

KA RADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Parafinle Gizli Isı Depolamada Depo Geometrisi Optimizasyonu Üzerine
DeneySEL Bir Çalışma

Makina Yük. Müh. Mithat AKGÜN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“Doktor”
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.03.2006
Tezin Savunma Tarihi : 22.05.2006

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Orhan AYDIN
Jüri Üyesi : Prof.Dr. Tuncay YILMAZ
Jüri Üyesi : Prof.Dr. Habip ASAN

Orhan Aydın
Tuncay Yılmaz
H. Asan

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT

Trabzon 2006

ÖNSÖZ

“Parafinle Gizli Isı Depolamada Depo Geometrisi Optimizasyonu Üzerine Deneysel Bir Çalışma” konulu bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora tezi olarak tamamlanmıştır.

Bu çalışmanın belirlenmesi ve gerçekleştirilmesinde bana her türlü desteği veren, bilimsel yaklaşımlarıyla yol gösteren ve tezin bu aşamaya gelmesinde en büyük katkıyı sağlayan değerli bilim insanı tez hocam Doç.Dr. Orhan AYDIN’a minnet ve şükranlarımı sunmayı çok zevkli bir görev sayarım. Ayrıca, bu çalışmamın yürütülmesi ve yönlendirilmesine sağladığı bilimsel katkılarından dolayı değerli hocam Prof. Dr. Kamil Kaygusuz’a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2001.112.3.2 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü birim yetkililerine şükranlarımı sunarım.

Tüm doktora çalışmam boyunca her an yanımda olan sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Genççağ PÜRÇEK ve ailesine, laboratuvar çalışmalarında bana yardımlarını esirgemeyen laboratuvar teknisyeni Kadir Aydemir’e ve Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda görev yapan tüm arkadaşlarıma bana olan desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Öte yandan, çalışmalarımın biteceği günü büyük bir sabır ve özveri ile bekleyen başta annem olmak üzere tüm aileme ve ayrıca çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen eşim Dr. Yasemin Akgün’e müteşekkirim. Bu çalışmayı, çalışmalarım sırasında babalarının eve dönmesini dört gözle bekleyen çocuklarım, Mehmet Kaan ve Ayşe Melek’e adıyorum.

Umuyorum ki bu çalışma, bu alandaki bir eksiği giderir, sevgili ülkeme ve milletime faydalı olur.

Mithat AKGÜN

Trabzon, 2006

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	XXII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XXIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 GİRİŞ	1
1.2.1. Mekanik Enerji Depolama	7
1.2.2. Kimyasal Enerji Depolama	11
1.2.3. Termal Enerji Depolama	14
1.2.4. Manyetik Depolama	14
1.3. Termal Enerji Depolama	15
1.3.1. Duyulur Isı Depolama	19
1.3.2. Gizli Isı Depolama	27
1.3.2.1. Sıvı-Buhar Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama	29
1.3.2.2. Katı-Katı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama.....	29
1.3.2.3. Katı-Sıvı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama.....	30
1.3.2.3.1. Katı-Sıvı Faz Değiştiren Maddeler ve Özellikleri.....	40
1.3.2.3.2. Katı-Sıvı Faz Geçişinde Gizli Isı Depolama Şekilleri ve Depolayıcılar	58
1.3.3. Termokimyasal Depolama	65
1.4. Literatür Araştırması	67
1.4.1. Kabuk İçerisinde Tüplü Isı Depolama	67
1.4.2. Farklı Geometrilere Isı Depolama.....	73
1.4.3. Depolama Sistemlerinin Termodinamik Analizi.....	79
1.4.4. Literatür Tablosu	84
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	89
2.1. Deneysel Çalışmalar.....	89
2.1.1. Deney Düzenegi	89

2.1.2.	Isı Depolama Ünitesi.....	95
2.1.3.	Termo Eleman Bağlantısı.....	101
2.1.4.	Sabit Sıcaklık Banyosu.....	108
2.1.5.	Sıcak Su Deposu.....	108
2.1.6.	Debimetre.....	109
2.1.7.	Veri Kaydedici (Datalogger).....	111
2.2.	Parafinlerin Özellikleri.....	113
2.3.	Kalibrasyon.....	117
2.3.1.	Termo elemanların Kalibrasyonu.....	117
2.3.2.	Debimetrenin Kalibrasyonu.....	118
2.4.	Yapılan Deneilerin Tablosu.....	120
2.5.	Depolama Sisteminin Termodinamik Analizi.....	127
2.6.	Belirsizlik Analizi.....	139
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	144
3.1.	Deponun Düşey Konumunda Erime ve Katılaşma.....	145
3.1.1.	Silindirik Depo (Kabuk açısı sıfır derece, $\theta = 0^\circ$).....	145
3.1.2.	Kabuğu Eğimli Depo (Kabuk açısı, $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$).....	164
3.2.	Deponun Yatay Konumunda Erime ve Katılaşma.....	233
3.2.1.	Silindirik Depo (Kabuk açısı, $\theta = 0^\circ$).....	233
3.2.2.	Kabuğu Eğimli Depo (Kabuk açısı, $\theta = 5^\circ$).....	246
3.3.	Deponun Yatayla Açılı Yerleştirilmesi Durumunda Erime ve Katılaşma.....	262
3.3.1.	Deponun Otuz Derece Yerleştirilmesi ($\theta = 30^\circ$).....	262
3.3.1.1.	Silindirik depo (Kabuk açısı, $\theta = 0^\circ$).....	262
3.3.1.2.	Depo Kabuk Açısı Beş Derece ($\theta = 5^\circ$).....	273
3.3.2.	Deponun Altmış Derece Yerleştirilmesi ($\theta = 60^\circ$).....	288
3.3.2.1.	Depo Kabuk Açısı Sıfır Derece ($\theta = 0^\circ$).....	288
3.3.2.2.	Depo Kabuk Açısı Beş Derece ($\theta = 5^\circ$).....	292
3.4.	Performans Analizi.....	306
3.4.1.	Sistemin Termodinamik Analizi.....	318
3.4.2.	Boyutsuz Sayılar Cinsinden Analiz.....	325
3.5.	Parafinin Erime ve Katılaşma Fotoğrafları.....	331
4.	SONUÇLAR.....	343
5.	ÖNERİLER.....	347

6. KAYNAKLAR.....	349
ÖZGEÇMİŞ	359

ÖZET

Enerji arz ve talebi arasındaki uyumsuzluk uygun bir enerji depolama sisteminin kullanımıyla giderilebilir. Termal enerjinin depolanması için üç ana yöntem vardır: duyu, gizli ve termokimyasal. Faz değıştiren maddeleri (FDM) kullanan gizli ısı depolama, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve ergime ve katılaşma esnasındaki izotermal çalışma karakteristikleri nedeniyle en etkin termal enerji depolama şeklidir.

Yükleme/boşaltma esnasında bir depo içerisindeki ısı geçişi daha iyi bir depolama performansı için iyileştirilmelidir. Bu iki şekilde gerçekleştirilebilir: aktif ve pasif. Aktif yöntem ekstra enerji kullanmayı gerektirirken pasif yöntem gerektirmez. Bu çalışmada, depo geometrisinin değıştirilmesine yönelik pasif bir yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemle faz değıştiren madde içerisinde doğal taşınımı kuvvetlendirmek, doldurma/boşaltma zamanını azaltmak ve deponun verimini artırmak hedeflenmiştir. Bir kabuk içerisinde bulunan tüp depo geometrisinde yeni bir değışiklik önerilmiştir. Önerilen geometride, deponun dış yüzeyi (dış kabuk) daha önce gözlenen erime ve katılaşma davranışına cevap verecek şekilde eğimlendirilmiştir. Faz değıştiren madde olarak üç farklı saf parafin kullanılmıştır. Öncelikle, diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) kullanılarak parafinlerin termofiziksel özellikleri belirlenmiştir. Düşey konumda beş farklı depo kabuk açısında çalışılmıştır: 0°, 5°, 10°, 15° ve 20°. Ayrıca, deponun farklı yerleştirme konumları da incelenmiştir: düşey, yatay ve yatayla 30° ve 60° konumlandırılması. Farklı geometrik konfigürasyonlarda, her bir parafin tipi için, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve debisinin erime/katılaşma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel ısı transfer akışkanı olarak su kullanılmıştır. Deneysel sonuçların doğruluğu için hata analizi yapılmıştır. Son olarak optimum depo geometrisi ve çalışma koşullarını belirlemek için bir termodinamik analiz yapılmıştır.

Dış kabuk eğim açısı parafinin erime süresini etkilemektedir. 5° kabuk açılı düşey deponun en kısa erime zamanına sahip olduğu, yatay depolamada ise en kısa erime zamanı silindirik depolamada olduğu görülmüştür. Yerleştirme açısının parafinin katılaşma süresine etkisinin ihmal edilir düzeyde olduğu belirlenmiştir

Anahtar Kelimeler: Termal enerji depolama, Deneysel, PCM, Parafin, Erime, Katılaşma, Tüp-kabuk geometri, Termodinamik analiz

SUMMARY

An Experimental Study on Optimization of the Storage Geometry in Latent Heat Storage Systems Using Paraffin

The discrepancy between energy supply or availability and demand can be overcome by the implementation of a proper energy storage system. There are three main methods for storing the thermal energy: sensible, latent and thermochemical. The latent heat storage employing phase change material (PCM) is the most effective way due to its advantages of high energy storage density and its isothermal operating characteristics during melting and solidification processes.

Heat transfer in a storage device during charging/discharging should be enhanced for a better performance. This can be realized in two ways: active and passive. The active method requires usage of extra energy while the passive one does not. In this study, a passive enhancement technique has been applied, which is based on the modification of the storage geometry, in order to intensify the natural convection currents inside the PCM, decrease the charge/discharge time and increase the efficiency of the storage container. A novel modification on a tube-in-shell type storage geometry is suggested. In the proposed geometry, the outer surface of the storage container, i.e. the shell, is inclined in order to respond the melting and solidification characteristics observed earlier. Three kinds of pure paraffin have been used. At first, the thermophysical properties of the paraffins used are determined through the differential scanning calorimeter (DSC). Five different inclination angles of the shell have been tested: 0° , 5° , 10° , 15° , and 20° . In addition, different positions of the storage container have also been examined: vertical, horizontal, and tilted to the horizontal axis with angles of 30° and 60° . At different geometrical configurations, for each paraffin type, the effects of the inlet temperature and the mass flow rate of the heat transfer fluid (here, water) on the melting/solidification behavior have been examined. In order to assess the validity of the experimental results, an uncertainty analysis has been conducted. Finally, a thermodynamic analysis has been performed in order to determine the optimum storage geometry and the working conditions.

Keywords: Thermal energy storage, experimental, PCM, paraffin, melting, solidification, tube-in-shell geometry, thermodynamic analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması	6
Şekil 1.2. Pompalanmış su depolama.....	9
Şekil 1.3. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri	10
Şekil 1.4. Bataryanın boşalma işlemi sırasındaki kimyasal reaksiyonlar	13
Şekil 1.5. Termal enerji depolama araştırma alanları.....	20
Şekil 1.6. Ortam ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi	23
Şekil 1.7. Ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sistemi	24
Şekil 1.8. Cam çatılı kaya dolgu duyulur ısı depolama evi.....	26
Şekil 1.9. İkili duyulur ısı depolama sistemleri.....	27
Şekil 1.10. Erimenin zamanla değişimi.....	34
Şekil 1.11. Taşınımın baskın olduğu erimedeki katı-sıvı ara yüzeyin gelişimi	35
Şekil 1.12. Erime safhalarının karşılaştırılması	35
Şekil 1.13. Erimenin iki safhasını ayıran ara yüzeyin gelişimi.....	36
Şekil 1.14. Tuz hidratlarda direk kontak gizli ısı depolama düzeneği	38
Şekil 1.15. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'nun katılaşması sırasında çekirdekleştiricinin aşırı soğumaya etkisi	39
Şekil 1.16. Kapsül içerisindeki suyun soğuma işlemi sırasındaki faz değişimi.....	39
Şekil 1.17. Isı depolama malzemelerinin sınıflandırılması	43
Şekil 1.18. Basit bir güneş enerjisinin FDM ile depolama sistemi	59
Şekil 1.19. Silindirik tekli parça gizli ısı depolama sistemi	60
Şekil 1.20. Arşimet spiral geometrisi ile tekli gizli ısı depolama sistemi	60
Şekil 1.21. Kanatçıklı gizli ısı depolama sistemi	61
Şekil 1.22. Silindirik çoklu termal enerji depolama sistemi	61
Şekil 1.23. Küresel kapsüllerle çoklu depolama sistemi	62

Şekil 1.24. FDM'nin termal depolama hızını ve kapasitesini artırmak için kurulan sistem	63
Şekil 1.25. Bal peteği geometrisi ile çoklu depolama	63
Şekil 1.26. Bina duvarlarında kullanılan doğrudan temaslı çoklu depolama	64
Şekil 1.27. Ardışık yerleştirilmiş çoklu FDM'li termal depolama.....	64
Şekil 1.28. Silindirik çoklu FDM'li gizli ısı depolama sistemi.....	64
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin şematik görünüşü	91
Şekil 2.2. Isı depolama tankının yatayla belirli bir açıda yerleştirilmesinin şematik görünüşü.....	92
Şekil 2.3. Deney düzeneğinin genel fotoğrafı	93
Şekil 2.4. 20° kabuk açılı deponun düşey pozisyonda sisteme bağlantı fotoğrafı	94
Şekil 2.5. Silindirik deponun yatay pozisyonda sisteme bağlantı fotoğrafı	94
Şekil 2.6. Isı depolama modülünün perspektif görünüşü	95
Şekil 2.7. Isı depolama tankının şematik görünüşü.....	96
Şekil 2.8. 0° kabuk açılı deponun resmi	98
Şekil 2.9. 5° kabuk açılı deponun resmi	99
Şekil 2.10. 10° kabuk açılı deponun resmi	99
Şekil 2.11. 15° kabuk açılı deponun resmi	100
Şekil 2.12. 20° kabuk açılı deponun resmi	100
Şekil 2.13. Termo elemanın basit bağlantı şeması	102
Şekil 2.14. 0° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması	103
Şekil 2.15. 5° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması	104
Şekil 2.16. 10° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması	105
Şekil 2.17. 15°' lik kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması	106
Şekil 2.18. 20° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması	107
Şekil 2.19. Sabit sıcaklık banyosu.....	108
Şekil 2.20. Sıcak su deposu.....	109

Şekil 2.21. Debimetrenin şematik kesiti.....	110
Şekil 2.22. Ölçülen sıcaklıkların bilgisayar ekranına aktarılması.....	112
Şekil 2.23. Veri kartı ve termo elemanların bağlantısı.....	112
Şekil 2.24. Parafinlerin DSC analizleri.....	114
Şekil 2.25. Parafinlerin resimleri.....	116
Şekil 2.26. Termo eleman kalibrasyon deney düzeneği.....	118
Şekil 2.27. Debimetre kalibrasyon deney düzeneği.....	119
Şekil 2.28. Depolama sistemi için termodinamik sistem tanımı.....	128
Şekil 2.29. Isı depolama sisteminin çalışma prensibi.....	128
Şekil 2.30. Isı transfer akışkanından FDM'ye ısı geçişi modeli.....	129
Şekil 2.31. Bir gizli ısı depolama sisteminde yükleme sırasında sıcaklık değişimi.....	134
Şekil 2.32. FDM'nin ısıtma işleminde tersinir olmayan kaynaklar.....	136
Şekil 3.1. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yönde sıcaklık- zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 70^\circ\text{C}, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	149
Şekil 3.2. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 70^\circ\text{C}, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	151
Şekil 3.3. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 70^\circ\text{C}, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	152
Şekil 3.4. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 70^\circ\text{C}, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	153
Şekil 3.5. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	154
Şekil 3.6. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 85^\circ\text{C}$).....	155
Şekil 3.7. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ, T_g = 20^\circ\text{C}, \dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	156

Şekil 3.8. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	158
Şekil 3.9. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	159
Şekil 3.10. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 4\text{ kg/dk}$).....	160
Şekil 3.11. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	161
Şekil 3.12. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)	162
Şekil 3.13. Parafinin (P1) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)	163
Şekil 3.14. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	168
Şekil 3.15. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	170
Şekil 3.16. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	171
Şekil 3.17. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	172
Şekil 3.18. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $m = 4\text{ kg/dk}$).....	173
Şekil 3.19. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)	174
Şekil 3.20. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	175
Şekil 3.21. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	177

Şekil 3.22. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	178
Şekil 3.23. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	179
Şekil 3.24. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)	180
Şekil 3.25. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 4\text{ kg/dk}$).....	181
Şekil 3.26. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)	182
Şekil 3.27. Parafinin (P2) Katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)	183
Şekil 3.28. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 4\text{ kg/dk}$).....	184
Şekil 3.29. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)	185
Şekil 3.30. Parafinin (P1) Katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)	186
Şekil 3.31. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	187
Şekil 3.32. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	188
Şekil 3.33. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	189
Şekil 3.34. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	190
Şekil 3.35. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	191

Şekil 3.36. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$)	192
Şekil 3.37. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	193
Şekil 3.38. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	194
Şekil 3.39. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağı sıcaklık-aksel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	195
Şekil 3.40. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksel mesafelerde, zamana bağı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	196
Şekil 3.41. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)	197
Şekil 3.42. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	198
Şekil 3.43. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$)	199
Şekil 3.44. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	200
Şekil 3.45. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$)	201
Şekil 3.46. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	202
Şekil 3.47. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	203
Şekil 3.48. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağı sıcaklık-aksel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	204
Şekil 3.49. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, zamana bağı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	205

Şekil 3.50. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $m = 8$ kg/dk).....	206
Şekil 3.51. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$)	207
Şekil 3.52. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk).....	208
Şekil 3.53. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)	209
Şekil 3.54. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-aksel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)	210
Şekil 3.55. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)	211
Şekil 3.56. Parafinin (P3) Katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	212
Şekil 3.57. Parafinin (P2) ergimede, suyun giriş sıcaklığına bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $m = 8$ kg/dk).....	213
Şekil 3.58. Parafinin (P2) erimede, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$).....	214
Şekil 3.59. Parafinin (P2) Katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	215
Şekil 3.60. Parafinin (P1) ergimede, suyun giriş sıcaklığına bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $m = 8$ kg/dk).....	216
Şekil 3.61. Parafinin (P1) erimede, suyun kütleli debisine bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 65^\circ\text{C}$).....	217
Şekil 3.62. Parafinin (P1) Katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	218
Şekil 3.63. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)	219

Şekil 3.64. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)	220
Şekil 3.65. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)	221
Şekil 3.66. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)	222
Şekil 3.67. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)	223
Şekil 3.68. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\dot{m} = 6\text{ kg/dk}$).....	224
Şekil 3.69. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$).....	225
Şekil 3.70. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 7\text{ kg/dk}$).....	226
Şekil 3.71. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 7\text{ kg/dk}$)	227
Şekil 3.72. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 7\text{ kg/dk}$)	228
Şekil 3.73. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$,	229
Şekil 3.74. Parafinin (P3) Katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	230
Şekil 3.75. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\dot{m} = 6\text{ kg/dk}$).....	231
Şekil 3.76. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $\dot{m} = 4\text{ kg/dk}$).....	232
Şekil 3.77. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\emptyset = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)	235

Şekil 3.78. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	237
Şekil 3.79. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	238
Şekil 3.80. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	239
Şekil 3.81. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	240
Şekil 3.82. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 4\text{ kg/dk}$).....	241
Şekil 3.83. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 4\text{ kg/dk}$).....	243
Şekil 3.84. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 4\text{ kg/dk}$).....	244
Şekil 3.85. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 4\text{ kg/dk}$).....	245
Şekil 3.86. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	249
Şekil 3.87. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	251
Şekil 3.88. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	252
Şekil 3.89. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	253
Şekil 3.90. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	254
Şekil 3.91. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$).....	255

Şekil 3.92. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	256
Şekil 3.93. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	258
Şekil 3.94. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-aksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	259
Şekil 3.95. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	260
Şekil 3.96. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	261
Şekil 3.97. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	264
Şekil 3.98. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	266
Şekil 3.99. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-aksenel mesafe grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	267
Şekil 3.100. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	268
Şekil 3.101. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	269
Şekil 3.102. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	270
Şekil 3.103. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	272
Şekil 3.104. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	275
Şekil 3.105. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\phi = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$).....	277

Şekil 3.106. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	278
Şekil 3.107. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	279
Şekil 3.108. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	280
Şekil 3.109. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütsel debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$).....	281
Şekil 3.110. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	282
Şekil 3.111. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	284
Şekil 3.112. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	285
Şekil 3.113. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	286
Şekil 3.114. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütsel debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	287
Şekil 3.115. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 5^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	289
Şekil 3.116. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	291
Şekil 3.117. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık- zaman grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	293
Şekil 3.118. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	295
Şekil 3.119. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	296

Şekil 3.120. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	297
Şekil 3.121. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	298
Şekil 3.122. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$).....	299
Şekil 3.123. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	300
Şekil 3.124. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	302
Şekil 3.125. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- aksenel mesafe grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	303
Şekil 3.126. Parafinin (P3) Katılaşmada belirli aksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	304
Şekil 3.127. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$).....	305
Şekil 3.128. Erimede işleminde, parafin P3'ün depo kabuk açısına bağlı sıcaklık-zaman grafığı ($\theta = 90^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	311
Şekil 3.129. Silindirik ve 5° kabuk açılı deponun farklı noktalarında parafinin erime davranışının karşılaştırılması ($\theta = 90^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	312
Şekil 3.130. Depo kabuk açısı-erime zamanı grafığı.....	313
Şekil 3.131. Erimede işleminde, parafin P3'ün depo yerleştirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık zaman grafığı ($\theta = 0^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	313
Şekil 3.132. Erimede işleminde, parafin P3'ün depo yerleştirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık zaman grafığı ($\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	315
Şekil 3.133. Deponun yerleştirme açısına bağlı olarak P3'ün Katılaşmada sıcaklık-zaman değişimi ($\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	316

Şekil 3.134. Deponun farklı yerleştirme açılarına bağlı olarak P3'ün Katılaşmada sıcaklık-zaman değişimi ($\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$).....	317
Şekil 3.135. Erime işleminde kabuk açısının verim üzerindeki etkisi	320
Şekil 3.136. Erime işleminde depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi	321
Şekil 3.137. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının verim üzerindeki etkisi	321
Şekil 3.138. Erime işleminde depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi	322
Şekil 3.139. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının verim üzerindeki etkisi	322
Şekil 3.140. Erime işleminde depo yerleştirme açısının boyutsuz entropi üretimi üzerindeki etkisi	323
Şekil 3.141. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının boyutsuz entropi üretimi üzerindeki etkisi	323
Şekil 3.142. Parafinin (P1) erimede, deponun farklı kabuk açılarına bağlı olarak ısı geçiş-zaman grafiği ($\theta = 90^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	324
Şekil 3.143. Parafinin (P3) erimede, deponun farklı kabuk açılarına bağlı olarak ısı geçiş-zaman grafiği ($\theta = 90^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	324
Şekil 3.144. Parafinin (P1) erimede, deponun akışkanın giriş sıcaklığına bağlı olarak ısı geçiş-zaman grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	325
Şekil 3.144. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P1'in erime işleminde Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 75^\circ\text{C}$, b. $T_g = 70^\circ\text{C}$ ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	326
Şekil 3.145. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P1'in erime işleminde Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, a. $m = 4\text{ kg/dk}$, b. $m = 8\text{ kg/dk}$)	327
Şekil 3.146. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P2'in erime işleminde Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 70^\circ\text{C}$, b. $T_g = 60^\circ\text{C}$ ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$)	328
Şekil 3.147. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P2'in erime işleminde Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, a. $m = 4\text{ kg/dk}$, b. $m = 8\text{ kg/dk}$)	329

- Şekil 3.148. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P3'ün erime işleminde Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 85\text{ }^\circ\text{C}$, b. $T_g = 75\text{ }^\circ\text{C}$ ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8\text{ kg/dk}$) 330
- Şekil 3.149. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P3'ün erime işleminde Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, a. $m = 4\text{ kg/dk}$, b. $m = 8\text{ kg/dk}$) 331
- Şekil 3.150. 5° kabuk açılı depo içerisinde donmuş parafinin erime başlangıcında fotoğrafı 332
- Şekil 3.151. Parafin P3'ün zamana bağlı erime fotoğrafları ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85\text{ }^\circ\text{C}$ ve $m = 8\text{ kg/dk}$) 333
- Şekil 3.152. Parafin P3'ün zamana bağlı Katılaşma fotoğrafları ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ve $m = 8\text{ kg/dk}$) 338
- Şekil 3.153. Deponun yatayla 30° açı yapacak şekilde yerleştirilmesi durumunda parafin P3'ün Katılaşma fotoğrafı ($\theta = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ve $m = 8\text{ kg/dk}$).. 341
- Şekil 3.154. 5° kabuk açılı deponun yerleştirme açısına bağlı olarak oluşan genişleme boşluğunun yeri 342

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Sıvı ortamda duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri	22
Tablo 1.2. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler	25
Tablo 1.3. Duyulur ısı depolama ortamlarının karşılaştırılması.....	27
Tablo 1.4. Isı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırması... 43	
Tablo 1.5. Organik FDM' lerin listesi.....	44
Tablo 1.6. İnorganik FDM'lerin listesi	46
Tablo 1.7. Parafinlerin erime gizli ısıları ve erime sıcaklıkları.....	47
Tablo 1.8. Parafin olmayanların erime gizli ısı ve erime noktası.....	49
Tablo 1.9. Yağ asitlerinin erime gizli ısı ve erime noktaları	51
Tablo 1.10. Tuz hidratların erime gizli ısı ve erime noktası.....	53
Tablo 1.11. Organik ve inorganiklerin (ötektik) listesi.....	56
Tablo 1.12. Bazı seçilmiş katı-katı FDM'lerin erime gizli ısı ve erime noktaları.....	57
Tablo 1.13. FDM'den termal depolamada istenen önemli özelliklerinin karşılaştırması. .	58
Tablo 1.14. Katı bileşenleri içermeyen TKD reaksiyonları	66
Tablo 1.15. Literatür özetinin kısaltılmış incelenmesi.....	84
Tablo 2.1. Isı depolama tankının kabuk açısına göre boyutları	97
Tablo 2.2. Parafinin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi.....	113
Tablo 2.3. Kullanılan parafinlerin termofiziksel özellikleri.....	114
Tablo 2.4. Düşey konumda, 0° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	120
Tablo 2.5. Düşey konumda, 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	121
Tablo 2.6. Düşey konumda, 10° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	122
Tablo 2.7. Düşey konumda, 15° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	123
Tablo 2.8. Düşey konumda, 20° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	124
Tablo 2.9. Düşey konumda yapılan Katılaşma deneyleri.....	125
Tablo 2.10. Yatay konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri.....	126
Tablo 2.11. Yatay konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan katılaşma deneyleri....	126
Tablo 2.12. Yatayla 30° ve 60° konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri	126

Tablo 2.13. Yatayla 30° ve 60° konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan katılaşma deneyleri.....	127
Tablo 2.14. Belirsizlik analizi sonuçları.....	143

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Isı transfer alanı (m ²)
A_t	: Topacın sıvı akımına etki eden büyük kesit alanı (m ²)
ADC	: Analog dijital dönüştürücü
c	: Özgül ısı (kJ/kg.K)
C_1	: Ölçme sabiti
C_D	: İtme katsayısı
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg.K)
c_v	: Sabit hacimde özgül ısı (kJ/kg.K)
d	: Çap (mm)
DED	: Duyulur enerji depolama
DSC	: Diferansiyel tarama kalorimetresi (Differential Scanning Calorimetry)
E	: Gerilim (mvolt)
Emk	: Elektro motor kuvvet
E_x	: Ekserji (kullanılabilirlik) (kJ)
EDS	: Enerji depolama sistemleri
F_d	: Sıvının direnci (N)
FDM	: Faz değıştiren madde
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	: Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)
h_{ks}	: Erime gizli ısısı (kJ/kg)
L	: Uzunluk (m)
LMTD	: Logaritmik sıcaklık farkı
m	: Kütle (kg)
\dot{m}_s	: Kütleli debi (kg/s)
N_s	: Boyutsuz entropi üretimi
NTU : N	: Geçiş birim sayısı (the number of transfer unit)
Ø	: Depo yerleşirme açısı
P1	: Parafin 42-44
P2	: Parafin 42-44
P3	: Parafin 42-44

Pt 100	: Sıcaklık ölçer
Q	: Isı geçişi, FDM'nin depoladığı ısı (kJ)
R	: Bağımsız değişken fonksiyonu
r	: Radyal yön
Re	: Reynolds sayısı
Ste	: Stefan sayısı
\dot{S}_{gen}	: Üretilen toplam entropi (kW/K)
\bar{T}	: Boyutsuz sıcaklık
T	: Sıcaklık (°C, K)
ΔT	: Sıcaklık değişimi (K)
ΔT_{lm}	: Logaritmik ortalama sıcak
t	: Zaman (s)
TA	: Isıl analiz (Thermal analysis)
TED	: Termal enerji depolama
U	: Sıcak akışkanla sıvı FDM arasındaki toplam ısı transfer katsayısı (kJ/kg.m ² .K)
U _m	: Topaç ile silindir arasındaki akımın ortalama hızı (m/s)
V	: Hacim (m ³)
V _t	: Topacın hacmi (m ³)
w	: Belirsizlik
W	: İş (kJ)
\dot{W}_{max}	: Maksimum güç (kW)
X	: Kullanılabilirlik (kJ)
X _{ITA}	: Isı transfer akışkanının kullanılabilirliği (kJ)
X _{FDM}	: Faz değiştiren maddenin kullanılabilirliği (kJ)
\bar{X}	: Ortalama erimiş bölge kalınlığı (m)
x	: Bağımsız değişken
y	: Yükselme miktarı (m)
z	: Eksenel yön
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_t	: Topacın yoğunluğu (kg/m ³)

η	: Verim
η_I	: I. kanun verimi
η_{II}	: II. kanun verimi
μ	: Dinamik vizkozite (kgm/s)
θ	: Depo kabuk açısı
θ	: Boyutsuz sıcaklık
ϕ	: Sistemin ekserjisi (kJ)
ϕ_{max}	: Sistemin maksimum ekserjisi (kJ)

Alt indis

1, i	: Başlangıç
2	: Bitiş
ç	: Çıkış
g	: Giriş
k	: Katı
m	: Erime
o	: Çevre
opt	: Optimum
r	: Referans
s	: Sıvı
T	: Toplam

1. GENEL BİLGİLER

1.1 GİRİŞ

Enerji ilk çağlardan itibaren giderek artan bir oranda insan yaşamına girmiş ve vazgeçilemez bir hal almıştır. İnsanların daha rahat yaşama istekleri ve artan sanayileşme ile beraber mevcut enerji kaynakları hızla tükenmekte ve alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, yeni alternatif enerji kaynakları konusundaki araştırmalar son zamanlarda hızlanmıştır. Diğer taraftan kullanılan fosil yakıtların çevreyi kirletmesi, bilim adamlarını ve mühendisleri temiz, güvenilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması için çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Üçüncü bin yıla girerken, sürdürülebilir kalkınma mantığı içinde iklim değişikliklerini göz önüne alan enerji üretim planlamaları, dünyanın hem politik hem de teknolojik gündeminde birinci sıraya oturmuştur. Küreselleşmeyle birlikte, kısa ve uzun vadede güvenilir kaynaklardan enerjiyi sağlama anlayışı dünyanın en önemli konularından biri haline gelmiştir. Dünyada özellikle gelişmekte olan ülkelerde ve ülkemizde hızlı nüfus artışı ve sanayileşme, enerjiye olan talebi de hızlı bir şekilde artırmaktadır.

Artan enerji ihtiyacı ve fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle, son yıllarda yapılan çalışmaların çoğu yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgar, jeotermal enerji v.s) yanı sıra yüzey veya yer altı suları, sanayideki atık ısının değerlendirilmesi ve elektrik enerjisinin ısı depolanması konularına yönelmiştir. Isıl enerji depolama sistemlerinin verimlerinin artırılması ve maliyetlerinin düşürülmesi yönündeki gelişmeler, en az yeni enerji kaynaklarının geliştirilmesi kadar önemlidir. Isı enerjisi, uzun süreli (mevsimlik) ve kısa süreli (haftalık) depolanabilir. Bu kapsamda ısı enerjisi depolama, ısıtma, soğutma veya her iki amaçlı olarak yapılabilir. Diğer taraftan enerjinin depolanması, tüketilen fosil yakıtlardan tasarruf sağlayacağından, yanma emisyonlarının ortaya çıkaracağı kirliliği de azaltacaktır.

Genel olarak ısı enerjisi üç şekilde depolanabilmektedir: termokimyasal, duyulur ve gizli ısı depolama. Faz değiştiren maddelerle (FDM) gizli ısı şeklinde enerjinin depolanması, diğer ısı depolama yöntemlerine göre daha ekonomik, daha büyük miktardaki ısının sabit sıcaklıkta daha uzun süreli depolanmasına imkân vermektedir. Termal enerji, doldurma esnasında ısı transfer akışkanından FDM'ye ve boşaltma esnasında FDM'den ısı

transfer akışkanına aktarılmaktadır. Termal enerjinin FDM'ye depolanması veya tekrar geriye alınmasında depolama sisteminin ısı performansının bilinmesi yanında depolama süresinin de bilinmesi çok önemlidir. Örneğin; güneş enerjisinin yoğun olduğu saatlerde ısı depolanması kısa sürede gerçekleştirilmesi gereken bir problemdir. Termal depolama için kullanılan ısı kaynaklarının var olma süresinin kısalığı yüzünden katı-sıvı faz geçişi ile ısı depolama sistemleri için zaman çok önemlidir. Parafinlerin erime süresini azaltmak ve dolayısıyla kısa sürede aynı enerjiyi doldurmak veya boşaltmak için ısı transfer akışkanı ve faz değiştiren madde arasında olan ısı geçişinin artırılması gerekir. Bu ise aktif ve pasif olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Aktif yöntem, ısı transfer akışkan sıcaklığı veya debisinin artırılması (ki bu depolanacak enerji kaynağının potansiyeli ile sınırlıdır) veya erimiş FDM'nin bir karıştırıcı ile karıştırılması ile ısı taşınım katsayısının artırılarak erimiş FDM'den katı matris formundaki FDM'ye taşınımı olan ısı geçişinin artırılması gibi ek enerji ilaveleri gerektirir. Pasif yöntemde ise, ek bir enerji ilavesi olmaksızın geometrik düzenlemelerle erimedeki sıcak ısı transfer akışkanından FDM'ye, katılaşmada ise erimiş FDM'den soğuk ısı transfer akışkanına olan ısı geçişi artırılır. Bu nedenle ısı depolama süresinin kısaltılması yönündeki çalışmalar; FDM seçimi, ısı depolama tank modellemesi ve ısı transfer şartlarının iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

Termal enerji depolama; maddenin fazlarının (katı, sıvı ve gaz) bir fazdan diğer faza veya aynı faz içerisinde sıcaklıklarının artışı ve azalması sırasında depolayabildikleri yada terk ettikleri ısıdır. Ancak; maddenin katı, katı/sıvı ve sıvı fazları arasındaki geçişlerinden termal enerji depolama yanında teknolojinin büyük bir bölümünde çok sık karşılaşılmaktadır. Örnek olarak; metal ve camların dökümünde, kristal büyümesinde, gıda maddelerinin korunmasında, dondurarak kurutma ve biyolojik hücrelerin dondurarak korunması verilebilir. Katı-sıvı faz geçişi sırasındaki ısı transfer işlemlerini önceden belirlemek ürün kalite kontrolünde, ısı depolama miktarlarının belirlenmesinde ve ilgili uygun ekipman dizaynında oldukça önemlidir. Bu nedenle, konu hakkında yapılan deneysel ve analitik çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır.

Isı depolama tanklarının ısı verimlerini artırmak, ısı depolama süresini en aza indirmek için literatürde çeşitli yöntemler denenmiştir. Bir kısım araştırmacılar silindirik ve küp depolarla çalışırken, bir kısım araştırmacılar çoklu depolamayı, diğer bir kısmı da farklı ergime sıcaklıklı FDM 'leri art arda sıralı olarak çalışmışlardır. Depo geometrilerinin genelde, düşey veya yatay olmak üzere iki konumu çalışılmıştır (Ettouney vd., 2004; Liu.vd., 2004 (a); Inaba ve Morita, 1995)

. Bu çalışmada; silindirik ısı depolayıcılarda FDM'nin doğal taşınımı etkisini iyileştirmek, depolama süresini azaltmak ve silindirik depolayıcıların verimini artırmak amacıyla depo geometrisinde değişikliğe dayanan pasif bir yöntem uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan depo, düşey silindirik bir boru ve etrafındaki kabuk arasındaki halka aralık hacminden oluşmaktadır. Yeni geometri aşağıda da bahsedildiği üzere esasen maddenin erime davranışını esas almaktadır. Literatürde verilen erime açılarına bağlı olarak, depolama süresini kısaltmak ve depolama sisteminin performansını artırmak için bu çalışmada, silindirik depoların alt tabanı daraltılırken, üst tavanı belirli bir açı (5° , 10° , 15° , 20°) ile genişletilmiştir. Isı depolama malzemesi olarak da farklı ergime sıcaklıklarına sahip 3 tip saf parafin kullanılmış ve her bir parafin için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Ayrıca, deponun farklı yerleştirme açısının parafinin erime veya katılaşma davranışı üzerindeki etkisini görmek için depo yatayla farklı açılarda (0° , 30° , 60° ve 90°) konumlandırılmıştır.

Parafinler ve özelliklede parafin wax çok fazla kullanılan ticari enerji depolayıcı maddedir. Parafinler ticari olarak kolayca bulunabilen, ucuz, kimyasal olarak kararlı, yüksek gizli ısı kapasitesi ve geniş erime aralığına sahip kimyasal maddelerdir.

Kurulan termal enerji depolama sisteminin, termal performansını belirlemek için sistemin I. kanun ve II. kanun analizleri yapılmış ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Depolama sisteminin termal davranışı boyutsuz sayılar (Reynolds ve Stefan sayıları) cinsinden de ele alınmıştır.

1.2. Enerji Depolama

Mevcut enerjiyi daha sonra kullanılmak üzere farklı bir enerji türüne dönüştürme ve ihtiyaç olduğunda da depolanan enerjinin kullanımını içeren sürece enerji depolama (ED) denir. ED, enerjinin faydalarını geliştirme ve ekonomik olarak kullanımında önemli bir rol oynar. ED, son yıllarda artan enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında modern teknoloji üzerinde önemli etkiye sahiptir. Özellikle, birkaç saatlik depolama zaman dilimini kapsayan ve sürekli olmayan enerjinin depolanmasındaki gelişmeler, enerji depolamayı kritik bir öneme sahip hale getirmiştir. Enerji depolama sistemleri (EDS), toplumsal ihtiyaçları daha verimli bir şekilde karşılamak, sanayide atık enerjiden faydalanmak, bina ısıtma soğutmada çevre açısından tehlikesiz enerji kullanımını sağlamak, tarım sektörünün sabit ısı talebini karşılamak ve uzay mekiği gücü gibi çeşitli faydalı uygulamalara önemli ölçüde katkıda bulunabilir. Enerji ihtiyacı ve karşılanması arasındaki muhtemel farkı karşılamamanın en ekonomik yöntemlerinden biri enerji depolamadır. EDS'nin kullanımı aşağıda verilen önemli faydaları sağlar (Dinçer ve Rosen, 2002):

- 1) Enerji giderlerinin azaltılması,
- 2) Enerji tüketiminin azaltılması,
- 3) Kapalı alanlarda daha temiz bir hava sağlanması,
- 4) İşlem kolaylığının artması,
- 5) Tesis kurma ve işletme maliyetlerinin düşmesi,
- 6) Kullanılan ekipman boyutlarının azalması; daha verimli ve daha etkin ekipmanlar,
- 7) Fosil yakıtların tüketiminin azaltılması,
- 8) Hava kirliliğinin azalması,
- 9) Atık enerji israfının önlenmesi,
- 10) Süreksiz doğal enerji kaynaklarından maksimum faydalanmak.

Termal veya elektriksel güç ihtiyacı zamana bağlı olarak değişir. Ayrıca, ihtiyaç olan enerjinin güneş ve rüzgâr enerjisi gibi bazı termal ve elektriksel enerji kaynaklarından sağlanması düzenli değildir. Arz ve talebin büyük oranda değişken olduğu durumlarda önceden yeterince depolanan enerji maksimum ihtiyaç olduğu durumlarda sisteme verilir. Ancak, bu sistemler büyük oranda yatırım gerektirmektedir. Buna karşın, yatırım maliyetleri düzenli güç ihtiyacı oluşturularak veya enerji depolama sistemlerinin küçük güç üretimine izin verecek şekilde kullanılmasıyla azaltılabilir. Nispeten küçük sistemler

tüketim gücü az olan zamanlarda fazlalık enerjii depolayarak fazla talep olduğu zamanlarda maksimum kapasitede çalışabilirler. Bir miktar enerjinin depolama sırasında kaybolmasına rağmen, enerji depolama işlemi enerji kaynaklarının verimli kullanılmasında gittikçe artan öneme sahiptir. Bazı durumlarda, enerji depolama sistemleri mevcut atık ısıyı farklı amaçlarda kullanabilir. Özellikle güneş enerjisinin konut ve işyerlerinde ısıtma ve soğutma amaçlı giderek artan kullanımıyla geleneksel kaynaklar üzerine aşırı talep azalacaktır (Kaygusuz, 1992).

Ticari, endüstriyel, evsel sektörlerdeki enerji ihtiyacı, günlük, haftalık ve mevsimlik değişir. Bu talepler, değişik enerji dönüşüm sistemleri tarafından karşılanır. En yüksek enerji ihtiyacı olan saatler aynı zamanda enerjinin en zor ve en pahalı olarak elde edildiği saatlerdir. Elektrik ihtiyacının en fazla olduğu dönemlerde gerekli olan ilave enerji, pahalı ve az bulunur nitelikte olan gaz türbinleri veya petrol ile çalışan jeneratörler tarafından karşılanır. Enerji depolama, enerji ihtiyacının maksimum olduğu dönemlerde alternatif enerji sağlama yöntemleri olarak ortaya çıkar. Enerji depolama sistemleri; güneş, rüzgâr, hidrolik enerji gibi doğal kaynaklarından üretilen enerjiden etkin bir şekilde yararlanılmasını sağlar.

Doğal enerji kaynaklarının sonradan kullanımı veya enerji ihtiyacının az olduğu dönemlerde fazlalık enerjinin, ihtiyacın maksimum olduğu dönemlerde kullanılması için çok farklı enerji depolama yöntemleri ve bu yöntemlere dayalı olarak da çok değişik depolama sistemleri kullanılmaktadır (Garg vd., 1985).

Mekanik ve hidrolik enerji depolama sistemleri, genellikle elektrik enerjisini sıkıştırma, yükseltme ve döndürme enerjisine çevirmek suretiyle depolar. Pompalanmış suda enerji depolama ile birlikte sıkıştırılmış hava şeklinde enerji depolanabilmekte ve bu yöntemler üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Alternatif olarak enerji kimyasal olarak da depolanabilir. Döndürme enerjisi volan içerisinde depolanabilir; fakat bunun için depolama hacmi ve maliyeti azaltacak yüksek dayanımlı malzemelerin kullanıldığı gelişmiş tasarımlara ihtiyaç duyulur. Mekanik ve hidrolik sistemlerde meydana gelen verimsizlik nedeniyle %50'ye varan bir oranda enerji kaybı meydana gelebilir (Dinçer ve Rosen, 2002).

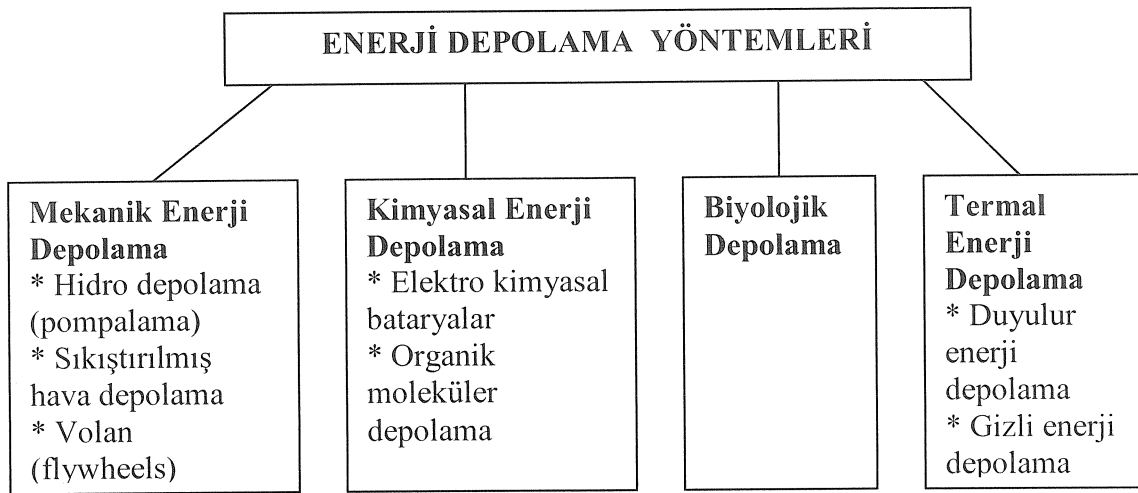
Termal enerji depolama sistemleri değişik tiplerde dizayn edilmiş olup, ana parametre enerjinin depolama yöntemidir. Yeraltı gölleri, tuğla ve dökme demirlerin sıcaklığının artırılması ile duyulur ısı olarak termal enerji depolanırken, tuz ve parafinler gibi malzemelerin faz değişimi sırasında termal enerji gizli ısı olarak depolanır. Duyulur ısı

depolamaya göre gizli ısı depolamada, depolama hacimleri yüz katına kadar azalabilir. Ayrıca; iki yönlü kimyasal reaksiyonla da termal enerji depolanır. Böylece düşük sıcaklıktaki ısı kimyasal enerji şeklinde depolanır. Fakat bunların pratik olarak uygulanması tam olarak gerçekleştirilememiştir. Aynı kategoriye giren bir diğer düşünce ise metal hibritler içerisinde hidrojen depolanmasıdır (Zhang, 2001).

Elektrokimyasal enerji depolama sistemleri daha iyi verimliliğe sahiptir. Fakat maliyetleri de yüksektir. Pillerin depolama kapasite oranlarının artırılmasına yönelik yoğun araştırma çalışmaları devam etmektedir. Buna yönelik çalışmalar daha çok ağırlık/depolama kapasitesi oranının düşürülmesi yönündedir. Bu da hareketli araçlarda önemli bir parametredir (Kılıkış ve Kakaç, 1989).

Yeni teknolojilerin depolamada kullanılması ile gelişmiş depolama üniteleri kurulmakta ve böylece sistemler daha verimli ve etkin olarak çalıştırılmaktadır. Enerji depolama tekniklerinin çeşitlendirilmesi, iyileştirilmesi ve geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar devam etmektedir. Örneğin, güneş enerjisi depolama teknolojilerindeki çalışmalar geleneksel depolama yanında yeni depolama teknikleri, elektrikle çalışan otomobillerin geliştirilmesindeki ilerlemeleri hızlandırmıştır.

Enerji depolama sistemleri; depolamanın nasıl yapılacağı, depolama kapasitesi, depolanacak enerji türü ve depolama süresine göre sınıflandırılabilir. Bu teknikler, enerji depolama tiplerine göre gruplara ayrılıp incelenebilir. Bu çalışmada seçilen sınıflandırma yönteminde; enerjinin depolama biçimi esas alınmıştır. Şekil 1.1., bu yaklaşıma göre mekanik, termal, biyolojik ve kimyasal olarak farklı depolama şekillerini göstermektedir.



Şekil 1.1. Enerji depolama yöntemlerinin sınıflandırılması (Dinçer ve Rosen, 2002).

1.2.1. Mekanik Enerji Depolama

Mekanik enerji depolama, büyük miktardaki enerjinin kısa veya uzun süreli depolanmasına imkan verir. Mekanik enerji; doğrusal veya dönel hareketin kinetik enerjisi, belirli bir yükseklikteki cismin potansiyel enerjisi, elastik malzemelerin gerilme veya sıkışma enerjisi ve gazların içerisine depolanan sıkıştırma enerjisi olarak depolanabilir. Büyük miktarlardaki enerjinin doğrusal hareket olarak depolanması zordur. Mekanik enerji; pompalanmış suda depolama (pompa depolaması), sıkıştırılmış hava depolama ve volan depolama ile üç tip olarak sınıflandırılabilir.

a. Pompalanmış suda depolama

Su depolama çok basit bir enerji depolama yöntemidir. Günün enerji ihtiyacının az olduğu gece döneminde, nehirden veya gölden alınan su yüksek bir yere pompalanır ve enerji ihtiyacının yüksek olduğu gündüz boyunca depolanmış su tepeden aşağı doğru akıtılır. Hızlı akan su türbini çevirerek elektrik üretir. Nehrin suyunu yukarı basan pompalar gün boyunca güneş enerjisi ile de çalıştırılabilir. Depolanmış su tersinir çevrimin verimi %50 civarındadır. Suyun tepeye pompalanmasında %30 enerji kaybedilir su aşağıya düşerken ise %20 enerji daha kaybedilir. Bu yöntemle enerji ihtiyacının olduğu anlarda, sistem çok hızlı devreye girer ve elektrik arzı kısa sürede karşılanır (Dinçer ve Rosen, 2002).

Şekil 1.2.'de verilen bu depolama tipinde pompa-türbin tektir. Suyun yukarıya basılmasında kullanılan pompa, aşağı basılmasında türbin olarak görev yapar. Su depolama ekonomik bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yakın gelecekte yeni pahalı depolama sistemlerinin inşasında en iyi alternatif hidroelektrik santraller gibi mevcut depolama sistemlerinin kullanılmasıdır. Pompalanmış depolama tesisleri bir depolama çiftinden oluşur. Üst bölüm aşağıdan yukarıya depolanmış su ile alt kısım ise enerjisi boşalmış su ile doludur. Su depolama, güneş enerjisi depolama için daha idealdir. Güneş enerji tesisinde gündüz maksimum oranda üretilen güç ile su yukarıya pompalanır ve gece boyunca bu enerjiden faydalanılır. Pompalanmış su depolama çevresel etkilerden dolayı (çok geniş hacimli tesislerin olması nedeniyle) çok fazla uygulama alanı bulamamıştır.

Yeraltı su depolama sistemi ise halen planlama aşamasındadır. Yüzeysel depolama sistemleri ile yeraltı depolama sistemi birlikte kullanılabilir. Yüzeysel depo mevcut su kütlesi veya yapay bir göl şeklinde olabilir. Yeraltında açılacak depo; sert, kalın ve stabil kayalık olmalı, volkanik kayalar ve yüksek sismik bölgelerle fay alanları olmamalıdır.

Nükleer santrallerde kullanılan yakıt maliyetleri fosil esaslı yakıtlarla çalışan elektrik santrallerinin yakıt maliyetlerinden çok daha düşüktür. Kısa sürelerde nükleer güç santrallerinden elde edilen üretimin hızlı bir şekilde değiştirilmesi zor olduğu için elektrige ihtiyacın az olduğu dönemlerde fazlalık elektrik enerjisi pompalanmış depolama istasyonlarının esas pompalama güç ihtiyaçlarını karşılar. Kömür, doğal gaz ve fuel-oil ile çalıştırılan güç santrallerinin çıkışları kolaylıkla değiştirilebilir. Fakat mümkünse en uygunu düzenli bir yüklemidir. Bu nedenle fosil yakıtlarla çalışan enerji sistemlerinde de fazlalık üretilen elektrik enerjisi nükleer santrallerde olduğu gibi pompalama enerjisi olarak kullanılır. Bazen günde birkaç dakikalık süreler için ani güç yükselmeleri gerçekleşir. Anlık enerji gereksinimlerini karşılamak için kuruluş maliyetleri çok yüksek olan pompalanmış su depolama gibi acil yüklem istasyonları kullanılır (Garg, 1985).

b. Sıkıştırılmış hava depolama

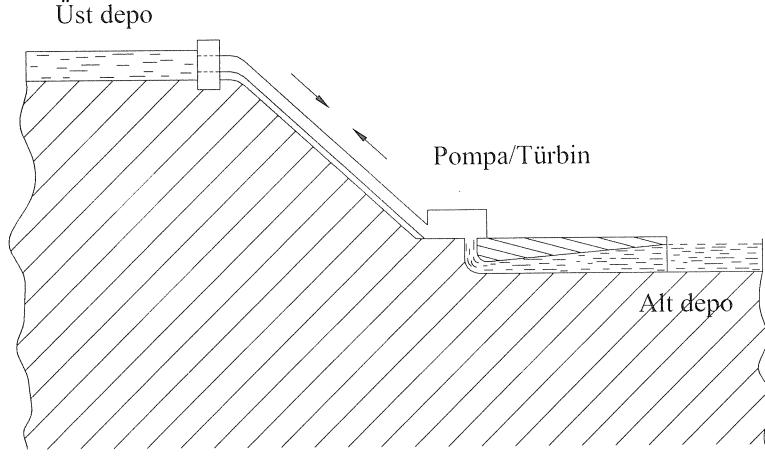
Sıkıştırılmış hava depolama sistemlerinde hava, elektrik ihtiyacının az olduğu dönemlerde yeraltındaki uygun büyük depolarda depolanır. Aşırı ihtiyacın olduğu anlarda sıkıştırılmış hava gaz türbinlerinden geçirilerek dışarıya verilir. Geleneksel gaz türbinlerinde yüksek basınçlı sıcak gaz kullanılır ve güç çıkışının 2/3' ü bu kompresörün çalıştırılmasında kullanılır. Sıkıştırılmış gaz sistemi bir kompresör ve türbinden oluşur. Bunlar aşırı ihtiyacın olduğu dönemlerde sıkıştırılmış hava ile çalıştırılırlar. Hidrolik depolama ve sıkıştırılmış havalı depolama maliyet olarak kıyaslanabilirken, her ikisi için arazi sınırlaması önemli bir sorundur (Dinçer ve Rosen, 2002).

Uygulamada hava sıkıştırma sistemleri Şekil 1.3.'de gösterildiği gibi, depolama basıncına bağlı olarak iki genel kategoride uygulanabilir:

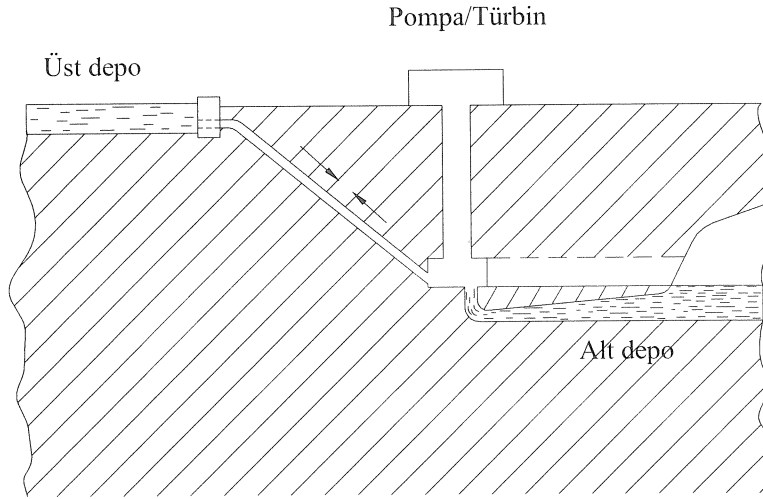
i) Değişken basınç sistemi: Basınç, depolama yapılırken maksimum bir değere kadar artar, dışarı verilirken ise minimum bir değere kadar azalır.

ii) Dengelenmiş basınçlı sistem: İşletimleri boyunca depolama basıncının sabit kaldığı sistemlerdir.

Sıkıştırma gücünün nükleer santraller tarafından karşılandığı veya sıkıştırılmış gazların mevcut olduğu yerlerde bu depolama sistemlerinin kullanılması avantajlıdır.

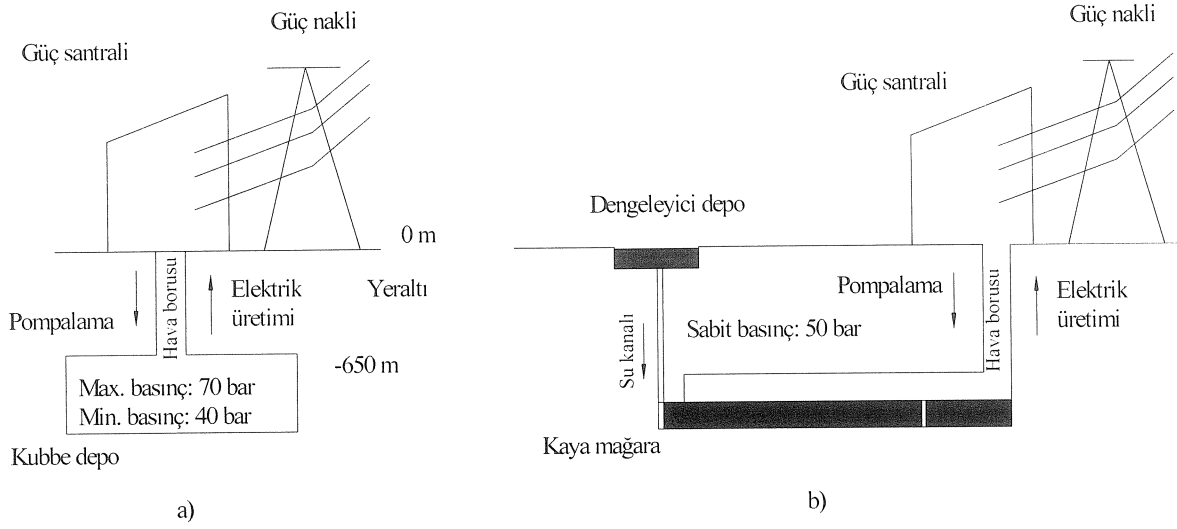


a) Hidrolik pompa (yer üstünde)



b) Hidrolik pompa (yer altında)

Şekil 1.2. Pompalanmış su depolama (a) alt depo yer üstünde, (b) alt depo yer altında (Garg vd., 1985).



Şekil 1.3. Sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri (a) değişken basınç sistemi, (b) sabit basınç sistemi (Dinçer ve Rosen, 2002).

c. Volan

Volan, dönme kinetik enerjisini depolayan oldukça büyük kütleli bir teker olup düzgün olmayan yüklemeleri düzelten ve motor pistonunun çevrim sırasında alt ve üst ölü noktaları dengeli olarak geçmesini sağlayan bir makine elemanıdır. Volan, enerji kaynağı olarak elektrik gücü kullanıldığında bir motor gibi, mekanik enerji ile döndürüldüğünde bir jeneratör gibi çalıştırılır (Dinçer ve Rosen, 2002).

Volan ile depolama sistemi, ada veya elektrik şebekelerinden uzak bölgelerdeki küçük yerleşim merkezlerindeki enerji tüketimini dengelemek için kullanılır. Çünkü bu gibi yerlerde elektrik ihtiyacını sağlamak için genellikle petrol esaslı yakıtlara dayalı elektrik jeneratörleri kullanılır. Bu sistemler, genelde yarı güçte çalıştıkları için, müşterilerin ani elektrik taleplerini karşılamakta zorluk çeker. Eğer, ani talepleri karşılamak için, jeneratör tam güçle çalıştırılırsa yakıt sarfiyatı artacak ve bu da birim kWh başına düşen maliyeti artıracaktır. Volan kullanımıyla hem pik elektrik ihtiyacı dengelenmiş olacak, hem de yakıt sarfiyatı azalmış olacaktır. Araçlarda frenleme sürtünme enerjisinden açığa çıkan ısı enerjisinden faydalanılamazken frenleme sırasında sürtünme etkisiyle enerji bir volana aktarılarak enerji depolanabilir. Bu depolanan enerji aracın tekrar harekete geçmesi ya da hızlanması sırasında devreye sokularak hem enerji tasarrufu hem de konforlu bir hızlanma sağlanabilir (Demirsoy,1989).

Elektrik enerjisi depolamak için kullanılan volanda iki önemli özellik aranır:

- i) Her bir sistem kütlesi maksimum şarj/deşarj gücüyle yüksek özgül kütle yoğunluğu,
- ii) Yüksek çevrim ömrü.

Volan güç sistemleri, fiyat ve sürtünme kayıpları makul seviyeye ulaştığında enerji depolama uygulamalarında yer bulacaktır.

1.2.2. Kimyasal Enerji Depolama

Enerji, bir veya daha çok kimyasal bileşik sistem tarafından depolanabilir. Bu sistemler, başka bileşiklerle reaksiyona girdiğinde enerjisi bırakır veya alır. En çok bilinen enerji depolama aracı pillerdir. Pillerle enerji depolama, elektro-kimyasal enerji depolama olarak tanımlanır. Çünkü pil içerisindeki kimyasal reaksiyonlar, elektrik enerjisi tarafından gerçekleştirilir ve böylece elektrik enerjisi kimyasal enerji olarak depolanır. Pilin kutupları arasına bir alıcı bağlandığında depolanan kimyasal enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür (Kılış ve Kakaç 1989).

Bazı kimyasal enerji depolama sistemleri termik olarak şarj vedeşarj edilir. Çoğu kimyasal reaksiyonlar endotermiktir ve termal enerjinin yutulması ile ilerler. Daha sonra sistemin sıcaklığı belli bir değerin altına düştüğünde orijinal reaksiyon esnasında sistemde depolanan enerji reaksiyon tersinir olduğunda geri verilir. Bu yüzden enerji kimyasal reaksiyon ısısından faydalanılarak depolanır. Bu tip kimyasal depolama, güneş termal uygulamaları için dikkate alınır, fakat bu durum hala geliştirme aşamasındadır.

Elektrik veya ısı kullanılarak depolanabilir bir kimyasalın üretimi teknik olarak mümkündür. Bunu üretmek için en basit kimyasal hidrojenidir. Hidrojen suyun elektrolizi ile elektro-kimyasal olarak üretilebilir veya direk çoklu proses içeren termokimyasal yöntemle de üretilebilir. Üretilen hidrojen, daha sonra bazı araçlarda yakıt olarak kullanılabilir. Bu arada hidrojen bir enerji depolama ortamı olarak hareket eder. Hidrojen yakıtının önemli bir kullanımı da yakıt hücrelerinde elektrik üretimidir. Hidrojenin yakıt olarak kullanımının diğer bir yolu da motorlarda direkt yakıt olarak kullanılmasıdır (Garg, 1985).

Kimyasal enerji depolamaya farklı bir örnek olarak da alüminyum verilebilir. Büyük miktarlardaki enerji çok küçük alüminyum kütlesi içerisinde depolanır. Toz halindeki

alüminyum, kompleks depolara ihtiyaç duymadan açık olarak depolanır. Alüminyum havada hızlı bir şekilde oksitlenerek alüminyum oksit haline dönüşür. Katı formda olan alüminyum oksit yeniden alüminyum olarak proses edilene kadar enerji depolamaya devam eder. Ancak, bu ekonomik bir yöntem değildir. Herhangi bir tersinir reaksiyon enerji depolamada kullanılabilir. Burada reaksiyonu gerçekleştiren kuvvet genellikle termal veya elektrik enerjisidir. Reaksiyon tersinir olduğu zaman bu enerji geriye alınır.

a. Elektro-kimyasal piller

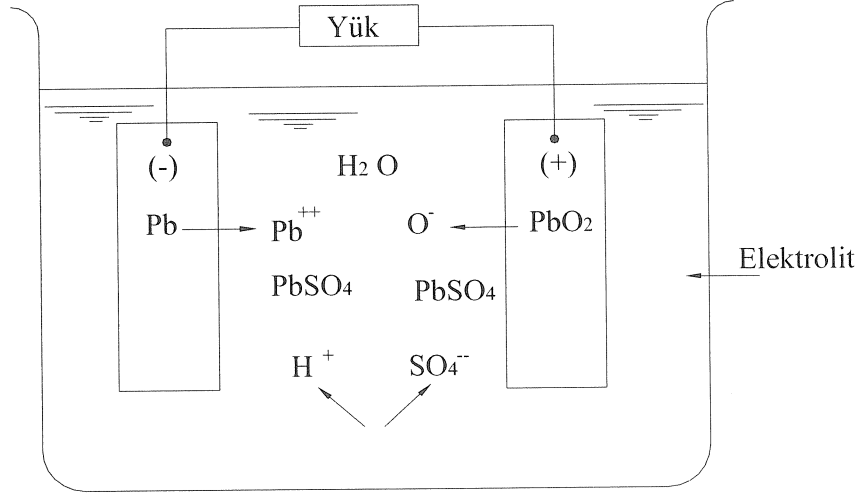
Piller, kimyasal olarak enerji depolar ve bunu elektrik enerjisi olarak verir. Piller depolayıcıların kararlı bir formudur ve yüksek enerji ve güç yoğunluğu sağlayabilir. Taşımacılıkta ve elektrik sistemlerine uzak merkezlerdeki yoğun olmayan elektrik ihtiyacını karşılamak için kullanılan piller (bataryalar) Şekil 1.4.'de verildiği gibi çoğunlukla kurşun-sülfürik asit pili olup, uzun zaman için depolamaya uygun ve yüksek enerji depolama kapasiteli pil olarak bilinir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Son zamanlarda yakıt hücreleri, piller gibi geniş ölçekli kimyasal depolayıcılar olarak sunulmaktadır (Bıyıklıoğlu, 2003).

Pillerin üç ana enerji uygulama alanı vardır. Bunlar, küçük elektrikli ev aletleri, elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinin depolanmasıdır. Piller, mekanik sistemlerden daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir (pillerde %70-80, mekanik sistemlerde %50-70). Büyük sistemlerde iki veya daha çok depolama istenebilir. Örneğin sıkıştırılmış hava seçeneği 8-12 saatlik periyotlardaki elektriği karşılayabilirken, pil sistemi 3-5 saatlik periyottaki elektriği karşılar (Dinçer ve Rosen, 2002).

Evsel elektrikli aletlerde kullanılan piller için ömür maliyetleri ve servis ömrü önemli karakteristiklerden iken, ağırlık veya kütle ve güç yoğunluğu ikincil öneme sahiptir. Güneş, rüzgâr veya hidrolik güç kaynakları ile üretilen gücün doğrudan kullanımı güçtür ve enerjiye ihtiyaç olduğunda da mevcut olmayabilir. Bu yüzden üretilen elektrik, genellikle ihtiyaç duyulduğunda kullanılmak üzere özel pillerde depolanabilir. Bu piller genellikle kimyasal olarak araba pili ile benzer olup, dizayn olarak farklıdır.

Araba bataryaları (akü) çok yüksek akım verecek şekilde dizayn edilmiştir. Bataryalarda depolanan enerji miktarı kapasite olarak isimlendirilir ve saatteki amper olarak ölçülür. Farklı iyonizasyon potansiyeline sahip katı madde (K>Ca>Na>Mg>Al>Zn>Fe>Ni>SN>Pb>H>Cu>Hg>Ag>Pt>Au) ve birbirine bir iletkenle

bağlanmış ve bir elektrolite batırılmış iki farklı metal arasında bir elektrik akımı oluşur. Böylece, Şekil 1.4.'de verildiği gibi bataryanın enerjisi boşaltılmış (deşarj) olur. Eğer aynı bataryanın plaka uçlarına doğru akım (DC) elektrik kaynağı bağlanırsa reaksiyon tersine döner ve plakalardaki fazla iyonlar elektrolite döner ve elektrolitin yoğunluğunu artırır, böylece batarya enerji yüklenmiş (şarj) olur.



Şekil 1.4. Bataryanın boşalma işlemi sırasındaki kimyasal reaksiyonlar

b. Organik moleküler depolama

Fotosentez prosesleri, endergonik fotoreaksiyonlar ışıma enerjisini depolar ve kimyasal enerjiye dönüştürebilir. Fotosentez işlemi için enerji kaynağı olan güneş radyasyonunun sürekli olarak elde edilememesi ve onun düşük yoğunlukta olması bu kaynağın verimli bir şekilde kullanımını sınırlar. Bu depolama prosesinde, bir endergonik fotokimyasal reaksiyon yeniden ekzergonik oluşum reaksiyonu takip eder.

Bir endergonik reaksiyon ile ışığın kimyasal enerjiye dönüşüm verimliliği, fotokimyasal reaksiyonun kuantum doğasından ortaya çıkan sınırlamalara bağlıdır. Bu sınırlamalar biyolojik fotosentetik sistemler ve fotoelektrik araçlarını içeren bütün kuantum çevricilerini içerisine alır. Isı taşıyan fotokimyasal enerji depolama sistemlerinin performansı ekzotermik reaksiyonun oluştuğu sıcaklığa bağlıdır.

1.2.3. Termal Enerji Depolama

Termal enerji, bir maddenin sıcaklığını düşürerek veya yükselterek veya maddenin faz değişimiyle ya da her ikisi bir arada gerçekleştirilerek depolanabilir. Her iki termal enerji depolama yöntemi, uygulama alanları geliştirilen yeni enerji teknolojilerinde etkin bir şekilde kullanılabilir. Termal enerji depolama (TED), yüksek veya düşük ısıların daha sonra kullanım için depolanmasıdır. TED'e örnek olarak gece kullanımı için gündüz var olan güneş enerjisinin depolanması, yaz uygulamaları için kışın buzun depolanması ya da elektrik fiyatının az olduğu saatlerde enerjinin ısı veya soğukluk olarak depolanmasıdır. Güneş enerjisi fosil yakıtların aksine her zaman mevcut değildir ve güneş enerjisinin efektif olarak var olduğu saatlerde optimum depolanmanın yapılması gerekmektedir. Enerjinin termal depolanması çok değişik yöntemler, farklı depolama şekilleri ve malzemeleriyle gerçekleştirilir. Termal enerji depolama sistemleri, mevcut depoladıkları ısı enerjisini deşarj işlemi sırasında kullanıcının ihtiyacına bağlı olarak ya direk ya da yardımcı ısı kaynağı olarak sisteme verirler.

Depolamada diğer önemli bir parametre de depolama yoğunluğu ve enerjinin şarj/deşarj süresidir. Bu da, kullanılacak depolama ortamını, şeklini ve malzemesini belirlemede etkin bir rol oynar.

1.2.4. Manyetik Depolama

Elektrik enerjisi, manyetik alan içerisinde güvenle depolanabilir. Geliştirilen süper iletken malzemeler manyetik depolamada kullanılmaya çalışılmaktadır. Mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda belli malzemeler elektrik direncine sahip değildir. Bu yüzden büyük miktarlarda akımlar kayıpsız olarak bu malzemelerin üzerinden geçirilebilir. Böylece, manyetik alan içerisinde kayıpsız olarak enerji doğru akım olarak elektriği depolar. Bazı kayıplar doğru akımdan alternatif akıma dönüşüm sırasında oluşur ve bir miktar enerji de mutlak sıfır sıcaklığına yaklaşmak için kullanılır. Bu süper iletken manyetik enerji depolama sistemlerinin depolama verimliği diğer depolama yöntemlerine göre oldukça yüksektir (Kılış ve Kakaç, 1989).

Manyetik depolama iki amaç için düşünülmektedir: Birincisi, 1000-10000 MWh elektrik depolama kapasiteli geniş süper iletken miktatıslar (Bunlar merkezi güç santralleri için çok çekicidir ve fiyatları caziptir) ve ikincisi ise, daha küçük ölçekli 10 kWh depolama

kapasitesine sahip daha küçük mıknatıslardır. Bu mıknatıslar, dış iletim hatlarında düşük maliyet nedeniyle kullanılır ve ayrıca, kısa dönemli tüketimlerde ve üretim karakteristiklerinde daha iyidir. Küçük bir süper iletken mıknatıs, elektrik hatlarının uzak bölgelerinde aşırı elektrik ihtiyacı olan saatlerde devreye girerek ihtiyacı karşılamaya yardımcı olur. Bu mıknatıslar oldukça verimli enerji depolama sistemleridir (Dinçer ve Rosen, 2002).

Manyetik depolama üniteleri, enerji ihtiyacının düşük olduğu saatlerde şarj edilir ve enerji ihtiyacının fazla olduğu saatlerde devreye sokulur. Sistem üç fazlı iletim hatlarına bağlanarak günde bir kez şarj ve deşarj yapabilir. Süper iletken pillerde depolama işlemlerinde depolama için alternatif akım doğru akıma çevrilir. Küçük prototip sistemler, enerji nakil sistemlerinin üzerine kurulur ve bunlar saniyelik voltaj değişimlerini dengelemek için kullanılır. Bu sistemler 10 kWh enerji depolama kapasitesine sahiptir ve saniyeden daha küçük sürelerde voltaj değişimini algılamak üzere dizayn edilir. Eğer voltajdaki bu değişim güvenilir bir şekilde dengelenirse iletim sisteminin etkin toplam kapasitesi artar (Kılıkış ve Kakaç, 1989).

1.3. Termal Enerji Depolama

Ticaret, sanayi kamu hizmetleri ve evsel enerji ihtiyaçları günlük, haftalık ve mevsimsel bazda değişmektedir. Bu talepler, sinerjik olarak çalışan termal enerji depolama (TED) sistemlerinin yardımı ile karşılanabilir. Daha konforlu yaşama isteği, daha ekonomik enerji ihtiyacı, çevresel kaygılar ve sanayileşmiş ülkelerde elektrik kullanımının artması; son kırk yılda farklı TED sistemlerinin gelişmesine yol açmıştır. Termal enerji depolama sistemlerinin potansiyel faydalarını ve verimliliğini artırmak için enerji sistemlerinin çeşitli sektörlerdeki kullanıcılarının koordineli hareket etmesi gerekmektedir.

Enerji, ulusların teknolojik rekabetinde ve ekonomik refahında çok önemli bir rol oynar. Enerji türlerinin fiyatı, onlara olan talep ve gelecekteki mevcudiyeti konusundaki tahminler yaklaşık olup, gelecekteki enerji taleplerini karşılamak için çok çeşitli teknolojilere sahip olmak önemlidir. Ayrıca, geliştirilen teknolojiler bir milletin enerji güvenliliği, yeterliliği ve çevreye etkilerini garanti etmelidir. TED, toplam enerji tüketimini çok önemli ölçüde azaltabilir, doğal fosil yakıtları korur ve pahalı olan yakıt naklini azaltır. Teknik ve ekonomik problem ve riskler azaltıldığında, faydalarının yanı sıra

çevresel çıkarlar ve enerji verimliliğini artırmasında rol oynayan TED 'in endüstri ve ticaret sektöründe cazip bir seçenek olması beklenir.

Toplumsal enerji talebinin artması, fosil yakıtlardaki azalmalar ve çevresel faktörlerin önem kazanması güneş, biyokütle ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini teşvik etmektedir. Enerji kaynaklarının sürekli olmamasından dolayı doğal enerji ve diğer enerji kaynaklarının verimli kullanımı, ancak etkin bir enerji depolama sisteminin mevcut olmasıyla mümkündür.

Dalga, rüzgâr, güneş enerjisi fosil, nükleer ve diğer bazı yakıtlardan farklı olarak her zaman kullanıma hazır değildir. TED, enerjinin elverişli olma zamanı ile talep arasındaki dengesizlikleri gidermek için önemli bir mekanizmadır.

Güneş enerjisinden yararlanarak su ısıtma, ortam ısıtma veya soğutma, havalandırma gibi düşük sıcaklık termal uygulamaları ile termal güç sistemleri gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için TED'nin kullanımı son zamanlarda çok cazip hale gelmiştir (Güllüce, 2003).

Termal depolama terimi, daha geniş bir depolama çeşidini kapsar. Diğer bir ifade ile hem ısı hem de soğuk depolamanın tüm yöntemlerini kapsarken; **ısı depolama**, sadece ısının depolanmasını kapsamaktadır (Dinçer ve Rosen, 2002).

Enerji birçok yöntemle depolanabilir. Fakat, birçok ülkede enerji üretilip, ısı olarak iletildiği için (bina ısıtma-soğutma, buhar veya sıcak hava sistemleri) ekonomik termal enerji depolama potansiyeli detaylı bir şekilde çalışmayı gerektirir. TED, bir malzemenin soğutma, ısıtma, erime, katılaşma ve buharlaşma yoluyla enerjinin depolanmasıyla ilgilenir (Schmid ve Willmott, 1981).

Üç tip TED sistemi yaygın olarak kullanılır. Birincisi, malzemenin özgül ısısına bağlı olarak sıcaklığının düşmesi veya yükselmesi şeklindeki duyulur ısı depolamadır. İkinci tip olan gizli ısı depolama, maddenin faz değişimi esnasında ısı depolamadır. Üçüncü tip ise, maddelerin kimyasal reaksiyonları sırasında depoladığı veya terk ettiği ısı ile termokimyasal enerji depolamadır. Duyulur enerji depolama (DED) sistemlerinde yaygın olarak termal enerji depolama ortamı olarak su veya kaya kullanılır. Gizli ısı depolama (GID) sistemlerinde faz değişimi genellikle katı fazdan sıvı faza olur. FDM'nin faz değişimi sırasında gizli ısı depolanırken maddenin, faz değişiminin tamamlandığı bölgelerinin katı veya sıvı fazlarında duyulur ısı depolanır. FDM'ler ya özel kaplar içerisinde (tüpler, dar paneller, plastik kutular vb.) ya da geleneksel yapı elemanları (duvar panelleri ve tavanlar) gibi kapalı kaplar içerisinde tutulur. Termal enerji depolamanın

bilinen en eski biçimi kışın göllerden ve denizlerden alınan buzun veya karın derin kuyulara sıkıştırılması veya iyi izole edilmiş depolarda yazın kullanımı için saklanması şeklindedir.

Termal enerji depolamanın önemli kullanım alanlarına aşağıdaki örnekler verilebilir:

- 1) Gece ısıtması için güneş enerjisinin kullanımı,
- 2) Kış kullanımı için yaz ısısının kullanımı,
- 3) Yazın ortam soğutması için kış buzunun depolanması,
- 4) Enerji ihtiyacının maksimum olduğu saatlerde enerjinin sıcak-soğuk kullanımı için elektriğin ihtiyaç olmayan saatlerde elektriğin ucuz olarak depolanması,
- 5) Sanayideki atık ısının ek ısı kaynağı olarak sonradan kullanım için depolanması.

TED, özellikle endüstriyel tesisler ve iş merkezleri için artan ısıtma ve soğutma ihtiyacının çok önemli bir kısmını atık ısı ve çevre enerjisinin kullanımıyla karşılayan, potansiyel kullanım vasıtalarından biridir. Çoğu uygulamada çevresel faydalarla TED birlikte anılmıştır.

İleri bir enerji teknolojisi olarak TED, iklimlendirme, soğutma, sıcak su ve alan ısıtması gibi termal uygulamalar için pratikte artan bir ilgi çekmektedir. En önemlisi TED enerjisinin arz ve talebi arasındaki dengesizliği gidermede faydalıdır. Bir TED sisteminin seçimi büyük ölçüde gerekli olan depolama periyoduna (günlük veya mevsimsel), ekonomik hareketliliğe ve işletme şartlarına bağlıdır. Enerji ile ilgili çoğu araştırma ve geliştirme faaliyetleri, enerjinin verimli kullanımı ve muhafazası üzerine yoğunlaşmıştır.

Mevsimsel bir depolama sisteminin başlıca karakteristiği uzun süreli ihtiyacı karşılamak için gerekli olan geniş kapasiteli TED olmasıdır. Termal kayıplar böyle uzun dönemli depolama için çok önemlidir. Mevsimsel depolama sistemleri, günlük depolama sistemlerine göre termal kayıpları azaltmak için daha büyük hacimli ve daha korunaklı yapılmaktadır. Günlük enerji depolama sistemleri genellikle bir bina içine yerleştirilirken, mevsimsel depolama çoğunlukla ayrı veya ek birimlere ihtiyaç duyan geniş depolama hacimlerini gerektirir.

Yeni teknolojiler, artan enerji maliyetleri ve enerji kaynaklarını korumak için mevsimsel depolama sistemlerinin gözden geçirilmesini gerektirmektedir. Günlük ve diğer kısa dönem depolama daha geniş uygulama alanına sahiptir. TED, herhangi bir anda kesilen ve azalan enerji kaynağının yerine talebi karşılama başarısına göre önem kazanır. Bu problem özellikle güneş enerjisi için fazla ciddidir. Çünkü enerjiye güneşin şiddetinin

en az olduğu kış mevsiminde daha çok ihtiyaç duyulur. Birçok güneş enerjisi depolama sistemi, günlük depolamada kullanılır ve enerji çoğu zaman bir veya iki gün için depolanır. Kısa dönemli güneş enerjisi TED sistemleri birkaç güne kadar ısı depolamak için düzenlenmiştir. Güneş enerji sistemleri ile yıllık depolama yapıldığında bina ısıtma ihtiyacının % 100'ü kadar katkı sağlamasına rağmen, kısa dönemli TED sistemleri nadiren % 60 katkıda bulunabilir (Dinçer ve Rosen, 2002).

Günlük depolama, aşağıda sıralanan üstünlüklere sahiptir:

- Depolama ve enerji kaybı için gereken maddi yatırımlar genellikle düşüktür.
- Sistem daha küçüktür ve kolaylıkla imal edilebilir.
- Uygulama için gereken günlük depolamanın büyüklüğü daha geniş yıllık depolamalar için gereken hacim kadar kritik değildir.

Güneş enerjisinin binaların ihtiyacı için günlük veya mevsimsel depolanmasında geleneksel pasif termal enerji depolama malzemeleri su, kaya, taş ve betondan oluşur. İyi bir performans için bu depolama maddelerinin depolama yoğunlukları yüksek olmalıdır. Çünkü sağladıkları ısı miktarı, bina içinde olması gereken konfor şartlarını sağlamalıdır.

Güneş enerjisi kullanan bir hacim ısıtma sisteminin, güneş enerjisinin az olduğu günlerde elektrik veya yakıtla güçlendirilen yardımcı enerji kaynağı tarafından desteklenmeye ihtiyacı vardır. Alternatif bir uygulama; güneş enerjisi ile desteklenmiş ısı pompası sistemi olup, sistemde depolanmış termal enerji güneşin olmadığı zamanlarda ısı pompası için ek ısı kaynağı olarak kullanılır (Kaygusuz, 1992).

İlk çağlardan beri kullanılan TED sistemi, gündüz ile gece arasındaki sıcaklık farklarını gidermek için gündüz güneş enerjisinin kiremitlerde depolandığı gece ise sıcaklık düştüğü zaman kiremitlerin depoladıkları ısıyı odaya geriye verdikleri sistemlerdir. Termal enerji depolamaya ilgi dünden bugüne artmış ancak, termal depolamanın amacı, depolama malzemeleri, depolama yöntemleri ve depolama şekilleri değişmiştir. Termal depolama amaçlarının çeşitlenmesi ile araştırmalar Şekil 1.5.'de verildiği gibi malzeme ve ısı değiştirici sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Mikro işlemcilerin gücü her 18 ayda bir iki katına çıkmaktadır. Elektronik sistemlerin artan performansı, dizaynda sıcaklığı önemli bir parametre haline getirmiştir. Bu yüzden, elektronik soğutma sistemleri çok önemlidir. Soğutma modülüne bir termal enerji depolama ünitesinin entegrasyonu daha küçük, daha sessiz ve daha az enerji tüketen bir sisteme yol vermektedir (Zheng, 2001).

Termal enerji depolama, depolanan enerjinin türüne, depolayıcı malzeme cinsine ve enerji depolama süresine bakılmaksızın duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal depolama olarak üç grupta toplanır.

1.3.1. Duyulur Isı Depolama

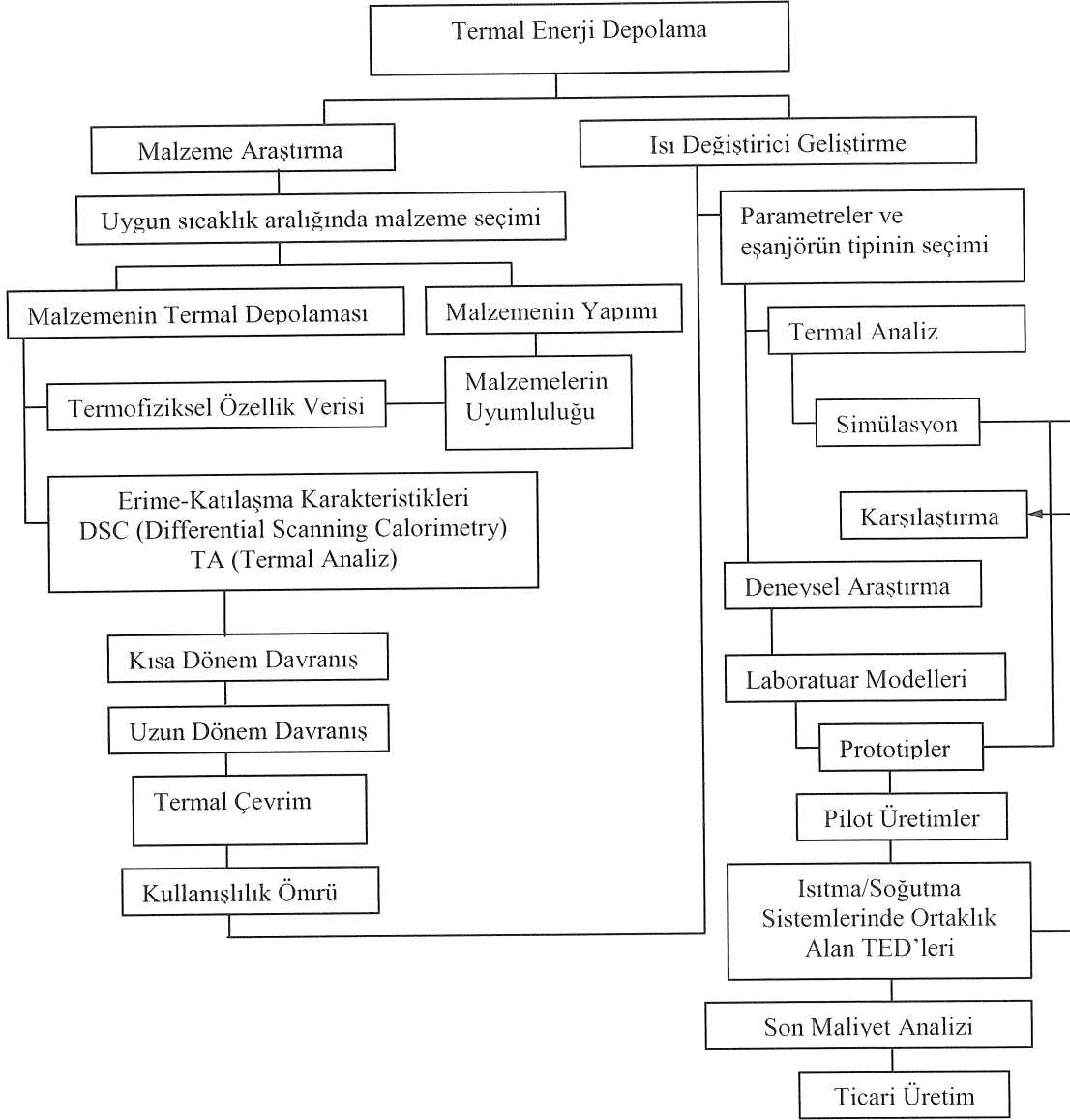
Bir maddenin sıcaklığı azaldıkça açığa çıkan enerjiye veya bir maddenin sıcaklığı arttıkça maddenin aldığı enerjiye duyulur ısı denir. Depolama malzemesinin sıcaklığının depolanan enerjinin miktarı ile değişimine **duyulur ısı depolama** diyoruz. Başka bir deyişle, duyulur ısı depolama; maddenin bir fazdan diğer bir faza (katı, sıvı, gaz) tamamen geçtikten sonraki fazında ısının depolanması veya depolanmış ısının geriye verilmesi periyodudur.

Gaz ortamda duyulur ısı depolama, gazın yüksek basınç artışı nedeniyle çok fazla tercih edilmez. Belirli bir hacimde tutulan gaz ısı alırsa, sıcaklık ve basıncı artar. Bu artış sırasında belirlenen özgül ısı, sabit hacimde özgül ısı (c_v) olarak adlandırılır. Sistem sabit basınçta ısı alır ya da verirken hacim değişimine uğruyorsa, bu durumda gözlenen özgül ısıya sabit basınçlı özgül ısı (c_p) adı verilir. Bir TED için c_p / c_v oranı ve basınç altında üretilen ısının depolanabilen kısmı depolama verimliliğini önemli ölçüde etkiler.

Maddelerin birim kütleleri için duyulur ısı ve gizli ısı miktarları birbirinden farklılık gösterir. Bunun sebebi duyulur ısıda maddenin özgül ısısı, gizli ısıda ise erime veya buharlaşma ısısının etkili olmasıdır. Katı ve sıvılar için duyulur ısı miktarını belirlemek nispeten kolay olmakla birlikte gazlar için durum daha karmaşıktır.

Duyulur termal enerji depolama da enerji; su, hava, petrol, kaya yatakları, tuğla, kum ve toprak gibi depolama maddelerinin ısısının değişmesiyle depolanır. Her bir sistemin avantajları ve dezavantajları vardır. Örneğin su, kaya ve toprağın belirli sıcaklıklarda depoladığı enerjinin iki katını depolar. Suyun yüksek ısıtma kapasitesi ($4.2 \text{ kJ / kg } ^\circ\text{C}$) ve binanın ısıtma ve soğutması için gerekli olan ısı dizininde çalışan TED sistemleri için cazip depolama yöntemini su tankları oluşturur. Duyulur ısı depolama, ısı depolama ortamına bağlı olarak, üç grupta sınıflandırılır:

- i) Sıvı ortamda depolama (su, akışkan yağlar, ergimiş tuzlar v.b.),
- ii) Katı ortamda depolama (kayalar, metaller ve diğerleri),
- iii) İkili ortamda ısı depolama.



Şekil 1.5. Termal enerji depolama araştırma alanları (Zalba vd., 2003).

i. Sıvı ortamda duyulur ısı depolama

Sıvı ortamda duyulur ısı depolama yapmak için kullanılan maddeler çok sayıda olup, bu maddeler, birbirleriyle depolama kapasiteleri, ucuzluğu ve kolay bulunabilirliği gibi değerlendirme kriterleriyle rekabet etmektedirler. Bu maddelerin bir kaçının fiziksel özellikleri Tablo1.2.' de verilmiştir. Su ve tuzlu su, orta ve düşük sıcaklıktaki sıvı ortamda duyulur ısı depolama için en yaygın kullanılan bir malzemedir. 100 °C'nin üzerindeki ısı depolama için düşük yoğunluk ve yüksek özgül ısıya sahip organik kimyasallar kullanılır.

Düşük sıcaklıktaki su, en iyi depolama ortamlarından biridir. Diğer malzemelerden daha yüksek özgül ısıya sahiptir ve ucuz olduğu kadar aynı zamanda boldur. Su ile depolama, 25-90 °C gibi geniş bir sıcaklık aralığında yapılır. Bununla birlikte yüksek sıcaklık uygulamalarında (100 °C ve üstü) suyun buhar basıncı dolayısıyla maliyeti yüksek izolasyon ve yüksek basınca dayanıklı kaplar gerektirir. Şekil 1.6.'da enerji kaynağı olarak güneşi kullanan sulu duyulur ısı depolama sisteminin şeması verilmiştir. Genel olarak su bir iki gün gibi kısa periyot için depolama ortamı olarak kullanılır. Akışkan ve depolama ortamı bir olduğu için depolama sisteminde eşanjöre ihtiyaç duyulmaz. Depolama malzemesi olarak suyun kullanılmasının bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; normal kaynama noktası sıcaklığını yukarı çekmek için yüksek buhar basıncına dayanacak pahalı basınç kaplarına ihtiyaç duyması, sızıntı kolaylığı, korozyona yatkın oluşu, katılaşma sırasındaki hacim genişlemesi ve termal tabakalaşma zorluğudur.

Tankın altındaki en düşük sıcaklık ve tankın üstündeki en yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan kaldırma kuvveti yüzünden depolama tankı içerisinde termal tabakalaşma oluşabilir. Depolama sırasında termal tabakalaşma gerçekleşmesinin iki avantajı vardır:

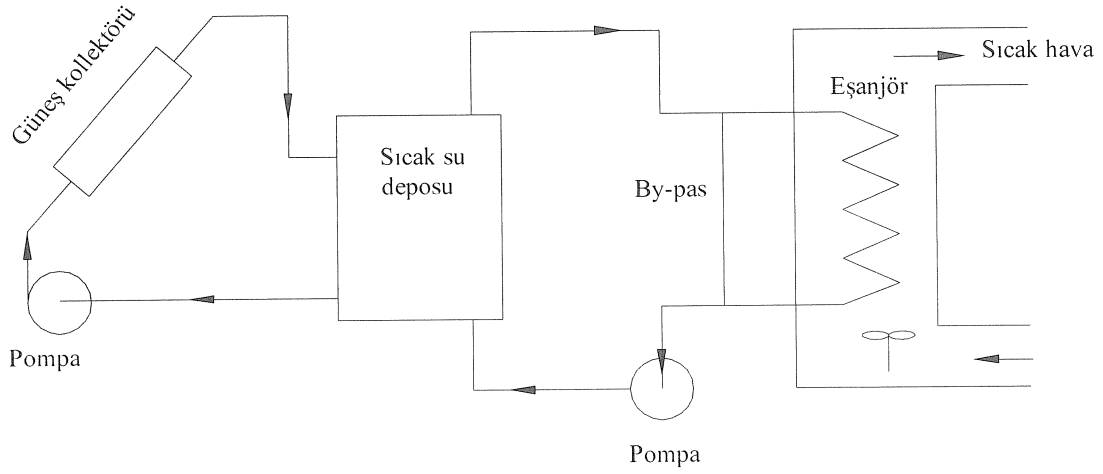
- Enerji depolama verimliliği artar,
- Eğer karışmış depolama sıcaklığından kollektör girişindeki akışkan sıcaklığı daha düşük ise depolanan enerjinin miktarı artabilir.

Su depolama tankları çelik, alüminyum, betonarme ve fiberglas gibi çok farklı malzemelerden yapılabilir. Tanklar cam yünü, mineral yünü ve poliüretan gibi malzemelerle izole edilir. Tank boyutları birkaç yüz litreden birkaç bin metreküpe kadar değişebilir. Geniş aralıklı depolama uygulamaları için yeraltı doğal su kaynakları düşünülmektedir. Yüksek depolama hacimlerine sahip olmaları ve düşük maliyetinden dolayı yeraltı su depolama caziptir.

Tablo 1.1. Sıvı ortamda duyulur ısı depolama malzemelerinin fiziksel özellikleri (Kaygusuz, 1992).

Ortam	Akış Tipi	Sıcaklık Aralığı (°C)	Yoğunluk (Kg/m ³)	Isı Kapasitesi (J/kg.K)	Isıl İletkenliği (W/m.K)
Su		0-100	1000	4190	0.63
Su-etilen					
Glikol(50/50)			1050	3479	-
Terminol 55	Yağ	(-18)-(315)		2400	-
Terminol 66	Yağ	(-9)-(434)	750	2100	0.106
Etilen Glikol			1116	2382	0.249
Motor yağı	Yağ	< 160	888	1880	
Lityum	Sıvı tuz	180-1300	510	4190	38.1
Sodyum	Sıvı tuz	100-760	960	1300	67.5
Etanol	Organik sıvı	< 78	790	2400	-
Propanol	“	< 97	800	2500	-
Butanol	“	< 118	809	2400	-
Izobutanol	“	< 100	808	3000	-
Izopentanol	“	< 148	831	2200	-
Oktan	“	< 126	704	2400	-

Tuzlu su içerisinde depolama ise, güneş havuzları, 50-95 °C düşük sıcaklık termal enerjinin yapısındaki güneş enerjisinin biriktirilmiş ve depolanmış büyük miktarları için ekonomik ve basit bir yöntem olarak sunulur. Bunlar elektrik güç üretiminde, endüstriyel işlem ısısının temin edilmesinde ve yüzey ısıtma ile soğutma uygulamalarında potansiyele sahiptir.



Şekil 1.6. Ortam ısıtmada kullanılan sulu duyulur ısı depolama sistemi (Kılıkış ve Kakaç,1989).

ii. Katı Ortamda Duyulur Isı Depolama

Basit bir katı ortamda duyulur ısı depolama sistemi, ısı depolayıcı katı maddenin tutulduğu büyük bir depo ve ısı transfer akışkanının (su, yağ, hava vb.) giriş/çıkış kontrolünü sağlayan cihazlarından oluşur. Depo boyunca bir sıcaklık değişiminin varlığı istenir. Termal tabakalaşmayı sağlama ve sürdürme katı depolama ortamında sıvıdakinden çok daha basittir. Duyulur TED maddeleri, depolama süresince faz değişimine uğramayacakları belirli bir sıcaklık aralığında çalışırlar.

Malzemenin kütlesi içerisinde depolanmış olan duyulur ısının miktarı aşağıdaki gibi ifade edilir (De Lucia ve Bejan 1990):

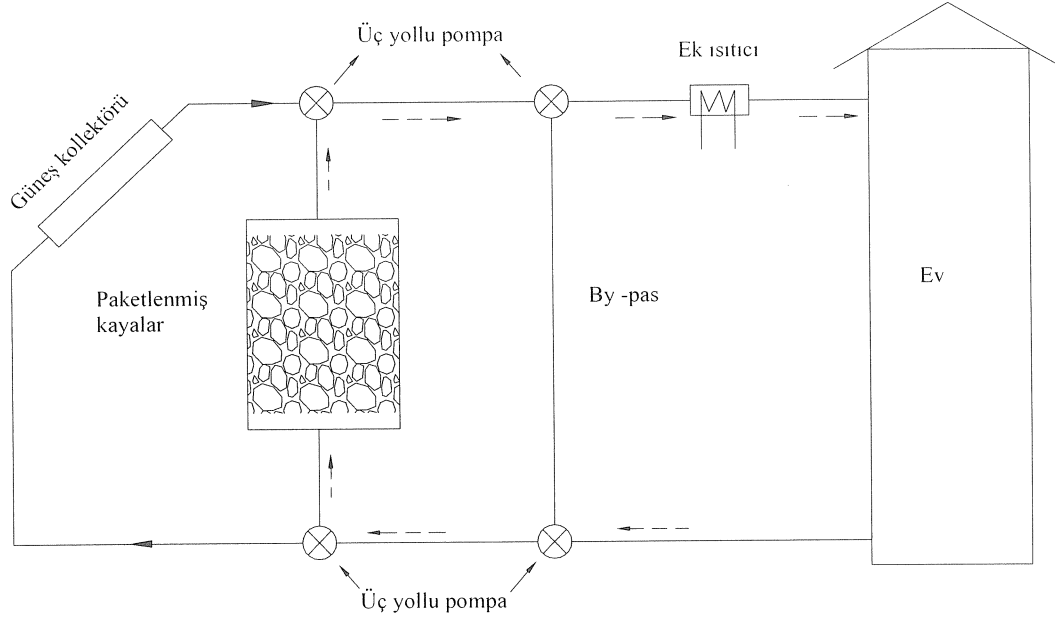
$$Q = mc_p\Delta T \text{ veya } Q = \rho c_p V\Delta T \quad (1)$$

Burada c_p , depolama malzemesinin özgül ısısı; ΔT , sıcaklık değişimi; V , depolama malzemesinin hacmi ve ρ , malzemenin yoğunluğudur.

Verilen bir madde için gereken makul ısı depolama kabiliyeti, ρc_p nin büyüklüğüne bağlıdır. Suyun yüksek ρc_p değeri vardır ve ucuzdur; fakat sıvı olduğu için katı depolayıcılara göre daha yüksek kalitede depoda saklanmalıdır. Bazı yaygın TED materyalleri ve onların özellikleri Tablo 1.2.'de gösterilmiştir. TED uygulamalarının yararlı olması için, depolama malzemesi normal olarak ucuz olmalı ve iyi bir ısı

kapasiteye sahip olmalıdır. Duyulur TED’da başka bir önemli parametre ısının alınıp verilme oranıdır. Bu karakteristikler ısı geçişinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle, demir kütle mükemmel bir termal depolama malzemesidir. Aynı zamanda demir yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletkenliğine sahiptir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için cazip olması yanında düşük sıcaklık duyulur TED için (100 °C’ ye kadar) demir ve demir oksit, deponun birim hacmi için suyla karşılaştırılabilecek termal özelliklere sahiptir. Fiyatlar hem oksit taneleri hem de metal toplar için uygundur.

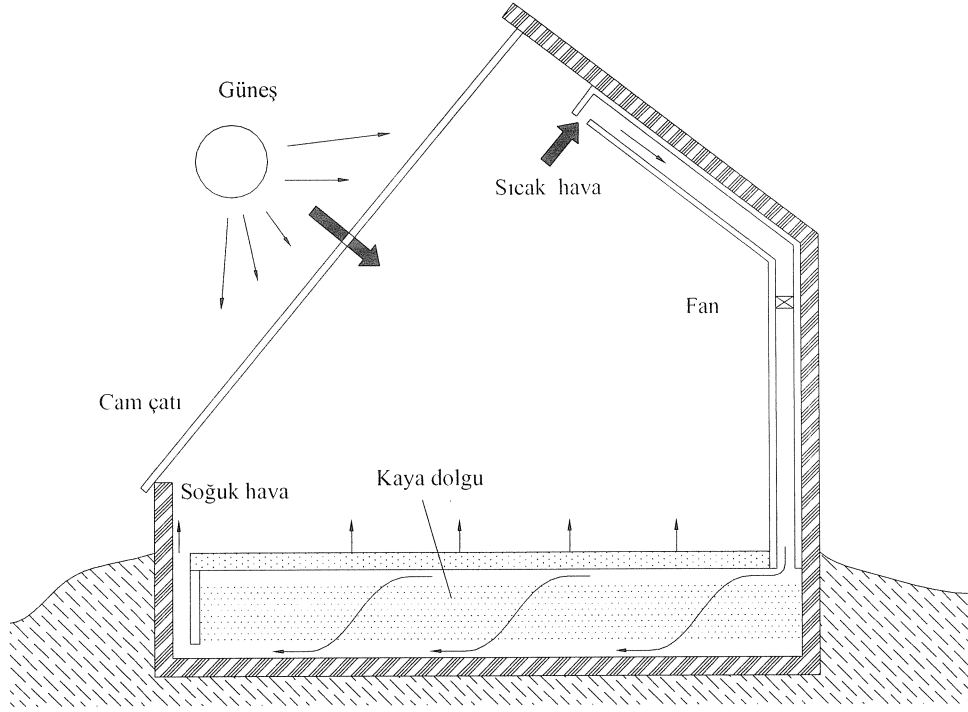
Kaya maliyet açısından iyi bir TED materyalidir. Bazen beton, düşük maliyet, kolay ve istenilen şekilde düzenlenmesinden dolayı seçilir. Fakat onun hacimsel termal kapasitesi suyunkinin sadece yarısıdır. Ancak, kaya termal depolamanın suya göre en önemli avantajı 100 °C’nin üzerinde ısı depolanması için kolayca kullanılabilmesi ve deponun sızdırma probleminin olmayışdır. Şekil 1.7.’de ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sisteminin şeması verilmiştir. Ev ısıtmada kullanılan güneş enerjisinin, kaya ile duyulur depolandığı cam çatılı sistemin şeması Şekil 1.8.’de verilmiştir.



Şekil 1.7. Ortam ısıtmada kullanılan kayalı duyulur ısı depolama sistemi (Kılıkış ve Kakaç,1989).

Tablo 1.2. Duyulur ısı depolama için kullanılan bazı katı maddeler (Kaygusuz, 1992).

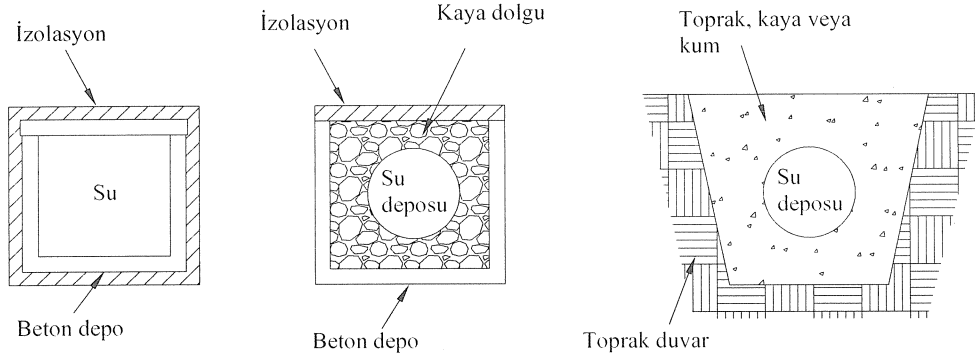
Depolama maddesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül ısı, c (J/kg.K)	Isı kap. c*10 ⁻⁶ (J/m ³ .K)	Isıl iletken. (W/m.K)	Isıl yayılma $\alpha=k/c*10^6$ (m ² /s)	
Alimünyum	2707	896	2.4255	204	20 °C de	84.10
Alimünyum oksit	3900	840	3.2760			
Alimünyum sülfat	2710	750	2.0325			
Tuğla	1698	840	1.4263	0.69	29 °C de	0.484
Beton	2240	1130	2.5310	0.9-1.3		0.35-0.51
Dökme demir	7900	837	6.6123	29.3		4.431
Saf demir	7897	452	3.5694	73.0	20 °C de	20.45
Kalsiyum klörür	2510	670	1.6817			
Bakır	8954	383	3.4294	385	20 °C de	112.3
Toprak (yaş)	1700	2093	3.5581	2.51		0.705
Toprak (kuru)	1260	795	1.0017	0.25		0.250
Magnezyum oksid	3570	960	3.4272			
Potasyum klörür	1980	670	1.3266			
Potasyum sülfat	2660	920	2.4472			
Sodyum karbonat	2510	1090	2.7359			
Sodyum klörür	2170	920	1.9964			
Sodyum sülfat	2700	920	2.4840			
Granit	2640	820	2.1648	1.73-3.98		0.79-1.84
Kumtaşı	2200	710	1.5620	1.83		0.56-0.59
Kireçtaşı	2500	900	2.2500	1.26-1.33		0.99-1.41
Mermer	2600	800	2.0800	2.07-2.94		1.72



Şekil 1.8. Cam çatılı kaya dolgu duyulur ısı depolama evi (Hariri ve Ward 1988).

3. İkili Sistemde Duyulur Isı Depolama

Sıvı ve katı ısı depolama malzemelerinin bir arada kullanıldığı sistemler de vardır. Bu sayede sistemlerin (sıvı ve katı ortamların) sakıncalı yönleri giderilmiş olur. Ayrıca, sıvı depolama sistemlerinin taşınması ve izolasyonu problemi de bertaraf edilmiştir. Şekil 1.9.'da Atomics International (A.B.D.) kuruluşu tarafından kullanılan üç çeşit ikili duyulur ısı depolama sistemi verilmiş olup, bunlar ikili sistemin en basit depo şekilleridir. En yaygın duyulur ısı depolama malzemesi olarak kullanılan kaya dolgu yatak ve su ikili sistemidir. Bu sistemler genelde güneş enerjisi ile ikili depolama sistemlerinde kullanılmaktadır. İkili depolama sisteminde yaygın olarak kullanılan kaya ve suyun termofiziksel özellikleri Tablo 1.3.'de verilmiştir.



Şekil 1.9. İkili duyulur ısı depolama sistemleri (Garg vd.,1985).

Tablo 1.3. Duyulur ısı depolama ortamlarının karşılaştırılması (Hasnain, 1998 a).

Özellik	Kaya	Su
Gizli ısı (kJ/kg)	1.0	4.2
Yoğunluk (kg/m ³)	2240	1000
Depo için depolama kütlesi (10 ⁶ kJ /kg)	67000	16000
Depo için depolama hacmi (10 ⁶ kJ/m ³)	30	16

1.3.2. Gizli Isı Depolama

Malzemelerin katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazı bulunmaktadır. Ancak, her temel faz içerisinde farklı moleküler düzene sahip başka fazlar da olabilmektedir. Malzemenin katı fazında, moleküller üç boyutlu bir düzende kafes yapılarına sahiptirler. Bu kafes yapı içerisindeki moleküller birbirlerine kuvvetli bir şekilde bağlı olup, yerlerini değiştirmeseler de titreşirler. Malzemenin sıcaklıklarına bağlı olarak titreşim hızları değişkenlik gösterir. Malzemenin sıvı fazında, moleküller arasındaki mesafe katı faza göre çok farklı olmamakla birlikte moleküller, kümeler halinde birbiri üzerinde kayarak hareket ederler. Malzemenin gaz fazında ise moleküller birbirinden iyice uzaklaşarak, birbirleriyle ve içinde buldukları kabın cidarları ile sürekli olarak çarpışırlar (Çengel ve Boles, 1996).

Gizli ısı depolama, bir maddenin faz değişimi veya durum değişiklikleri ile ilişkilidir. Bu değişikliklerin olabilmesi için gerekli olan enerji erime noktasında erime ısısı, kaynama noktasında da buharlaşma ısısı olarak adlandırılır. Gizli ısı depolama için, tersinir faz değiştirme durumu üç grupta incelenir:

- i) Sıvı-buhar faz değişimi,
- ii) Katı-sıvı faz değişimi,
- iii) Katı-katı faz değişimi.

Faz değişim periyodu; faz değişiminin başından sonuna olan periyodu tanımlar ve faz değişim periyodunun sınırı; malzemenin faz değişim sıcaklığının ± 0.2 °C aşılması aralığı olarak belirlenir. Bu periyotta yapılan termal depolama, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesini belirler. FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi yüksek olsa bile katı fazının ısı iletim katsayısının düşük olması ve erimiş faza düşük taşınım etkilerinden dolayı FDM'ye olan ısı transferi gcleşmektedir.

FDM'ye ısı transferini artırmak için; FDM ile temasta olan ısı transfer yüzeyini artırmak, metal kanatçıklar takmak ve metalik parçalar ilavesi (Ettouney vd., 2004; Liu vd., 2004 a,b) gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu uygulamalarla FDM'nin termal depolama kapasitesi artarken şarj / deşarj süresi kısalımış ve FDM ile termal depolama diğer yöntemlere göre daha cazip hale gelmiştir. Böylece gizli ısı depolama daha geniş kullanım alanı bulmuştur. Zalba vd. (2003), FDM ile termal enerji depolama uygulamalarını aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır:

- Güneş enerjisinin termal depolanması,
- Biyoklimatik binalarda pasif depolama,
- Soğutma: buz bankası ve aşırı gc ihtiyacını azaltma uygulamaları,
- Isıtma ve temiz su ihtiyacı,
- Emniyet: bilgisayar ya da elektrik sistemlerinin bulunduğu odalarda sabit sıcaklığın sürdürülmesi
- Gıdaların ısıl korunması: taşıma, dondurma ve pazarlama,
- Gıda endüstrisi: şarap ve süt üretimi ve seracılık,
- Elektronik parçaların termal korunması,
- Tıbbi uygulamalar: kan taşınması, ameliyat masası, sıcak-soğuk terapi,
- Motor soğutma (elektrik ve içten yanmalı),
- Araçlarda termal konfor,
- Kimyasal reaksiyonlarda ekzotermik sıcaklık yükselmelerini yumuşatmak,
- Uzay araçları termal sistemleri,
- Güneş enerji panelleri.

Gizli ısı depolamanın uygulamada daha yaygın kullanılmasını, FDM'nin uzun süreli çevrimsel depolama durumunda kimyasal yapısının bozulması ve FDM ile ısı depolama tankı arasında korozyonun oluşması engellemiştir. FDM olarak kullanılan malzemelere çevrimin etkisi üzerine çok az sayıda araştırma yapılmış olup, parafinlerin özellikleri üzerinde yapılan bir çalışmada; çevrimlerin etkisinin olmadığı üç parafin karışımı için gerçekleştirilen deneylerle kanıtlanmıştır (Hadjieva vd., 1992).

Duyulur ısı depolama malzemelerinde çevrimin etkisi hiç yokken, sıvı ortamda depolama malzemelerinde korozyonun etkileri gizli ısı depolamada olduğu gibi önemlidir. Bununla birlikte, duyulur ısı depolamaya göre gizli ısı depolamanın aşağıdaki avantajları bulunmaktadır:

- Daha fazla enerji depolama yoğunluğu,
- Daha yüksek verimlilik,
- Isı geçişi için sabit sıcaklık,
- Daha küçük hacimli ısı depolayıcı ihtiyacı.

1.3.2.1. Sıvı-Buhar Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama

Gaz fazı moleküllerinin enerji düzeyleri sıvı ve katı fazınkilere oranla yüksektir. Bu nedenle de gaz yoğunlaşırken veya donarken çevreye büyük miktarda enerji vermek zorundadır. Sıvı-buhar faz geçişinde buharın yüksek basıncı ve hacimsel genişlemesinden dolayı basınca dayanıklı depo ve daha geniş bir depo hacmine ihtiyaç duyulur. Bu da, depo maliyetlerini artırdığından genellikle ısı depolamada tercih edilmez. Buna ilaveten, buhar tüm enerji depolama işlemleri için aşırı bir şekilde düşük bir ısı iletimine sahiptir (Son ve Morehouse, 1991)

1.3.2.2. Katı-Katı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama

Belirli kristal moleküle sahip FDM ısı alır ya da verirken belli bir sıcaklıkta katı durum kristallerinde moleküler değişim meydana gelir. Bu olaya katı-katı faz değişimi ile ısı depolama denir. Ayrıca; katı – katı faz değişimiyle ısı depolama, sabit bir sıcaklıkta bazı katı malzemelerin düşük bir simetrik kristal yapıdan yüksek bir kristal yapıya geçişi

sırasında ısının büyük miktarda depolanması işlemi olarak da tanımlanabilir (Li, 1999; Wang vd., 2000 a,b).

Katı-katı faz değiştiren malzemeler, düşük gizli ısıya ve yüksek faz değişim sıcaklıklarına sahiptir. Bu nedenle, ısı depolama çalışmalarında yeterli ilgiyi görmezler. Ancak, faz değiştirme süresince düşük hacim değişimi, sızdırmazlık probleminin olmayışı, depoda daha az aşınma ve bileşiklerinin ayrışması daha az olduğundan daha uzun hizmet ömrü gibi avantajlara sahiptirler (Wang vd., 2000 b). Bu avantajlarının yanında, katı-katı faz değiştiren malzemeler, iki önemli probleme sahiptir. Bunlardan ilki, her iki katı fazının ısı iletim değerleri faz değişim bölgesindeki ısı iletim değerlerinden büyük olmasıdır. Faz değişimi için uygulanan depolama sıcaklığı ile maddenin faz değişim sıcaklığı arasındaki farkın büyük olması gerekir. Aksi takdirde, ısı depolama süresi uzar. İkinci problem ise, bu malzemeler hava sızdırmaz bir kap içinde muhafaza edilmezlerse süblime olmasıdır. Fakat katı-katı faz değiştiren malzemelerin buhar basınçları düşük olduğu için üzerlerine basınç uygulamak sorun değildir. Literatürde yapılan birçok araştırmada katı-katı faz değiştiren malzemeler ile ilgili verilerin ısı iletim değerleri uyumsuzdur (Son ve Morehouse, 1991).

Maddelerin bazıları katı durum içerisinde katı-katı tersinir faz değişimine sahiptir. Fakat çok azı termal enerji depolamanın pratik uygulamasında potansiyel kullanımı olan yeterli bir şekilde güçlü değişimlere sahiptir. Katı-katı faz değiştiren maddelerin üç tipi vardır. Organometalikler $[(n-C_nH_{2n+1}NH_3)MX_4]$, geçiş polimerleri ve hidrokarbon moleküler kristallerdir (Li, 1999; Wang vd., 2001).

1.3.2.3. Katı-Sıvı Faz Değişimi ile Gizli Isı Depolama

Katı-sıvı faz değişim malzemeleri ile gizli ısı depolamanın uygulama avantajlarına karşın, katı-sıvı faz değiştiren malzemelerin düşük ısı iletkenliği, sıcaklıkla yoğunluk değişimi, aşırı soğutma ve bazı maddelerde faz ayrışması, uzun süreli çevrimlerde termofiziksel özelliklerde değişim gibi olumsuzluklar yüzünden katı-sıvı faz geçişi uygulamada sıkıntılar yaratmaktadır.

Katı-sıvı faz değişimi ile gizli ısı depolama diğer faz geçiş yöntemleri ile depolamaya göre daha yoğun kullanılmaktadır. Literatür ve uygulamalarda faz geçişi ile ısı depolama denildiğinde katı-sıvı faz geçişi ile gizli ısı depolama ifade edilir. Bu çalışmada da, katı-sıvı faz değişimi yerine sadece “faz değişimi” ifadesi kullanılacaktır ve

erimenin faz değişimi akla gelecektir. Örneğin, katı-sıvı faz değişim malzemesi yerine faz değişim malzemesi (FDM) diyeceğiz.

Gizli ısı depolama, FDM'lerin erime sıcaklıklarına bağlı olarak kullanımı, soğuk depolama, düşük sıcaklıkta depolama ve yüksek sıcaklıkta depolama olarak sınıflandırılır. Aşağıda bu farklı üç tür kısaca izah edilmiştir:

i. Soğuk depolama

Soğuk hava depoları, iklimlendirme sistemleri ve buz makineleri gibi sistemlerin soğutma ihtiyaçlarını karşılamak için soğuk depolama yapılır. Soğutucu termal enerji depolanması konforlu bir çevre sağlarken soğutucu enerji maliyetlerini azaltabilir. Soğuk depolama, soğutucu sistemlerin en fazla çalıştığı ve maliyetli olduğu periyodu daha ucuz olan gece kullanımlarındaki maliyetlere getirmek için yapılır. Genelde FDM olarak su, glikol ve ötektik tuzlar kullanılır. Maksimum erime yeteneği olan tuzlar termal depolama için uygun olsa da tuzların sudan daha pahalı olması, daha fazla korozyon etkisi, yoğun faz ayrışmaları ve yükleme / boşaltmadaki kayıplardan dolayı çok fazla tercih edilmez. Ancak, suyun korozyon ve hacimsel genleşme gibi mahzurlarına rağmen ucuz ve bol bulunması dolayısıyla ısı depolama malzemesi olarak yaygın kullanılır (Chen vd., 2000; Ismail ve Henriquez, 2000; Erek vd., 2005; Hasnain, 1998 b).

Buzla gizli ısı depolamada, FDM erirken çoğu diğer FDM'lerden farklı olarak buzun yoğunluğu erimiş fazınkinden daha az olduğu için buz erimiş bölgenin üstüne çıkar. Bu da yatay gizli depolama sistemlerinde, suyun ısı depolama zamanını kısaltmaktadır. Diğer soğuk depolama FDM'lerinde, erimiş madde yukarı doğru çıkarken katı madde sıvı fazın altına doğru kayar (Liu vd., 2004 b). Soğuk depolama duyulur veya gizli ısı depolama şeklinde yapılmakla birlikte FDM ile depolama yoğunluğunun fazla olması dolayısıyla genelde su ile gizli ısı depolama çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Soğuk depolamada farklı geometriler kullanılmakta olup daha geniş bir kullanım alanına sahip silindirik termal depolama sisteminin soğuk depolama performansını etkileyen hususlar aşağıda verilmiştir (Chen vd., 2000):

- Kapsülün boyutu,
- Soğutucu akışkan debisi,
- Soğutucu akışkan sıcaklığı,
- Kapsülün malzemesi,

- Çekirdekletirici ilavesi,
- Soğutucu akışkan akış tipi,
- Soğutucu akışkanın kapsül üzerinden akış yönü.

Soğuk depolama sistemlerinin performansı yanında bu sistemlerin ekonomik analizleri de önemlidir. Thangmanosodsikul (1995), termal depolama sistemlerinin ekonomik analizini karşılaştırmalı olarak sunmuştur.

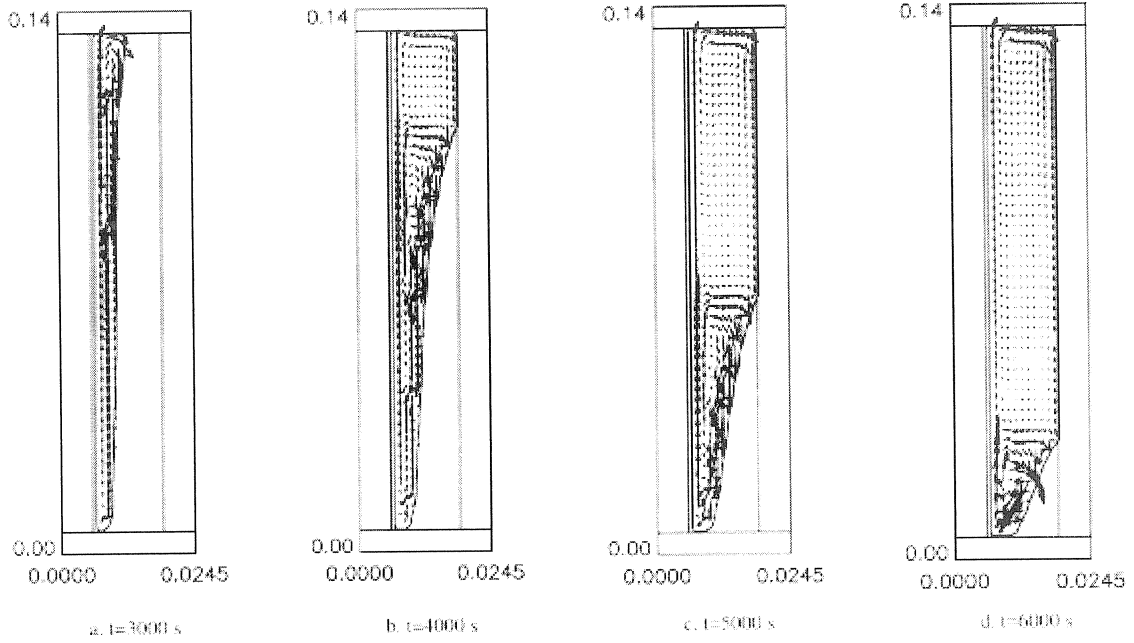
ii. Düşük sıcaklıkta depolama

Hacim ısıtma, evsel sıcak su ihtiyacı ve sera ısıtma gibi uygulamalarda ya doğrudan veya bir yardımcı ısı kaynağı ile birlikte kullanılır. Depolama sistemlerinin imalatının kolaylığı, maddelerin genelde fiyatlarının ucuzluğu ve çalışma sıcaklık aralıklarının düşük olması (20-120 °C) nedeniyle düşük sıcaklıkta depolama yaygın olarak kullanılmaktadır. Erime sıcaklık aralığı ve termofiziksel özellikleri gizli ısı depolamaya uygun olan organik ve inorganik malzemeler FDM olarak kullanılır. Bu çalışma; düşük sıcaklıkta gizli ısı depolama malzemeleri ve uygulamalarını içerdiğinden bu bölümde kısa geçilmiştir.

iii. Yüksek sıcaklıkta depolama

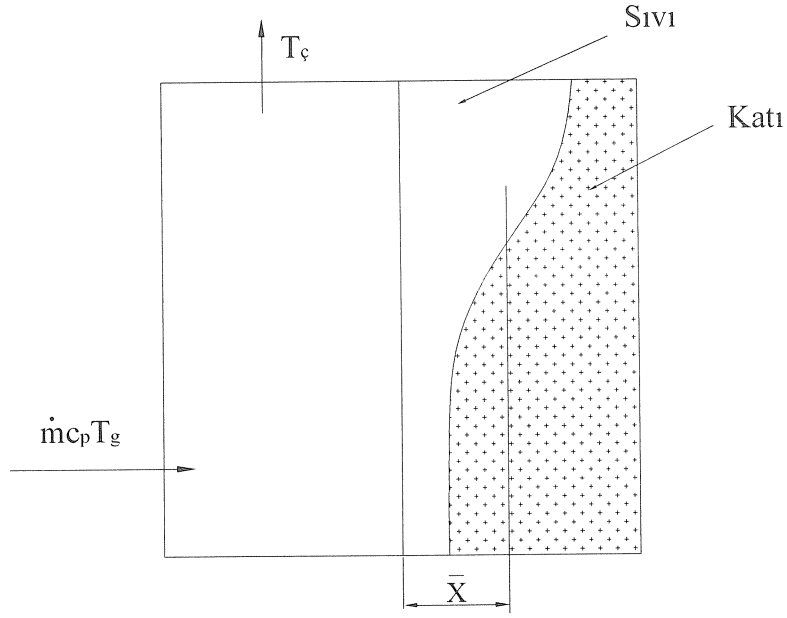
Yüksek sıcaklıkta depolama; sanayi, odaklanmış güneş yansıtıcı buhar sistemleri ve yüksek sıcaklık isteyen uygulamalarda kullanılır. Yüksek sıcaklıkta elektrik üreten güneş santrallerinde ısı transfer akışkanı ve depolama ortamı olarak alkali metal karbonat tuzları kullanılmış, fakat bunların korozyon etkisinden dolayı depolama tanklarının dizaynında bazı problemler ortaya çıkmıştır (Wang vd., 1985). Lityum-sodyum-potasyum karbonat ötektik karışımları düşük erime sıcaklığından ($T_m : 397 \text{ }^\circ\text{C}$), yüksek sıcaklıktaki iyi kararlılık özelliği ve oldukça düşük korozyon etkilerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda depolama için tercih edilir. Bu ötektik karışımla 425 °C gibi düşük çalışma sıcaklığına ulaşılabilir. Böylece duyulur ısı depolama için 425-900 °C sıcaklık aralığında çalışma imkanı doğmaktadır. Kimyasal maddeler yanında yüksek sıcaklıkta eriyen maddeler (demir ve alaşımları), beton ve kayalar bu depolama sistemlerinde kullanılır.

Termal depolama çeşidine bakılmaksızın eriyen veya katılaştan FDM, deponun şekline ve cinsine bağlı olarak bir erime katılma eğrisine sahip olur. FDM'nin erime katılma ara yüzeyinin gelişimi maddenin faz değişim süresini etkilemektedir. Depo geometrisi ve depolama malzemelerine göre bu ara yüzeyin gelişimi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Ho ve Viskanta (1984 b) yaptıkları çalışmada, yatay bir silindir içerisinde depolanan bir FDM'nin erimesi süresince katı-sıvı ara yüzeyin değişimini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Katı-sıvı ara yüzeyin gelişimi; FDM'nin erime sıcaklığı ile kaynak sıcaklığı arasındaki farka, depo geometrisine, depolama süresine ve maddenin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimine bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir. Sıvı fazın yoğunluğu katı fazdan az olan FDM'lerin şarj işlemi sırasında erimiş madde yukarıya doğru çıkar. Bu hareketlenmeden ısı depolamada yaralanmak için kurulan sistemlerin çalışması şöyledir. Bir tarafı FDM'nin erime sıcaklığının üstündeki bir sabit sıcaklıkta diğer tarafı yalıtılmış bulunan bir depo içerisinde bulunan FDM erimeye başlar. Isıtmanın başlangıcında ısı kaynağından maddeye ısı geçişi saf iletimle olurken, erime başlayınca doğal taşınım baskın hale gelir. Eriyen FDM'deki kaldırma kuvvetlerinin oluşturduğu taşınımın erime şekli üzerine etkisi zamana bağlı olarak Şekil 1.10.'da verilmiştir. Bu aşama süresince ısınan ve hafifleyen ergimiş FDM ısınan duvar boyunca yukarıya doğru katı-sıvı ara yüzey boyunca döngüsünü tamamlar. Bu akış katı-sıvı ara yüzeyi yalar ve katı yüzeye ısı transferi oluşur. Isı transferini takiben sıvı hale gelmiş FDM, katı-sıvı ara yüzey boyunca aşağı doğru akar. Eriyen FDM'nin taşınım etkisi, FDM'nin üst tabakasında erimenin daha yüksek olmasına neden olur. Böylece erime devam ederken erime şekli eğimli oluşur. Erimenin ilk aşamaları süresince maksimum erime hızı düşükken erimede taşınım baskın hale gelir (Pal ve Joshi, 2001). Ancak, erime işleminin sonuna doğru silindirik depolayıcılarda deponun en alt bölgelerindeki katı FDM'nin üzerinden akan akışkanın hızı düşeceğinden katı yüzey üzerine olan doğal taşınım etkisi azalacak ve küçük bir miktar FDM yüzünden toplam ısı depolama süresi artacaktır. Erimenin sonlarına doğru tabana yakın bölgede oluşan eğimli ölü FDM bölgesi, toplam depolama süresini uzatırken, depodan olan ısı kayıpları artar ve sistemin ısı depolama verimliği düşer.

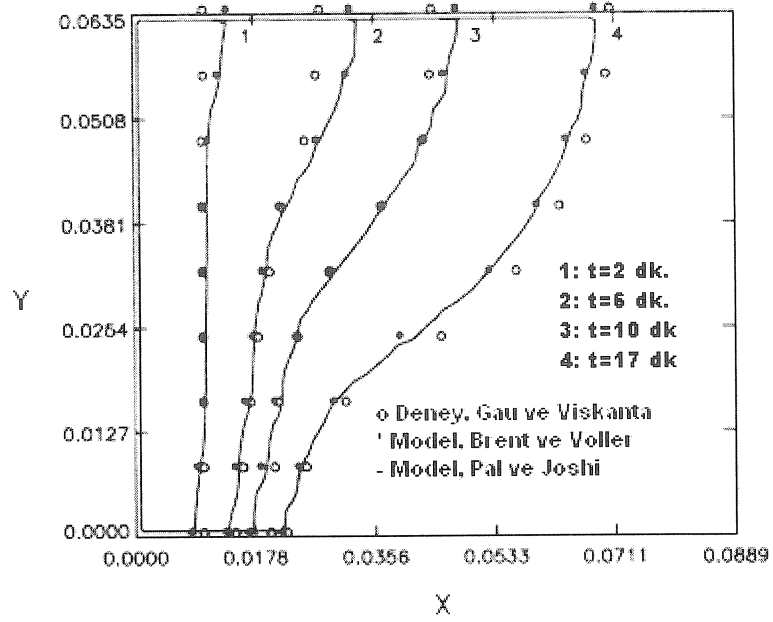


Şekil 1.10. Erimenin zamanla değişimi (Pal ve Joshi 2001).

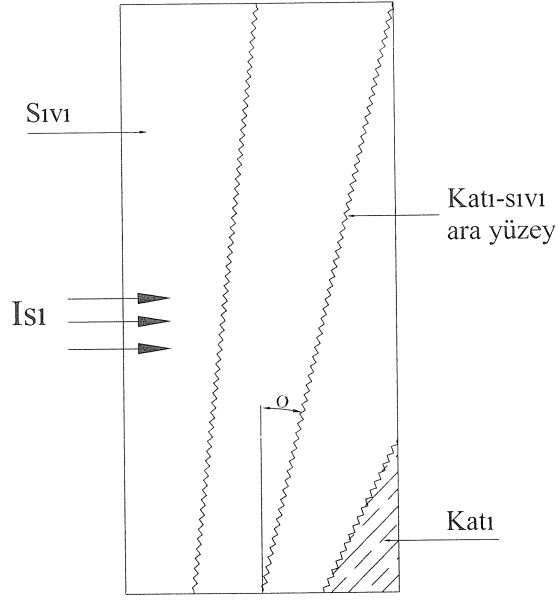
De Lucia ve Bejan (1990), FDM'nin düşey kaplar içerisindeki erime davranışını modellemiş ve modele uygun olarak katı-sıvı ara yüzeyin gelişimini belirlemiştir. Şekil 1.11.'de taşınımın baskın olduğu erimede, ortalama erimiş bölge kalınlığının değişimi verilmiştir. Pal ve Joshi (2001), katı-sıvı ara yüzeyin x ve y doğrultularındaki gelişimini zamana bağlı olarak teorik olarak incelemiş ve kendi çalışması ile diğer araştırmacıların çalışmaları arasındaki bir uyumu gösteren grafik Şekil 1.12.'de verilmiştir. FDM'nin erimesi sırasında katı-sıvı ara yüzeyin gelişimi ve ara yüzey açısının belirlenmesi üzerine Hamdan ve Al-Hinti (2004)'de ayrı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada sabit ısı kaynağı ile ısıtılan FDM'nin katı-sıvı safhasını ayıran ara yüzeyin gelişimini elde etmişler ve bu elde edilen grafik Şekil 1.13.'de verilmiştir. Burada FDM'nin katı ve erimiş bölgesinde duyulur ısı depolanırken katı-sıvı ara yüzeyinde gizli ısı depolanmaktadır.



Şekil 1.11. Taşınımın baskın olduğu erimedeki katı-sıvı ara yüzeyin gelişimi (De Lucia ve Bejan, 1990).



Şekil 1.12. Erime safhalarının karşılaştırılması (Pal ve Joshi, 2001).



Şekil 1.13. Erimenin iki safhasını ayıran ara yüzeyin gelişimi (Hamdan ve Al-Hinti, 2004).

FDM'lerle ısı depolamayı geniş ölçüde sınırlayan en önemli iki faktörün biri depo ile malzeme arasındaki korozyon diğeri de FDM'nin kullanım ömrü ve çevrim sayısıdır. Isı depolama maddelerinin kullanımında ortaya çıkan başlıca iki sorun ve çözüm yöntemi aşağıdaki gibidir.

i) Malzemelerin korozyonu

Ortamın kimyasal ve elektro-kimyasal etkilerinden dolayı metal malzemelerde meydana gelen hasara korozyon denir. Metal malzemelerden yapılmış depoların içerisine yerleştirilen FDM'ler depo malzemesi ile reaksiyona girer ve böylece, hem deponun mukavemeti zamanla azalır hem de depodan kopan parçalar FDM'nin içerisine karıştığı için FDM'nin termofiziksel özelliği değişir. Depolama sıcaklığı, depo veya FDM ile temas eden diğer metalik malzemelerdeki korozyonu oldukça etkilemektedir. Depolama sıcaklığı arttıkça korozyon reaksiyonunun hızı da artmaktadır. Diğer bir deyişle, yüksek sıcaklıkta ısı depolama sırasında FDM ile depo malzemesi arasındaki korozyon daha hızlıdır.

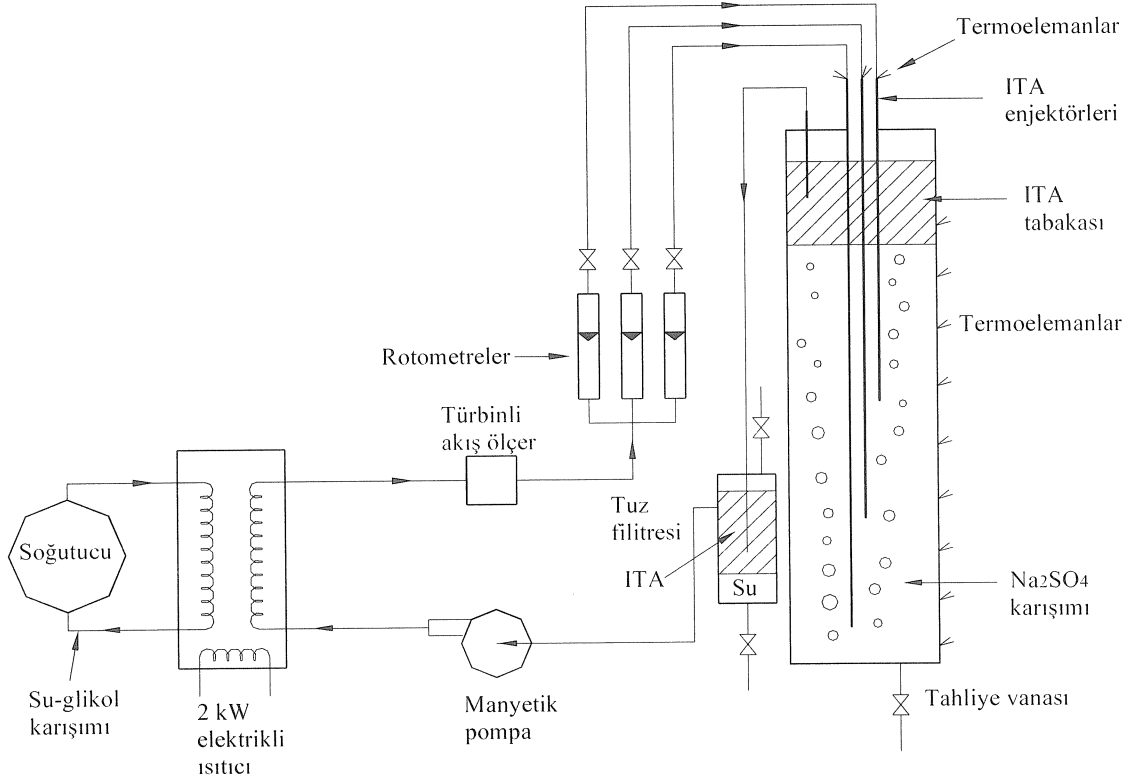
Isı depolama tankı dizayn edilirken depolama malzemesinin türü dikkate alınmalıdır. Örneğin, parafinler, metalik depo malzemesi ile reaksiyona girmezler ve uzun ömürlü bir depolama kabiliyeti gösterirler. Bunun yanında tuz hidratlar, metalik

malzemelerle kolaylıkla reaksiyona girerek aşınma oluşturabilirler ve çoğu kaynaklar tuz hidratlar kullanılarak yapılan korozyon araştırmalarını içerir. FDM'lerin korozyonu üzerine özel çalışmalar azdır ve genelde ısı depolama çalışmaları sırasında yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara dayalıdır (Sharma ve Sagara, 2005). Cabeza vd. (2001), beş yaygın kullanılan metalin (alüminyum pirinç, bakır ve paslanmaz elik) korozyon direnci üzerine çalışmıştır. FDM olarak erimiş tuz hidrat, çinko nitrit hekzahidrat, sodyum hidrojen fosfat dodekahidrat, kalsiyum klorit hekzahidrat, sodyum karbonat, potasyum hidrojen karbonat, potastum klorit, su, sodyum acetate tirihidrat ve sodyum thisulfat pentahidrat kullanılmış ve malzemelere korozyon etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Bazı araştırmacılar da erimiş tuzların yüksek sıcaklıktaki korozyon etkisini araştırmıştır (Kıncay ve renel, 2002; De Lucia ve Bejan, 1990; Garg vd., 1985; Sharma ve Sagara, 2005; Cabeza vd., 2001). Hahne (1980), 235-857 C arasında eriyen altı farklı tuz içerisinde dört farklı metalin korozyon performansını araştırmıştır (Pal, 1996).

ii) Faz ayrışması ve alt soğutma problemleri

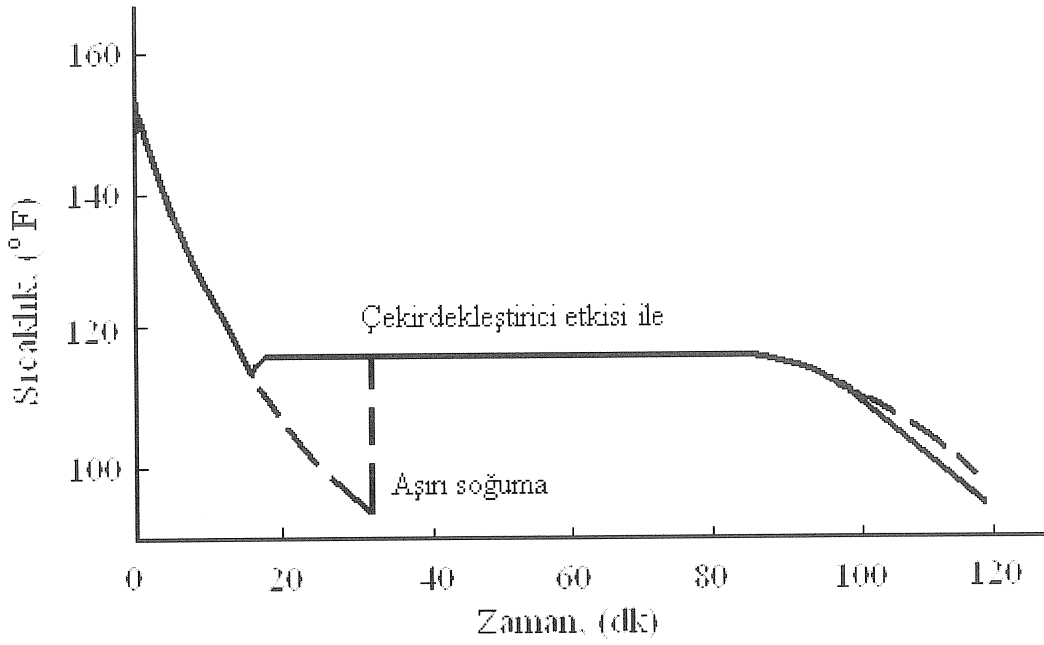
Faz ayrışması, erime katılaşma deneylerinin sürekli tekrarları durumunda, maddeyi oluşturan yapılarında bozulmalar meydana gelmesidir. FDM'nin faz ayrışmasının sonucu olarak maddelerin erime ve katılaşma sıcaklıkları değişirken ısı depolama yoğunlukları da düşer. Faz ayrışma problemi ısı depolama malzeme seçiminde önemli bir kriterdir. FDM'nin verimli çalışma ömrü, faz ayrışmanın görüldüğü şarj/deşarj çevrim sayısı ile belirlenir. Faz ayrışması görüldükten sonraki çevrimler ısı depolamanın kontrolden çıktığı ve zamanla tamamen verimsizleştiği durumdur. Yoğun olarak tuz hidratlarda faz ayrışmaları görülür. evrim boyunca tuz içerisindeki su moleküllerinin sayısı azalır ve daha düşük hidratlı tuza dönüşür. Böylece maddenin ısı depolama kapasitesi düşer (Lane 1983). Faz ayrışmasını önlemek için tuz hidratlı depolamalarda bileşikteki suyun miktarını korumak için doğrudan temas ısı depolama yöntemi önerilmektedir (Carlsson ve Wettermark, 1979). şekil 1.14.'de tuz hidratlarda doğrudan temas gizli ısı depolama düzeneği verilmiştir. Burada dikkat edilecek husus direk kontak ısı transfer akışkanını (ITA) olarak kullanılan suyun çok temiz olmasıdır. Çünkü; kullanılan su devirdaim sırasında akışkan borusu, depo ve diğer temas ettiği yüzey malzemesi ile korozyona girebilir. Doğrudan temas termal depolamada, malzeme seçimi önemli bir rol oynamaktadır (Fouda vd.,1984).

Aşırı soğutma; katılaşma esnasında maddenin katılaşma hızı yüksekse FDM'nin katılaşma sıcaklığında değil de daha alt sıcaklıklarda çekirdeklemeye başlaması ve katılaşmasıdır. Tuzun (Sodyum tiosülfat pentahidrat) katılaşması sırasında oluşan aşırı soğutma ve çekirdekleştirici etkisi Şekil 1.15.'de verilmiştir. Katılaşma eğrisinden de görüldüğü gibi FDM katılaşma sıcaklığında katılaşmayıp daha alt sıcaklıklarda katılaşmaya başlamaktadır. Ancak, zamanla sıcaklık tekrar artarak katılaşma sıcaklığına yükselmekte ve katı sıvı faz geçişi tamamlanıncaya kadar bu değerde sabit kalmaktadır. Aşırı soğutmayı önlemek için FDM'ye çekirdekleştirici madde ilavesi yapılır (Lane, 1983; Telkes, 1974).

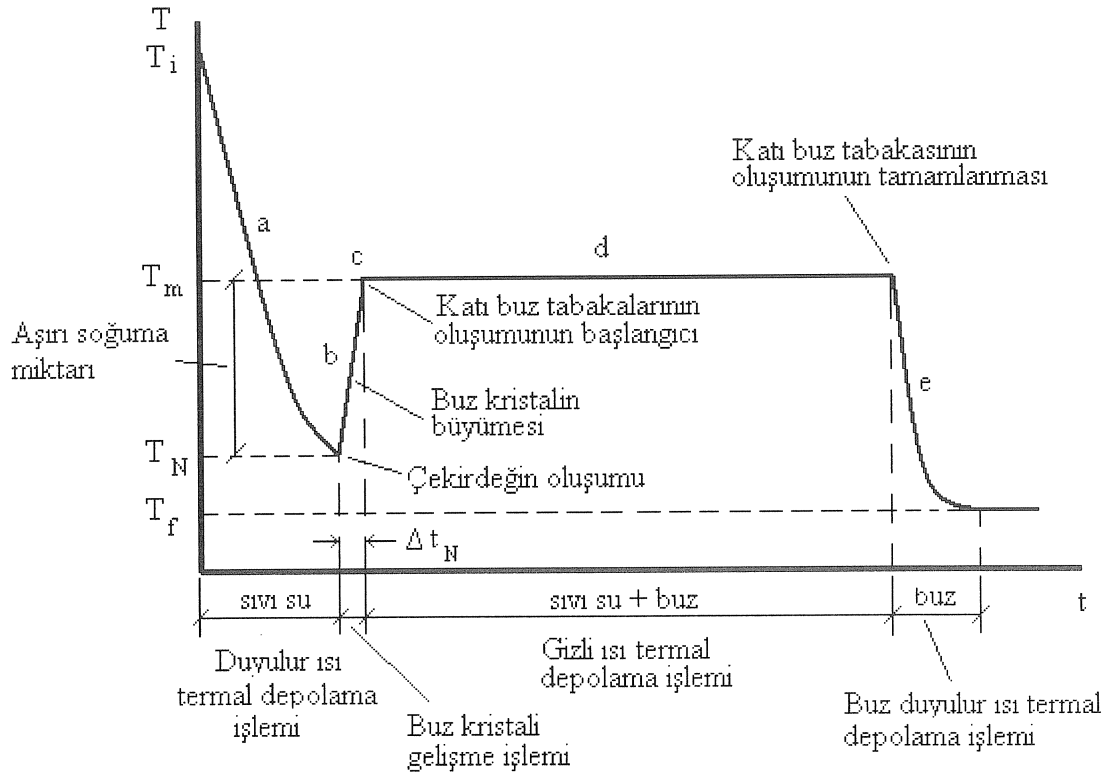


Şekil 1.14. Tuz hidratlarda direk kontak gizli ısı depolama düzeneği (Fouda vd.,1984).

Şekil 1.16.'da kapsül içerisindeki suyun donmasında katı-sıvı faz değişimi, suyun donması sırasında oluşan aşırı soğuma oluşumu ve ilk kristalin meydana gelişi ve ısı depolama şekilleri (duyulur ve gizli ısı) verilmiştir.



Şekil 1.15. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 'nun katılaşması sırasında çekirdekleştiricinin aşırı soğumaya etkisi (Telkes, 1974).



Şekil 1.16. Kapsül içerisindeki suyun soğutma işlemi sırasındaki faz değişimi (Chen vd., 2000).

Katı-sıvı faz değişimi sırasında donmuş olan FDM’de hem gizli ısı hem de duyulur ısı depolanır. Donmuş FDM’ nin sıcaklığının erime noktasına çıkması ve depo içerisinde katı-sıvı faz değişimi surerken erimiş FDM’nin sıcaklığının artması ile de duyulur ısı depolanır. FDM’nin depolama başlangıcındaki sıcaklığı, T_1 ; erime sıcaklığı, T_m ve depolama sonundaki sıcaklığı, T_2 ise maddenin depoladığı toplam ısı:

$$Q = mc_{pk} (T_m - T_1) + mh_{ks} + mc_{ps} (T_2 - T_m) \quad (2)$$

Burada m ; maddenin kütlesi, h_{ks} ; erime gizli ısısıdır.

1.3.2.3.1. Katı-Sıvı Faz Değiştiren Maddeler ve zellikleri

Kaynak sıcaklığı yükseldiğinde FDM’deki kimyasal bağlar kırılarak madde katı fazdan sıvı faza dönüşür. Faz değiştirme olayı endotermik proses olduğundan FDM dışarıdan ısı alır. Depolama maddesinde ısı depolayarak faz değişim sıcaklığına ulaşıldığında madde erimeye başlar. Erime işlemi bitinceye kadar sıcaklık sabit kalır. Maddenin faz değişimi (erime işlemi) sırasında depolanan ısı, erime gizli ısısı olarak adlandırılır.

FDM’nin erime noktası veya aralığı, erime gizli ısısı ve termofiziksel özelliğini belirlemek için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC: Differential Scanning Calorimetry) ve ısıl analiz (TA: Thermal Analysis) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Bu iki lme tekniği, yapılan ölçümlerin tipine, deneylerde kullanılan numunelerin miktarına ve sonuçların elde edilme hızına göre kendilerine has özellikler gösterir. Örneğin; DSC analizinde çok küçük miktarlarda (1-10 mg) numune kullanılarak enerji-zaman diyagramları şeklinde süratli ve güvenilir sonuçlar verir. Numunenin erime ve katılaşması esnasındaki faz geçiş sıcaklıklarının daha kesin tespit edilmesinde, erime gizli ısısı ve özgül ısı değişiminin belirlenmesinde bu yöntem kullanılır. TA tekniği, sıcaklık-zaman (T-t) diyagramlarının veya numunenin erimesi ve katılaşması esnasında kaydedilen ısıtma ve soğutma eğrilerinin çizilmesini içerir. TA tekniği, kullanılan cihaza bağlı olarak 10 g ile birkaç kg arasında değişen ağırlıkta numune kullanıldığından DSC yöntemine göre daha yavaştır (Abhat, 1983).

Gizli ısı ile duyulur ısı depolama karşılaştırıldığında gizli ısı depolama sistemini kullanmak 5 ile 10 kat daha fazla depolama kapasitesi sağlar. Faz değiştiren maddenin

depolama hacmi suyun depolama hacminden iki kat daha küçüktür (Garg vd.,1985; Hasnain, 1998 a). Faz değişimi sırasında FDM'nin çok küçük bir sıcaklık değişimiyle büyük miktarda ısı depolamak mümkündür. Bununla birlikte, sabit sıcaklıktaki faz değiştirme belli bir zamanda tamamlandığından sabit sıcaklık isteyen sistemlerin çalışmasını sorunsuz hale getirir.

Gizli ısı depolama geniş bir sıcaklık aralığında kullanılma avantajına sahiptir. İstenilen herhangi aralıkta erime gizli ısısı ile eriyen pek çok FDM vardır ve bu maddelerin erime sıcaklığı çoğunlukla sabit veya dar bir sıcaklık aralığındadır.

Katı-sıvı faz değiştiren maddelerden istenilen özellikler üç grupta toplanır (Sharma ve Sagara 2005):

1. Termofiziksel özellikler

- i) Erime sıcaklığı istenen sıcaklık çalışma aralığında olmalıdır.
- ii) Birim hacim başına yüksek erime gizli ısısına sahip olmalıdır. Bu durum gerekli depo hacmini küçültür.
- iii) İlave önemli duyulur ısı depolama işlemini sağlamak için yüksek özgül ısıya sahip olmalıdır.
- iv) Depolama sistemlerinin enerji yükleme ve boşaltmasını sağlamak için katı ve sıvı fazlarının yüksek ısı iletkenliğine sahip olması gerekir.
- v) Faz değişimi sırasında hacim değişimleri küçük olmalıdır ve depolama problemlerini azaltmak için çalışma sıcaklığındaki buhar basıncı küçük olmalıdır.
- vi) Herbir erime katılaşma çevrimi esnasında maddenin sabit depolama kapasitesi için faz değiştiren madde uygun erime noktasına sahip olmalıdır.

2. Kinetik özellikler

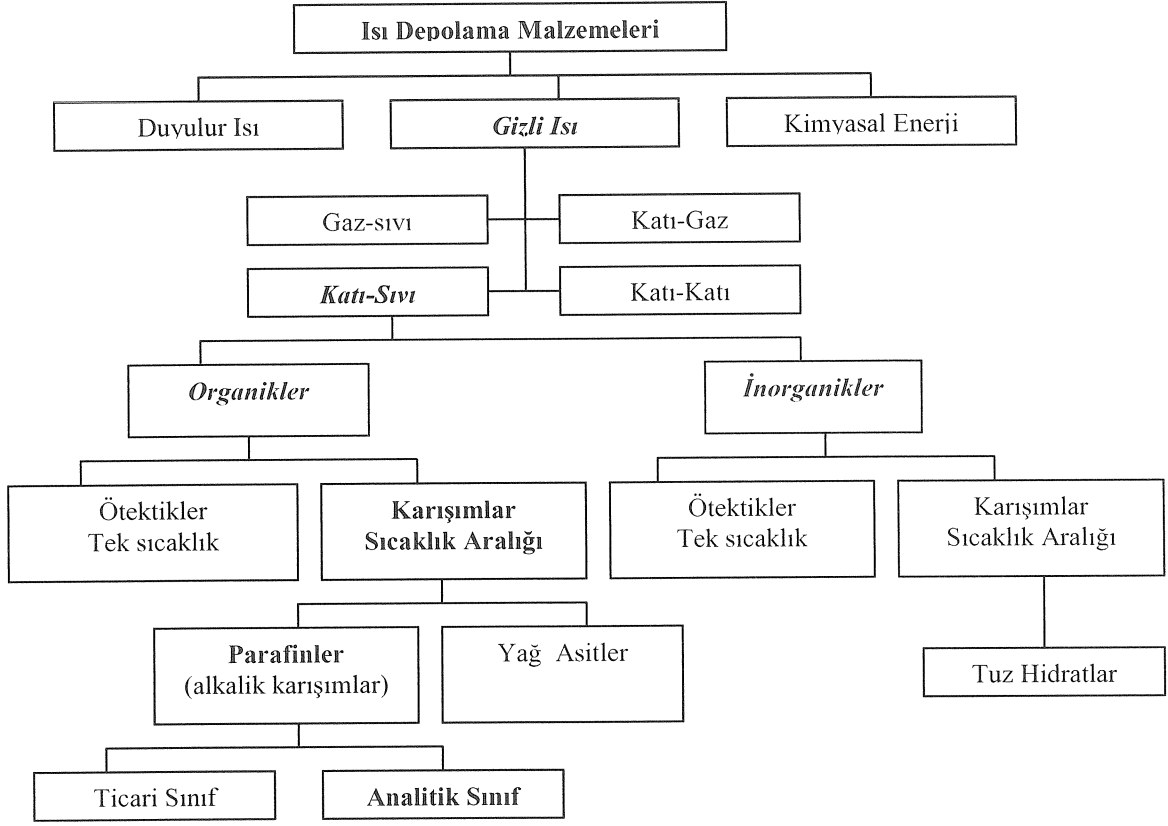
- i) Bir sıvı fazın aşırı soğumasını önlemek için yüksek çekirdekleşme hızına sahip olmalıdır.
- ii) Yüksek kristal büyüme hızına sahip olmalıdır. Bu durumda sistem depodan ısı dönüşüm ihtiyacını karşılayabilir.

3. Kimyasal özellikler

- i) Kimyasal denge (Her iki yöndeki faz değişim hızının aynı olması).
- ii) Erime/katılaşma çevriminde tam bir dönüşme (tersinirlik).
- iii) Pek çok erime katılaşma çevriminden sonra bozulmama.
- iv) Depo malzemesinde korozyon oluşturmama.
- v) Emniyet için zehirli, yanıcı ve patlayıcı olmama.
- vi) Ucuz ve bol miktarda bulunabilme.

FDM'lerin sınıflandırılması

Termal enerji depolama yöntemleri ve bununla birlikte gizli ısı depolama malzemelerinin sınıflandırılması Şekil 1.17.'de verilmiştir. Organik, inorganik ve ötektik yapıda çok sayıda faz değiştiren madde vardır. Bu maddeler, erime sıcaklığı ve dikkate değer erime gizli ısılarına göre faz değiştiren maddeler olarak tanımlanır. Bununla beraber işletme sıcaklık aralığındaki erime noktası hariç faz değiştiren maddelerin önemli bir kısmı depolama için istenen özellikleri tam sağlamaz. Gizli ısı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırılması Tablo 1.4.'de verilmiş olup, faz değiştirirken ısı depolayan organik maddelerin listesi Tablo 1.5.'de ve inorganik maddelerin listesi Tablo 1.6.'da verilmiştir. Tek bir madde ideal ısı depolama ortamı olarak gerekli tüm özellikleri sağlamadığından depolama amacı için en ucuz ve teknik olarak en uygun maddeyi kullanmak sistem dizaynı açısından önemlidir. Bu arada ısı transfer hızını ve kimyasal kararlılığı artırmak için bazı önlemler almak gerekir. Örneğin, metalik kanatçıklar kullanılarak faz değiştiren maddelere olan ısı geçişi artırılabilir (Liu vd., 2004). Diğer taraftan depolama maddesine uygun çekirdekleştirici ilave edilerek aşırı soğumanın önüne geçilebilir ve yine uygun bir yoğunlaştırıcı kimyasal madde kullanılarak uygunsuz erime olayı önlenir (Telkes, 1974). Bu maddelerin çok farklı ısı ve kimyasal davranışları için detaylı bilgiler aşağıda verilmektedir. Gizli ısı depolama sistemlerinin dizaynında bu özellikler oldukça önemlidir. Dolayısıyla maddeyi seçmeden önce istenen özelliklerin iyice bilinmesi gerekir.



Şekil 1.17. Isı depolama malzemelerinin sınıflandırılması (Zalba vd., 2003).

Tablo 1.4. Isı depolamada kullanılan organik ve inorganik maddelerin karşılaştırması (Sharma ve Sagara, 2005).

Organikler	İnorganikler
<u>Avantajları</u> Korozyon yok Aşırı soğutma yok yada az Kimyasal ve termal denge	<u>Avantajları</u> Büyük erime entalpisi
<u>Dezavantajları</u> Düşük erime entalpisi Düşük ısı Kolayca yanabilme	<u>Dezavantajları</u> Aşırı soğuma Korozyon Faz ayrışması Faz bozulması, termal dengesiz

Tablo1.5. Organik FDM' lerin listesi (Sharma ve Sagara, 2005).

Malzeme	Erime noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Malzeme	Erime noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
n-tetradekan	5.5	226	n-pentakosan	53.7	164
Formikasit	7.8	247	Miristikasit	54.0	199
n-pentadekan	10.0	205	Okzalat	54.3	178
Asetikasit	16.7	273	Tristearin	54.5	191
n-hegzadekan	16.7	237	o-ksilendiklorür	55.0	121
Kaprilon	40.0	260	β-kloroasetikasit	56.0	147
Dodesilbromür	40.0	201	n-hegzakosan	56.3	255
n-henikosan	40.5	161	∞ -nitro naftalen	56.7	103
Fenol	41.0	120	∞ -kloroasetikasit	61.2	130
n-laurikasit	43.0	183	n-oktakosan	61.4	134
P-toluidin	43.3	167	Palmitikasit	61.8	164
Syanamid	44.0	209	Balmumu	61.8	177
n-dokosan	44.5	157	Glikolikasit	63.0	109
n-trikosan	47.6	130	ρ-bromofenol	63.5	86
Hidrosinnamikasit	48.0	118	Azobenzen	67.1	121
Setilalkol	49.3	141	Akrilikasit	68.0	115
o-nitroanilin	50.0	93	2,4-dinitrotoluen	70.0	111
Kamfor	50.0	239	Fenilasetikasit	76.7	102
Difanilamin	52.9	107	Tyosinamin	77.0	140
p-diklorobenzen	53.1	121	Benzilamin	78.0	174

Parafinler

Normal parafinler, C_nH_{2n+2} tipinde olup çok yakın özelliklere sahip doymuş hidrokarbonlar gurubundandır. Parafinlerin C_5 ile C_{15} arasında olanları sıvıdır ve geri kalanları ise ($n>15$) katı veya amorfdir. Parafin wax en çok kullanılan ticari organik ısı depolama malzemesidir (Hale, vd., 1971; Lane,1983). Parafin waxlar düz zincirli hidrokarbonlar olup erime sıcaklığı 23-67 °C arasındadır (Abhat, 1983). Ticari parafin wax, petrolün damıtılmasından elde edilir ve saf değildir. Ancak, farklı hidrokarbonların bileşimidir. Genelde hidrokarbon zincirinin ortalama uzunluğundan daha uzun olan hidrokarbonlar yüksek erime sıcaklığı ve erime gizli ısısına sahiptir (Hiran vd., 1994). Bazı

parafinlerin özellikleri Tablo 1.7.'de verilmiştir. Parafinler, üreticilerden kolayca temin edilebilir ve tuz hidratlardan daha pahalıdır.

Ticari parafin waxlar orta ısı depolama yoğunluğuna ve erimenin geniş bir aralığına sahiptir. Ancak, belirli bir kimyasal formülleri yoktur ve diğer tüm özellikleri parafinle aynıdır.

Saf parafinler çok pahalıdır ve sadece deneysel çalışmalarda kullanılır. Bu nedenle çoğu araştırmacılar uygulama değerleriyle uyuşsun diye çok daha ucuz olan ticari parafini kullanmışlardır.

Parafinlerin, enerji depolama yanında gıda sektörü, sanayi, tıp, malzemelerin güvenli ve uzun süreli depolanması ve ev süs eşyaları gibi çok geniş bir kullanım alanı vardır. Örneğin, sanayide mikro kanallarda tek kullanımlık vana görevi görür. Parafinin erimesi sırasında bulunduğu kanalı açar ve sonrada donarken diğer bir kanalı kapatır veya sisteme bağlı olarak kanalı sürekli açık tutabilir. Parafin tekniği diğer mikrovalf tekniklerine göre; basit dizayn, üretim kolaylığı, düşük maliyet, karmaşık mikro akışkan sistemlere uygulama kolaylığı ve sıfır ölü hacim gibi üstünlüklere sahiptir (Liu vd., 2004, Liu vd., 2004 a ,b).

Avantajları

Parafin waxlar faz ayrışması eğiliminde değildir. Ancak, literatürde oksijene maruz bırakıldıklarında yavaş bir oksidasyon gösterdikleri belirtildiğinden kapalı kaplarda depolanmaları tavsiye edilir. Sharma vd., (1998, 1999 ve 2002), yaptıkları deneysel çalışmada ticari parafinlerin de 1500 erime/katılma çevrimi sonunda bile kararlı özelliklere sahip olduklarını göstermiştir. Parafin wax tekrarlanan erime katılma çevrimlerinden sonra ısı özelliklerde düzenli bozulma göstermez. FDM olarak kullanılan malzemelerin çok azında çevrim etkisi araştırılmıştır. Üç parafin karışımı üzerinde gerçekleştirilen deneylerle parafinlerin özellikleri üzerinde çevrimlerin etkisinin olmadığı kanıtlanmıştır (Hadjieva vd., 1992). Tablo 1.7.'de görüldüğü gibi parafinler yüksek erime gizli ısılarına sahip olup aşırı soğuma göstermezler ve dolayısıyla çekirdekleştiricilere ihtiyaç duymazlar. Parafin waxlar kimyasal reaksiyona girmez, zehirli ve patlayıcı değildir. Bu maddeler, tüm metal depolayıcılarla uyumludur ve ısı depolama sistemlerine kolaylıkla doldurulabilir. Plastik depolarda bu maddeleri kullanırken dikkatli olmak gerekir. Çünkü parafinler, plastik kaplardan sızabilirler (Lane, 1983).

Tablo 1.6. İnorganik FDM'lerin listesi (Sharma ve Sagara, 2005).

Malzeme	Erime noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)	Malzeme	Erime noktası (°C)	Gizli Isı (kJ/kg)
H ₂ O	0.0	333	BI ₃	31.8	10
POCl ₃	1.0	85	SO ₃ (β)	32.3	151
D ₂ O	3.7	318	TiBr ₄	38.2	23
SbCl ₅	4.0	33	H ₄ P ₂ O ₆	55.0	213
H ₂ SO ₄	10.04	100	SO ₃ (γ)	62.1	331
ICI (β)	13.9	56	SbCl ₃	73.4	25
MOF ₆	17.0	50	NaNO ₃	307	199
SO ₃ (α)	17.0	108	KNO ₃	380	266
ICI (α)	17.2	69	KOH	380	149
P ₄ O ₆	23.7	64	MgCl ₂	800	492
H ₃ PO ₄	26.0	147	NaCl	802	492
Cs	28.3	15	Na ₂ CO ₃	854	275
Ga	30.0	80	KF	857	452
AsBr ₃	30.0	38	K ₂ CO ₃	897	235
SnBr ₄	30.0	28			

Dezavantajları

Parafinler Tablo 1.7.'de görüleceği gibi katı hallerinde gözenekli yapısından dolayı ısı iletim katsayısı düşüktür. Bu durum katılaşma esnasında yüksek ısı transfer hızları gerektiğinden problem oluşturur. Velraj vd., (1998), bu problemin kanatçıklı kaplar ve metalik dolgu maddeleri veya gizli/duyulur ısı kombinasyonu kullanılarak azaltılabileceğini belirtmiştir. Alüminyum peteklerinin sistemin performansını iyileştirdiği bulunmuştur (Hale vd., 1971).

Parafinler, katı ve sıvı fazları arasında yüksek hacim değişmesine sahiptir. Bu durum depo tasarımında dikkate alınmalıdır. Yine literatürde parafinlerin ısı depolama kapasitelerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Tuz hidratlarının aksine ticari parafinler, genelde çok belirli erime noktaları göstermez. Parafinler yanıcı olduğundan yüksek sıcaklıktaki ısı kaynağına direk temas etmemelidir.

Tablo 1.7. Parafinlerin erime gizli ısıları ve erime sıcaklıkları (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	'C' atomu sayısı	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)
n-Dodecane	12	-12	750	0.21 ^K	-
n-Tridecane	13	-6	756	-	-
n-Tetradecane	14	4.5-5.6	771	-	231
n-Pentadecane	15	10	768	0.17	207
n-Hexadecane	16	18.2	774	0.21 ^K	238
n-Heptadecane	17	22	778	-	215
n-Octadecane	18	58.2	814 ^K (14), 775 ^S (14)	0.35 ^K (14), 0.149 ^S (14)	245
n-Nanodecane	19	31.9	912 ^K , 769 ^S	0.21 ^K	222
n-Eikosan	20	37	-	-	247
n-Heneikosan	21	41	-	-	215
n-Dokosan	22	44	-	-	249
n-Trikosan	23	47	-	-	234
n-Tetrakosan	24	51	-	-	255
n-Pentakosan	25	54	-	-	238
n-Parafin (polinerik)	-	32	785 ^K (15), 749 ^S (15)	0.514 ^K (15), 0.224 ^S (15)	251
n-Hegzakosan	26	56	770	0.21 ^K	257
n-Heptakosan	27	59	773	-	236
n-Octakosan	28	61	910 ^K , 765 ^S	-	255
n-Nonakosan	29	64	-	-	240
n-Trikosan	30	65	-	-	252
n-Hentriakontan	31	-	930 ^K , 830 ^S	-	-
n-Dotrikontan	32	70	-	-	-
n-Tritrikondan	33	71	-	-	189

K: katı S: sıvı

Parafin olmayan maddeler

Gizli ısı depolama için en geniş madde grubunu oluştururlar. Abhat (1983), parafin olmayan maddeler için esterler, yağ asitleri, alkoller ve glikollerin enerji depolama için uygun olduğunu ifade etmiştir. Bu organik maddeler daha çok yağ asitlerinin alt grupları ve parafin olmayan diğer organik maddelerdir. Yüksek değişken özelliklere sahip faz

değiştiren maddelerin çoğunluğunu parafin olmayan organikler teşkil eder. Bu maddelerin her biri, kendi özelliklerine sahip olup, parafinlerin özelliklerinden farklıdır. Bu maddeler yanıcı olduklarından yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmamalıdır. Tablo 1.8.'de parafin olmayan organikler verilmektedir.

Yağ asitleri

Yağ asitleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ kapalı formül ile ifade edilir ve parafinlerin özelliklerine benzer özellik sergiler. Yağ asitlerinin avantajı daha keskin faz değişim noktası göstermeleri, dezavantajları ise parafinlerden 2-3 kat daha pahalı olmalarıdır. Bu maddeler orta derecede koroziftir. Düşük sıcaklık gizli ısı uygulamaları için bazı yağ asitleri Tablo 1.9.'da verilmiştir. Kauranen vd. (1991) yaptığı bir çalışmada, erime noktası aralığının 20-30 °C arasında değiştiğini bulmuştur. Bu sıcaklık aralığı tasarımcıya ısı depolama sisteminin maksimum performansını elde etmek için optimum çalışma sıcaklığını seçme imkanı sağlar. Sharma vd. (1999 ve 2002), stearik asitin geniş bir sıcaklık aralığında eridiğini, iki erime noktası gösterdiğini ve farklı erime gizli ısısına sahip olduğunu belirtmiştir. Fakat bu maddeler, 1500 erime/katılma çevriminden sonra dahi kararlı halini sürdürmektedir. Farklı kullanım şartları için üretildiklerinden ticari stearik asitin kalitesi üreticilere göre değişmektedir ve böylece saflıkları için garanti verilememektedir. Bu durum termal çevrim deneylerinin sayısı artıkça stearik asitin erime gizli ısılarının azalmasına yol açmaktadır (Sarı ve Kaygusuz, 2002).

Tablo 1.8. Parafin olmayanların erime gizli ısısı ve erime noktası (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	Erime Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Gizli Isı (kJ/kg)
Formik asit	7.8	1226.7 ^{15C}	247
Asetik asit	16.7	1050 ^{20C}	187
Gliserin	17.9	1260 ^{20C}	198.7
Lityum klorür etanolat	21	n.a.	188
Polietilen glikol (PGE)	20-25	1100 ^{20C}	146
D-Lattik asit	26	1249 ^{15C}	184
1-3 Metil pentakosan	29	n.a.	197
Kamfenilon	39	n.a.	205
Dodesil brorür	40	n.a.	201
Kaprilon	40	n.a.	259
Heptadekanon	41	n.a.	201
1-Siklohegzil okta dekan	41	n.a.	218
4-Heptadekanon	41	n.a.	197
Syanamid	44	1080 ^{20C}	209
Metil eikosanat	45	851 ^{79C}	230
3-Heptadekanon	48	n.a.	218
2-Heptadekanon	48	n.a.	218
Kamfor	50	842 ^{54C}	238
9-Heptadekanon	51	n.a.	213
Metil behenat	52	n.a.	234
Pentadekanoik asit	52.5	n.a.	178
Hipofosforik asit	55	n.a.	213
Kloroasedic asit	56	1580 ^{20C}	130
Trimiristin	33-57	862 ^{20C}	201-213
Heptaadenoik asit	60.6	n.a.	189
Balmumu	61.8	950	177
Glikolik asit	63	n.a.	109
Okzasolin mum	74	n.a.	
Arahik asit	76.5	n.a.	227
Bromokamfor	77	1449 ^{81C}	174
Duren	79.3	838 ^{20C}	156
Asetamid	81	1159	241
Metil bromobenzoat	81	n.a.	126
α - naftol	96	1095 ^{98.7C}	163
Glutarik asit	97.5	1429	156
p-Ksilendiklorür	100	n.a.	138.7
Metil fumarat	102	1045	242
Katehol	104.3	1370 ^{15C}	207
Kinon	115	1318 ^{20C}	171
Asetanilid	115	1210 ^{4C}	142
Süksinik anhidrid	119	1104	204
Benzoik asit	121.7	1266 ^{15C}	142.8
Stiben	124	1164 ^{15C}	167
Benzamid	127.2	1341	169.4
Fenasetin	137	n.a.	136.7
α - Glikoz	141	1544	174
Asetil-p-toluidin	146	n.a.	180
Penilhazonebenzaldeyit	155	n.a.	134.8
Salisilik asit	159	1443 ^{20C}	199
Benzanilid	161	n.a.	162
o-mannitol	166	1489 ^{20C}	294
Hidrokinon	172.4	1358 ^{20C}	258
p-aminobenzoik asit	187	n.a.	153

Tablo 1.8.'in devamı

İsim	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal iletkenlik (W/m K)	Gizli ısı (kJ/kg)	Erime davranışı
CH ₃ COONa.3H ₂ O	58	n.a	n.a.	270-290	ic
LiC ₂ H ₃ O ₂ .2H ₂ O	58	n.a	n.a.	251-377	n.a.
MgCl ₂ .4H ₂ O	58.0	n.a.	n.a.	178	n.a.
NaOH.H ₂ O	58	n.a	n.a.	272	n.a.
Na(CH ₃ COO).3H ₂ O	58	n.a	n.a.	n.a.	n.a.
Cd(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	59	n.a.	n.a.	98	n.a.
Cd(NO ₃) ₂ .1H ₂ O	59.5	n.a	n.a.	107	n.a.
Fe(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	60	n.a	n.a.	125	n.a.
NaAl(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	61	n.a.	n.a.	181	ic
FeSO ₄ .7H ₂ O	64	n.a.	n.a.	200	n.a.
Na ₃ PO ₄ .12H ₂ O	65	n.a.	n.a.	168	n.a.
Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	68	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Na ₃ PO ₄ .12H ₂ O	69	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LiCH ₃ COO.2H ₂ O	70	n.a.	n.a.	150-251	c
Na ₂ P ₂ O ₇ .10H ₂ O	70	n.a.	n.a.	186-230	ic
Al(NO ₃) ₂ .9H ₂ O	72	n.a.	n.a.	155-176	ic
Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	78	1937 ^{84C} , 2070 ^{24C} , 2180	0.653 ^{85.7C} , 0.678 ^{98.2C} , 1.255 ^{23C}	265-280	c
Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O	88	n.a.	n.a.	218	ic
Sr(OH) ₂ .8H ₂ O	89	n.a.	n.a.	370	ic
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89-90	1550 ^{94C} , 1636 ^{25C}	0.490 ^{95C} , 0.502 ^{110C} , 0.611 ^{37C} , 0.669 ^{55.6C}	162-167	c
KAl(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	91	n.a.	n.a.	184	n.a.
(NH ₄)Al(SO ₄).6H ₂ O	95	n.a.	n.a.	269	n.a.
Na ₂ S.51/2H ₂ O	97.5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LiCl.H ₂ O	99	n.a.	n.a.	212	ic
CaBr ₂ .4H ₂ O	110	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Al ₂ (SO ₄) ₂ .16H ₂ O	112	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
MgCl ₂ .6H ₂ O	115-117	1450 ^{120C} , 1442 ^{78C} , 1569 ^{20C} , 1570 ^{20C}	0.570 ^{120C} , 0.598 ^{140C} , 0.694 ^{90C} , 0.704 ^{110C}	165-169	n.a.
NaC ₂ H ₃ O ₂ .3H ₂ O	137	1450	n.a.	172	n.a

Tablo1.9. Yağ asitlerinin erime gizli ısı ve erime noktaları (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	Erime Noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal İletkenlik (W/m)	Gizli Isı (kJ/kg)
Propil palmiat	10	n.a.	n.a.	186
İzopropil palmiat	11	n.a.	n.a.	100
Oleik asit	13.5-16.3	863 ^{60C}	n.a.	n.a.
İzopropil stearat	14-19	n.a.	n.a.	140-142
Kaprilik asit	16	901 ^{30C}	0.149 ^{39C}	148
	16.3	862 ^{80C} 981 ^{13C} 1033 ^{10C}	0.145 ^{67.7C} ,0.148 ^{20C}	149-140
Butil stearat	19	n.a.	n.a.	123-20
Dimetil sabakat	21	n.a.	n.a.	120-135
Vinil steorat	27-29	n.a.	n.a.	122
Metil palmitat	29	n.a.	n.a.	205
Kaprik asit	32	878 ^{45C}	0.153 ^{38.5C}	152.7
	31.5	886 ^{40C} .1004 ^{24C}	0.152 ^{55.5C} ,0.149 ^{40C}	153
Eurik asit	33	853 ^{70C}	n.a.	n.a.
Metil-12-hidroksi-stearat	42-43	n.a.	n.a.	120-126
Laurik asit	42-44	862 ^{60C} .1007 ^{24C}	n.a.	178
Elaidik asit	47	851 ^{79C}	n.a.	218
Pelargonik asit	48	n.a.	n.a.	n.a.
Miristik asit	49-51	861 ^{55C}	n.a.	205
	54	844 ^{80C}		
Palmitik asit	64	850 ^{65C}	0.162 ^{68.4C}	185.4
	61	847 ^{80C}	0.159 ^{80.1C}	203.4
Steorik asit	69	848 ^{70C}	0.172 ^{70C}	202.5
	60-61	965 ^{24C}		186.5
Valporik asit	120	n.a.	n.a.	n.a.

n.a.: bulunamadı

Tuz hidratlar

Tuz hidratlar, en eski ve en çok çalışılan ısı depolayıcı faz değiştiren maddelerdir (Lane, 1983). Bunlar tuz ve sudan ibaret olup madde katılaştığı zaman kristal yapıda birleşirler. Tuz hidratlar tek başına ya da ötektik karışımlar halinde kullanılabilirler. Bazı tuz hidratların özellikleri Tablo 1.10.'da verilmektedir. Pek çok tuz hidratın erime aralığı 15-117 °C arasında değişmektedir (Lane, 1983). Tuz hidratlar faz değiştiren maddelerin en önemli grubudur ve bunlar gizli ısı termal enerji depolama sistemlerinde kullanılmak için fazlaca çalışılmıştır. Erimiş tuzların üç çeşit davranışı şu şekilde verilebilir: Uygun, uygun olmayan ve yarı uygun erime. Uygun erime, susuz tuz erime sıcaklığında kendi hidrat suyu ile tamamen çözüdüğünde meydana gelir. Uygunsuz erime ise erime noktasında tuzun kendi hidrat suyu ile tamamen çözünmemesidir. Yarı uygun erime ise; sıvı ve katı fazların faz geçişi sırasında dengede olduklarında meydana gelir.

Avantajları

Düşük fiyat ve kolay elde edilebilir özelliği tuz hidratları ısı depolamada cazip yapmaktadır (Lane, 1989). Ucuz ve en çok bulunabilir iki tuz hidrat, kalsiyum klorür heksahidrat ve sodyum sülfat dekahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)'tır. Tuz hidratlar diğer ısı depolama faz değiştiren maddelerle karşılaştırıldıkları zaman keskin erime noktası ve yüksek ısı iletkenliğe sahiptirler. Bu durum depolama ünitesinde şarj ve deşarj sırasında ısı transferini artırır. Tuz hidratlar, yüksek erime gizli ısısına sahip olduklarından daha küçük depolama hacmine sahiptir. Yine tuz hidratlar diğer faz değiştiren maddelere göre daha düşük hacim değişmesi gösterir. Bu durum, depo tasarımında hacim değişmelerini dikkate fazla almayı gerektirmez.

Tablo1.10. Tuz hidratların erime gizli ısısı ve erime noktası (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)	Erime davranışı
LiClO ₃ .3H ₂ O	8	n.a.	n.a.	253	c
NH ₄ ClNaSO ₄ .10H ₂ O	11	n.a.	n.a.	163	n.a.
K ₂ HO ₄ .6H ₂ O	14	n.a.	n.a.	108	c
NaClNa ₂ SO ₄ .10H ₂ O	18	n.a.	n.a.	286	n.a.
KF.4H ₂ O	18	n.a.	n.a.	330	c
K ₂ HO ₄ .4H ₂ O	18.5	1447 ^{20C} 1455 ^{18C} , 1480 ^C	n.a.	231	n.a.
Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25	1738 ^{20C} [12]	n.a.	148	n.a.
	25.8	1728 ^{40C} [12] 1480 ^{5C} [12]	n.a.	125[12]	n.a.
LiBO ₂ .8H ₂ O	25.7	n.a.	n.a.	289	n.a.
FeBr ₃ .6H ₂ O	27		n.a.	105	n.a.
CaCl ₂ .6H ₂ O	29-30	1562 ^{32C} , 1802 ^{24C}	0.561 ^{61.2C} , 1.008 ^{23C}	170-192	ic
LiNO ₃ .3H ₂ O	30	n.a.	n.a.	189-296	c
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32	1485 ^{24C}	0.544	251-254	ic
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	33-36	1442	n.a.	247	ic
KFe(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	33	n.a.	n.a.	173	ic
CaBr ₂ .6H ₂ O	34	1956 ^{35C} , 2194 ^{24C}	n.a.	115-138	
LiBr.2H ₂ O	34	n.a.	n.a.	124	ic
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	35	1522	n.a.	256-281	ic
Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36	1828 ^{36C} , 2065 ^{14C}	1937 ^{24C} , 0.464 ^{39.9C} , 0.469 ^{61.2C}	134-147	c
Mn(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	37	n.a.	n.a.	115	n.a.
FeCl ₃ .6H ₂ O	37	n.a.	n.a.	223	c
CaCl ₂ .4H ₂ O	39	n.a.	n.a.	158	ic
CoSO ₄ .7H ₂ O	40.7	n.a.	n.a.	170	n.a.
CuSO ₄ .7H ₂ O	40.7	n.a.	n.a.	171	n.a.
KF.2H ₂ O	42	n.a.	n.a.	162-266	c
MgI ₂ .8H ₂ O	42	n.a.	n.a.	133	v
CaI ₂ .6H ₂ O	42	n.a.	n.a.	162	n.a.

Tablo1.10.'nin devamı

İsim	Erime noktası (°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (W/mK)	Gizli ısı (kJ/kg)	Erime davranışı
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	43-47	n.a.	n.a.	106-140	c
Zn(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	45	n.a.	n.a.	110	n.a.
K ₃ PO ₄ .7H ₂ O	45	n.a.	n.a.	145	n.a.
Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	47	n.a.	n.a.	155-190	ic
Mg(NO ₃) ₃ .4H ₂ O	47	n.a.	n.a.	142	n.a.
Na ₂ SiO ₃ .5H ₂ O	48	n.a.	n.a.	168	n.a.
Na ₂ HPO ₄ .7H ₂ O	48	n.a.	n.a.	135-170	ic
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48	1600	n.a.	209	n.a.
K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	48	n.a.	n.a.	99	n.a.
MgSO ₄ .7H ₂ O	48.4	n.a.	n.a.	202	n.a.
Ca(NO ₃) ₂ .3H ₂ O	51	n.a.	n.a.	104	n.a.
Na(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	53	n.a.	n.a.	158	n.a.
Zn(NO ₃) ₂ .2H ₂ O	55	n.a.	n.a.	68	c
FeCl ₃ .2H ₂ O	56	n.a.	n.a.	90	n.a.
CO(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	57	n.a.	n.a.	115	n.a.
Ni(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	57	n.a.	n.a.	168	n.a.
MnCl ₂ .4H ₂ O	58	n.a.	n.a.	151	n.a.

c.: uygun, ic.: uygun değil

Dezavantajları

Faz ayrışmasıyla diğer hidratların oluşmasına sebep olur (Sudan ayrılan tuzlar dibe çöker). Bu durum ısı depolama için kullanılabilir aktif hacmin azalmasına yol açar. Abhat (1983), sodyum sülfat dekahidrat (Na₂SO₄.10H₂O : Glauber tuzu) 1000 erime/katılma çevriminden sonra erime gizli ısısının %73'den fazlasının azaldığını bildirmiştir. Bu problem koyulaştırıcı karışım kullanılarak çözülebilir (Lane, 1983).

Tuz hidratlar diğer faz değiştiren maddelerin Katılma noktalarında kristalleşmeye başlamadıklarından aşırı soğuma gösterir. Bu durum uygun çekirdekleştirici kullanılarak önlenir. Çok bilinen tuz hidratlar için çekirdekleştirici maddelerin geniş bir listesi Lane (1983) tarafından verilmiştir. Diğer taraftan Abhat (1983), deneyler açık kaplarda yapıldığı zaman sadece iki çevrim sonunda kalsiyum klorür heksahidrat'da faz ayrışmasını tespit

etmiştir. Bundan dolayı depoların tasarımında suyun uzaklaşmaması için sızdırmayan kaplar kullanılmalıdır. Tuz hidratlar için diğer bir problem metal kaplarda korozyon etkileridir. Dolayısıyla tuzlar depolamada kullanılmadan önce depolama malzemesiyle uyumları test edilmelidir.

Ötektikler

Ötektik, iki ya da daha fazla maddenin minimum erime bileşimine sahip olmasıdır. Burada ötektiği oluşturan her bir madde uygun bir şekilde erir ve donar. Böylece kristalleşme esnasında bileşen kristalinin bir karışımı meydana gelir. Ötektikler, genelde faz ayrışması olmaksızın erir ve katılaşır. Çünkü onların yeni karışımı, herbir maddenin kendi kristalleri oluncaya kadar donarlar. Erime durumunda ise, ötektiği meydana getiren her iki kristal kendiliğinden sıvılaşır ve birbirinden ayrılır. Geliştirilen ötektiklerin bir listesi Tablo 1.11.'de verilmiştir.

Çapraz Bağlı Polietilen

Çapraz bağlı polietilen, plastik şişelerin yapımında kullanılan polietilene oldukça benzerdir. Sıvı-katı FDM'ye benzer şekilde kristal yapısının oluşma ve bozulmasında enerji depolar. İki çapraz bağlı polietilenlerin özellikleri Tablo 1.12.'de verilmiştir. Çapraz bağlı polietilen sıvı-katı FDM'den daha karardır ve diğer maddelerle birlikte kapsız kullanılabilir.

Avantajları

Diğer FDM'lere göre fiyatının yüksek olmasına rağmen onlar bir kapalı bir kaba (kapsül) ihtiyaç duymazlar. Böylece tüm ısı depolama sistemi için maliyet düşük olur ve bu nedenle diğer FDM'e göre daha ekonomiktir. Çapraz bağlı polietilen zehirleyici değildir ve kimyasal olarak da diğer maddelerle reaksiyona girmez.

Tablo1.11. Organik ve inorganiklerin (ötektik) listesi (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	Bileşimi (% ağırlık)	Erime Noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
Na ₂ SO ₄ +NaCl+KCl+H ₂ O	31+13+16+40	4	234
Na ₂ SO ₄ +NaCl+NH ₄ Cl+H ₂ O	32+14+12+42	11	-
C ₅ H ₅ C ₆ H ₅ +(C ₆ H ₅) ₂ O	26.5+73.5	12	97.9
Na ₂ SO ₄ +NaCl +H ₂ O	37+17+46	18	-
Na ₂ S ₄ +MgSO ₄ +H ₂ O	25+21+54	24	-
C ₁₄ +H ₂₈ O ₂ +C ₁₀ H ₂₀ O ₂	34+66	24	147.7
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O+Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	47+53	30	136
NH ₂ CONH ₂ +NH ₄ NO ₃	-	46	95
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+NH ₄ NO ₃	61.5+38.4	52	125.5
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+MgCl ₂ .6H ₂ O	58.7+41.3	59	132.2
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+Al(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	53+47	61	148
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O+MgBr ₂ .6H ₂ O	59+41	66	168
Naftalin + Benzoik asit	67.1+32.9	67	123.4
AlCl ₃ +NaCl+ZrCl ₂	79+17+4	68	234
AlCl ₃ +NaCl+KCl	66+20+14	70	209
NH ₂ CONH ₂ +NH ₄ Br	66.6+33.4	76	151
LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ +NaNO ₃	25+65+10	80.5	113
AlCl ₃ +NaCl+KCl	60+26+14	93	213
AlCl ₃ +NaCl	66+34	93	201
NaNO ₂ + NaNO ₃ +KNO ₃	40+7+53	142	-

Dezavantajları

Çalışma sıcaklıkları 110-140 °C arasında değiştiğinden ortam ve su ısıtma uygulamaları için uygun değildir. Literatürdeki bilgilere göre, ısı depolama için ticari üretimi yoktur.

Polialkoller

Polialkoller, enerjiyi yapılarını daha düşük sıcaklıklardaki heterojen halden daha yüksek sıcaklıklardaki yüzey merkezli kübik forma dönüştürerek depolarlar (Wang vd., 2000 a). Polialkoller, katı sıvı FDM'lere göre küçük hacim değişmesi ve maddenin bozulmaması gibi pek çok avantaja sahiptir (Wang vd., 2000 b). Bu avantajların yanında

düşük gizli ısı, yüksek faz değiştirme sıcaklığı ve yüksek maliyet gibi dezavantajlar dikkate alınmaz.

Tablo1.12. Bazı seçilmiş katı-katı FDM'lerin erime gizli ısı ve erime noktaları (Sharma ve Sagara, 2005).

İsim	Erime Noktası (°C)	Gizli ısı (kJ/kg)
%38.2 NPG+%61.8 PE	26–32	18–75
%38.2 NPG+%61.8 TAM	22–35	27–33
%76.4 NPG+%33.6 TAM	28–38	75–80
%76.4 NPG+%33.6 PE	31–37	35–46
%91 NPG+%9 PE	31–36	68
%91 NPG+%9 TAM	30–39	143–150
Neopentilglükol (NPG)	43	130
Diaminopentakritrit	68	184
2-amino-2-metil-1,3-propandiol	78	264
2-metil-2-nitro-1,3-propandiol	79	201
Trimetiletan	81	192
Pentagliserin	81	192
2-hidroksimetil-2-metil-1,3-propandiol	81	192
Monoaminopentaeritritol	86	192
Çapraz bağlı polietilen	110–115	125–146
Tris (hidroksimetil) asetik asit	124	205
2-amino-2-hidroksimetil-1,3-propandiol	131	285
Çapraz bağlı HDPE	125–146	167–201
2,2-Bis (hidroksimetil) propiyonik asit	152	289
%38.2 NPG +%61.8 PE	170	147
Pentaeritritol	185	303

Termal enerji depolama malzemelerinden en genel olarak istenen özelliklerin karşılaştırması Tablo 1.13.' de verilmiştir.

Tablo1.13. FDM'den termal depolamada istenen önemli özelliklerinin karşılaştırması (Sharma ve Sagara, 2005).

Termal Özellikler	Fiziksel Özellikler	Kimyasal Özellikler	Ekonomik Özellikler
Uygulamalar için uygun faz değişim sıcaklığı	Düşük yoğunluk değişimi	Denge	Ucuz olma ve kolay temin edilebilme
Kullanım sıcaklığı etrafında yüksek entalpi değişimi	Yüksek yoğunluk	Faz ayrışması yok	
Hem sıvı hem de katı fazlarda yüksek ısı iletkenliği	Aşırı soğutma yok yada küçük (önemsiz)	Maddeler depo ile bir arada olabilirler	
		Zehirsiz, yanmaz ve kirliliğe neden olmazlar	

1.3.2.3.2. Katı-Sıvı Faz Geçişinde Gizli Isı Depolama Şekilleri ve Depolayıcılar

Depo dizaynında; ısı depolama miktarı, FDM cinsi ve depolama süresi birincil etkiye sahipken, kullanılacak izolasyonun miktarı, tank malzemeleri ve basınç ikincil etkilidir. Çelikten yapılmış basınca dayanıklı tanklar sıklıkla su için kullanılırken beton, fiberglas ve alüminyum büyük depolama için tank malzemesi olarak kullanılabilir. Katı faz depolama malzemeleri olarak üste sayılanlarla birlikte ağaç depolarda kullanılabilir. Tüm depolar, sızdırmaz, sıcak çevrime uyumlu ve korozyon direncine sahip olmalıdır. Çelik tanklar farklı boyut ve basınçlarda imal edilirken beton tanklar basınca dayanamaz ve sızdırmazlığı zordur.

Bir termal enerji deposunun imalatına başlamadan önce, depolama şartları ve enerji ihtiyacı belirlenmeli ondan sonra FDM'nin cinsi ve depo geometrisi belirlenmelidir. Zhang (2001), yaptığı bir çalışma ile bir hibrid termal enerji depolama sisteminin tasarım kriterlerini ve deponun performansını ortaya koymuştur.

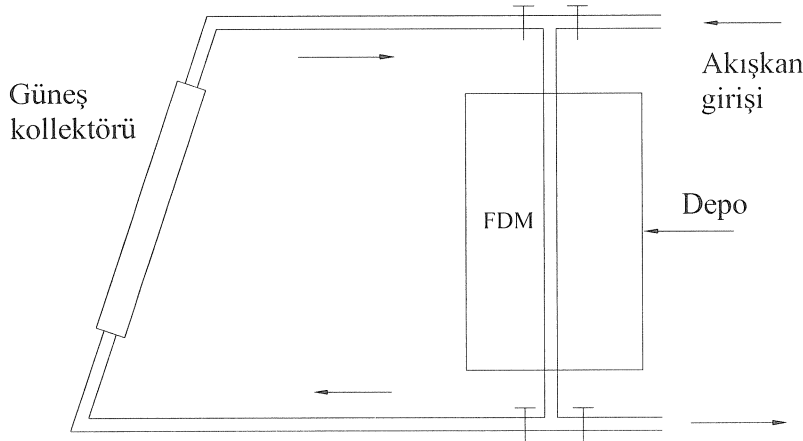
Küresel tank malzeme gereksinimleri ve ısı kayıplarını minimize etmek için ideal bir seçimdir. Ancak, küresel tankları üretmek zordur (Cho ve Choi, 2000).

Çok farklı termal enerji kaynağından FDM ile gizli ısı depolaması yapılırken, güneş enerjisi ile gizli ısı depolayan basit bir sistem Şekil 1.18.'de verilmiştir. Ancak; bu sistemde FDM'nin içerisine konulduğu deponun şekli farklı olabilir. Literatürde çok farklı depolama sistemleri olup, genel olarak üç grupta toplanabilir.

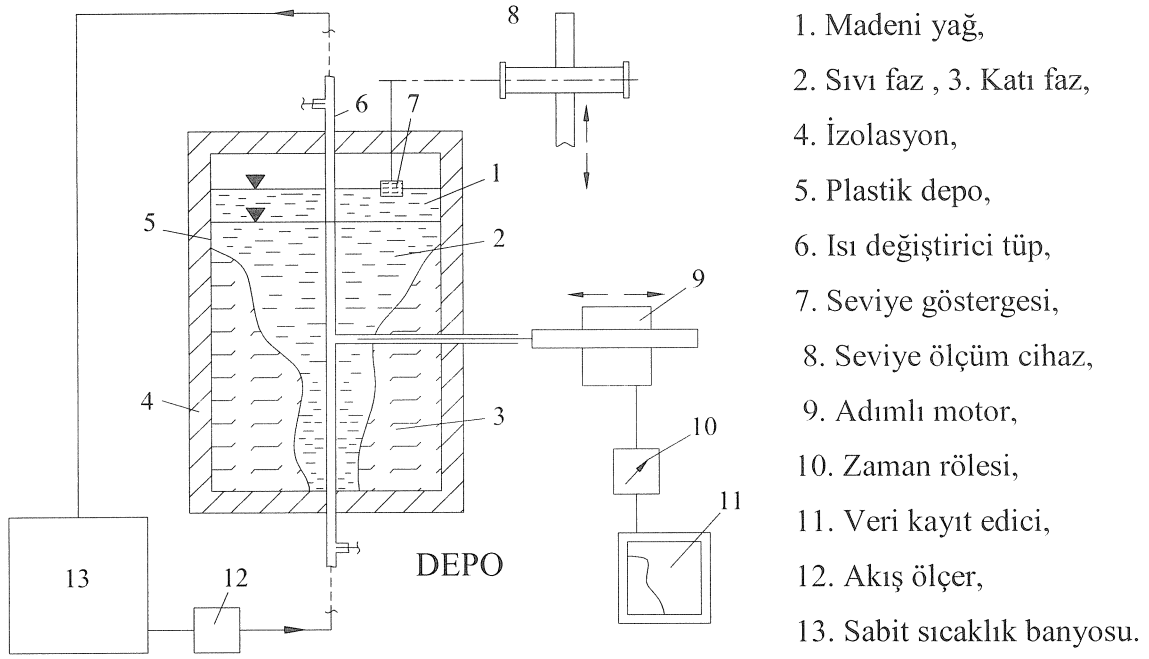
1. FDM'ler depo içerisine tek parça olarak yerleştirilir. Depolar; silindir, küp, spiral ve konik gibi geometrilere sahip olabilir. Bu geometrilere yaygın olarak kullanılan üç tip depolama sisteminin şematik görünüşü aşağıda verilmiştir. Bunlardan silindirik depolama geometrisi Şekil 1.19.'da, spiral depolama geometrisi Şekil 1.20.'de verilmiştir. FDM depolayıcı olarak spiral geometri kullanılması durumunda akışkanın aktığı ısı transfer alanı arttığı için depolama süresi ve depo boyu kısalmışken depolama performansı artmaktadır (Banaszek vd., 1999). Şekil 1.21.'de soğuk depolamada kullanılan kanatçıklı yatay silindirik bir depo verilmiş olup, bu geometri ile yatay tekli silindirik depolama sisteminde FDM'nin katı fazının düşük iletim katsayısının mahsurları giderilmeye çalışılır.

2. FDM'ler daha küçük kaplara (silindirik ve dikdörtgen prizmalar, bal mumu geometrisi veya küresel kapsüller vb.) konularak depo içerisine yerleştirilir. Bunlara çoklu depolama da denilir. Çoklu depolama sistemlerine örnekler Şekil 1.22.- Şekil 1.26.'da verilmiştir. Depolama kapları depo içerisine; sistemin depolama kapasitesine, FDM türüne, eğer ısıtıcı varsa ısıtıcının gücüne veya ısı transfer akışkanının cinsi, debisi ve sıcaklığına bağlı olarak değişik şekillerde yerleştirilir.

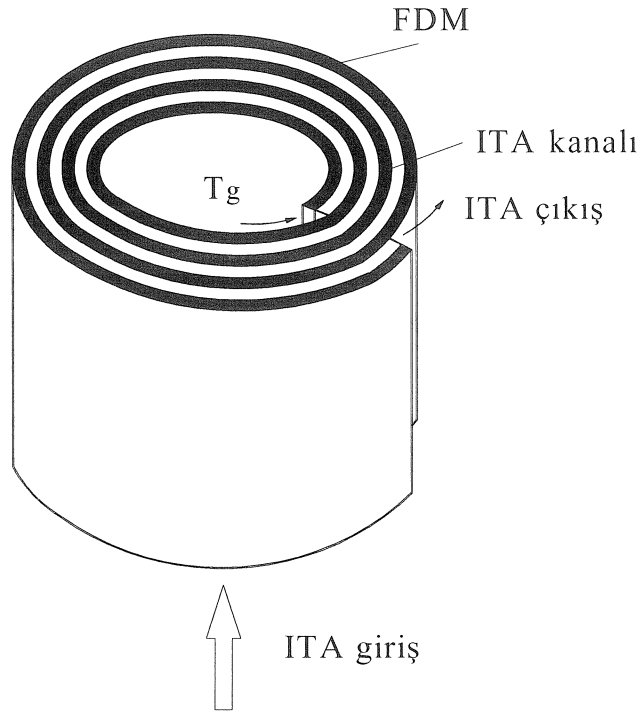
3. Mevcut ısıdan daha verimli faydalanmak için bir depo içerisine farklı erime sıcaklığına sahip FDM'ler art arda yerleştirilir. Bu depolama şekli çoklu FDM ile depolama olarak adlandırılır. Bu sistemlere örnekler ise Şekil 1.27. ve Şekil 1.28.'de verilmiştir (Kılıkış ve Kakaç, 1988; Wang vd., 2001; Gong, 1996).



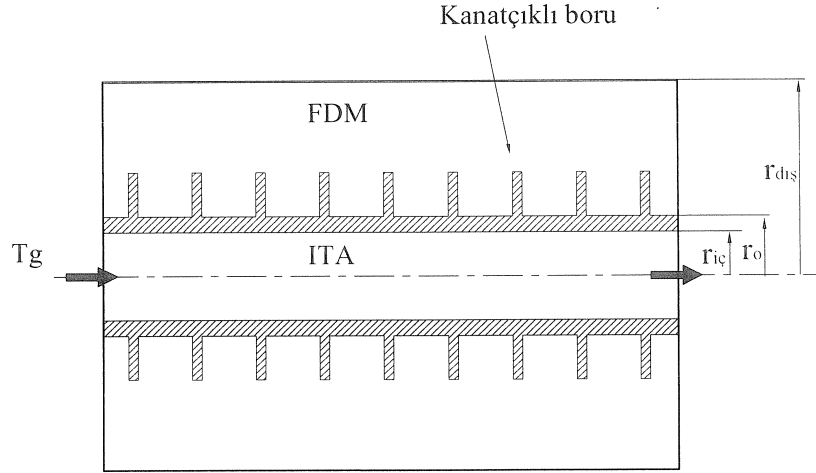
Şekil 1.18. Basit bir güneş enerjisinin FDM ile depolama sistemi (Sharma ve Sagara, 2005).



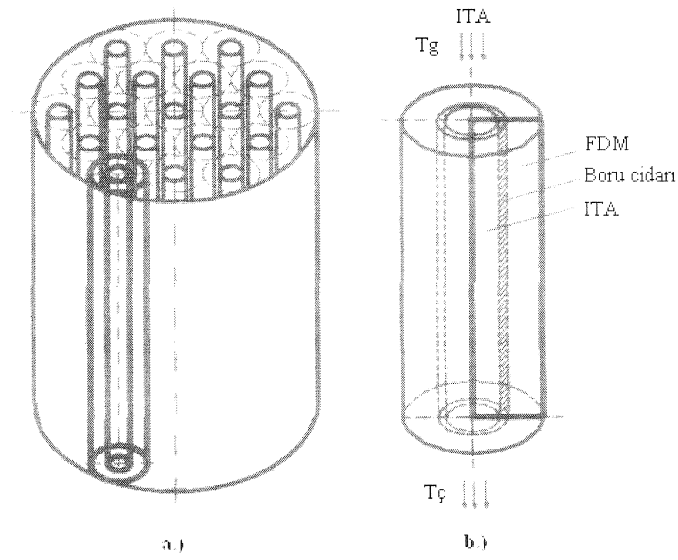
Şekil 1.19. Silindirik tekli parça gizli ısı depolama sistemi (Carlsson ve Wettermark, 1979).



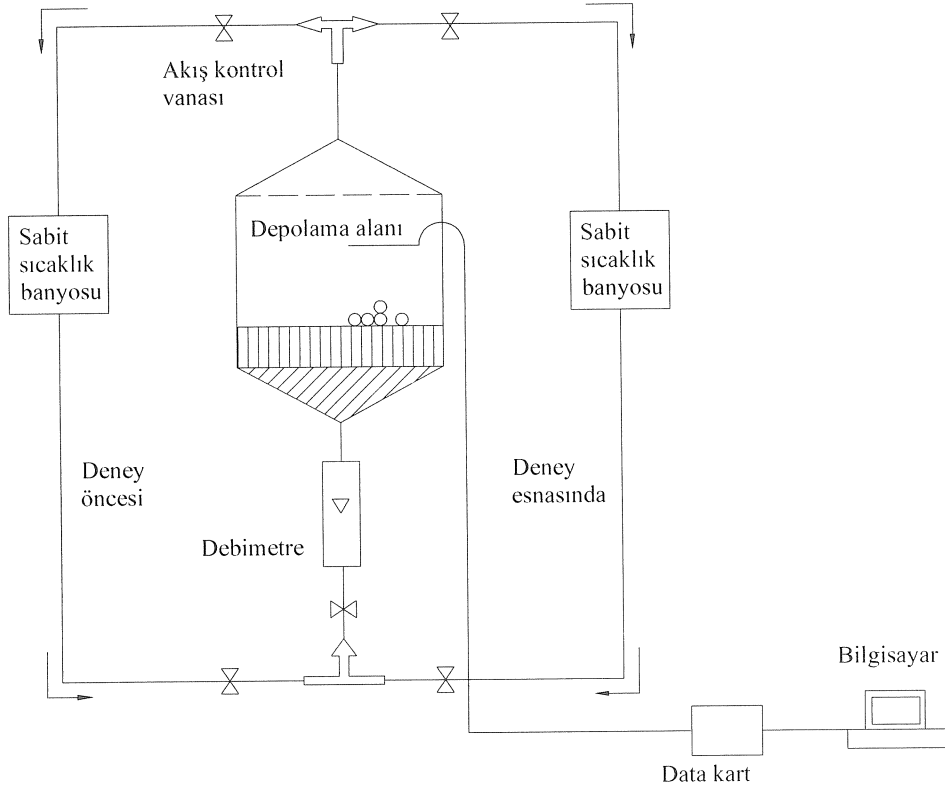
Şekil 1.20. Arşimet spiral geometrisi ile tekli gizli ısı depolama sistemi (Banaszek vd., 1999).



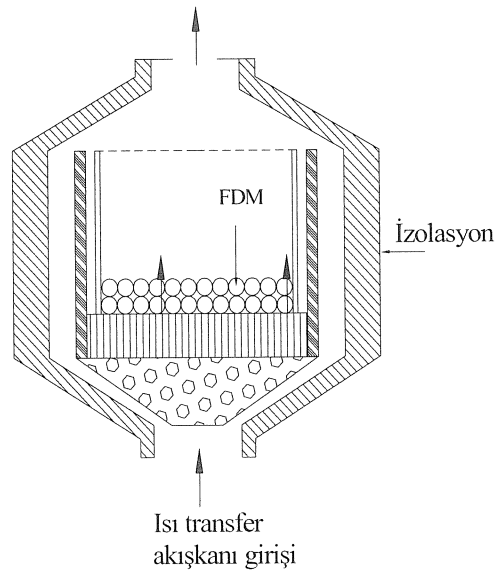
Şekil 1.21. Kanatçıklı gizli ısı depolama sistemi (Erek vd., 2005).



Şekil 1.22. Silindirik çoklu termal enerji depolama sistemi (Trp, 2005).

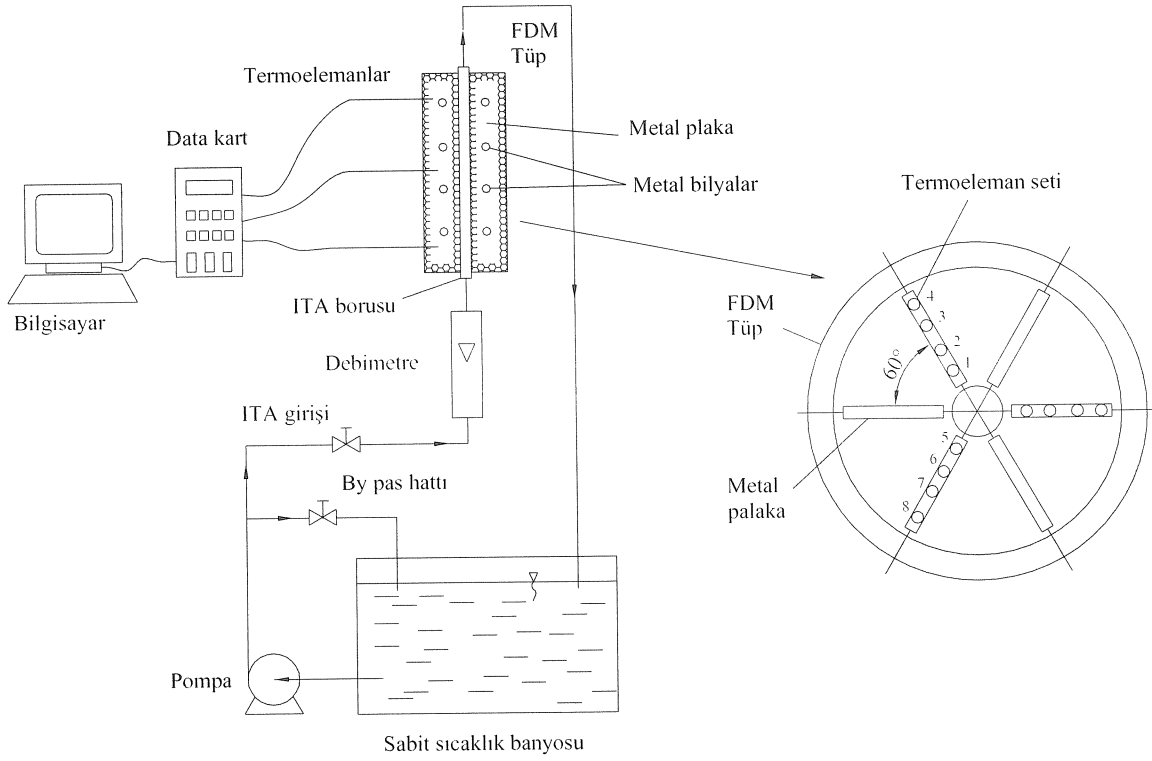


a)

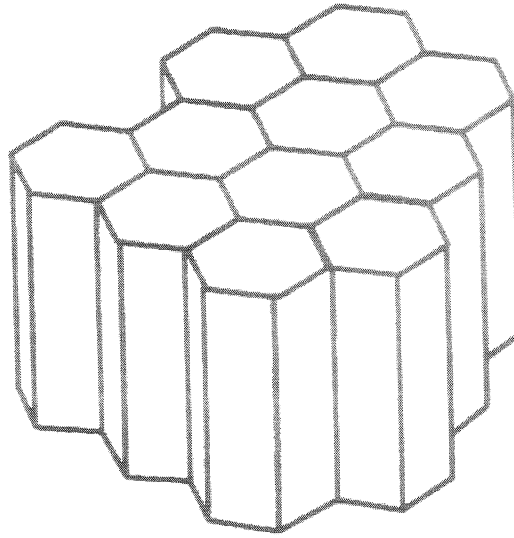


b)

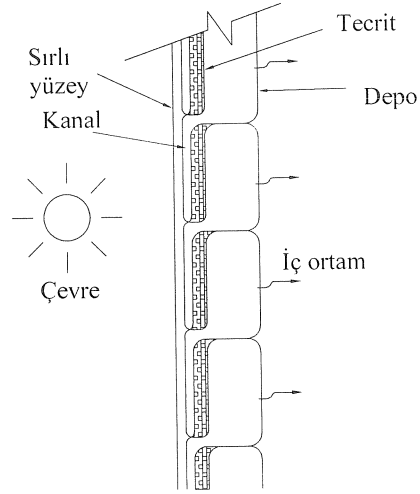
Şekil 1.23. Küresel kapsüllerle çoklu depolama sistemi (a. Termal depolama sistemi, b. küresel kapsüllerin yerleştirildiği depo) (Cho ve Choi, 2000).



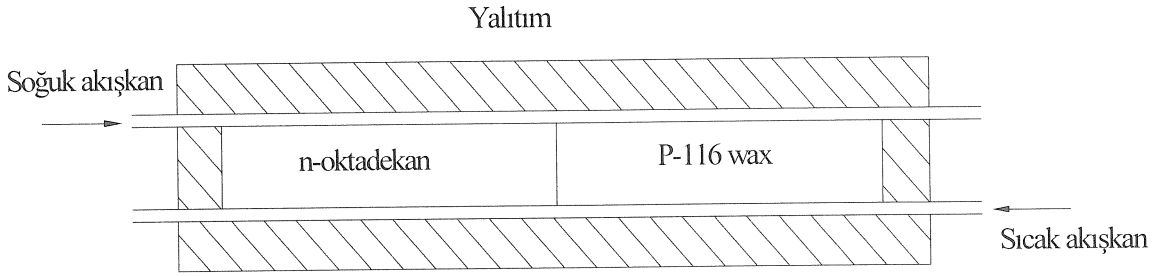
Şekil 1.24. FDM'nin termal depolama hızını ve kapasitesini artırmak için kurulan sistem (Ettouney vd., 2004).



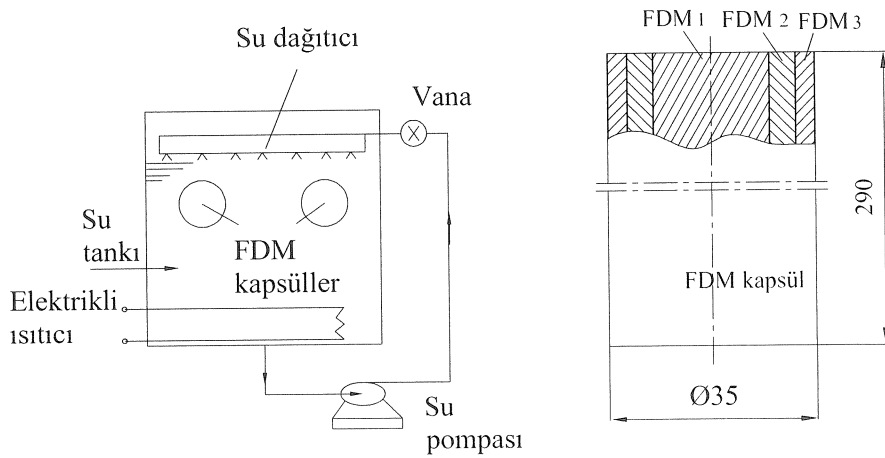
Şekil 1.25. Bal peteği geometrisi ile çoklu depolama (Pal,1996).



Şekil 1.26. Bina duvarlarında kullanılan doğrudan temaslı çoklu depolama (Kılkış ve Kakaç, 1988).



Şekil 1.27. Ardışık yerleştirilmiş çoklu FDM'li termal depolama (Farid vd., 2004).



Şekil 1.28. Silindirik çoklu FDM'li gizli ısı depolama sistemi (Wang vd., 2001).

1.3.3. Termokimyasal Depolama

Orta sıcaklıktaki bir kaynaktan endotermik reaksiyonla ısı alan ve ekzotermik reaksiyonda yüksek sıcaklıkta istenen ortama veren, tersine reaksiyonlardan oluşan termal depolamaya termokimyasal depolama (TKD) denir. Bina ısıtma soğutma ve seracılık gibi düşük sıcaklık uygulamaları için ısının depolanmasında kimyasal reaksiyonları kullanmak, duyulur ve gizli ısı depolama maddelerini kullanmaya göre bazı avantajlar sağlar. Bunlar:

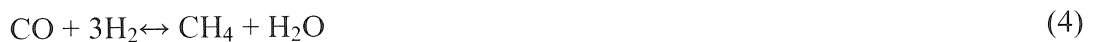
- i) Isı, çevre sıcaklığında depolanabilir. Bundan dolayı deponun yalıtımı önemli değildir.
- ii) Isı, özel kollektörler olmaksızın çevreden alınabilir ve böylece depolama sisteminin maliyeti düşer.
- iii) Şarj/deşarj sıcaklıkları sabit tutulabilir.
- iv) Kimyasal reaksiyonlarla ısı depolama kapasitesi belirli bir depo hacmi için daha büyüktür.
- v) Isı kayıpları olmaksızın uzun süreli depolanabilir ve kolayca taşınabilir.

Bu avantajlar yanında kullanılan kimyasal maddeler ucuz olmalı, reaksiyon sonucu üretilen ürünlerin saklanacağı depoların maliyeti düşük olmalı ve kimyasalların zehirlenme, yanma ve patlama gibi olumsuzluklarına karşı emniyet tedbirleri alınmalıdır. Termokimyasal depolamaya en çarpıcı örnek olarak hidrojen üretimi verilebilir. Güneş enerjisinin kullanıldığı dört hidrojen üretimi yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar; direk ısı, termokimyasal, elektrolitik ve fotolitik yöntemdir (Kaygusuz, 1992; Kıncay ve Örenel, 2002).

Reaksiyon sıcaklığında reaktanların gaz olması reaksiyonun kontrolünü ve çevre sıcaklığında ürünlerin sıvı olması da depolamayı kolaylaştırdığı için tercih edilirler. Bu şartları yerine getiren en uygun olanı aşağıda reaksiyonu verilen sülfür ile suyun reaksiyonudur.



Ancak, H_2SO_4 ayrışma ürünlerinin davranışları mükemmel değildir. Bileşenlerinin çoğu gaz olan alternatif reaksiyonlar da vardır. Gaz reaktanlara aşağıdaki iki örnek verilebilir:





Ayrıca su buharı, 2700 °C ve daha yukarı sıcaklıklarda ısıtılırsa hidrojen ve oksijeni ayrışmaya başlar ve bu reaksiyon;



şeklinde ifade edilebilir. Burada m_1 , m_2 ve m_3 mol kesirleri olup maddeler gaz halindedir. Sıvı ve gaz reaktanların genel bir listesi Tablo 1.14.'de verilmiştir.

Tablo 1.14. Katı bileşenleri içermeyen TKD reaksiyonları (Kıncay ve Örenel 1992).

Reaksiyon										Reaksiyon Entalpisi 25 °C (kJ/kg)	Sıcaklık °C		
<div style="text-align: center;"> Ekzotermik \longleftrightarrow Endotermik </div>											% 90 Oluşma	%90 Ayrışma	
CO	g	+	3H ₂	g	\longleftrightarrow	CH ₄	g	+	H ₂ O	s	7345	-	-
CO	g	+	3H ₂	g	\longleftrightarrow	CH ₄	g	+	H ₂ O	g	6053	481	1193
C ₂ H ₄	g	+	H ₂	g	\longleftrightarrow	C ₂ H ₆	g				4561	568	932
2CO	g	+	2H ₂	g	\longleftrightarrow	CH ₄	g	+	CO ₂	g	4118	505	879
CO	g	+	2H ₂	g	\longleftrightarrow	CH ₃ OH	s				3996	72	161
N ₂	g	+	3H ₂	g	\longleftrightarrow	2NH ₃	s				3861	-	-
N ₂	g	+	3H ₂	g	\longleftrightarrow	2NH ₃	g				2695	73	255
2NO	g	+	O ₂	g	\longleftrightarrow	N ₂ O ₄	s				1750	276	657
SO ₂	g	+	Hava		\longleftrightarrow	SO ₃	g				1544	533	997
SO ₂	s	+	½ O ₂	g	\longleftrightarrow	SO ₃	s				1517	519	962
SO ₂	g	+	½ O ₂	g	\longleftrightarrow	SO ₃	g				1235	519	962
NO	g	+	½ O ₂	g	\longleftrightarrow	NO ₂	g				1243	276	657
CO	g	+	Cl ₂	s	\longleftrightarrow	COCl ₂	s				1172	355	608
NO ₂	g	+	NO ₂	g	\longleftrightarrow	N ₂ O ₄	s				932	15	108
SO ₃	s	+	H ₂ O	s	\longleftrightarrow	H ₂ SO ₄	s				885	262	450
SO ₂	g	+	Hava		\longleftrightarrow	SO ₃	g				727	533	997
NO	g	+	½ Cl ₂	s	\longleftrightarrow	NOCl	g				695	152	546
H ₂ O	s	+	H ₂ SO ₄	s	\longleftrightarrow	H ₂ SO ₄ . H ₂ O				s	230	-	-

g: gaz, s: sıvı

1.4. Literatür Araştırması

Yukarda anlatılan geniş pratik kullanım alanı ve karmaşık teorisi nedeniyle, faz değiştiren maddelerle enerji depolama üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır. Konu üzerine olan pratik ve bilimsel araştırma ilgisi giderek artmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmaları çok kapsamlı bir şekilde veren inceleme makaleleri (Sharma ve Sagara, 2005; Farid vd., 2004; Hasnain, 1998; Hariri vd., 1988,) ve konu ile ilgili çalışmaları kapsayan kitaplar (Dinçer ve Rosen, 2002; Lane, 1989; Kılıkış ve Kakaç, 1989; Garg vd.,1985) mevcuttur.

1.4.1. Kabuk İçerisinde Tüplü Isı Depolama

Carlsson ve Wettermark (1979), kalsiyum klorür heksahidratın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) erime prosesini deneysel ve geliştirdikleri bir matematiksel model yardımıyla teorik olarak incelemiştir. FDM için ısı iletim ve taşınım katsayıları belirlenmiş; ayrıca, ısı transfer oranı – zaman, ısı transfer oranı – FDM sıcaklıklarının değişim grafikleri elde edilmiştir.

Henze ve Humphery (1981), faz değişimiyle termal enerji depolayan sistemlerde artan ısı iletimini incelemiştir. Yarı lineer geçiş modelini esas alan basitleştirilmiş nümerik model geliştirmişler ve modeli desteklemek içinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Eriyen FDM'nin oranı ve zamanın bir fonksiyonu olarak sıvı katı ara yüzeyinin şekli belirlenmiştir. Deneysel sonuçlarla modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve uyum içerisinde oldukları gözlenmiştir. Model, sabit miktardaki FDM'de metal kanatçık ile yüksek ısı transfer hızlarına ulaşmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Katayama vd. (1981), yatay bir silindir içerisine yerleştirilen naftalinin (C_{10}H_8) davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Isı kaynağı olarak silindirin üzerine sarılan yüzey sıcaklık adımlı bir elektrikli ısıtıcı kullanmışlardır. Şarj ve deşarj işlemlerinde ısı akısını deneysel olarak ölçmüşler ve sonlu farklar yöntemiyle de hesaplamalar yapmışlardır. Deşarj işleminde deneysel ölçümlerle sayısal sonuçlar tam bir uyum içerisindeyken şarj işleminde ise doğal taşınım etkilerinden dolayı farklılıklar gözlemişlerdir.

Kawamura vd. (1982), ısı depolama için metal ve hidrojen reaksiyonu uygulayan tek tüplü ısı depolama tankının davranışları üzerindeki deneysel çalışmalarında ısı kaynağı su buharı olan düşey bir silindir içerisinde ısı depolayıcı olarak Mg_2Ni kullanmıştır. Tek tüplü

ısı depolama tankı için yapılan deneysel çalışmalarla model sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Dietz (1984), bir dikdörtgen ısı depolama modülü içerisinde belirli bir düzende düşey silindirik depolayıcılar yerleştirmiş, FDM olarak kalsiyum klörür heksahidrat kullanmış ve etrafından ITA olarak da hava geçirmiştir. FDM'nin şarj ve deşarjı sırasında elde edilen deneysel sonuçlara dayanılarak, ITA tipi, debi ve sıcaklığı, FDM tipi ve depo boyutlarına bağlı olarak tüplerin termal performansını önceden belirlemeyi sağlayacak basit bir matematiksel model geliştirmiştir.

Ho ve Viskanta (1984 a, b), bir yatay silindirik borudaki erime olayını deneysel ve sayısal olarak çalışmıştır. Isı kaynağının yüzeyindeki lokal ısı transfer katsayılarını ölçmek için *shadowgraph tekniğini* kullanmışlar. Faz değişme sırasında katı-sıvı ara yüzey hareketi fotoğraflarla da kaydedilmiş. Erime sırasında sıvıdaki taşınım, akış izletici olarak alüminyum toz kullanılarak gözlenmişler. Lokal ısı transfer katsayısının Reynolds ve Stefan sayısına bağlı olarak değişimini elde etmişler ve deneysel sonuçların sayısal sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

Christenson ve Incropera (1989), yatay silindirik bir depo içerisine yerleştirmiş değişik karışım oranlarındaki sulu sodyum karbonat çözeltisinin katılma davranışı, deponun yatayla farklı açılarda konumları için deneysel olarak incelemiştir. Farklı karışım, belirli zamanlarda FDM'nin içyapı fotoğrafları ve FDM'nin sıcaklık-zaman değişimi verilmiştir.

Choi vd. (1989), sodyum difosfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) ve çeşitli oranlardaki su karışımları kullanarak, katılma işleminde ısı transfer akışkanının sıcaklığının ve debisinin ısı kazanımına etkisini deneysel olarak incelemiştir. En iyi fizikokimyasal şartların Na_2HPO_4 'a %37.5-37.75 suyun karışım değerine karşılık geldiğini göstermişlerdir.

Cao vd. (1991), silindirik yatay halka kesite sahip gizli ısı depolama sisteminde akış, ısı ve erime karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Geometride iç aralıkta FDM bulunmakta, halka aralıktan ise ısı transfer akışkanı geçirilmektedir. Çözüm alanı olarak ısı transfer akışkanının geçtiği bölge ve FDM bulunduğu kısım birlikte ele alınmıştır. FDM ve akışkan içerisindeki sıcaklık dağılımlarını Reynolds ve Stefan sayısına bağlı olarak elde etmişlerdir. Sonuç olarak, kısa süreli etkin ısı depolama için, bu geometrinin kullanımının uygun olduğunu belirlemişlerdir.

Akgün (1992), düşey silindirik depolayıcıya yerleştirilmiş kalsiyum klorür heksahidratın depolama performansına ısı transfer akışkanının farklı debi ve sıcaklıklarının etkilerini incelemiştir. Ayrıca, depo içerisindeki FDM'nin erime katılma davranışını gözlemiştir.

Cao ve Faghri (1992), silindirik yatay halka kesite sahip gizli ısı depolama sisteminde türbülanslı akış durumunda akış, ısı ve erime karakteristiklerini sayısal olarak incelemiştir. Halka aralığına FDM yerleştirilmiş, merkezdeki boşluktan da ısı transfer akışkanı olarak hava geçirilmiştir. Zamana bağlı olarak erime bölgeleri, akışkan ve FDM içerisindeki sıcaklık dağılımlarının Nusselt sayısı, Reynolds sayısı ve Stefan sayısına bağlı olarak değişimlerini belirlemiştir.

Choi ve Kim (1992), magnezyum klorür heksahidratın ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) kanatçıklı düşey silindirik bir depoda katılma esnasında gösterdiği ısı transfer karakteristiklerini incelemiştir. FDM ve tüp arasındaki ısı transfer katsayısının, kanatçıklı tip için kanatçıksız göre 3.5 kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Bununla birlikte ısı performansı kanatçıklı tipte debi etkilerken, kanatçıksız tipte akışkan sıcaklığı daha etkin olduğu belirtmişlerdir.

Lacroix (1993 a), kanatçıklı/kanatçıksız silindirik ısı depolama tankının düşey ve yatay olarak iki farklı konumunda, n-octadecan ısı depolama davranışını deneysel ve teorik (entalpi yöntemi) olarak incelemiştir. Depo dış çapı, akışkan debisi, akışkan giriş sıcaklığı ve kanatçık durumunun sistem performansına etkileri belirlenmiştir.

Hasan (1994), stearik asitin erime davranışını, silindirik depolayıcının yatay ve düşey olarak iki farklı konumunda deneysel olarak incelemiş, düşey konum için şarj vedeşarj sürelerinin daha kısa olduğunu ortaya koymuştur.

Esen ve Ayhan (1996) ve Esen vd. (1997), bir silindir ısı depolama modülü içerisinde belirli çap ve adetlerde silindirik depolayıcıların yerleştirildiğini kabul ettikleri termal ısı depolama sisteminin erimedeki davranışını teorik (entalpi yöntemi) incelemiştir. Farklı su giriş sıcaklık ve debisi, silindir yarıçapı ve FDM tipi için erime davranışının değişimini sayısal olarak belirlemiştir.

Yimer ve Senthil (1997) yüksek sıcaklıklarda ısı depolama malzemesi olarak kullanılan flourid tuzunun katı ve sıvı fazının termal iletkenliklerini ve gizli ısı miktarını deneysel ve teorik olarak belirlemiştir. İki boyutlu geçici iletimi esas alan analitik bir model geliştirmiş ve kurulan model Gauss-Seidel iterasyon yöntemi ile çözmüşlerdir.

Velraj vd. (1997, 1999), farklı ısı transferi tekniklerini kullanarak silindirik halka aralıklı bir depoda faz değiştiren maddenin toplam erime ve katılma sürelerinin azaltılmasını karşılaştırmalı olarak incelemiştir.

Ismail ve Melo (1998), düşey halka aralıklı bir silindirik depoda taşınımın baskın olduğu erime ve katılma davranışını sayısal olarak incelemiştir. Rayleigh sayısı ve Stefan sayısı cinsinden toplam erime/katılma davranışını elde etmişlerdir.

Ng vd. (1998), yatay silindirik bir halka aralıklı depoda FDM 'nin (n-oktadekan) erime davranışını, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemiştir. Yerel ısı transferinin erimiş maddenin akış şekline bağlı olduğu gösterilmiştir.

Khillarkar vd.; (2000), iki farklı depolama geometrisi için (yatay kare tüp içerisinde silindirik halka aralık ve yatay dairesel tüp içerisinde kare halka aralık) n-oktadekan'ın erime davranışını sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla sayısal olarak çalışmıştır. Rayleigh sayısının, iç duvardaki yerel ısı transfer katsayısı ve eriyik içerisindeki doğal taşınım akışı üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Fourier sayısının değişimiyle eriyik içerisindeki akış ve sıcaklık alanlarının nasıl değiştiğini göstermişlerdir.

Chen vd. (2000), soğuk termal depolama için yatay silindir modül içersine paketlenmiş küçük yatay silindirler yerleştirmiş oldukları deneysel çalışmada; FDM olarak çekirdekleşme etkili su, ITA olarak da etilen glikol solüsyonu kullanmıştır. Akışkan debisi ve sıcaklığının, ısı transferinin, tankın basınç düşüşünün, kapsüllerin çekirdekleşmesi ve termal performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Eğer şarj işleminde akışkan sıcaklığı FDM'nin %100 çekirdekleşmesindeki sıcaklığının altında ise soğuk enerjinin tamamı gizli ısı olarak depolanabileceğini ve daha düşük soğutucu giriş sıcaklığı durumunda toplam şarj süresi kısılırken, suyun alt soğutmasının azaldığını ortaya koymuşlardır.

Khillarkar vd. (2000), iki farklı yatay konsantrik halka aralık geometrisi için saf bir faz değiştiren maddenin baskın doğal taşınım erimesini sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir. Birinci tip depo geometrisinde bir kare kesitli kanal ve içersine yerleştirilmiş dairesel boru arasındaki halka aralığı, ikinci tip depo geometrisinde ise silindirik bir boru içersine yerleştirilen kare kesitli bir kanal arasındaki halka aralığı esas almıştır.

Dimaano ve Watanabe (2002), FDM olarak %90 (%65 kaprik asit + %35laurik asit) + %10 pentadekan (parafin) kullanarak düşük sıcaklıkta ısı depolamayı deneysel olarak incelemiştir. Asitin içersine parafin ilave edilmesiyle, hem asitin erime sıcaklığı düşmüş

hem de karışımın termal performansı artmıştır. Dimaano ve Watanabe (2002), %65 mol kaprik asit ve %35 mol laurik asit karışımından oluşan bir gizli ısı depolama maddesinin soğuk depolamada kullanımında termal performansını deneysel olarak incelemiştir. Benzer bir çalışmada, Dimaano ve Watanabe (2003), FDM olarak %65 kaprik asit + %35 laurik asit için erime ve katılaşma davranışlarını deneysel ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelemiştir. Erime ve katılaşma sırasında radyal sıcaklık dağılımı için elde edilen sayısal sonuçların deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca, şarj işlemi sırasında ergimiş FDM tabakasının artmasının doğal taşınım etkilerini artırdığını da vurgulamışlardır.

He ve Zhang (2001), deneysel ve teorik çalışmalarında, depolayıcı olarak yatay pozisyonlu çoklu tüp gizli ısı depolama eşanjörü, FDM olarak yüksek sıcaklıkta gizli ısı depolama malzemesi olarak Al ve Si alaşımı ve ITA olarak da hava kullanmıştır. FDM kalınlığının, faz değişim oranı ve katılaşma süresini etkilediğini ve hava giriş sıcaklığının artması, hava hızının artması, FDM kütlesinin artması ve akış kanal boyunun artmasının ise eşanjör çıkış gücünü artırdığını belirlemişlerdir.

Ismail vd. (2001), eksenel kanatçıklar ihtiva eden düşey silindirik ısı depolama tankı içerisindeki parafinin katılaşma davranışını deneysel ve teorik (entalpi yöntemi) olarak incelemiştir. Kanatçık sayısı, uzunluk ve kalınlığının, süper ısıtmanın ve halka boşluğun boyut oranının, depolanan toplam enerji, katılaşmış kütle parçası ve tamamen katılaşma için geçen zaman üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Kanatçık sayısı ve kanatçık uzunluğunun deşarj süresini kısaltmasında önemli bir etkiye sahipken, kanatçık kalınlığının önemli bir etkisinin olmadığı ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, deneysel ve sayısal sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Saito vd. (2001), yatay silindirik bir kapsülün içerisine yerleştirilen sodyum sülfat dekahidrat'ın deşarj davranışlarını deneysel ve teorik olarak incelemiş, deneysel sonuçlarla geliştirilen analitik modelin mükemmel bir uyum içerisinde olduğu görmüşlerdir.

Sarı ve Kaygusuz (2002 a), değişik oranlardaki laurik ve stearik asit karışımlarının ısı depolama karakteristikleri deneysel olarak karşılaştırmalı incelemiştir. Söz konusu karışımların DSC analiz sonuçları verilmiş ve bu analize bağlı olarak ağırlık cinsinden en uygun karışım oranı (laurik/stearik) %75.5 / %24.5 şeklinde olup bu oran uzun süreli ısıl çevrime de uygun olduğunu ortaya koymuşlardır. Reynolds ve Stefan sayılarının, toplam erime/katılaşma zamanı ve toplam ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini elde etmişlerdir. Sarı ve Kaygusuz (2002 b), deneysel çalışmalarında, düşey ve yatay olarak iki farklı depo

konumunda, palmitik asitin erime-katılaşmada esnasındaki ısıl davranışını karşılaştırmalı olarak incelemiş ve yatay yerleştirilen deponun daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Benzer bir çalışmada, Sarı (2003), deneysel bir çalışmada, farklı oranlardaki palmitik asit ve miristik asit karışımının ısı depolama davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Söz konusu karışımların DSC analiz sonuçları vermiş ve bu analize bağlı olarak ağırlık cinsinden en uygun karışım oranının (miristik /palmitik) %58 / %42 olduğunu belirlemiştir.

Wang vd. (2001), yatay pozisyonda iç içe geçmiş üç silindir arasındaki halka aralıklara erime sıcaklıkları farklı üç tip FDM (stearik asit, parafin ve laurik asit) yerleştirilen bir depolama sisteminin ısıl depolama davranışı, farklı su sıcaklıkları için deneysel olarak incelenmiş ve çoklu FDM ile depolamanın tekli depolamaya göre şarj oranını arttırdığını göstermiştir.

Baran ve Sarı (2003), FDM olarak değişik oranlarda ötektik palmitik asit ve stearik asit karışımının depolama davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve en iyi depolama davranışının ağırlıkça efektif ötektik karışım oranının (stearik asit/palmitik asit) 64.2/35.8 olduğu durum için gerçekleştiğini göstermiştir. Reynolds ve Stefan sayısının ergime/katılama davranışı üzerindeki etkisini belirlemiştir.

Ettouney vd. (2004), deneysel çalışmalarında FDM olarak parafin wax kullanmış, parafinin ısıl iletkenliğini artırabilmek için de halka aralıkta depo içerisine metal kafes ile metal küre yerleştirmiştir. Birleştirilmiş ısı depolama ünitesinde parafin içerisinde gizli ısı depolanırken, metal kafes ve metal küreciklerde de duyulur ısı depolanmış ve FDM' nin efektif ısıl iletkenliğinin arttığını belirlemiştir. Küre boyutu ve sayısının artırılması FDM' nin Nusselt sayısında üç kata kadar artış sağlarken aynı şartlarda erimedeki Fourier sayısında benzer şekilde bir azalma sağlamıştır. Buna karşın, akışkan sıcaklığının artırılmasının Fourier ve Nusselt sayılarının değişimini çok fazla etkilemediğini belirlemiştir.

Liu vd. (2005 a), deneysel çalışmalarında, FDM olarak stearik asit kullanarak, düşey silindirik ısı depolama sisteminin katılaşmada ısıl performansını artırmak için özel geometriye sahip spiral kanatçık kullanılmıştır. Reynolds sayısının ısı transfer parametreleri üzerindeki etkisini belirlemiştir. Soğutma suyunun depolama sistemine giriş sıcaklığı deşarj süresini çok fazla etkilerken, deney şartlarındaki Reynolds sayısının bu süreye fazla etkisi olmadığı belirlenmiştir. Kanatçıkların FDM' nin ön erime safhasında ısıl iletkenliği %67 artırırken, erime safhasında 3 kat kadar artırdığı belirlenmiştir.

Liu vd. (2005 b), düşey silindirik enerji depolama sisteminde stearik asitin katılaşma prosesi esnasındaki termal karakteristiklerini deneysel olarak incelemiştir. Soğutma suyu giriş sıcaklığının toplam erime süresini etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, iç boruya olan kanatçık ilavesinin katılaşmayı önemli ölçüde iyileştirdiğini de ortaya koymuşlardır. Başka bir çalışmada ise, aynı sistemde benzer şekilde maddenin erime davranışını incelemiştir.

Trp (2005), düşük sıcaklıkta ısı depolama için teknik parafinin şarj/deşarj davranışını deneysel ve entalpi yöntemini kullanarak teorik olarak incelemiştir.

1.4.2. Farklı Geometrilerde Isı Depolama

Lou (1982), küp şeklindeki bir depo içerisinde Glauber tuzunun farklı karışımları için katılaşma prosesini deneysel ve teorik olarak çalışmıştır. Sınır Tabaka İntegral yöntemi kullanılarak elde edilen teorik sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu belirtilmiştir. Katılaşma tabakası kalınlığı–zaman, katılaşma tabakası kalınlığı–sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Anhidrat tuzu konsantrasyonunun katılaşma üzerindeki etkisinin zayıf olduğu görülmüştür.

Moore ve Bayazitoğlu (1982), küresel kap içerisindeki FDM'nin (n-oktedans wax) erime olayını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Geliştirilen teorik modellerle deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğunu ortaya koymuşlardır. Değişik Stefan ve Fourier sayıları için ara yüzey pozisyonları ve sıcaklık profilleri ile enerji depolama karakteristiklerini incelemişler, ayrıca, erimenin fotoğrafını da vermişlerdir.

Fouda vd. (1984), ısı transfer akışkanı (varsol) ve FDMnin (Glauber tuzu) direk temasta olduğu durumu için deponun ısı transfer verimi ve hacimsel ısı transfer katsayısını deneysel olarak belirlemiştir. Depolama veriminin, akışkanı debisi, giriş sıcaklığı ve izolasyon kullanımı ile sistemin uzun süreli kapanmasından önemli bir şekilde etkilenmediği belirlenmiştir ve % 85-90 arasında verim değerleri elde edilmiştir.

Ho ve Viskanta (1984 a,b), iletken dikey duvarlara sahip dikdörtgen boşluğa yerleştirilmiş n-oktadekan'ın erime ve katılaşma sırasındaki termal davranışını deneysel olarak incelemiştir. Isı kaynağının yüzeyindeki lokal ısı transfer katsayılarını ölçmek için shadowgraph tekniğini kullanmışlardır. Parafinin erimesi sırasında sıvı-katı ara yüzeyin değişimi zamana bağlı olarak fotoğrafla kaydedilmiştir. Çalışmada katı parafinin

başlangıçtaki aşırı soğuma etkisi incelenmiş ve iletimle ısı transferinin katılaşmada baskın rol oynadığını göstermiştir.

Benard vd. (1986), yaptıkları çalışmada dikdörtgen bir prizma içerisine yerleştirilen FDM'nin (n-oktadekan) faz değişim bölgelerindeki sıcaklık dağılımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Sayısal çözümde, katı kısımdaki ısı iletimi ve eriyikteki doğal taşınım birlikte ele alınmıştır. Erimenin başlangıcında FDM'deki ısı transferinde iletim baskınken ileriki aşamalarda taşınımın daha baskın rol oynadığı tespit edilmiştir. FDM'nin erime ve katılaşması sırasında zamanla sıcaklık değişimleri verilmiştir. Zaman bağımlı olarak faz değişim bölgelerinin belirlenmesinde elde edilen deneysel verilerin sayısal sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Hayashi vd. (1987), ısı transfer akışkanı olarak su, silindir ve silindir içerisine yerleştirilmiş mikro kapsüllü iki tip ısı depolama tankı kullanarak, n-oktadence ve kalsiyum klorür heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) için erime ve katılaşma prosesini deneysel olarak incelemiştir. Mikro kapsüllü silindir depolama geometrisinin mükemmel performans özelliklerine (yüksek ısı depolama yoğunluğu ve iyi ısı değiştirme) sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Farid ve Hussain (1990), paket düşey dikdörtgen içerisine yerleştirilmiş ticari parafin wax'ın ısı depolama davranışı üzerine deneysel ve teorik bir çalışma yapmıştır. Dikdörtgen prizmanın tam ortasına yerleştirilmiş bir elektrikli ısıtıcı aracılığıyla erime işlemini ve prizmanın dışından alttan yukarıya doğru akan hava aracılığıyla da FDM'nin katılaşmasını sağlamışlardır.

Son ve Morehouse (1991), deneysel çalışmalarında, neopentil glikol ve petagliserin kullanarak, bu maddelerin düşük ısı iletkenlik özelliklerini iyileştirerek hem ısı depolama kapasitelerini geliştirmeye hem de depolama süresini kısaltmaya çalışmıştır. FDM'lerin ısı iletkenlik özelliğini iyileştirmek için iki farklı yöntem kullanılmışlardır. Birincisinde, katı-katı faz değişimine sahip malzemelere belirli oranlarda katı-sıvı faz değişimine sahip FDM'ler ilave ederken; ikinci yöntem de, yüksek ısı iletime ve gizli ısıya sahip alüminyum matrix ile neopentil glikolün yeni bir bileşik yapısını kullanmışlardır. Böylece; katı-katı faz değişimine sahip neopentil glikole göre katı fazın ısı iletimini 60 kat artırmayı başarmışlardır.

İlken ve Toksoy (1993), FDM'nin katılaşması sırasında ısı transfer yüzeyinde oluşan katı maddenin kötü ısı iletimini iyileştirmek için kanatçık kullanılan bir matematik model geliştirmiştir. Sayısal çözümler ışığında, kanat boylarının, kanatlar arası mesafenin, kanat

malzemesinin ve Stefan sayısının enerji depolama hızına etkilerini veren bir bağıntı çıkarmışlardır.

Lacroix (1993 b), iki silindirik ısı değiştirici etrafında bulunan faz değiştiren maddenin erime ve tekrar katılaşmasını Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni kullanarak sayısal çözümünü yapmıştır. Erimiş ve katılaşmış bölgelerin şekillerinin termal sınır koşullarına ve erime/katılaşma periyoduna bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Ouyang ve Tamma (1994), iki boyutlu çoklu ara yüzey faz değiştirme problemlerini çözmek için Sonlu Eleman Yöntemi'ni kullandıkları bir teorik çalışma yapmıştır. Açığa çıkan gizli ısıyı simüle etmek için Entalpi metodunu kullanmışlardır. Bu çalışmada zaman entegrasyonu için koşulsuz kararlı İmlicit Metodu kullanıldı. Çoklu fazın ön gelişmeleri üzerine sınır şartlarının ve farklı faz bölgeleri etkileri pek çok örnek için incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ayrı ayrı verilmiştir.

Inaba ve Morita (1995), ITA olarak deniz suyu, FDM olarak parafin (tetradekan), su ve yüzey genişletici maddenin belirli oranlarda karışımları kullanarak çift tüplü kangal boru içerisinde soğuk depolama karakteristiklerini incelemişlerdir. Newtonumsu olmayan akışkanın, soğuk depolamada önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir.

Lee ve Chiou (1995), Sonlu Elemanlar Yöntemi yardımıyla faz değişim problemini incelemiştir. Hesaplama sonuçları ile deneysel sonuçlar oldukça uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Zaman adımlı ve katılaşma sıcaklık aralığının maksimum ve ortama hatalar üzerindeki etkisinin küçük olduğu görülmüştür.

Gong ve Mujumdar (1996), çoklu kompozit faz değiştiren maddelerden oluşan depolama sistemi için faz değişimi sırasındaki ısı iletimini Sonlu Elemanlar Yöntemi yardımıyla incelemiştir. Farklı erime noktalarına sahip FDM'lerin yerleştirme şekli, termo fiziksel özellikler ve farklı sınır şartlarının etkileri araştırılmıştır. Sayısal sonuçlar, çok tabakalı FDM'lerden oluşan depolama sistemi kullanılarak anlık ısı akısının büyük ölçüde artırılabilceğini göstermiştir. Termal enerji depolama için kompozit FDM'lerin kullanımının uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Lacroix ve Duong (1998), paket düşey dikdörtgen prizmalar içerisine FDM olarak n-octadekan yerleştirdikleri ısı depolama sistemi için deneysel bir çalışma yapmıştır. Çoklu tabaka TED sisteminin gizli ısı depolama performansını artırmak, ısı kaynağının aşırı ısınmasını engellemek ve erimede doğal taşınımı artırmak için dikdörtgen prizmanın çeşitli noktalarına farklı güçte ve sayıda elektrikli ısıtıcı kullanmışlardır. Depolanan enerjinin geriye alınmasını, havanın zorlanmış taşınımı ile sağlamışlardır. Isı

kaynağının sabit ve periyodik çalışma yükleri için, ısıtıcı kaynak adet ve konumlarına bağlı olarak FDM'nin sıcaklık değişimi, ergimiş hacim oranı- zaman değişimi ve havanın aktığı kanal tipleri için Reynolds sayısının basınç farkı ve ortalama Nusselt sayısı üzerindeki etkisi elde edilmiştir.

Banaszek vd. (1999, 2000), ısı depolayıcı olarak Arşimet spirali, FDM olarak parafin wax ve ITA olarak da hava kullanılan bir ısı depolama sisteminin şarj ve deşarj sırasındaki performansı deneysel ve teorik olarak incelemiş, hava debisinin ve depolayıcı geometrisinin sistem performansı üzerine etkisini araştırmıştır. Yüksek ısı transferi, geniş ısı transfer yüzeyi, daha uzun akış kanalı ve daha kısa depo boyu istenen ısı depolama sistemleri için Arşimet spiral geometrisinin uygun olduğunu göstermişlerdir.

Cho ve Choi (2000), şarj/deşarj işlemi sırasında küresel kapsüllerin ısı depolama kapasitelerini belirlemek için yaptıkları deneysel çalışmada; FDM olarak n-tetradakan, su ve %60 heksadekan + %40 n-tetradakan karışımı ve ısı transfer akışkanı olarak da etilen glikol karışımı kullanmıştır. Erime ve katılaşmada; Re ve Ste sayılarına bağlı olarak kapsülün farklı noktalarında sıcaklık, boyutsuz termal depolama kapasitesi ve akışkanın ortalama ısı transfer katsayısının değişimlerini elde etmişlerdir. Doğal taşınım etkisinden dolayı, Re ve Ste sayılarının erimede, katılaşmadan daha etkili olduğunu ortaya koymuşlar. Hem erime hem de katılaşmada parafinin ısı transfer katsayısının suyun ısı transfer katsayısından %40 daha fazla olduğunu ve suyun parafinden daha büyük alt soğutma gösterdiğini de belirlemişlerdir.

Ismail ve Abugderah (2000), dairesel kesitli düşey bir enerji depolama sisteminde FDM'nin zaman bağımlı olarak akış ve ısı transfer karakteristiklerini sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak belirlemiştir. Çözüm alanı olarak; ısı transfer akışkanı, kanal cidarı ve FDM'yi içeren bir bölge seçilmiştir. Çalışmada, radyal doğrultuda sıcaklık dağılımı, erimenin gerçekleştiği ara yüzeyin yeri ve boru boyunca üretilen gizli ve duyulur ısı miktarı; farklı Reynolds ve Stefan sayılarına, faz değişim sıcaklık aralığına ve zaman bağlı olarak verilmiştir.

Ismail ve Henriquez (2000), küresel kapsüllerin içerisine soğuk ısı depolama malzemesi olarak su kullanarak, ITA'nın debi ve giriş sıcaklığının, küre boyutu, kabuk malzemesi, kabuğun kalınlığı ve kabuğun dış duvar sıcaklığı ile FDM'nin başlangıç sıcaklığının katılaşma zamanına etkilerini sonlu farklar yöntemini kullanarak sayısal olarak araştırmışlardır.

Pal ve Joshi (2001), düşey kenarından sabit ısı akısı ile ısıtılan ve 1/10 kenar oranına sahip dikdörtgen bir çerçeve içinde bulunan katı FDM'nin (n-trikosan) erime sürecini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, erime prosesinin sayısal modellenmesinde entalpi-gözeneklilik yaklaşımını kullanılmış ve FDM'nin erime bölgeleri deneysel olarak gözlenmiştir. Deneysel ve sayısal olarak belirlenen sıcaklık dağılımlarının ve erime ara yüzey bölgelerinin aynı olduğunu göstermişler. Erime sürecinde doğal taşınımın, akış ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde baskın bir rol oynadığını belirleyerek ısı transferi ve erime oranının zamanla değişimini içeren korelasyonlar ortaya koymuşlardır.

Ismail ve Jesus (2001), dairesel halka kesitli düşey bir enerji depolama sisteminde FDM'nin katılma sürecini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, FDM halka aralığa yerleştirilmiş olup soğutucu akışkan depolama tankının ortasındaki iç borudan geçirilmiştir. Isı transferinin FDM ve boru cidarında sadece iletimle gerçekleştiği varsayılarak faz değişim sürecinde enerji denklemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Soğutucu akışkanın giriş sıcaklığı, FDM'nin başlangıç sıcaklığı ve borunun ısı iletim katsayısının katılma süreci üzerindeki etkileri çalışılmıştır. FDM kalınlığı ile boru iç çapı oranının artışı ve akışkan giriş sıcaklığının artışı ile katılma süresinin arttığını belirlenmiştir. Ayrıca, akışkan borusunun iletim katsayısının artmasıyla katılmış madde oranının arttığını ortaya koymuşlardır.

Marin vd. (2001), faz değiştiren maddelerle termal enerji depolama sistemlerinin tasarımı üzerine öneriler sunmuştur. Özellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarının depolama sistemine entegrasyonunu tartışmışlardır.

Vakilaltojjar ve Saman (2001), düşey dikdörtgen ızgara tipli bir depolayıcı için FDM olarak iki farklı erime noktasına sahip kalsiyum klorür heksahidrat ve potasyum florit tetrahidrat, faz değiştirici akışkan olarak da hava kullanılarak; depo dizayn parametrelerinin (FDM kalınlığı, hava kanalı yüksekliği ve kanal boyu), akışkan özellikleri (sıcaklık ve debi) ve FDM özelliklerinin sistem performansına etkilerini teorik olarak araştırmışlardır.

Zhu vd. (2001), soğuk depolamada optimal sistem dizaynında erime işlemi sırasındaki anlık ısı transfer oranının belirlenmesi için teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Kurulan modelde ısı depolama sistemi sabitlenmemiş yatay silindir olup silindirin içerisine FDM olarak buz, ITA olarak da tam merkezden bir boru aracılığıyla geçirilen hava kullanmışlardır.

Siahpush (2002), depo geometrisi içerisine yerleştirilen yüksek ısı iletkenliğe sahip metal köpüklerin FDM'lerin erime/ katılma karakteristiği üzerindeki etkisini deneysel olarak çalışmıştır.

Silva vd. (2002), dikdörtgen prizma içerisine yerleştirilen ticari parafin waxın erime ve katılma davranışını deneysel ve teorik (entalpi yöntemi) olarak incelemiştir. Deponun bir duvarından gücü ayarlanabilen plaka elektrikli ısıtıcı ile FDM'nin erimesini, diğer duvarından da farklı debi ve sıcaklıklardaki hava ile FDM'nin katılmasını sağlamışlardır. Isı akısı ve FDM kalınlığının erime süresini önemli ölçüde etkilediğini göstermişlerdir. Isı iletimi, şarj/deşarj işlemleri süresince etkinken, depo içerisinde oluşan termal tabakalaşmalardan dolayı da ısı taşınım sisteminin termal performansı üzerinde etkin rol oynadığını ve sayısal modelle deneysel sonuçların verilen sistem için uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

Buddhi vd. (2003), yaptıkları deneysel çalışmada, parafin-wax'ın erime ve katılma davranışını incelemiştir. Maddenin ısı iletim kapasitesini artırmak için akışkan borusu üzerine kanatçıklar ilave edilerek, farklı akış debisi ve giriş sıcaklığının etkisini incelemiştir. Kanatçık sayısının artması ile ısı değiştiricisi etkinliğinin arttığını belirlemiştir. Bununla birlikte, cidarlar arası mesafenin, kanatçık sayısının ve akışkan giriş sıcaklığı ve debisinin ısı değiştirici performansı üzerinde optimizasyon için etkili parametreler olduğunu da ortaya koymuşlardır.

Nagano vd. (2004), kübik bir depo içerisine FDM olarak magnezyum nitrat heksahidrat ve magnezyum klorit heksahidrat karışımı yerleştirmiş ve ısı kaynağı olarak da elektrikli ısıtıcı kullanmıştır. DSC analiz yöntemi ile farklı karışımların termofiziksel özellikleri belirlenmiştir. FDM' nin içerisine ağırlıkça %5-10 magnezyum klorit heksahidrat ilavesi gizli ısı değeri olarak en iyi karışım oranını verdiğini ve karışım oranının değiştirilmesi gizli ısıyı az miktarda etkilerken erime noktasının sıcaklık değerini azalttığını göstermişlerdir. Çevrimin (şarj/deşarj) 1000 değerinden sonra FDM' nin orijinal değerlerine dönüş yaptığını belirlemiştir.

Hamdan ve Al-Hinti (2004), düşey kenarından sabit bir ısı akısı ile ısıtılan dikdörtgen bir çerçeve içinde bulunan bir katı faz-değiştiren maddenin (n-octadekan) erime sürecini analitik olarak incelemiştir. Katı-sıvı ara yüzeyin yayılması ve eğimi, eriyen kısmın zamansal değişimi ile birlikte ele alınmıştır. Çalışmada kullanılan modelin, ara yüzey yayılmasını erime sürecinin başlangıç devresinde çok iyi, fakat erimenin geç dönemlerinde ise daha aşağılarda benzeştirdiği bulunmuştur. Yayılma ve eriyen parça ile

ilişkili olarak elde edilen sonuçların yayınlanmış deney sonuçları ile uyum halinde olduğu gösterilmiştir.

Erek vd. (2005), deneysel ve teorik olarak gerçekleştirdikleri çalışmada, soğuk ısı depolama üzerine kanatçık ve ITA parametrelerinin etkilerini incelemiştir. Farklı boyutlardaki radyal kanatçıklar ısı transfer borusu üzerine yerleştirilmiş ve bu boru FDM olarak kullanılan saf suyun içerisine daldırılmıştır. Soğutucu akışkan olarak kullanılan etil alkol, ısı transfer borusu içerisinden farklı debi ve sıcaklıklarda geçirilmiştir. Kanatçık çap ve aralığının, Re ve Ste sayılarının farklı değerlerinin suyun katılma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemiştir.

1.4.3. Depolama Sistemlerinin Termodinamik Analizi

Jurinak ve Abdel-Khalik (1978), havalı güneş ısıtma sistemlerinde kullanılacak FDM'lerin optimum fiziksel özelliklerini belirlemek için teorik bir çalışma yapmıştır. İhtiyaç olan ısıyı güneşin karşılama oranına, erime sıcaklığı, gizli ısı, ısı yükü özellikleri ve kontrol mekanizmasının etkileri belirlendi. Ayrıca FDM'nin uygunsuz erime özelliğinin sistemin performansı üzerine etkileri de incelenmiştir.

Rosen vd. (1988), bir termal enerji depolama sisteminde şarj ve deşarj periyotlarını göz önüne alarak sistemin ekserji analizini yapmıştır. Farklı iki akışkan debisinde çevre ve başlangıç koşulları aynı olan depolama sisteminin deşarj işleminde I. Kanun verimleri aynı iken, II. Kanun veriminin düşük akışkan debisinde daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır.

De Lucia ve Bejan (1990), FDM'lerin kullanıldığı enerji depolama sistemleri için ikinci kanun analizini yapmıştır. Deponun yatay ve düşey olmasına bağlı olarak erime süreci üzerinde etkili olan ısı transfer mekanizmalarını belirlemiştir. Erimenin ilk aşamalarında ısı transferinin zaman bağımlı olarak sadece iletimle, sonraki aşamalarda ise zaman bağımsız olarak sadece doğal taşınım ile gerçekleştiğini belirlemiştir. Enerji depolama sisteminin tersinmezlik ölçüsünü (entropi üretimini) ortaya koyan matematiksel ifadeler geliştirilmiştir. Tersinmezlik üzerindeki etkili parametrelerin FDM'nin erime sıcaklığı ve akışkan giriş sıcaklığı olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca, faz değiştiren maddelerin erime sıcaklıklarına bağlı olarak optimum ısı transfer akışkanı sıcaklıklarını da belirlemiştir.

Adebiyi (1991), paketlenmiş çoklu FDM'lerin ve duyulur ısı malzemesi kullanıldığı silindirik enerji depolama sisteminin I. ve II. Kanun analizini şarj ve deşarj işlemi için yapmıştır. Akışkan giriş sıcaklığının artması ile I. Kanuna dayalı sistem veriminin arttığını, ayrıca en yüksek I. Kanun verimin duyulur ısı malzemesi kullanıldığında elde edildiğini de belirlemiştir. II. Kanuna dayalı verimin ise akışkan giriş sıcaklığının artışı ile belirli bir değere kadar arttığını ve sonrasında ise azaldığını belirlemiştir. Bu analizde de I.Kanun analizine benzer olarak en yüksek verim duyulur ısı malzemesinin kullanıldığı enerji depolama sisteminde ortaya çıktığını göstermiştir. Sonuç olarak, bir sistemin performansının değerlendirilmesinde I. kanunun yetersiz kaldığını nihai sonucun II. kanuna dayandırılması gerektiğini belirtmiştir.

De Lucia ve Bejan (1991), yatay bir enerji depolama sisteminde, erime ve katılma sürecini dikkate alarak maksimum ekserji depolama için FDM optimum faz değiştirme sıcaklığının, ısı kaynağı ve çevre sıcaklığının geometrik ortalamasına eşit olduğunu belirlemiştir. Ayrıca bu çalışmada, erime ve katılma işlemleri ayrı dikkate alındığında; erime işleminde minimum tersinmezlik için optimum faz değiştirme sıcaklığının bu sıcaklıktan daha düşük olması gerektiğini, katılma işleminde minimum tersinmezlik için optimum faz değiştirme sıcaklığının bu sıcaklıktan daha yüksek olması gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Charach ve Zemel (1992), dairesel kesitli yatay bir enerji depolama sistemindeki depolama sırasındaki faz değişim sürecinde meydana gelen entropi artışını sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada FDM'ye gerçekleşen ısı transferinin baskın iletimle olduğu kabul etmişlerdir. Literatürde yapılan diğer sayısal çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, toplam entropi üretimi üzerinde depo ve çevre esaslı entropi üretimine ek olarak basınç düşüşünün neden olduğu entropi üretimini de dikkate almışlardır. Isı transfer biriminin (NTU) artışıyla ısı transferinden kaynaklanan entropi üretimi eksponansiyel bir azalış, basınç düşüşünden kaynaklanan entropi üretiminin lineer bir artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Depolama işleminin başlangıcında entropi üretimini minimum iken ilerleyen süreçte entropi üretiminin arttığını da ortaya koymuşlardır.

Bellecci ve Conti (1994), yaptıkları sayısal çalışmada güneş kollektörü ve bir ısı makinesine seri şekilde bağlı olarak çalışan bir enerji depolama modülünün ikinci kanun analizini yapmıştır. Tersinmezlik üzerinde erime sıcaklığının baskın bir rol oynadığını ortaya koymuşlardır. Sistemdeki entropi minimizasyonu için seçilecek FDM erime

sıcaklığının, depolama sistemine akışkan giriş ve kolektöre dönüş sıcaklığının aritmetik ortalamasına eşit seçilmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır.

Domanski ve Fellah (1996), yaptıkları sayısal çalışmada bir termal enerji depolama sisteminin performansını II. Kanuna dayalı olarak incelemiştir. Yapılan analiz, birbirine seri olarak bağlı iki ısı depolama tankının şarj ve deşarj sürecini içermektedir. Depolara farklı erime sıcaklığına sahip FDM yerleştirilmiş ancak her iki deponun içerisinde hem erime hem de katılaşma işleminde aynı ısı transfer akışkanı (hava) geçirilmiştir. İkinci kanun esas alınarak yapılan performans değerlendirmesi sonucu, birinci depoda yüksek erime sıcaklığına sahip FDM, ikinci depoda ise çevre sıcaklığına yakın bir erime sıcaklığına sahip FDM kullanılması gerektiğini belirlemiştir. Bununla birlikte, sistemin performansının daha da artırılması için çok sayıda enerji deposunun seri olarak bağlanması gerektiğini önermişlerdir.

Conti vd. (1996), dairesel halka kesitli yatay bir gizli enerji depolama sisteminde erime sırasında ısı transferinden kaynaklanan tersinmezlikleri sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada incelenen sistem; termal depolama modülü (iç içe geçmiş iki dairesel boru; halka aralığına FDM yerleştirilmiş ve iç borudan ısı transfer akışkanı geçirilmiş) ve çevreden oluşmaktadır. Birbirinden bağımsız olarak modülden kaynaklanan ve çevre üzerinde meydana gelen tersinmezlikler FDM'nin erime sıcaklığına bağlı olarak verilmiştir.

Gong ve Mujumdar (1997 a), erime ve katılaşma sürecini içerisine alan çoklu FDM'lerin kullanıldığı bir gizli enerji depolama sisteminin termodinamik analizini yapmıştır. Analizde birbirine seri olarak bağlı 1,2,3,4 ve 5 farklı erime sıcaklığına sahip FDM'ler için çözümler ortaya koymuşlardır. Çalışma sonucunda çoklu FDM içeren depolama sistemlerinin tekil FDM içerenlere kıyasla daha yüksek verimliliğe sahip olduklarını belirlemiştir. Yine Gong ve Mujumdar (1997 b), kabuk- tüp sızlı ısı termal depo ısı değiştiricisinde faz değiştiren maddenin erime ve katılaşma davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal olarak incelemiştir.

Ramayya ve Ramesh (1998), erime öncesi ve katılaşma sonrasında FDM'nin sahip olduğu duyulur ısının bir gizli depolama sistemi performansı üzerindeki etkisi birinci ve ikinci kanun esas alınarak bütün şarj/deşarj sürecinde incelemiştir. Isı transferi ve depolama sürecindeki tersinmezlikler ve çevre üzerinde meydana gelen tersinmezlikler esas alınarak maksimum ikinci kanun verimi için optimum faz değişim sıcaklığını belirlemiştir. Erime öncesi ve katılaşma sonrası aşırı soğuma sürecinde FDM'nin sahip olduğu duyulur ısı dikkate alınarak veya alınmayarak ısı depolama sisteminin performansı

incelenmişlerdir. I. kanun esas alınarak yapılan değerlendirmede duyulur ısının dikkate alınması durumunda sistem performansının daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. II. Kanun esas alınarak yapılan değerlendirmede ise optimum faz değiştirme sıcaklığına kadar sadece gizli ısı depolama dikkate alındığında daha verimli iken, bu sıcaklıktan sonraki durumlarda hem gizli ısı hem de duyulur ısının dikkate alındığı sistemlerin daha verimli olduğu sonucuna varmışlardır.

Sharma ve Buddhi (2005), yaptıkları çalışmada bir gizli ısı depolama sisteminde entalpi yaklaşımına dayalı iki boyutlu bir teorik model geliştirmiş. Geliştirilen bu modelle depolama sisteminin performansı üzerine FDM'nin termofiziksel özellikleri, tankın boyutu, tank cidar kalınlığı ve malzemesinin etkisini araştırmışlar. Yüksek toplam entalpide, tank malzemesinin termal kapasitesinin erime oranı üzerine etkisinin olmadığını ancak, depo malzemesi ve FDM'nin ısı iletim katsayısının erime oranı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Li vd. (1999), çevrim boyunca faz ayrışmasının az görüldüğü katı-katı faz değişim malzemesi olarak tetrachlorometallates $(n-C_nH_{2n+1}NH_3)MCl_4$ farklı bileşiklerini kullanmış. Bura da $n=10,12,16$ sayılarını ve $M=Cu,Zn,Hg,Mn,Co,Ni$ malzemelerini ifade eder. Kullanılan FDM'lerin katı-katı faz geçiş özelliklerini belirlemek için DSC ve IR analizlerini yapmışlar ve C_nM 'in sıcaklıkla entalpisinin nasıl değiştiğinin tablosunu vermişler. Ayrıca, C_nNi , C_nCd , C_nHg 'nin termal depolama için uygun olmadığını belirtmişlerdir.

Sarı (2004), parafinin termal özelliklerini iyileştirmek ve ısı iletkenliğini artırmak için bir deneysel çalışma yapmış. İki tip parafin içerisine ağırlıkça değişik oranlarda bir tip polietilen karıştırarak yeni FDM bileşiklerini elde etmiştir. Yeni FDM'lerin iç yapılarını SEM ile görüntülemiş ve ağırlıkça farklı oranlardaki parafin bileşiklerinin DSC analiz grafiklerini vermiştir. Ayrıca bileşik oranlarına bağlı olarak FDM'lerin geçiş ve erime sıcaklıkları ile gizli ısı değerlerini tablo halinde vermiştir. Parafin, polietilen ağırlığının %77' si değerine kadar bileşiğe katılırsa en verimli termal depolama yapılabileceğini, bu bileşik oranına kadar parafinin erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta ITA geçirilse bile parafinin bileşik yapısını bozmadığını ve böylece termal depolama için herhangi kaba ihtiyaç olmadığını ortaya koymuştur.

Lim vd. (1992), yaptıkları sayısal çalışmada farklı faz değiştirme sıcaklığına sahip maddelerden oluşan depoları birbirine seri bağlayarak yapılan gizli ısı depolama sistemlerinin optimizasyonunu yapmış. Her iki depoda da aynı ısı transfer akışkanı kullanmışlar.

Hendra vd. (2005), Mikro adı verilen bir geleneksel Endonezya maddesinin faz değiştiren madde olarak kullanımını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Deneysel ve teorik sonuçların bir birine uyumlu olduğunu göstermişlerdir.

1.4.4. Literatür Tablosu

Literatür özetinde verilen yayınların özet sınıflandırması Tablo 1.15.'de verilmiştir.

Tablo 1.15. Literatür özetinin kısaltılmış incelenmesi

Yazar	Kullanılan FDM	Isı Kaynağı	Geometri	Erime / Katılma	Deneysel / Teorik
Carlsson ve Wettermark, 1979	CaCl ₂ .6H ₂ O	Sıcak su	Düşey silindir	+/-	+/-
Katayama vd., 1981	Naftalin	Elektrikli ısıtıcı (Dıştan)	Düşey silindir	+/+	+/+
Kawamura vd., 1982	Mg ₂ Ni	Su buharı	Düşey silindir	+/-	+/+
Dietz, 1984	Kalsiyumklorit heksahidrat	Hava	Düşey silindir paketlenmiş çoklu depolama	+/+	+/+
Fouda vd., 1984	Glauber tuzu	Varsol	Düşey silindir	+/-	+/-
Ho ve Viskanta, 1984	n-oktadekan	Hava	Yatay silindirik depo	+/-	+/+
Hayashi vd., 1987	n-oktadecane, CaCl ₂ .6H ₂ O	Sıcak su	Silindir ve silindir içerisinde mikro kapsüller	+/+	+/-
Choi vd., 1989	Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O ve çeşitli oranlardaki su karışımları	Su	Düşey silindir	+/+	+/-
Christenson ve Incropera, 1989	Sulu sodyum karbonat solüsyonu	Sabit ısı kaynağı	Yatay silindir	-/+	+/-
Adebiyi, 1991	-	Su	Düşey silindirik tank içerisinde çoklu yatay silindir	+/-	-/+
Cao vd., 1991	LiH	Hava (dış akış)	Yatay silindirik depolama	+/-	-/+
İlken ve Toksoy, 1991	-	-	Kanatçıklı boru	-/+	-/+
Cao ve Faghri, 1992	LiH	Hava (iç akış)	Yatay silindirik depo	+/-	-/+
Charach ve Zemel, 1992	-	Sıcak ideal gaz	Yatay halka aralıklı silindir	+/-	-/+
Choi ve Kim, 1992	MaCl ₂ .6H ₂ O	Hava	Düşey silindir	-/+	+/-
Lacroix, 1993 (a)	n-octadecane	Su	Yatay ve düşey silindir (kanatçıksız ve kanatçıklı)	+/-	+/+
Akgün, 1994	Kalsiyum klorür heksahidrat	Su	Düşey silindir	+/-	+/-

Tablo 1.15.'nin devamı

Yazar	Kullanılan FDM	Isı Kaynağı	Geometri	Erime / Katılma	Deneysel / Teorik
Bellecci ve Conti, 1994	-	Su	Düsey halka aralıklı silindir	+/+	-/+
Hasan, 1994	Stearik asit	Su	Yatay ve düşey silindir	+/-	+/-
Vargas vd., 1994	Buz	Elektrikli ısıtıcı	Yatay silindir	+/+	+/+
Conti vd., 1996	-	-	Yatay halka aralıklı silindir	+/-	-/+
Esen ve Ayhan, 1996	Kalsiyum klörür heksahidrat, Sodyum sülfat dekahidrat, Parafin, Parafin wax	Su	Düsey silindir paketlenmiş depolama	+/-	-/+
Esen vd., 1998	Kalsiyum klörür heksahidrat, Sodyum sülfat dekahidrat, Parafin, Parafin wax	Su	Düsey silindir paketlenmiş depolama	+/-	-/+
Chen vd., 2000	Çekirdekleşme etkili su	Etilen glikol solisyonu	Yatay silindir modül içersine paketlenmiş küçük yatay silindirler	-/+	+/-
Ismail ve Abugderah, 2000	-	-	Düsey silindirler	-/+	-/+
Khillarkar vd., 2000	n-octadecane	-	Yatay dairesel tüp ve kare tüp	+/-	-/+
He ve Zhang, 2001	Al+Si alaşımı	hava	Yatay silindir (çoklu depolama)	-/+	+/+
Ismail ve Jesus, 2001	Su	Akışkan	Düsey halka aralıklı silindir	-/+	-/+
Ismail vd., 2001	Parafin	Su	Düsey silindir (eksenel kanatçık)	-/+	+/+
Saito vd., 2001	Sodyum Sülfat Dekahidrat	Su	Yatay silindir	-/+	+/+
Zhu vd., 2001	Buz	Hava	Sabitlenmiş yatay silindir	+/-	+/+
Dimaano ve Watanabe, 2002	%90 (%65 capric asit + %35lavrik asit) + %10 pentadecane	Su	Düsey silindir	+/+	+/-
Sarı ve Kaygusuz, 2002 (a)	Laurik asit + Stearik asit değişik oranlarda karışımı	Su	Düsey silindir	+/+	+/-
Sarı ve Kaygusuz, 2002 (b)	Palmitic asit	Su (içten)	Düsey silindir	+/+	+/-
Baran ve Sarı, 2003	Ötektik palmitik asit ve Stearik asit karışımı	Su	Düsey silindir	+/+	+/-

Tablo 1.15.'nin devamı

Yazar	Kullanılan FDM	Isı Kaynağı	Geometri	Erime / Katılma	Deneysel / Teorik
Buddhi vd., 2003	Ticari parafin wax	Su	Yatay halka aralıklı silindir (kanatçıklı)	+/+	+/-
Dimaano ve Watanabe, 2003	%65 capric asit + %35laurik asit	Su	Düsey silindir	+/+	+/+
Sarı, 2003	Palmitic asit ve mayristik asit karışımı	Su	Düsey silindir	+/+	+/-
Ettouney vd., 2004	Parafin wax + etal kafes + metal küre	Su	Düsey silindir	+/-	+/-
Liu.vd., 2004 (a)	Stearik asit	İçten elektrikli ısıtıcı çubuk	Düsey silindir ve kanatçık	+/-	+/-
Liu vd., 2004 (b)	Stearik asit	Dıştan soğutucu su	Düsey silindir ve kanatçık	-/+	+/-
Erek vd., 2005	Saf su	Etil alkol	Radyal kanatçıklı yatay silindir	-/+	+/+
Trp, 2005	Teknik parafin	Su	Düsey silindir	+/+	+/+
Dimaano ve Watanabe, 2003	%65 capric asit + %35laurik asit	Su	Düsey silindir	+/+	+/+
Sarı, 2003	Palmitic asit ve mayristik asit karışımı	Su	Düsey silindir	+/+	+/-
Ettouney vd., 2004	Parafin wax + etal kafes + metal küre	Su	Düsey silindir	+/-	+/-
Liu.vd., 2004 (a)	Stearik asit	İçten elektrikli ısıtıcı çubuk	Düsey silindir ve kanatçık	+/-	+/-
Liu vd., 2004 (b)	Stearik asit	Dıştan soğutucu su	Düsey silindir ve kanatçık	-/+	+/-
Erek vd., 2005	Saf su	Etil alkol	Radyal kanatçıklı yatay silindir	-/+	+/+
Trp, 2005	Teknik parafin	Su	Düsey silindir	+/+	+/+
Jurinak ve Abdel-Khalik, 1978	Parafin wax ve Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	Hava	-	+/+	-/+
Henze ve Humphery, 1981	n-oktadekan	Elektrikli ısıtıcı	Yatay dikdörtgen depo (kanatçıklı)	+/+	+/+
Lou, 1982	Glauber tuz farklı karışımları	Soğuk su	Küp hücre (7.62x5,08x0,635 cm)	-/+	+/+

Tablo 1.15.'nin devamı

Yazar	Kullanılan FDM	Isı Kaynağı	Geometri	Erime / Katılma	Deneysel / Teorik
Moore ve Bayazıtöğlu, 1982	n-oktedans wax	Su	küresel kap	+/-	+/+
Ho ve Vıskanta, 1984 (b)	n-oktadekan	Hava	Düşey dikdörtgen prizma	+/+	+/-
Benard vd., 1986	n-oktadekan	Su	Düşey dikdörtgen bir prizma	+/+	+/+
De Lucia ve Bejan, 1990					
Farid ve Husain, 1990	Ticari parafin wax	Erimede elektrikli ısıtıcı, katılma-mada hava	Paketlenmiş düşey dikdörtgen prizmalar	+/+	+/+
De Lucia ve Bejan, 1991	-	Akışkan	Yatay dikdörtgen prizma	+/+	-/+
Son ve Morehouse, 1991	Neopentylglycol ve Pentaglycerine + Sodyum sültat dekahidrat ve Magnezim klorit hekhahidrat	Elektrikli ısıtıcı (içten)	Düşey içi silindir dışı küp 4x4x5.9 cm	+/-	
Lim vd., 1992	-	Akışkan	Ard arda sıralı depolar	+/-	-/+
Lacroix, 1993 (b)	n-oktedans	Silindirik ısı kaynağı	Düşey dikdörtgen prizma	+/+	+/+
Ouyang ve Tama, 1994	-	-	-	+/+	-/+
Inaba ve Morita, 1995	Parafin (tetradekane)	Deniz suyu	Çift tüplü kangal boru	-/+	+/-
Lee ve Chiou, 1995	-	Sabit ısı akılı soğutucu	Kare kesit alanı (5x5 m)	-/+	+/+
Domaski ve Fellah, 1996	İki faklı tip	Hava	Ard arda sıralı depolar	+/+	-/+
Gong ve Mujumdar, 1996	Çoklu komposit FDM	-	Bir birine bitişik yatay dikdörtgen kablalar	+/+	-/+
Gong ve Mujumdar, 1997 (a)	Beş faklı tip	-	Ard arda sıralı depolar	+/+	-/+
Lacroix ve Duong, 1998	n-octadecane	Erimede faklı elektrikli ısıtıcı, katılma-mada hava	Paketlenmiş düşey dikdörtgen prizmalar (0.19x0.02x0.4m)	+/+	+/-
Ramayya ve Ramesh, 1998	-	-	-	+/+	-/+

Tablo 1.15.'nin devamı

Yazar	Kullanılan FDM	Isı Kaynağı	Geometri	Erime / Katılma	Deneysel / Teorik
Rosen vd., 1988	Su	Akışkan	Yatay dikdörtgen kap	-/-	-/+
Banaszek vd., 1999	Parafin Wax	Hava	Arşimet spirali	+/+	+/-
Banaszek vd., 2000	Parafin Wax	Hava	Arşimet spirali	+/+	-/+
Cho ve Choi, 2000	n-tetradacane, su ve %60 hexadecane + %40 n-tetradacane karışımı	Ethylene glycol solisyonu	Küresel kapsül paketlenmiş (çoklu) depolama	+/+	+/-
Ismail ve Henriquez, 2000	Su	-	Küre kapsül	-/+	-/+
Pal ve Joshi, 2001	n-trikosane	Elektrikli ısıtıcı	Düşey dikdörtgen prizma	+/-	+/+
Vakilaltojjar ve Saman, 2001	Kalsiyum klorit heksahidrat, potasyum florit tetrahidrat	Hava	Düşey dikdörtgen ızgara (1x0.9x0.9 m)	+/+	-/+
Nagano vd., 2004	Magnezyum nitrat heksahidrat ve magnezyum klorit heksahidrat karışımı	Elektrikli ısıtıcı	Küp (50x50x10 mm)	+/-	+/-
Hamdan ve Al-Hinti, 2004	n-octadecane	Sabit ısı kaynağı	Dikdörtgen modül	+/-	-/+
Sharma ve Buddhi, 2005	Parafin wax	-	-	+/-	-/+

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Deney Düzeneği

Bu çalışmada, faz değiştiren maddeler kullanılarak termal enerji depolama prosesi incelenmiştir. Faz değiştiren madde olarak, farklı termofiziksel özelliklere sahip üç değişik tip parafin kullanılmıştır. Çalışmada, yeni bir depo geometrisi önerilmiş; önerilen bu depo geometrisi termal enerji depolama performansına göre optimize edilmeye çalışılmıştır. Her bir depo geometrisi için faz değiştiren maddenin erime/katılaşma davranışları incelenmiştir.

Bu çalışmada önce dizayn ve daha sonra imal edilen deney düzeneğinin şematik görünüşü deponun düşey konumu için Şekil 2.1.'de ve deponun yatayla eğimli yerleştirilmesi durumu için Şekil 2.2.'de verilmiştir. Kurulan depolama sisteminin genel bir fotoğrafı Şekil 2.3.'de verilmiştir. Ayrıca, 20° kabuk açılı depolama tankının termal depolama sistemine bağlantısı ve termo elemanlarla sıcaklık ölçme sisteminin depoya bağlantısının fotoğrafı Şekil 2.4.'de verilmiştir.

Deney sistemi, parafinlerin içerisine konulduğu beş farklı dış kabuk açısında gizli ısı depolama tankı, suyun sıcaklığının kontrol edildiği sabit sıcaklık banyosu, akışkanın debisinin ölçüldüğü debimetre, sıcak suyun pompalandığı sirkülasyon pompası ve sistemde iş yapan akışkanın kontrol edildiği 11 adet ısı transfer akışkan kontrol vanasından (a 'dan k 'ya kadar) oluşmaktadır. Akışkanın aktığı borular 1" çapındadır. Boruların ısı izolasyonu, polietilen hazır boru izolatörü ile yapılırken depolama sisteminin diğer bölümleri ise cam yünü ile yalıtılmıştır.

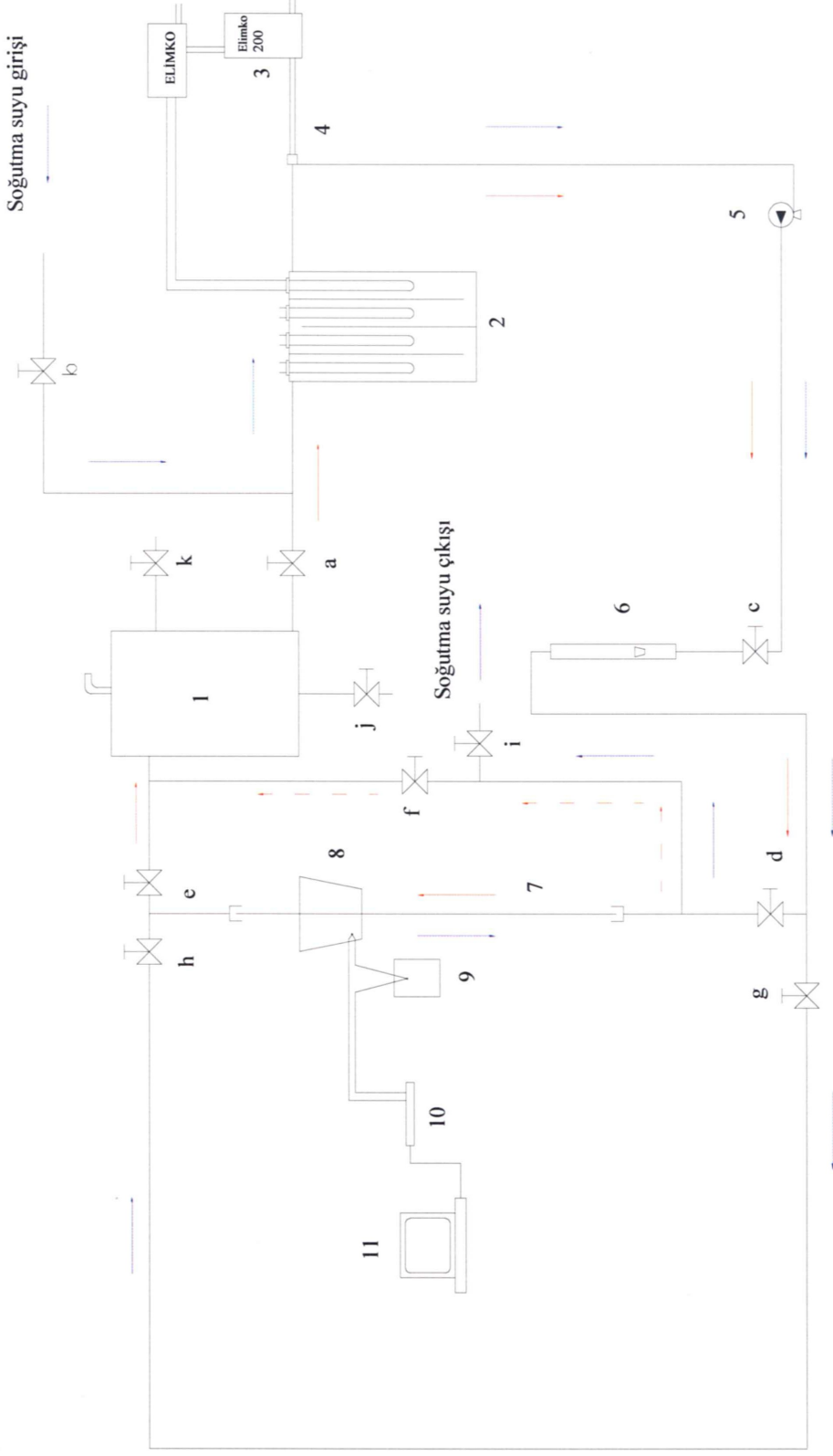
Faz değiştiren maddenin şarj işlemi, Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'de verilen 1 no'lu sıcak su deposunda başlar. Bu esnada, b,f,h,i,j ve k vanaları kapalı a,d ve e vanaları açıktır. Isı transfer akışkanı olarak kullanılan sıcak suyun şarj işleminde izlediği yol şekil üzerinde kırmızı sürekli okla verilmektedir. Sıcak su deposundan gelen akışkan istenilen sıcaklığa kadar sabit sıcaklık banyosunda ısıtılır, akışkan sıcaklığının ölçüldüğü Pt 100 üzerinden geçerek, sıcak su sirkülasyon pompasına ve oradan da akışkan debisinin ayarlandığı c vanasına gelir. Debisi ayarlanan sıcak su, ısı transfer borusundan geçerken ısısının bir

kısmını ısı depolama tankı içerisindeki parafine aktarır ve buradan da sıcak su tankına döner. Kırmızı kesik çizgilerle belirtilen hat ise; ısı transfer akışkanının sıcaklık ve debisinin rejim haline gelirken takip ettiği yolu gösterir.

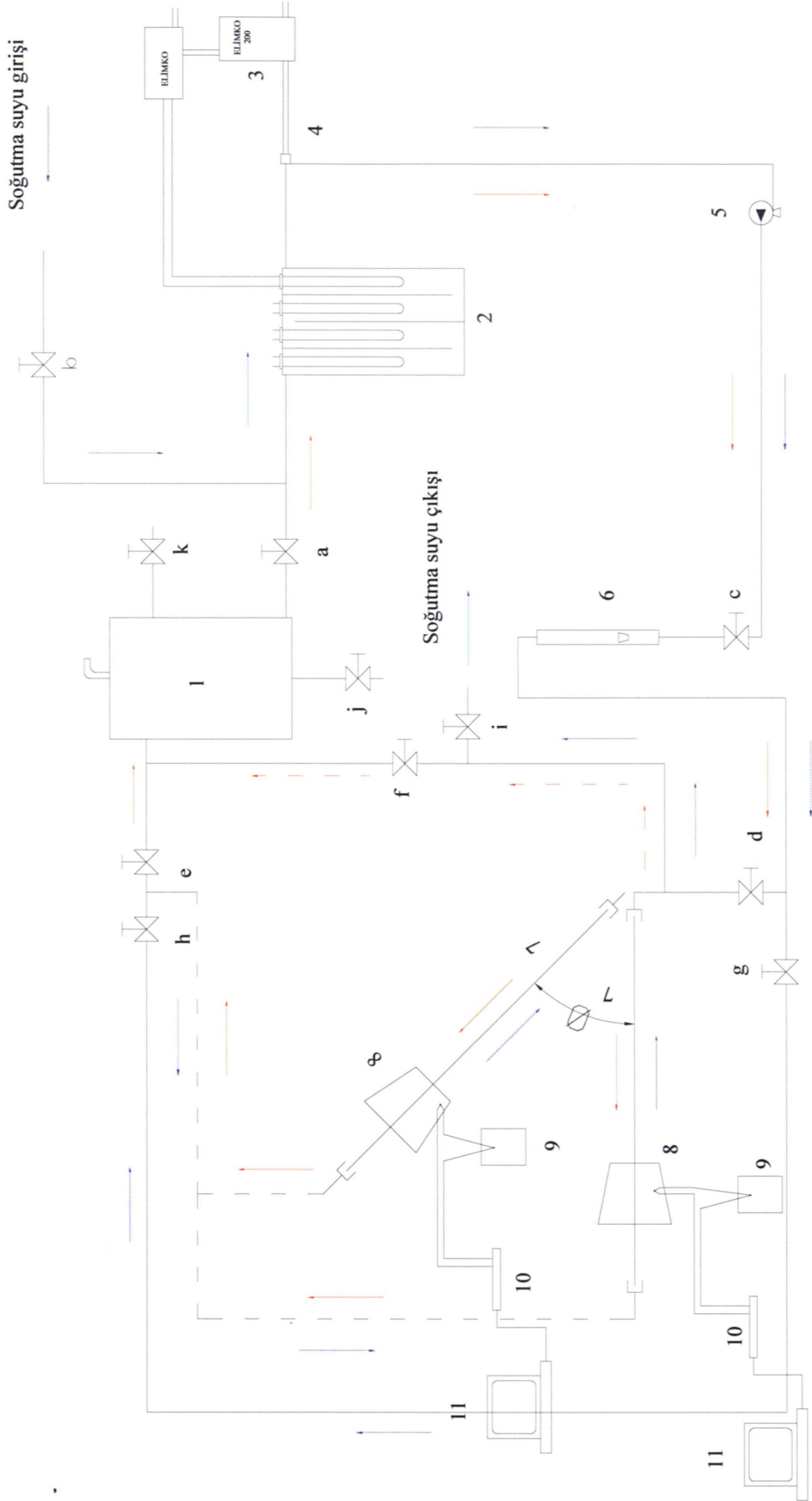
FDM'nin deşarj işlemi, Şekil 2.1. ve Şekil 2.2.'de verilen şehir şebekesi soğutma suyu girişinden başlar. Bu esnada, a,d,e,f,j ve k vanaları kapalı ve b,c,g,h ve i vanaları ise açıktır. Isı transfer akışkanı olarak kullanılan soğuk suyun izlediği yol mavi sürekli okla verilmektedir. Mavi kesik çizgili okla belirtilen hat ise; soğuk ısı transfer akışkanının sıcaklığı ve debisinin rejim haline gelirken takip ettiği yolu göstermektedir. Soğuk su girişinden giren ısı transfer akışkanının sıcaklığı 20 ° C' ye sabit sıcaklık banyosunda çıkartıldıktan sonra debisi c vanası aracılığıyla ayarlanmaktadır. Debimetre üzerinden yoluna devam eden soğuk su, depolama tankına şarj işleminin ters yönünde girer ve FDM'den akışkana ısı geçişi olur. Sonuç olarak akışkan açık olan i vanasından tahliye edilmektedir.

0° ve 5°'lik dış kabuk açısına sahip ısı depolama tankları Şekil 2.2.'de verildiği gibi yatayla farklı açılarda (0°, 30°, 60° ve 90 °) depolama sistemine bağlanmıştır. Silindirik depolama tankının, depolama sistemine yatay konumda bağlantı resmi Şekil 2.5.'de verilmektedir.

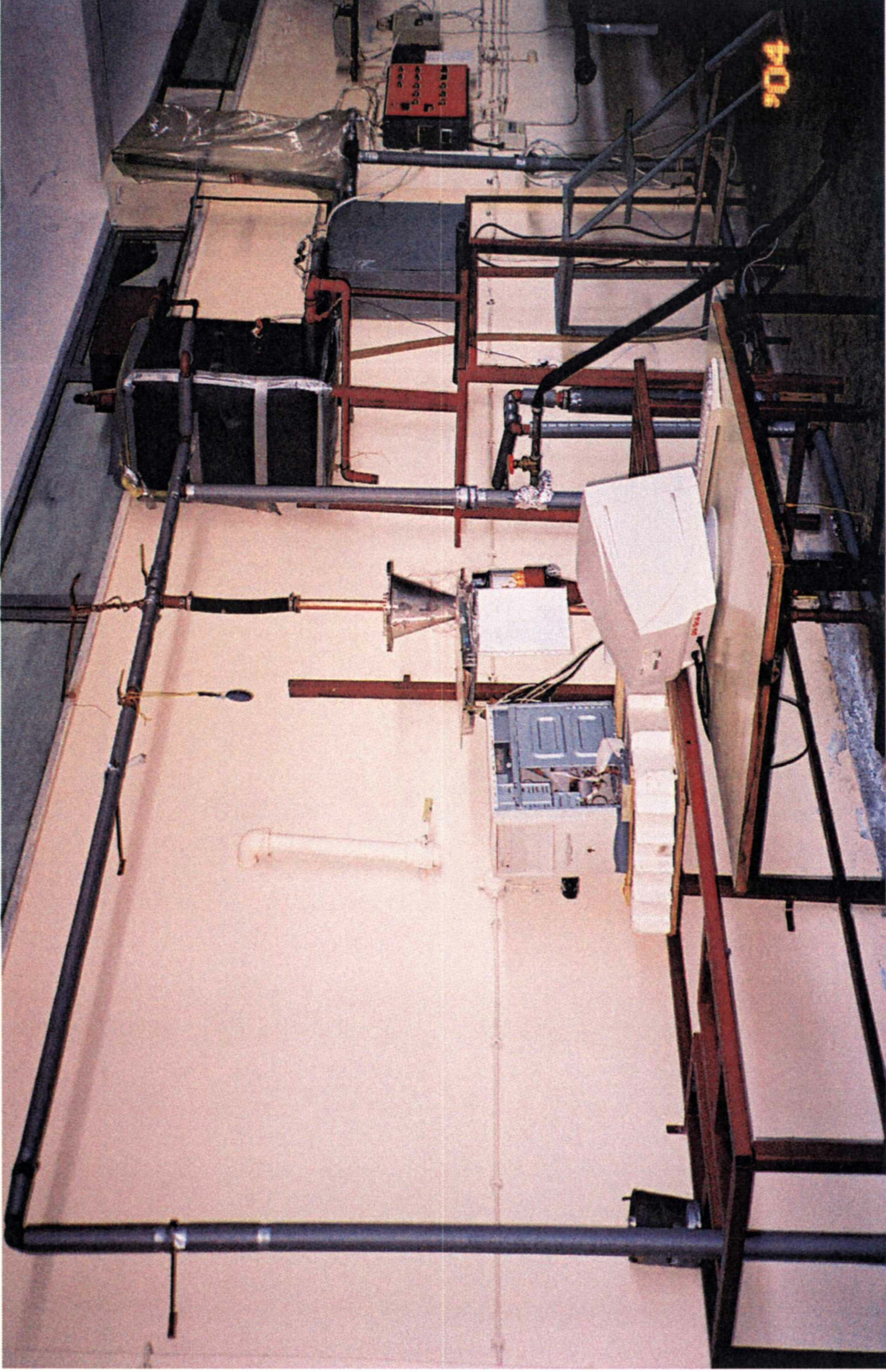
Şarj işlemi, tüm FDM'ler tamamen eridikleri zaman tamamlanmıştır. Depo içerisindeki FDM'nin duvarından ve içerisinden geçen bakır bir borudan kaybettiği ısıları minimize etmek için deşarj deneyleri şarj deneylerinin hemen peşine başlatılmıştır. Deşarj akışkanı olarak kullanılan sabit sıcaklığa getirilen şehir şebekesi suyu, deponun içerisinden ters yönde geçirilerek depodan ısı geriye alınmış ve deşarj işlemi tüm madde tamamen donduğunda bitirilmiştir.



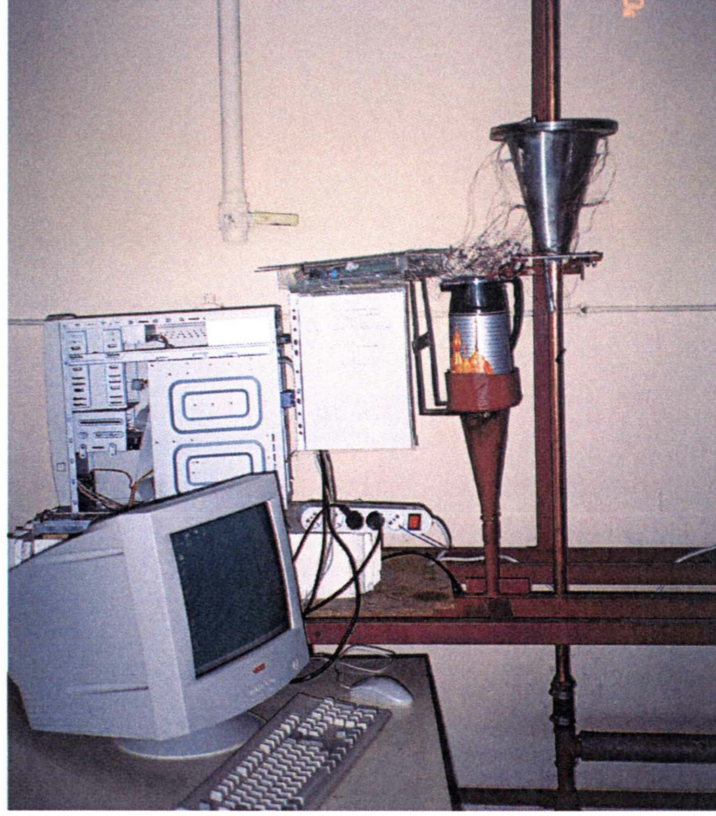
Şekil 2.1. Deneysel düzeneğin şematik görünüşü (1. sıcak su deposu, 2. sabit sıcaklık banyosu, 3. sabit sıcaklık kontrolörü, 4. Pt 100 sıcaklık ölçer, 5. sıcak su pompası, 6. debimetre, 7. ısı transfer borusu (1" bakır boru), 8. ısı depolama tankı, 9. termos, 10. data kartı, 11. bilgisayar ve vanalar (a-k))



Şekil 2.2. Isı depolama tankının yatayla belirli bir açıda yerleştirilmesinin şematik görünüşü (1. sıcak su deposu, 2. sabit sıcaklık banyosu, 3. sabit sıcaklık kontrolörü, 4. Pt 100 sıcaklık ölçer, 5. sıcak su pompası, 6. debimetre, 7. ısı transfer borusu (1" bakır boru), 8. ısı depolama tankı, 9. termos, 10. data kart, 11. bilgisayar ve vanalar (a-k))



Şekil 2.3. Deney düzenineğin genel fotoğrafı



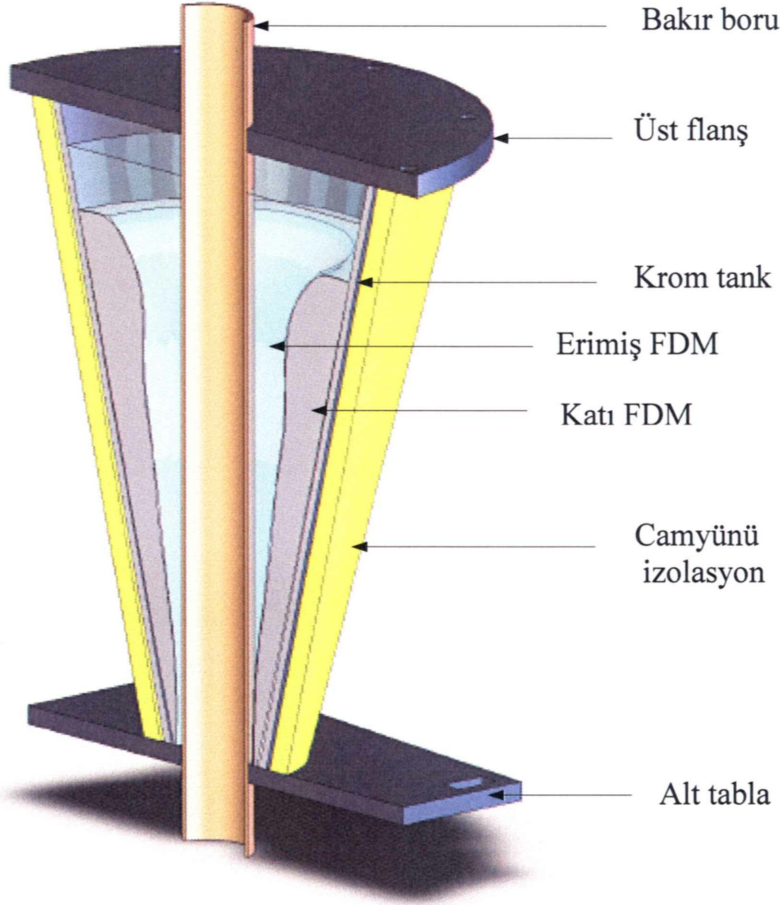
Şekil 2.4. 20° kabuk açılı deponun düşey pozisyonda sisteme bağlantı fotoğrafı



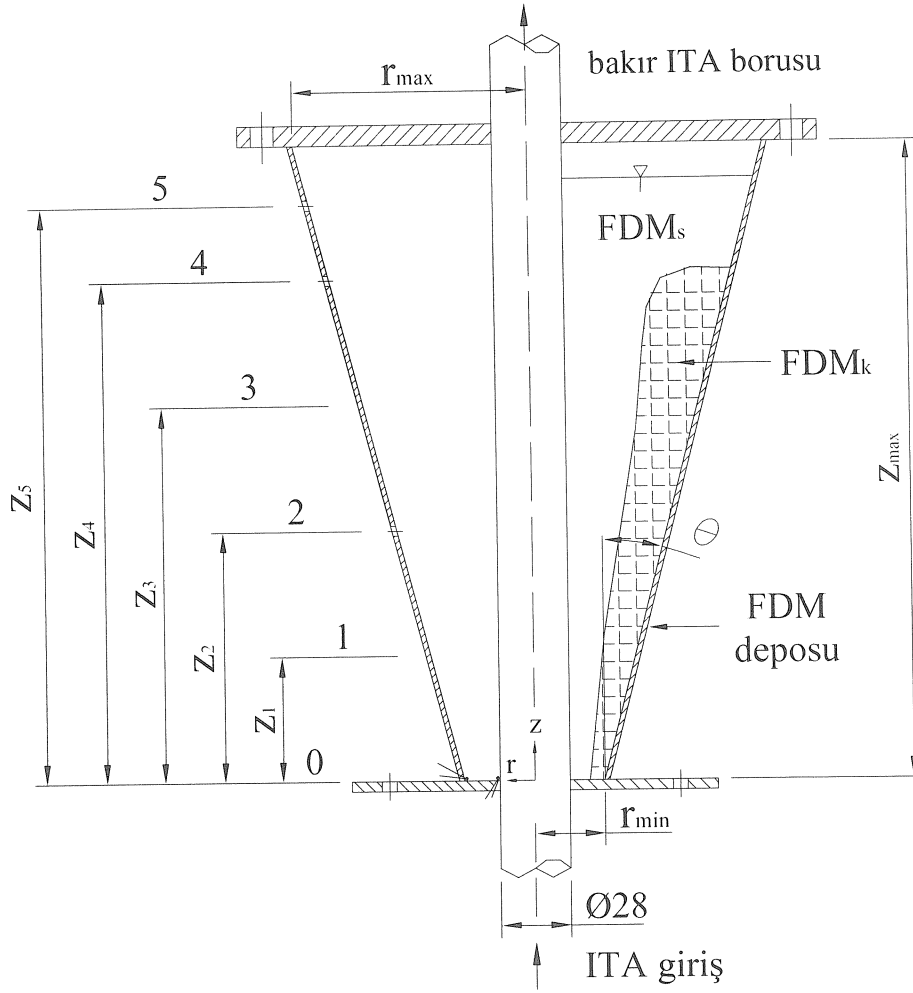
Şekil 2.5. Silindirik deponun yatay pozisyonda sisteme bağlantı fotoğrafı

2.1.2. Isı Depolama Ünitesi

Silindirik depolayıcıların depolama verimini artırmak ve depolama süresini kısaltmak amacıyla silindirik deponun kabuk açısının değiştirildiği ısı depolayıcılar imal edilmiştir. FDM, iç içe (konsantrik) silindirik bir boru ile dış kabuğu eğimli halka aralığa yerleştirilmiştir. İç boru 28 mm çaplı bakır bir boru olup, içerisinden ısı transfer akışkanı akmaktadır. Halka aralığının alt ve üst kısımlarının kapatılmasıyla elde edilen ısı depolama ünitesi iç borudaki akışın hidrodinamik olarak tam geliştiği bölgeye yerleştirilmiştir. İmal edilen deponun perspektif görünüşü Şekil 2.6.'da verilmiştir. Taban çapı ($r_{min} = 56$ mm) sabit tutulan deponun diğer boyutlarının simgesel olarak gösterimi Şekil 2.7.'de verilmiştir.



Şekil 2.6. Isı depolama modülünün perspektif görünüşü



Şekil 2.7. Isı depolama tankının şematik görünüşü

Bu çalışmada, etkisi incelenen ana parametrelerden biri deponun dış cidar açısıdır (geometrik bir parametre). Dış cidarın etkisinin erime ve katılaşma prosesi üzerindeki etkisini görebilmek için, dış cidar eğimi değiştirilirken; depo hacminin sabit tutulması hedeflenmiştir. Beş farklı dış cidar eğim açısı ele alınmıştır: 0° , 5° , 10° , 15° ve 20° . Farklı kabuk açıları için depo boyutları, termo elemanların bağlanacağı aksenal ve radyal mesafeler Tablo 2.1.'de verilmiştir. Beklenildiği üzere, sabit bir depo hacmi için, artan dış kabuk eğimi depo yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur. Kromdan imal edilen farklı kabuk açılı depoların (0° , 5° , 10° , 15° ve 20°) sırasıyla resimleri Şekil 2.8.- Şekil 2.12.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Isı depolama tankının kabuk açısına göre boyutları

θ	r_{\max}	$r_{\min} = r_0$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	Z_{\max}	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
0°	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3			465	100	200	300	400	421
5°	66.7	28	36.7	45.5	54.2	63	67	465	100	200	300	400	445
10°	88.3	28	45.6	63.3	80.9	---	---	325	100	200	300	---	---
15°	96.1	28	54.8	81.6	89.6	---	---	254	100	200	300	---	---
20°	104	28	64.4	100.8	---	---	---	210	100	200	---	---	---

Deneyleerde kullanılan FDM'min miktarı 2.2 kg'da sabit tutulmuştur. Erimiş parafinlerin yoğunluk farkından dolayı oluşan ortalama %10'luk genleşme boşluğu depo hacmine eklenmiştir.

Isı depolayıcının boyutları alt taban çapı (56 mm) ve içerisine alacağı FDM miktarı (2.2 kg) sabit kalacak şekilde deponun yüksekliği ve üst çapı hesaplanmıştır. Ancak, silindirik depo (dış kabuk açısı 0°) ile, ileride belirtileceği gibi dört tip depo içerisinde depolama süresi en kısa olan 5° kabuk açılı depoyla karşılaştırılmak için, silindirik deponun yüksekliği, FDM miktarı ve sudan FDM'ye olan ısı transfer alanları 5° 'lik depo ile aynı olacak şekilde silindirin dış çapı belirlenmiştir.

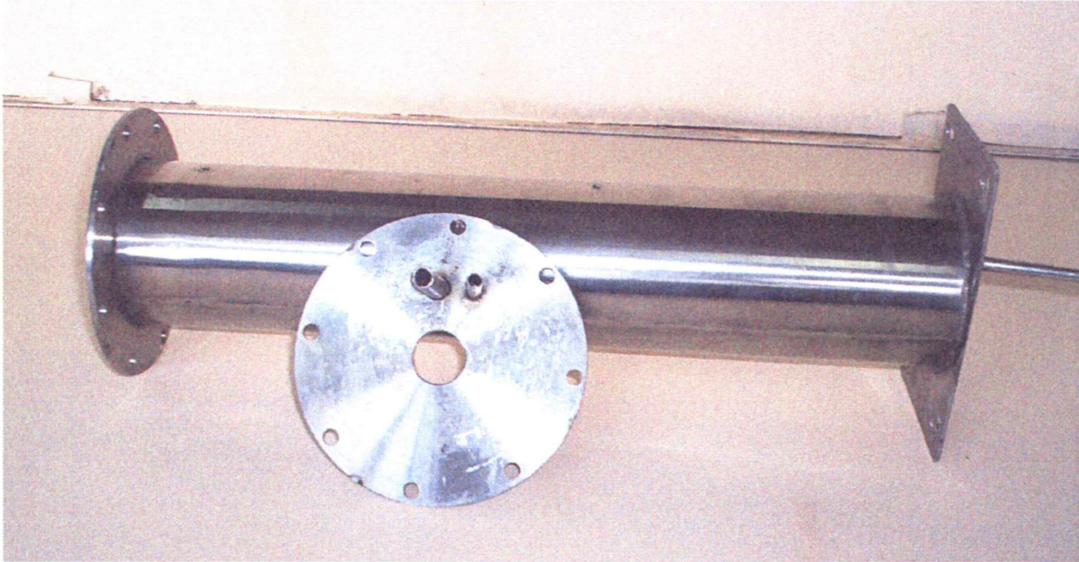
Isı depolama tankının alt ve üstüne merkezi olarak 28 mm çaplı bir delik açılmış ve bu delikten 28 mm çaplı dış çaplı, bir ısı transfer akışkanın içerisinden akacağı bir bakır boru geçirilmiştir. Isı depolama tankı, bakır boru üzerine ısı transfer akışkanının tam gelişmiş olduğu bölgeye bağlanmıştır.

Isı depolama tankının sabit olan alt yarıçapı ($r_{\min} = 28$ mm), ısıtıcı ve soğutucu akışkanın içerisinden geçtiği bakır boru yarıçapının ($r = 14$ mm) iki katı olarak belirlenmiştir. Ancak, bu durum silindirik depo için diğerlerinden farklıdır.

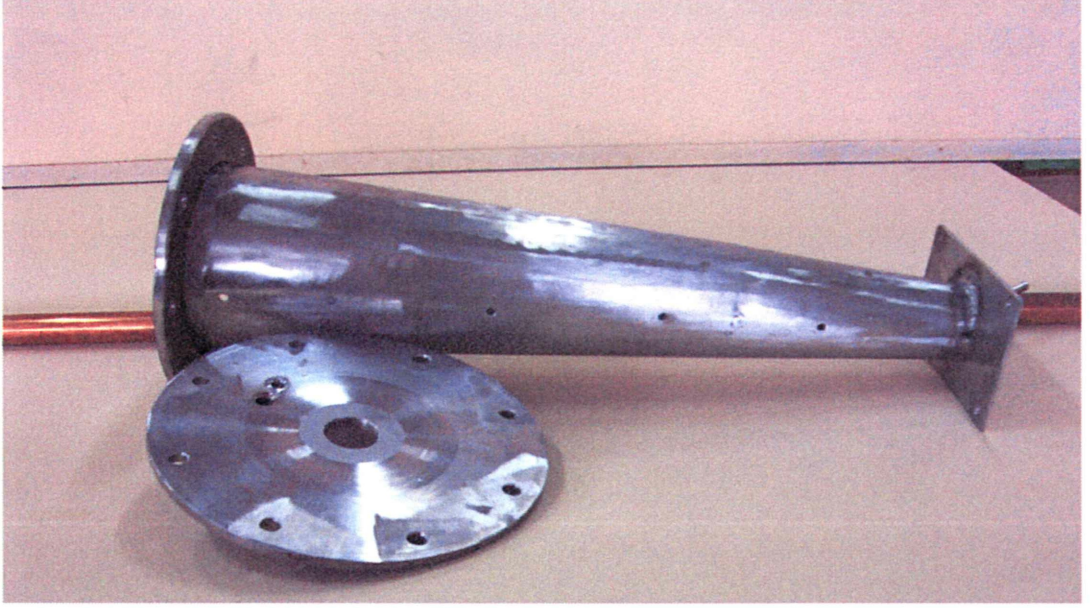
Isı depolama tankının dış çıdarı 2 mm kalınlığında, alt tabla 4 mm kalınlıklı krom sactan depoya kaynaklı birleştirme ile, üst tabla FDM'lerin doldurulması veya depo içerisinde yapılacak değişiklikleri karşılayacak şekilde açılabilir olsun diye 8 mm kalınlığında krom flanşlı bağlantı ile kapatılmıştır. Ayrıca, flanşın sızdırmaması için o-ring ve sıvı conta kullanılmıştır. Depolama sisteminde kullanılmak üzere imal edilen farklı kabuk açılara sahip depoların resimleri Şekil 2.8.-Şekil 2.12.'de verilmiştir. Depo malzemesinin krom seçilmesinin amacı; FDM'nin şarj ve deşarjı sırasında depolama tankı malzemesiyle reaksiyona girmesini önlemek, FDM'nin tüm deneyler boyunca saflığını

korumasını sağlamak ve kurulan depolama sisteminde parafinden farklı malzemelerin kullanılmasına imkan vermektir.

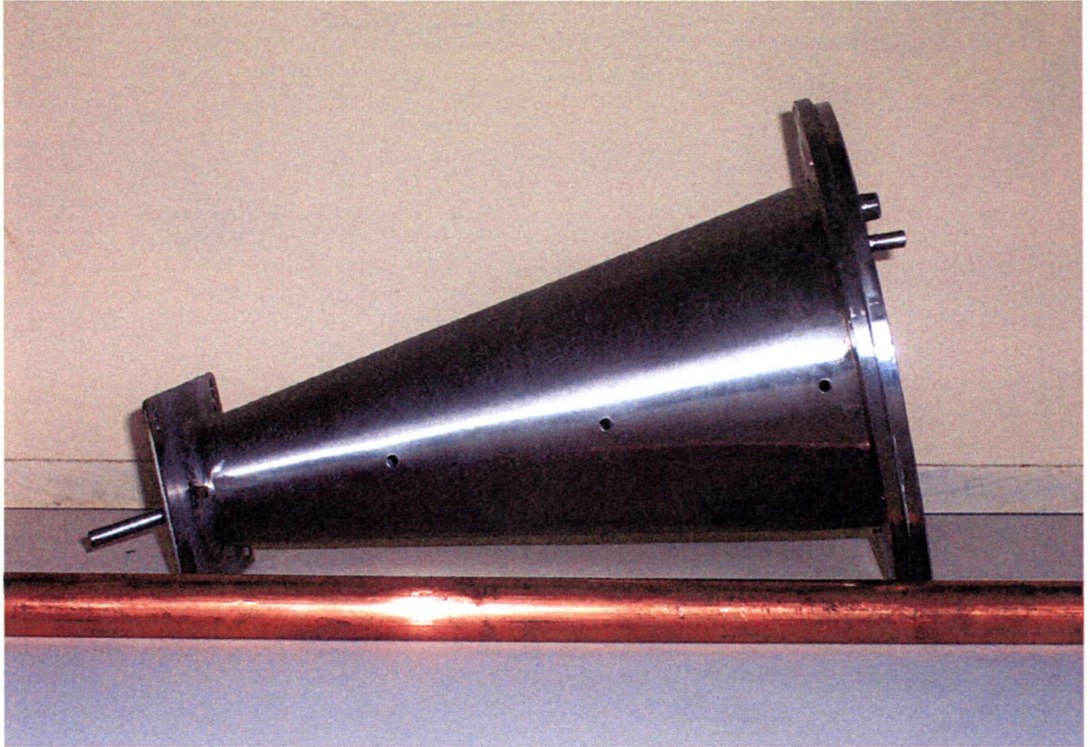
Depo içerisindeki FDM'nin tahliyesi için deponun alt tablasına 4 mm çaplı bir kanal açılmış ve bu kanal bir tapa ile sızdırmaz bir şekilde kapatılmıştır. Sızdırmazlığı sağlamak ve tapanın yerinden çıkmasını önlemek için yüksek sıcaklığa dayanıklı ve FDM ile reaksiyona girmeyen yapıştırıcı kullanılmıştır. Ayrıca, farklı FDM'leri depoya sistemi sökmeden doldurmak içinde üst flanşa 10 mm çaplı delik açılmış ve deliğe bir boru bağlantısı yapılmıştır.



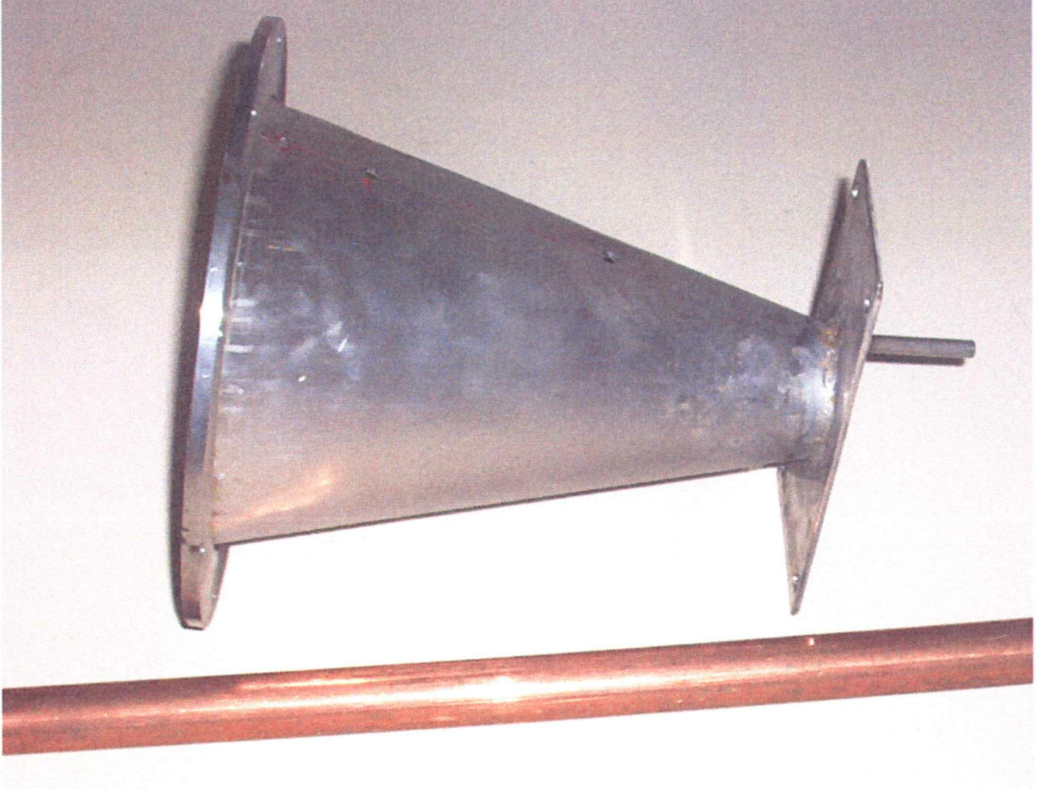
Şekil 2.8. 0° kabuk açılı deponun resmi



Şekil 2.9. 5° kabuk açılı deponun resmi



Şekil 2.10. 10° kabuk açılı deponun resmi



Şekil 2.11. 15° kabuk açılı deponun resmi

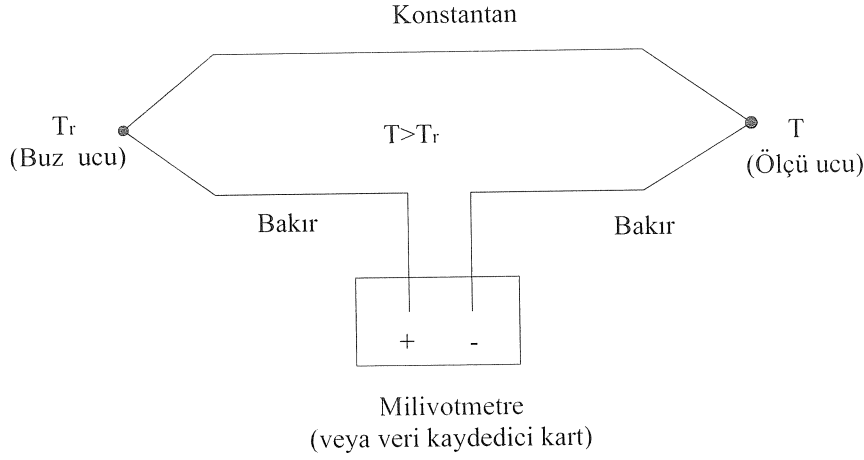


Şekil 2.12. 20° kabuk açılı deponun resmi

2.1.3 Termo Eleman Bağlantısı

Termo eleman çifti ile elektriksel olarak sıcaklık ölçme, iki nokta arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşan elektro motor kuvvetden (emk) yararlanılması prensibine dayanır. Termo eleman telleri birbirlerine çeşitli şekillerde birleştirilir. En çok kullanılan ve en hassas olanı uçların nokta kaynağı ile birleştirilmesidir. Birleşme yeri boyutu mümkün olduğunca küçük olmalı ve tellerin uçları iyice zımpara ile temizlenip parlatılmalıdır. Eğer nokta kaynağı için kuvvet makinesi yoksa daha hassas olamamak kaydıyla termo eleman telleri uç uca oksijen kaynağı ile kaynak edilebilir. Birleştirilen uçların elektrik izolasyonunu sağlamak için reçine veya vernikle iki kez sıvanır. Eğer termo elemanın bulunduğu ortamda bağlantı uçlarını bozacak bir dış etken varsa üzerine ısıya ve darbeye dayanıklı kaplama yapılır. Kaplama kalınlığı sıcaklığın geç algılanmasını engellemeyecek şekilde ince ve diğer termo elemanlarla sıcaklık algılamasında fark yaratmayacak şekilde aynı kalınlıkta olmalıdır. Termo eleman çifti ortamda olacak gürültüden etkilenmesin diye birbirlerine sarılmalıdır. Eğer termo elemanın boyu çok uzun ise ölçümün gürültüden etkilenmemesi için termo elemanlar Faraday kafesi oluşturacak izoleli bir kanaldan geçirilmelidir.

Bu çalışmada, ısı depolama tankı içerisinde FDM'nin değişik noktalarda ve ısı transfer akışkanının giriş ve çıkışta sıcaklıklarını ölçmek için Omega marka T tipli, 0.010 inç çapında teflon izoleli bakır-konstantan termo eleman çifti kullanılmıştır. Termo eleman çiftinin basit bağlantı şeması Şekil 2.13 'de verilmiştir. Bakır ile konstantanın birbirine bağlandığı iki ucu elektrik yalıtımı için ince bir reçine tabakasıyla kaplanmıştır. Termo elemanın izoleli bir ucu sıcaklığın okunacağı yere, diğer ucu da referans sıcaklığını oluşturması için termos içerisindeki 0 °C'de ki buzlu su banyosuna daldırılmıştır. Boşta kalan bakır uçlar sıcaklık farkından dolayı termo elemanda oluşan emk (mvolt)'ni ölçmek için veri kayıt kartına bağlanmıştır.



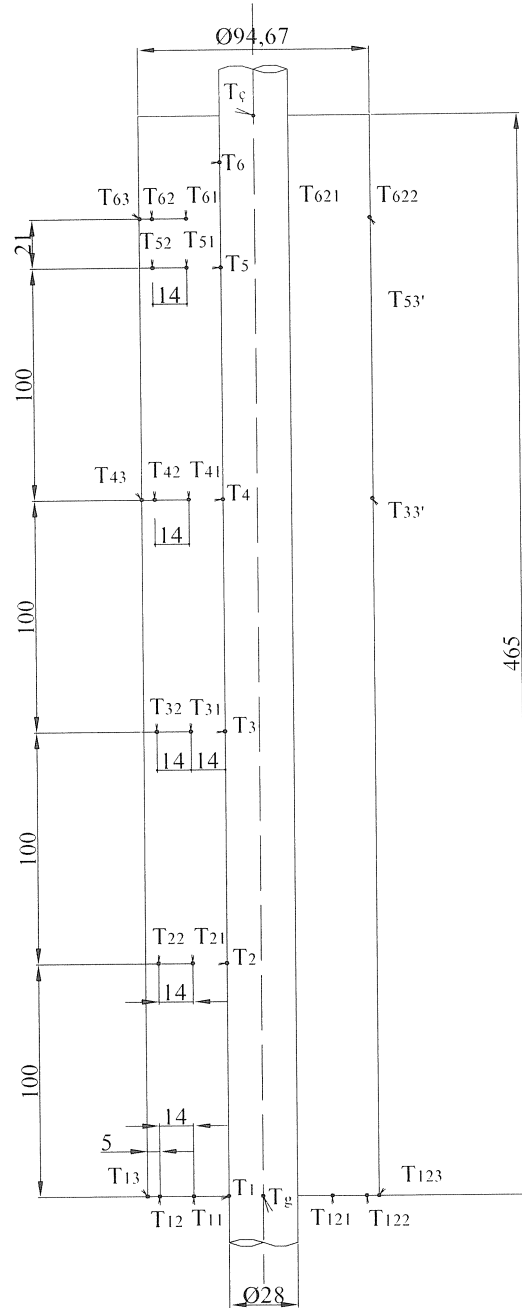
Şekil 2.13. Termo elemanın basit bağlantı şeması

Termo elemanlar; FDM'nin sıcaklığını radyal ve aksel yönde okuyacak şekilde ısı depolama tankı içerisine yerleştirilmiştir. Farklı kabuk açılarındaki depolar için radyal yönde termo elemanların birbirlerine olan mesafeleri ısı değiştirici akışkan borusundan itibaren 14 mm sabit aralıktır. Radyal yönde ısı depolama tankı cidarına yakın son termo eleman cidardan 3 mm mesafede konumlandırılmıştır. Bu konumlandırmanın amacı; termo elemanın ısı depolama tankı sıcaklığından etkilenmemesi ve FDM'nin gerçek sıcaklığının tespiti içindir. Kabuk açısı 20° olan ısı depolama tankı için; aksel yönde sıcaklık tabandan itibaren 0 mm, 100 mm ve 200 mm yüksekliklerde ölçülmüştür. Kabuk açısı 15° olan ısı depolama tankı için; aksel yönde sıcaklık tabandan itibaren 0 mm, 100 mm, 200 mm ve 230 mm yüksekliklerde ölçülmüştür. Kabuk açısı 10° olan ısı depolama tankı için; aksel yönde sıcaklık tabandan itibaren 0 mm, 100 mm, 200 mm ve 300 mm yüksekliklerde ölçülmüştür. Kabuk açısı 5° olan ısı depolama tankı için; aksel yönde sıcaklık tabandan itibaren 0 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm ve 445 mm yüksekliklerde ölçülmüştür. Kabuk açısı 0° olan (silindirik) ısı depolama tankı için; aksel yönde sıcaklık tabandan itibaren 0 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm ve 421 mm yüksekliklerde ölçülmüştür. Termo elemanların aksel yönde yerleştirildiği en üst nokta, FDM'nin katılaşması sırasında en küçük hacme sahip olduğu yerdir. Böylece termo elemanlar, katılaşmada hacmi küçülen FDM'nin sürekli içerisinde kalmıştır.

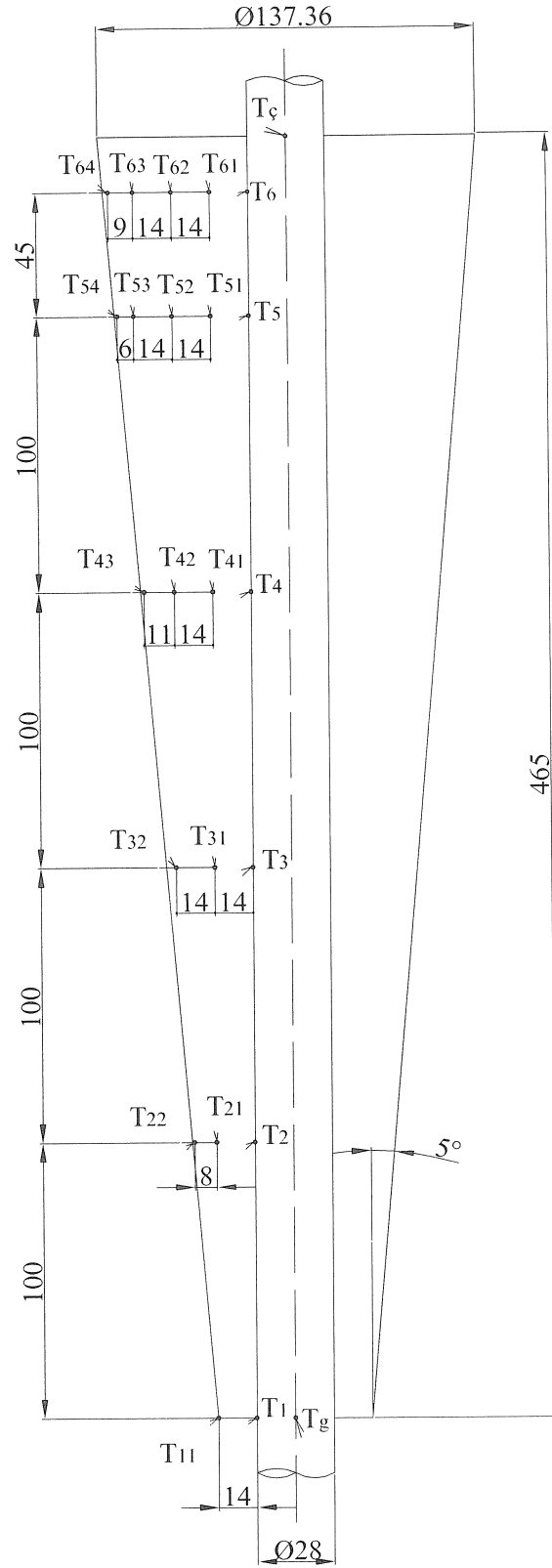
Isı transfer akışkanının ısı depolama tankına girdiği ve çıktığı noktalardan sırasıyla T_g ve T_c sıcaklıkları okunmuştur. Bakır boru üzerindeki termo elemanlar T_a ve FDM içerisindeki $T_{a,b}$ olarak adlandırılmıştır. Burada **a**; aksel mesafeyi ve **b**; radyal mesafeyi verir. Isı transfer akışkanının içerisinden aktığı bakır borunun FDM tarafındaki

eksenel yöndeki sıcaklıklarını ölçmek için; yukarıda verilen farklı kabuk açlarındaki ekstenel yönde verilen mesafelere uyulmuştur.

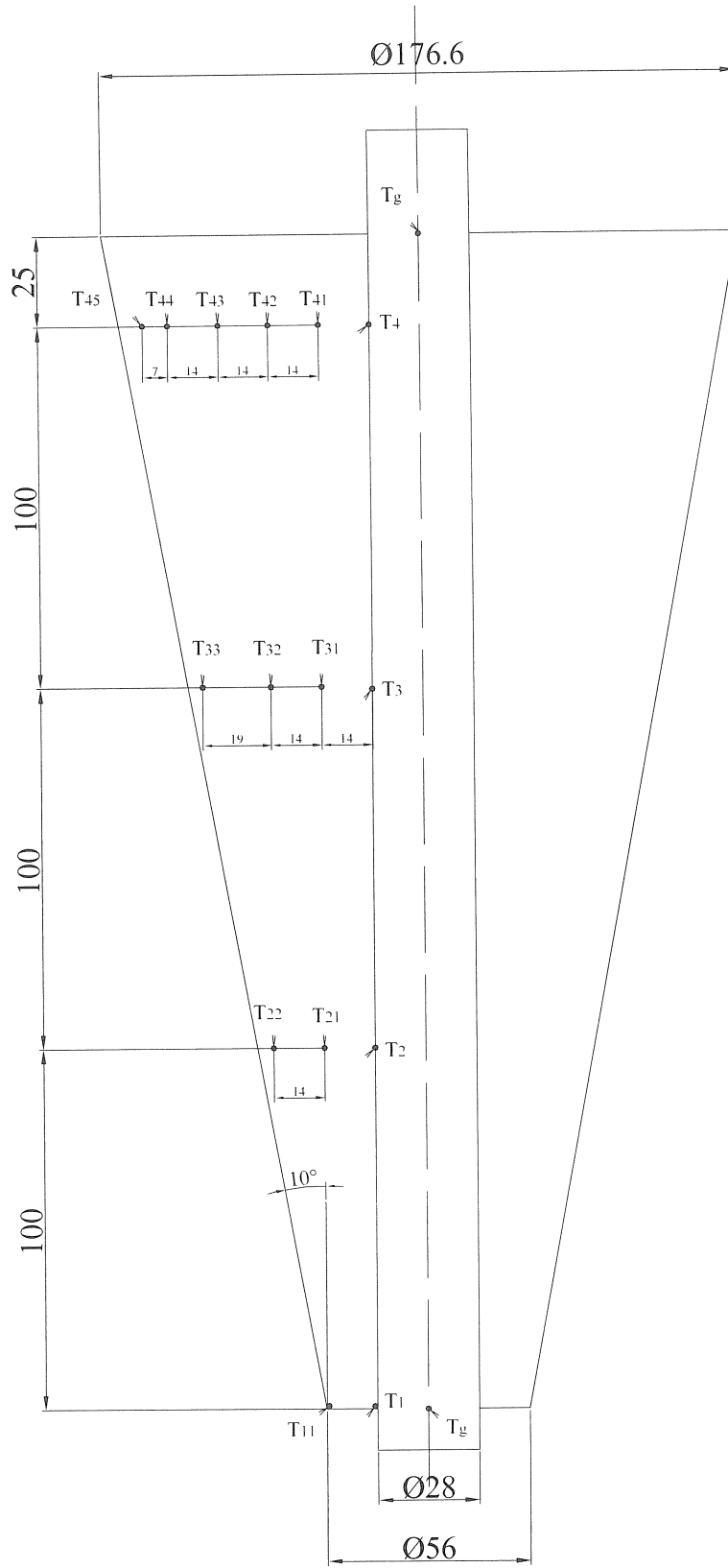
Şekil 2.14.- Şekil 2.18.'de sırasıyla 0° , 5° , 10° , 15° , 20° lik kabuk açılı ısı depolama sisteminde sıcaklık ölçmek için yerleştirilen termo elemanların adetleri, radyal ve ekstenel birbirlerine mesafeleri şematik olarak verilmiştir. Termo elemanların yerlerine tespiti sırasında 0.01 mm hassasiyetli dijital kumpas kullanılmış ve böylece ± 0.02 mm montaj hassasiyeti sağlanmıştır.



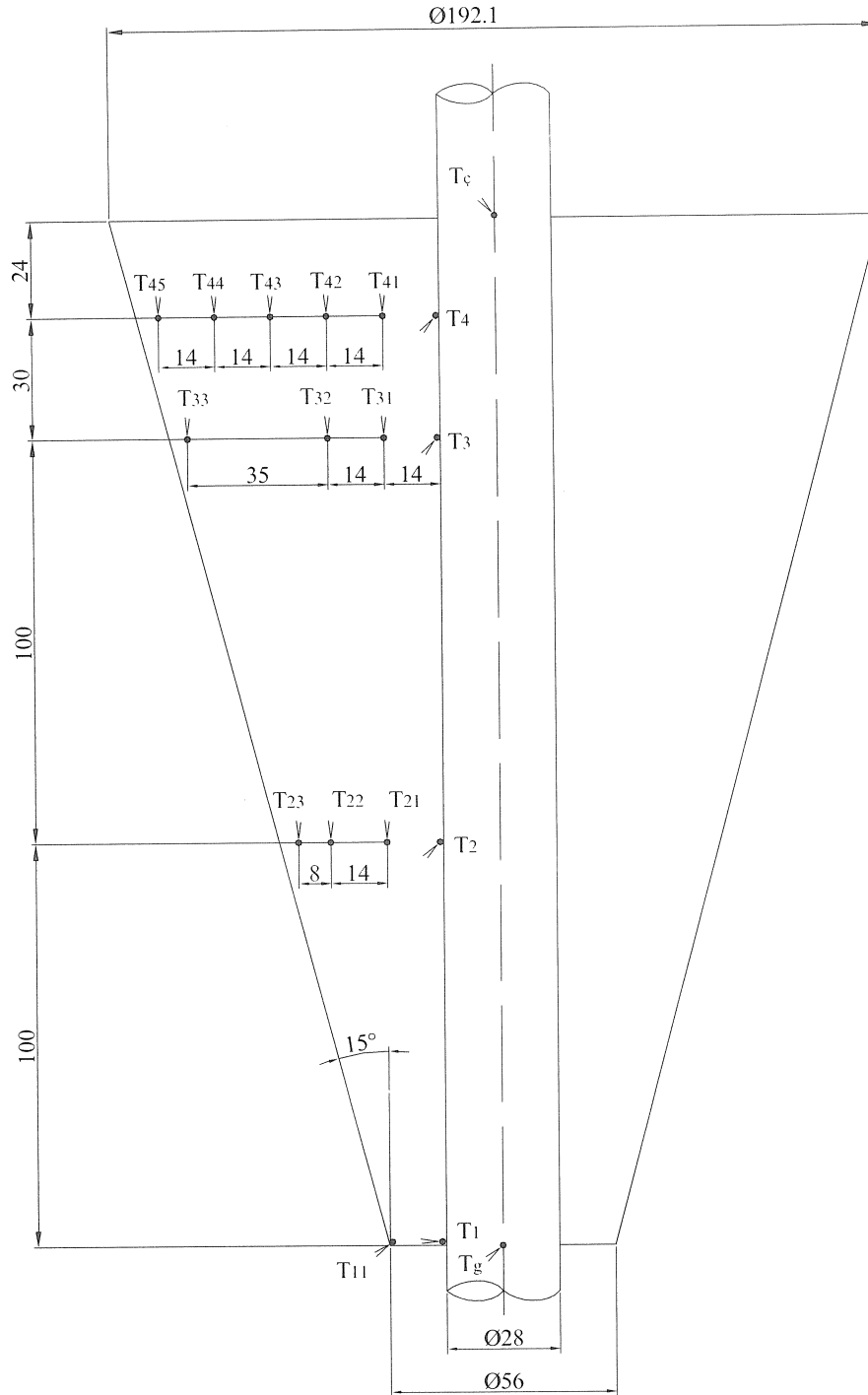
Şekil 2.14. 0° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması



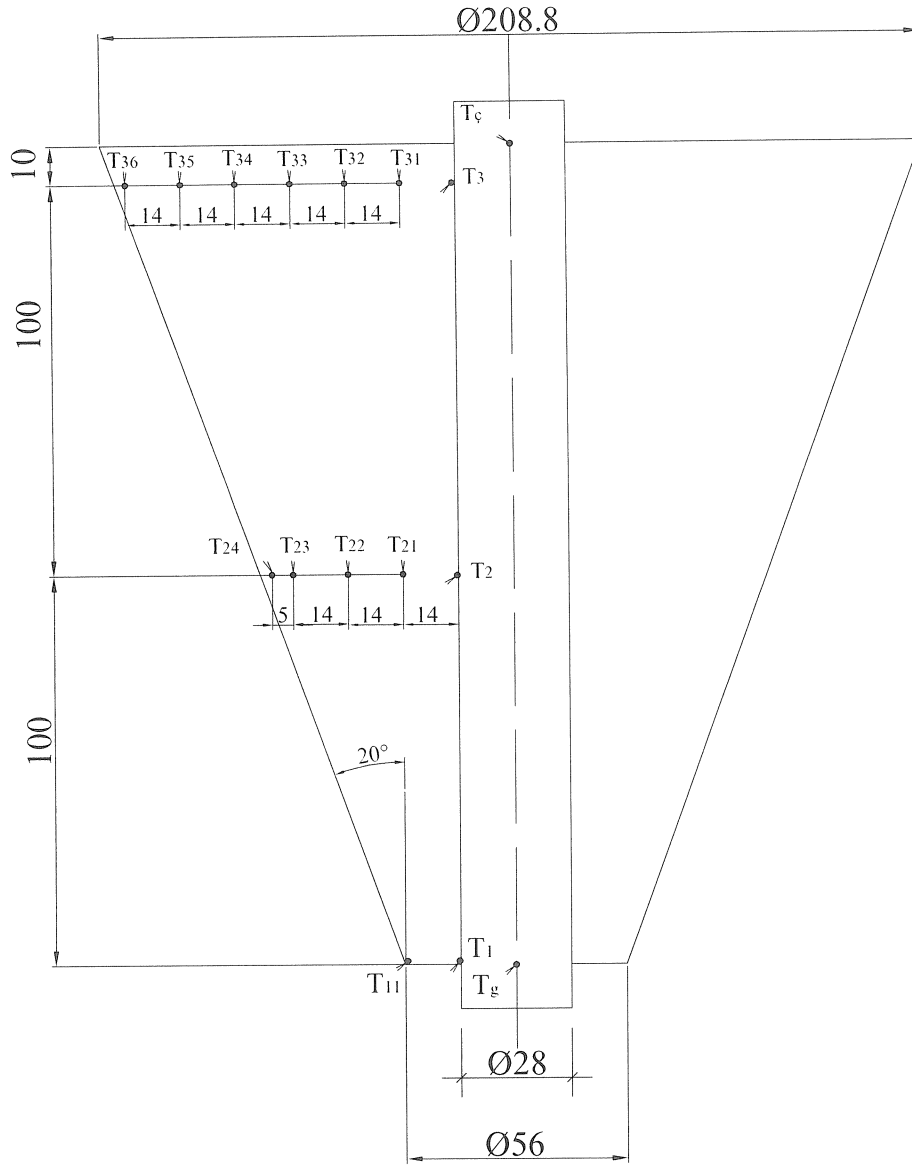
Şekil 2.15. 5° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması



Şekil 2.16. 10° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması



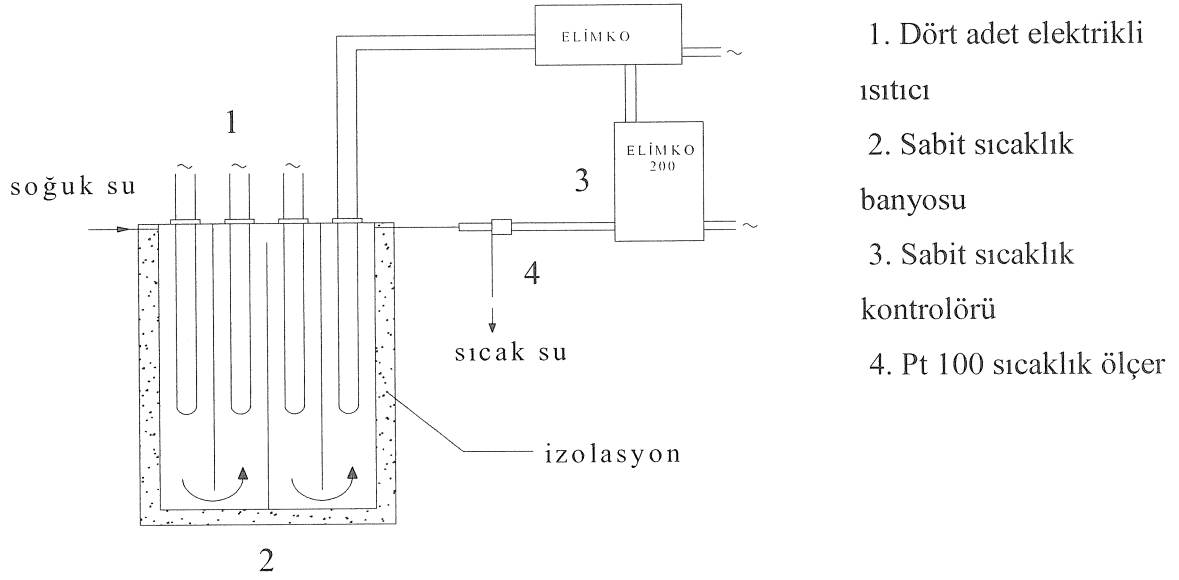
Şekil 2.17. 15° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması



Şekil 2.18. 20° kabuk açılı ısı depolama tankının termo eleman bağlantı şeması

2.1.4. Sabit Sıcaklık Banyosu

Sistemde depolanmış FDM'nin eritilmesinde ve dondurulmasında ihtiyaç olan ısı, sabit sıcaklıktaki ısı transfer akışkanı olan su ile sağlanmıştır. Suyun sabit sıcaklığa getirilmesi için Şekil 2.19.'da verilen sabit sıcaklık banyosu kullanılmıştır. Bu sabit sıcaklık banyosunda; suyu ısıtmak amacıyla 2000 watt gücünde, 35 cm uzunluğunda, daldırılmalı tip 4 adet krom ısıtıcı kullanılmıştır. Suyun sabit sıcaklık banyosuna giriş tarafından itibaren ilk üç ısıtıcı termostatlarla kontrol edilmiş, dördüncü ısıtıcı ise sabit sıcaklık banyosu çıkış sıcaklığını okuyan 15 cm boyunda 3/4" boru bağlantı rekorlu Pt 100 sıcaklık ölçerden gelen sinyale göre çalışan Elimko 200 tipli kontrolör tarafından kontrol edilmiştir. Sabit sıcaklık banyosu çevreye olan ısı kaybını önlemek için cam yünü ile izole edilmiştir.

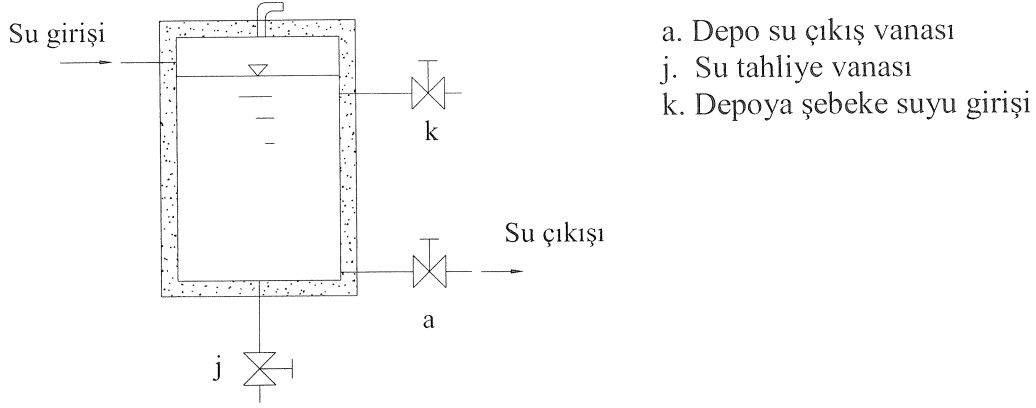


Şekil 2.19. Sabit sıcaklık banyosu

2.1.5. Sıcak Su Deposu

Erime işleminde ısı transfer akışkanı olarak kullanılan sıcak su, Şekil 2.20.'de verilen 1x0.4x0.4 m boyutunda, 4 mm kalınlığında sacdan imal edilen bir depoda muhafaza edilmiştir. Depo, ısı kayıplarını önlemek için cam yünü ile izole edilmiş ve depoya havalık, sıcak su giriş ve çıkış vanaları ile bir de depo tahliye vanası yerleştirilmiştir. Isı transfer akışkan çevrimi sıcak su deposundan başlatılmış olup, erime

işleminde kullanılan sıcak suyun sirkülasyonu 2 kademeli Wilo marka sıcak su pompası ile yapılmıştır.



Şekil 2.20. Sıcak su deposu

2.1.6. Debimetre

Debimetreler, akışkanın kaldırma özelliğinden faydalanarak yapılmış debi ölçme aletleri olup sağlıklı bir ölçüm için kalibre edilmeleri gerekir. Depolama sisteminde kullanılan soğuk ve sıcak suyun debisi, MFG Co. LTD (İngiltere) şirketi tarafından üretilen debimetre ile ölçülmüştür. Depolama sisteminde debimetre, Şekil 2.1.' de görüldüğü gibi sirkülasyon pompası ile ısı depolama tankı arasına yerleştirilmiştir. Bu deneylerde kullanılan debimetrenin şematik görünüşü Şekil 2.21.'de verilmiş olup; debimetre, içerisinde debisi ölçülecek sıvının (su) aktığı düşey konik bir silindir ve ayrıca silindir içerisinde hareket edebilen bir topaçtan oluşur. Akış yokken sudan ağır bir maddeden (genellikle paslanmaz çelik veya bronz) yapılmış olan topaç en alt konumda bulunur. Alttan yukarı doğru akış başladığında topaca etkiyen su direnci topacı yukarıya doğru hareket ettirir. Yukarı çıktıkça topaç ile silindir arasındaki geçiş kesiti artacağından sıvının hızı ve direnci azalır ve sonunda topaç belli bir konumda sabit durur. Sıvının debisi ne kadar fazla ise, topaçta orantılı olarak yükselecektir. Bu durum topacın serbest cisim diyagramı çıkarılarak, topaca etkiyen kuvvetler cinsinden şu şekilde ifade edilebilir (Holman 1989):

$$\text{Topacın ağırlığı} = \text{Sıvının direnci} + \text{Kaldırma kuvveti}$$

$$\rho_t V_t g = F_d + \rho_s V_t g \quad (7)$$

Burada;

ρ_t : Topacın yoğunluğu

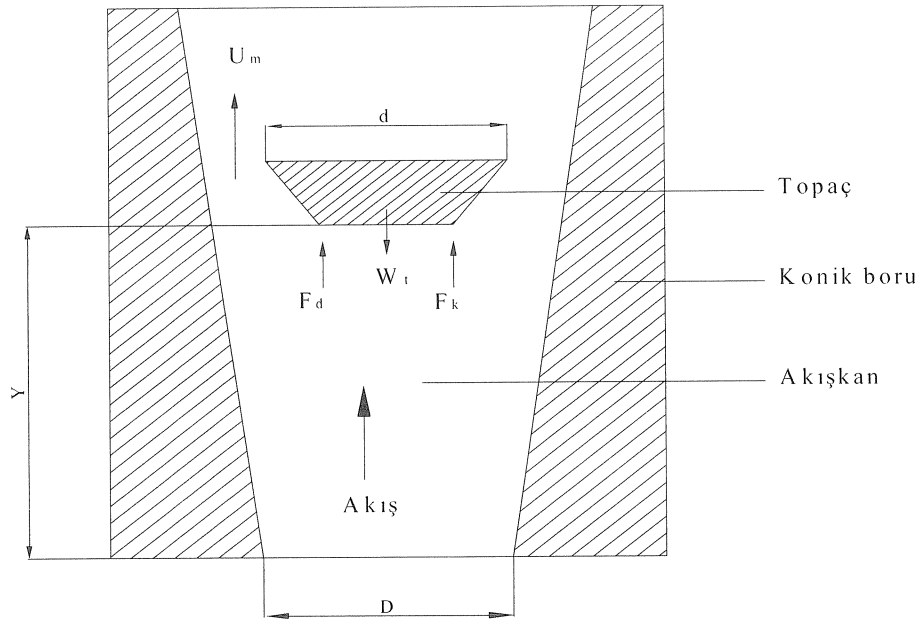
V_t : Topacın hacmi

ρ_s : Sıvının yoğunluğu

g : Yerçekimi ivmesi

F_d ise sıvının direnci olup, aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$F_d = C_D A_t \rho_s \frac{U_m^2}{2} \quad (8)$$



Şekil 2.21. Debimetrenin şematik kesiti (Holman 1989)

Burada;

A_t : Topacın sıvı akımına etki eden büyük kesit alanı

U_m : Topaç ile silindir arasındaki akımın ortalama hızı

C_t : Ölçme sabiti

C_D : itme katsayısı

Bu ifadelerden debimetreden geçen akışkanın kütleli debisi (\dot{m}_s) elde edilir.

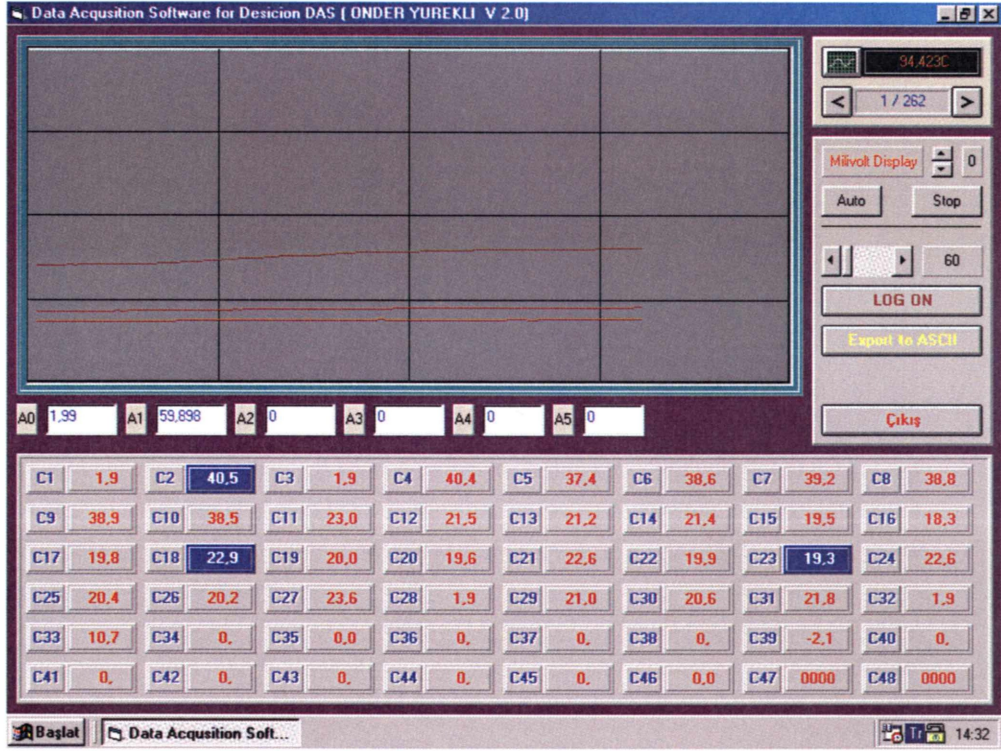
$$\dot{m} = U_m A \rho_s \quad (9)$$

$$\dot{m}_s = C_l y \sqrt{\rho_s (\rho_t - \rho_s)} \quad [\text{kg/s}] \quad (10)$$

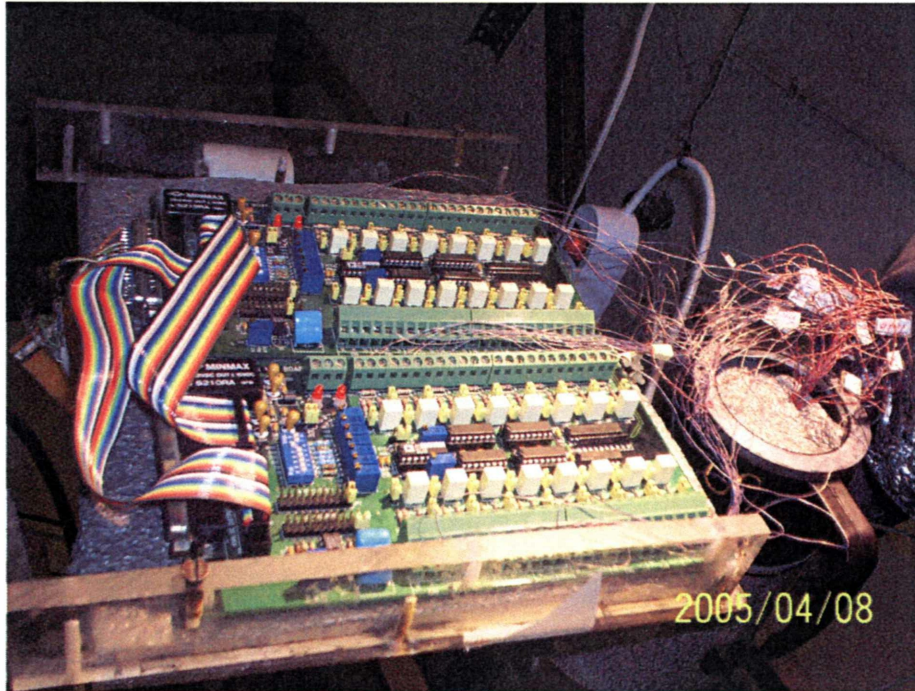
Debimetreden geçen sıvının debisi, topacın y yükselme miktarı ile yaklaşık olarak orantılıdır. Debimetre üreticileri imal ettikleri debimetreler için kalibrasyon eğrileri hazırlasalar da yapılan çalışmalar için tekrar kalibrasyon eğrisi çıkartılmış ve bu çalışmada da elde edilen kalibrasyona bağlı olarak debi ayarları yapılmıştır.

2.1.7. Veri Kaydedici (Datalogger)

Isı depolama sistemindeki termo elemanların sıcaklık farkından dolayı ürettikleri e.m.k.'i algılayıp bu sinyalleri sayısal formata dönüştürerek bilgisayara yollamak için 2 adet 16 kanallı yüksek kazanç ve düşük gürültü oranlı Advantech marka multiplexer ve bir adet 12 bit 'lik ADC (analog dijital dönüştürücü) kartı kullanılmıştır. Termo elemanlardan gelen mvolt genlikli sinyaller, yazılan bir program aracılığıyla sıcaklık değerleri hem bilgisayarın ekranına hem de gerçek zamanda veriler excell dosyasına 1 saniye aralıklarla okunmasına rağmen 1 dakika arayla kayıt edilmiştir. Şekil 2.22.'de termo elemanla okunan sıcaklıkların veri kaydedici aracılığıyla düzenlenmiş bilgisayar ekranına sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) olarak aktarılmış bir örnek ölçümün resmi verilmiştir. Ayrıca, Şekil 2.23.'de veri kartı ve termo elemanların karta bağlantılarının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 2.22. Ölçülen sıcaklıkların bilgisayar ekranına aktarılması



Şekil 2.23. Veri kartı ve termo elemanların bağlantısı

2.2. Parafinlerin Özellikleri

Parafin; zehirsiz, kimyasal dengede, çekirdekleşme sırasında ihmal edilebilir alt soğutma derecesi ile faz değişimi sırasında düşük hacim değişimine sahiptir. Bununla birlikte çok geniş olmayan faz değişim sıcaklık aralığı ve uygun faz değişim gizli ısısına da sahip olmaları parafinleri çekici hale getirmiştir. Parafinler, uzun süreli çevrimlere dayanıklı olması, depo malzemeleriyle korozyona girmemesi ve ticari parafinlerin fiyatının diğer kullanılan FDM'lere göre daha düşük olması sebebiyle gizli ısı depolama malzemesi olarak kullanımı yaygındır. Tablo 2.2.'de verildiği gibi parafinlerin yoğunluğunun düşük olması ve sıcaklıkla yoğunluğunun fazla değişmemesi dolayısıyla kullanılacak deponun imalatı kolay ve maliyeti düşüktür.

Parafinlerin katı haldeki gözenekli yapısı ve ısı iletim katsayısının düşük olması dolayısıyla toplam şarj ve deşarj sürelerinin uzun oluşu onların dezavantajlarından biridir (Inaba ve Morita, 1995).

Faz değişim işlemi sırasında sıcaklık düşer çünkü ısı kazanımı, katılaşma işlemi uzun olduğundan katılaşma enerjisinden daha büyüktür. Eğer kullanılan parafin saf değilse depo içerisindeki sıcaklık değişim eğrisi artar (Khillarkar vd., 2000).

Parafinin kullanıldığı küresel kapsüller küresel, levha, silindirik ve kangal şekilleri arasında en iyi termal depolama performansına sahiptirler (Saito vd., 2001).

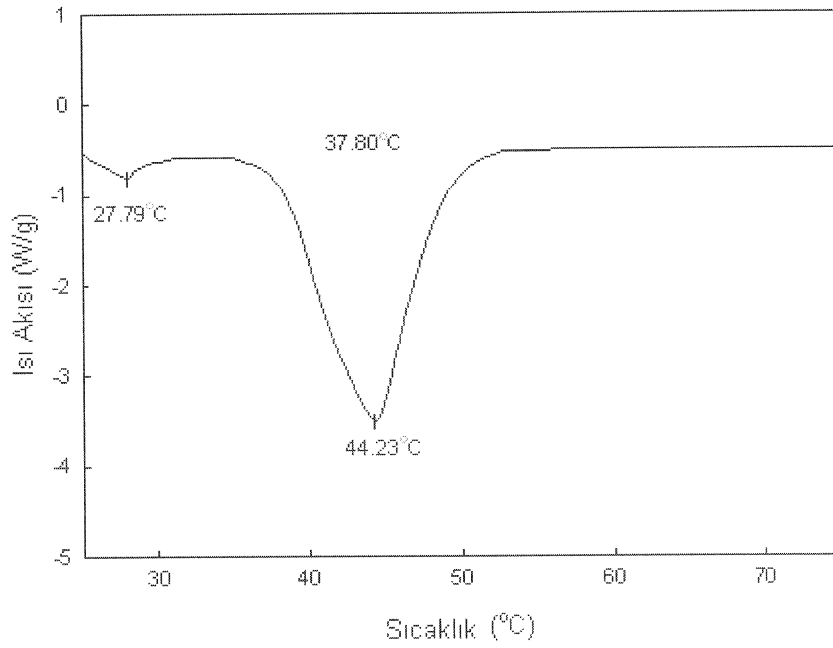
Bu deneysel çalışmada erime noktaları farklı üç tip parafin kullanılmış olup parafinlerin özellikleri Tablo 2.3.'de verilmiştir. Kullanılan parafinlerin DSC analizleri ODTÜ Kimya Bölümü'nde yapılmış olup, parafinlerin DSC analiz sonuçları Şekil 2.24.'de verilmiştir. Ayrıca, Merck Co. tarafından üretilen parafinlerin fotoğrafları Şekil 2.25.'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Parafin yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık °C	Yoğunluk (P1) kg/m ³	Sıcaklık °C	Yoğunluk (P2) kg/m ³	Sıcaklık °C	Yoğunluk (P3) kg/m ³
80	0.763	80	0.762	80	0.773
70	0.768	70	0.767	70	0.779
60	0.773	60	0.773	60	0.785
50	0.779	50	0.780	-	-
30	0.900	30	0.860	30	0.880

Tablo 2.3. Kullanılan parafinlerin termofiziksel özellikleri

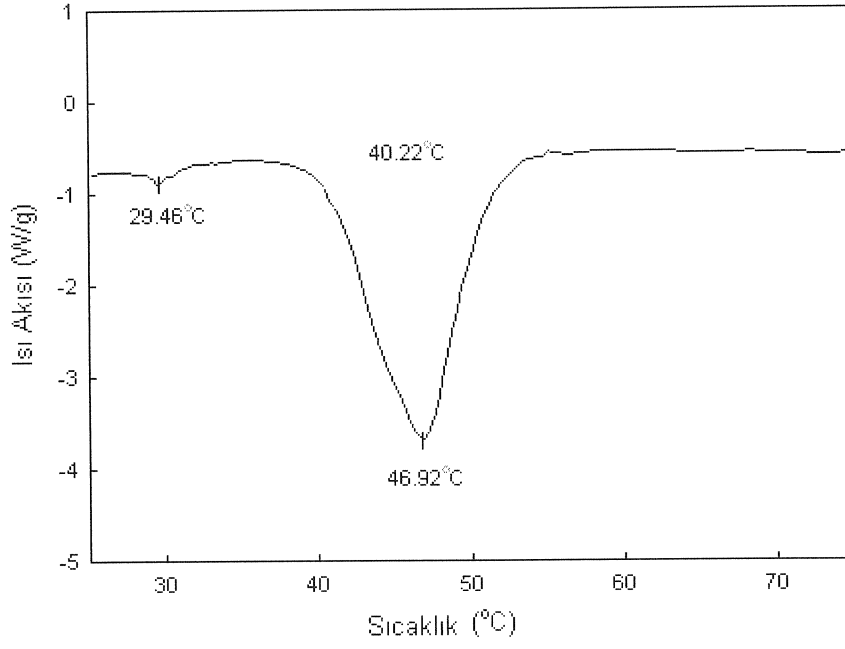
Üretici Firma Ürün				Ürün Adı	Mol Ağırlığı kmol	Erime Gizli Isısı kJ/kg	Yoğunluk		Özgül Isı	
Adı	Kodu	Katılaşma Sıcaklığı °C	Kaynama Sıcaklığı °C				Katı	Sıvı	Katı	Sıvı
							kg/m ³			
		30°C	80°C	25°C	80°C					
Merck	107150	42-44 :P ₁	300	Dokosane	310	252	900	763	1.929	2.383
Merck	107151	46-48 :P ₂	350	Trikosane	324	234	860	762	1.929	2.228
Merck	107337	56-58 :P ₃	350	Hekzakosane	366	250	880	762	1.84	2.37



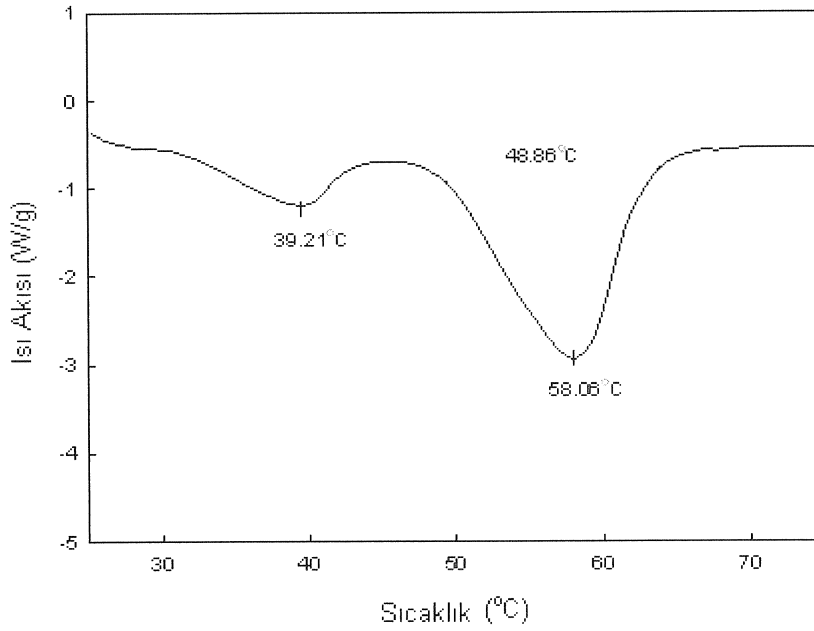
a)

Şekil 2.24. Parafinlerin DSC analizleri (a. P1, b.P2 ve c.P3)

Şekil 2.24.'ün devamı



b)



c)



a)



b)

Şekil 2.25. Parafınlerin resimleri (a. P1, b.P2 ve c.P 3)

Şekil 2.25.'ün devamı



c)

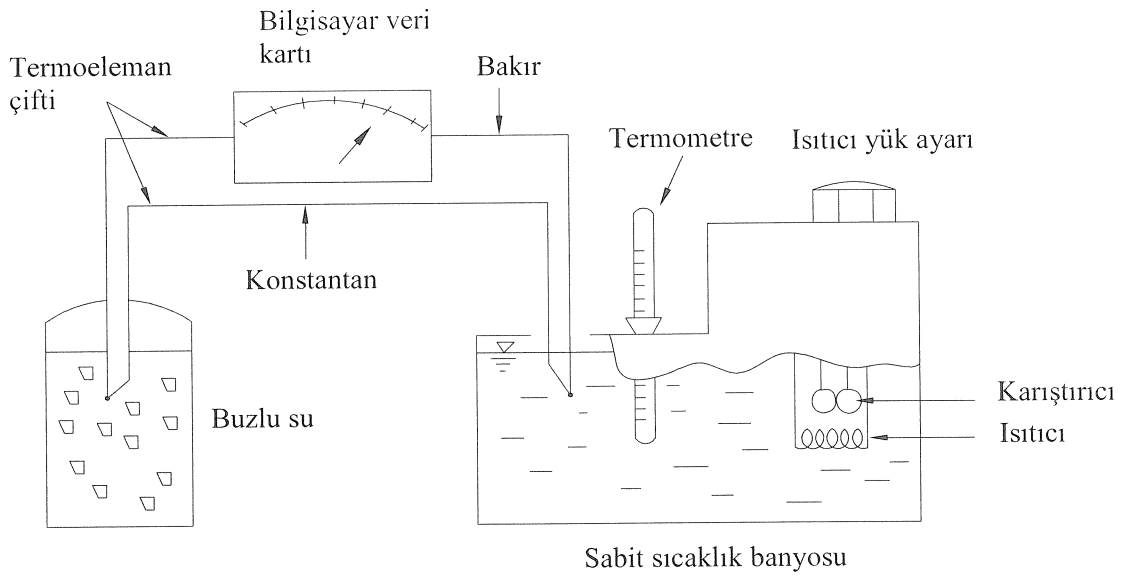
2.3. Kalibrasyon

2.3.1. Termo elemanların Kalibrasyonu

Termo elemanlarla sıcaklık ölçümü yapabilmek için termo elemanların kalibrasyon eşitliğinin bilinmesi gerekir. Deneyde kullanılan T tipli 0.010" (0.20 mm) çapındaki bakır-konstantan termo eleman çifti için üretici firma değerleri bilinse de veri kayıt sistemine uyumlu olarak bir kalibrasyon eğrisinin deneysel olarak bulunması gerekir. Termo eleman kalibrasyon deney düzeneği Şekil 2.26.'de verilmiştir.

Termo eleman çiftinin bir ucu 0 °C'deki buzlu su banyosuna, diğer ucu da sıcaklığı bir termostatla ayarlanabilen ± 0.1 °C hassasiyetli sıcak su banyosuna daldırılır. Her iki banyoya daldırılan termo elemanların uçları arasında oluşan çok küçük değerli emk ölçmek için boşta kalan bakır uçlar veri kaydedici karta bağlanır. Emk değerleri bilgisayar

ekranından genliği ayarlanmış şekil mvolt cinsinden okunur. 0 °C referans sıcaklığındaki buzlu su ile sıcaklıkları kademelendirilmiş sıcak su banyosu arasında ölçülen emk(milivolt)'e karşılık gelen sıcaklık değerleri her kademe için kaydedilir. Bilgisayar programı aracılığı ile farklı sıcaklıklar için kayıt edilen emk'lerin sıcaklık-gerilim (T (°C)- E (mV)) kalibrasyon eğrisi çizilir ve eğrinin denklemi elde edilir. Bu denklem, yazılan bilgisayar programına girilir böylece, veri kartından okunan mvolt değerindeki gerilimler Excell ortamına °C olarak aktarılır ve kayıt edilir.



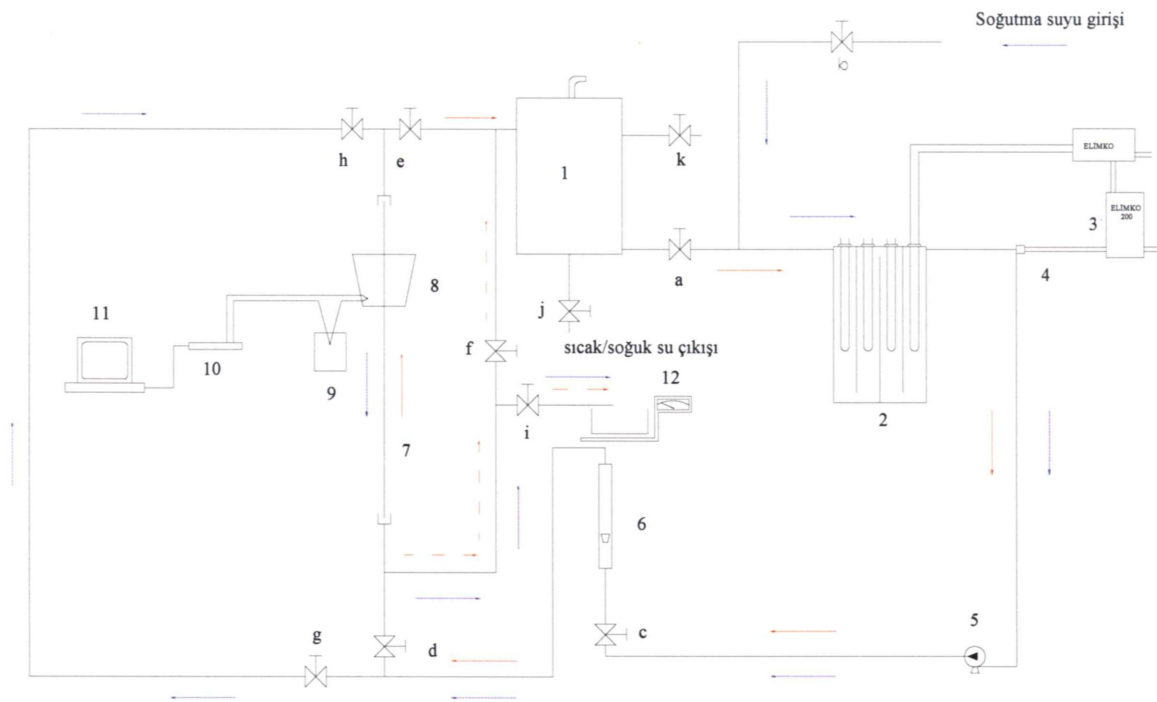
Şekil 2.26. Thermo element kalibrasyon deney düzeneği

2.3.2. Debimetrenin Kalibrasyonu

Isı depolama sisteminde ısı transfer akışkanı olarak su kullanılmaktadır. Faz değiştiren maddeye erimede ısısını veren, katılaşma da ısısını alan ısı transfer akışkanının kütleli debisi Şekil 2.27.'da verilen c vanası ile ayarlanmakta olup, 6 numara ile verilen debimetre (rotometre) aracılığıyla da geçen ısı transfer akışkanının miktarı belirlenmektedir. Sıcak su devirdaim pompasının bastığı ısı transfer akışkanının farklı sıcaklıklara göre kütleli debisi ile şehir şebekesinden gelen sabit sıcaklıktaki (20 °C) soğuk ısı transfer akışkanının kütleli debileri debimetre üzerinden kalibre edilmiştir.

Debimetrenin kalibrasyon işlemi; ısı depolama sisteminde kullanılan ısı transfer akışkanının bu çalışmadaki her bir kütleli debi ve sıcaklık için kalibrasyonu Şekil

2.27.'da 12 numara ile verilen terazi ile yapılmıştır. Sabit sıcaklıktaki suyun, **i** tahliye vanasından tahliye edildiği yerde bulunan, 0.001 kg hassasiyetli dijital bir terazi ile bir dakikalık zaman aralığındaki miktarı *kg/dk* cinsinden belirlenmiş ve bu değerlere bağlı olarak her bir sıcaklık değeri için debimetrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Şekil 2.27.'da verilen **c** vanası ile kalibre edilmiş 6 numaralı debimetre üzerinden tekrar yapılan kontrol ölçümlerinde, ± 0.050 kg/dk'lık kütleli debi farkının olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.27. Debimetre kalibrasyon deney düzeneği

2.4. Yapılan Deneylerin Tablosu

Deney çalışma, üç tip parafinin beş değişik geometride depolanması sırasında yapılan deneyleri içerir. Deneyler, erime ve katılaşma olarak sınıflandırılmış olup ayrıca kendi içerisinde depolama tankının yatayla olan açılara göre de yatay, düşey ve yatayla 30° ve 60° olarak sınıflandırtmıştır. Bu deneyler serisi, Tablo 2.4.-Tablo 2.13. arasında verilmiştir.

Tablo 2.4. Düşey konumda, 0° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	FDM1 ($T_m=42-44$ °C)	4	75
		6	75
		8	60
			65
			70
			75
0°	FDM3 ($T_m=56-58$ °C)	4	85
		6	85
		8	70
			75
			80
			85

Tablo 2.5. Düşey konumda, 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
5°	FDM1 ($T_m=42-44$ °C)	4	60
			65
			70
			75
		6	60
			65
			70
			75
		8	60
			65
			70
			75
5°	FDM2 ($T_m=46-48$ °C)	4	60
			65
			70
			75
		6	60
			65
			70
			75
		8	60
			65
			70
			75
5°	FDM3 ($T_m=56-58$ °C)	4	70
			75
			80
			85
		6	70
			75
			80
			85
		8	70
			75
			80
			85

Tablo 2.6. Düşey konumda, 10° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
10°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	60
			65
			70
			75
		6	60
			65
			70
			75
		8	60
			65
			70
			75
10°	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	60
			65
			70
			75
		6	60
			65
			70
			75
		8	60
			65
			70
			75
10°	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	70
			75
			80
			85
		6	70
			75
			80
			85
		8	70
			75
			80
			85

Tablo 2.7. Düşey konumda, 15° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
15°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	55
			60
			65
			70
		6	75
			60
			65
			70
		8	75
			60
			65
			70
15°	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	75
			60
			65
			70
		6	75
			60
			65
			70
		8	75
			60
			65
			70
15°C	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	75
			80
			85
			70
		6	75
			80
			85
			70
		8	75
			80
			85
			75

Tablo 2.8. Düşey konumda, 20° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
20°	FDM1 ($T_m=42-44$ °C)	4	55
			60
			65
			70
		6	55
			60
			65
			70
		8	55
			60
			65
			70
20°	FDM2 ($T_m=46-48$ °C)	4	60
			65
			70
			75
		6	60
			65
			70
			75
		8	60
			65
			70
			75
20°	FDM3 ($T_m=56-58$ °C)	4	70
			75
			80
			85
		6	70
			75
			80
			85
		8	70
			75
			80
			85

Tablo 2.9. Düşey konumda yapılan katılaşma deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	6	20
		8	
	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	
5°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	20
		6	
		8	
	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	
		6	
		8	
	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	
		6	
		8	
10°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	20
		6	
		8	
	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	
		6	
		8	
	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	
		6	
		8	
15°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	20
		6	
		8	
	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	
		6	
		8	
	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	
		6	
		8	
20°	FDM1 (T _m =42-44 °C)	4	20
		6	
		8	
	FDM2 (T _m =46-48 °C)	4	
		6	
		8	
	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	
		6	
		8	

Tablo 2.10. Yatay konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	75
			80
			85
5°	FDM3 (T _m =56-58°C)	6	80
			70
			75
		8	80
			85
			85

Tablo 2.11. Yatay konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan katılma deneyleri

Kabuk açısı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	20
5°	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	20
		6	
		8	

Tablo 2.12. Yatayla 30° ve 60° konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan erime deneyleri

Kabuk açısı	Yatayla olan açı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	30 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	75
				80
				85
	60 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	75
				80
				85
5°	30 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	75
				80
				85
	60 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	75
				80
				85

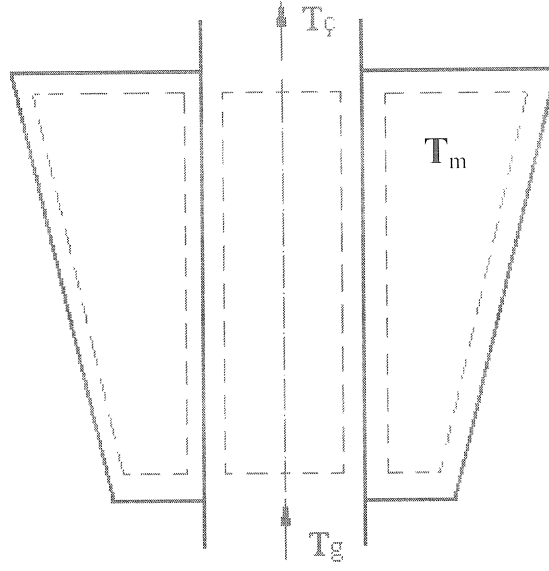
Tablo 2.13. Yatayla 30° ve 60° konumda, 0° ve 5° kabuk açılı depoda yapılan katılaşma deneyleri

Kabuk açısı	Yatayla olan açı	FDM	Akışkan debisi (kg/dk)	Akışkan sıcaklığı (°C)
0°	30 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	8	20
	60 °		4	
5°	30 °	FDM3 (T _m =56-58 °C)	4	20
			6	
			8	
	4			
60 °	8			

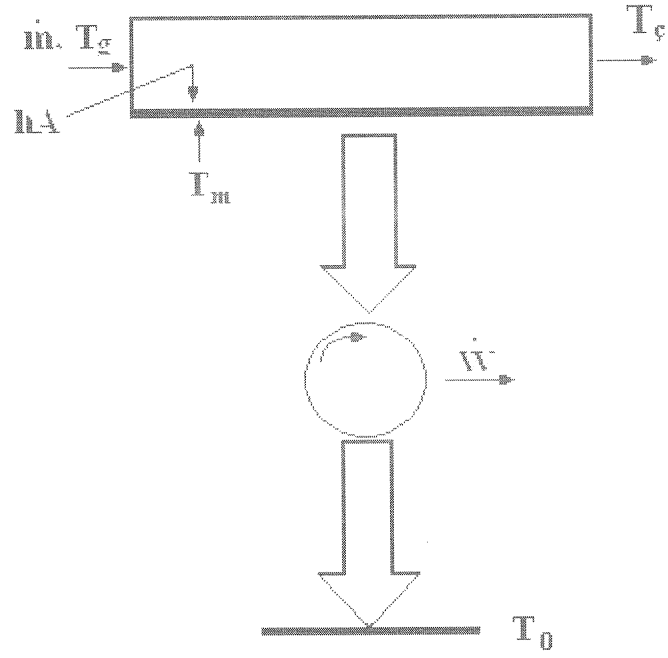
2.5. Depolama Sisteminin Termodinamik Analizi

Daha önceden de bahsedildiği üzere; bu çalışmada kullanılan depo geometrisi, içinden ısı transfer akışkanının aktığı bir silindirik boru ve boru ile ona eş merkezli olarak yerleştirilmiş bir kabuk arasında, faz değiştiren maddenin yerleştirildiği halka aralıktan oluşmaktadır. Bu aralık içerisinde bulunan FDM ile ısı transfer akışkanı arasında ısı alış veriş olmaktadır. Faz değiştiren maddenin erime prosesi için sıcak ısı transfer akışkanından faz değiştiren maddeye ısı geçişi gerçekleşir. Şekil 3.28.'de ısı geçişinin olduğu depolama sisteminin geometrisi verilmiş olup, depo ve ısı transfer akışkanı ayrı ayrı birer sistem olarak alınmıştır.

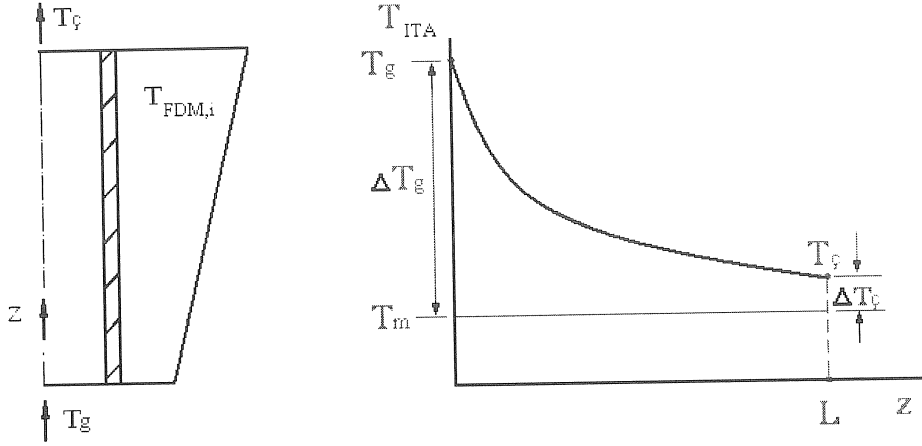
Bu depolama işlemi, Lim vd. (1992), kullandığına benzer olarak termodinamik olarak şu şekilde incelenebilir. Erime veya yükleme prosesinde gerekli ısının bir termodinamik güç çevriminde güç üretiminde kullanılacağı varsayılarak, ilgili sistemin Şekil 3.29.'de bir ısı makinesi benzeşimi yapılabilir.



Şekil 2.28. Depolama sistemi için termodinamik sistem tanımı



Şekil 2.29. Isı depolama sisteminin çalışma prensibi



Şekil 2.30. Isı transfer akışkanından FDM'ye ısı geçişi modeli

Sistemin daimi durum için çalıştığını varsayalım. \dot{m} debisindeki T_g sıcaklığındaki akışkandan, T_m sıcaklığındaki faz değiştiren maddeye ısı geçişi olmaktadır (Şekil 2.30.). Bu ısı geçişine karşı olan toplam termal direnci (ısı transfer akışkanın direnci, ısı transfer akışkanının aktığı borunun iletim direnci) $1/UA$ olarak tanımlayalım. Çevre sıcaklığını da T_o ile gösterelim. Isı makinesinin soğutma etkisi iki şekilde gösterilebilir: Birincisi faz değiştiren maddeye olan ısı geçişi:

$$\dot{Q}_m = UA(T_c - T_m) \quad (11)$$

şeklinde yazılır. Buradaki U toplam ısı transfer katsayısıdır. İkincisi ise ısı transfer akışkanının verdiği ısı,

$$\dot{Q}_m = \dot{m}(h_g - h_c) = \dot{m}c_p(T_g - T_c) \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada h_g ve h_c , sırasıyla ısı transfer akışkanın giriş ve çıkış entalpileridir. (11) ve (12) denkleminde T_c 'yi yok ederek,

$$\dot{Q}_m = \dot{m}c_p \frac{NTU}{1 + NTU} (T_g - T_m) \quad (13)$$

eşitliği elde edilir. Burada NTU ,

$$NTU = \frac{UA}{\dot{m}c_p} \quad (14)$$

şeklinde tanımlanmış olup, boyutsuz bir sayıdır.

Burada ilgilendiğimiz faz değıştiren maddelerden çekilebilecek maksimum ekserjidir. Isı makinesinin içten tersinir olduğu kabulüyle ısı makinesinin verimi,

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_m} = 1 - \frac{T_0}{T_m} \quad (15)$$

şeklinde tanımlanabilir. Buradan \dot{W} ,

$$\dot{W} = \dot{Q}_m \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. (13) ifadesi (16)'da yerine konursa,

$$\dot{W} = \dot{m}c_p \frac{NTU}{1 + NTU} (T_g - T_m) \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (17)$$

elde edilir. (17) ifadesi T_m 'ye göre türev alınıp sıfıra eşitlenirse, optimum erime sıcaklığı,

$$T_{m,opt} = (T_g T_0)^{1/2} \quad (18)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki ifade, verilen giriş ve çevre koşulları kullanılabilen faz değıştiren maddenin optimum erime sıcaklığını vermektedir. Benzer şekilde belli bir çevre koşulunda, verilen bir faz değıştiren madde için optimum giriş sıcaklığı,

$$T_{g,opt} = \frac{T_m^2}{T_0} \quad (19)$$

şeklinde elde edilir. Faz değıştiren madde için, optimum transfer akışkanları giriş sıcaklığına karşılık gelen maksimum güç çıkışı,

$$\dot{W}_{\max} = \dot{m} c_p T_g \frac{NTU}{1 + NTU} \left[1 - \left(\frac{T_0}{T_m} \right)^{1/2} \right]^{-1/2} \quad (20)$$

şeklinde elde edilir.

Yukarıda (18) eşitliği ile elde edilen optimum erime sıcaklığı benzer şekilde Bjurstrom ve Carlsson (1985); Adebayi ve Russell (1987) tarafından da elde edilmiştir.

Gong ve Muzumdar (1997 a) tarafından verilen analize göre Şekil 3.29.'i tekrar göz önüne alalım. Faz değıştiren maddenin depoladığı enerji, aşağıdaki gibi iki farklı şekilde yazılabilir:

$$Q = \frac{UA(T_g - T_c)}{\ln \left(\frac{T_g - T_m}{T_c - T_m} \right)} \quad (21)$$

$$Q = \dot{m} c_p (T_g - T_c) \quad (22)$$

Bu eşitliklerden ısı transfer akışkanının çıkış sıcaklığı,

$$T_c = T_m + (T_g - T_m) e^{-NTU} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilir.

Faz değıştiren madde de depolan ekserji miktarı,

$$W = \dot{m} c_p \left(1 - e^{-NTU} \right) (T_g - T_m) \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad (24)$$

şeklinde elde edilir. Isı transfer akışkanının sahip olduğu, temastan önceki toplam enerji miktarı,

$$W_T = \dot{m}c_p \left[T_g - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_g}{T_0} \right) \right] \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir. Yükleme veya erime prosesinin ekserji verimi, FDM' de depolanan ekserjinin ısı transfer akışkanının temastan önceki toplam enerjisine oranı şeklinde ifade edilir.

$$\phi = \frac{W}{W_T} = \frac{(1 - e^{-NTU}) (T_g - T_m) \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right)}{T_g - T_0 - T_0 \ln \frac{T_g}{T_0}} \quad (26)$$

Bağımsız parametrelerin sayısını azaltmak için şu boyutsuz parametreleri tanımlayabiliriz (Gong ve Mujumdar, 1997 a):

$$w = \frac{W}{mc_p T_0}, \quad \theta = \frac{T}{T_0} \quad (27)$$

Bu boyutsuz parametrelerin kullanımı ile, (26) eşitliği,

$$\phi = \frac{w}{w_T} = \frac{(1 - e^{-NTU}) (\theta_g - \theta_m) \left(1 - \frac{1}{\theta_m} \right)}{\theta_g - 1 - \ln(\theta_g)} \quad (28)$$

elde edilir. Bu eşitliğin θ_m 'e göre türevini alıp sıfıra eşitlersek ,

$$\theta_{m_{opt}} = (\theta_g)^{1/2} \quad (29)$$

elde edilir. (29) eşitliği boyutlu formda, (18) eşitliğinin aynısıdır. Bu optimum erime sıcaklığına karşılık gelen optimum ekserji verimi,

$$\phi_{\max} = \frac{(1 - e^{-NTU}) \left[(\theta_g)^{1/2} - 1 \right]^2}{\theta_g - 1 - \ln \theta_g} \quad (30)$$

olarak ifade edilir.

Depodan çevreye olan ısı kayıplarını ihmal ederek ısı transfer akışkanı ve faz değiştiren madde arasındaki enerji dengesinden,

$$UA(LMTD) = \dot{m}c_p (T_g - T_c) \quad (31)$$

yazabiliriz. Burada, $LMTD$, logaritmik sıcaklık farkını göstermektedir. Bu dengede,

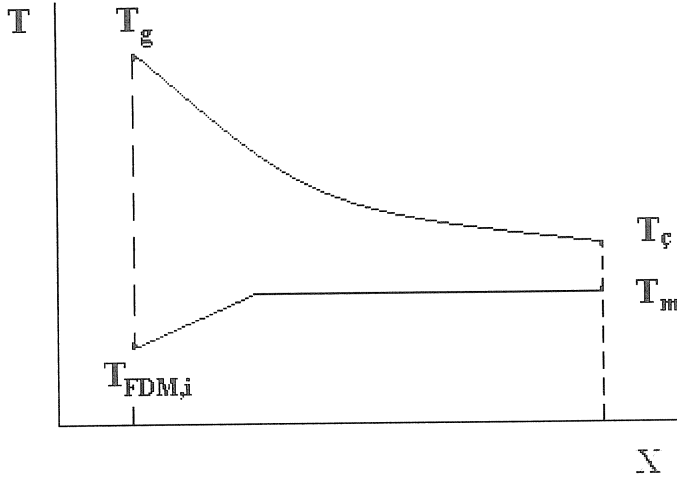
$$T_g - T_c = \frac{NTU \left[(T_g - T_c) + (T_m - T_{FDM,i}) \right]}{\ln \left(\frac{T_g - T_{FDM,i}}{T_c - T_m} \right)} \quad (32)$$

yazılabilir. Burada, $T_{FDM,i}$, faz değiştiren maddenin yükleme veya erime başlangıcındaki sıcaklığıdır (Şekil 2.30.).

Buradan, Q ,

$$Q = \dot{m}c_p \frac{\left[(T_g - T_c) + (T_m - T_{FDM,i}) \right] NTU}{\ln \left(\frac{T_g - T_{FDM,i}}{T_c - T_m} \right)} \quad (33)$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 2.31. Bir gizli ısı depolama sisteminde yükleme sırasında sıcaklık değişimi

Birinci ve ikinci kanun verim ifadelerini elde edebilmek için ısı transfer akışkanı ve faz değiştiren madde için kullanılabilirlik ifadelerine ihtiyaç vardır. Isı transfer akışkanının kullanılabilirliği,

$$X_{ITA} = \dot{m}c_p \left[T_g - T_0 - T_0 \ln \left(\frac{T_g}{T_0} \right) \right] \quad (34)$$

olarak yazılabilir. Faz değiştiren maddenin kullanılabilirliği ise,

$$X_{FDM} = \frac{Q(T_m - T_0)}{T_m} = \frac{\dot{m}c_p NTU \left[(T_g - T_ç) + (T_m - T_{FDM,i}) \right] (T_m - T_0)}{\left[\ln \left(\frac{T_g - T_{FDM,i}}{T_ç - T_m} \right) \right] T_m} \quad (35)$$

Birinci kanun verimi

Birinci kanun verimi şu şekilde tanımlanabilir:

$$\eta_I = \frac{\text{FDM'nin gerçekte kazandığı enerji}}{\text{Muhtemel maksimum enerji kazanımı}}$$

$$\eta_I = \frac{T_g - T_c}{T_g - T_m} \quad (36)$$

Bütün sıcaklıkları T_o ile boyutsuzlaştırırsak,

$$\eta_I = \frac{T_g/T_o - T_c/T_o}{T_g/T_o - T_m/T_o} \quad (37)$$

Birinci kanun verimi sistemin enerji depolama kabiliyetini verir.

İkinci Kanun Verimi

İkinci kanun verimi şu şekilde yazılabilir:

$$\eta_{II} = \frac{\text{FDM}'nin kullanılabilirliği}{\text{Isı transfer akışkanının kullanılabilirliği}} \quad (38)$$

$$\eta_{II} = \frac{NTU[(T_g - T_c) + (T_m - T_{FDM,i})(T_m - T_o)]}{\left[\ln \left(\frac{T_g - T_{FDM,i}}{T_c - T_m} \right) \right] T_m [T_g - T_o \ln(T_g/T_o)]}$$

Yine bütün sıcaklıkların boyutsuz formda yazılmasıyla, bu ifade,

$$\eta_{II} = \frac{NTU[(T_g/T_o - T_c/T_o) + (T_m/T_o - T_{FDM,i}/T_o)](T_m/T_o - 1)}{\left[\ln \left(\frac{T_g/T_o - T_{FDM,i}/T_o}{T_c/T_o - T_m/T_o} \right) \right] \left(\frac{T_m}{T_o} \right) [T_g/T_o - 1 - \ln(T_g/T_o)]} \quad (39)$$

Benzer şekilde entropi üretim tanımlanabilir: Bu sayı N_s ile gösterilmekte olup,

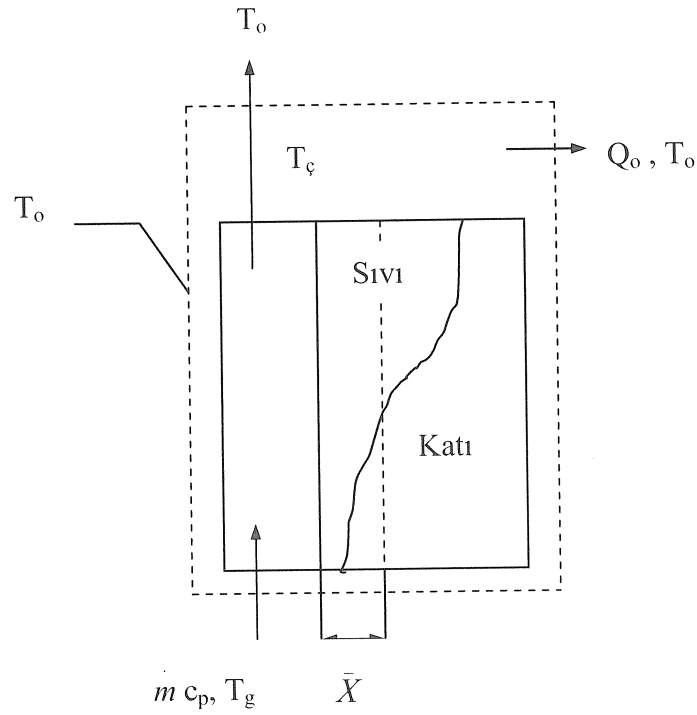
$$N_s = 1 - \eta_{II} \quad (40)$$

şeklinde tanımlanır. N_s ,

$$N_s = 1 - \frac{\text{FDM'nin kullanılabilirliği}}{\text{Isı transfer akışkanının kullanılabilirliği}}$$

N_s , 1 değerini aldığında, sisteme giren kullanılabilirliğin tamamı tersirmezlikler tarafından yok edilir. Sistem, N_s değerini en aza indirecek şekilde tasarlamalı ve çalıştırılmalıdır.

Yine, De Lucia ve Bejan (1990)'nın yaklaşımına benzer şekilde, ısı depolama işleminin termodinamik analizi şu şekilde yapılabilir:



Şekil 2.32. FDM'nin ısıtma işleminde tersinir olmayan kaynaklar

Şekil 2.32.'de gösterilen sistem için, Termodinamiğin I. Kanunu'na (TDİK) göre, akışkanın kanal boyunca kaybetmiş olduğu ısı, FDM' ye transfer edilen ısıya eşit olacağından;

$$\dot{m} c_p (T_g - T_ç) = UA (T_ç - T_m) \quad (41)$$

yazılabilir.

Aynı şekilde FDM' ye transfer edilen ısı FDM içerisinde depolanan ısıya eşit olacağından,

$$UA(T_c - T_m) = \rho h_{ks} A \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (42)$$

yazılabilir. Burada U sıcak akışkanla sıvı FDM arasındaki ısı transfer katsayısı olup,

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{1}{h_i} \quad (43)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Yapılan analizde FDM bölgesinde ısı transferinin sadece doğal taşınım ile gerçekleştiği kabul edilmektedir. (41) eşitliği;

$$N = \frac{UA}{\dot{m}c_p} = \frac{T_g - T_c}{T_g - T_m} \quad (44)$$

şeklinde düzenlenebilir. Çıkış sıcaklığı boyutsuz formda (44) eşitliği kullanılarak,

$$\theta_c = \frac{T_c - T_m}{T_g - T_m} = \frac{1}{1 + N} \quad (45)$$

elde edilir. Sıvı-katı bölge ortalama genişliğinin zamanla lineer bir değişim sağladığı varsayılarak,

$$\bar{X} = t \frac{U(T_c - T_m)}{\rho h_{ks}} \theta_c \quad (46)$$

yazılabilir. Doğal taşınımın etkili olduğu erime prosesinde üretilen toplam entropi

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}c_p \ln \left(\frac{T_o}{T_g} \right) + \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \rho h_{ks} A \frac{dx}{dt} \quad (47)$$

şeklindedir. (47) eşitliğinin; ilk terimi kanal içerisindeki ısı transferi sürecinde üretilen entropi, ikinci terim çevreye geçen ısıdan kaynaklanan entropi üretimi ve üçüncü terim ise depolama sürecinde üretilen entropiyi ifade etmektedir. Çevreye gerçekleşen ısı kaybı:

$$\dot{Q}_o = \dot{m}c_p (T_c - T_o) \quad (48)$$

denklemleri ile belirlenebilir. $\bar{T}_g = \frac{T_g}{T_o}$, $\bar{T}_m = \frac{T_m}{T_o}$ olmak üzere (44), (45), (46) ve (48)

eşitlikleri (47) eşitliğine taşınarak,

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}c_p \ln\left(\frac{T_o}{T_g}\right) + \frac{\dot{Q}_o}{T_o} + \rho S_{ks} A \frac{dX}{dt}, \quad S_{ks} = \frac{h_{ks}}{T_m}$$

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}c_p} = \ln\left(\frac{T_o}{T_g}\right) + \frac{\dot{m}c_p (T_c - T_o)}{\dot{m}c_p T_o} + \frac{\rho h_{ks} A U (T_g - T_m)}{\dot{m}c_p T_m \rho h_{ks}} \theta_c$$

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}c_p} = \ln\left(\frac{T_o}{T_g}\right) + \frac{(T_c - T_o)}{T_o} + \frac{UA (T_g - T_m)}{\dot{m}c_p T_m} \theta_c, \quad N = \frac{UA}{\dot{m}c_p}$$

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}c_p} = \ln\left(\frac{T_o}{T_g}\right) + \left(\frac{T_c - T_o}{T_o}\right) + N \frac{(T_g - T_m)}{T_m} \theta_c$$

$$= -\ln \bar{T}_g - 1 + \left(\frac{T_g - T_m}{T_o}\right) \frac{1}{1+N} + \frac{T_m}{T_o} + N \left(\frac{T_g - T_m}{T_m}\right) \frac{1}{1+N}$$

$$\frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{m}c_p} = \bar{T}_m - 1 - \ln \bar{T}_g + \frac{\bar{T}_g - \bar{T}_m}{1+N} + \frac{N}{N+1} \left(\frac{\bar{T}_g}{\bar{T}_m} - 1\right) \quad (49)$$

olarak elde edilir.

Sisteme sağlanan kullanılabilirlik (sıcak akışkanın sahip olduğu ekserji):

$$E_x = \dot{m}c_p \left(T_g - T_o - T_o \ln \frac{T_g}{T_o} \right) \quad (50)$$

denklemi ile belirlenebilir. Boyutsuz entropi üretimini N_s ile gösterecek olursak, erime prosesi sürecinde üretilen toplam entropi boyutsuz olarak

$$N_s = \frac{\text{Yok edilen kullanılabilirlik (tersinmezlik)}}{\text{Sisteme sağlanan kullanılabilirlik}} = \frac{T_o S_{gen}}{E_x} \quad (51)$$

olarak ifade edilebilir. (49) ve (50) eşitlikleri (51) denkleminde taşınırsa boyutsuz entropi denklemi:

$$\bar{N}_s = \frac{\dot{m}c_p T_o \left[\bar{T}_m - 1 - \ln \bar{T}_g + \frac{\bar{T}_g - \bar{T}_m}{1+N} + \frac{N}{N+1} \left(\frac{\bar{T}_g}{\bar{T}_m} - 1 \right) \right]}{\dot{m}c_p \left(T_g - T_o - T_o \ln \frac{T_g}{T_o} \right)} \quad (52)$$

olarak elde edilir.

2.6. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen hataların derecelerinin ve miktarlarının belirlenmesi oldukça önemlidir (Asan ve Namlı, 1997). Literatürde belirtilen standartlara uygun olarak kurulan bir deney düzeneğinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerde hatalar iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar; deney düzeneğinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan kaçınılmaz hatalar ve deney yapan kişinin ihmallerinden kaynaklanan hatalardır (Holman, 1989). Bu hataların

değerlendirilmesi için yapılan *Belirsizlik Analizi*, sonuçların yorumlanması açısından oldukça önemlidir.

Belirsizlik analizi kısaca şöyle yapılabilir: Sonuç R , $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ şeklinde bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olarak,

$$R = R (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (53)$$

şeklinde tanımlanabilir. $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ sözü edilen bağımsız değişkenlerin belirsizlikleri olmak üzere R için toplam belirsizlik,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} w_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right] \quad (54)$$

ifadesi ile belirlenebilir (Holman, 1989).

Bu çalışmada sıcaklık ve debi ölçümleri yapıldı. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerle Reynolds sayıları (Re), Stefan sayıları (Ste) ve ısı akısı (Q) hesaplandı. Sözü edilen bu değerler, ölçülen değerler cinsinden ifade edildikten sonra belirsizlik analizinde kullanılacak ifadeler elde edildi. Bu belirsizlik ifadeleri şöyle verilebilir:

Reynolds Sayısı için Belirsizlik

Reynolds sayısı ölçülen değerler cinsinden,

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu} \quad (55)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Reynolds sayısı için toplam belirsizlik,

$$\frac{w_{Re}}{Re} = \left[\left(\frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{w_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{w_{\mu}}{\mu} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (56)$$

şeklinde belirlenebilir

Isı Akısı Miktarında Meydana Gelen Belirsizlik

Isı transfer akışkanından FDM'ye geçen ısı ölçülen değerler cinsinden,

$$Q = \dot{m} c_p \Delta T = \dot{m} c_p (T_c - T_g) \quad (57)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Isı akısı için toplam belirsizlik,

$$\frac{w_Q}{Q} = \left[\left(\frac{w_{\dot{m}}}{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{w_{c_p}}{c_p} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_c}}{T_c - T_g} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_g}}{T_c - T_g} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (58)$$

Stefan Sayısı İçin Belirsizlik

Stefan sayısı ölçülen değerler cinsinden,

$$Ste = c_{FDM} (T_c - T_m) / h_{ks} \quad (59)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Stefan sayısı için toplam belirsizlik,

$$\frac{w_{Ste}}{Ste} = \left[\left(\frac{w_{c_{FDM}}}{c_{FDM}} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_c}}{T_c - T_m} \right)^2 + \left(\frac{w_{T_m}}{T_g - T_m} \right)^2 + \left(\frac{w_{h_{ks}}}{h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (60)$$

şeklinde belirlenebilir.

Yukarıda elde edilen belirsizlik ifadelerindeki her bir bağımsız değişken için belirsizliğin belirlenmesi gerekmektedir. Bu belirsizlik değerleri için çeşitli kaynaklarda benzer ölçümlerdeki belirsizliklerin esas alınması dışında, ölçü aletlerinin kullanım kılavuzlarındaki belirsizlik değerleri esas alınmıştır. Bunların dışındaki belirlenmesi zor veya mümkün olmayan belirsizlikler, tahmini olarak belirlenmiştir. Bunların ışığında her bir bağımsız değişken için belirsizlik değerleri şu şekilde verilebilir:

- 1) Sıcaklık ölçümlerinde ortaya çıkabilecek belirsizlikler;

1) Sıcaklık ölçümlerinde ortaya çıkabilecek belirsizlikler;

Sıcaklık ölçüm ünitesi termo eleman çifti, buz banyosu, data kart sistemi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Sistem bir bütün halinde sabit sıcaklık banyosu ile kalibre edilerek sistemi oluşturan her bir bileşenin belirsizliği tek bir belirsizlik değerine indirgenmiştir.

(a1) Sıcaklık ölçüm ünitesinden kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

(a2) Sıcaklık ölçüm noktalarından kaynaklanan belirsizlik; $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$

Yukarıdaki belirsizlik değerleri esas alınarak akışkan giriş sıcaklığının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$w_{T_g} = \left[(a1)^2 + (a2)^2 \right]^{1/2} \quad (61)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Akışkan çıkış sıcaklığının belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$w_{T_c} = \left[(a1)^2 + (a2)^2 \right]^{1/2} \quad (62)$$

şeklinde tanımlanabilir.

2) Debi ölçümlerinde ortaya çıkabilecek belirsizlikler;

(b1) Debimetreden kaynaklanan belirsizlik; $\pm \% 1$

(b2) Kalibrasyondan kaynaklanan belirsizlik; $\pm \% 0.5-1$

(b3) Yoğunluk değişiminden kaynaklanan belirsizlik; $\pm \%0.2$

(b4) Debimetrenin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik; $\pm \%0.5$

Kütleli debinin belirlenmesinde ortaya çıkabilecek toplam belirsizlik;

$$w_{\dot{m}} = \left[(b1)^2 + (b2)^2 + (b3)^2 + (b4)^2 \right]^{1/2} \quad (63)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Diğer Belirsizlikler :

(c1) Boru çapında meydana gelebilecek belirsizlik; $w_d = \pm 0.0025 \text{ mm} \equiv \pm \% 0.1$.

(d1) Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek belirsizlik

$$w_{c_p} = w_{\mu} = w_{c_{FDM}} = w_{h_{ks}} ; \pm \% 0.1-0.2.$$

FDM'nin erime sıcaklığında belirlenmesinde meydana gelebilecek belirsizlik; $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$

Her bir bağımsız değişken için belirlenen belirsizlik değerleri ilgili eşitliklerde yerine yazılarak Reynolds sayısı (Re), Stefan sayısı (Ste) ve ısı akısı (Q) için toplam belirsizlikler hesaplanmıştır.

Belirsizlik Analizinden Elde Edilen Bulgular

Deneylerin yapılışı esnasında, deney araçlarının hassasiyetinden ve ölçüm hatalarından kaynaklanabilecek belirsizlikler, (53) ve (54) eşitlikleriyle hesaplanmıştır. İlgili eşitlikler her bir kütleli debiye ve akışkan sıcaklığına bağlı olarak Reynolds sayısının yirmi dört farklı değeri için uygulanmış, elde edilen belirsizlik değerleri Tablo 2.14.'de sunulmuştur. Hesaplanan değerler ortalama değerler cinsinden olup %1-2 mertebesinde değişebilmektedir.

Tablo 2.14. Belirsizlik analizi sonuçları

Belirsizlik tipleri	Hesaplanan değerler
Akışkan giriş sıcaklığı w_{T_i} [%]	0.1
Akışkan çıkış sıcaklığı w_{T_o} [%]	0.1
Kütleli debi w_m [%]	1.51
Reynolds sayısı w_{Re} [%]	1.53
Stefan sayısı, w_{Ste} [%]	3.59
Isı transfer miktarı, w_Q [%]	14.2

3. BULGULAR VE İRDELEME

Faz değiştiren maddeler kullanılarak termal enerji depolama üzerine yapılan çalışmalarda, silindirik, dikdörtgen prizma, vb. gibi çok farklı geometriler kullanılmıştır. Bu depo geometrilerinin genelde dūřey veya yatay olmak üzere iki konumu çalışılmıştır (Choi vd.,1989, Farid ve Husain 1989, Sarı 2003). Bu çalışmada, kullanılan depo, dūřey silindirik bir boru ve etrafındaki kabuk arasındaki halka aralık hacminden oluşur. Bu geometride, dış kabuğun farklı eęim açıları ve deponun yatay ve yatayla farklı eğimlerde yerleştirildiği konumlar çalışılmıştır. Çalışmada genel olarak üç farklı parafin için aşağıdaki parametrelerin etkisi deneysel olarak incelenmiştir:

- a) Deponun yatayla yaptığı açı,
- b) Dış kabuk eğim açısı,
- c) Isı transfer akışkanı (bu çalışmada su kullanılmıştır) giriş sıcaklığı,
- d) Isı transfer akışkanı giriş debisi.

Bu çalışmada, dış kabuk cidarı eğimli olarak tasarlanmıştır. Bunun sebebi řu şekilde açıklanabilir: Dūřey konumlarda yerleştirilen depoların içerisindeki FDM'ler erirken dūřey doğrultuda ısıtıcı yüzeylerinden başlayan katı-sıvı ara yüzeyi zamana bağlı olarak belirli bir açı ile gelişmektedir (Benard vd., 1985; Pal ve Joshi, 2001). Bundan dolayı deponun üst kısımları alt kısımlarına göre daha hızlı erimektedir. Deponun alt kısmında erimeyen maddenin eriyen maddeye oranı çok küçük olmasına rağmen, bu küçük oran faz değişim süresini büyük oranda artırmaktadır. Zaman, depolama sistemleri için yapılan termodinamik analizlerde bir parametre olarak ele alınmasa da, termal depolama için kullanılan ısı kaynaklarının var olma süresinin kısalığı yüzünden katı-sıvı faz geçişi ile ısı depolama sistemleri için çok önemlidir. Erime süresini azaltmak ve dolayısıyla kısa sürede aynı enerjii doldurmak veya boşaltmak için ısı transfer akışkanı ve faz değiştiren madde arasında olan ısı geçişinin artırılması gerekir. Bu ise aktif ve pasif olarak iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Aktif yöntem, ısı transfer akışkan sıcaklığı veya debisinin artırılması (ki bu depolanacak enerji kaynağının potansiyeli ile sınırlıdır) veya erimiş FDM'nin bir karıştırıcı ile karıştırılması ile ısı taşınım katsayısının artırılarak erimiş FDM'den katı matris formundaki FDM'ye taşınılma olan ısı geçişinin artırılması gibi ek enerji ilaveleri gerektirir. Pasif yöntemde ise, ek bir enerji ilavesi olmaksızın geometrik düzenlemelerle

erimede sıcak ısı transfer akışkanından FDM'ye, katılaşmada ise erimiş FDM'den soğuk ısı transfer akışkanına olan ısı geçişi artırılır. Literatürde yaygın kullanılan pasif yöntemlerden biri ısı transfer akışkanının aktığı iç boruya kanatçık ilavesidir (Erek vd., 2005; Buddhi vd., 2003). Bu çalışmada ise doldurma veya boşaltma (erime veya katılaşma) sırasında meydana gelen ısı geçişini artırmak veya toplam erime veya katılaşma süresini azaltmak için depo geometrisinde değişikliğe dayanan pasif bir yöntem uygulanmıştır. Yeni geometri aşağıda da bahsedildiği üzere esasen maddenin erime davranışını esas almaktadır. Literatürde verilen erime açılarına bağlı olarak, depolama süresini kısaltmak ve depolama sisteminin performansını artırmak için bu çalışmada, silindirik depoların alt tabanı daraltılırken, üst tavanı belirli bir açı (5° , 10° , 15° , 20°) ile genişletilmiştir. Sistemde kullanılan 3 farklı tip FDM yukarıda anlatılan depolama sistemine yerleştirilmiş ve her bir FDM için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.

Çalışmada, deponun farklı konumunun erime veya katılaşma davranışı üzerindeki etkisini görmek için depo yatayla farklı açılarda (0° , 30° , 60° ve 90°) konumlandırılmıştır.

Isı transfer akışkanının depolayıcı sisteme giriş sıcaklığı ve debisi, doldurma/boşaltma süresi ve erime/katılaşma davranışını etkileyen önemli parametrelerdendir. Bu çalışmada, ısı transfer akışkanının üç farklı debisi (4, 6 ve 8 kg/dk) karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Isı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ise kullanılan parafinin erime sıcaklığına bağlı olarak, 5°C 'lik artışlarla $55\text{-}85^\circ\text{C}$ arasında değiştirilmiş ve giriş sıcaklığının erime/katılaşma davranışı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

3.1. Deponun Düşey Konumunda Erime ve Katılaşma

3.1.1. Silindirik Depo (Kabuk açısı sıfır derece, $\theta = 0^\circ$)

Dış kabuk açısının sıfır derece (silindirik) olduğu depo geometrisi, literatürde yaygın olarak çalışılan geometridir (Dimaano ve Watanabe, 2001; Sarı ve Kaygusuz, 2001; Trp, 2005). Bu çalışmada, öncelikle bu geometri için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde iki farklı parafinle (P1 ve P3) çalışılmıştır. Deneyler, erime işleminde; farklı akışkan giriş sıcaklık ve kütledebilerinde, katılaşma işleminde ise; tek bir akışkan giriş sıcaklığı ve farklı kütledebilerde tekrarlanmıştır. Ancak, burada, tezin hacmini daha fazla geniş tutmamak için, sadece parafin P3 için sonuçlar verilmiştir. Diğer parafinler için karşılaştırma grafiklerinden de görüleceği gibi benzer davranışlar elde edilmiştir.

Depo içerisine yerleştirilen parafin içerisinde aksel yönde belirli noktalarda sıcaklığın zamana bağlı değişimi Şekil 3.1.(a-f)'de verilmiştir. Şekil 3.1.(a) incelendiğinde, deponun en alt kısmında ($z = 0$ mm) madde sıcaklığının hızla faz değişim sıcaklığına erişerek faz değişiminin başladığı görülmektedir. Faz değişimi, deponun üst kısımlarında daha önce başlamakta ve bu bölgedeki parafin tamamen eriyinceye kadar sürmekte ve sonra alt kısımdaki maddenin sıcaklığı artarak tamamlanmaktadır. Bu davranış, ısı transfer borusu üzerinde gözlenen sıcaklık değişimi için de geçerlidir. Erime işlemi tamamlandıktan sonra, akışkan giriş sıcaklığı sabit olmasına rağmen borunun iç tarafındaki sıcaklık hızla artmaktadır. Katı fazdaki FDM'nin ısı iletim katsayısının çok düşük olmasına rağmen, radyal doğrultudaki sıcaklık dağılımları birbirine çok yakındır. Depo malzemesinin krom olması nedeniyle FDM'ye ısı transferi sadece ısı transfer borusundan radyal yönde değil taban ve dış kabuktan da olmaktadır. Şekil 3.1.(b-f) grafikleri incelendiğinde, diğer aksel mesafelerde ($z = 100, 200, 300, 400$ ve 421 mm), benzer erime davranışları gözlenmiştir. Aralarında en önemli fark, aksel yönde azalan erime zamanlarıdır.

Parafinin (P3) radyal mesafelerde belirli aksel noktalarda zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 3.2. (a-c)'de verilmiştir. Şekil 3.2. (a) incelendiğinde, akışkan borusu üzerinde ($r=14$ mm), $z = 200$ mm'den sonra sıcaklık-zaman davranışının pek değişmediği görülmektedir. Artan zamanla, parafinin tamamıyla erimesi boru yüzeyinin alt ile üst seviyeleri arasındaki sıcaklık farkını azaltmaktadır. Erime işlemi başlangıcında, bu farkın yüksek olmasının ana nedeni daha önce belirtilen FDM'nin erime davranışdır. Erimenin ilk aşamaları süresince erime hızı küçük iken, erimede taşınım baskın hale gelir ve erime hızı artar. Ancak, erime işleminin sonuna doğru silindirik depolayıcılarda deponun en alt bölgelerindeki katı FDM'nin üzerinden akan akışkanın hızı düştüğünden katı yüzey üzerine olan doğal taşınım etkisi azalmış ve küçük bir miktar FDM yüzünden toplam ısı depolama süresi artmıştır. Erimenin sonlarına doğru tabana yakın bölgede oluşan eğimli ölü FDM bölgesi, toplam depolama süresini uzatırken, depodan olan ısı kayıplarını artırmış ve sistemin ısı depolama verimliliğini düşürmüştür. Bu davranış, dış kabuk cidarının eğimli seçilmesinin ana nedenidir.

FDM içerisinde T_{11} ($z = 0$ mm, $r = 28$ mm) noktasında sıcaklık hızla artıp sabitlenirken, aksel yönde yukarıdan aşağıya doğru $T_{61}, T_{51}, T_{41}, T_{31}$ ve T_{21} sıcaklıkları madde zamanla eridikçe T_{11} sıcaklığından yüksek değerler alır ve benzer şekilde sabit bir

değere ulaşır (Şekil 3.2.(b)). Yine parafin içerisinde $r = 42 \text{ mm}$ ' de aksel doğrultuda parafin sıcaklık-zaman değişimi için benzer davranış gözlenmiştir (Şekil 3.2.(c)).

Şekil 3.1. ve Şekil 3.2.'ye benzer şekilde belirli bir radyal mesafedeki aksel sıcaklık dağılımları farklı zaman adımları için Şekil 3.3.(a,b)'de verilmiştir. Doldurma başlangıcında aksel yönde depo tabanından uzaklaştıkça ($z = 100, 200$ ve 300 mm) zamanla sıcaklık tabandan daha düşükken ilerleyen zamanlarda yukarıdan aşağıya doğru sıcaklık atmakta ve parafin eriyerek sıcaklığı en üst nokta sıcaklığına ulaşarak sabitlenmektedir. 60 ve 90. dakikalarda, T_{61} ve T_{63} sıcaklıkların düşük olmasının sebebi, deponun üst kısmında bırakılan genleşme boşluğuna olan ısı kaybıdır. Depo sıcaklığının artmasıyla eriyen parafin genleşmekte T_{61} ve T_{63} sıcaklıkları artmaktadır. Parafinin tamamen erimesi durumunda depo içerisindeki tüm noktalarda yaklaşık olarak aynı sıcaklık gözlenmiştir. Şekil 3.4.(a,b)'de depo içerisinde parafinin aksel belirli noktalarda radyal yönde zamanla sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi sabit aksel istasyonlarda, erime başlangıcında parafinin sıcaklığının depo iç cidarından depo dış cidarına radyal yönde şiddetli bir şekilde değiştiği halde parafinin tamamen erimesine doğru zaman içerisinde sabit bir değere ulaşmaktadır. Şekil 3.4. dikkatli bir şekilde incelendiğinde, depo iç cidarına yakın bir bölgede ($r < 28 \text{ mm}$) sıcaklık erime süresince radyal yönde yerel olarak değişirken, dış cidara yakın bölgede ($r > 28 \text{ mm}$) radyal sıcaklık gradyanının düşük olduğu görülür.

Parafinin (P3) erimesi sırasında belirli noktalarda farklı akışkan giriş sıcaklıklarına bağlı olarak sıcaklık-zaman değişimleri Şekil 3.5.(a-c)'de verilmiştir. Deponun tabanında (T_{11}) parafinin sıcaklığı zamanla sabit iken aniden artması, depoda faz değişiminin tamamlandığını göstermektedir. T_{43} ve T_{63} sıcaklık değişimleri üzerinde ısı transfer alışkanı giriş sıcaklığı etkisi benzer şekilde belirgindir. Beklenildiği üzere giriş sıcaklığının artması depolama süresini kısaltmaktadır.

Farklı akışkan kütleli debilerinde, parafinin sıcaklık-zaman değişimleri Şekil 3.6.(a-c)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi ısı transfer akışkan debisinin artışı ($4,6,8 \text{ kg/dk}$) parafinin sıcaklık-zaman davranışlarında biraz farklılık gösterse de toplam erime süresi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir.

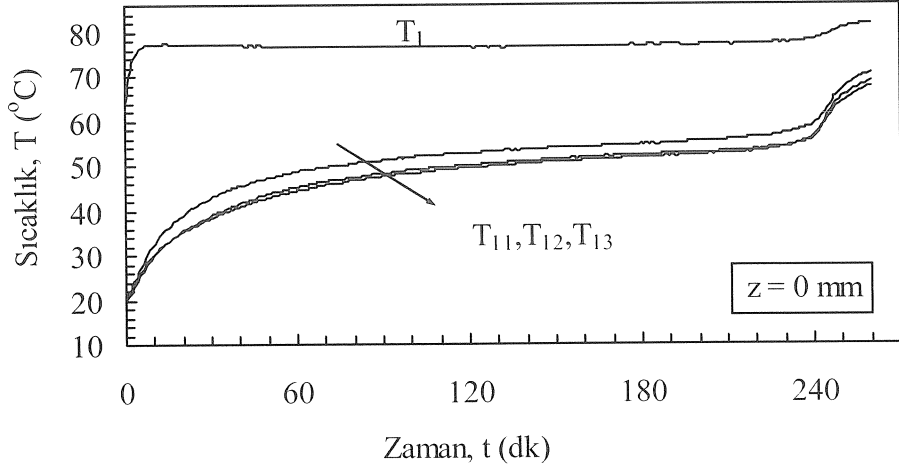
Parafine (P1,P3) depolanan ısının geriye alınmasında, deşarj deneyleri şarj biter bitmez başlatılmıştır. Düşey konumda yerleştirilmiş silindirik depoda bulunan erimiş parafin P3 için aksel yönde belirli mesafelerde zamana bağlı katılma eğrileri Şekil 3.7. de verilmiştir. Erime işleminden farklı olarak deponun en alt kısmında ($z = 0 \text{ mm}$)

maddenin hızla faz değişim sıcaklığının altına indiği görülmüştür. Şekil 3.1.(a)'da FDM'nin katı fazının ısı iletim katsayısının çok düşük olmasına rağmen radyal doğrultudaki sıcaklık dağılımları birbirine çok yakın davranış sergilemiştir. Şekil 3.7.(b-f) grafiği incelendiğinde, parafin deponun farklı noktalarında birbirine benzer katılma davranışları göstermektedir. Ancak, deponun üst kısımlardaki parafin alt kısımlara göre daha geç sıvı-katı faz geçişini gerçekleştirmektedir. Isı transfer borusuna yakın noktalarda soğutucu akışkan sıcaklığına hızla inilirken, radyal olarak daha uzak noktalarda ısının geriye alınma süresi uzamaktadır. Böylece, katılma süresince deponun her noktasında birbirine yakın sıcaklık dağılımını görmek mümkündür.

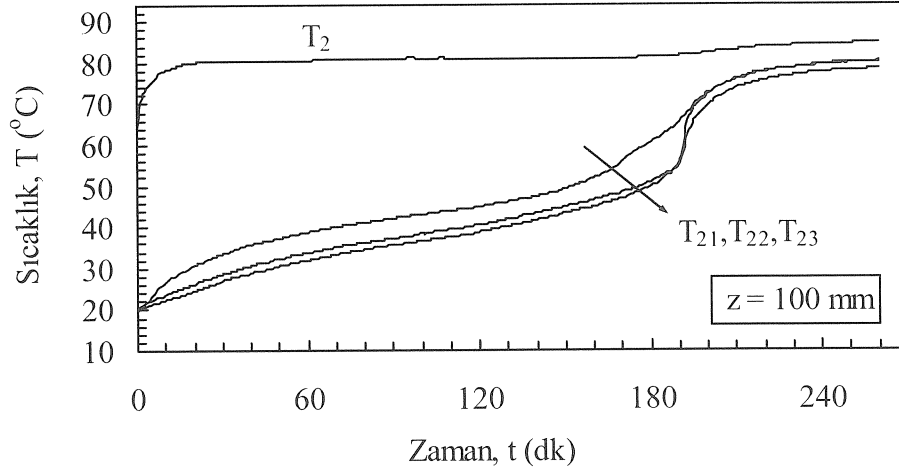
Katılma sırasında parafin P3'ün radyal yöndeki sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.8.(a-c)'de verilmiştir. Şekil 3.8.(a) incelendiğinde, $r = 28$ mm'de parafin içerisinde aksel yönde sıcaklık yukarıdan aşağıya doğru birbiriyle orantılı olarak hızla azalırken, yaklaşık 50. dakikada sıcaklıkların T_{11} noktası hariç tüm aksel noktalarda aynı olduğu görülmüştür. Bu zamandan sonra, deponun taban ve üstünden olan etkin ısı kayıpları dolayısıyla tabana ve üste yakın bölgelerde (T_{11}, T_{61}, T_{51}) sıcaklık hızla düşerken orta bölgelerde (T_{21}, T_{41}, T_{31}) sıcaklık düşüşü daha azdır. Belirli radyal mesafeler için ($r = 42, 46$ mm), aksel doğrultularda parafinin zamanla sıcaklık değişimleri $r = 28$ mm'deki sıcaklık dağılımına benzer davranış göstermektedir.

Katılma işlemi sırasında, zamana bağlı olarak radyal ve aksel doğrultularda parafin P3'ün sıcaklığının değişimi Şekil 3.9.(a-c) ve Şekil 3.10.(a-c)'de verilmiştir. Hem radyal doğrultu hem de aksel doğrultuda parafinin sıvı-katı faz değişimi çok hızlı tamamlanmakta, ilerleyen zaman dilimlerinde her iki yönde de benzer şekilde sıcaklıklar yaklaşık olarak sabitlenmektedir.

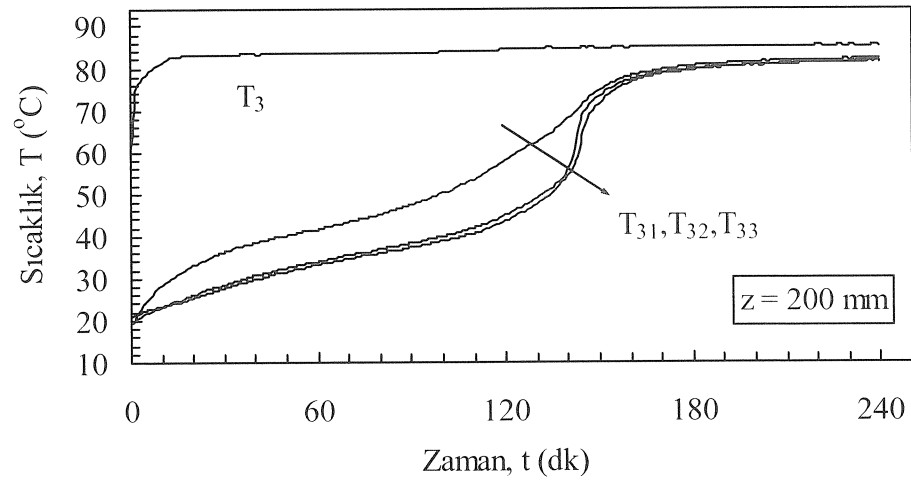
Erime sıcaklığı farklı parafin P1 için tekrarlanan deneyler benzer sonuçlar sergilemiştir. Burada, sadece ısı transfer akışkan giriş sıcaklık ve debisinin erime davranışı üzerinde etkisini gösteren grafikler verilmiştir (Şekil 3.11.(a-c) ve Şekil 3.12.(a-c)). Parafin P3 için elde edilen sonuçlara benzer şekilde, akışkan giriş sıcaklığı parafinin toplam erime süresini önemli bir şekilde etkilerken, kütleli debinin etkisinin az olduğu görülmüştür. Isı transfer akışkan depolama ortamına pompa aracılığı ile sürülmektedir. Debinin artması pompalama gücünün, dolayısıyla da tüketilen enerjinin artması demektir. Enerjinin optimum verimli kullanımına yol veren ekonomik bir depolama sistemi için, ısı transfer akışkan debisinin düşük seçilmesi mantıklıdır. Parafinin(P1) katılma sırasında belirli noktalarda, suyun debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.13.'de görülmektedir.



a)



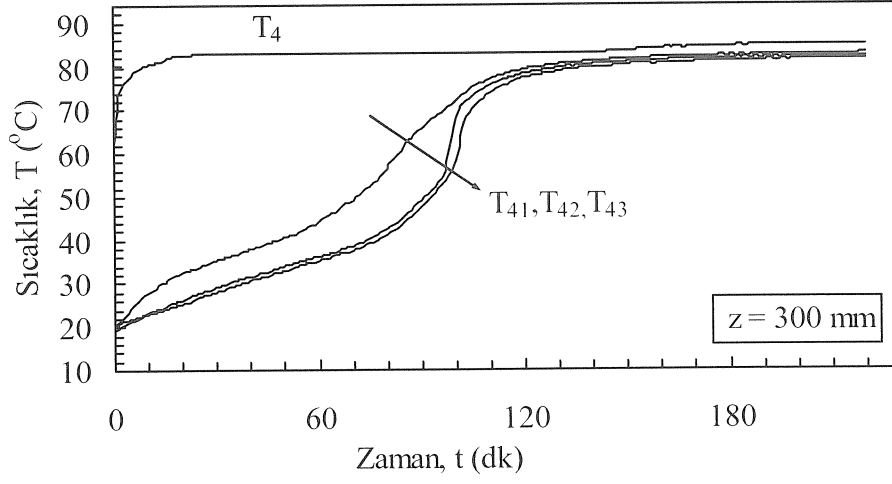
b)



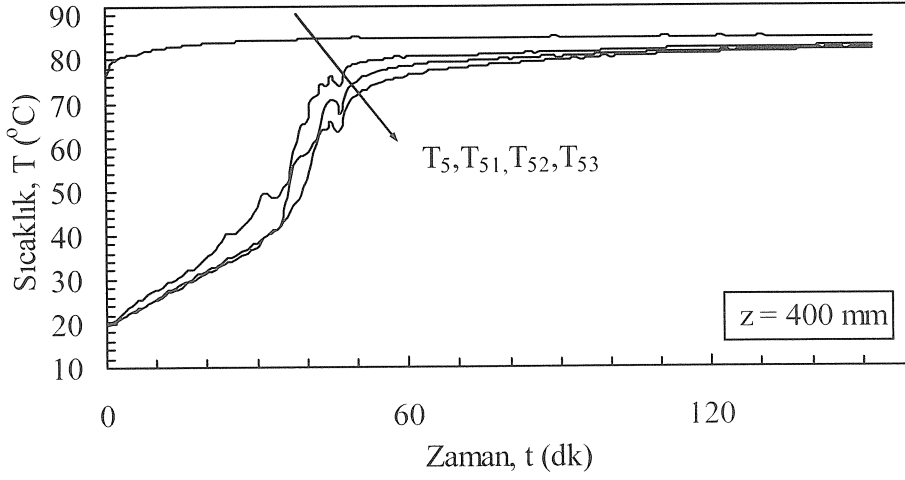
c)

Şekil 3.1. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, radyal yönde sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}, \theta = 0^{\circ}, T_g = 70^{\circ}\text{C}, \dot{m} = 8$ kg/dk)

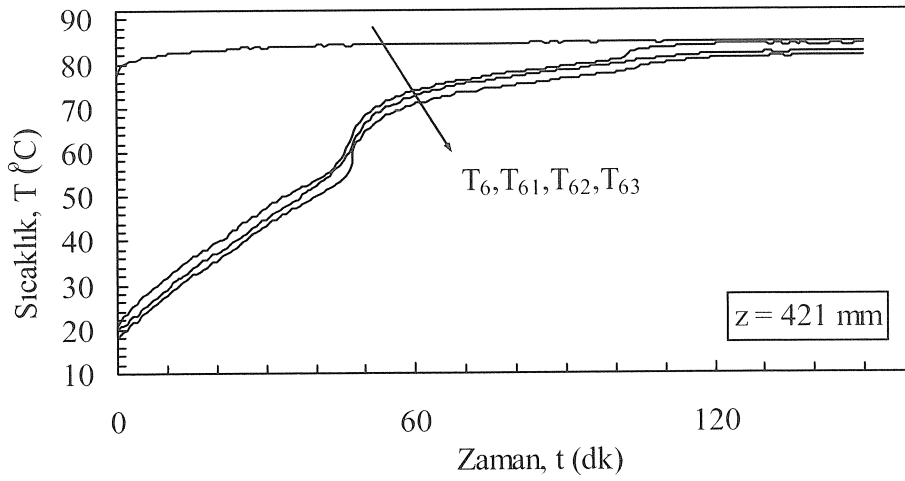
Şekil 3.1.'in devamı



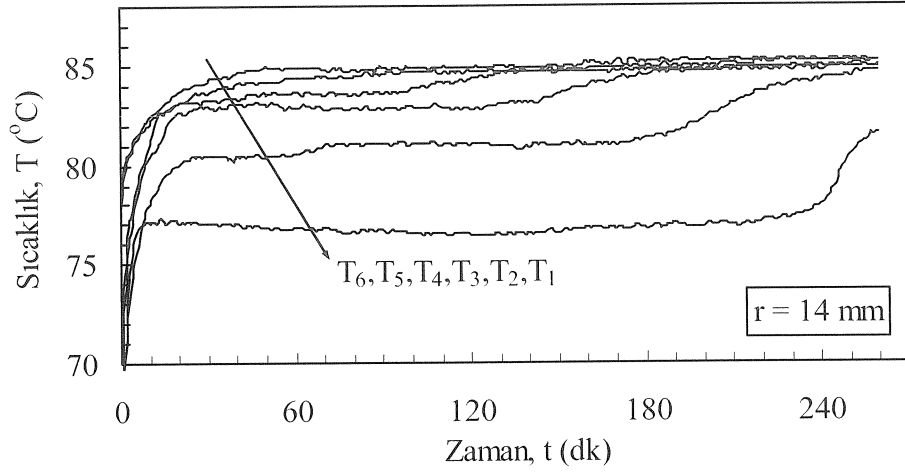
d)



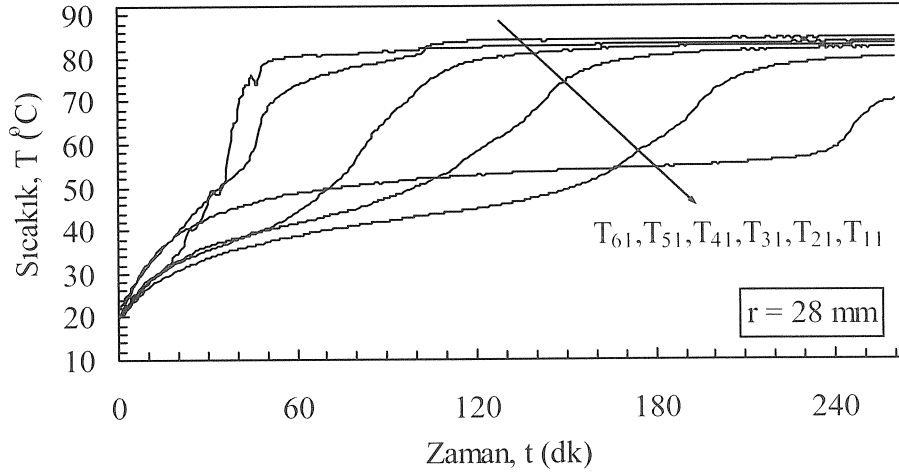
e)



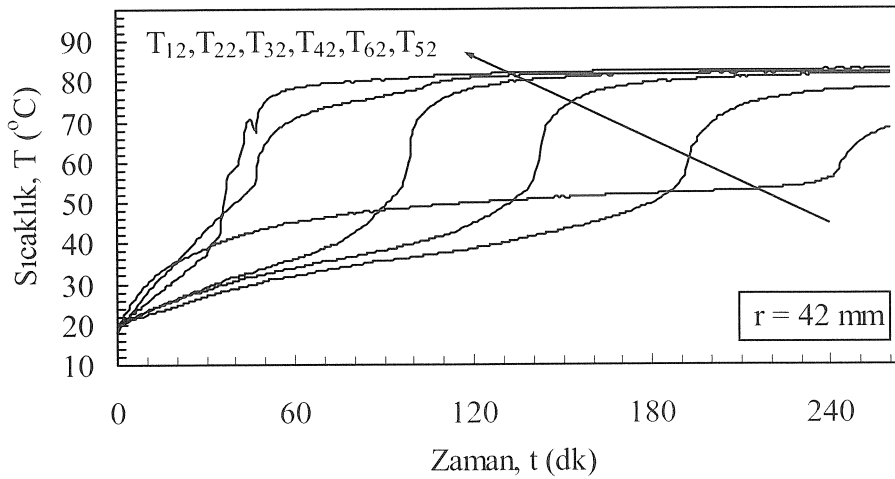
f)



a)

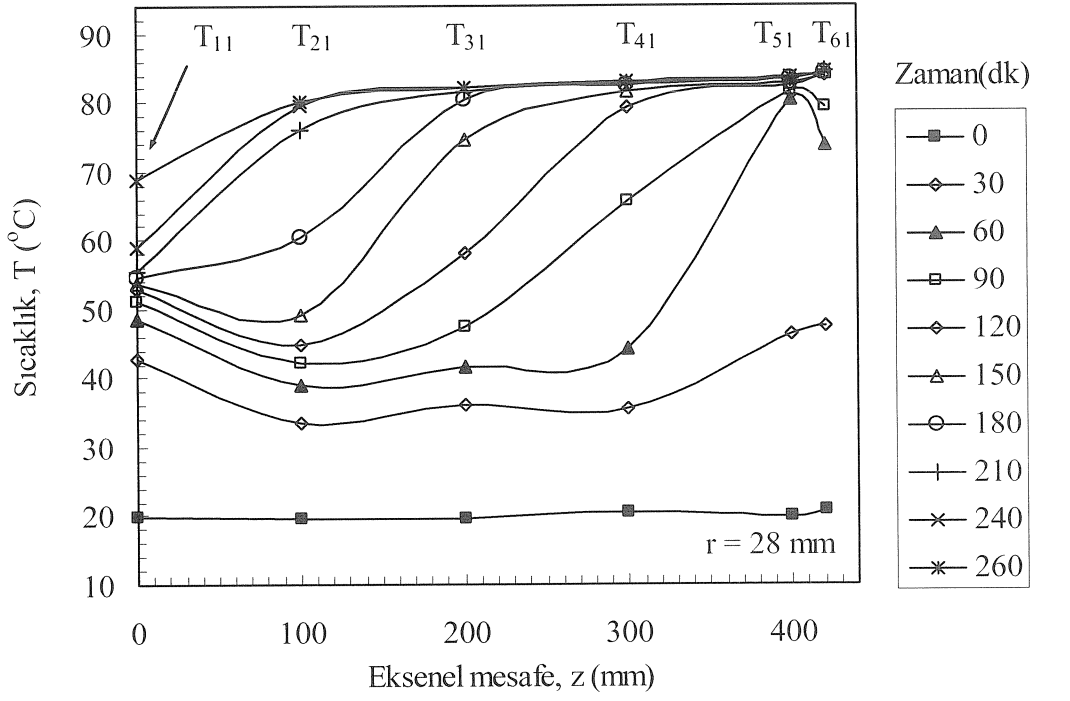


b)

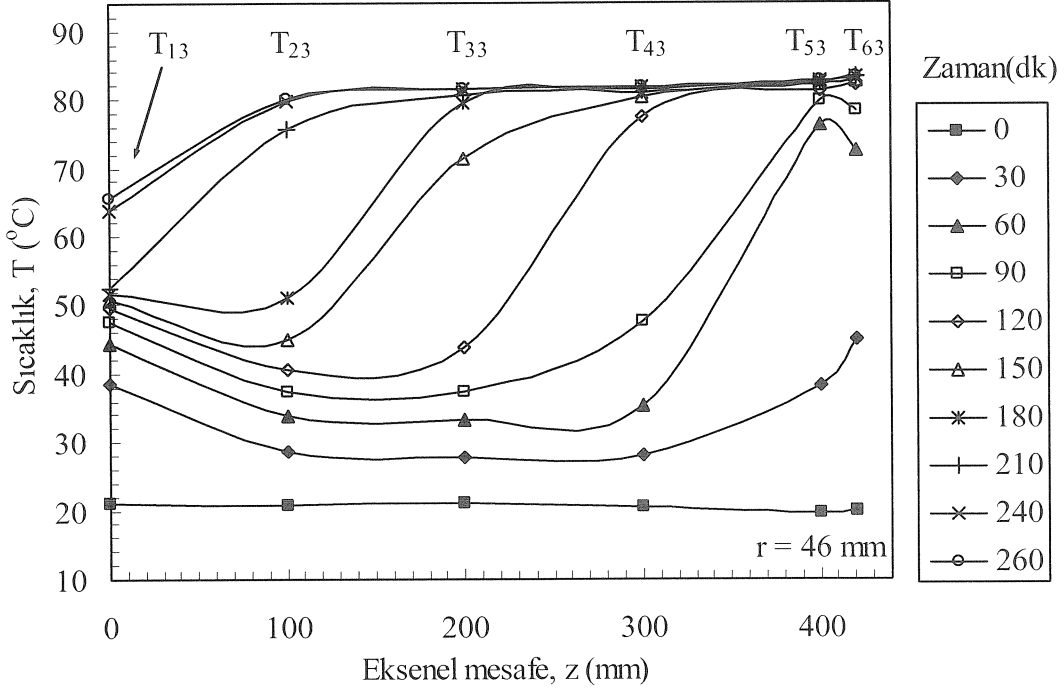


c)

Şekil 3.2. Parafinin (P3) ergimedeki belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 70^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

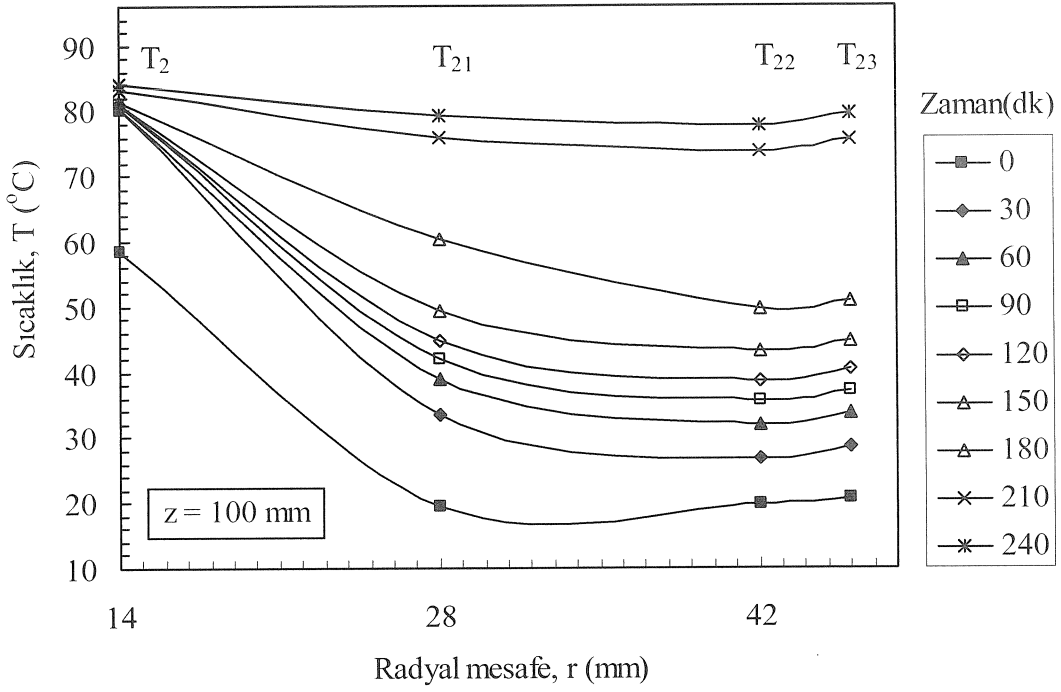


a)

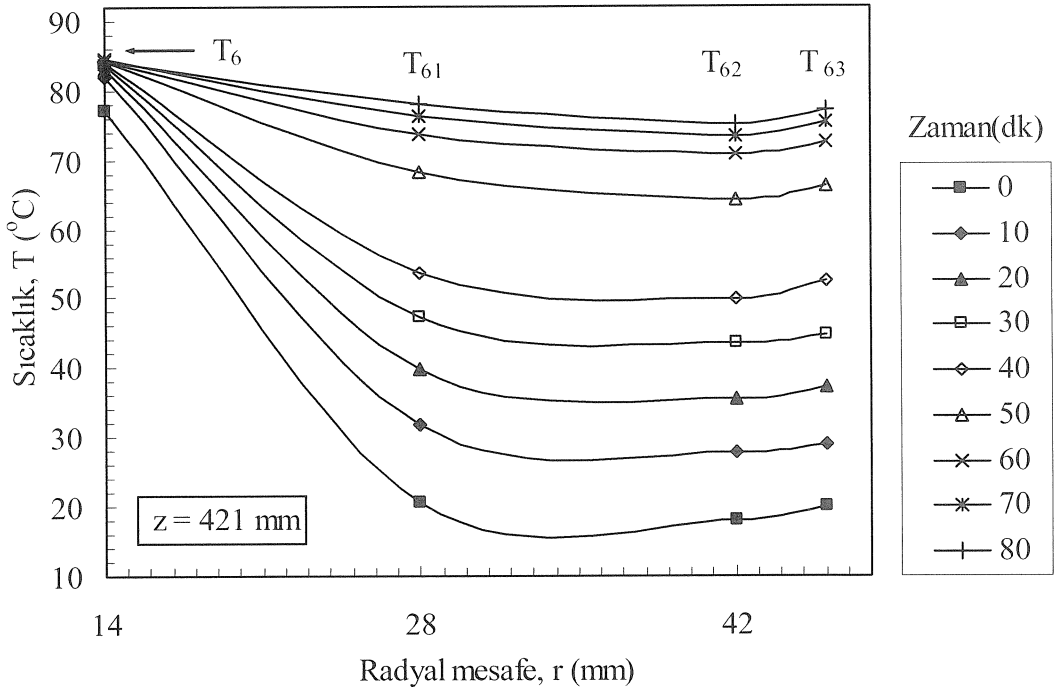


b)

Şekil 3.3. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık aksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 70^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

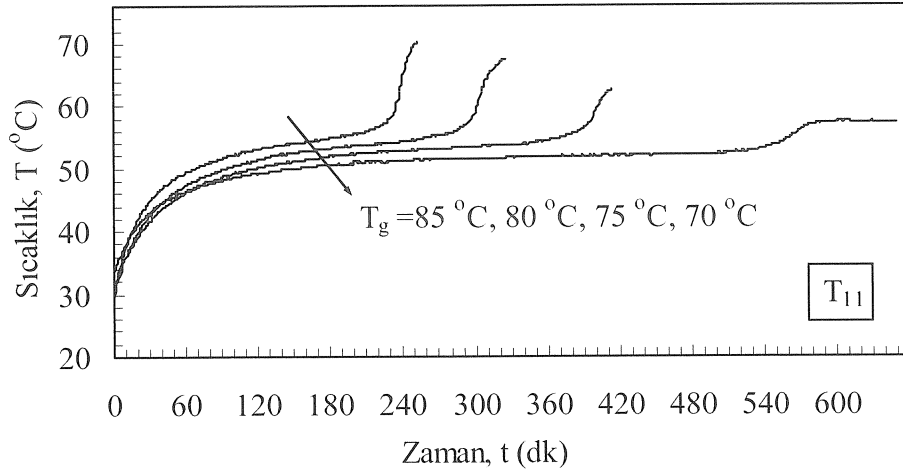


a)

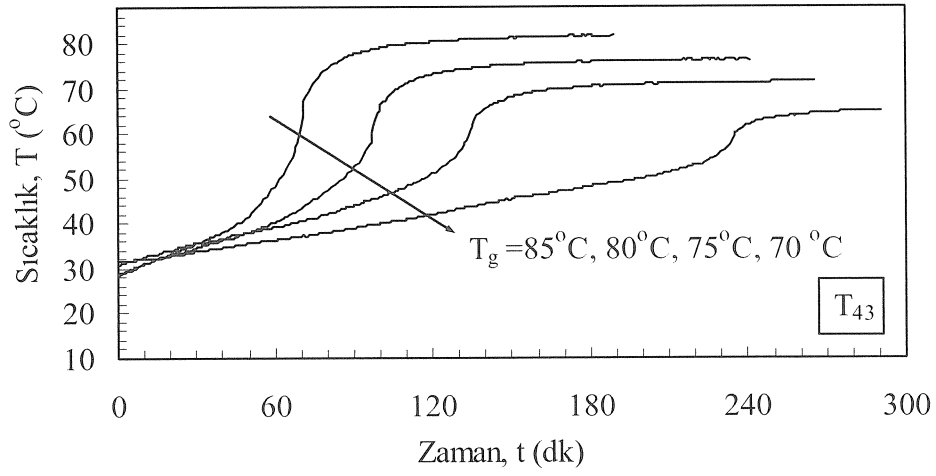


b)

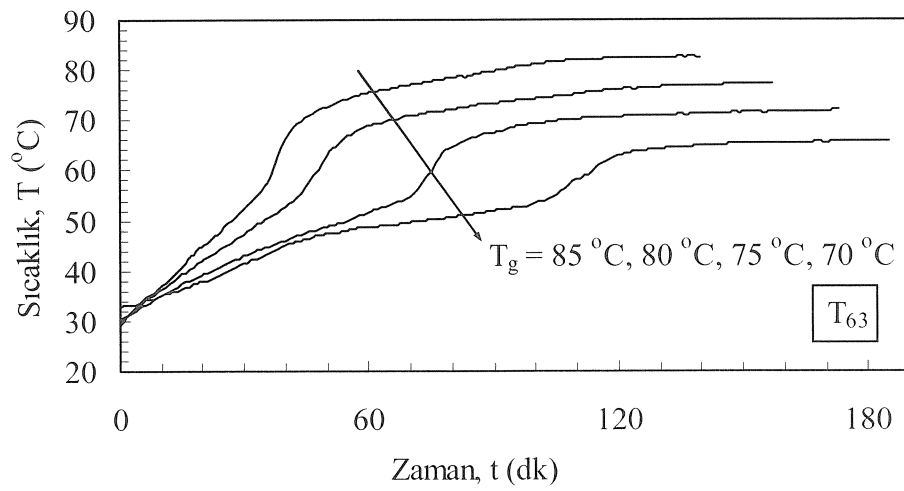
Şekil 3.4. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\emptyset = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 70^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

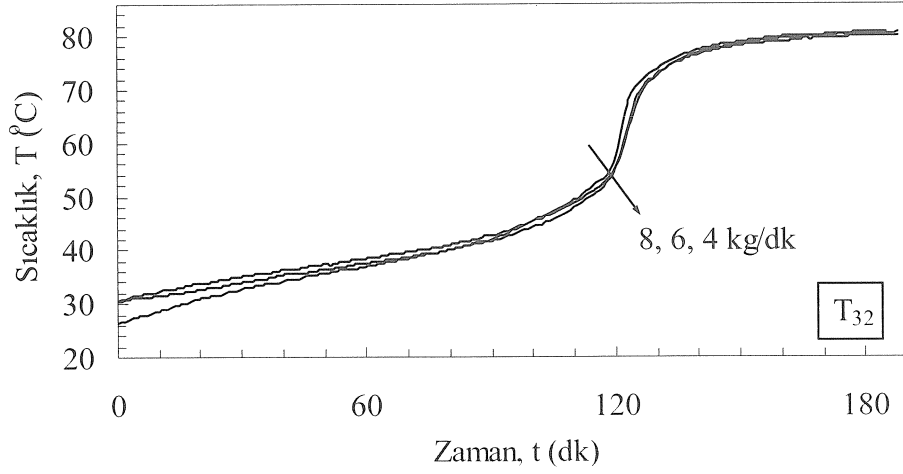


b)

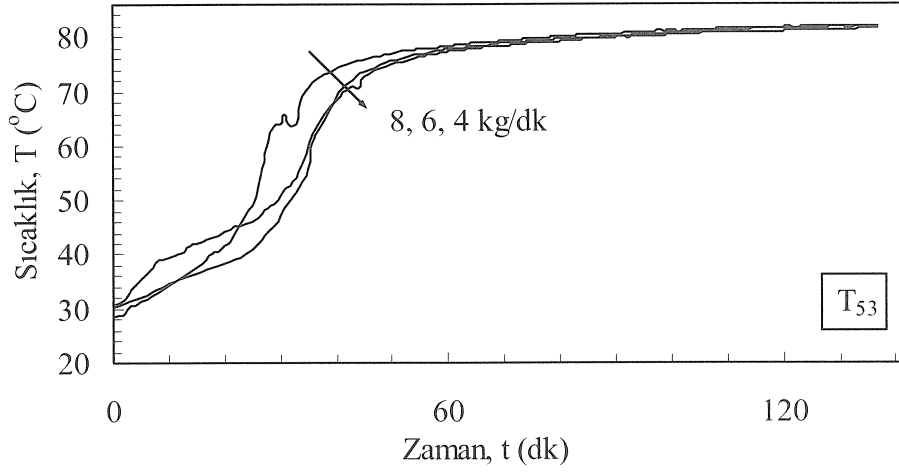


c)

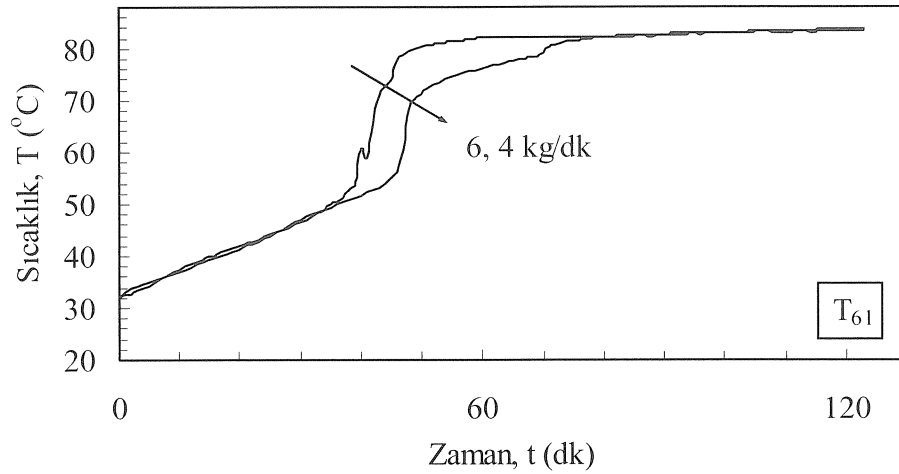
Şekil 3.5. Parafinin (P3) ergimedeki belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

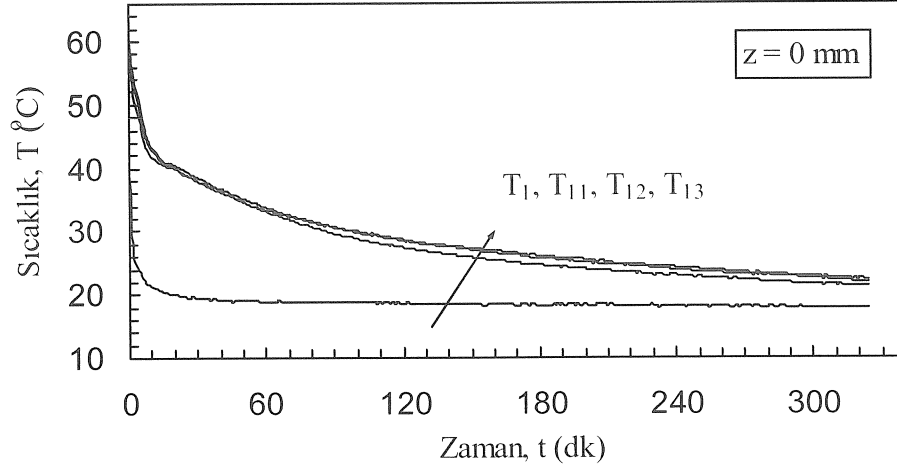


b)

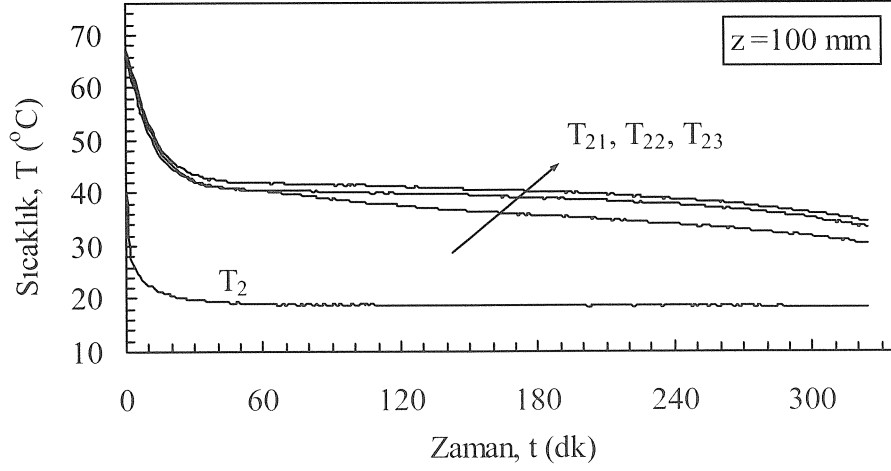


c)

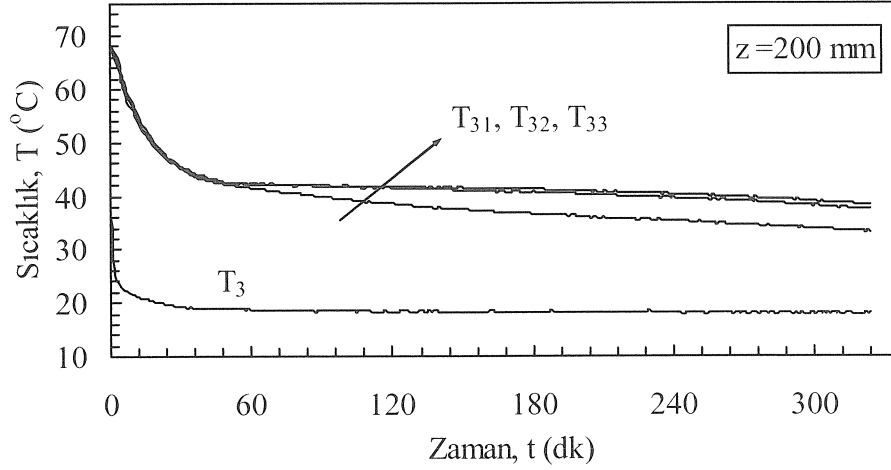
Şekil 3.6. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$)



a)



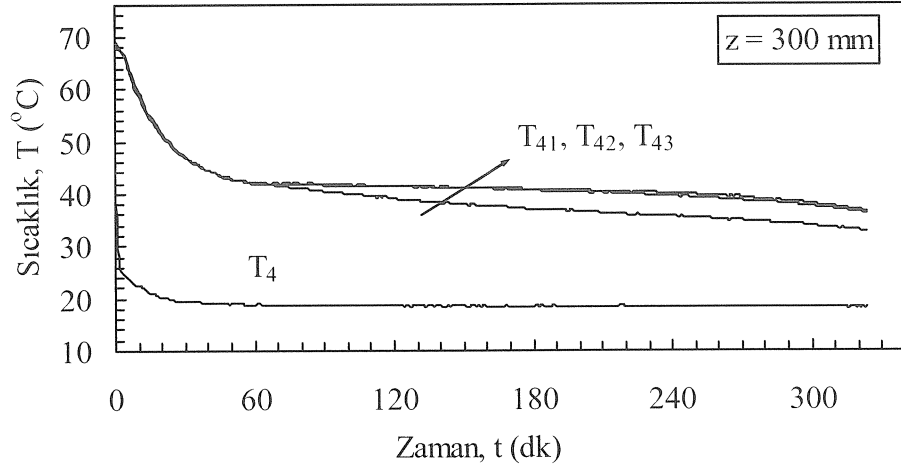
b)



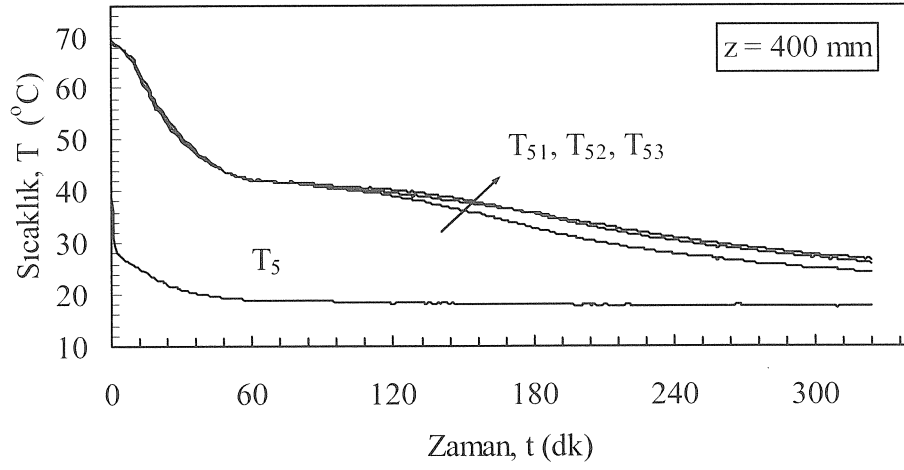
c)

Şekil 3.7. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksnel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

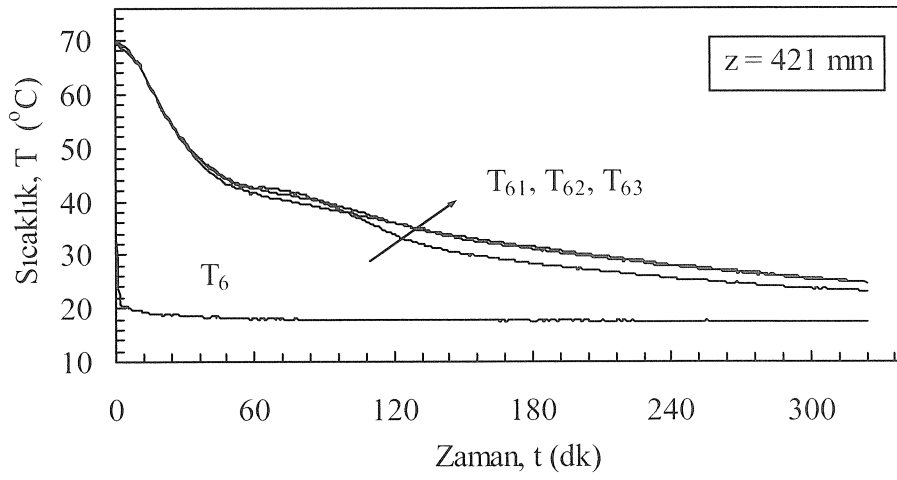
Şekil 3.7.'ün devamı



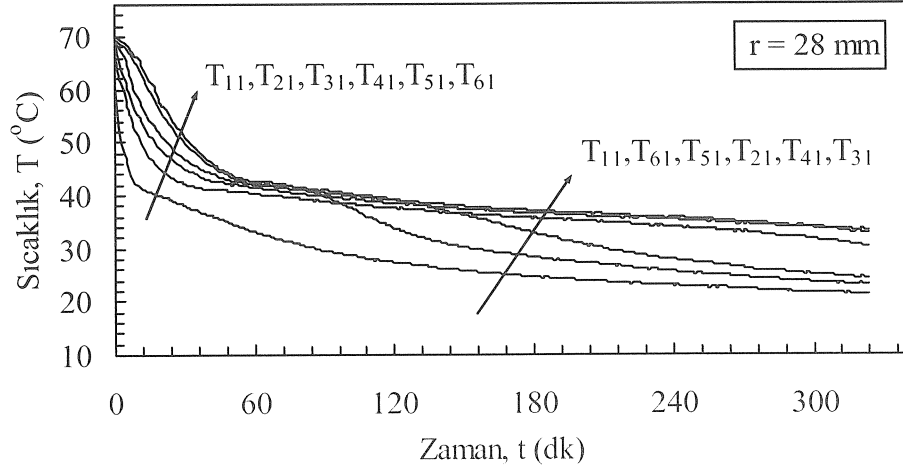
d)



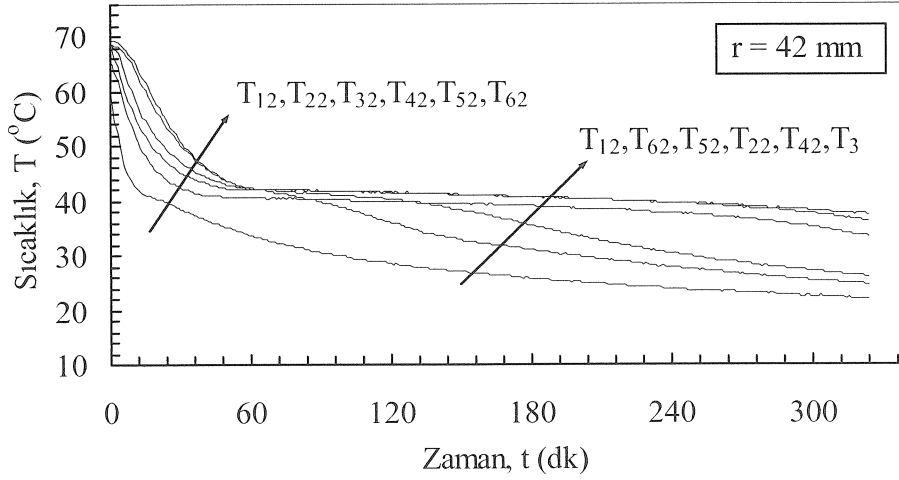
e)



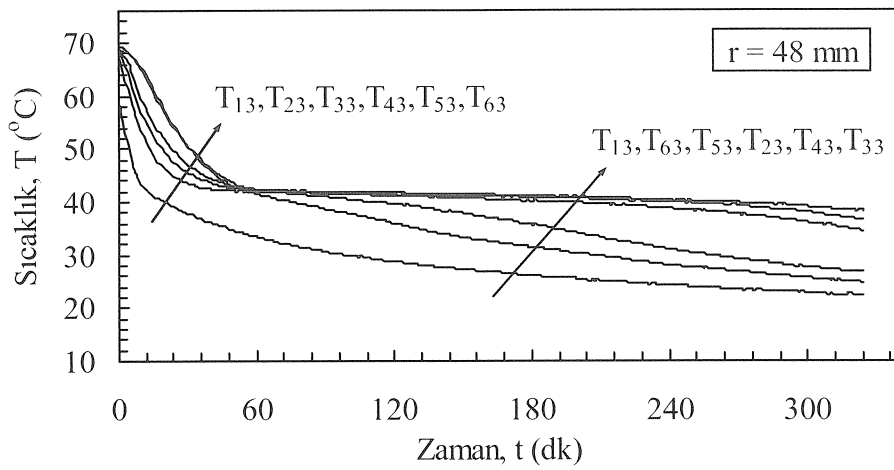
f)



a)

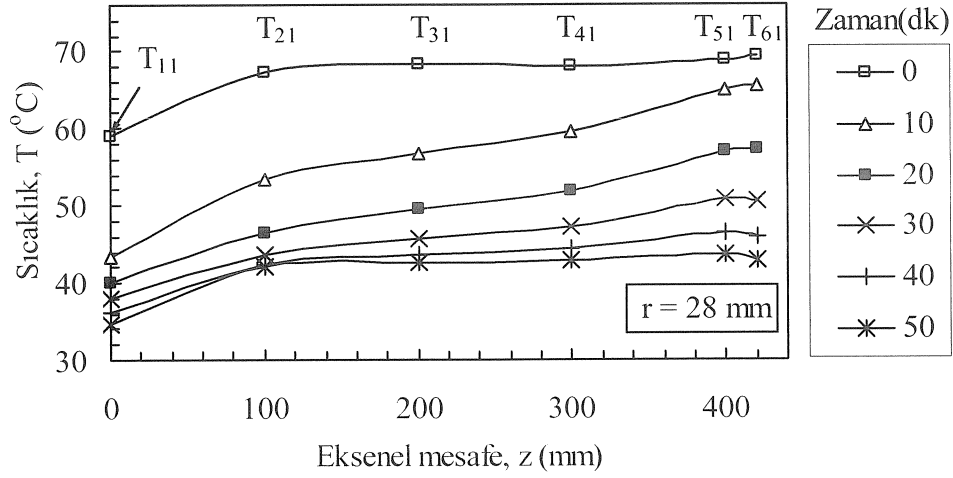


b)

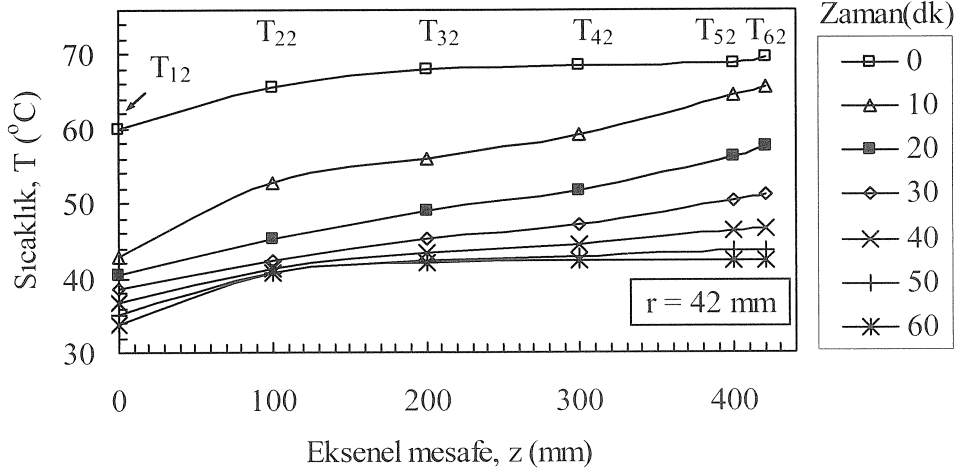


c)

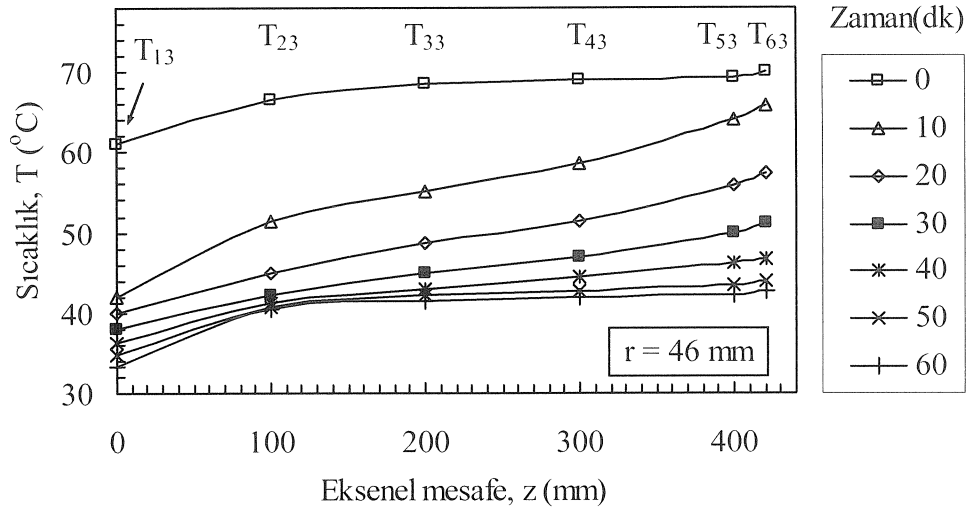
Şekil 3.8. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)



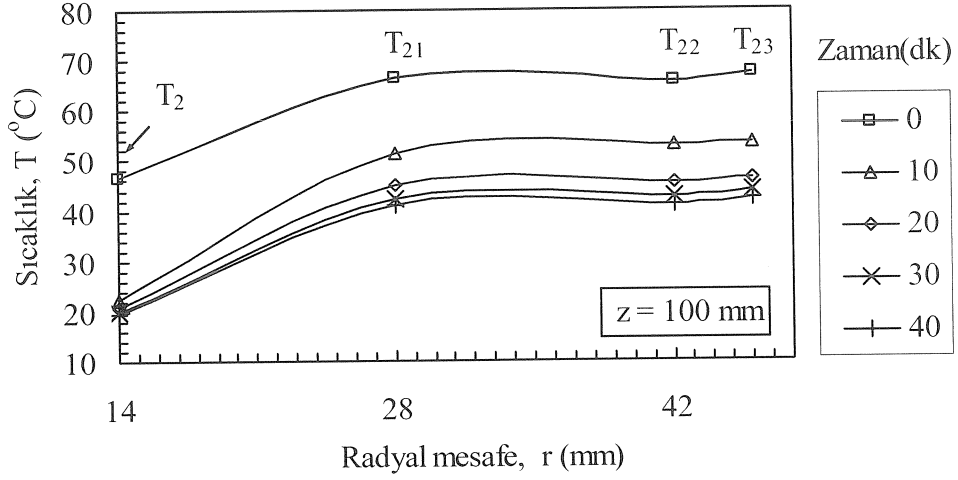
b)



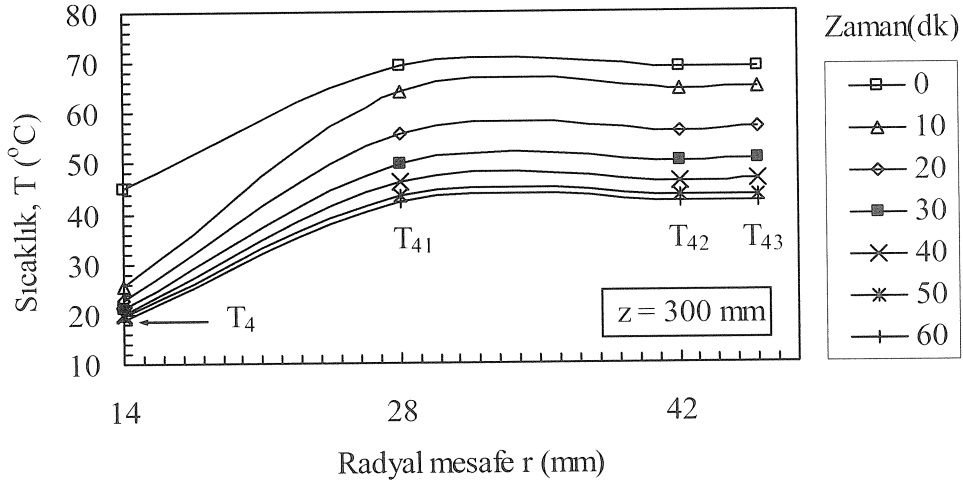
c)

Şekil 3.9. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$,

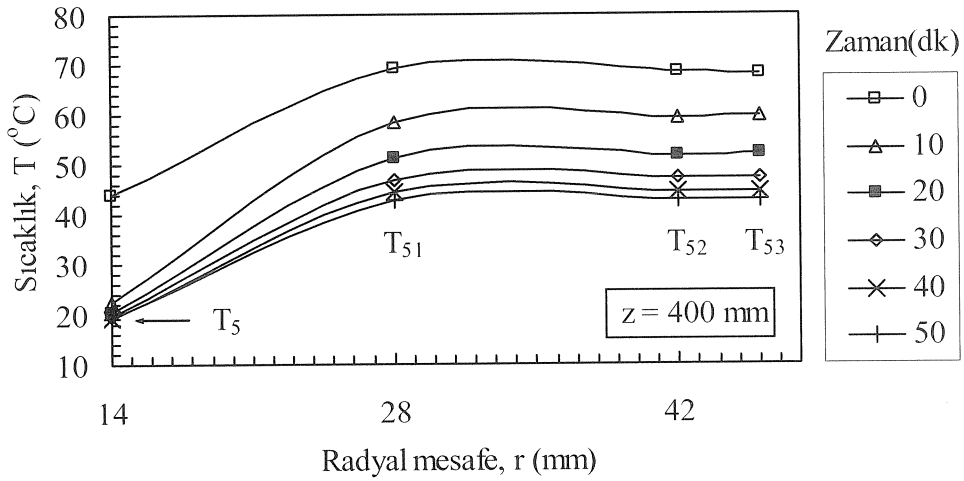
$$m = 8 \text{ kg/dk})$$



a)



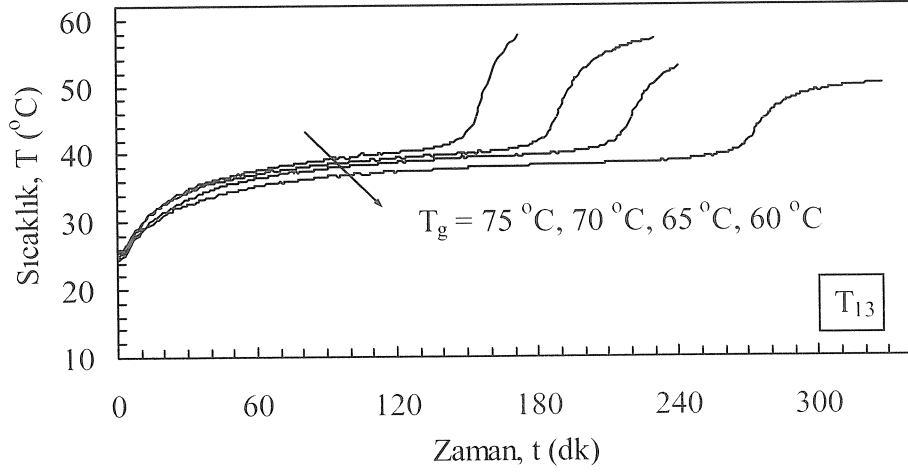
b)



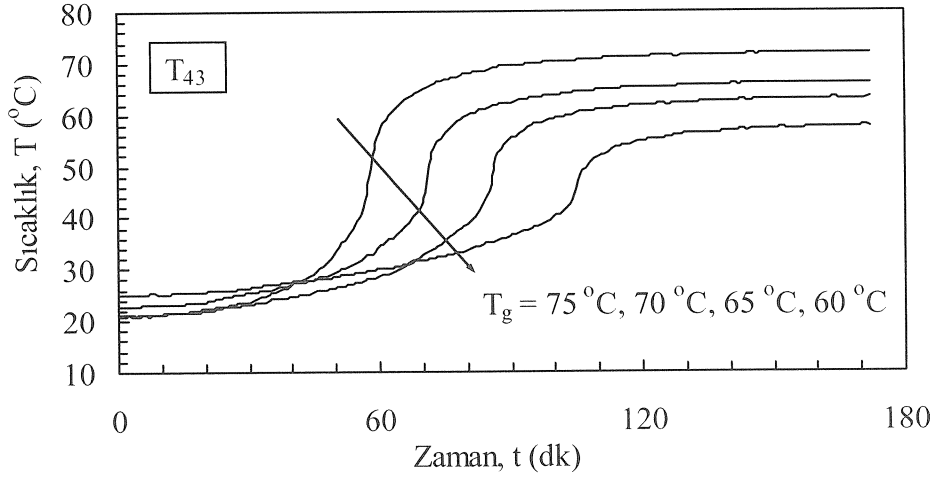
c)

Şekil 3.10. Parafinin (P3) katılmasında belirli aksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$,

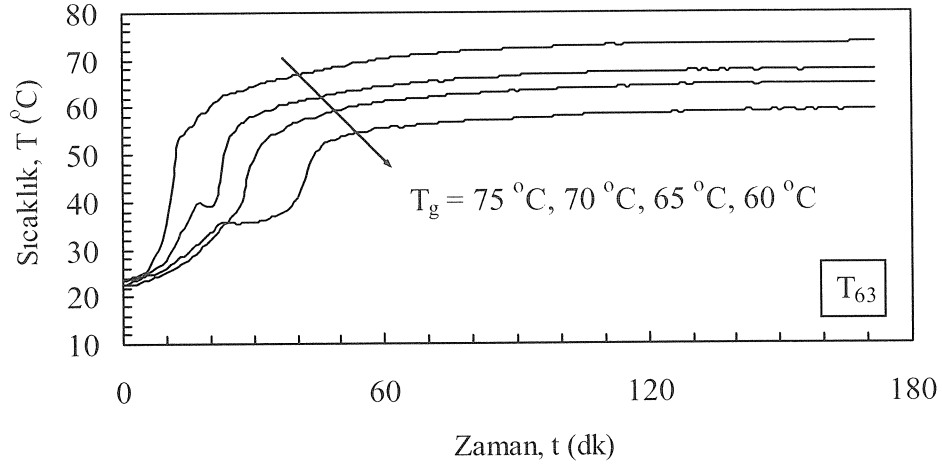
$$m = 4 \text{ kg/dk})$$



a)

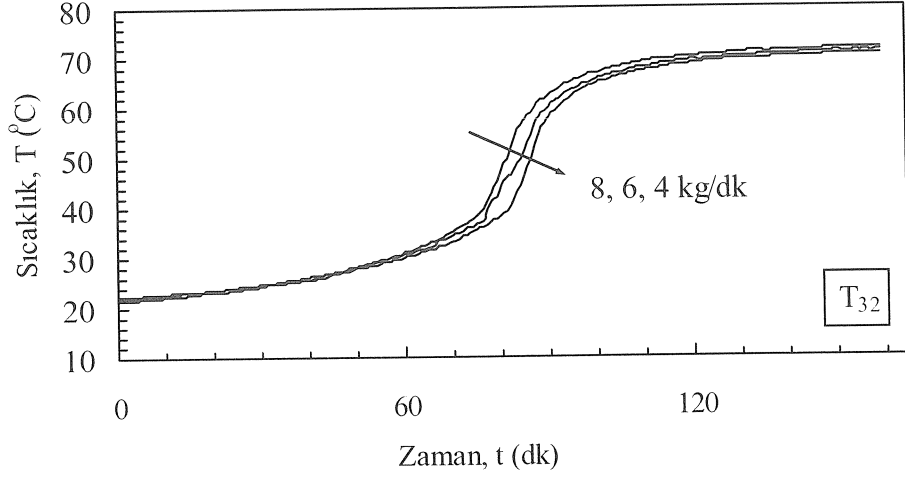


b)

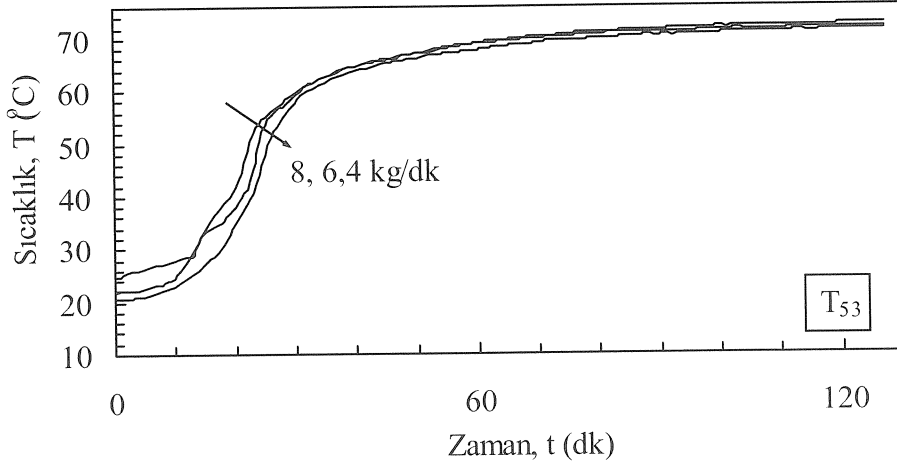


c)

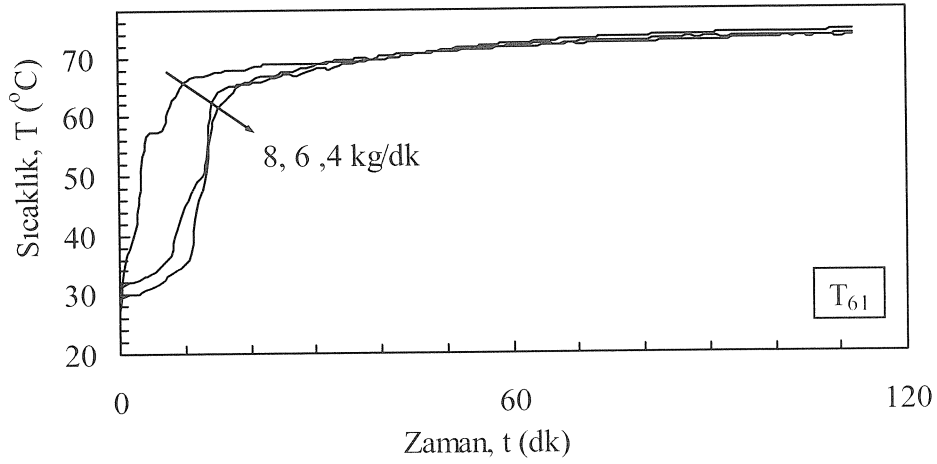
Şekil 3.11. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

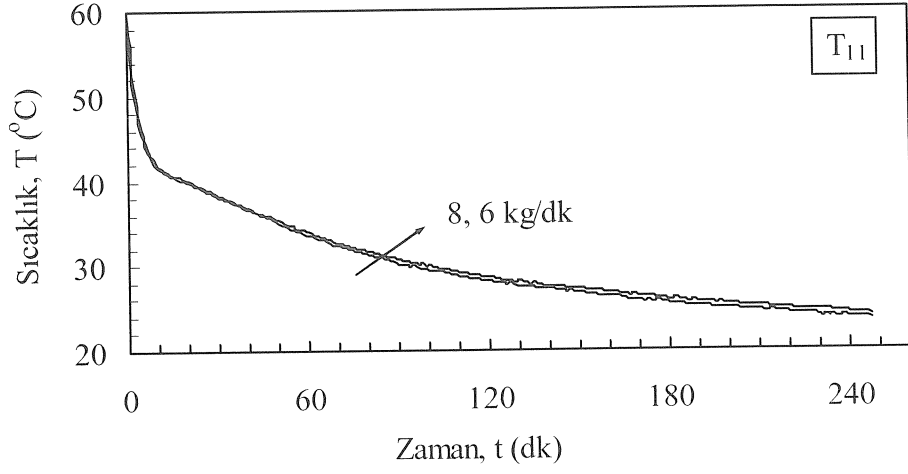


b)

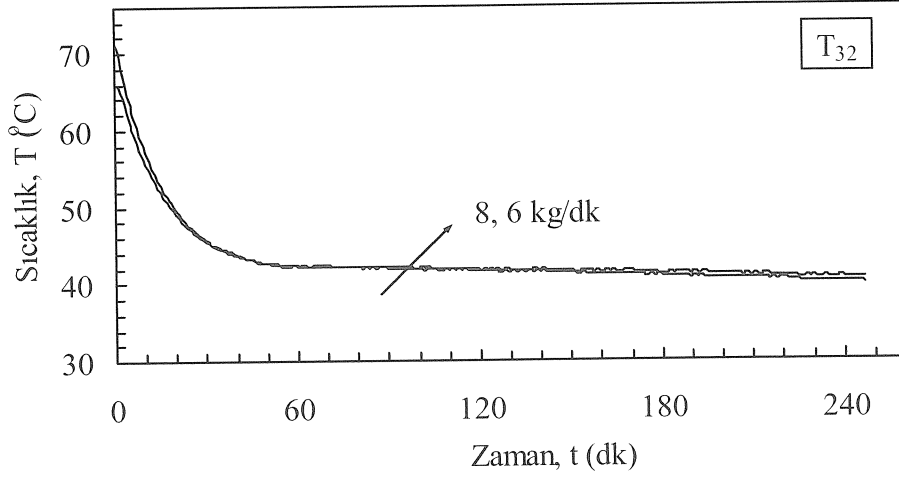


c)

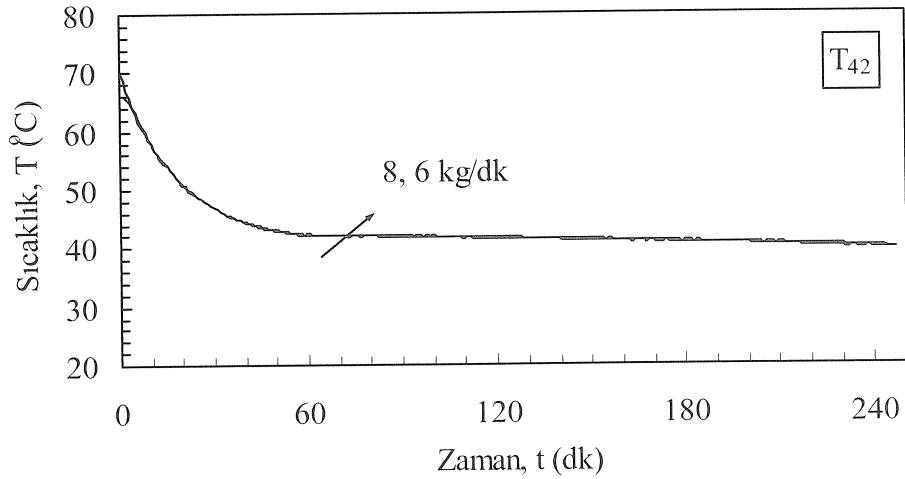
Şekil 3.12. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 75^{\circ}\text{C}$)



a)



b)



c)

Şekil 3.13. Parafinin (P1) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)

3.1.2. Kabuğu Eğimli Depo (Kabuk açısı, $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$)

Beş derece kabuk açılı depo kullanılarak yapılan deneylerde, P1, P2 ve P3 parafinleri kullanılmıştır. Deneyler, erime işleminde; farklı akışkan giriş sıcaklığı ve kütleli debilerinde, katılma işleminde ise; tek bir akışkan giriş sıcaklığı ve farklı kütleli debilerde tekrarlanmıştır. Ancak, bu bölümde sadece diğer kabuk açıları ile karşılaştırabilmek için, aynı tip parafin P3, tek akışkan giriş sıcaklığı ve debisi için deney sonuçları verilmiştir. Ayrıca, farklı parafinler (P1, P2), akışkan giriş sıcaklıkları ve debiler için karşılaştırma grafikleri verilmiştir.

Isı değiştirici içerisindeki parafinin radyal yönde zamana bağlı erime davranışları Şekil 3.14.(a-f)'de verilmiştir. Şekil 3.14.(a); tabana yakın radyal yöndeki maddenin sıcaklığı, erime noktasına kadar hızlı bir şekilde artmış, faz değişim sıcaklığında depo içindeki maddenin tümü eriyinceye kadar sabit kalmış ve sonra tekrar hızla artmıştır. Bu durum ısı transfer borusu üzerindeki sıcaklık değişimi için de aynıdır. Faz değişimi tamamlandığında, T_{11} eğrisi üzerinde aşırı soğuma gözükmektedir. Diğer taraftan, Şekil 3.14.(b-e)'den de görüldüğü gibi deponun aksel mesafesi arttıkça maddenin faz değişim süresi kısalmakta ve radyal mesafedeki sıcaklık farkı artmaktadır. Deponun en üst noktasında, Şekil 3.14.(f) de görüldüğü gibi deponun diğer noktalarından farklı olarak maddenin faz değişiminden sonra radyal noktalardaki ($T_{61}, T_{62}, T_{63}, T_{64}$) sıcaklıklar ısı transfer borusundan uzaklaştıkça artmaktadır.

Parafinin radyal mesafelerde belirli aksel noktalarda zamana bağlı sıcaklık değişimleri Şekil 3.15. (a-c)'de verilmiştir. Şekil 3.15.(a)'da akışkan borusu üzerindeki sıcaklığın zamanla değişimi görülmektedir. Borunun tabanından itibaren yükseldikçe sıcaklık artmakta, ilerleyen zamanlarda tüm parafin eriyince borunun en altı ile en üstü arasında sıcaklık farkı ortadan kalkmaktadır. Şekil 3.15.(b) grafiği incelendiğinde, $z = 0$ mm'de T_{11} noktasında sıcaklık hızla artıp sabitlenirken, aksel yönde yukarıdan aşağıya ($T_{61}, T_{51}, T_{41}, T_{31}, T_{21}$) doğru parafin zamanla eridikçe T_{11} nokta sıcaklığını hızla geçer ve parafin sıcaklıkları dengeye gelerek sabitlenir. Belirli aksel mesafelerde deponun kabuğuna en yakın noktalarda (r_{max}) parafinin zamanla sıcaklık değişimleri Şekil 3.15.(c)'de verilmiştir. Bu şekil, aynı zamanda, depo içerisindeki parafinin tamamen erime davranışını daha açık olarak vermektedir.

Belirli bir radyal mesafede aksel sıcaklık dağılımları farklı zaman adımları için Şekil 3.16.(a,b)'de verilmiştir. Şekil 3.16.(a)'da $r = 28$ mm noktasında parafinin erime

işleminde aksel sıcaklık değişimleri zamana bağlı olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi aksel yönde, $z = 0$ noktasındaki (T_{11}) maddenin sıcaklığı hızla erime noktasına ulaşırken, aynı doğrultudaki değişik z mesafelerindeki bu durum zamana bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. 20. ve 40. dakikalarda T_{61} noktasında sıcaklık alt noktalara göre daha düşüktür. Bunun sebebi, üst noktada genişleme boşluğuna olan ısı kaybıdır. Şekil 3.16.(c)'de aksel mesafelerde r_{max} için belirli zaman adımlarında sıcaklığın değişimi verilmiştir. Faz değişimi deponun üst noktasından aşağıya doğru kabuk boyunca zamanla gerçekleşmektedir.

Şekil 3.17.(a,b)'de ısı değiştirici içinde bulunan parafinin aksel mesafelerdeki ($z = 200$ mm ve $z = 400$ mm) zamana bağlı radyal mesafe-sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Isı depolamanın ilk 40. dakikasına kadar radyal yöndeki sıcaklık gradyanı düşükken, bundan sonraki sürelerde ısı transfer borusuna yakın bölgelerdeki parafin P3 hızla erimiş, akışkan borusundan uzaklaştıkça maddenin erime sıcaklığına ulaşması gecikmiştir. Duvara yakın noktada, (T_{32}) sıcaklığının faz değişim sıcaklığını geçmesi durumunda, radyal yönde parafinin sıcaklık dağılımı ısı transfer borusu yüzey sıcaklığına hızla yaklaşmaktadır. Şekil 3.17.(b)'de görüldüğü gibi, faz değişiminin başlangıcında radyal yöndeki sıcaklık dağılımı çok farklı olmamasına rağmen, erime zamanının ilerlemesi durumunda radyal yöndeki sıcaklık farkı, ısı transfer borusundan uzaklaştıkça hızla artmış ve erime tamamlanınca radyal yöndeki sıcaklık gradyanı yaklaşık olarak sabit kalmıştır.

Şekil 3.17.(a,b)'de, aksel yöndeki her nokta için, radyal yönde duvara yakın (r_{max}) FDM'nin erimesi durumunda depo içerisinde sıcaklığın birbirine yaklaşarak sabitlendiği görülmüştür.

Şekil 3.18.(a-c)'de farklı giriş sıcaklıklarında, T_{11} , T_{43} ve T_{63} sıcaklarının zamanla değişimi verilmiştir. T_{11} için, değişen akışkan giriş sıcaklığı faz geçişi başlangıcına kadar T_{11} davranışını pek etkilememiştir. Deneylerde düşük sıcaklıktaki ($T_g = 70$ °C) ısı transfer akışkanı kullanıldığında ısı depolama süresinin çok fazla arttığı görülmüştür. Isı transfer akışkan sıcaklığının artması beklendiği üzere depolama ve erime süresini kısaltmaktadır. Ancak, giriş sıcaklığının optimum giriş sıcaklığından çok fazla yüksek olması, depolama kayıplarını artırması dolayısıyla tercih edilmez. Benzer şekilde, T_{43} , yüksek akışkan giriş sıcaklıkları için FDM'nin sıcaklıkları arasında fark azken, düşük akışkan giriş sıcaklıkları için fark daha fazladır. Deponun üst noktalarında (T_{63}) akışkan giriş sıcaklıkları arasındaki farka rağmen parafinin sıcaklıkları birbirine yakındır. Akışkanın farklı giriş sıcaklıkları ve

deponun farklı noktalarında parafinin erime davranışlarının aynı olduğu görülmüştür. Parafinin erime noktasına yakın sıcaklıklarda akışkan sıcaklığı seçimi hem depolama süresini uzatmakta ve dolayısıyla depodan olan ısı kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu da termal depolama için istenen bir durum değildir.

Şekil 3.19.(a-c)'de akışkan debisinin parafinin erime zamanına etkisi verilmiştir. Silindirik depo için daha önceden gözlemlendiği gibi, akışkan debisinin artması, erime süresini çok fazla etkilememektedir.

Parafine (P1, P2, P3) depolanan ısının geriye alınmasında, deşarj deneyleri şarj işlemi biter bitmez başlatılmıştır. Soğutucu akışkan, şarj deneylerinin tersi yönde depolama sisteminden geçirilmiştir. Düşey konumda yerleştirilmiş 5° kabuk açısındaki depoda bulunan erimiş parafin P3'ün katılaşma işleminde belirli aksel mesafelerde radyal yönde sıcaklığın zamanla değişimi Şekil 3.20.(a-f)'de verilmiştir. Deponun en alt kısmında ($z = 0$ mm) madde hızla faz değişim sıcaklığının altına inmiş ve radyal mesafe oldukça yakın olmasına rağmen katı parafinin düşük ısı iletim katsayısından dolayı uzun zamanda boru sıcaklığına yaklaşmıştır. Şekil 3.20.(b-f) incelendiğinde, parafin deponun farklı noktalarında birbirine benzer katılaşma davranışları gösterdiği ve ısı transfer borusundan radyal doğrultuda en uzak noktada (T_{64}), 70. dakikada depo içerisindeki faz değişiminin tamamlandığı görülmüştür. Isı transfer borusuna yakın noktalarda soğutucu akışkan sıcaklığına hızla inilirken, daha uzak noktalarda ısının geriye alınma süresi uzamaktadır. Isı transfer akışkan borusu üzerinde donan parafinin ısı iletiminin düşük olmasından dolayı katılaşma süresince, deponun her noktasında birbirine yakın sıcaklık dağılımları görülür.

Şekil 3.21.(a,b)'de parafin P3'ün katılaşmada belirli radyal mesafede, zamanla sıcaklığının değişimleri verilmiştir. Sıcaklığın aksel yönde zamanla değişimi, silindirik depoda gözlenen değişime çok benzer olup arasındaki tek fark, katı-sıvı faz değişim süresinin silindirik geometriye göre biraz daha uzun olmasıdır. Şekil 3.21.(a) incelendiğinde, sıcaklık düşüşü $r = 28$ mm'de sıcaklık ölçüm noktalarında 60. dakikaya kadar düzgün bir dağılım gösterirken, parafinden ısı transfer borusuna ısı geçişi, iletimle gerçekleştiğinden beklendiği gibi akışkan borusuna ve depo kabuğuna yakın bölgelerde sıcaklık düşüşü daha fazla gerçekleşmektedir. Şekil 3.21.(b)'de belirli aksel mesafelerde depo kabuğuna en yakın bölgede parafin içerisinde sıcaklığın zamanla değişimleri verilmektedir. Bu bölgede, parafinin sıcaklık düşüşü iç bölgelerden daha yavaş olsa da katılaşma süreleri arasında çok fark yoktur. Bu değişim, Şekil 3.22.(a,b)'de verilen sabit

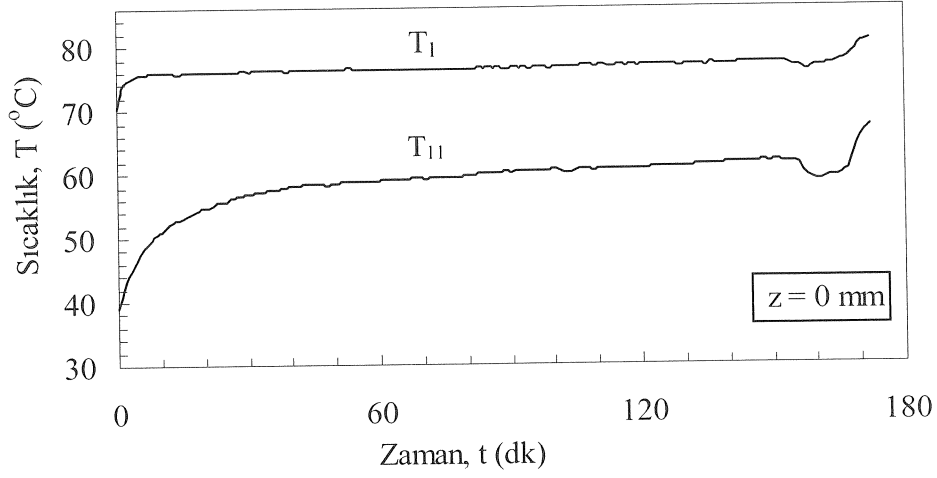
radyal mesafelerde aksel sıcaklık dağılımlarının zamanla değişiminden daha iyi gözlenebilir. katılma işleminin 70. dakikasından sonra iç bölgelerde sıcaklıklar birbirine çok yakın hale gelmiştir. Parafinin katılmasıyla oluşan hava boşluğu nedeniyle T_{64} ve T_{61} noktalarında iç bölgeye göre daha fazla sıcaklık düşüşü görülmüştür. Şekil 3.23. ise, sabit aksel mesafelerde radyal sıcaklık dağılımlarının zamanla değişimini göstermektedir. Parafinin sıcaklık düşüşü, deponun alt bölgesinde ($z = 100$ mm) daha yavaşken, deponun üst bölgelerinde ($z = 400$ mm) daha hızlıdır.

Soğutucu akışkan debisinin katılma süresinin üzerindeki etkisi Şekil 3.24.(a-c)'de verilmiştir. Debinin, hem FDM'in katılma davranışı ve hem de toplam katılma süresi üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğu görülmüştür. Daha öncede bahsedildiği üzere enerji ekonomik bir depolama sistemi için düşük ısı transfer akışkanı debisi tercih edilmelidir.

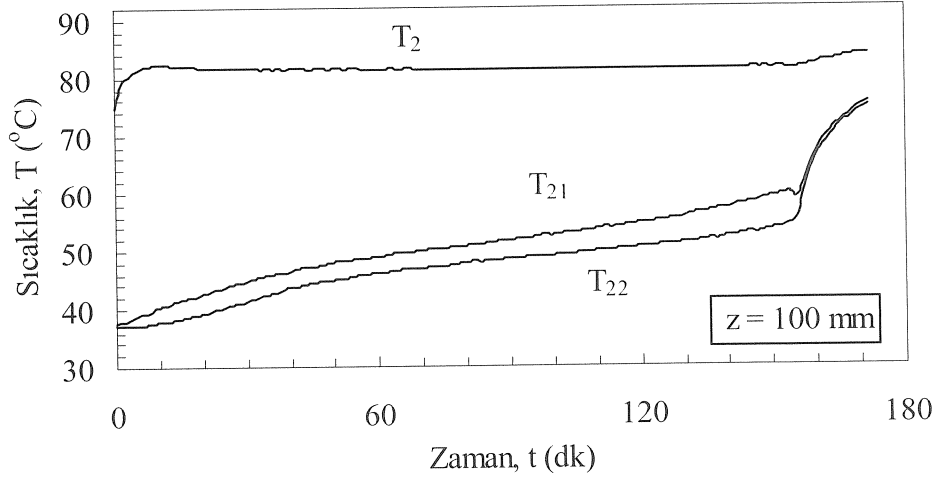
Parafin P1 ve P2 için de yukarıdakilere benzer davranışlar ve sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.25.-Şekil 3.30.'da parafin P1 ve P2 için, ısı transfer akışkan giriş sıcaklığı ve debisinin erime-katılma davranışları üzerine etkileri gösterilmiştir. Beklenildiği üzere, kullanılan parafinin erime sıcaklığına göre sıcaklık skalaları değişimine karşın elde edilen sıcaklık zaman değişimleri benzerdir. Şekil 3.25.-Şekil 3.30. incelendiğinde, farklı erime sıcaklıklarına sahip parafinin kullanılması parafinin katılma ve erime davranışlarını etkilemediği, sadece zamana bağlı sıcaklık değişimlerinde beklenildiği gibi etkili olduğu görülmüştür.

Isı transfer akışkan giriş sıcaklığının düşük seçilmesi, bilindiği gibi depolama süresini uzatmakta ve buna bağlı olarak da bir takım depolama sorunlarına sebep olmaktadır. Depolama sistemine giren akışkanın giriş sıcaklığının depolama süresine olan etkilerinin deneysel incelemeleri sonucunda seçilecek minimum akışkan giriş sıcaklığı, yaklaşık olarak $T_{g,min} = T_m + 15$ (°C) bağıntısı ile seçilmelidir (Şekil 3.18.(a), Şekil 3.25.(a), Şekil 3.35.(a)).

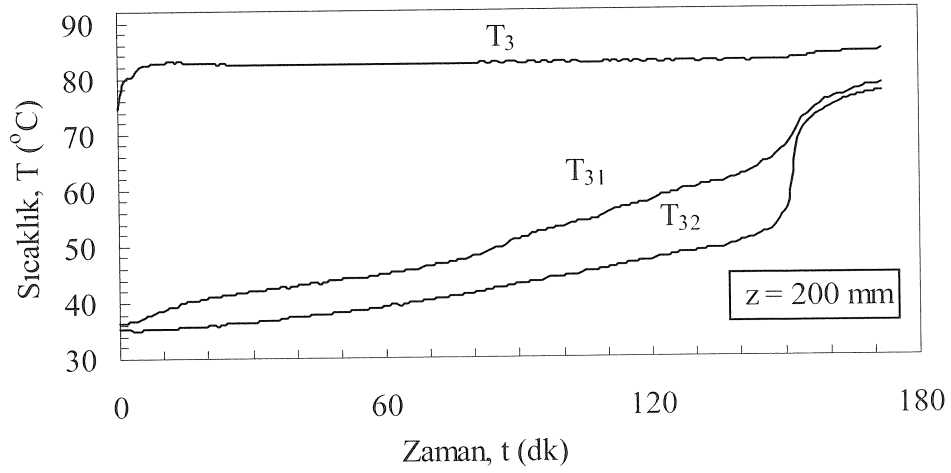
10° kabuk açısında, erime ve katılma için ayrı ayrı depo içerisindeki belirli noktalarda sıcaklığın zamanla değişimi, farklı zamanlarda sabit aksel istasyonlarda radyal sıcaklık dağılımları, yine farklı zamanlar için sabit radyal istasyonlarda aksel dağılımları ve ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve debisinin yükleme ve boşaltma davranışı üzerindeki etkisi Şekil 3.31.- Şekil 3.45.'de verilmiştir. Benzer değişimler, kabuk açısı 15° için, Şekil 3.46.-Şekil 3.62.'de ve 20° için, Şekil 3.63.-Şekil 3.76.'da gösterilmiştir.



a)



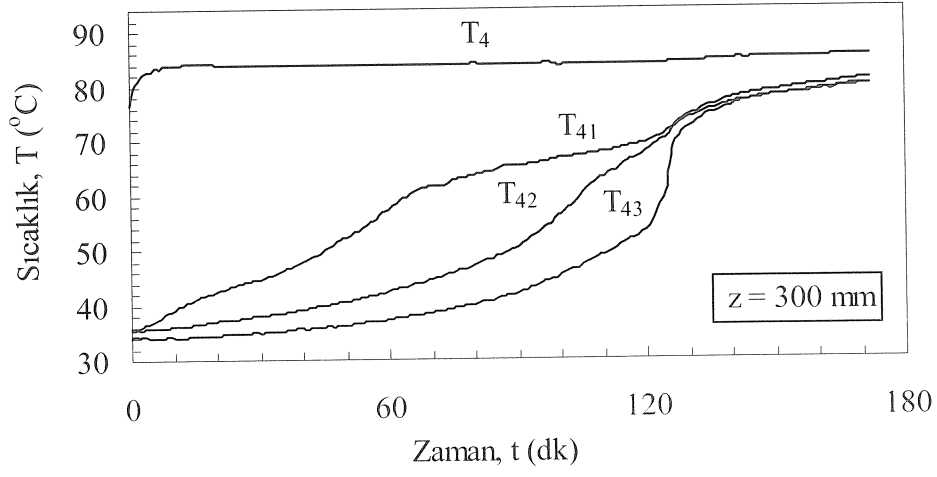
b)



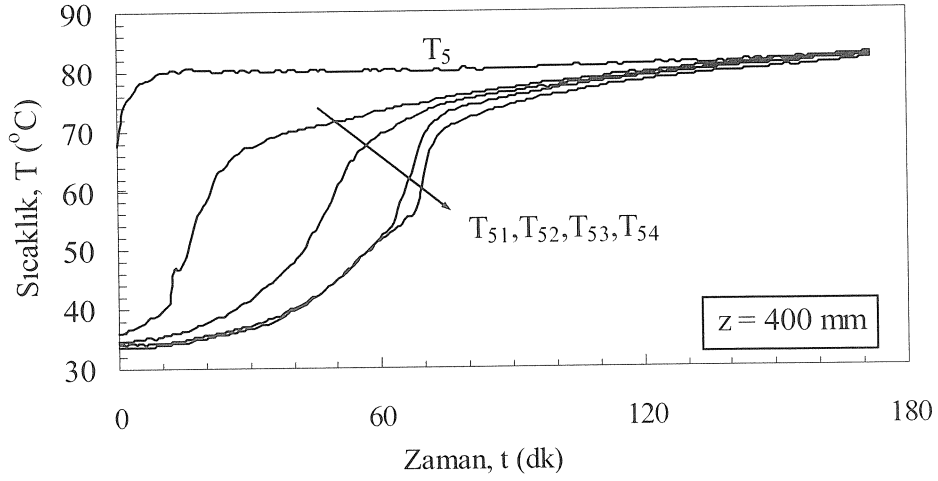
c)

Şekil 3.14. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{ kg/dk}$)

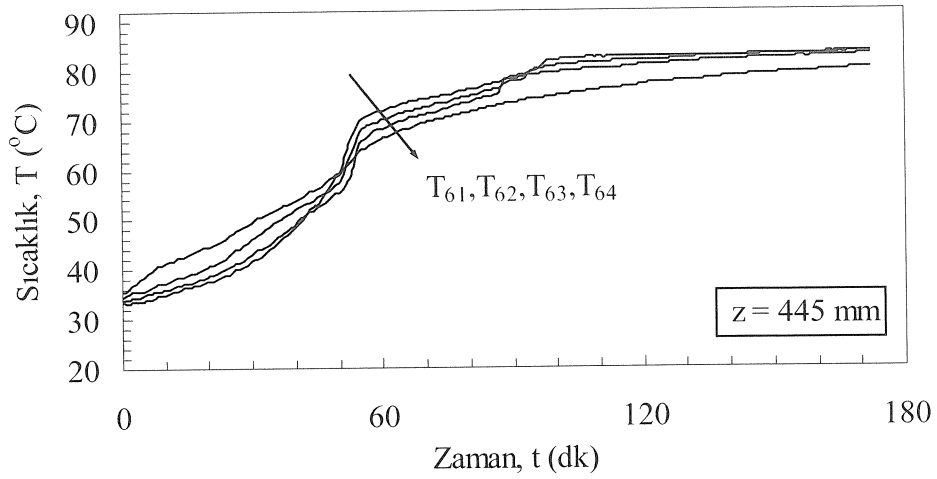
Şekil 3.14.'ün devamı



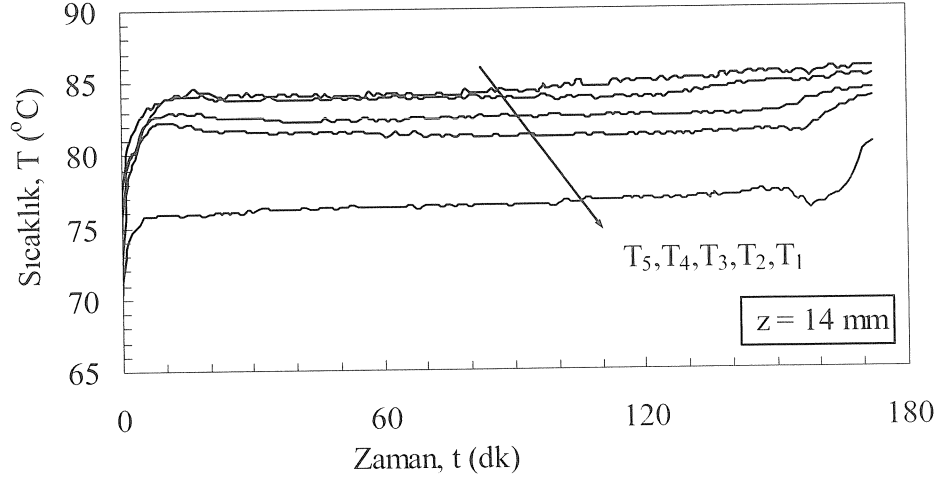
d)



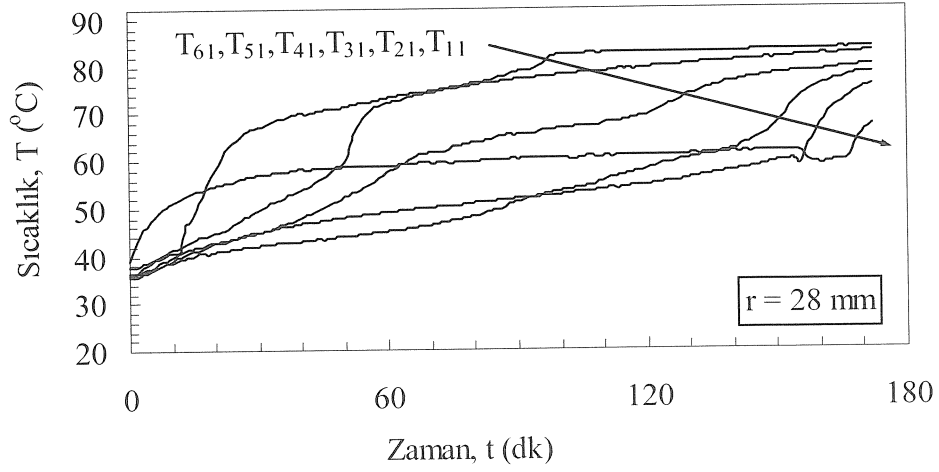
e)



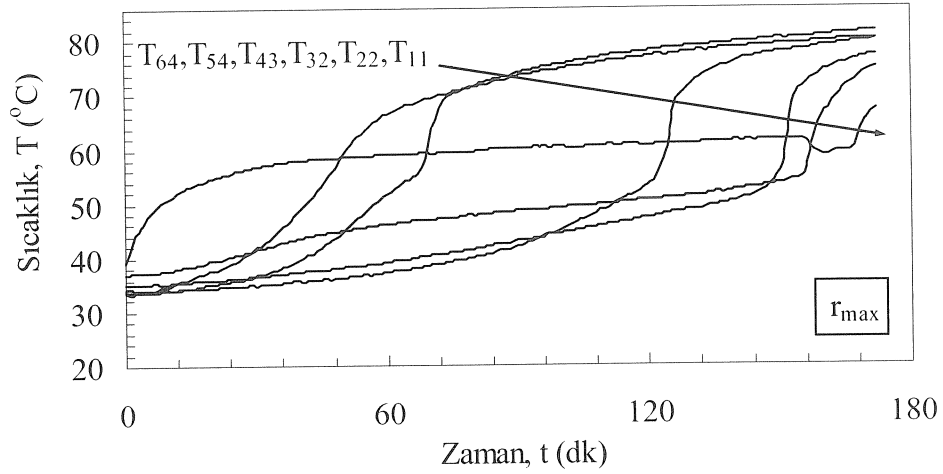
f)



a)

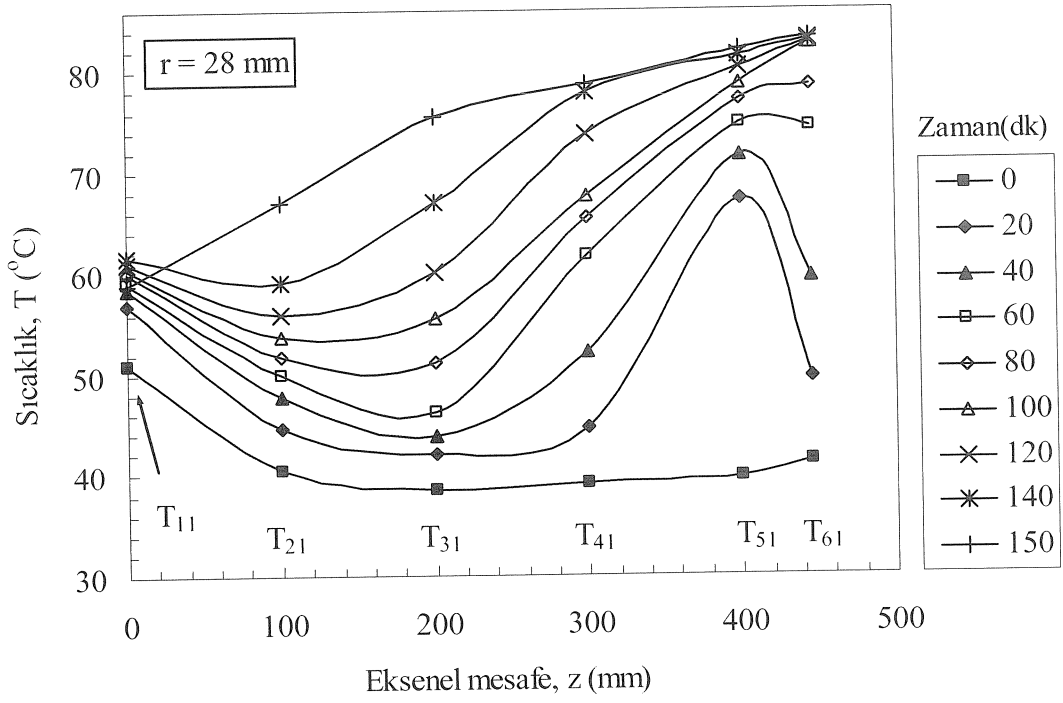


b)

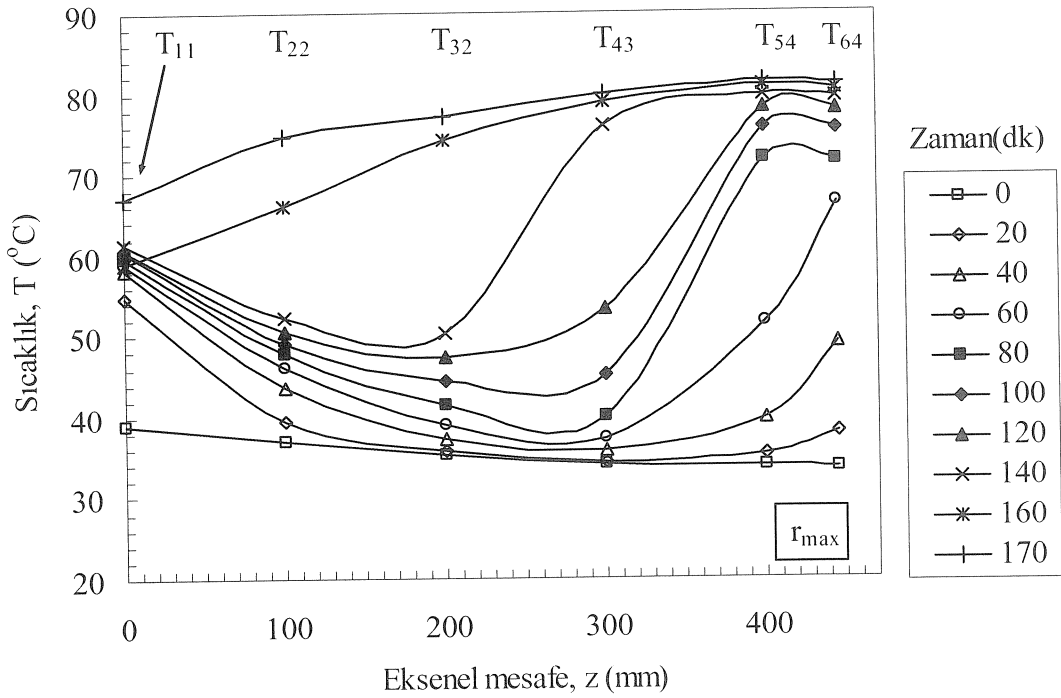


c)

Şekil 3.15. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

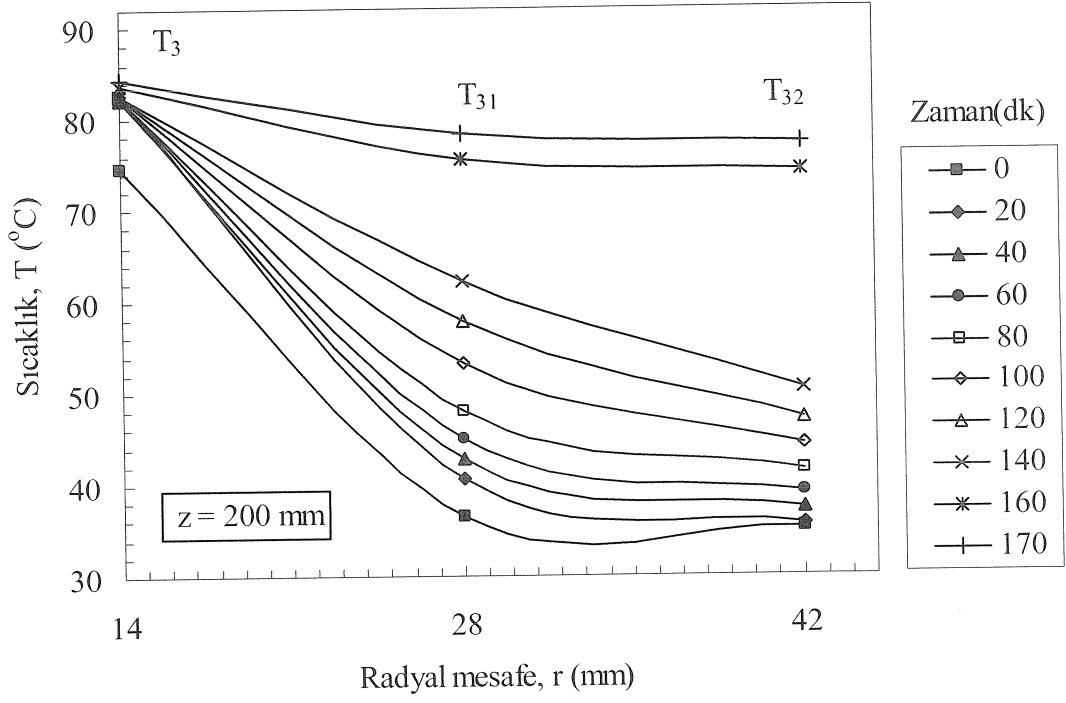


a)

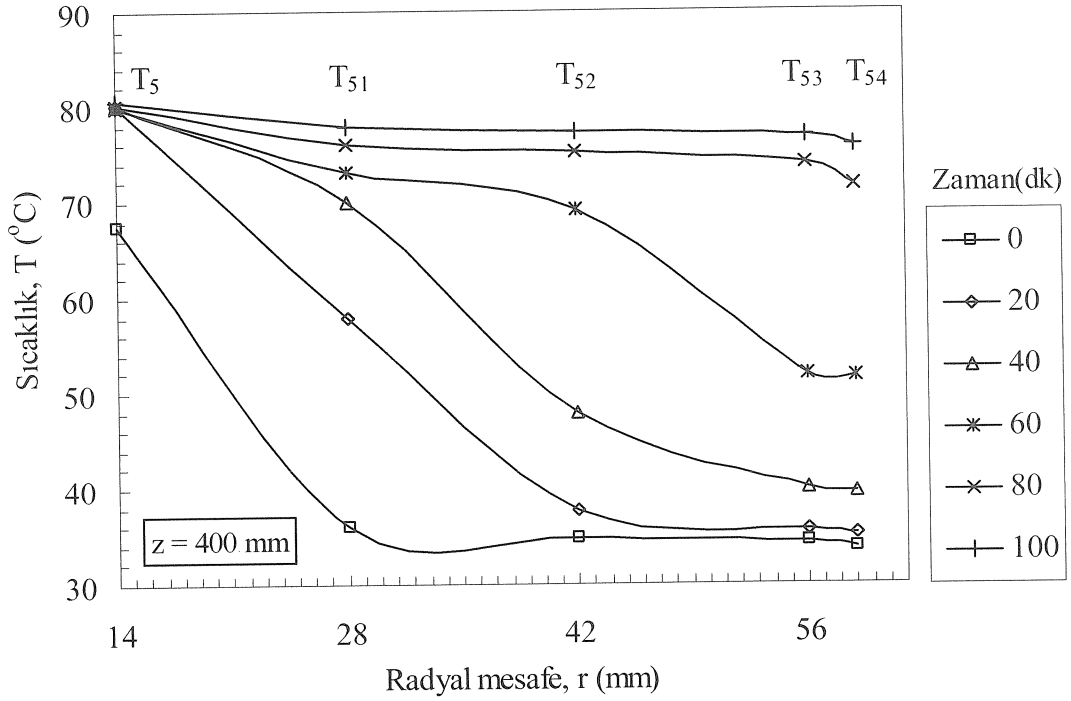


b)

Şekil 3.16. Parafinin (P3) ergirmede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

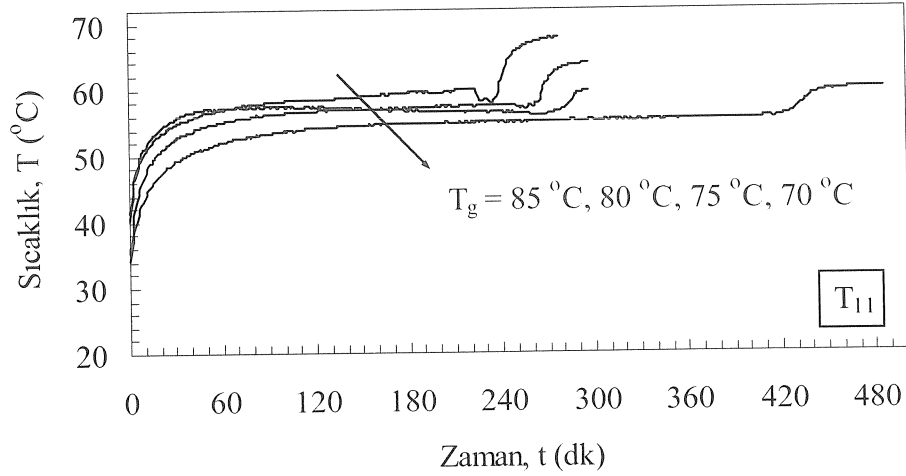


a)

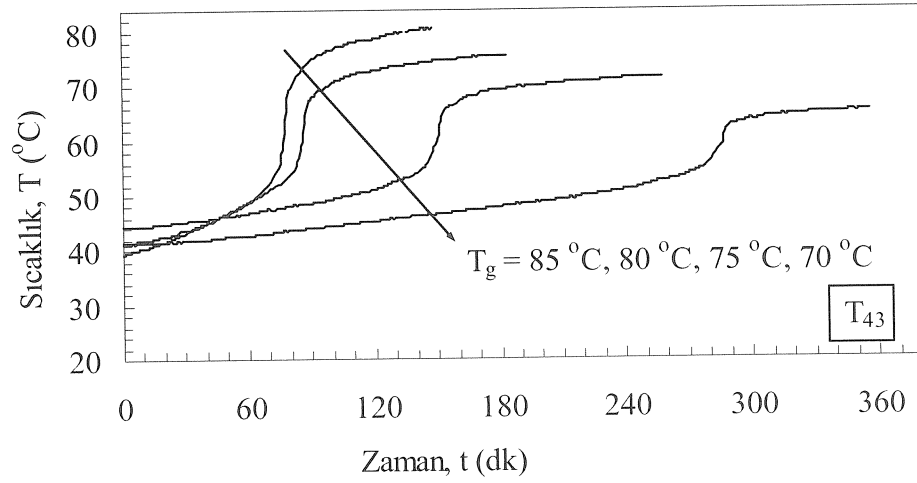


b)

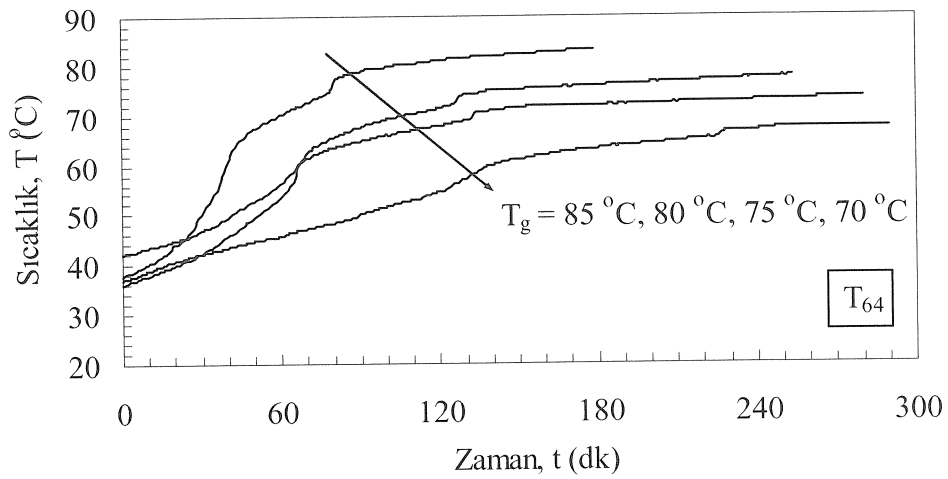
Şekil 3.17. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)



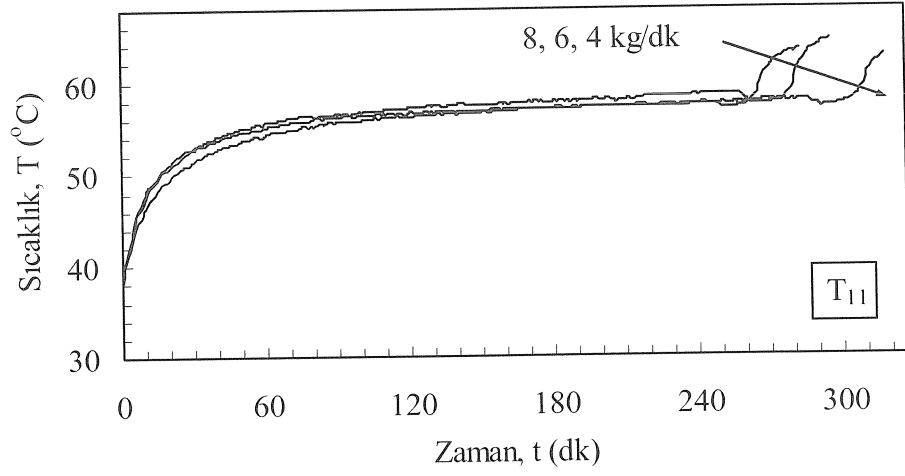
b)



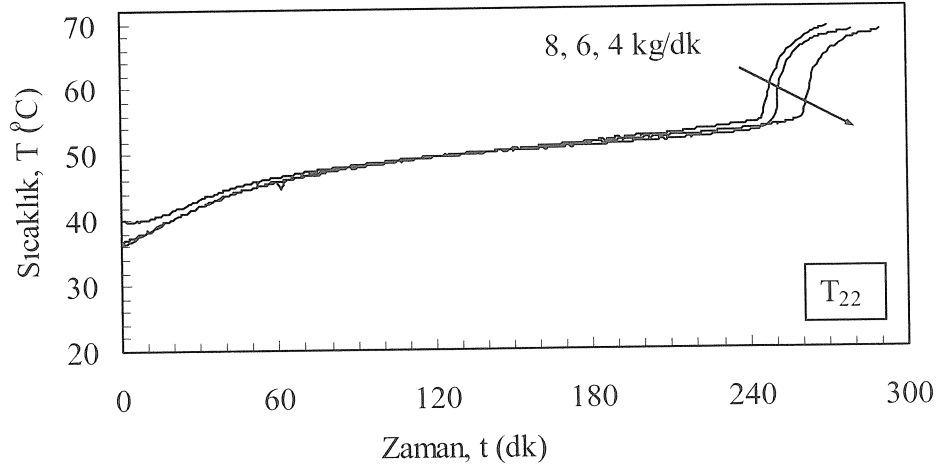
c)

Şekil 3.18. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$,

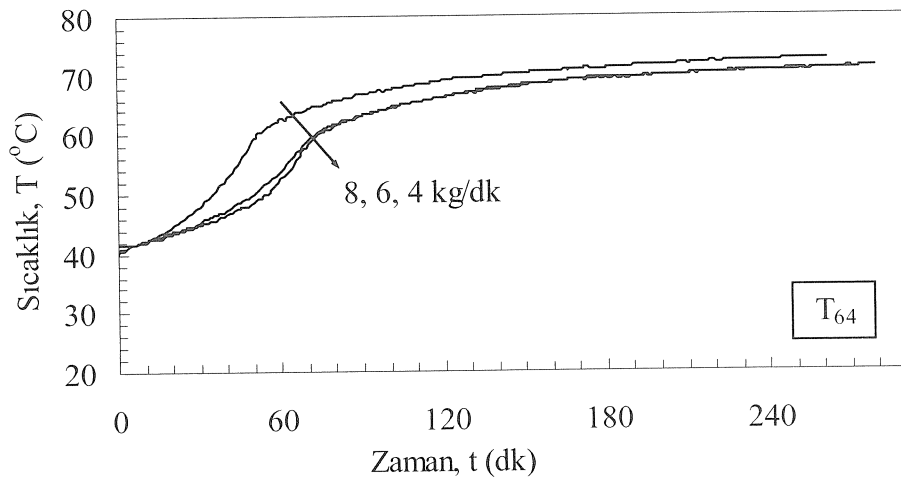
$$m = 4 \text{ kg/dk})$$



a)

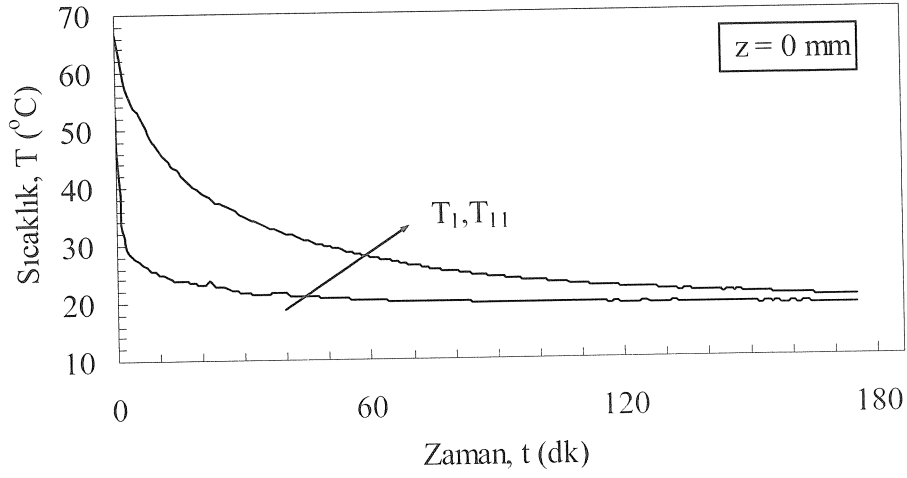


b)

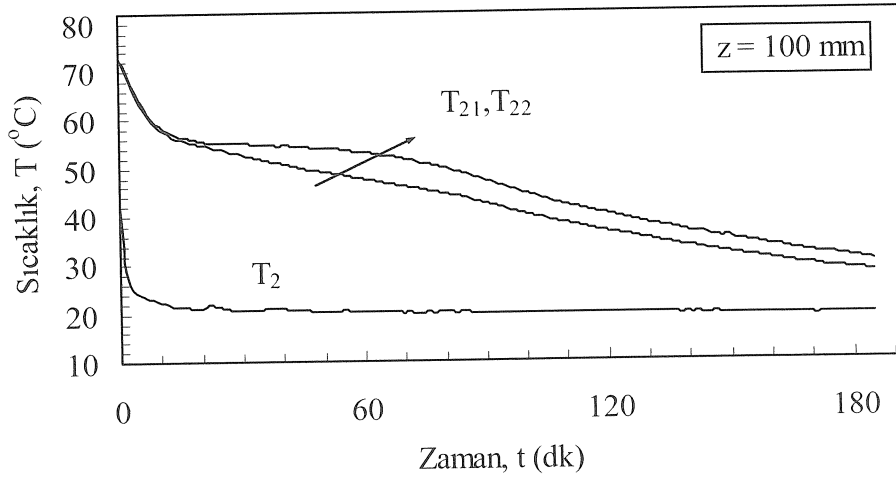


c)

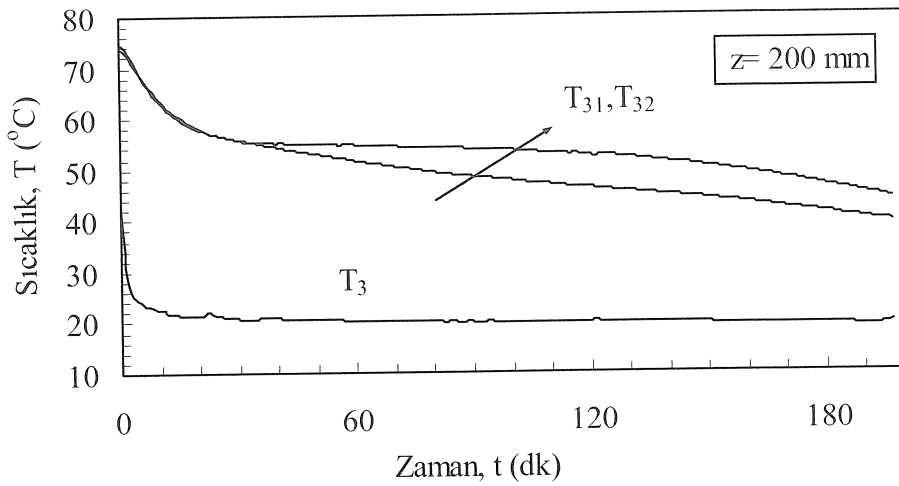
Şekil 3.19. Parafinin (P3) ergirmede belirli noktalarda, suyun kütesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)



a)



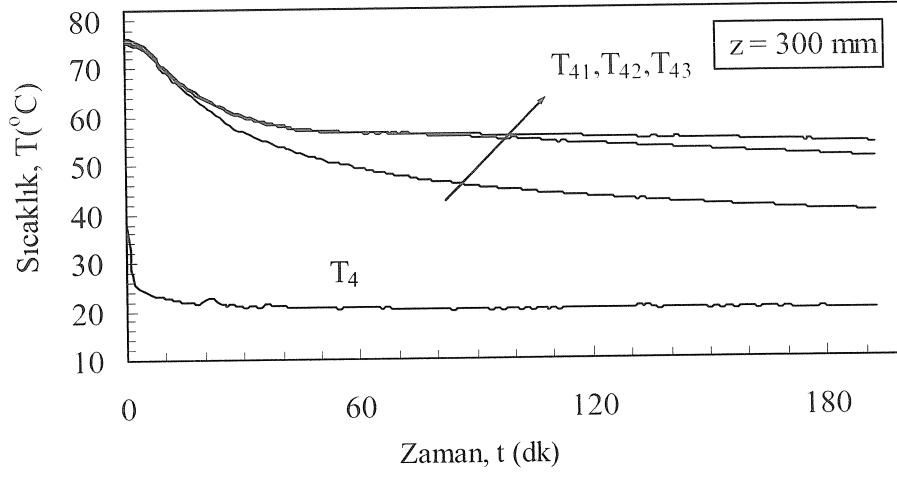
b)



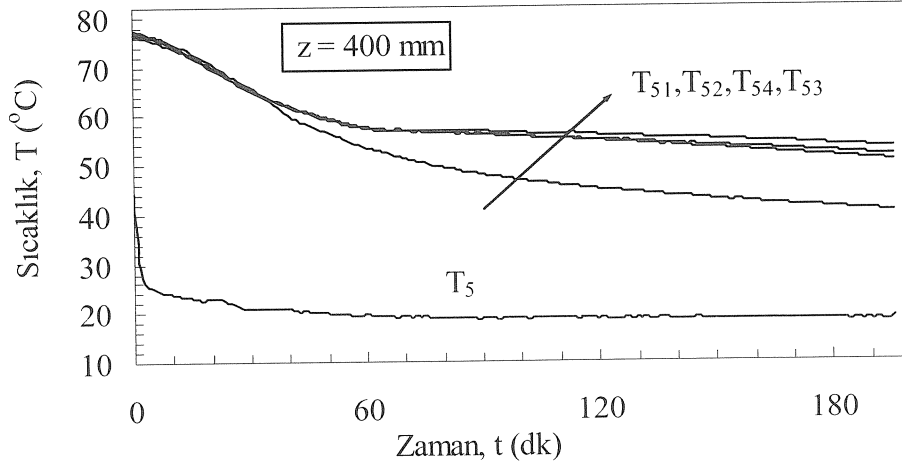
c)

Şekil 3.20. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8$ kg/dk)

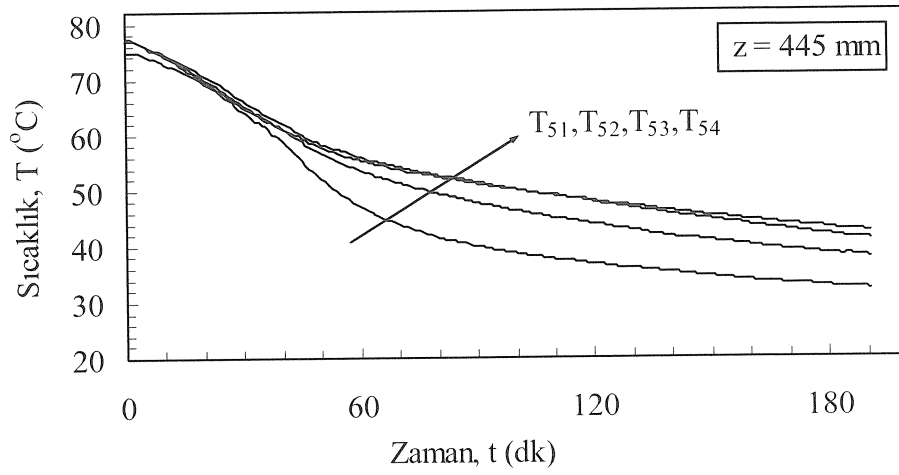
Şekil 3.20.'nin devamı



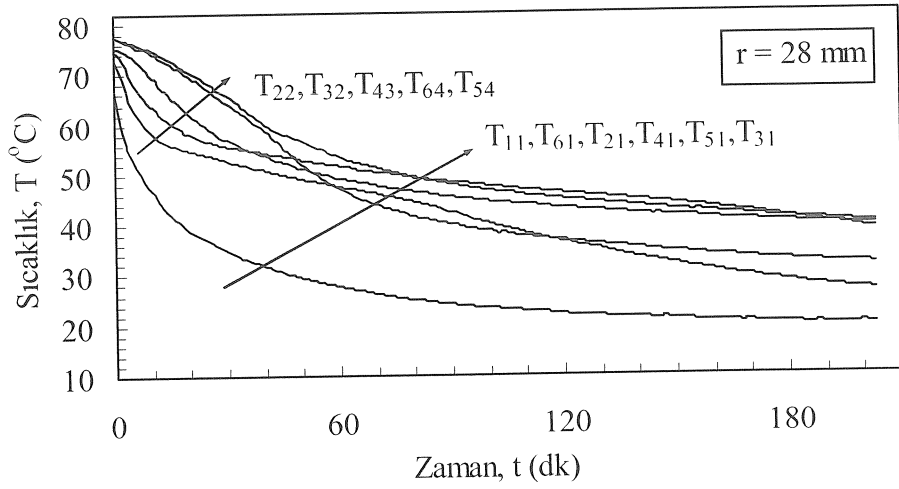
d)



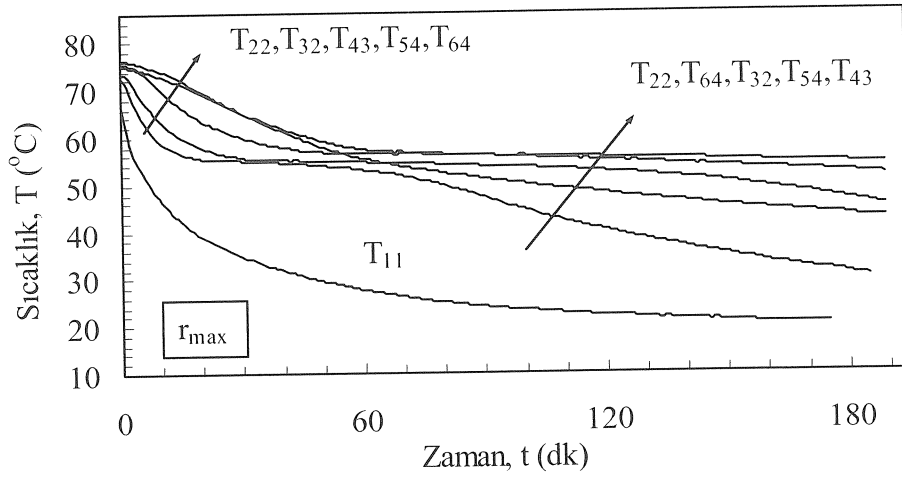
e)



f)

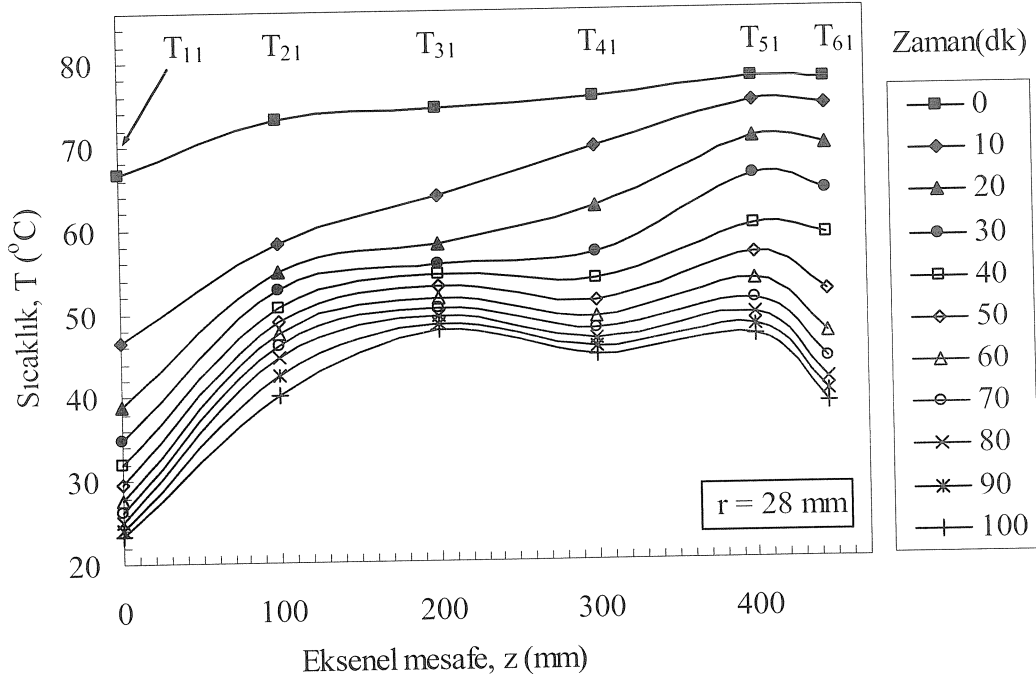


a)

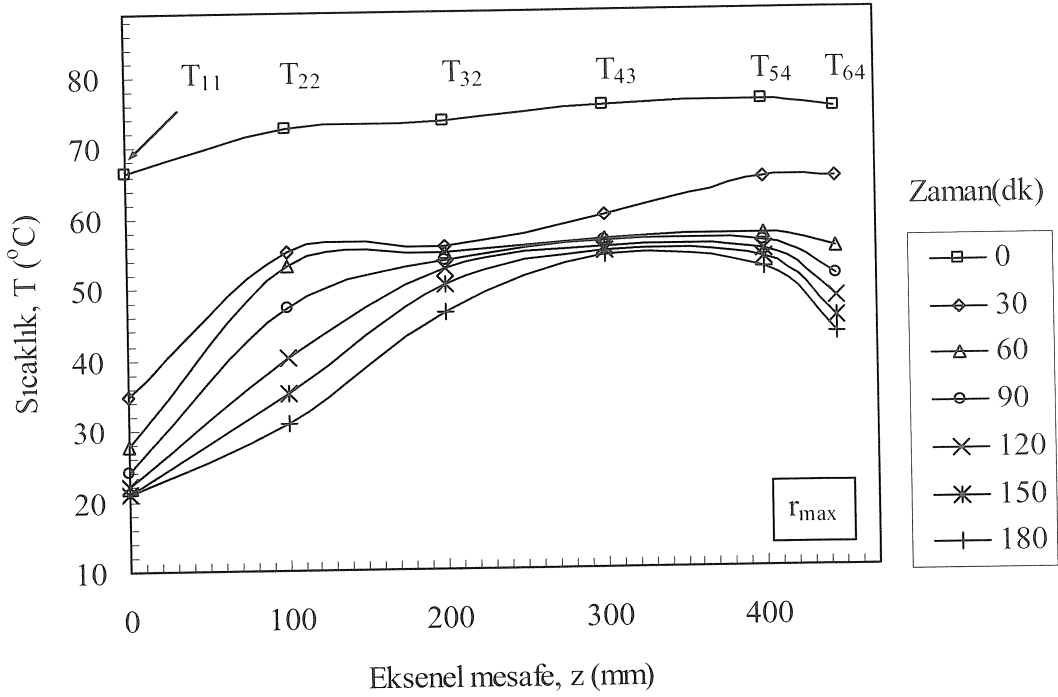


b)

Şekil 3.21. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\epsilon = 5^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



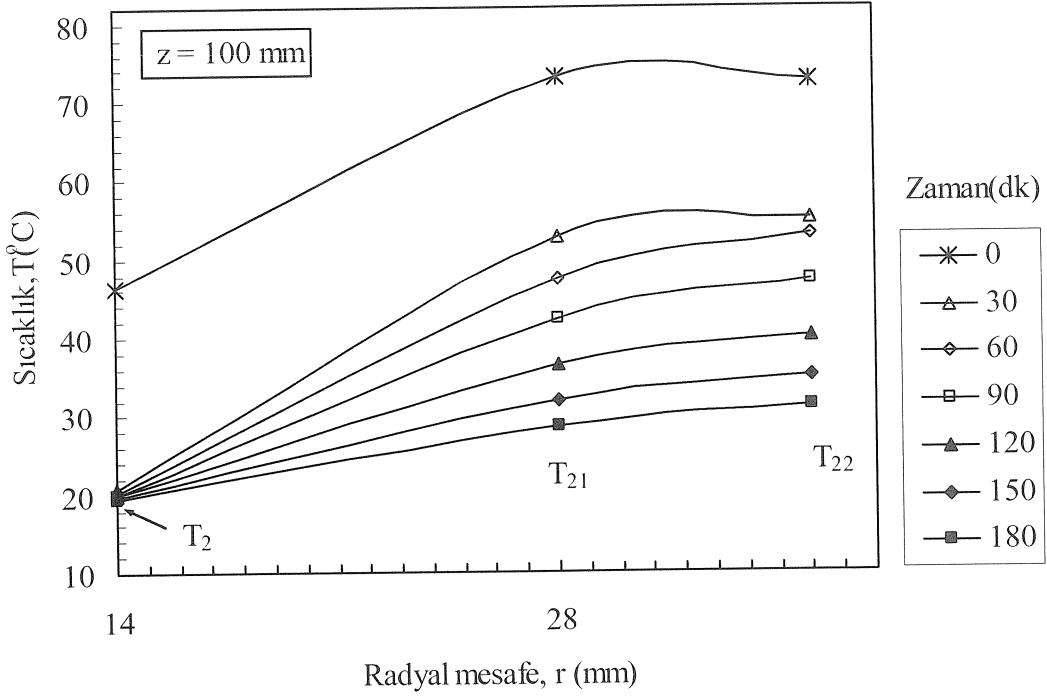
a)



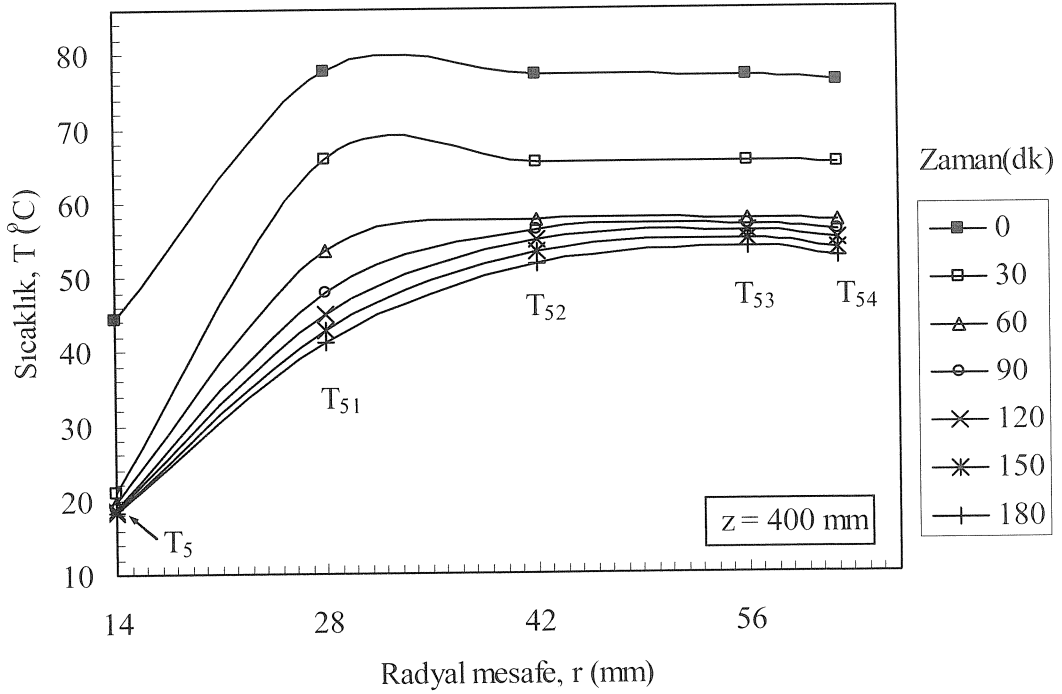
b)

Şekil 3.22. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- aksenal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$,

$$m = 8 \text{ kg/dk})$$

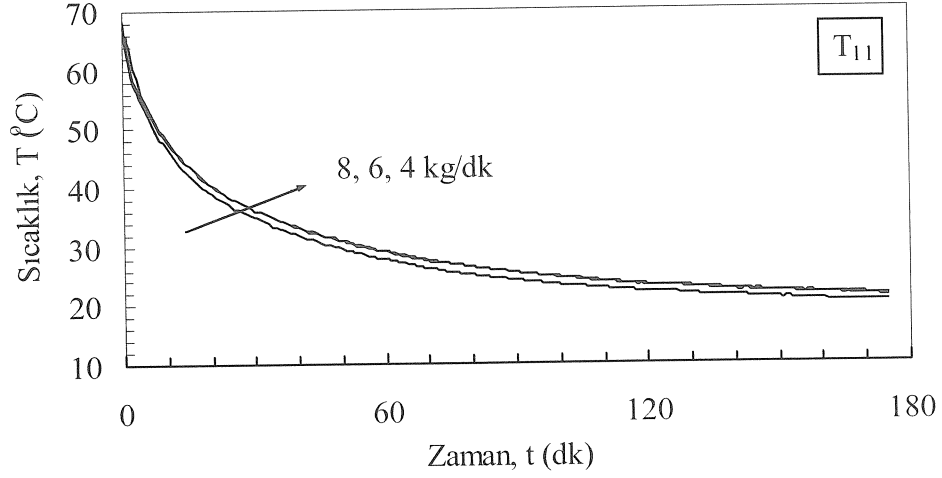


a)

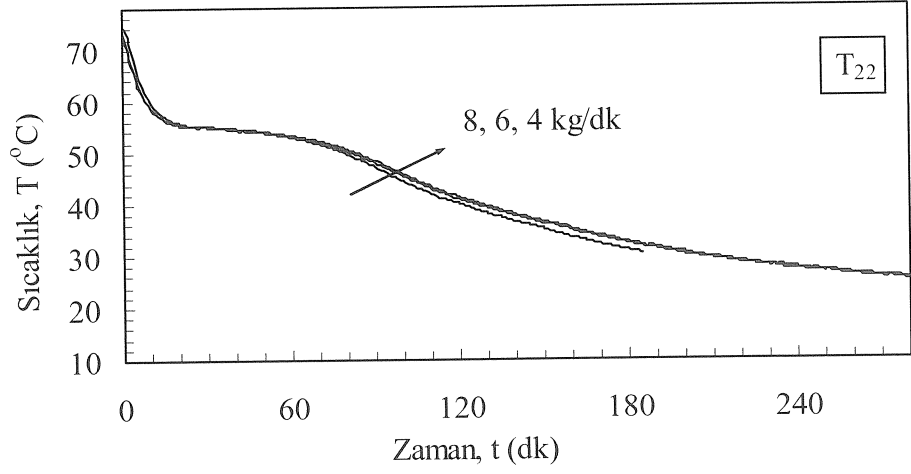


b)

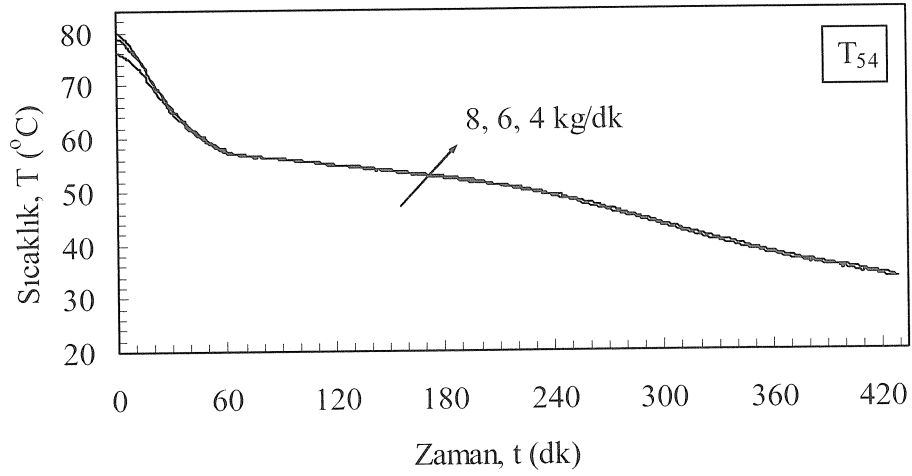
Şekil 3.23. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

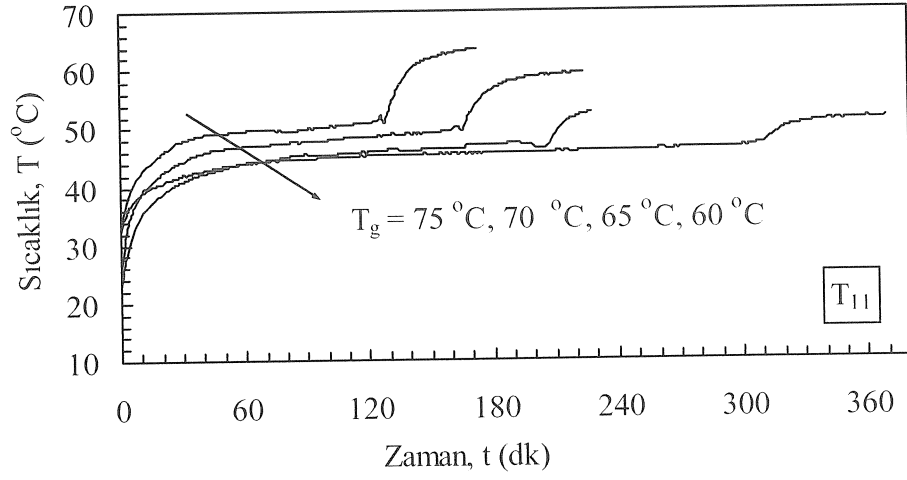


b)

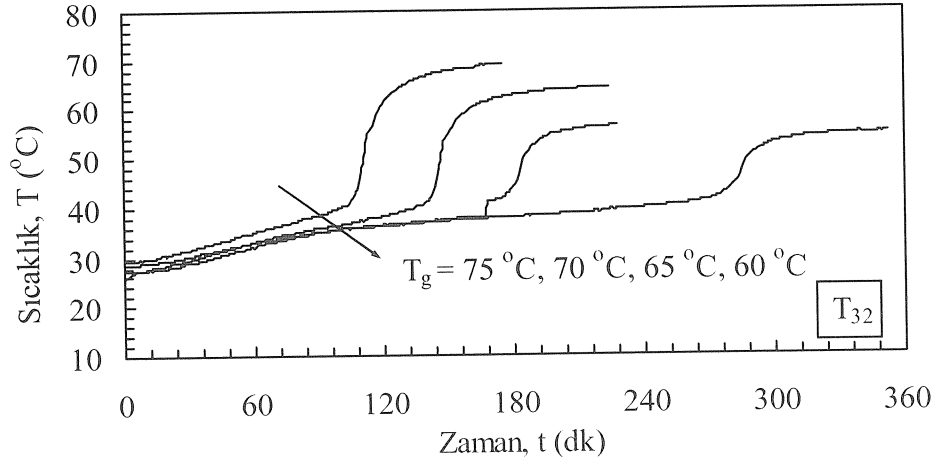


c)

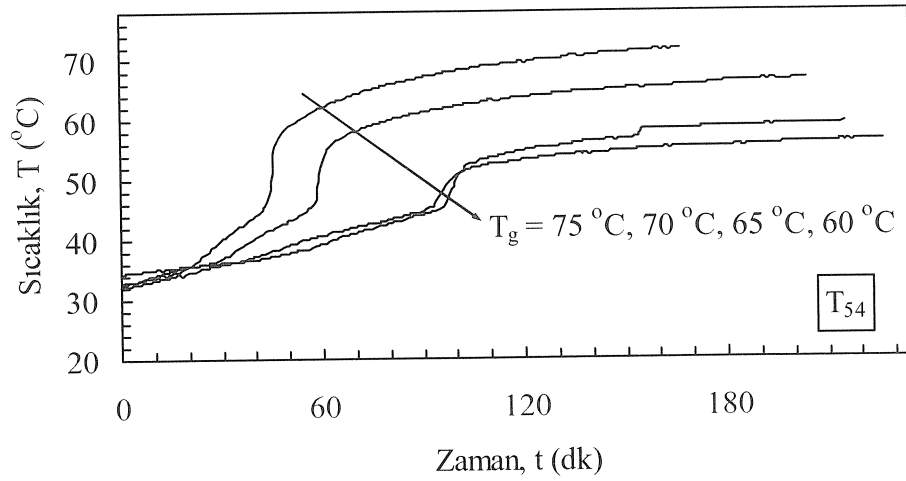
Şekil 3.24. Parafinin (P3) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütsel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\epsilon = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)

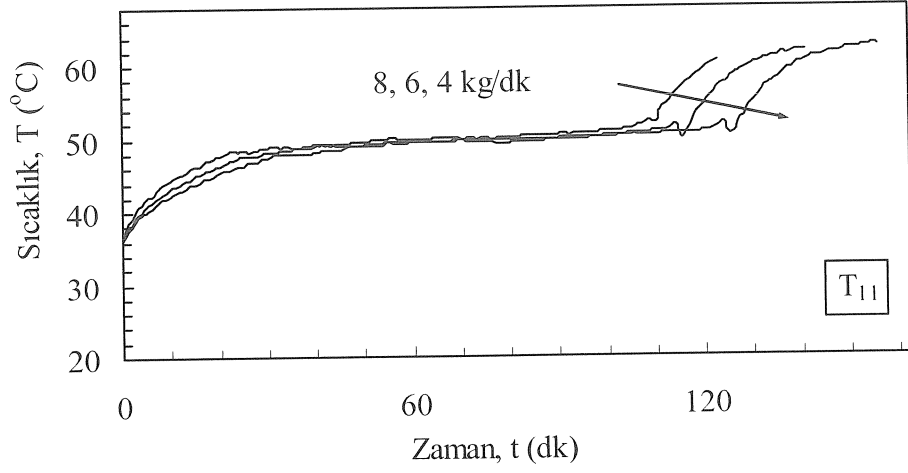


b)

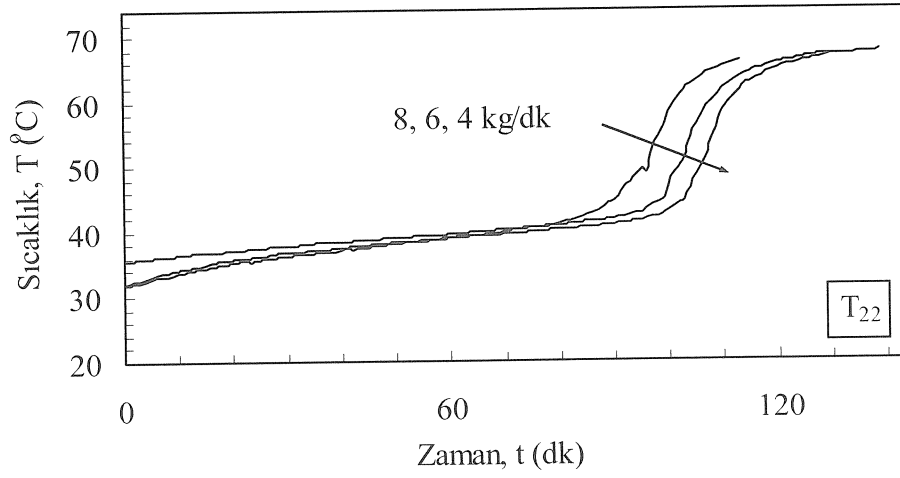


c)

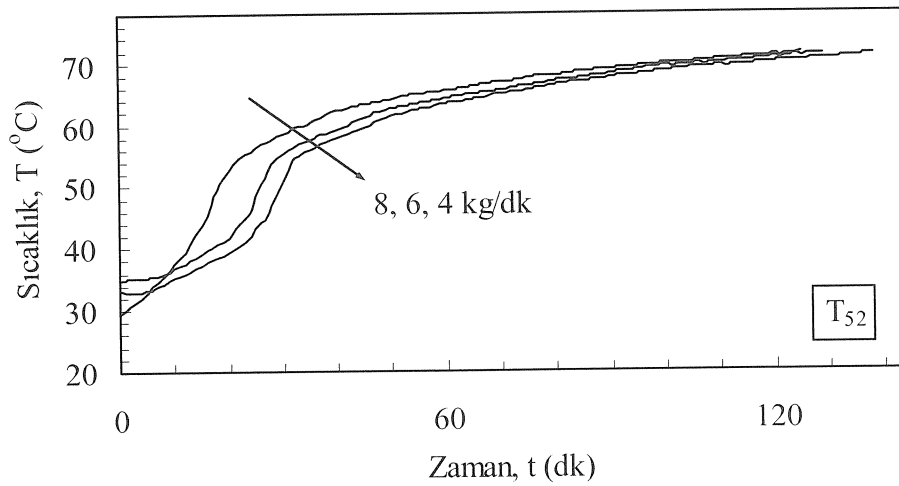
Şekil 3.25. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $\dot{m} = 4 \text{ kg/dk}$)



a)

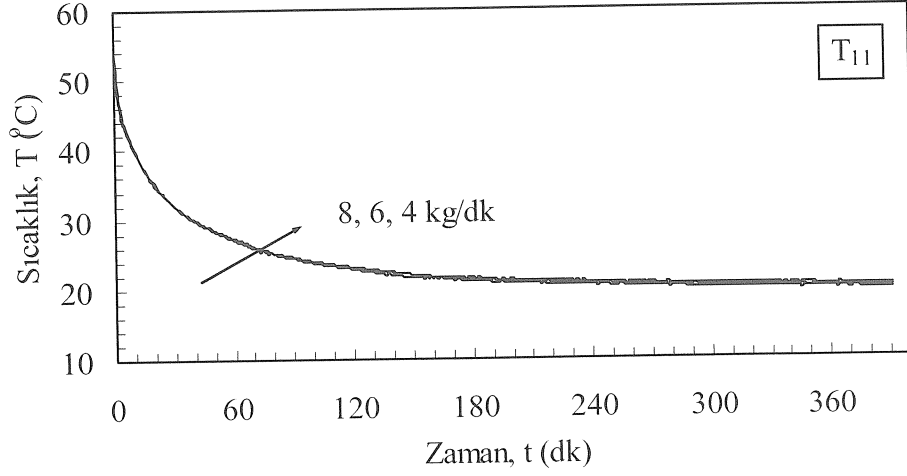


b)

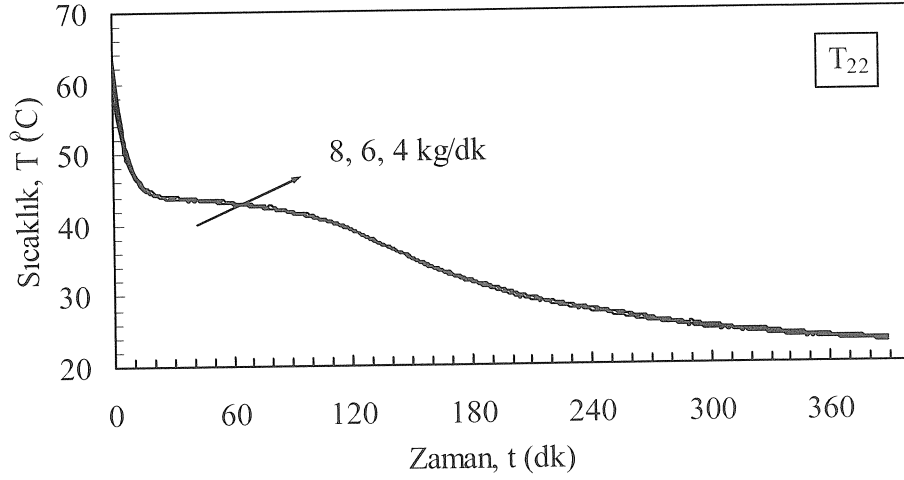


c)

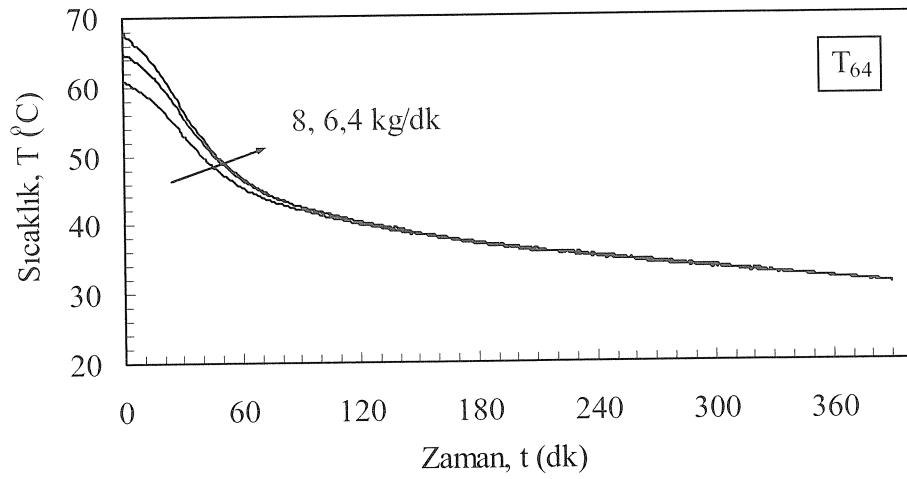
Şekil 3.26. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun kütesel debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\Theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)



a)

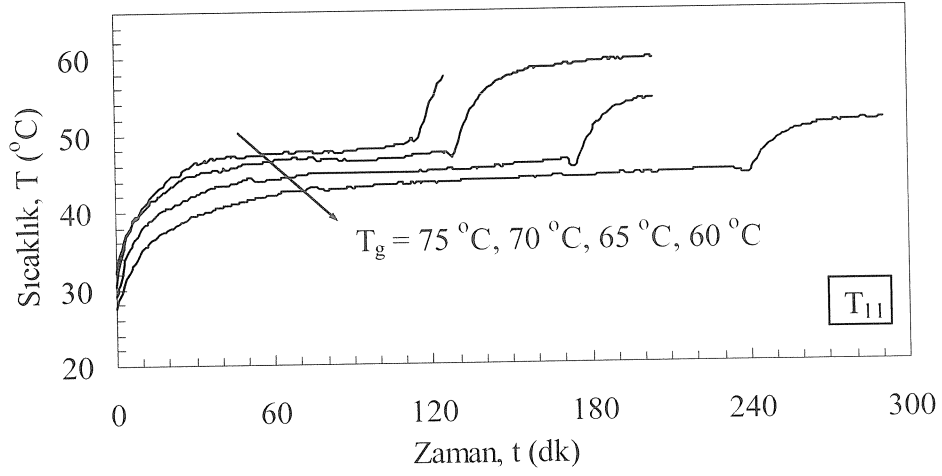


b)

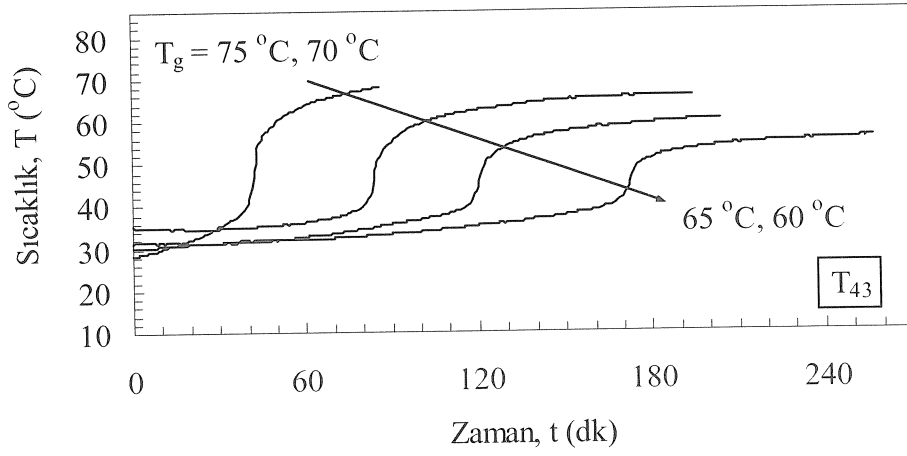


c)

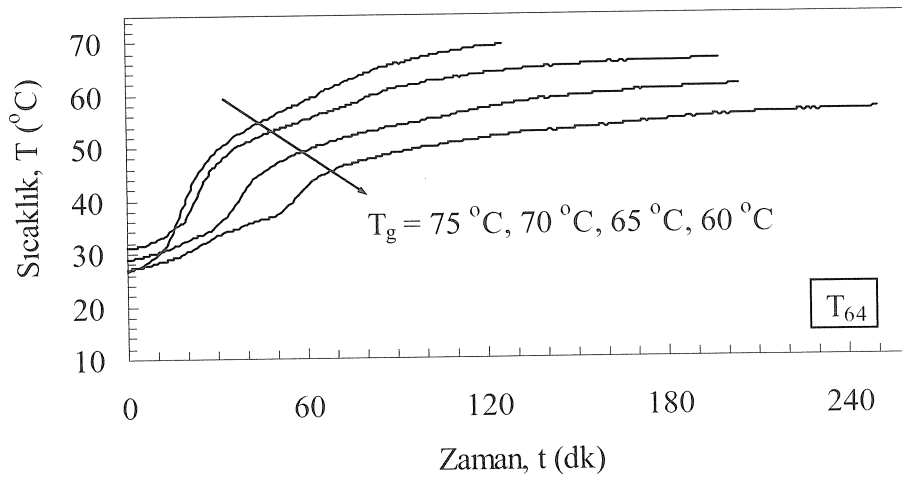
Şekil 3.27. Parafinin (P2) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)



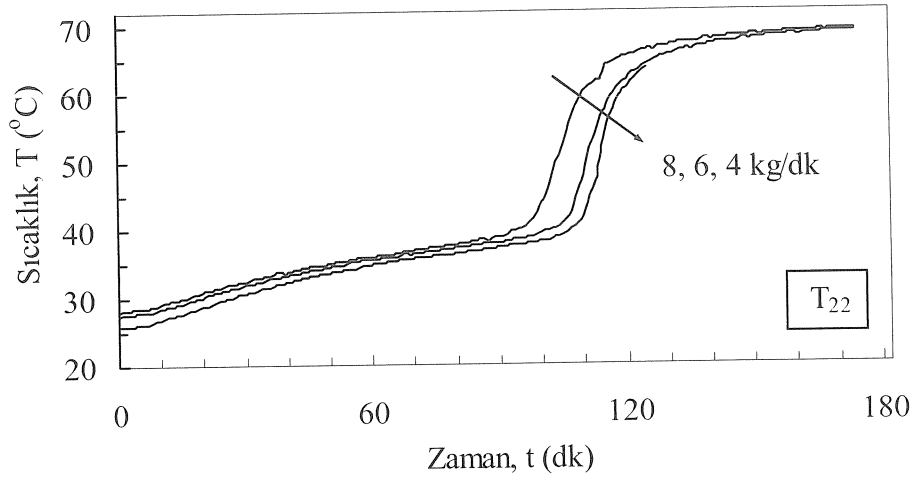
b)



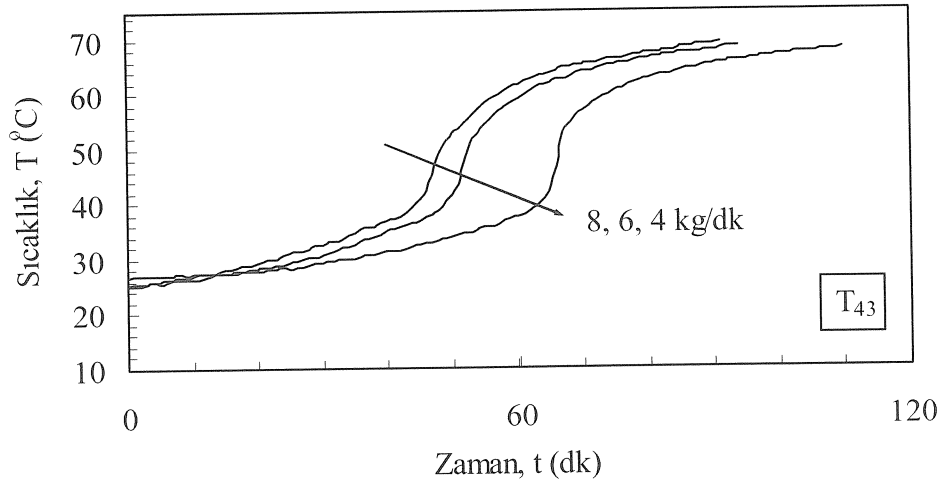
c)

Şekil 3.28. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$,

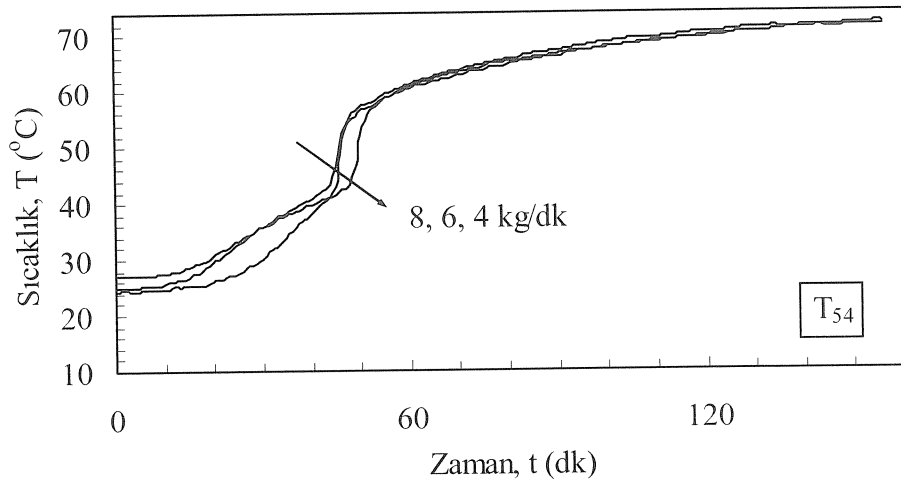
$m = 4 \text{ kg/dk}$)



a)

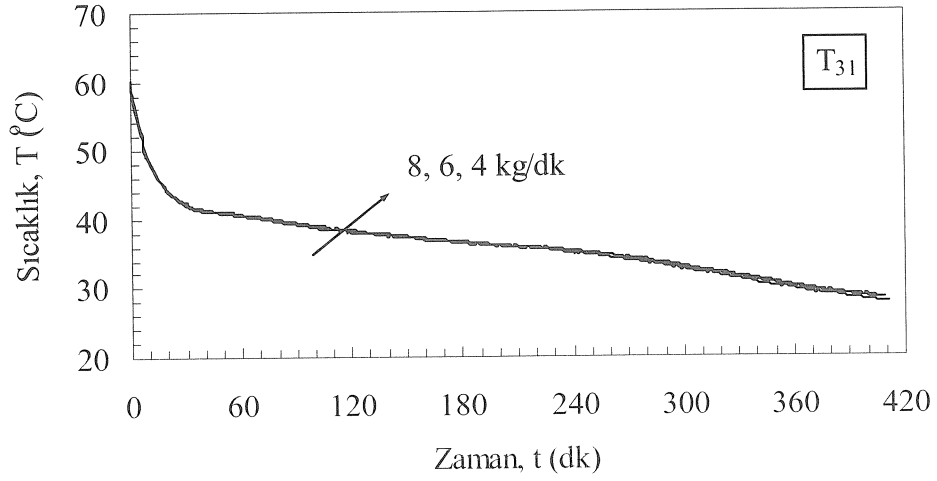


b)

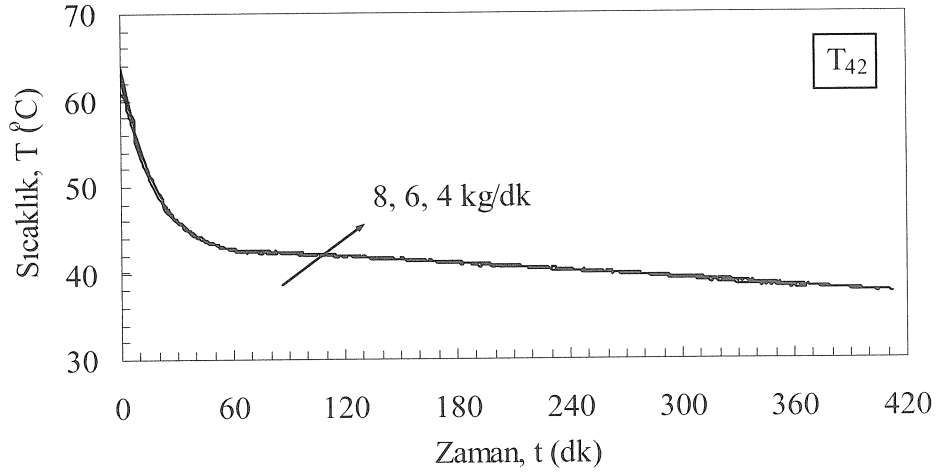


c)

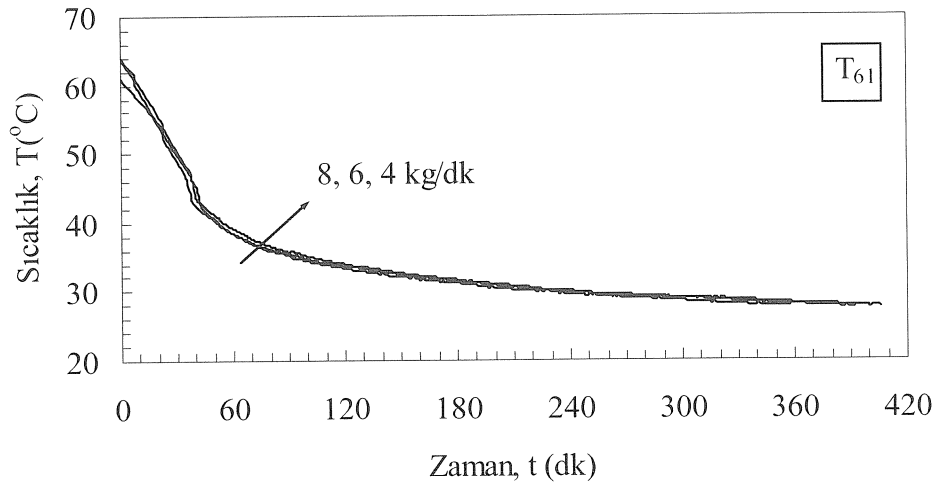
Şekil 3.29. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\delta = 5^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$)



a)

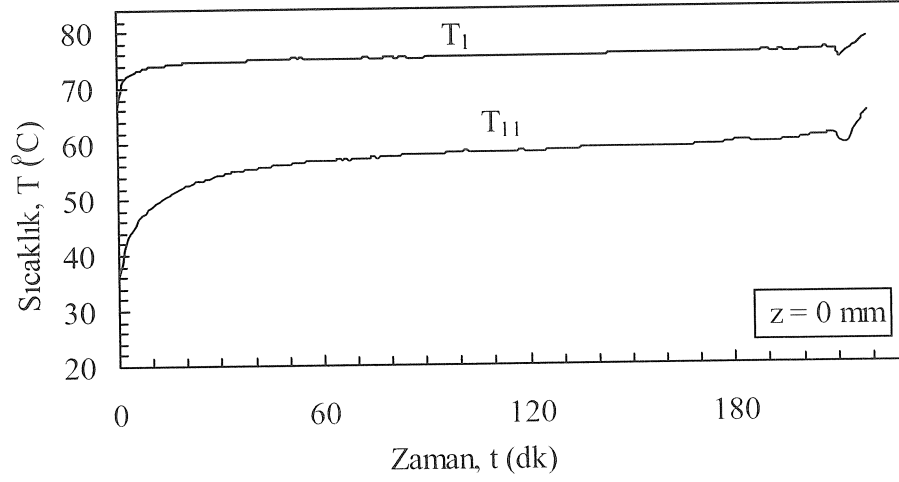


b)

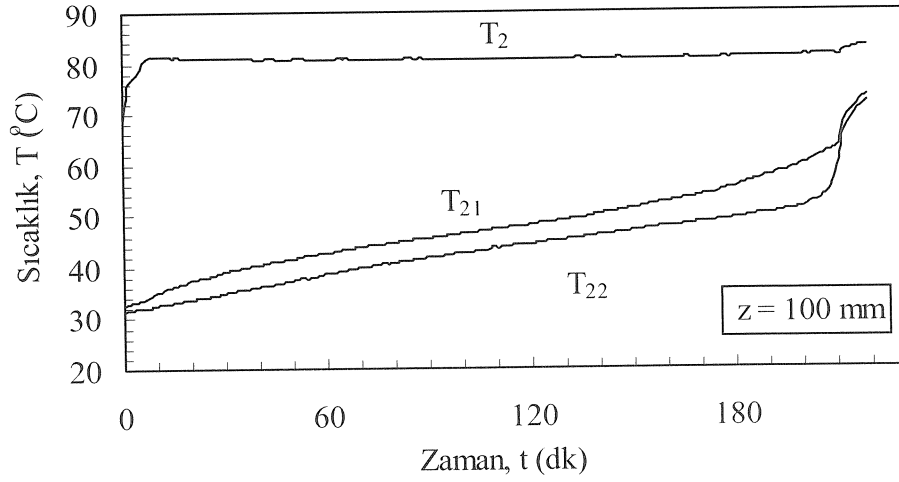


c)

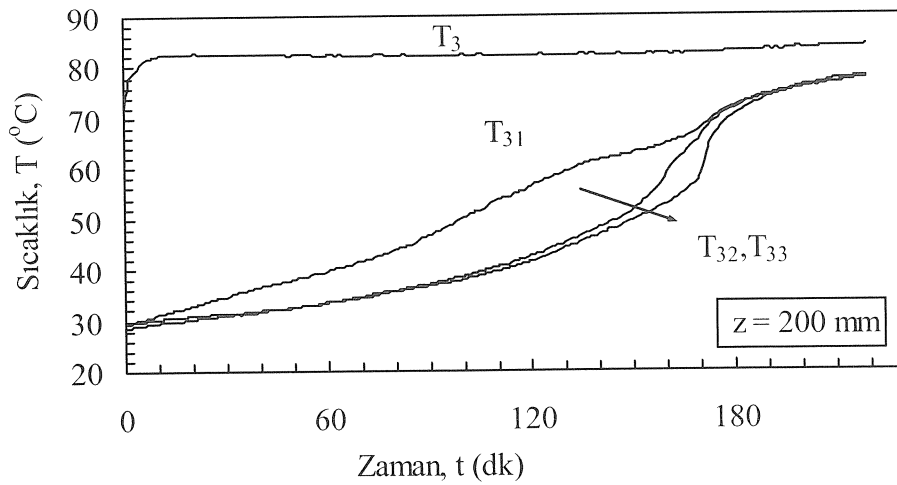
Şekil 3.30. Parafinin (P1) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı olarak sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)



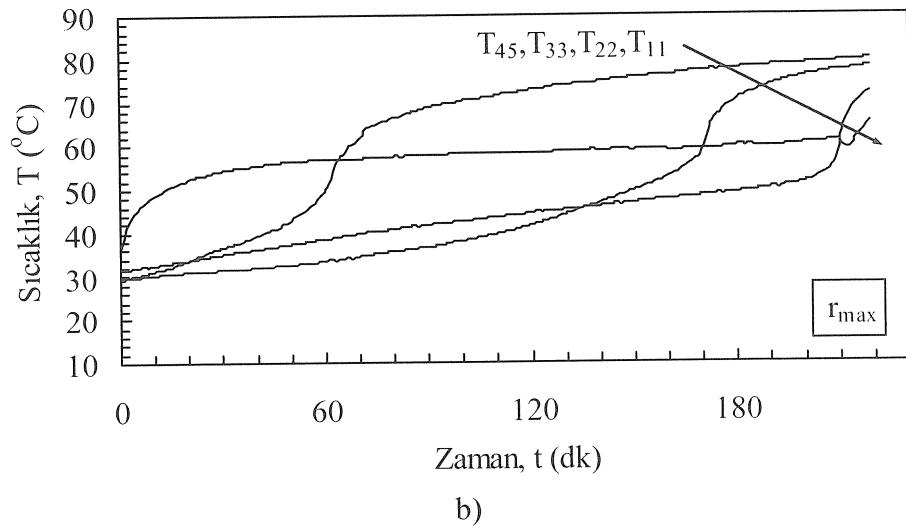
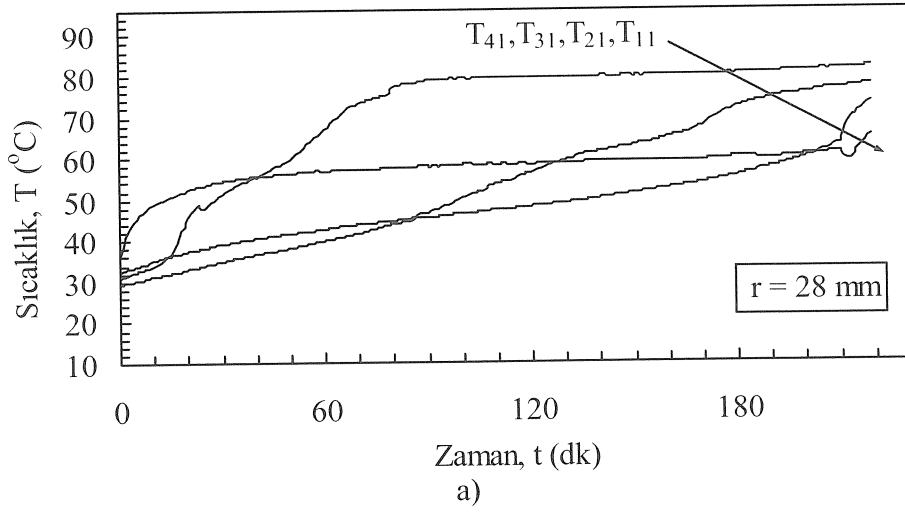
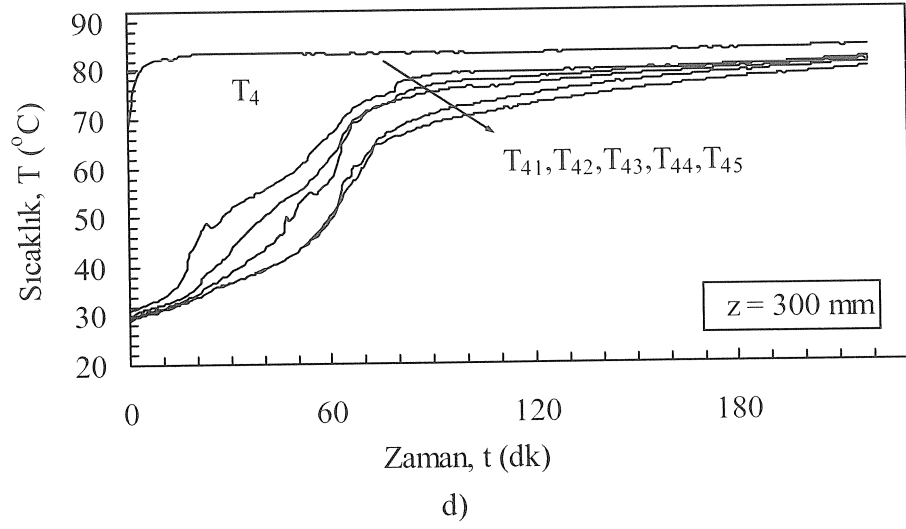
b)



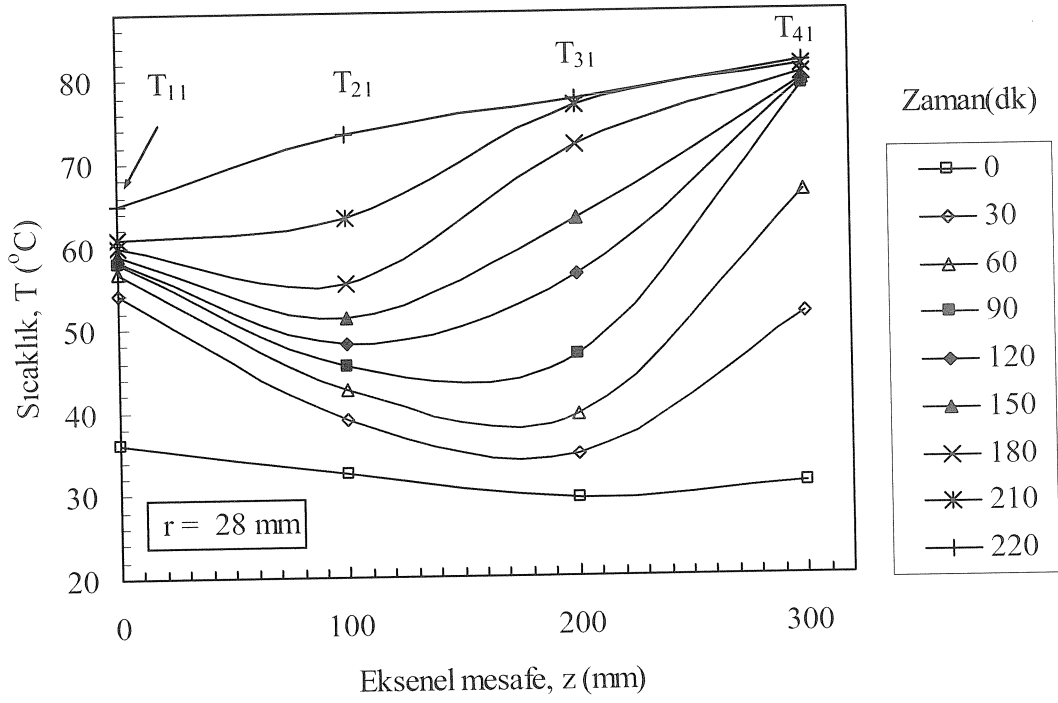
c)

Şekil 3.31. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8\text{kg/dk}$)

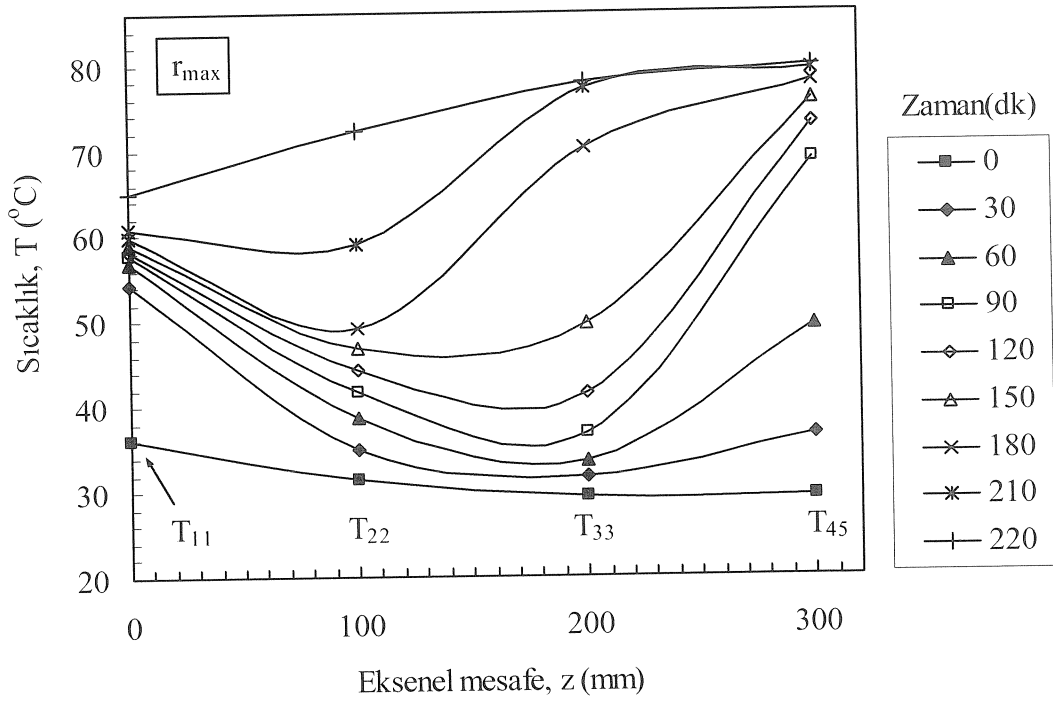
Şekil 3.31.'in devamı



Şekil 3.32. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)

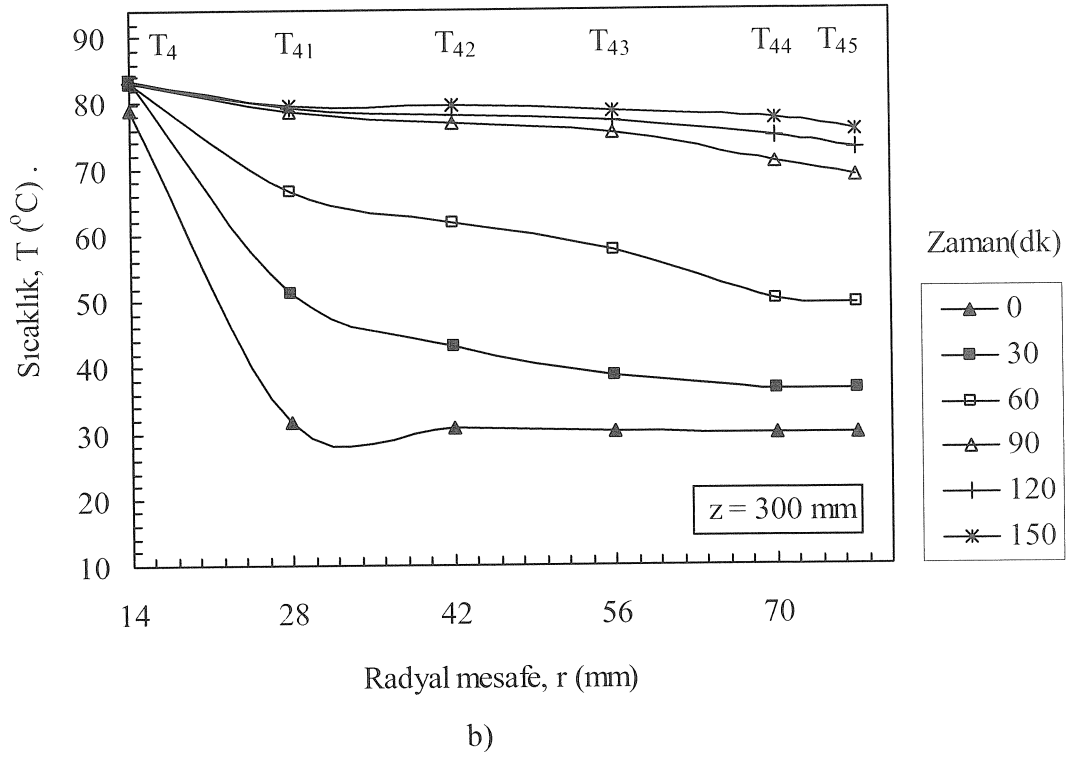
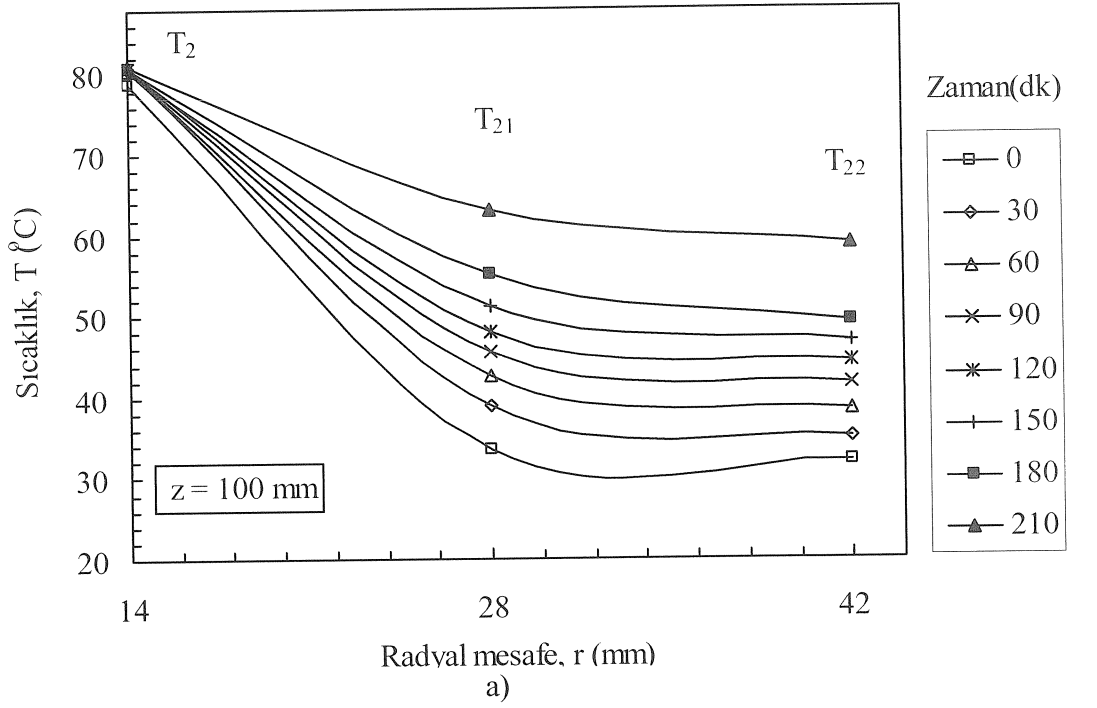


a)

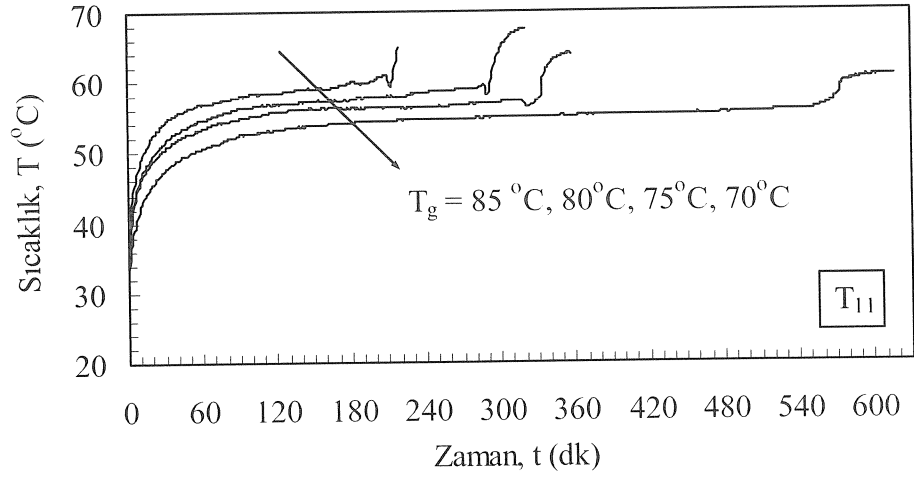


b)

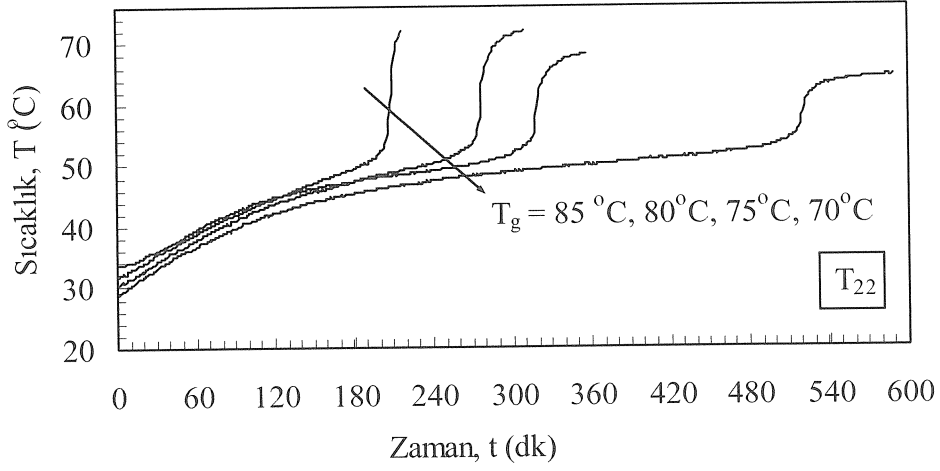
Şekil 3.33. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 10^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



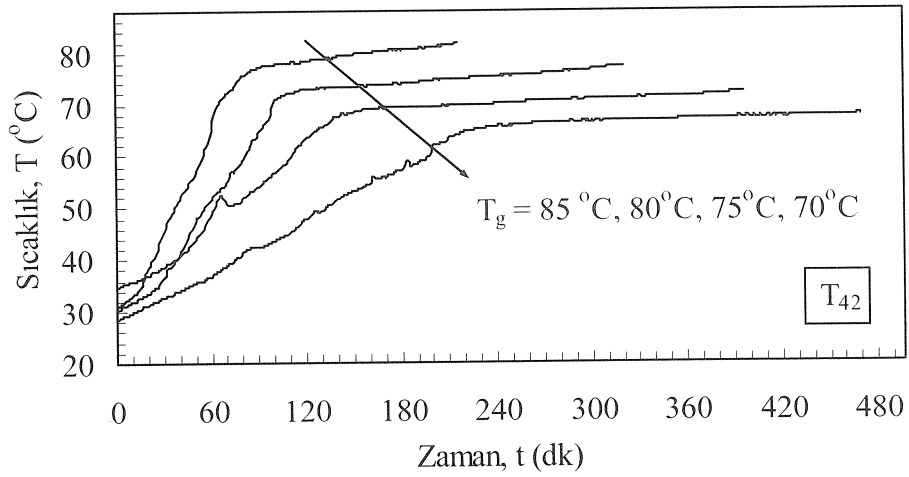
Şekil 3.34. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

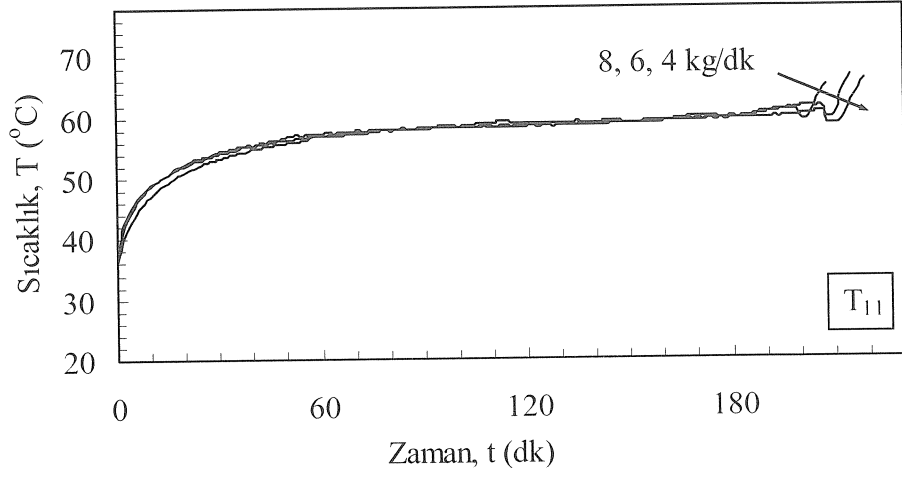


b)

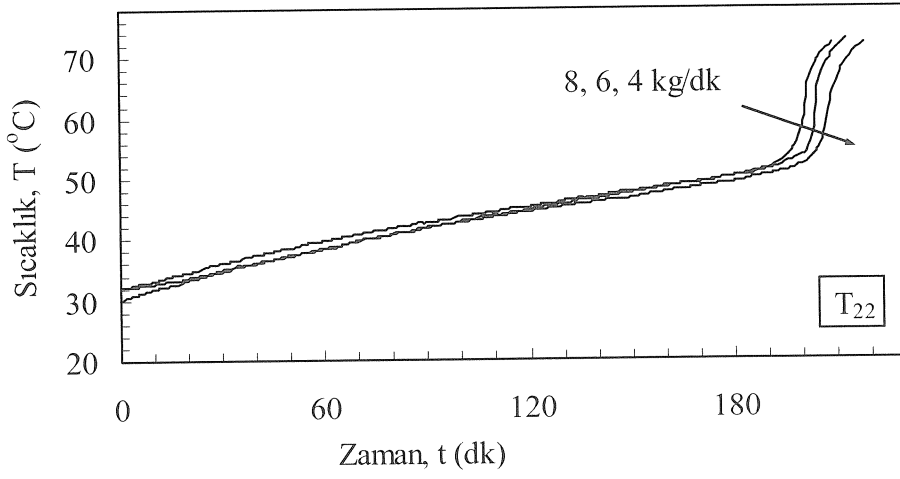


c)

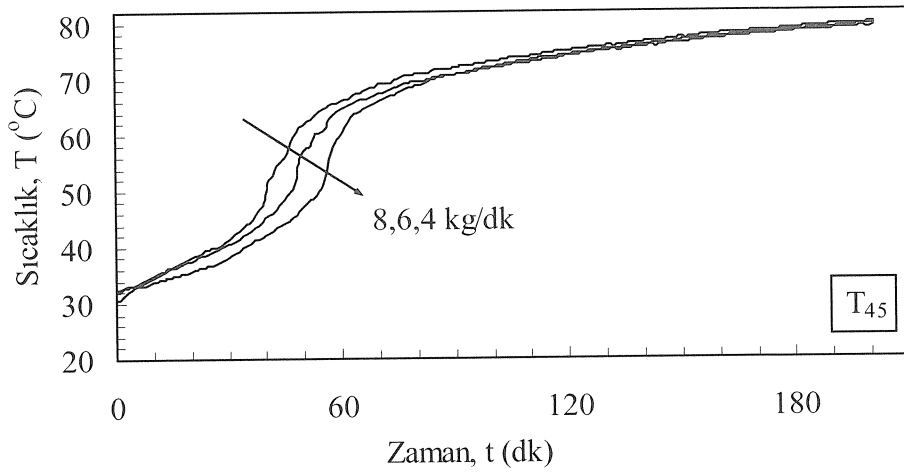
Şekil 3.35. Parafinin (P3) ergirmede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 10^{\circ}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

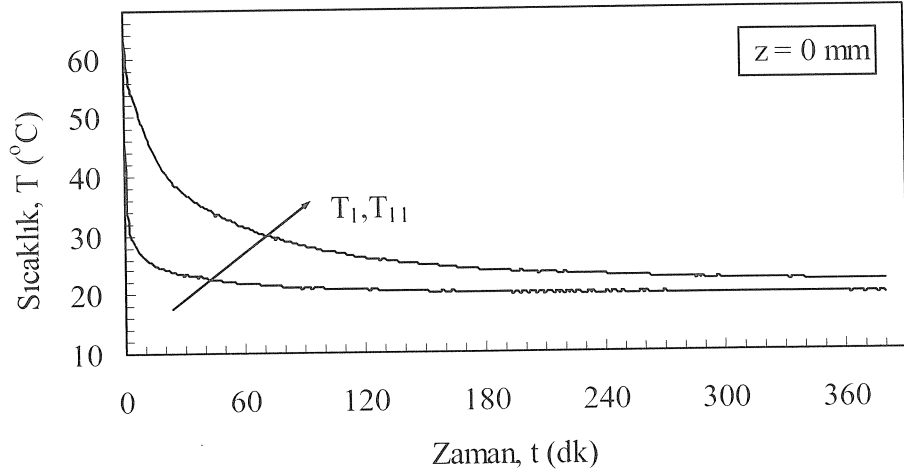


b)

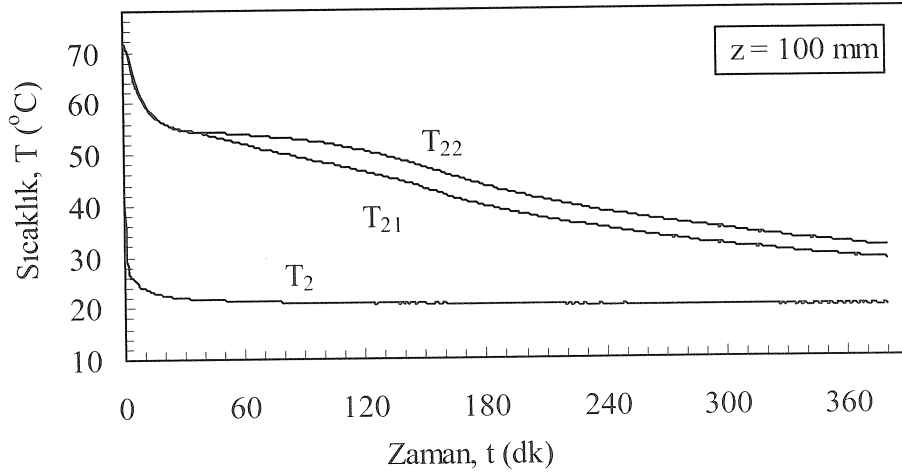


c)

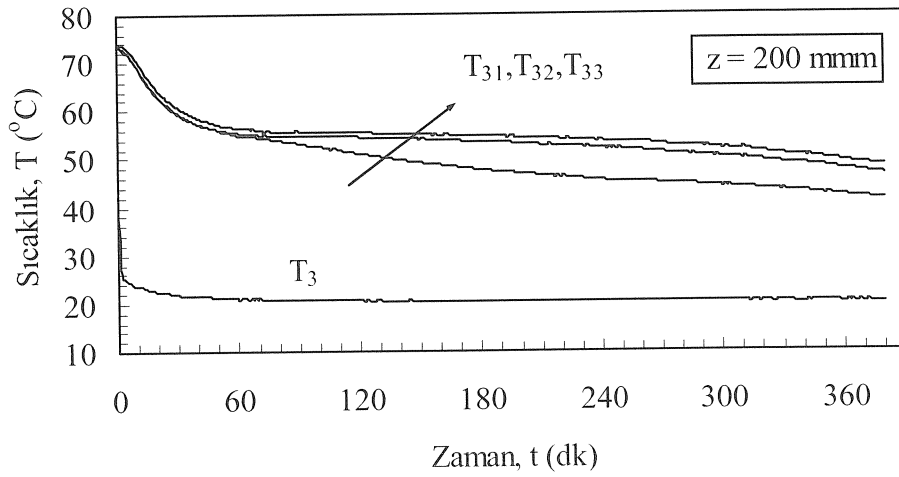
Şekil 3.36. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$)



a)



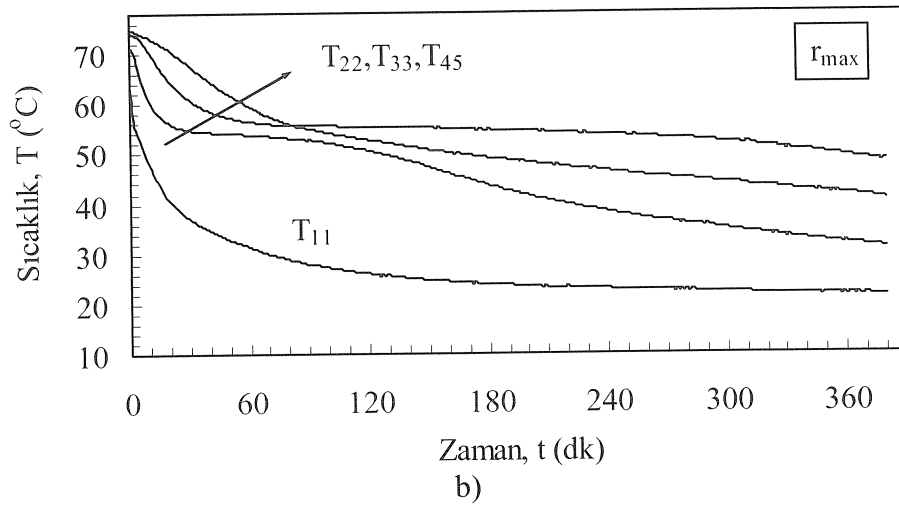
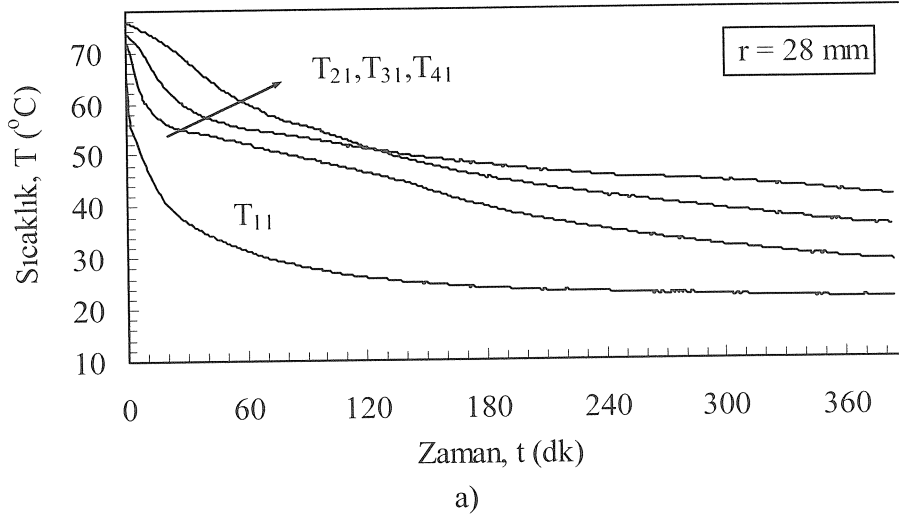
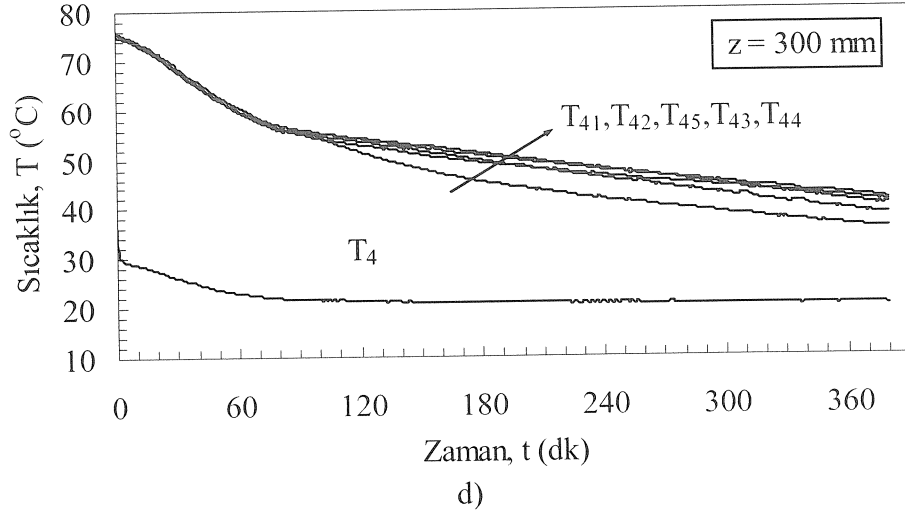
b)



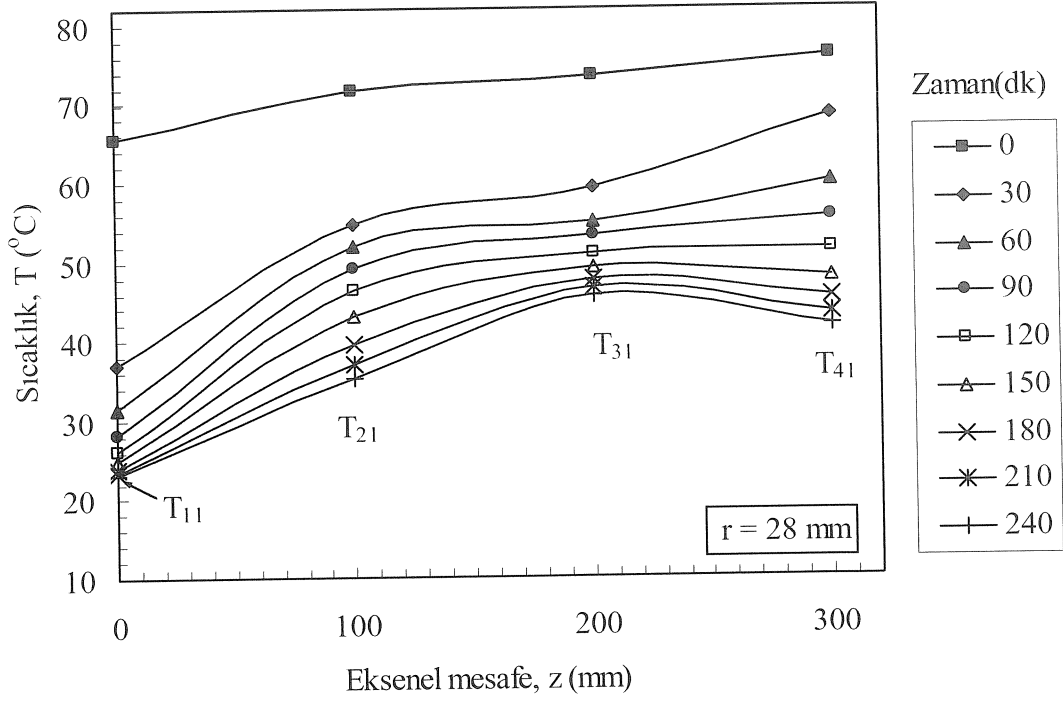
c)

Şekil 3.37. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

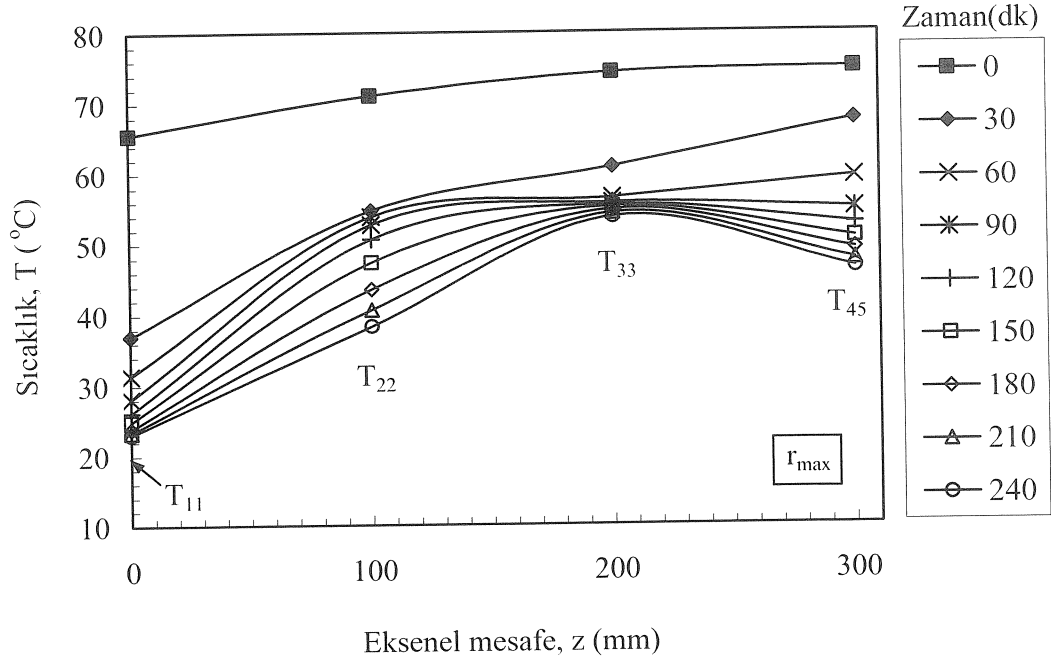
Şekil 3.37.'nin devamı



Şekil 3.38. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)

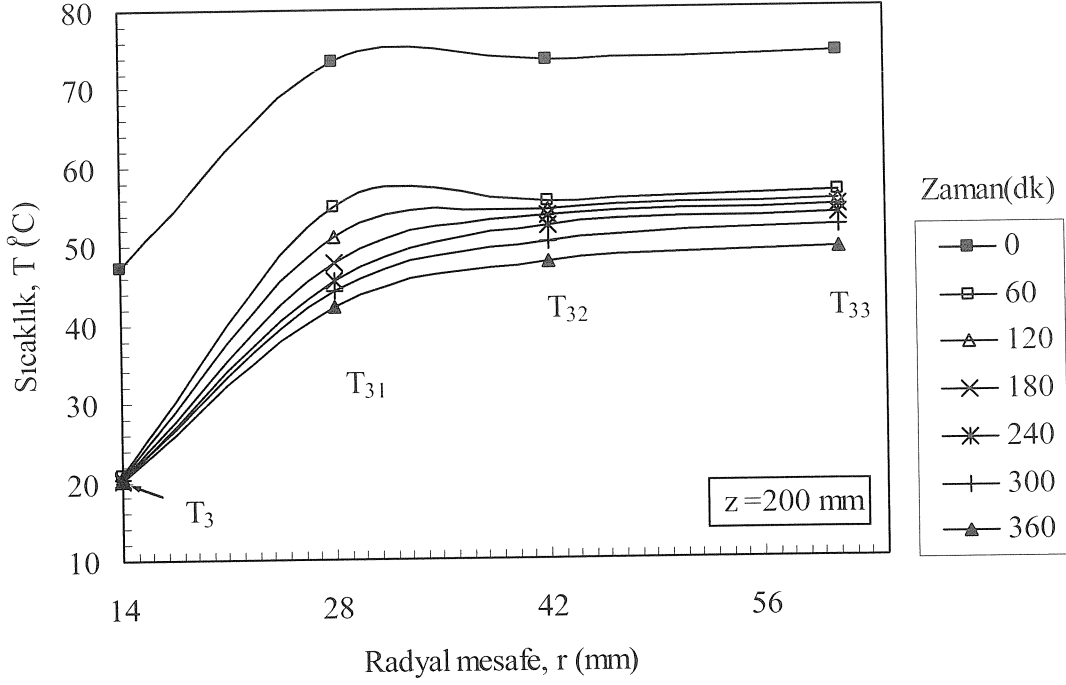


a)

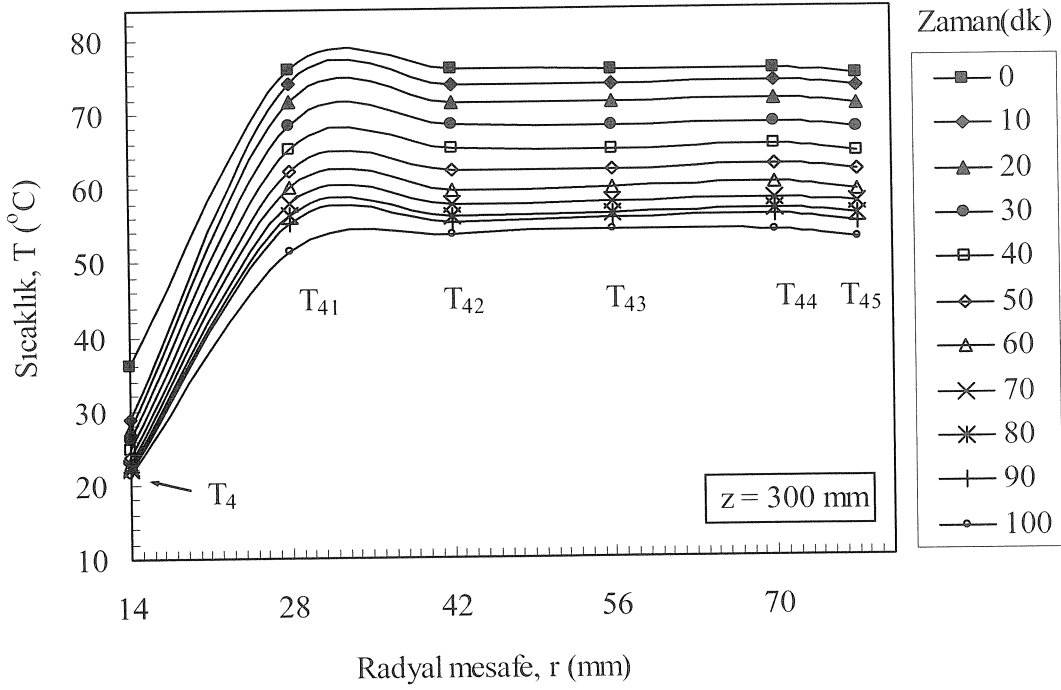


b)

Şekil 3.39. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20$ °C, $m = 8$ kg/dk)

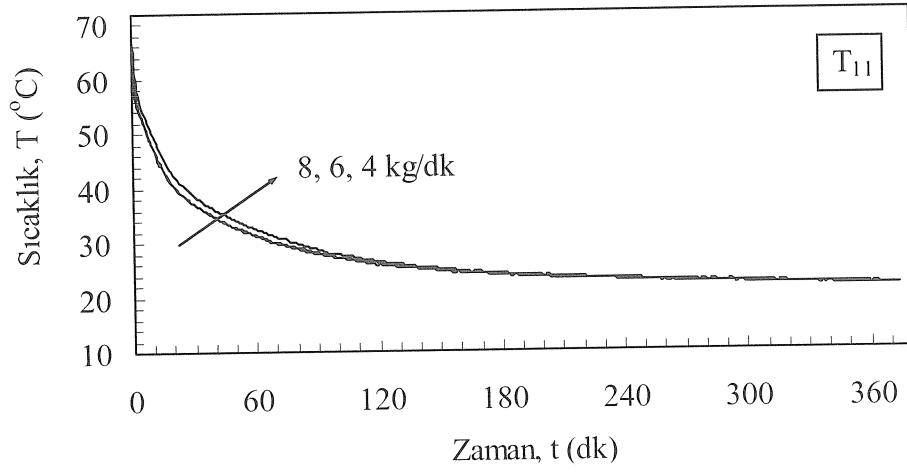


a)

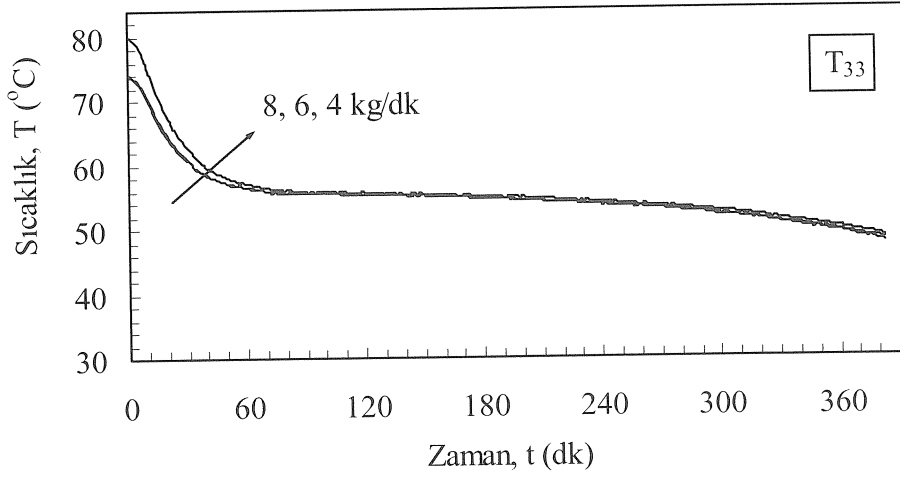


b)

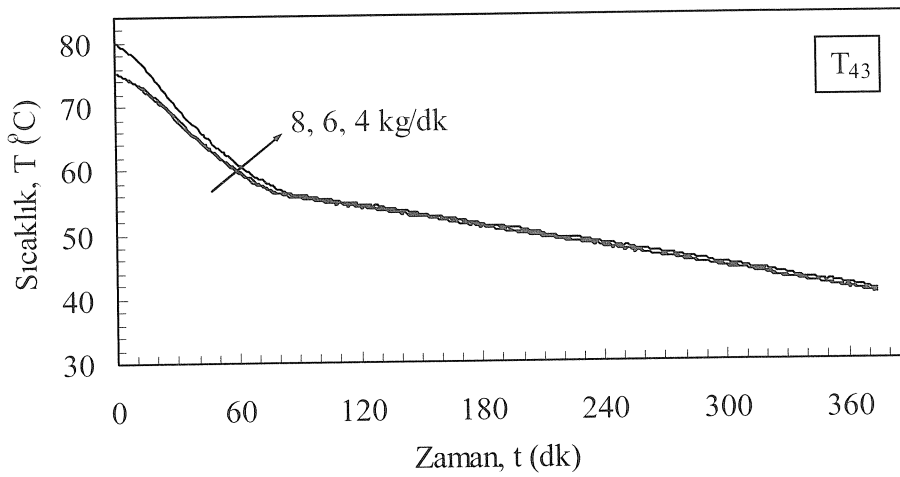
Şekil 3.40. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\epsilon = 10^\circ$, $T_g = 20$ °C, $m = 8$ kg/dk)



a)

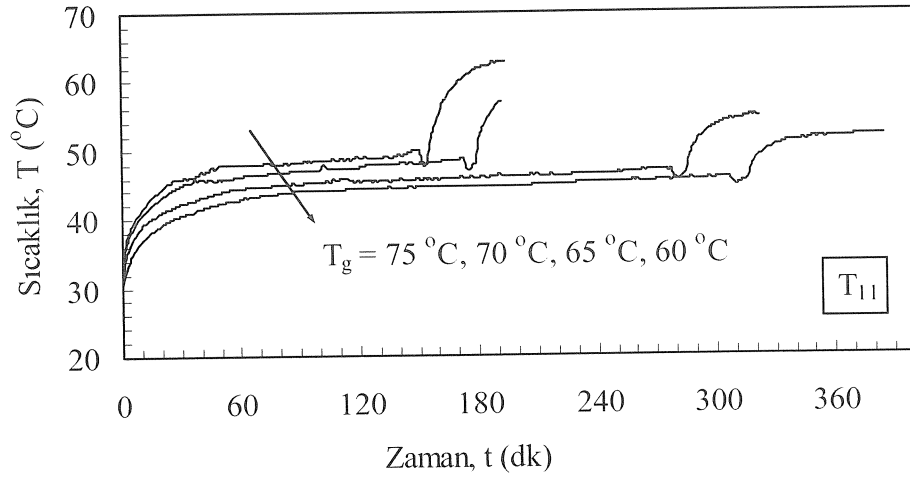


b)

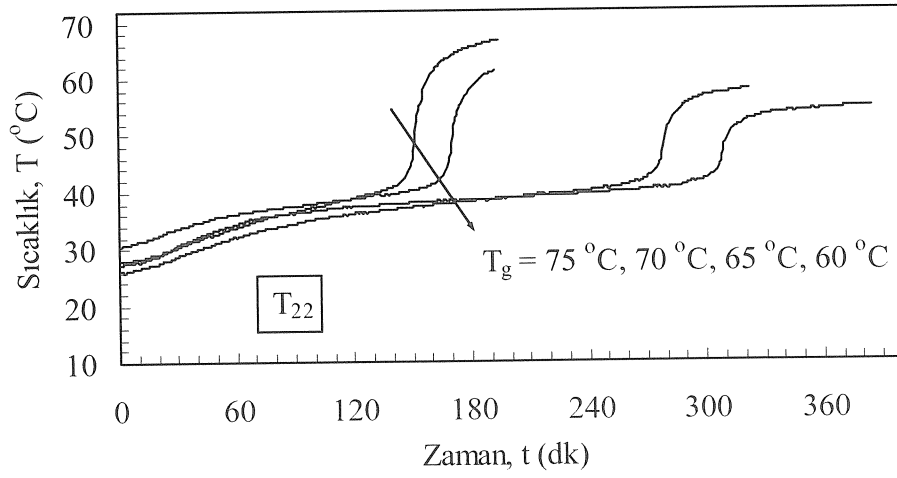


c)

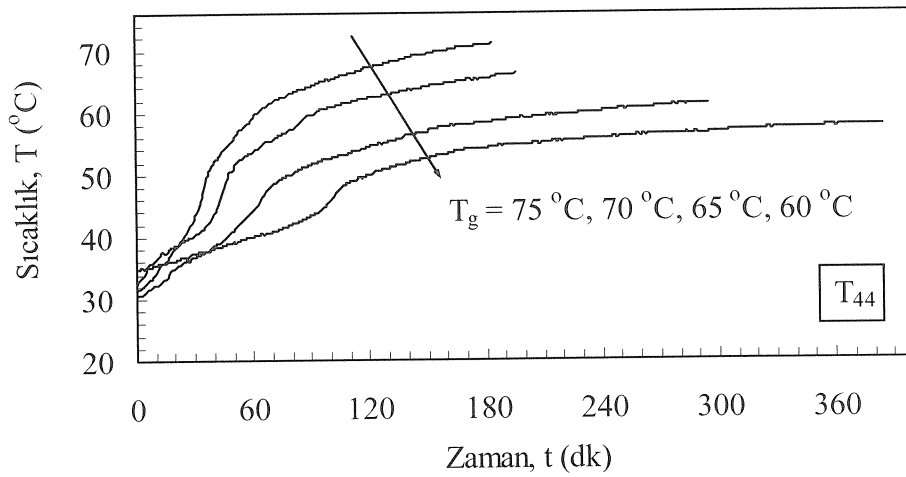
Şekil 3.41. Parafinin (P3) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütesel debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)

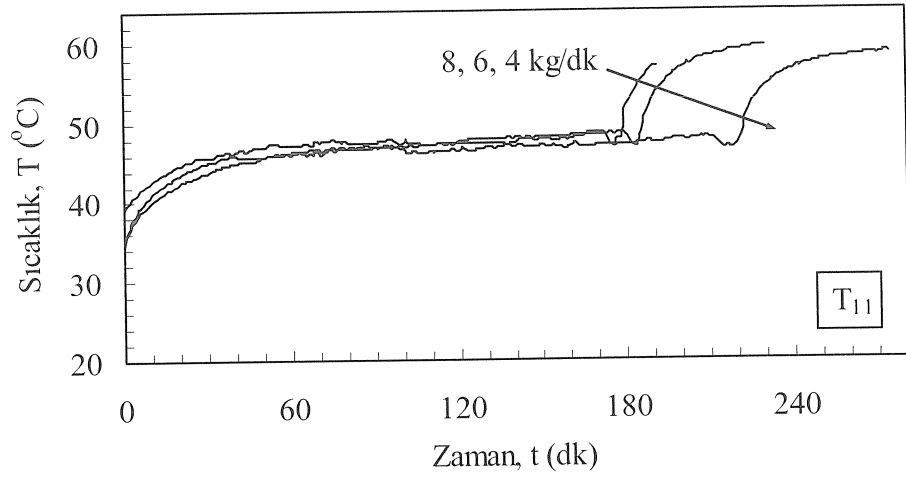


b)

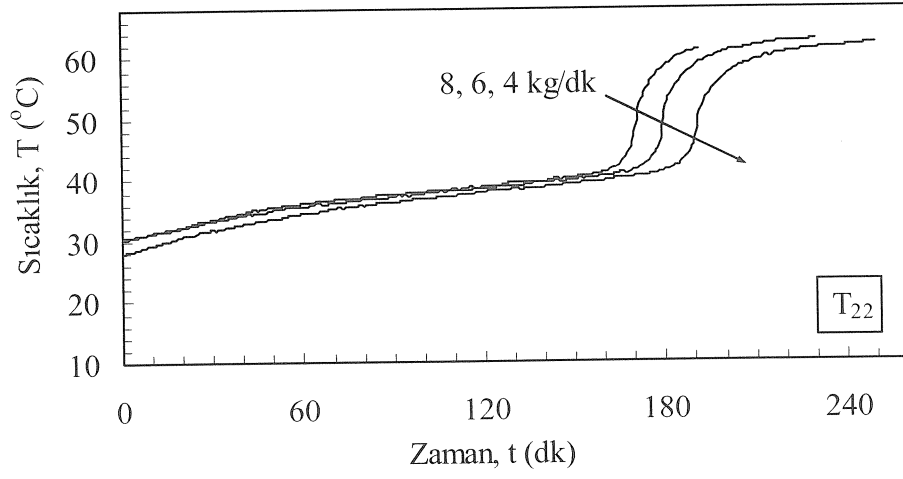


c)

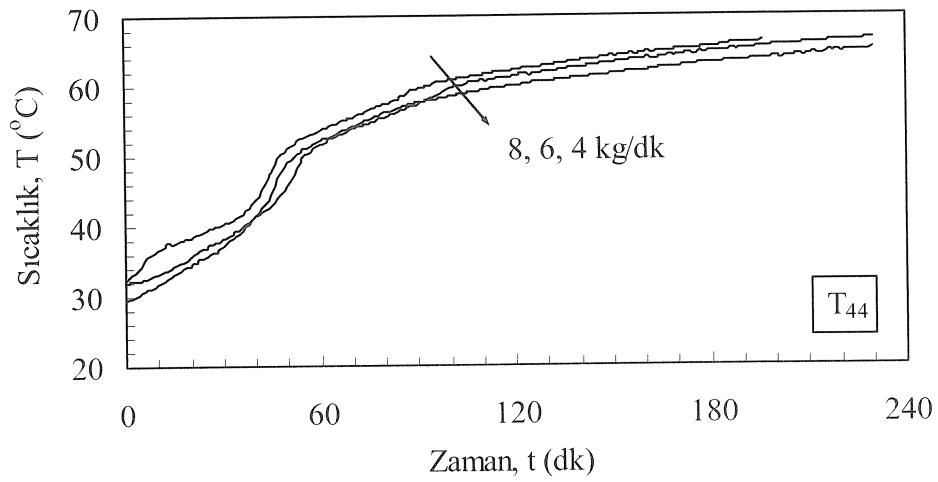
Şekil 3.42. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

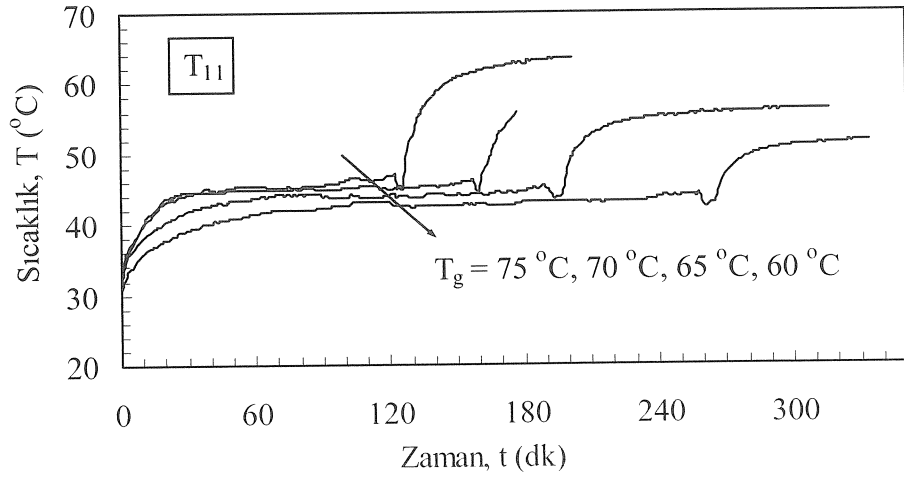


b)

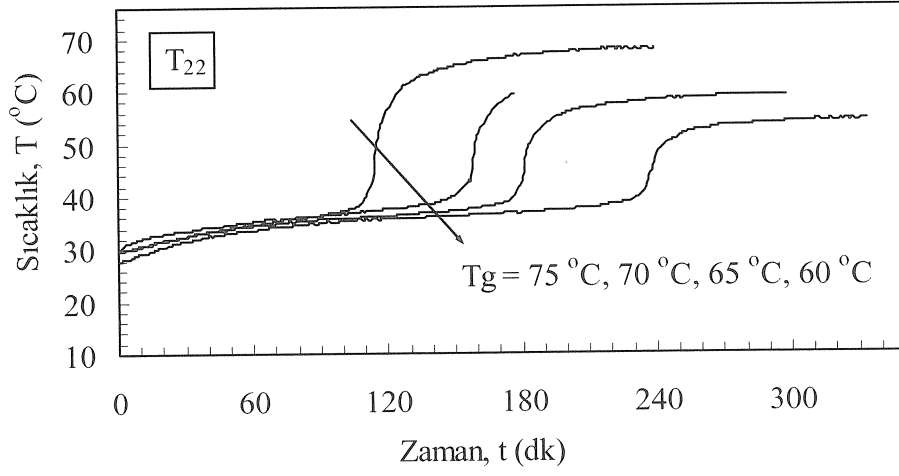


c)

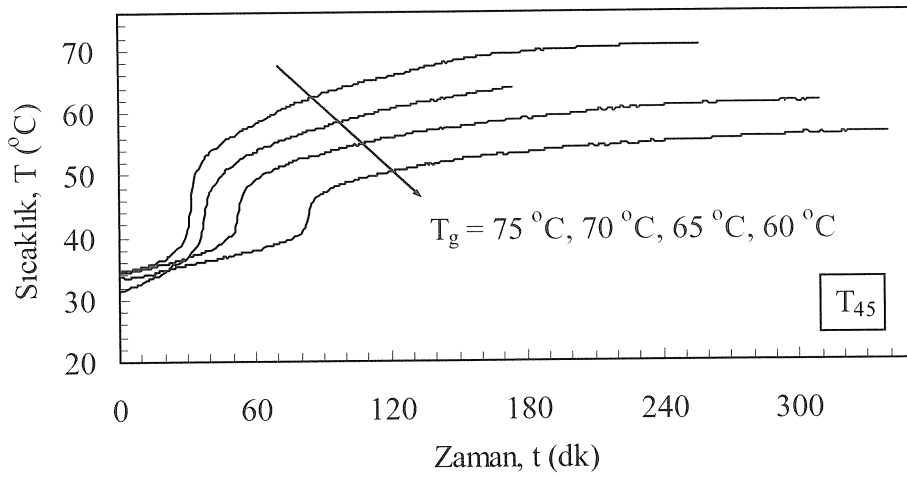
Şekil 3.43. Parafinin (P2) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$)



a)

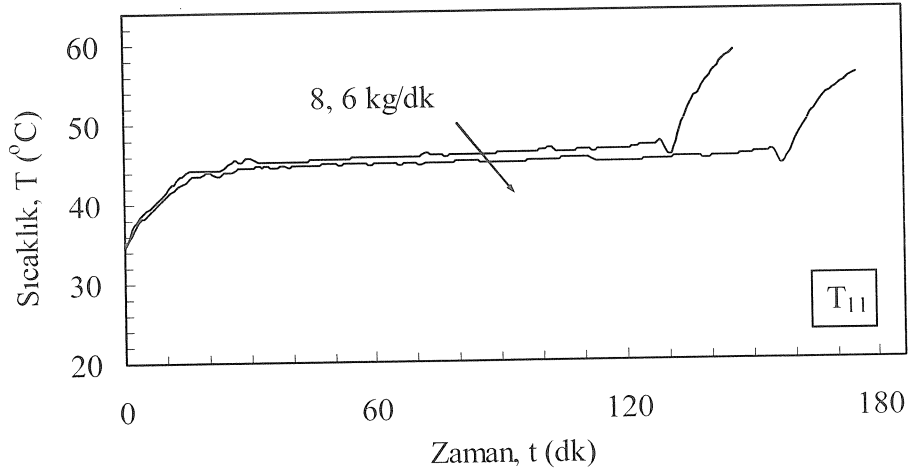


b)

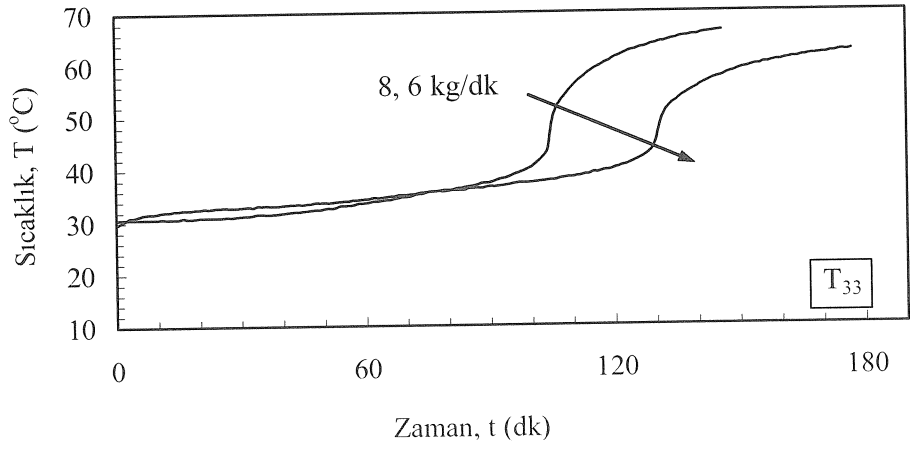


c)

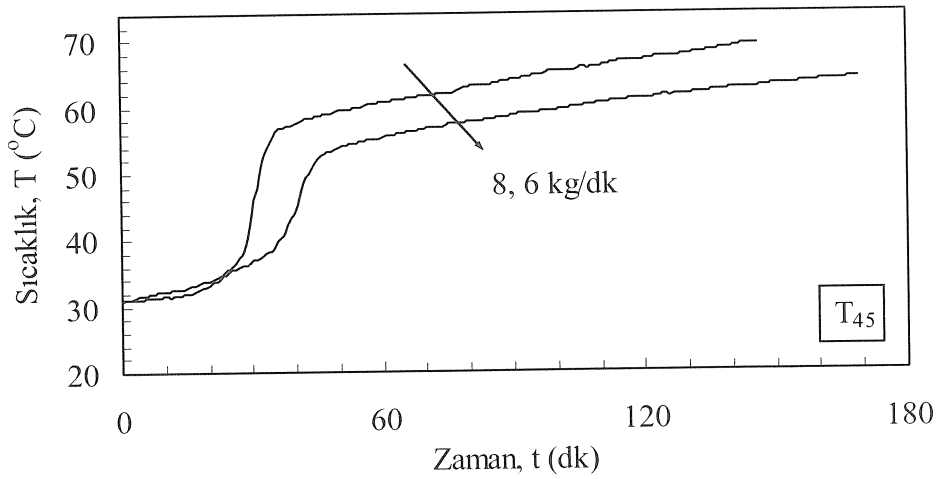
Şekil 3.44. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $m = 8$ kg/dk)



a)

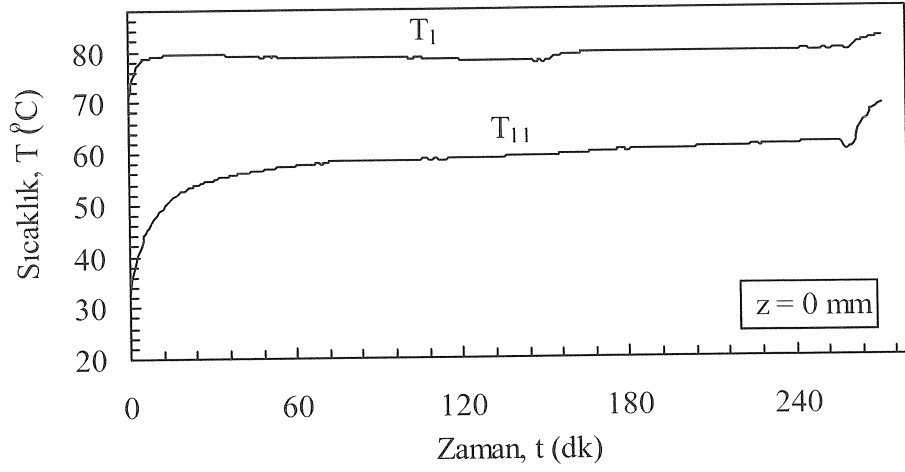


b)

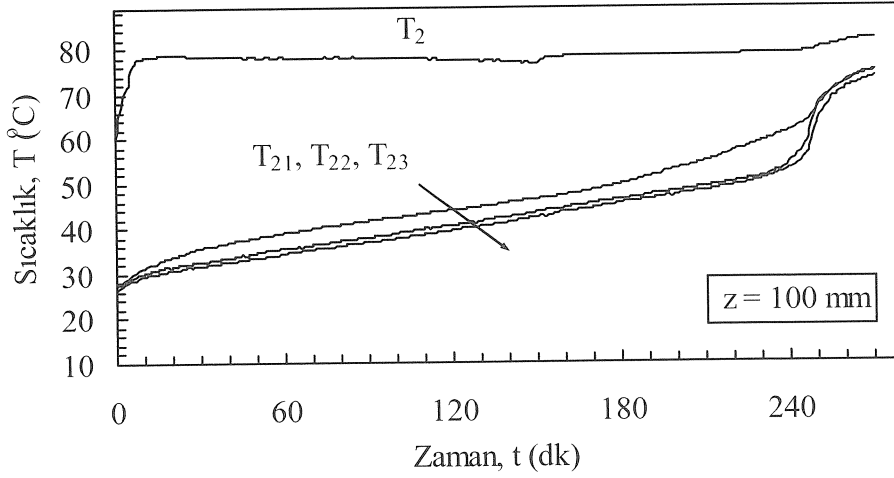


c)

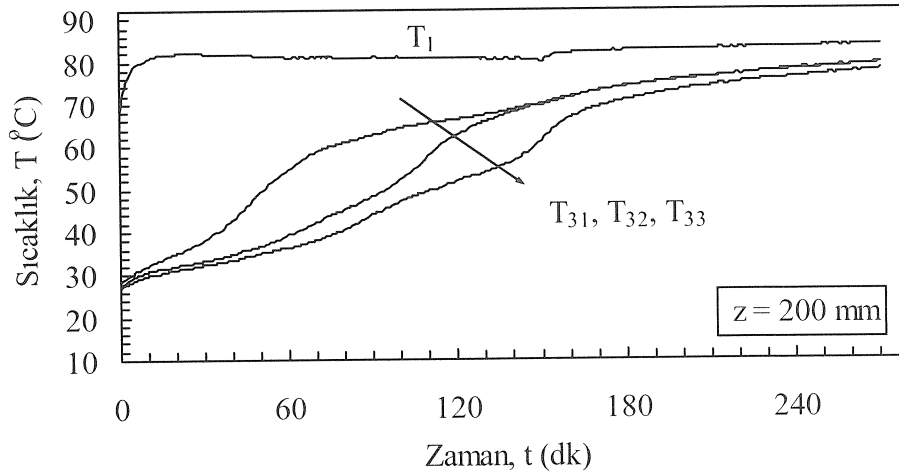
Şekil 3.45. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun kütsel debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 10^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$)



a)



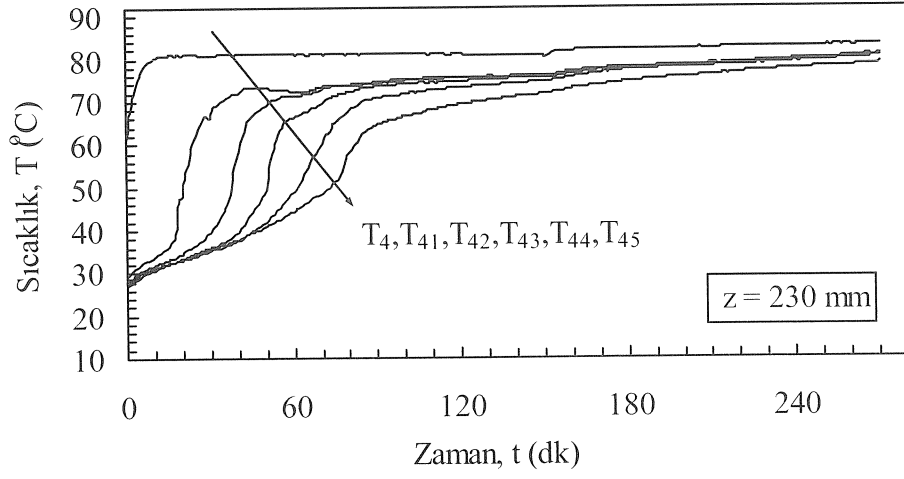
b)



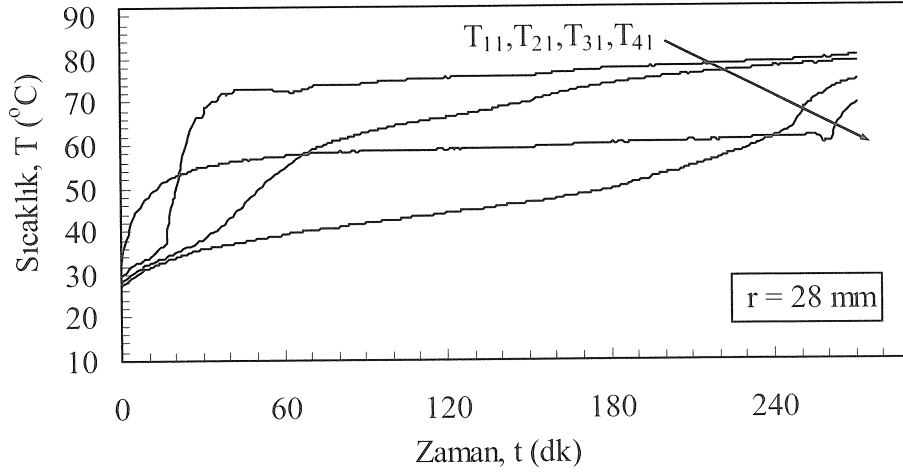
c)

Şekil 3.46. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

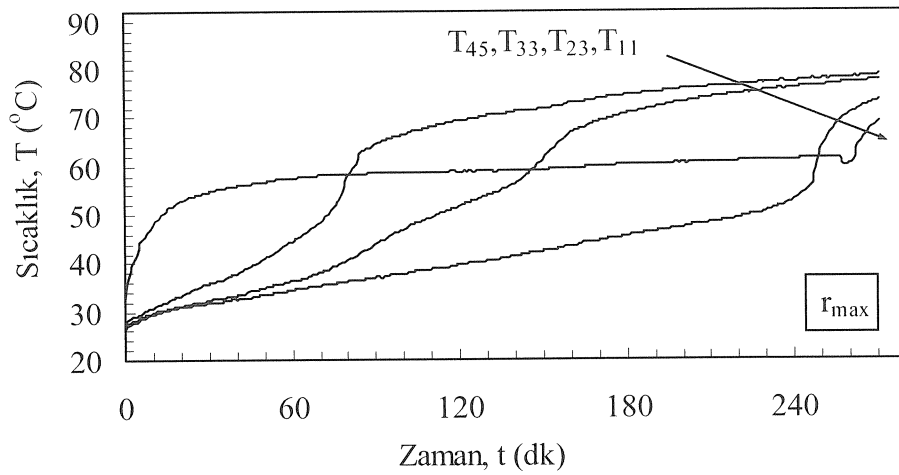
Şekil 3.46.'nın devamı



d)

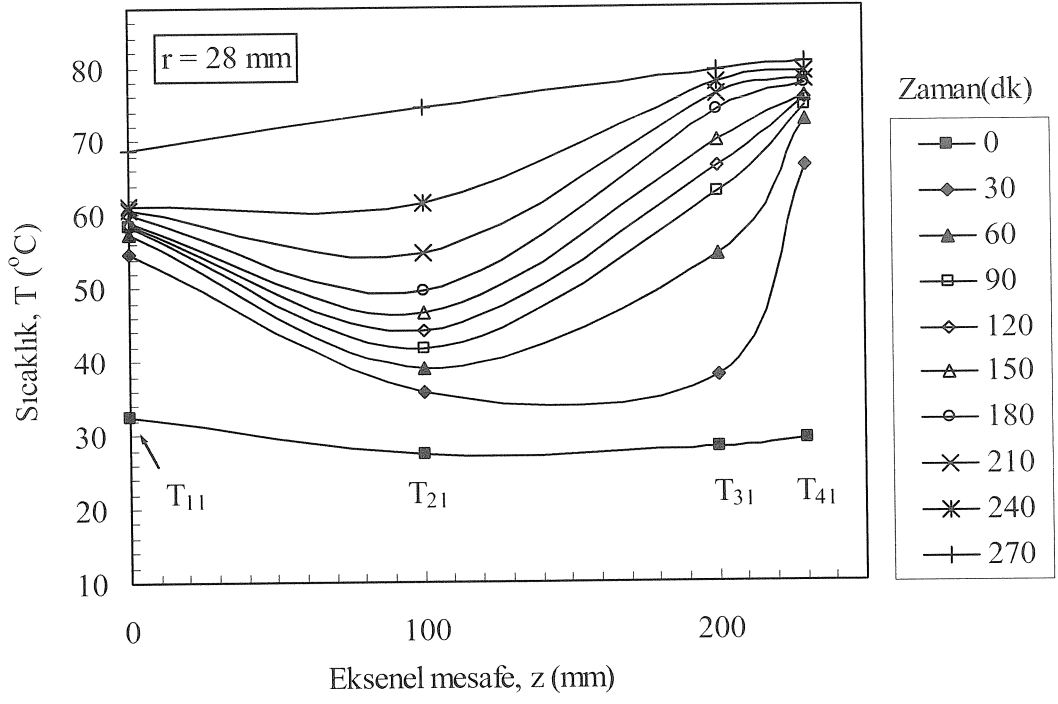


a)

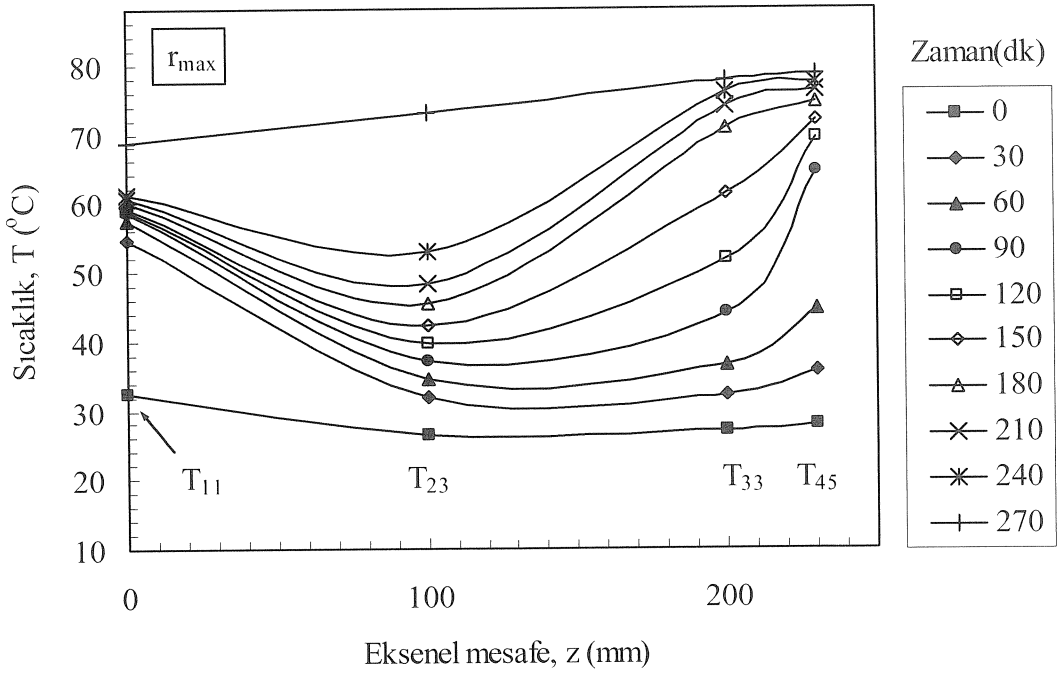


b)

Şekil 3.47. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

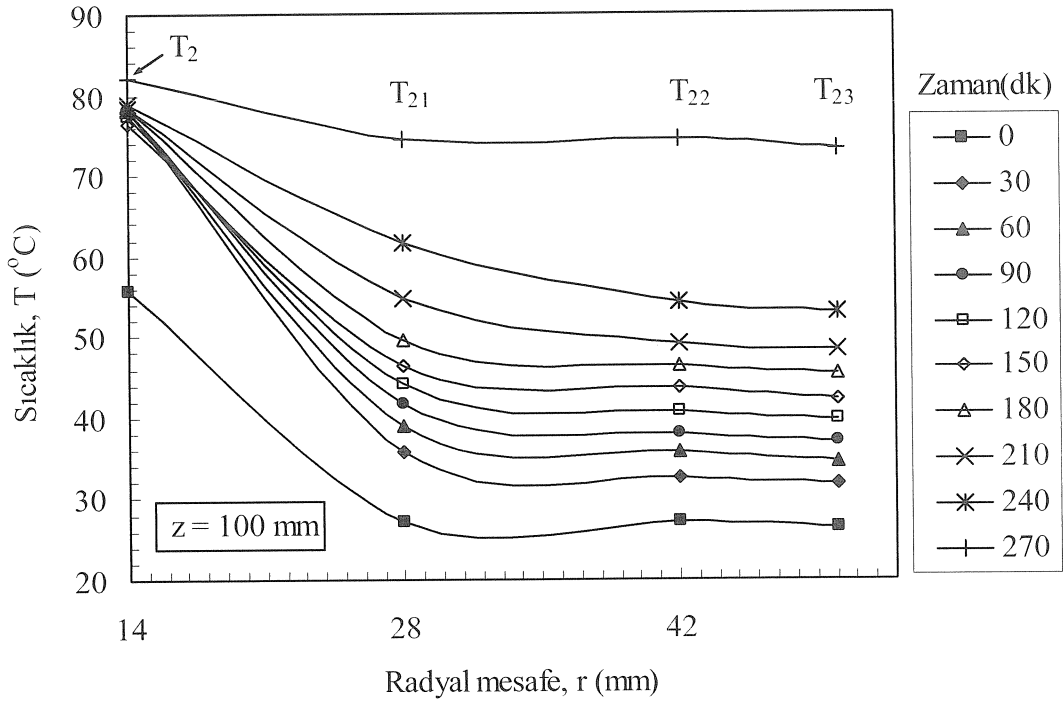


a)

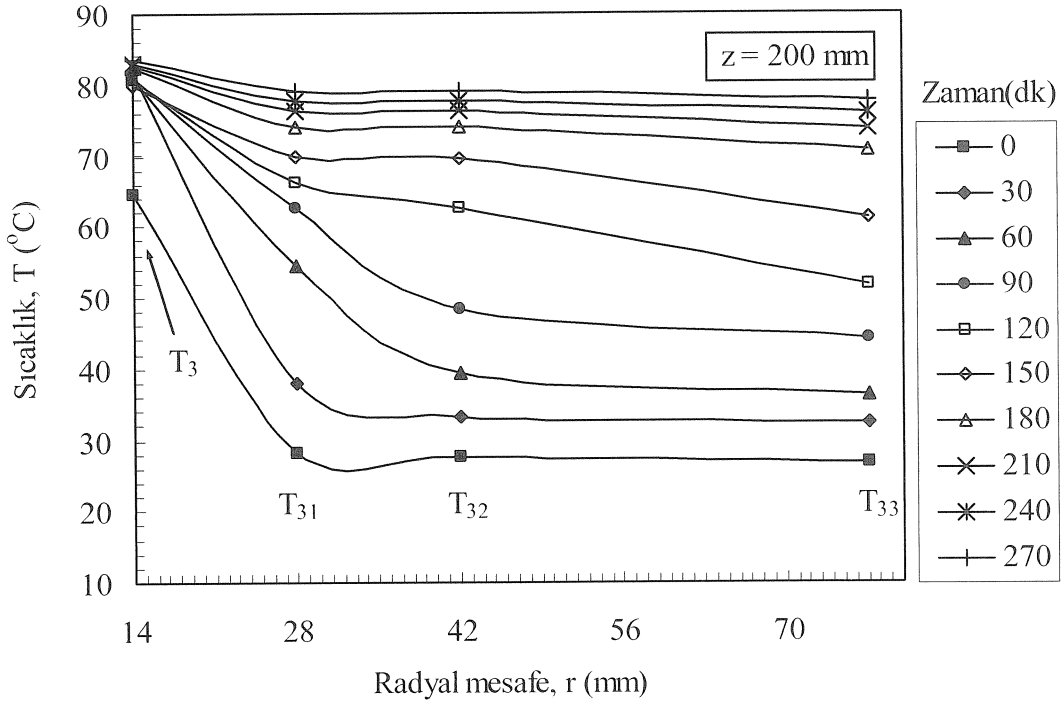


b)

Şekil 3.48. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)

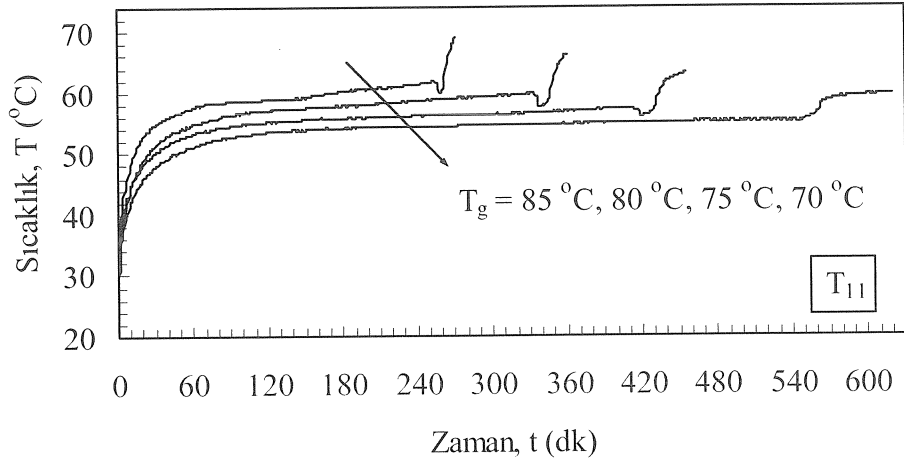


a)

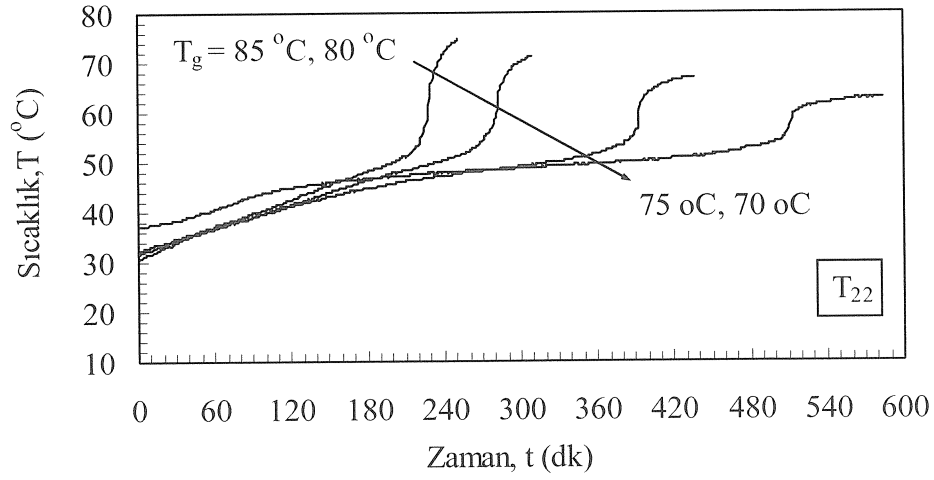


b)

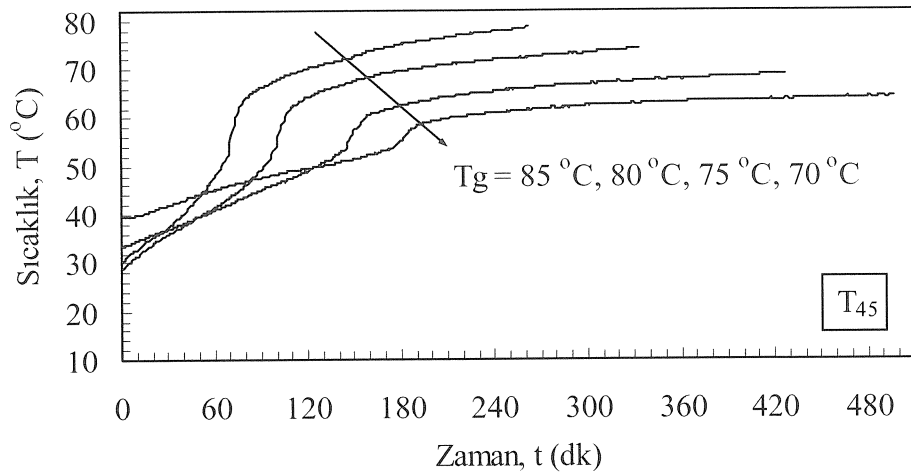
Şekil 3.49. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

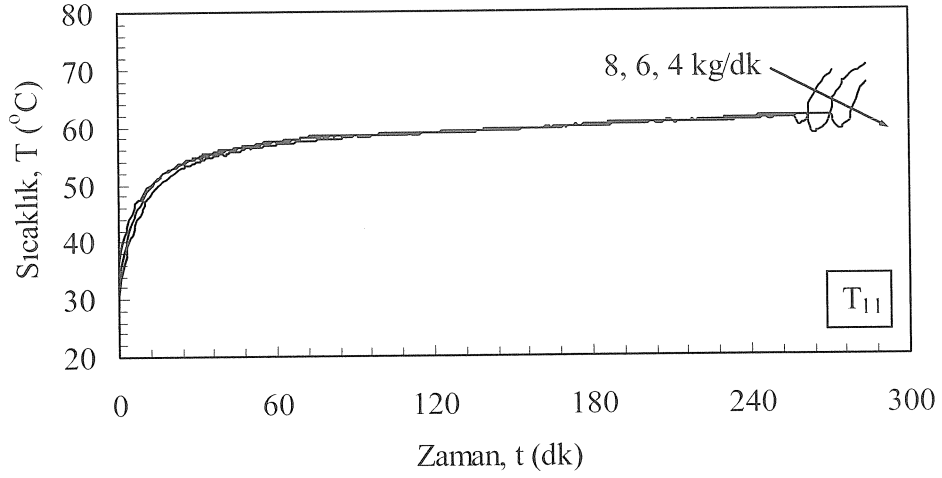


b)

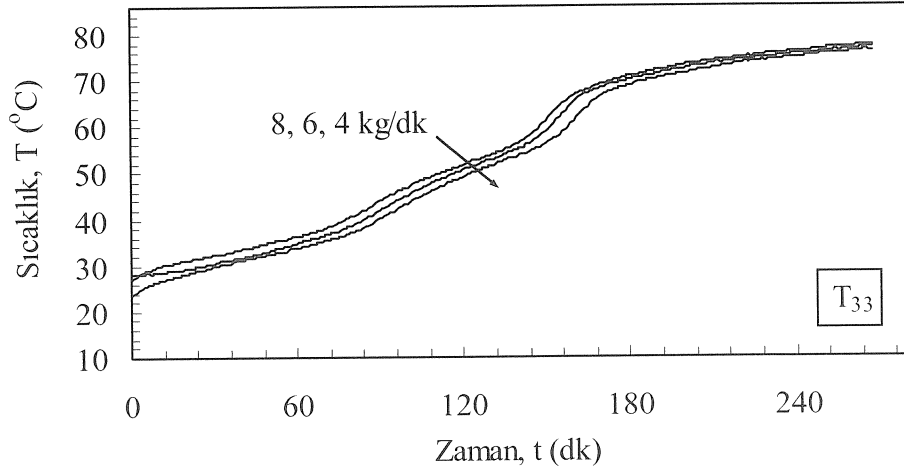


c)

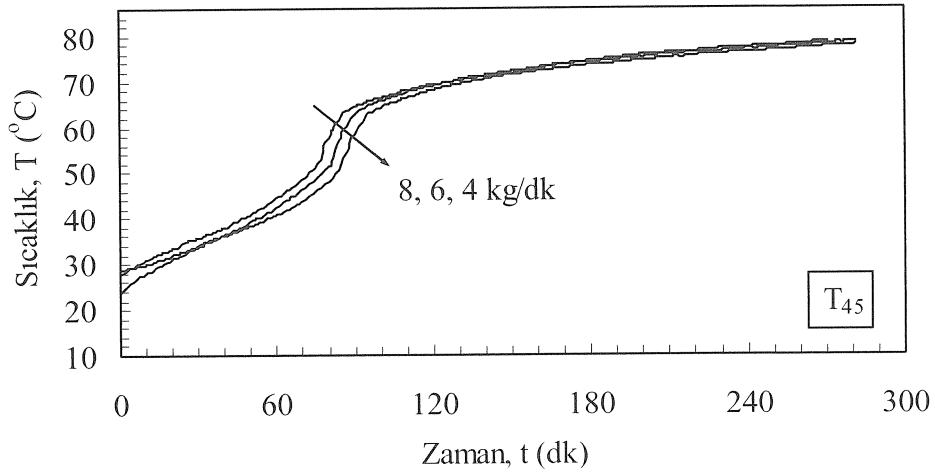
Şekil 3.50. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

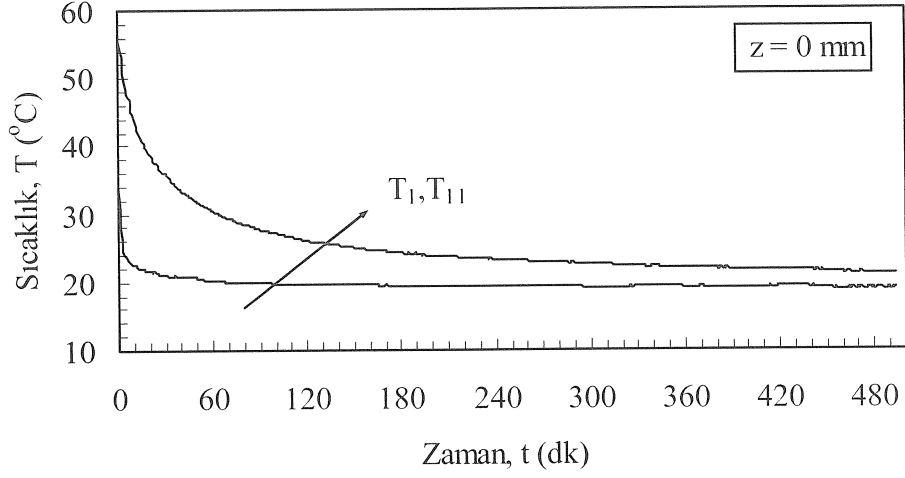


b)

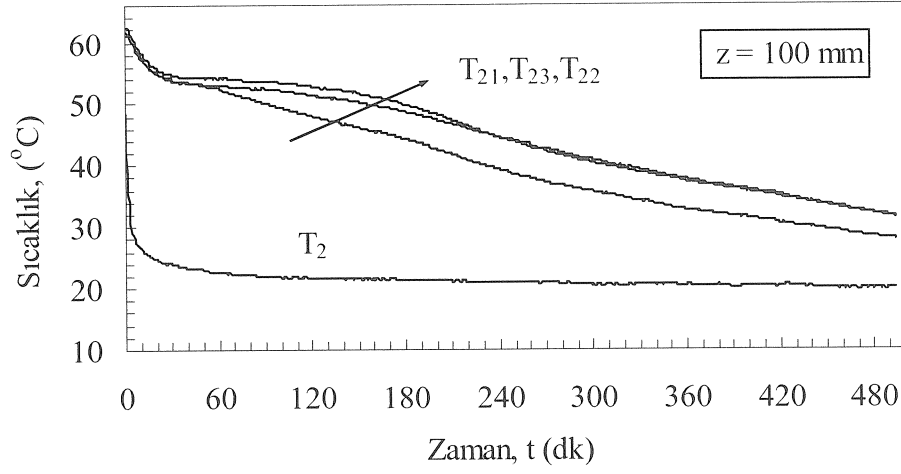


c)

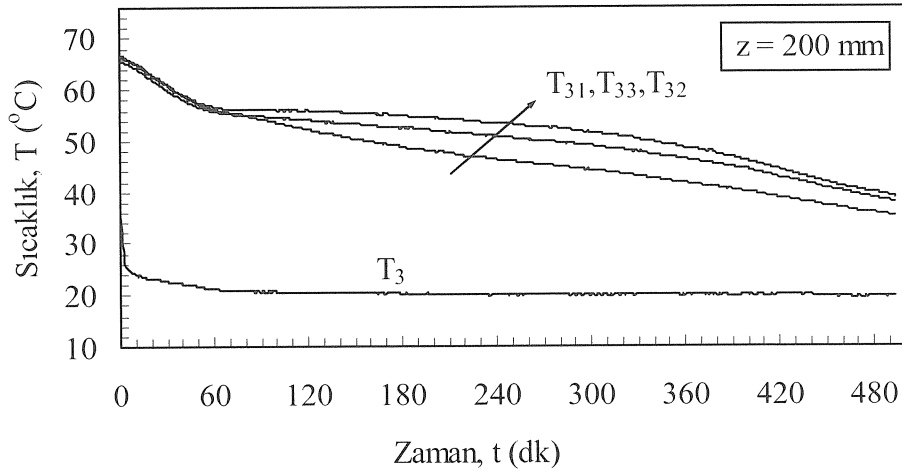
Şekil 3.51. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$)



a)



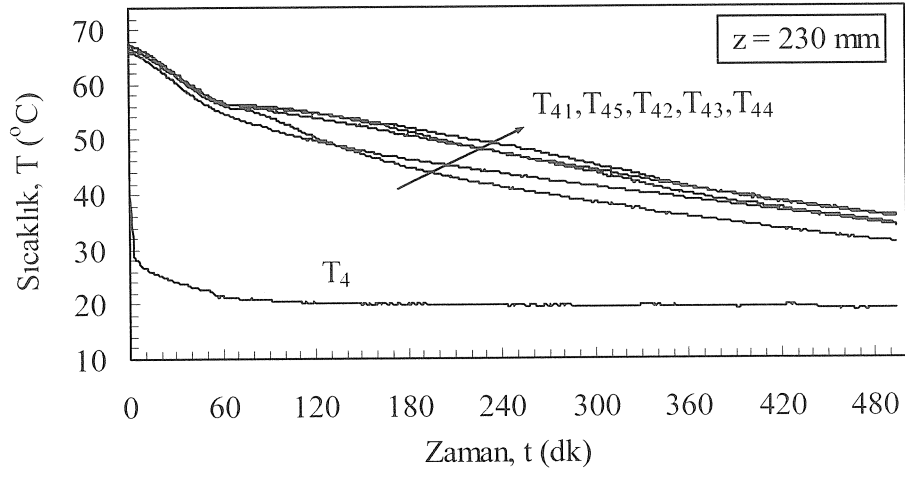
b)



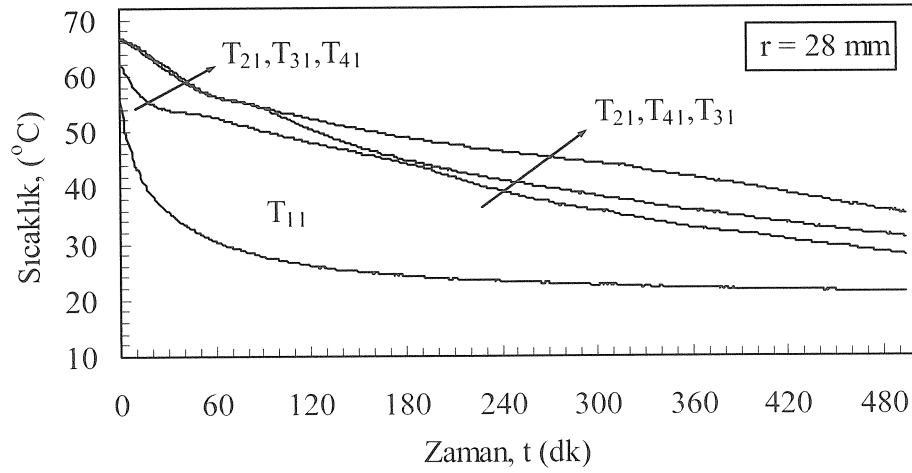
c)

Şekil 3.52. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

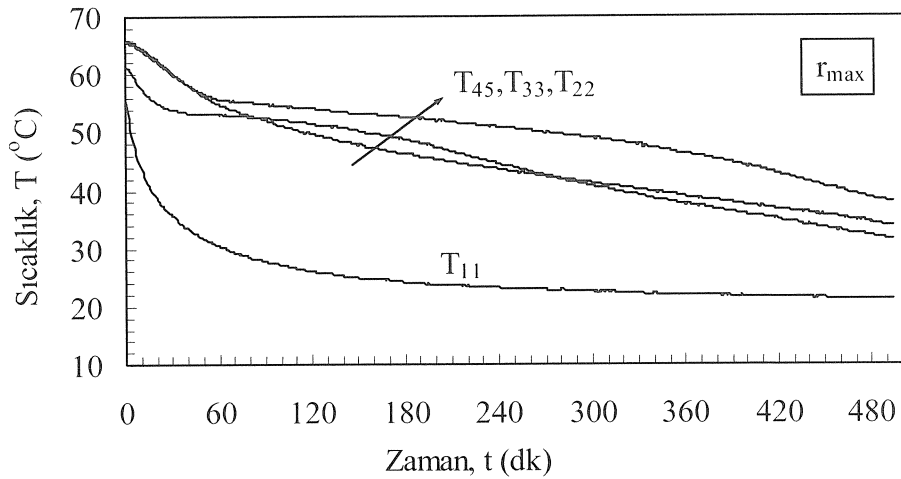
Şekil 3.52.'nin devamı



d)

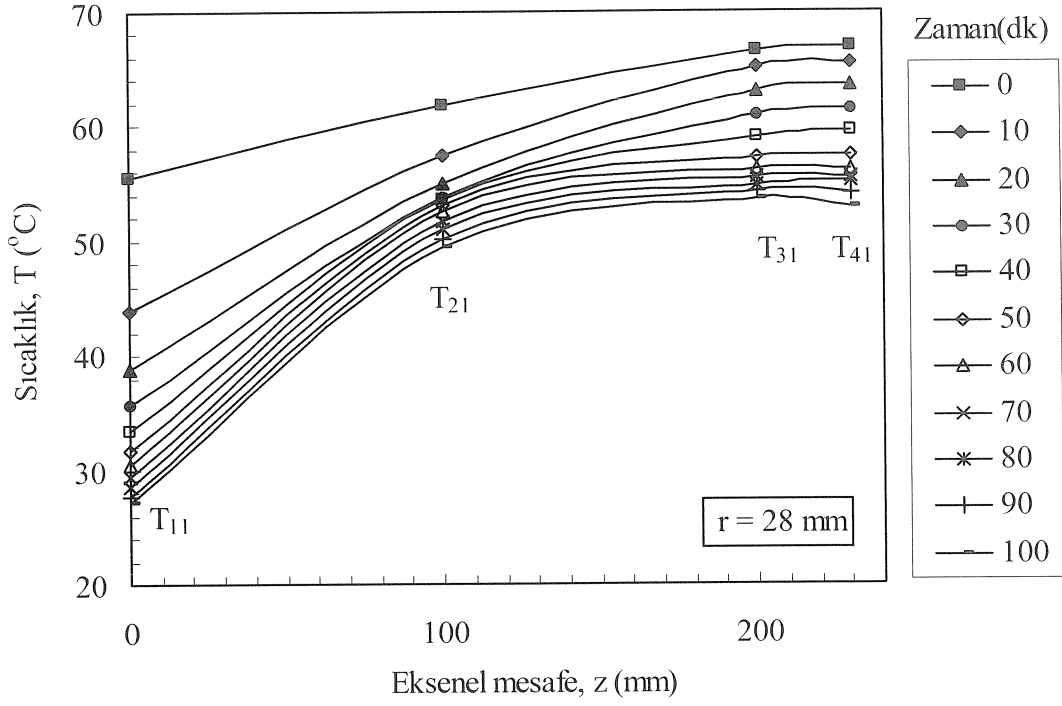


b)

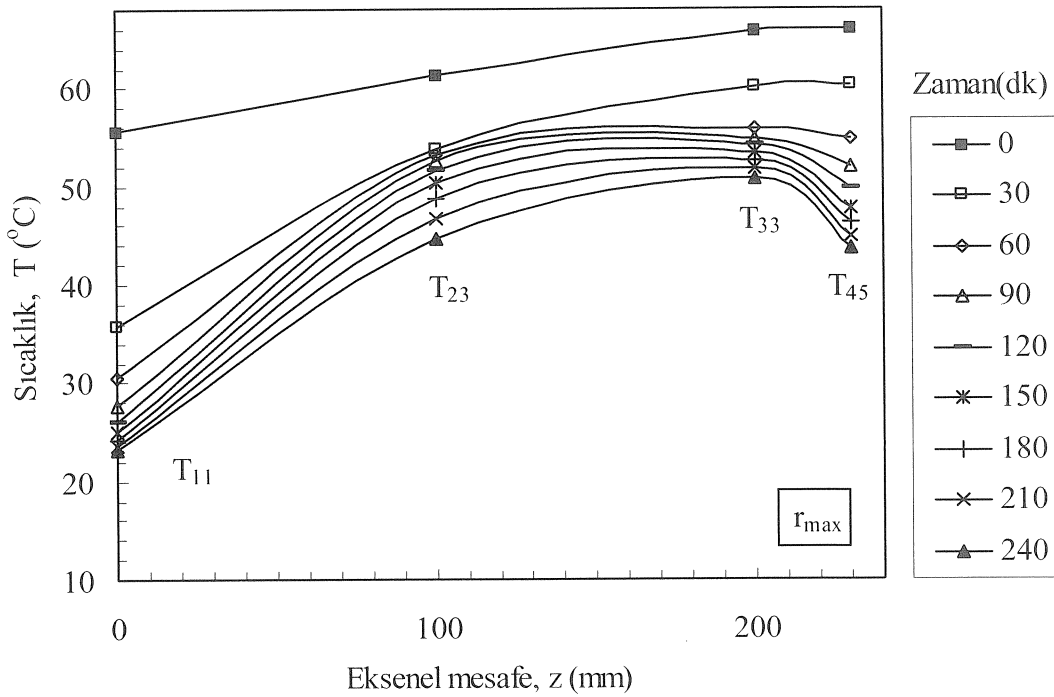


c)

Şekil 3.53. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

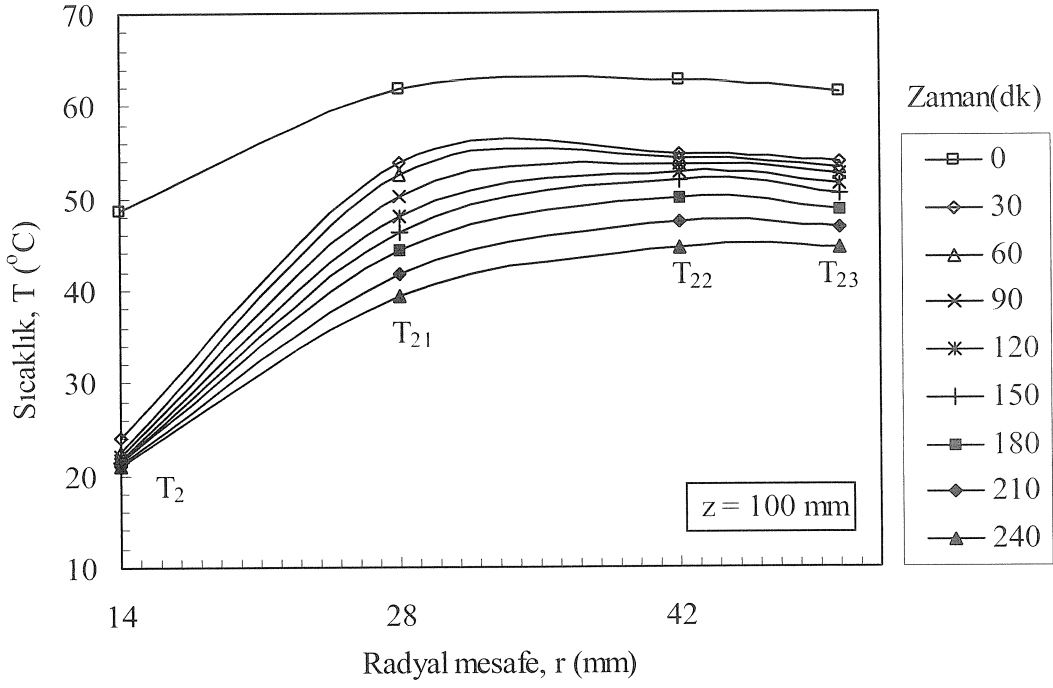


a)

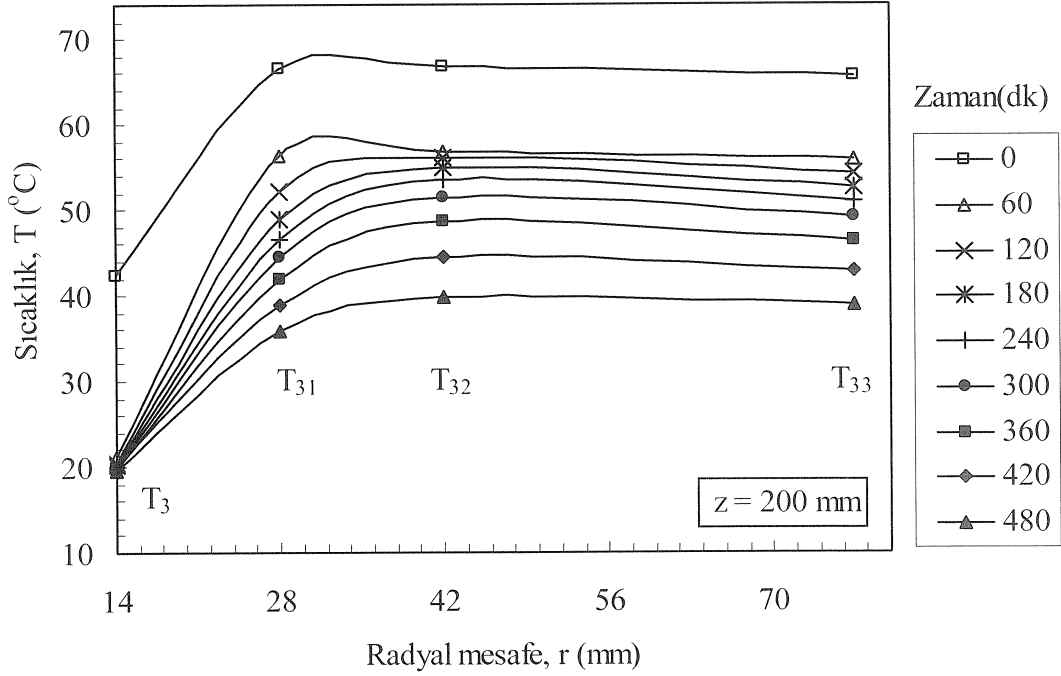


b)

Şekil 3.54. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- aksenal mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

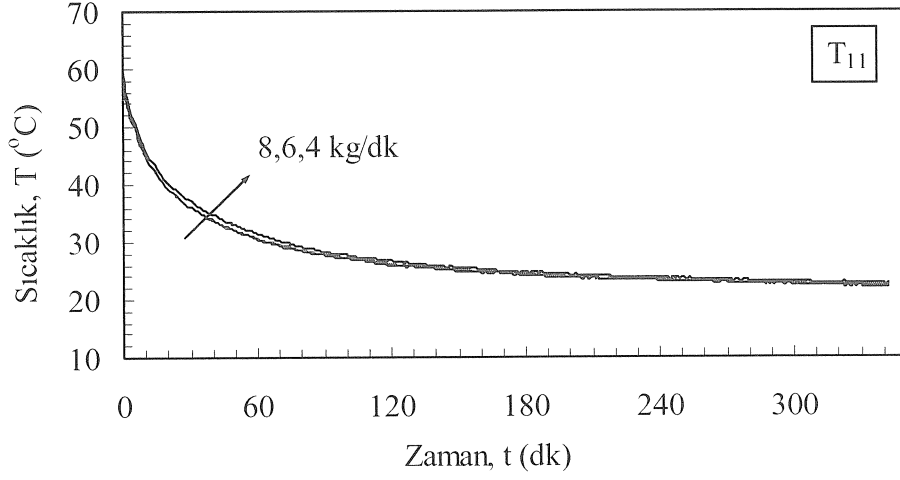


a)

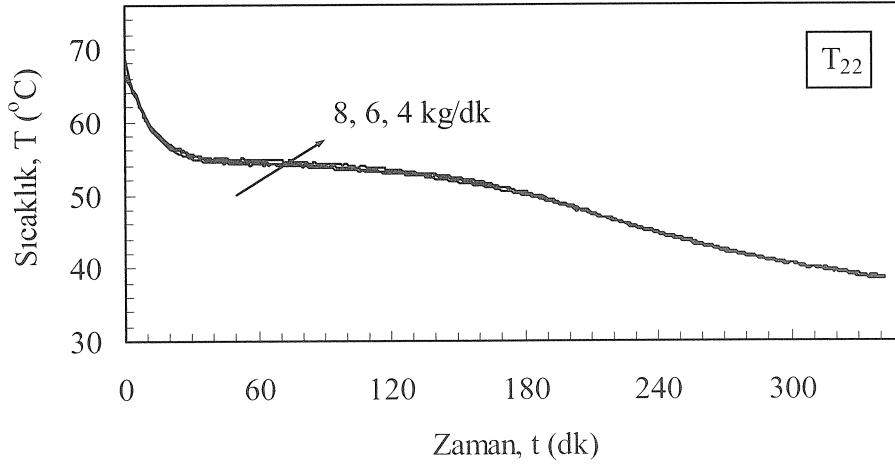


b)

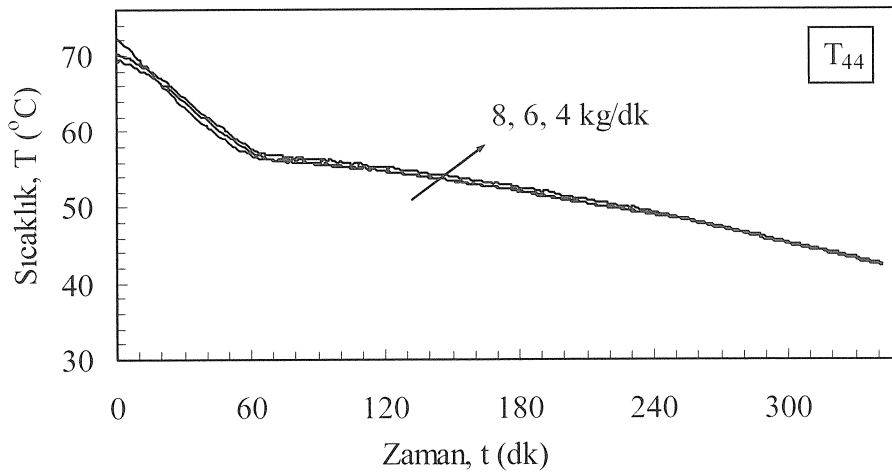
Şekil 3.55. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

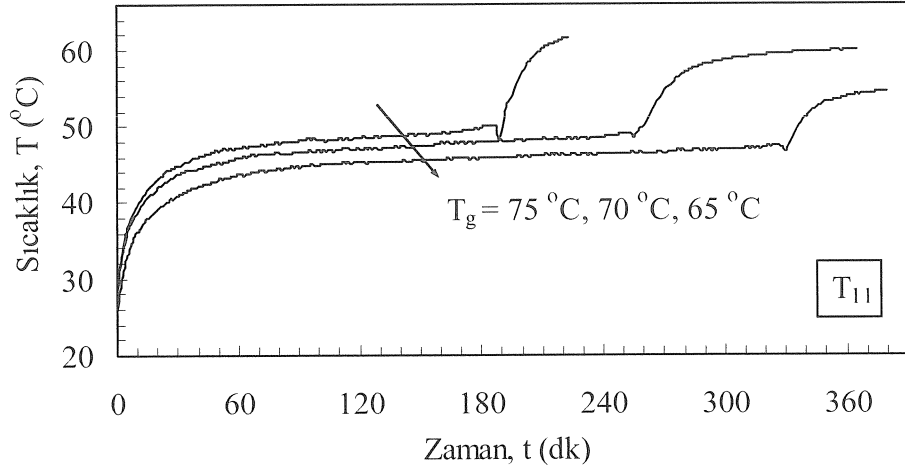


b)

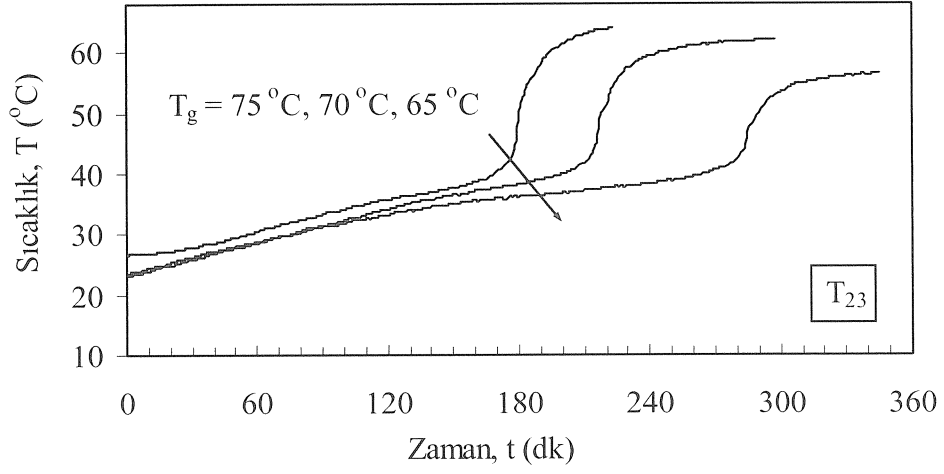


c)

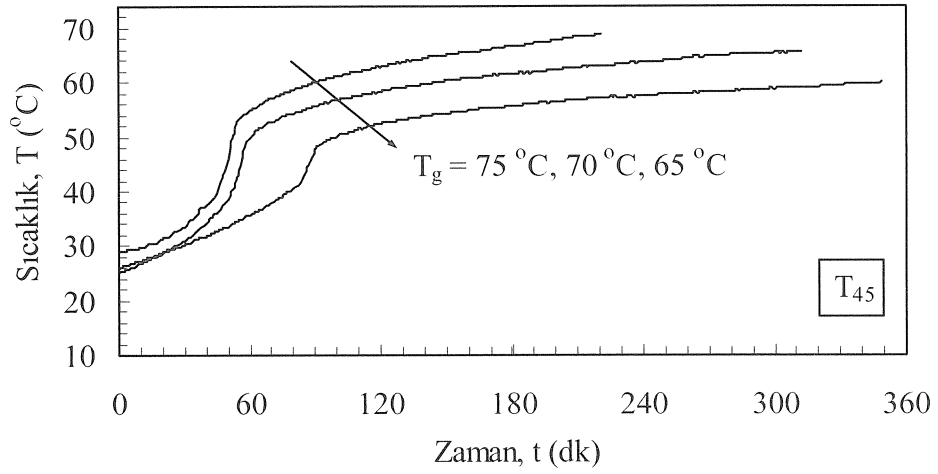
Şekil 3.56. Parafinin (P3) katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)

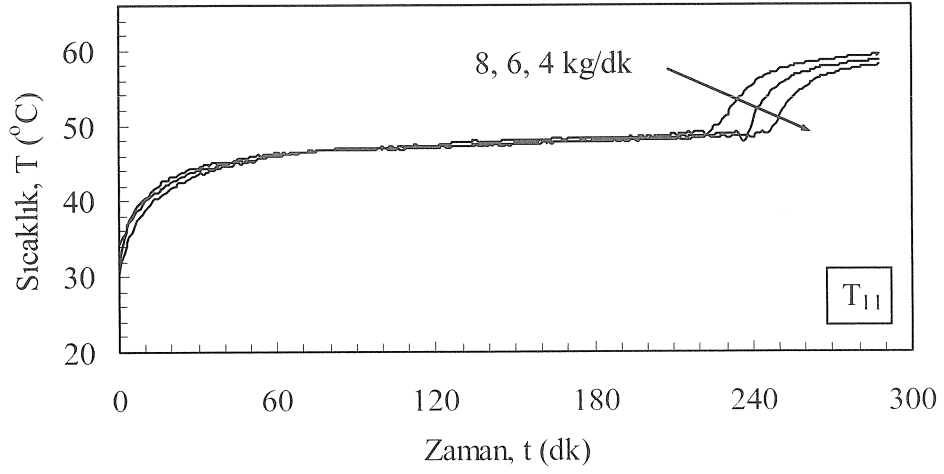


b)

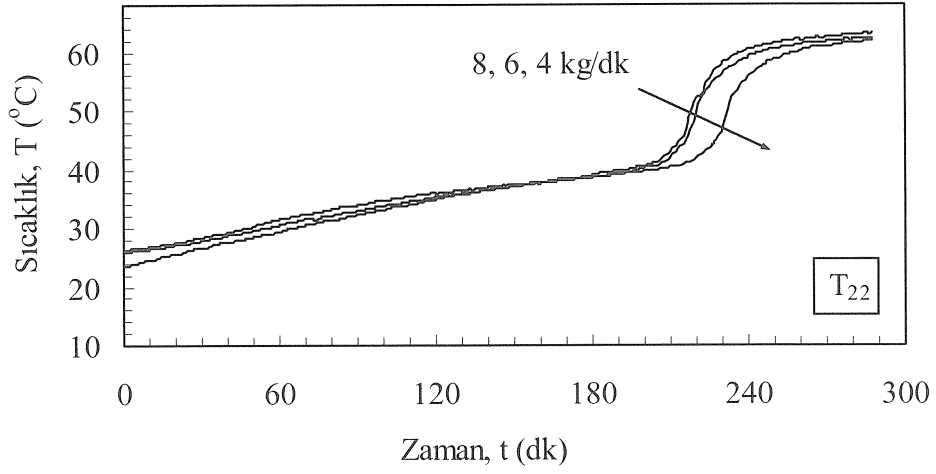


c)

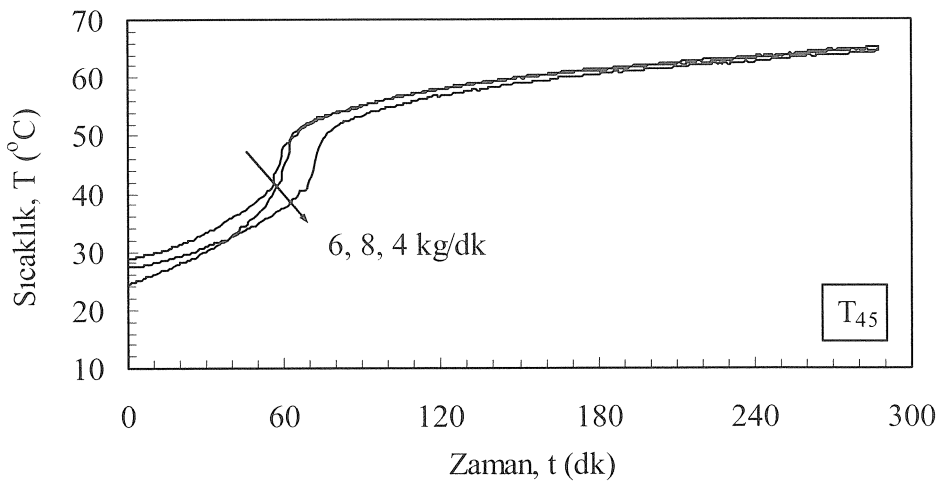
Şekil 3.57. Parafinin (P2) ergimede, suyun giriş sıcaklığına bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\delta = 15^{\circ}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

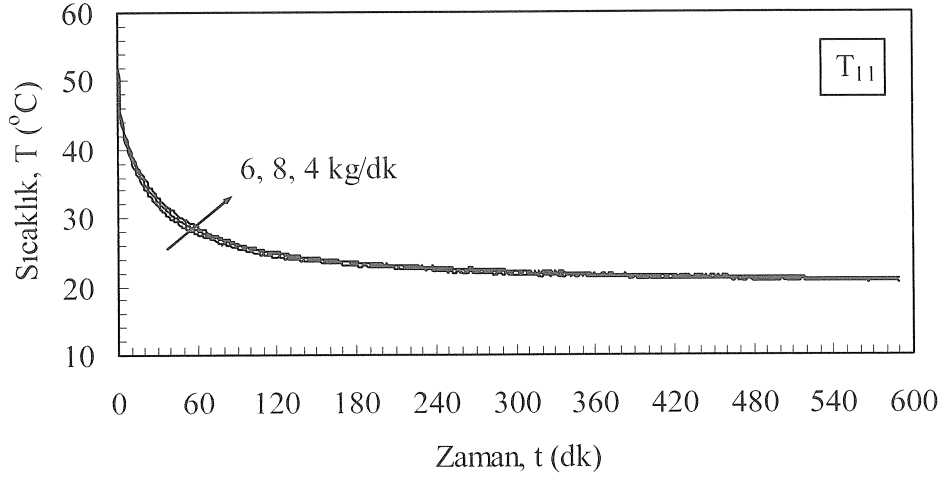


b)

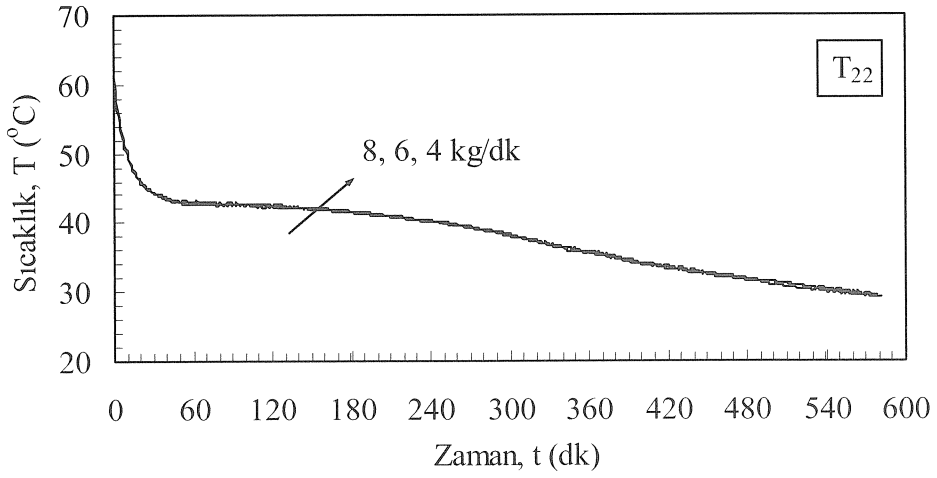


c)

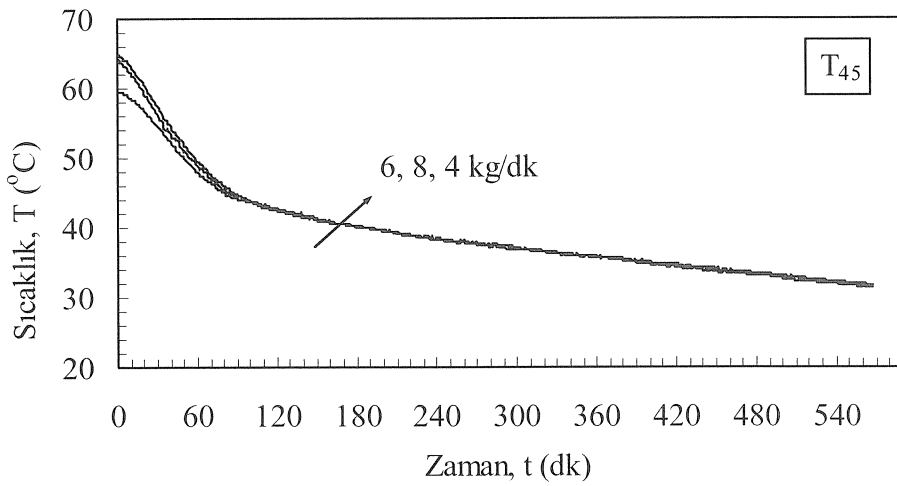
Şekil 3.58. Parafinin (P2) erimede, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 70^\circ\text{C}$)



a)

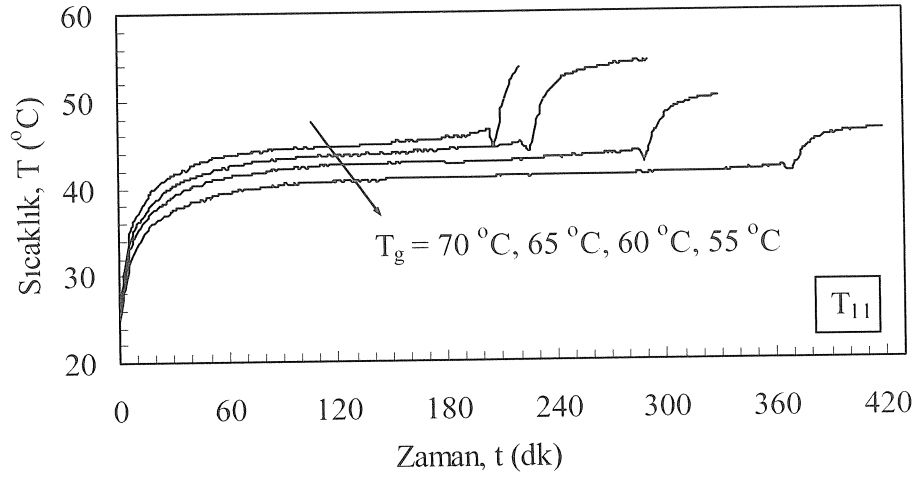


b)

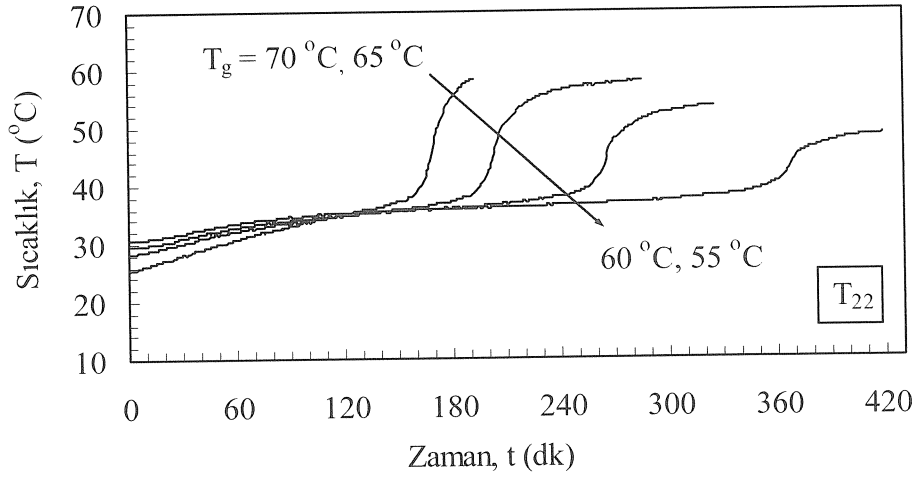


c)

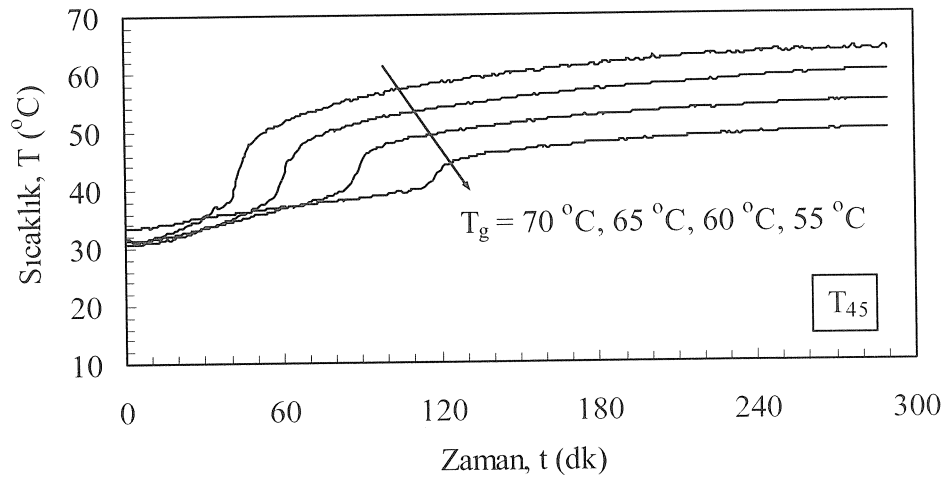
Şekil 3.59. Parafinin (P2) katılaşmada, suyun kütsel debisine bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $b = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)

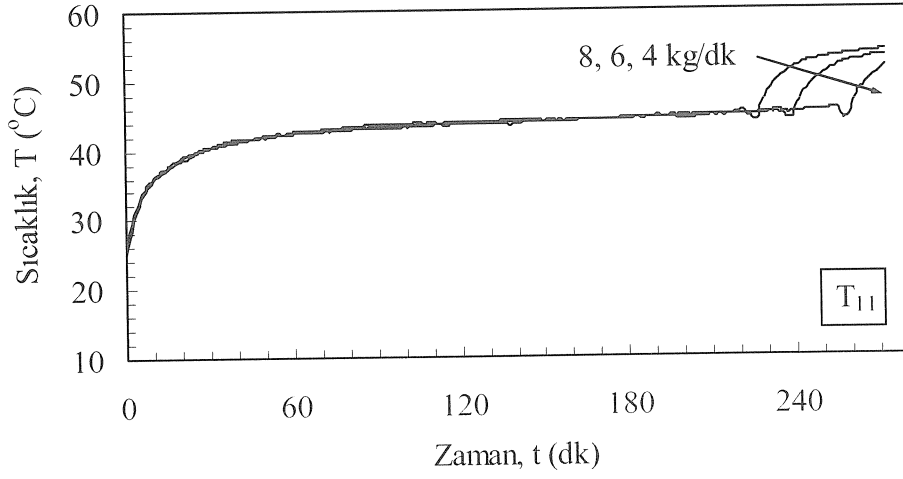


b)

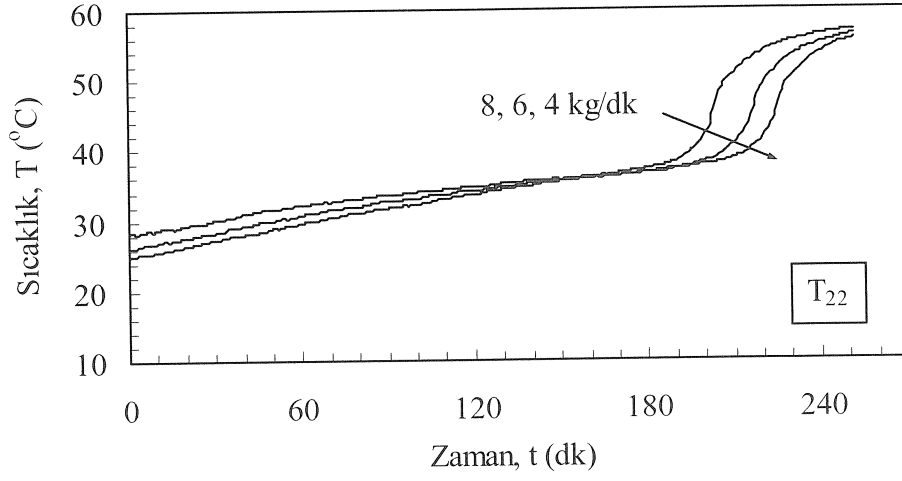


c)

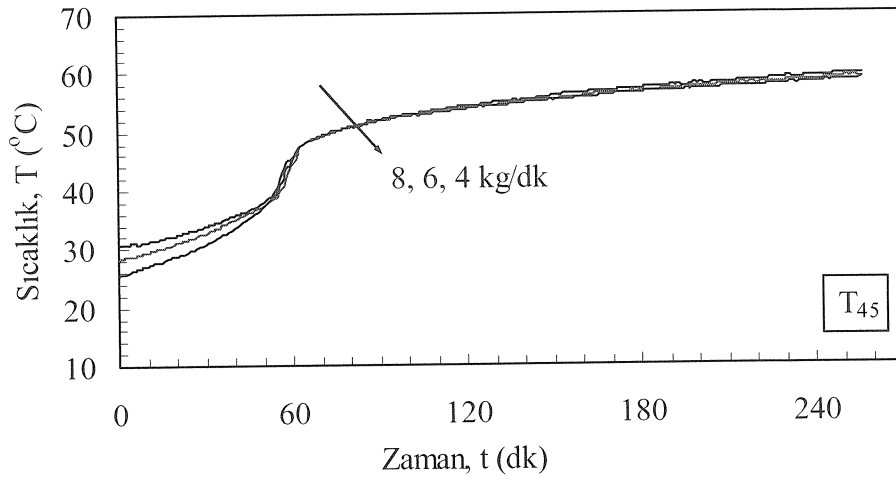
Şekil 3.60. Parafinin (P1) ergimede, suyun giriş sıcaklığına bağlı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 15^{\circ}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

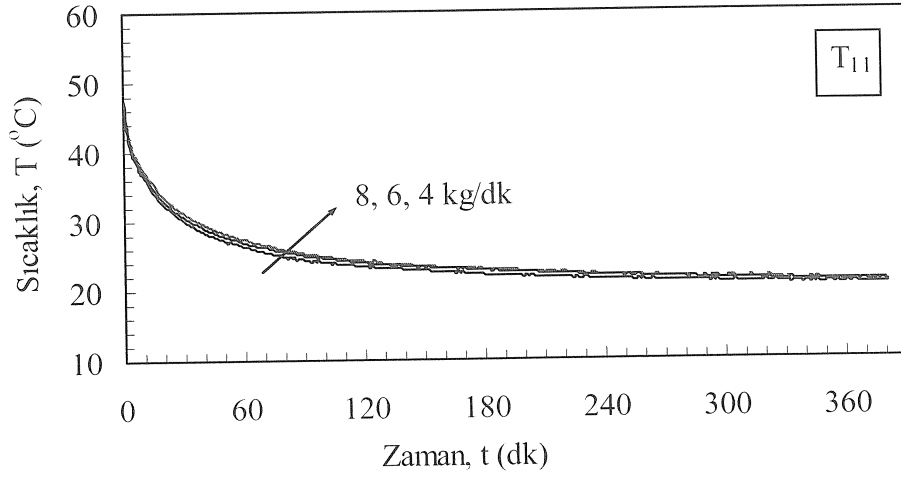


b)

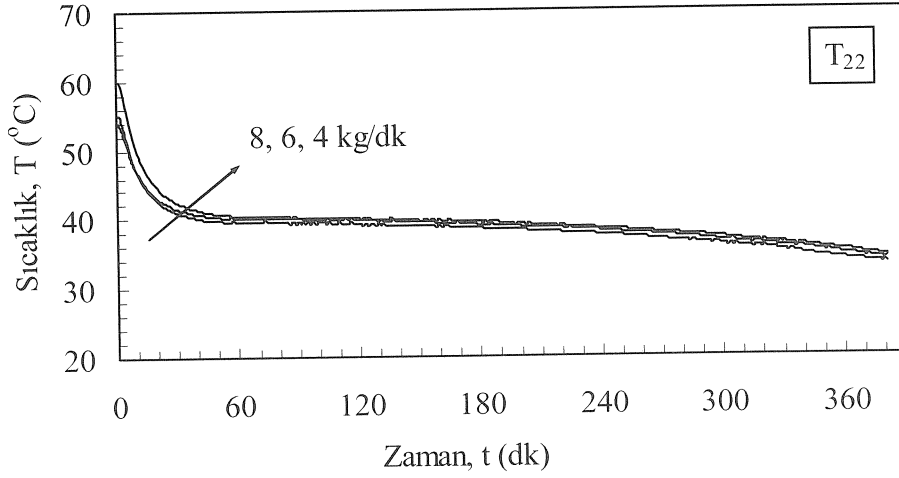


c)

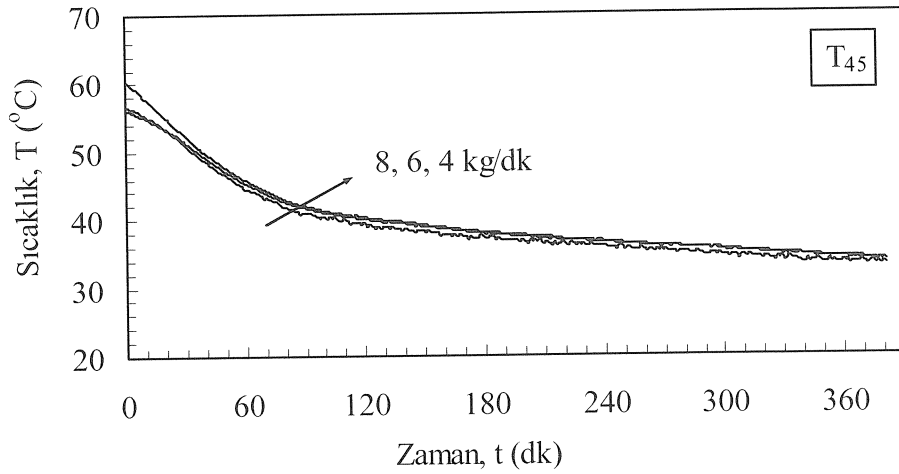
Şekil 3.61. Parafinin (P1) erimede, suyun kütsel debisine bağı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 65^\circ\text{C}$)



a)

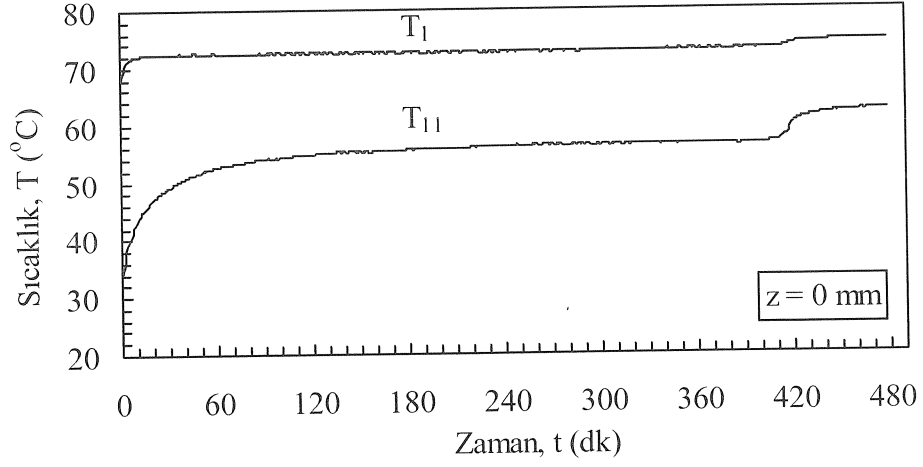


b)

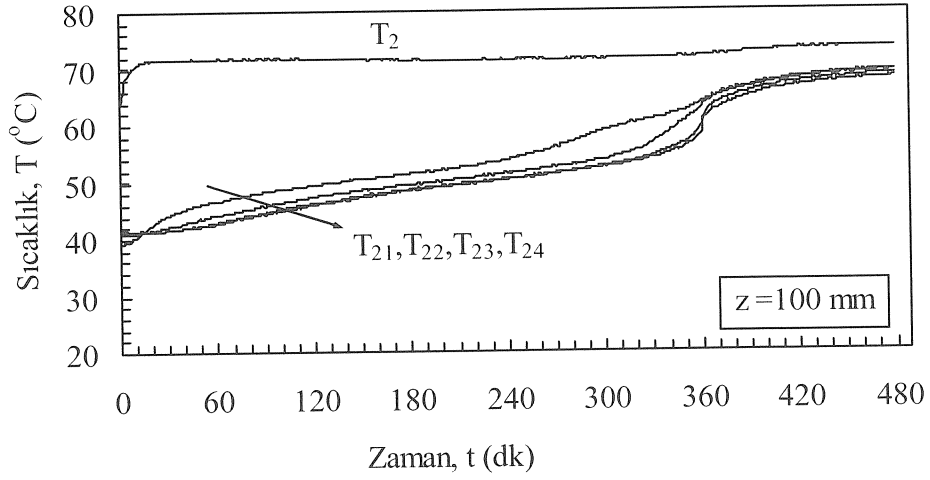


c)

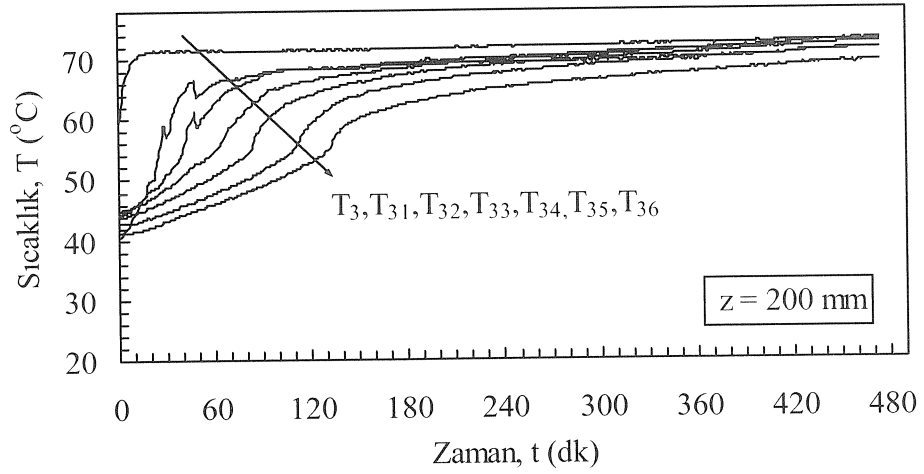
Şekil 3.62. Parafinin (P1) katılaşmada, suyun kütsel debisine bağı, belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^\circ$, $\theta = 15^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)



a)



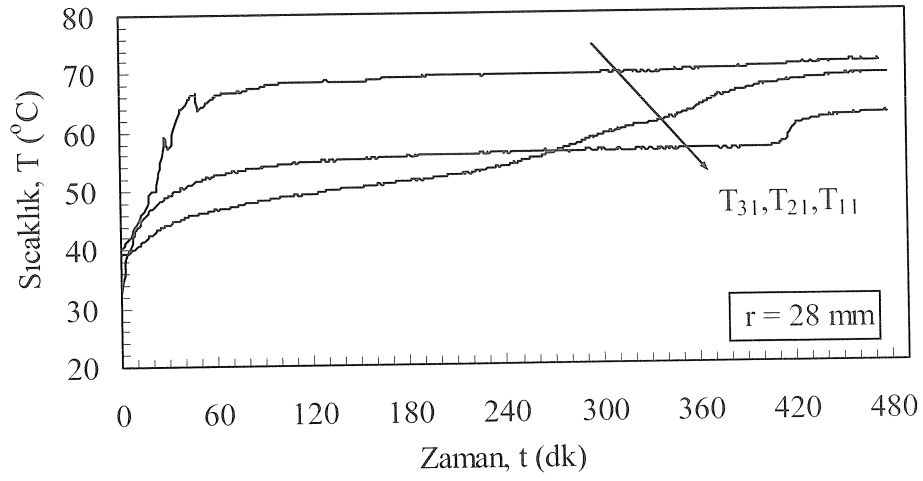
b)



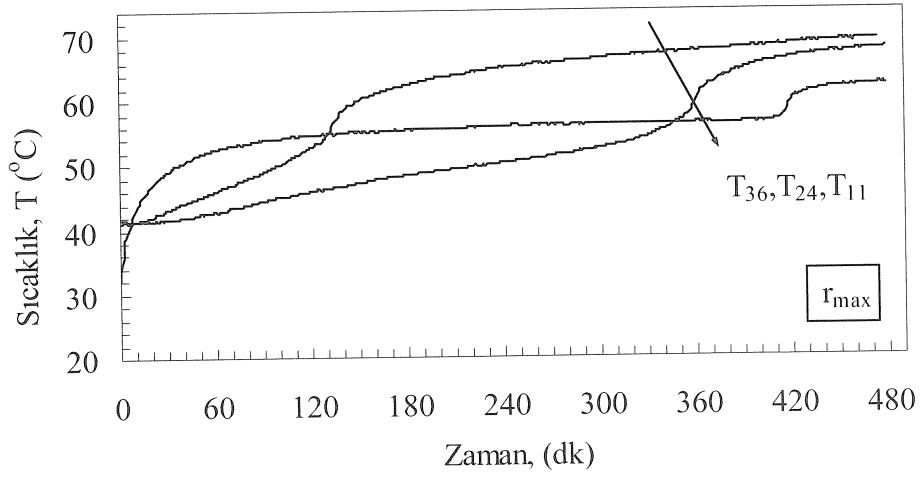
c)

Şekil 3.63. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\Theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$,

$T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

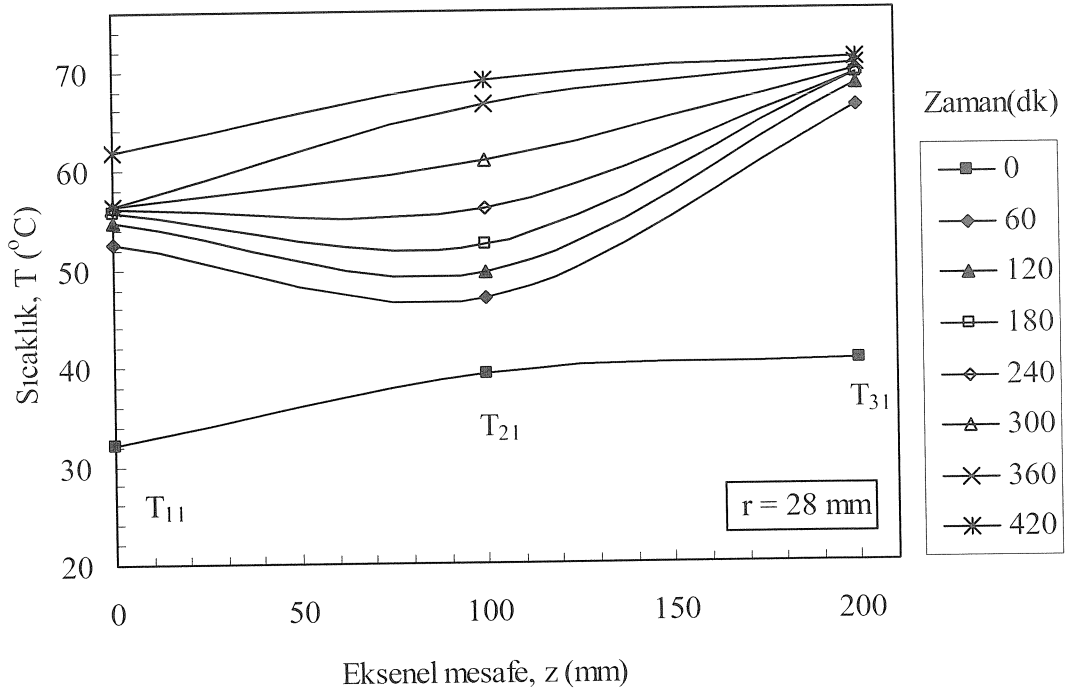


a)

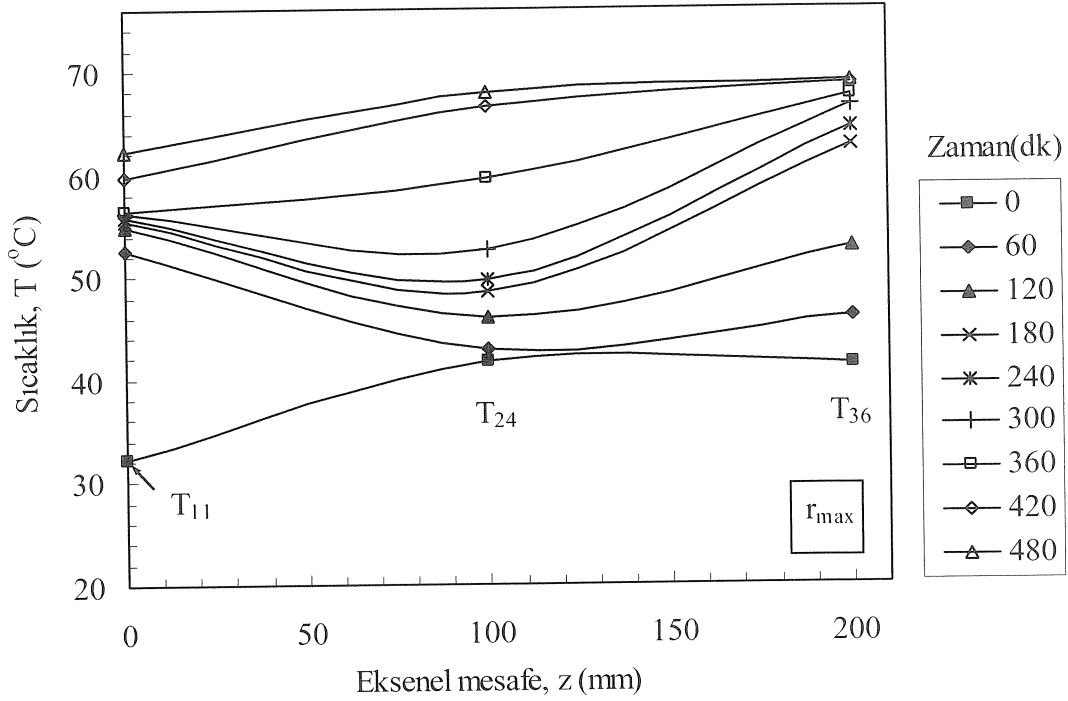


b)

Şekil 3.64. Parafinin (P3) ergimedeki belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $T_g = 75^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

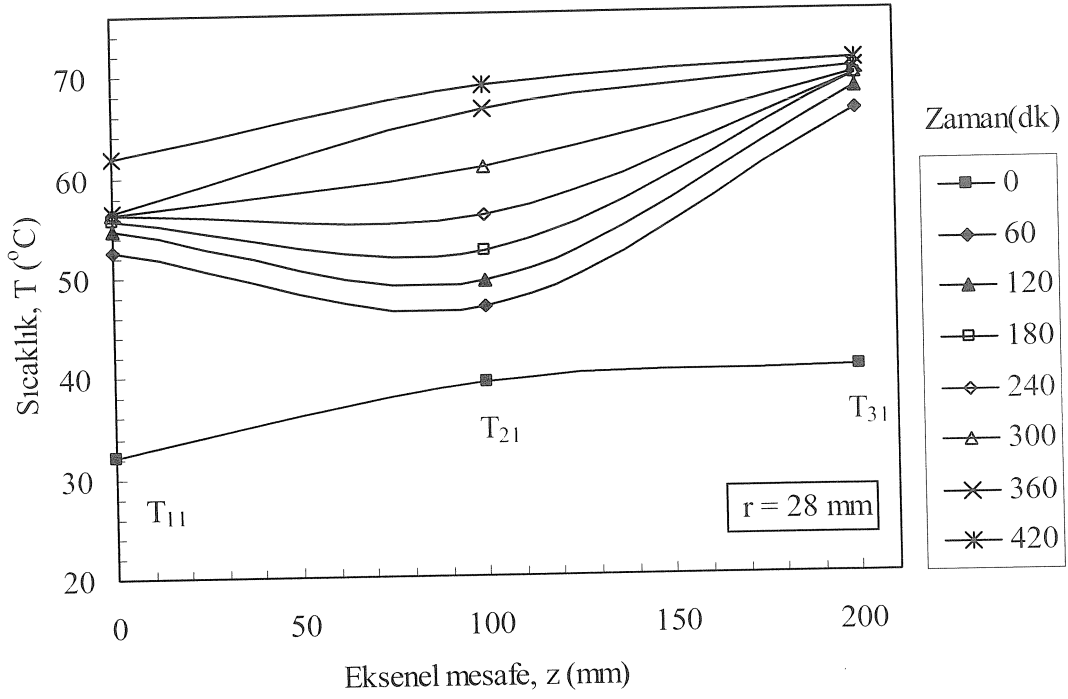


a)

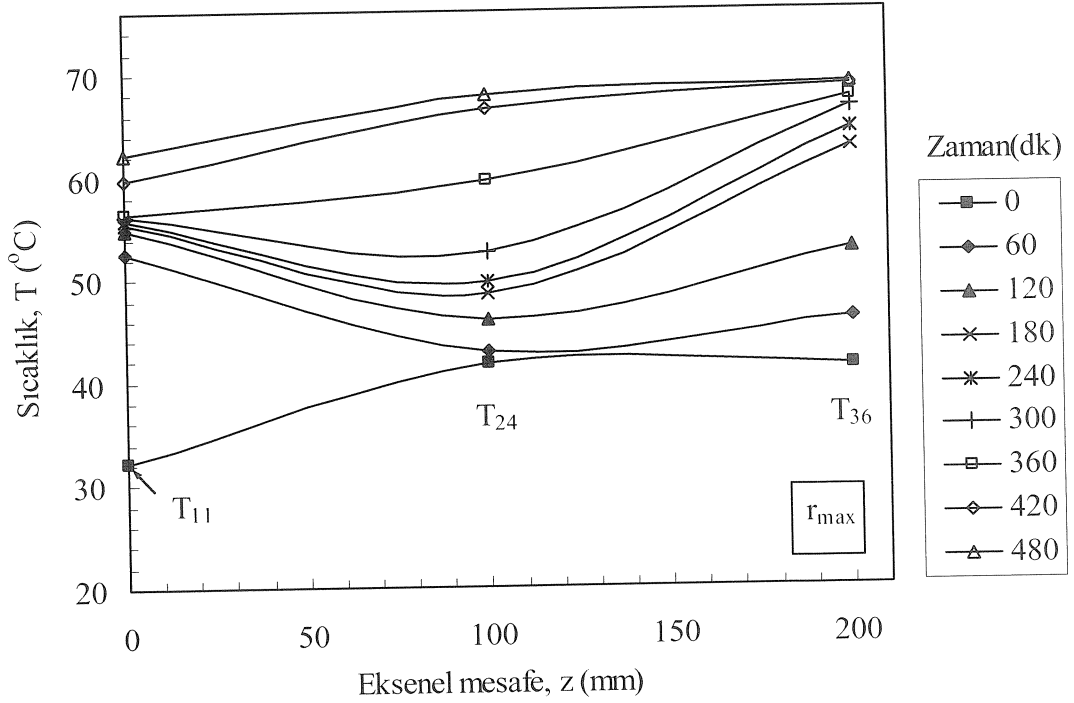


b)

Şekil 3.65. Parafinin (P3) ergirmede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $T_g = 75^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

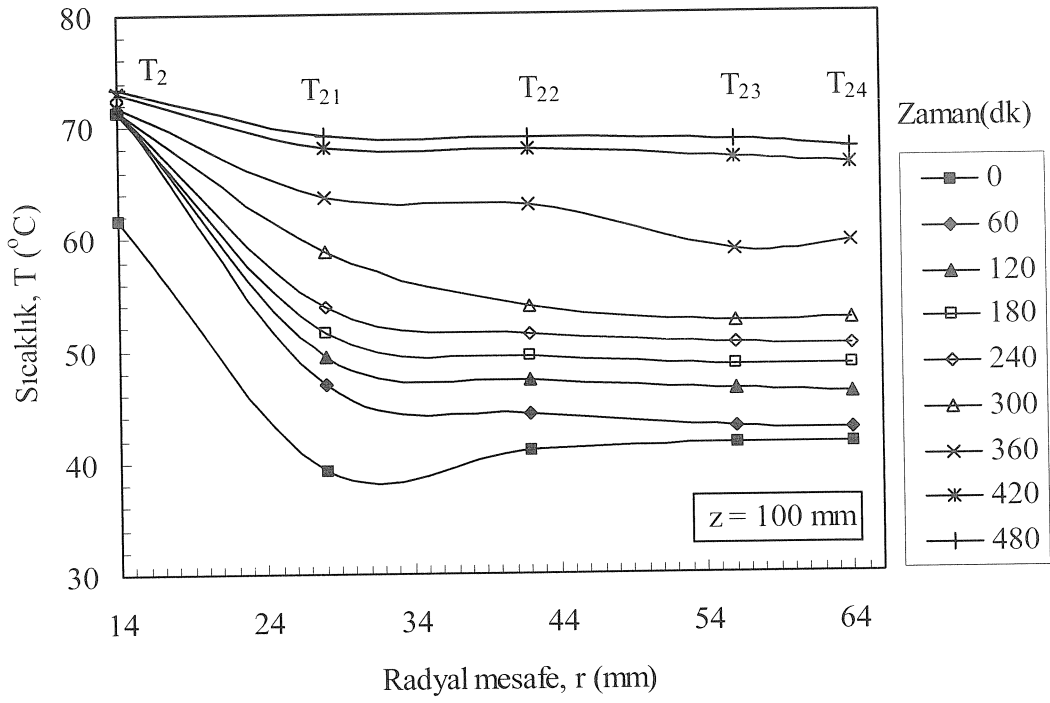


a)

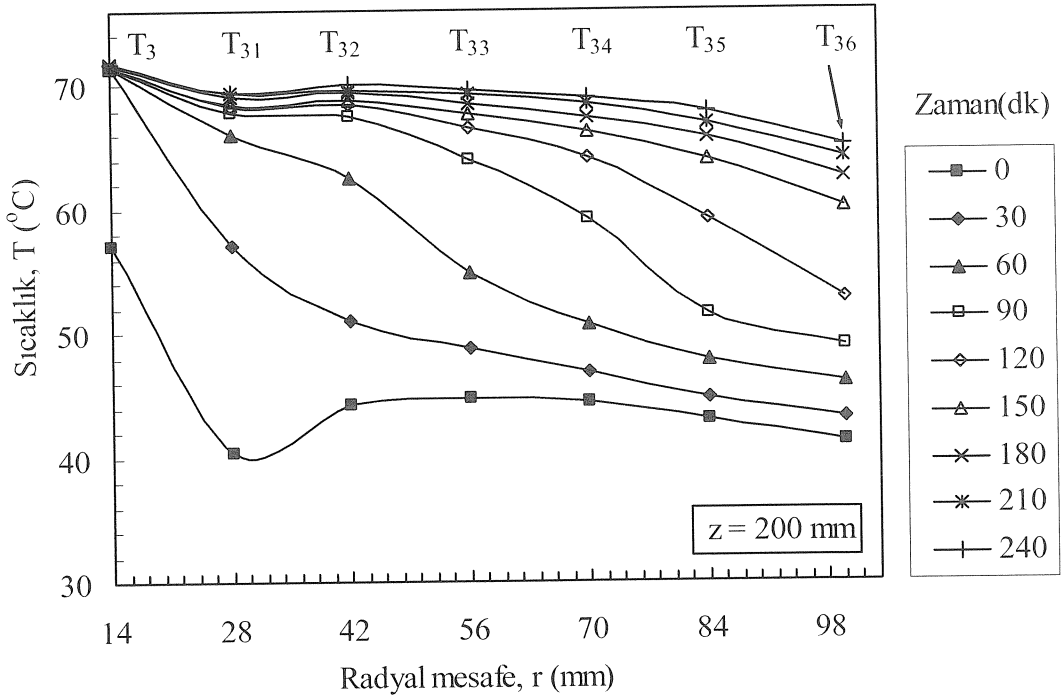


b)

Şekil 3.66. Parafinin (P3) ergirmede belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

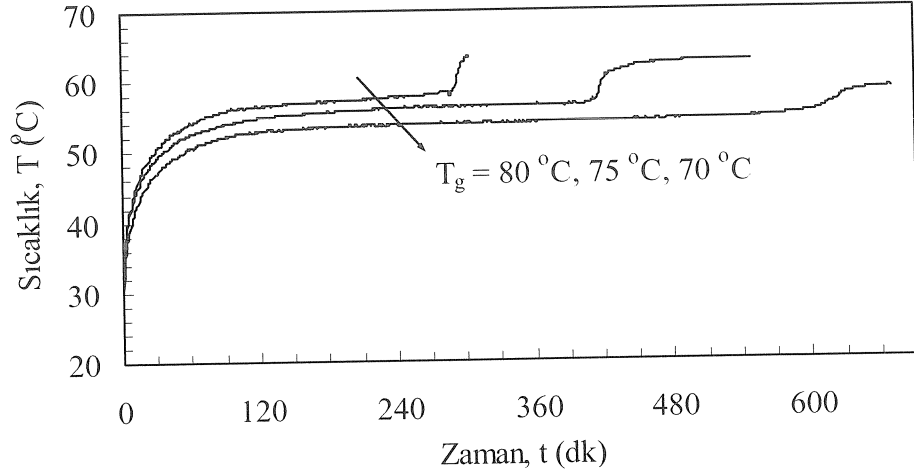


a)

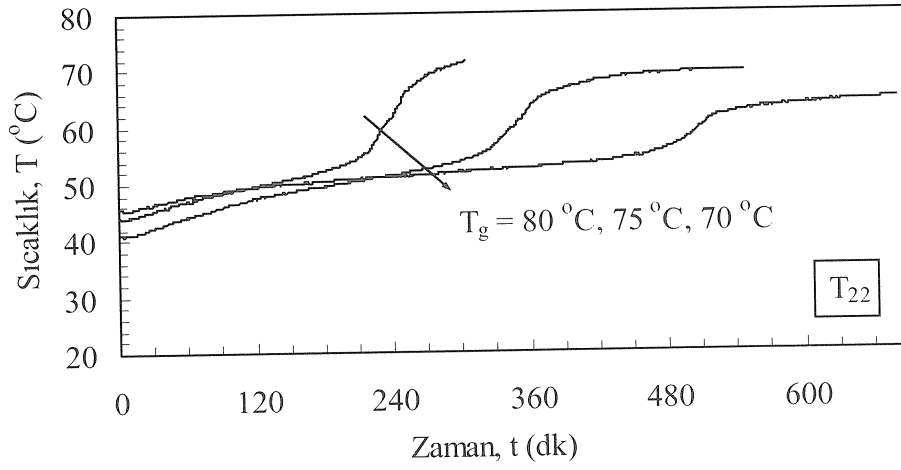


b)

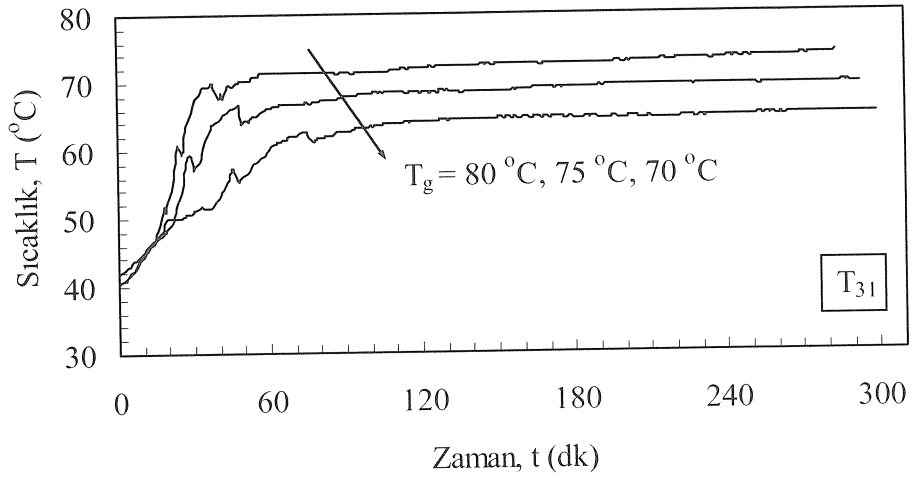
Şekil 3.67. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

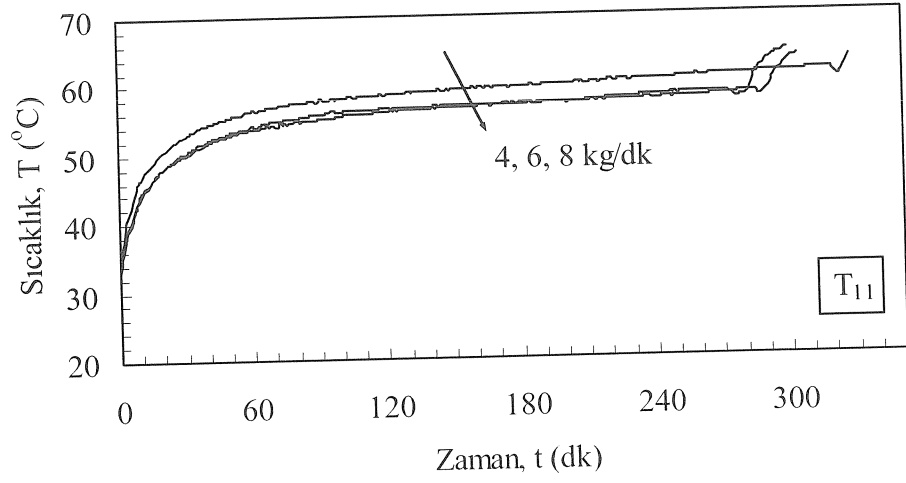


b)

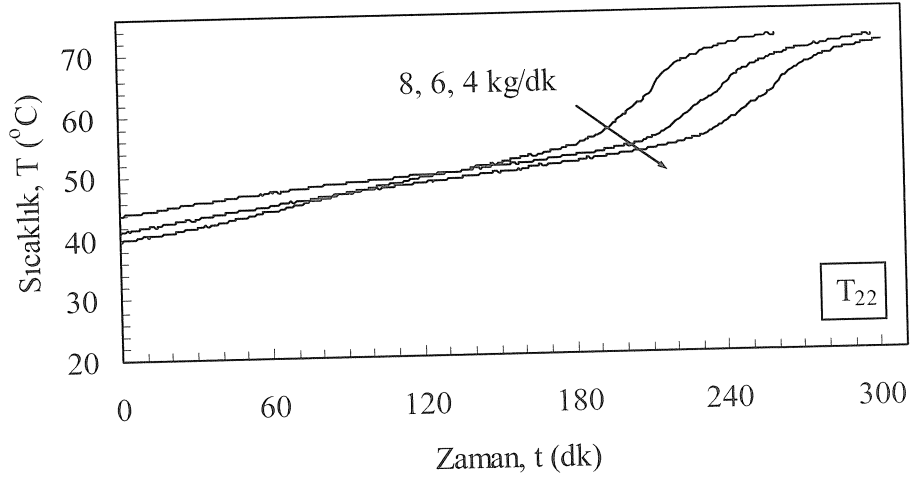


c)

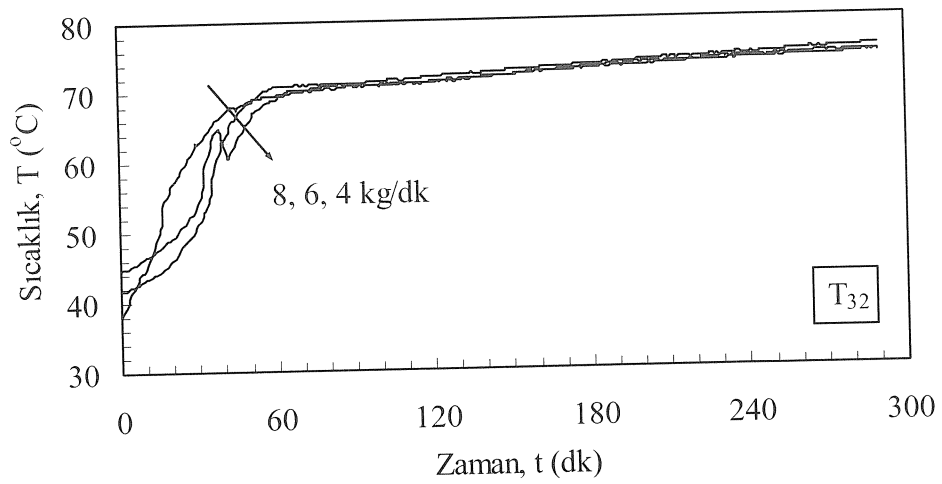
Şekil 3.68. Parafinin (P3) ergirmede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $m = 6$ kg/dk)



a)

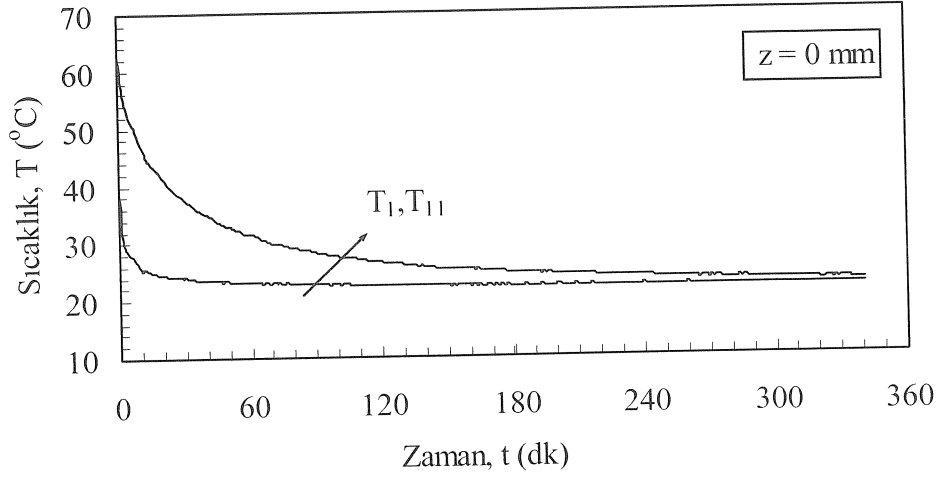


b)

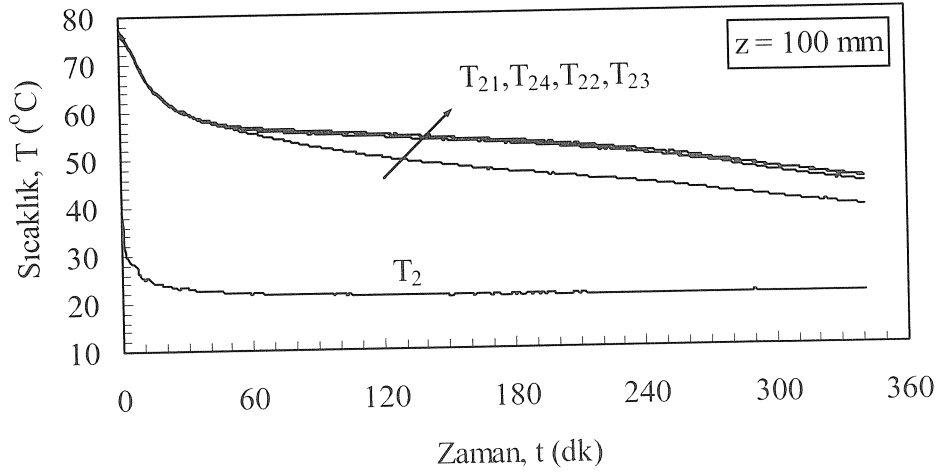


c)

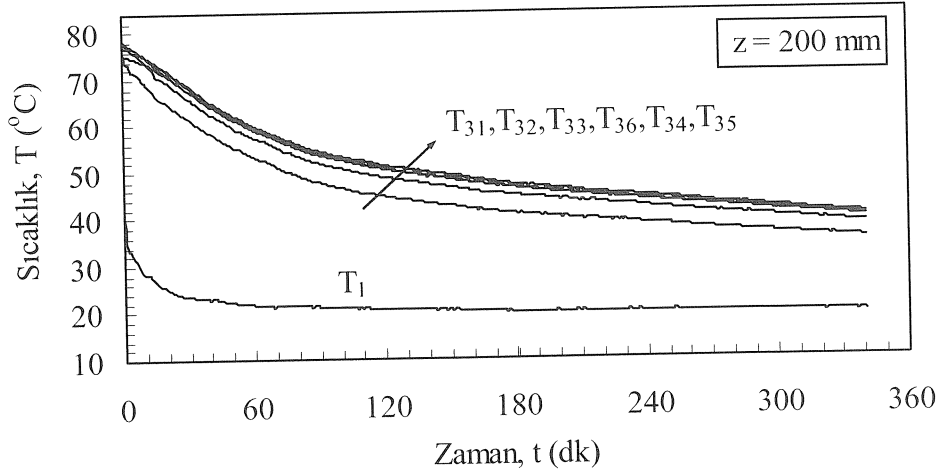
Şekil 3.69. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$)



a)

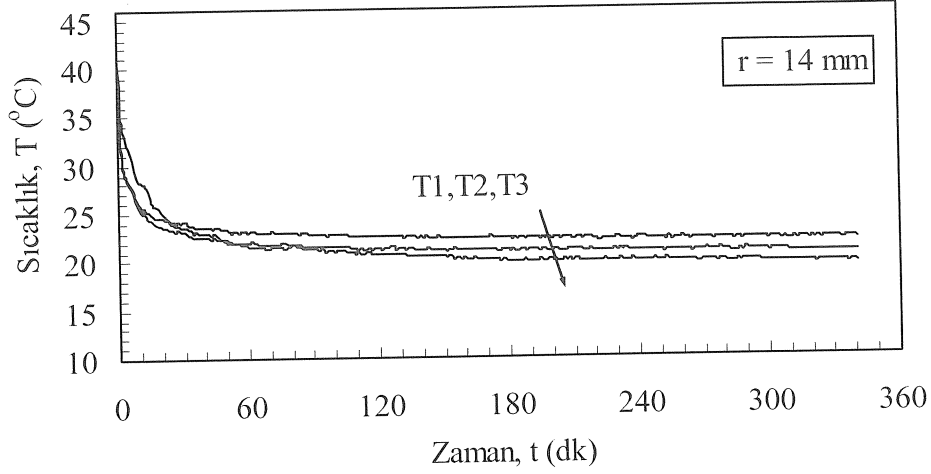


b)

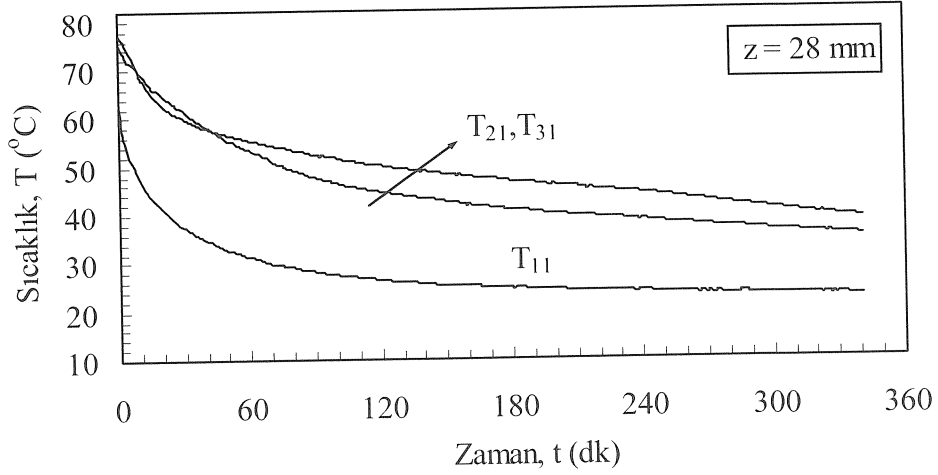


c)

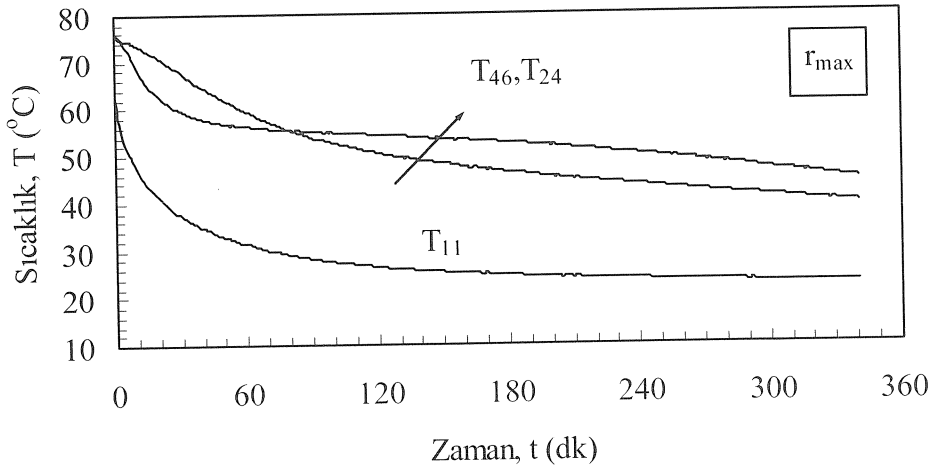
Şekil 3.70. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksel mesafelerde radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 7$ kg/dk)



a)

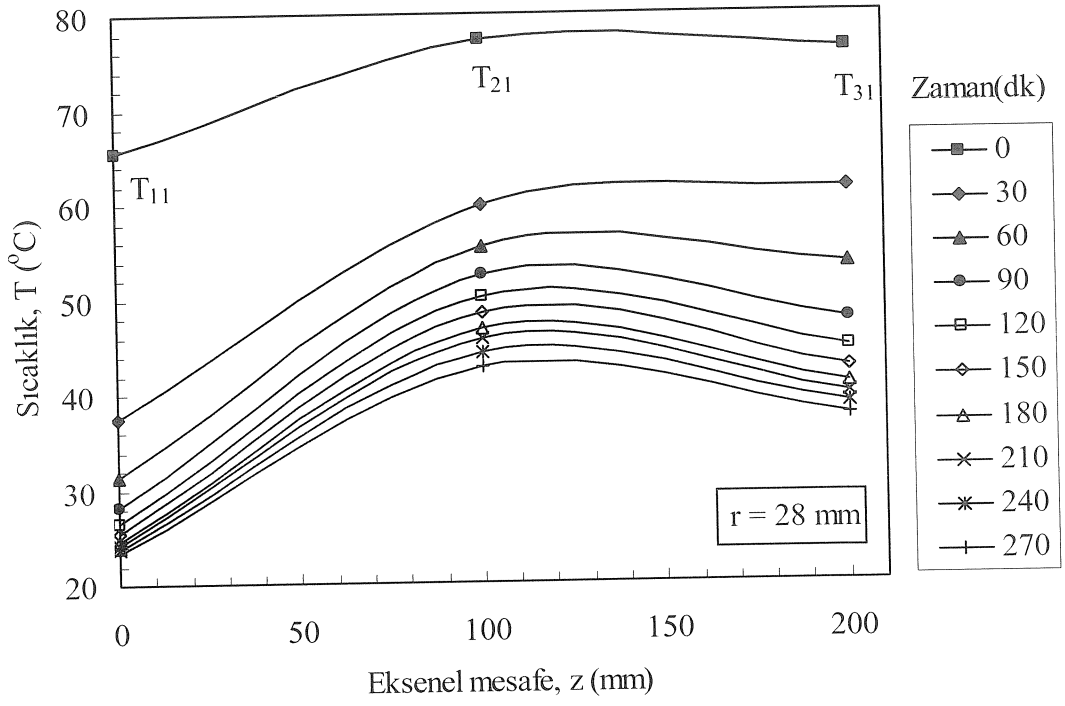


b)

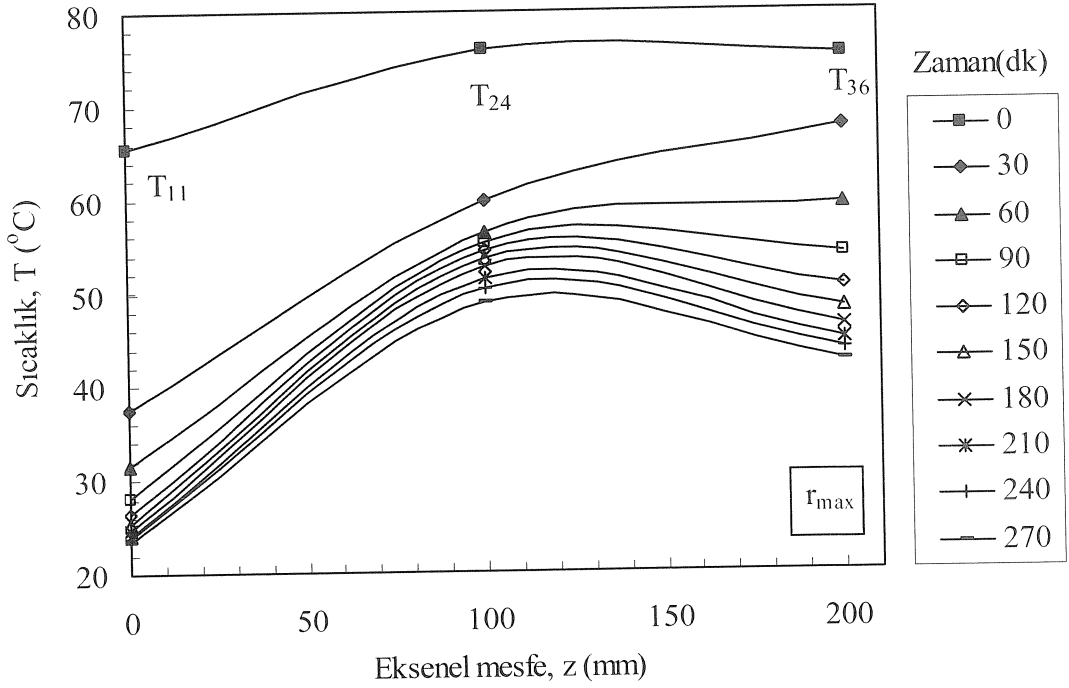


c)

Şekil 3.71. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\Theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 7$ kg/dk)

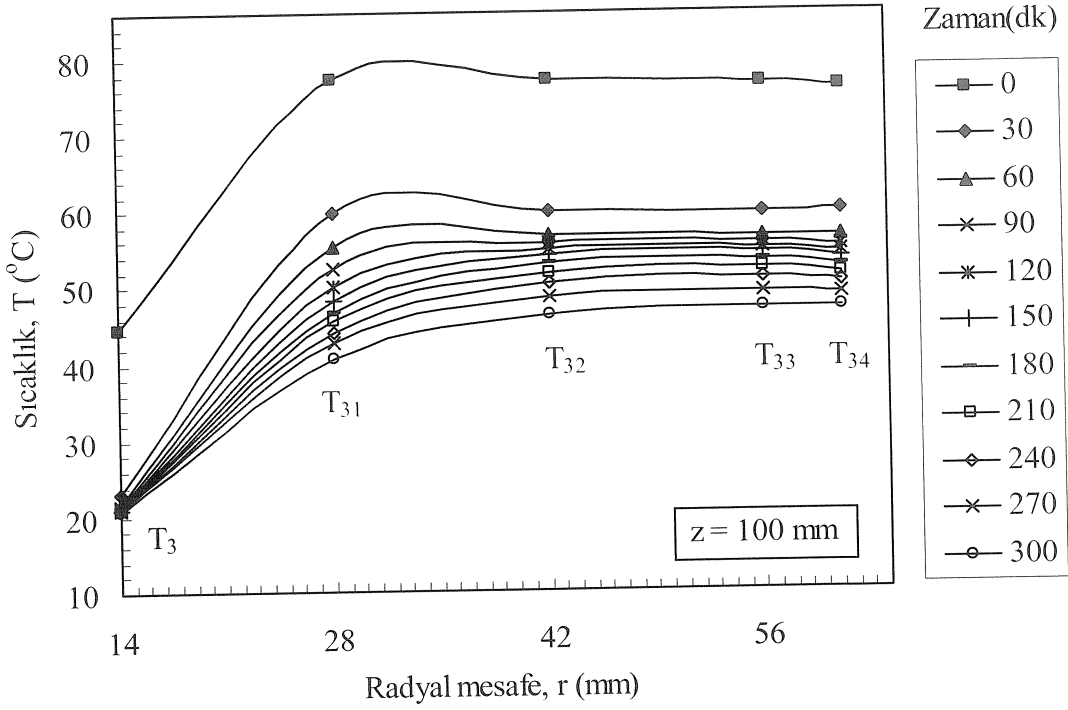


a)

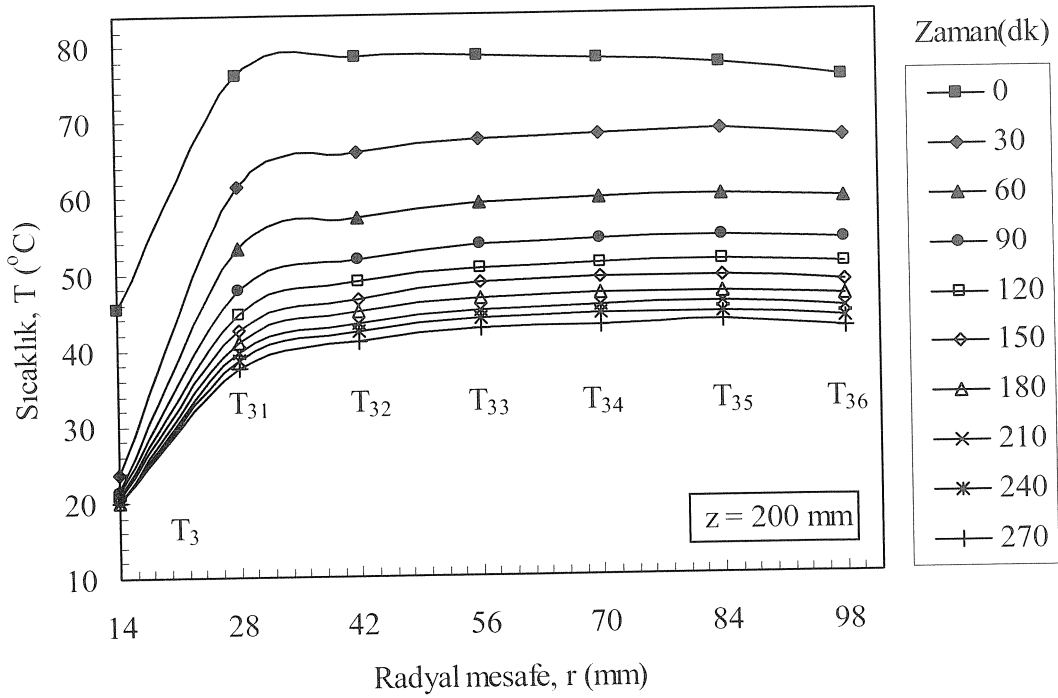


b)

Şekil 3.72. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 7 \text{ kg/dk}$)

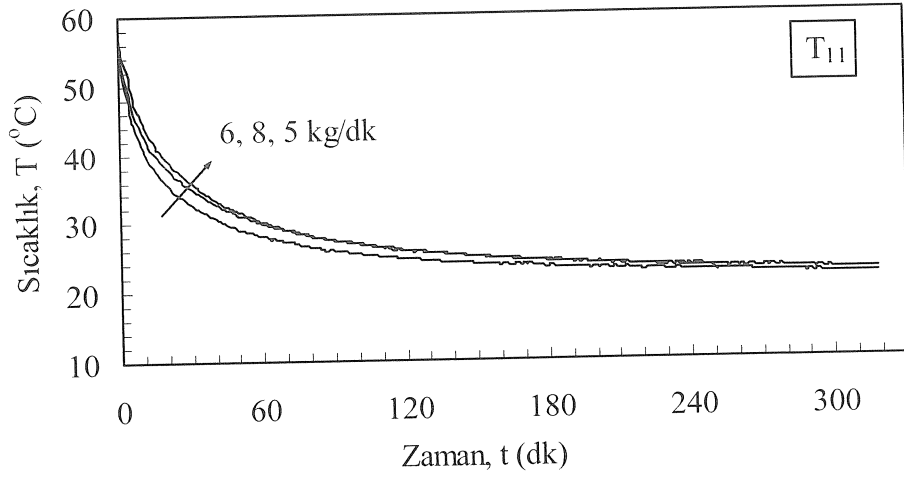


a)

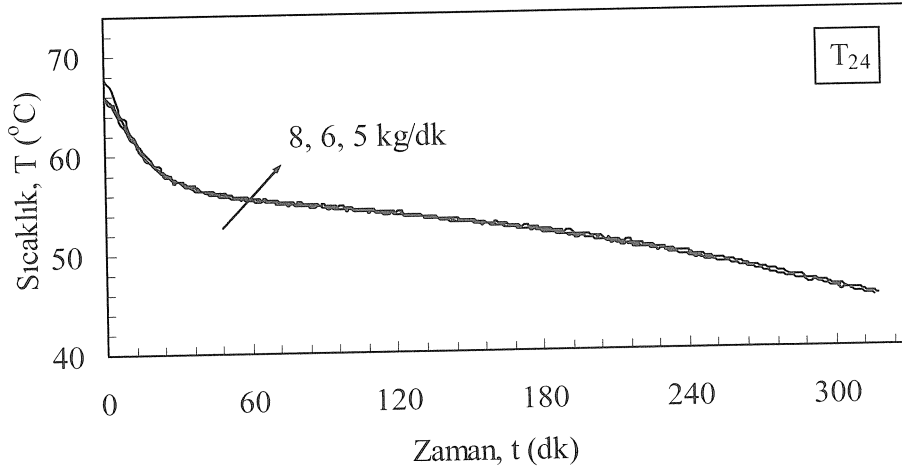


b)

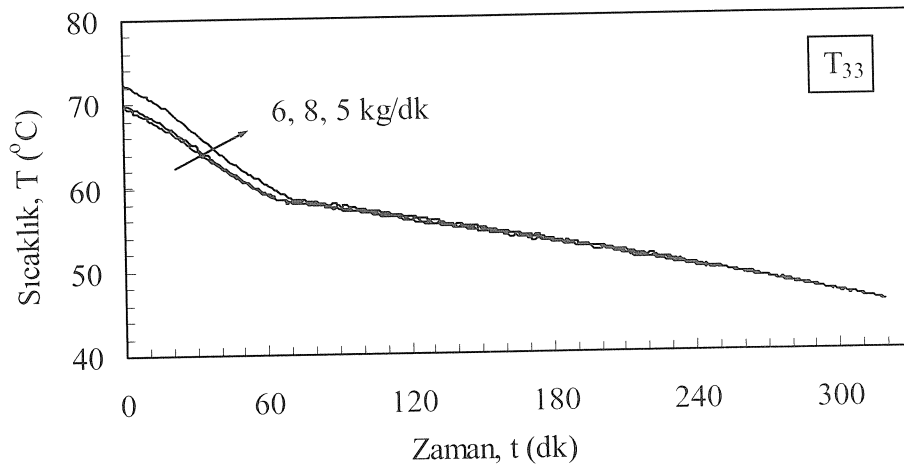
Şekil 3.73. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 7$ kg/dk)



a)

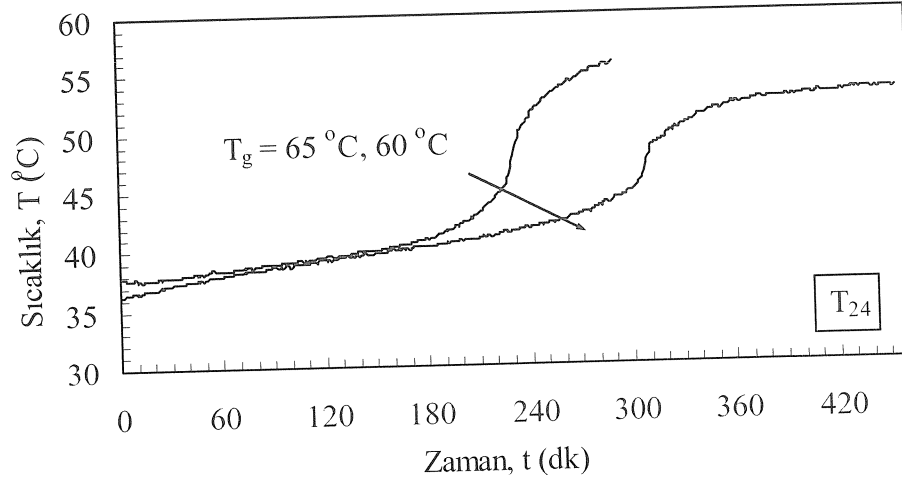


b)

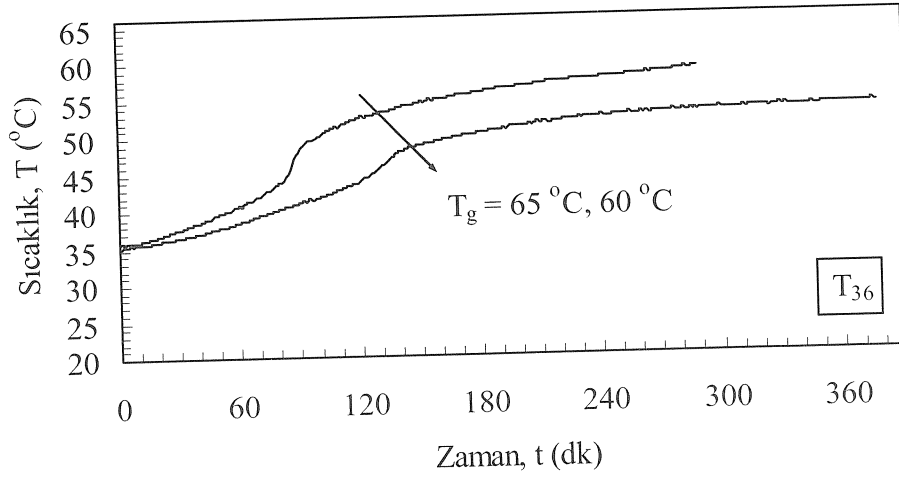


c)

Şekil 3.74. Parafinin (P3) katılaşmada, suyun kütleli debisine bağlı belirli noktalarda sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)

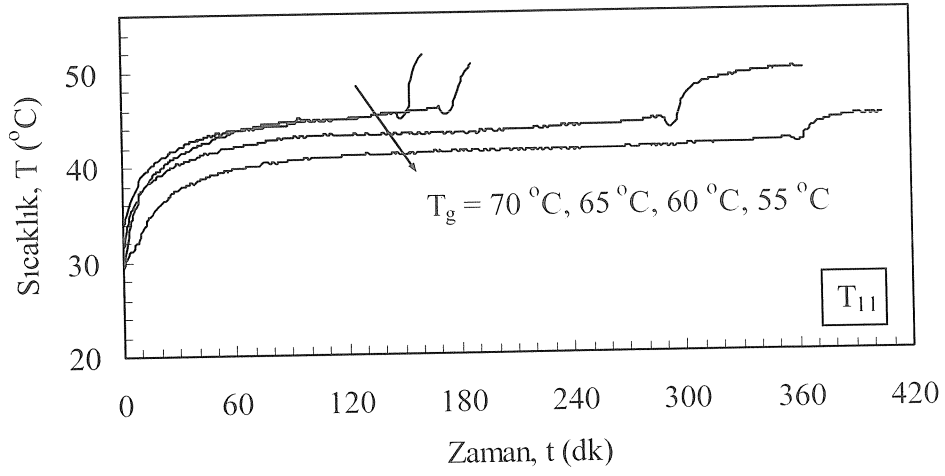


a)

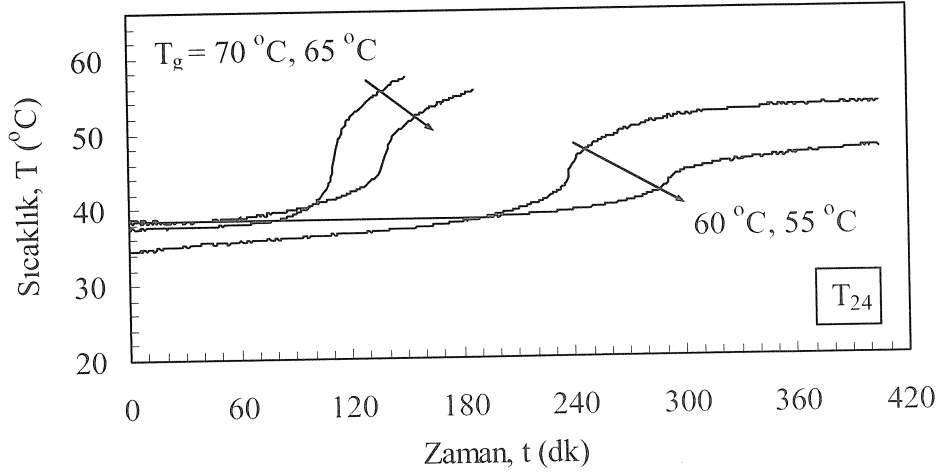


b)

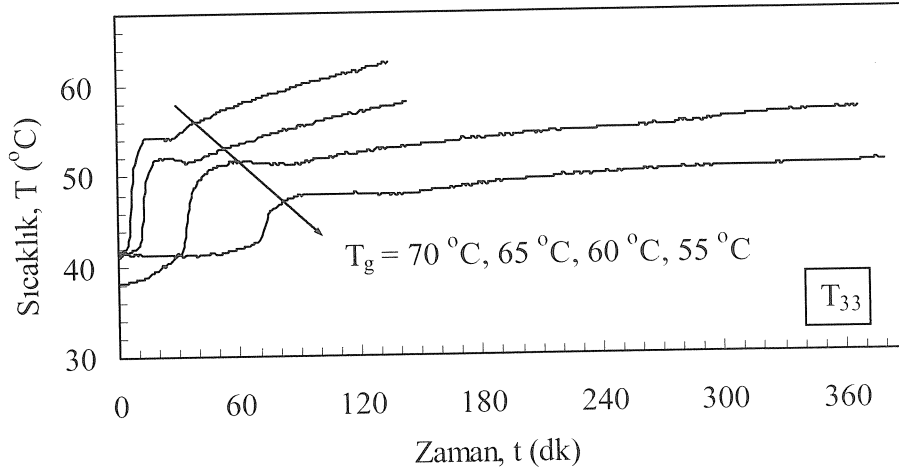
Şekil 3.75. Parafinin (P2) ergimedeki belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $m = 6$ kg/dk)



a)



b)



Şekil 3.76. Parafinin (P1) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 90^{\circ}$, $\theta = 20^{\circ}$, $m = 4 \text{ kg/dk}$)

3.2. Deponun Yatay Konumunda Erime ve Katılaşma

İçerisine parafin yerleştirilen depo, sisteme yatay olarak bağlanmıştır. Deponun içerisinde bırakılan genleşme boşluğu, deponun yatay konumda yerleştirilmesi durumunda aksenal yönde depo üzerinde oluşmaktadır. Sıcaklık lm noktaları radyal yönde deponun tam altına gelecek Şekilde depo sisteme yatay bağlanmıştır. Eriyen parafin, düşük yoğunluğundan dolayı deponun radyal yönde deponun st kısmında toplanmaktadır. Bu çalışmada, deponun yatay konumunda iki tip geometri ile çalışılmıştır: silindirik depo ve kabuk açısı 5° olan depo. Silindirik depoda, FDM olarak P1 ve P3 kullanılırken 5° kabuk açılı depo için P3 kullanılmıştır.

3.2.1. Silindirik Depo (Kabuk açısı, $\theta = 0^\circ$)

Yatay konumda yerleştirilen silindirik deponun içerisindeki parafin P3'n belirli aksenal mesafelerde ve radyal yönde sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.77.(a-f)' de verilmiştir. 3.77.(a)'da $z = 0$ mm'de radyal yöndeki sıcaklık gradyanının deponun düşey konumuna benzer Şekilde birbirine yakın olduğu görülmüştür. 3.77.(b-f)'de parafinin aksenal yöndeki sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak eşit olup, sıcaklık-zaman eğrileri birbirine benzerdir. Tüm aksenal doğrultuda, sıcaklık zaman eğrileri arasındaki kısa süreli açılma $r = 28$ mm'de maddenin faz değişimini tamamlamasından dolayı oluşan sıcaklık atışından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.78.(a-c)'da yatay konumda yerleştirilen silindirik deponun içerisindeki parafin P3'n erimede belirli radyal mesafedeki ($r = 28, 42, 46$ mm) sıcaklık-zaman değişimi verilmiştir. Deponun düşey olarak yerleştirilmesine benzer Şekilde ısı transfer akışkanın depoya giriş bölgesinde ($z = 0$ mm) parafinin sıcaklığı hızla katı-sıvı faz değişim sıcaklığına çıkmış ve aynı aksenal doğrultuda madde faz değişimini tamamlayana kadar yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Düşey konumda yerleştirilen depolardan farklı olarak, yatay konumlanmış depoda faz değişimi sırasında $z = 0$ nokta sıcaklığını aynı eksendeki diğer noktalarda okunan sıcaklıkların daha kısa sürede geçtiği görülmüştür. Böylece, aksenal yönde faz değişim zamanları arasında farkın çok olmadığı belirlenmiştir.

Yatay konumda yerleştirilen silindirik deponun içerisindeki parafin P3'n belirli radyal mesafedeki ($r = 28, 42$ mm) zaman bağlı olarak sıcaklık-aksenal mesafe değişimi Şekil 3.79.(a-b)' de verilmiştir. Şekillerden, faz değişimine kadar olan zamanlarda

parafinin sıcaklığı T_{11} ve T_{12} sıcaklığının altında iken, sonraki zaman adımlarında bu bölge sıcaklığını geçerek yaklaşık sabit kaldığı anlaşılmaktadır.

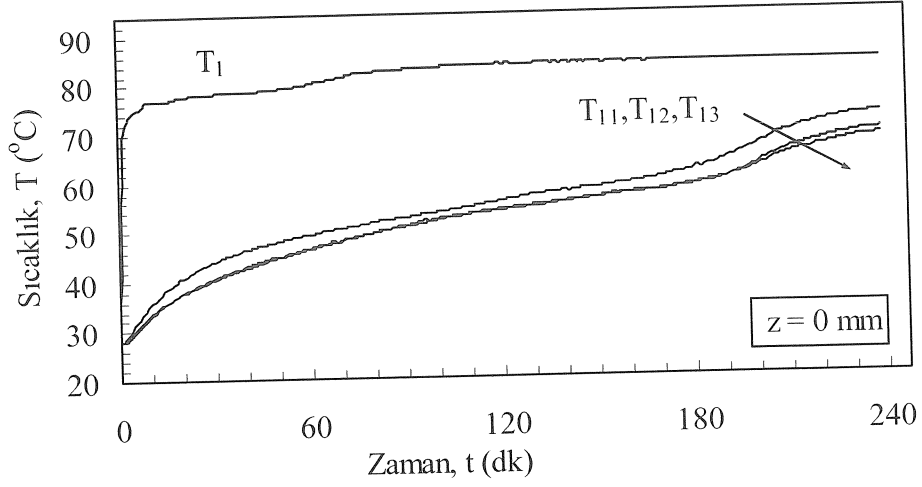
Parafin P3'ün belirli aksenal mesafedeki ($z = 100, 300, 421$ mm) zaman bağı olarak sıcaklık-radyal mesafe değişimi Şekil 3.80.(a-c)'de verilmiştir. Akışkan borusundan $r = 28$ mm'ye kadar parafinin sıcaklığı hızla düşerken bu mesafeden sonra radyal sıcaklık değişimi faz değişim zamanı hariç ($t = 150-180$ dk.) yaklaşık olarak sabit olduğu şekilden anlaşılmaktadır.

Şekil 3.81.(a-c)'de yatay silindirik termal depolamada, akışkan giriş sıcaklığının parafinin sıcaklık-zaman değişimine etkisi verilmiştir. Burada beklenildiği üzere, akışkan giriş sıcaklığının artışı erime zamanı üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Ancak bu etki, düşey silindirik depolamada olduğu gibi belirgin değildir. Sıcaklık-zaman eğrileri üzerinde faz geçiş bölgeleri tam belirgin olmasa da, akışkan giriş sıcaklıklarına bağlı olarak parafinin sıcaklık dağılımları birbirine benzer davranış göstermektedir.

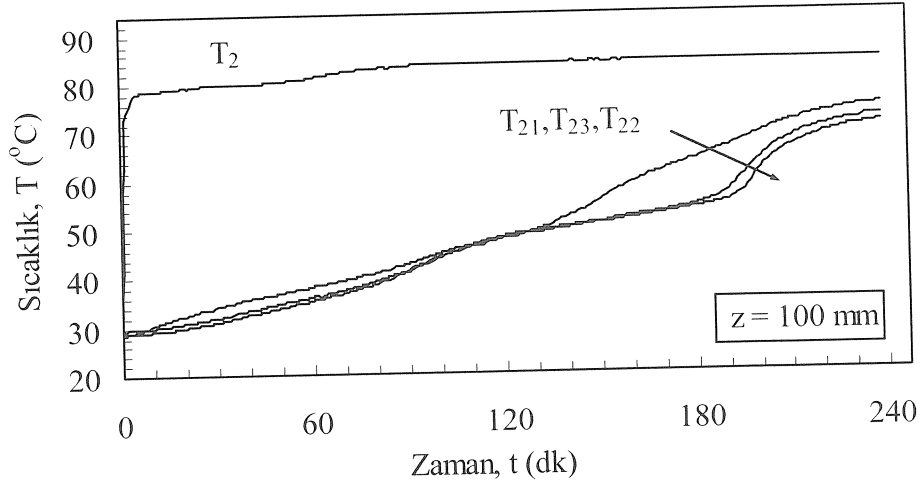
Yatay konumda yerleştirilen silindirik deponun içerisindeki parafin P3'ün deşarj işleminde belirli aksenal noktalarda, radyal yönde sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.82.(a-f)'de verilmiştir. 3.82.(a) incelendiğinde, $z = 0$ mm'de radyal yöndeki sıcaklık gradyanının devamlı azalan yönde olduğu görülmüştür. 3.82.(b-f)'de görüldüğü gibi, parafinin aksenal yöndeki sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak benzerdir ve $z = 28$ mm'ye kadar, sıvı-katı faz değişimi sırasında da sıcaklık depo içerisinde sabit olup, bu değişimden sonra parafinin sıcaklığı zamanla akışkan sıcaklığına doğru inmektedir.

Deşarj işleminde belirli radyal mesafelerde aksenal yönde sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.83.(a-c)'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $z = 0$ mm'de parafinin sıcaklığı hızla sıvı-katı faz değişim sıcaklığının altına inmekte, diğer noktalarda Şekil 3.82.'de belirtildiği gibi sıvı-katı faz değişimi sırasında uzun süre sabit kalmakta ve sonra faz değişimini tamamlayan bölgelerdeki parafinin sıcaklığı soğutucu akışkan sıcaklığına zamanla erişmektedir.

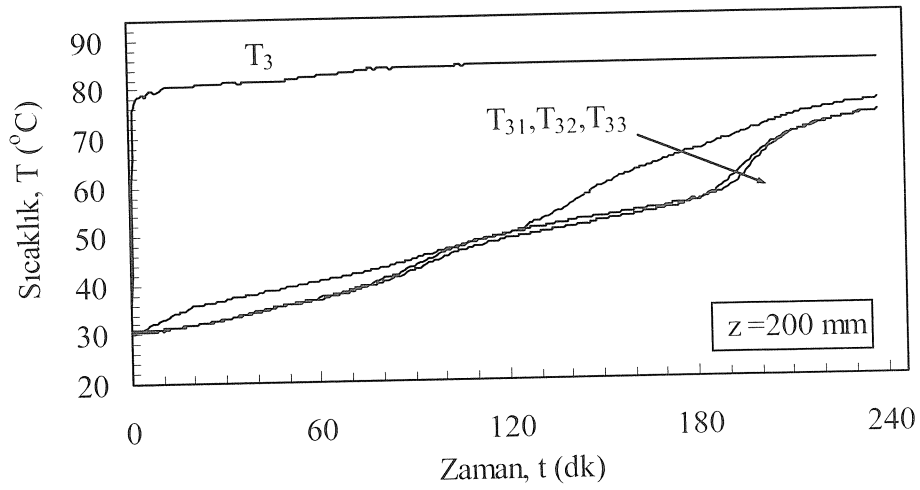
Şekil 3.84.(a-c) ve Şekil 3.85.(a-c)'de belirli zaman adımlarında aksenal ve radyal mesafe sıcaklık değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, depolamanın tersi olarak çok kısa sürede (30 dk.) parafin faz değişim sıcaklığına inmekte, bir süre bu sıcaklıkta kalmakta ve ilerleyen zamanlarda deponun altı ve üstündeki sıcaklıklar daha hızlı düşmektedir.



a)



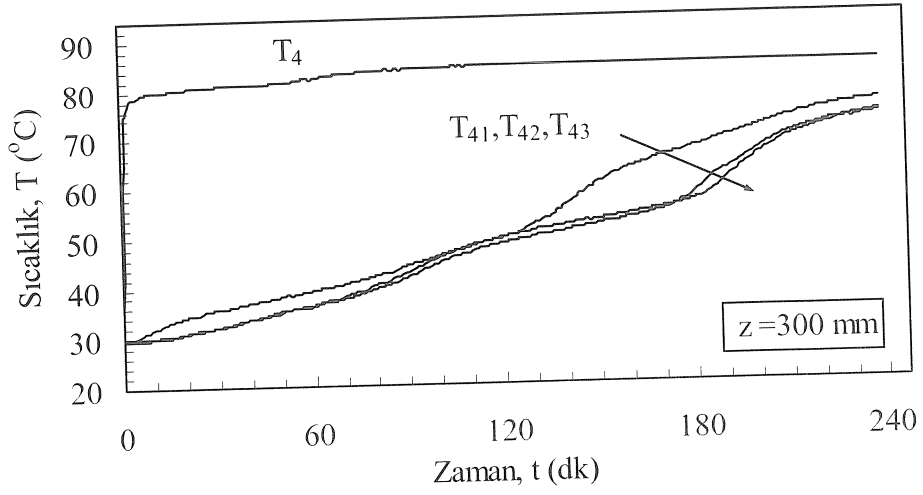
b)



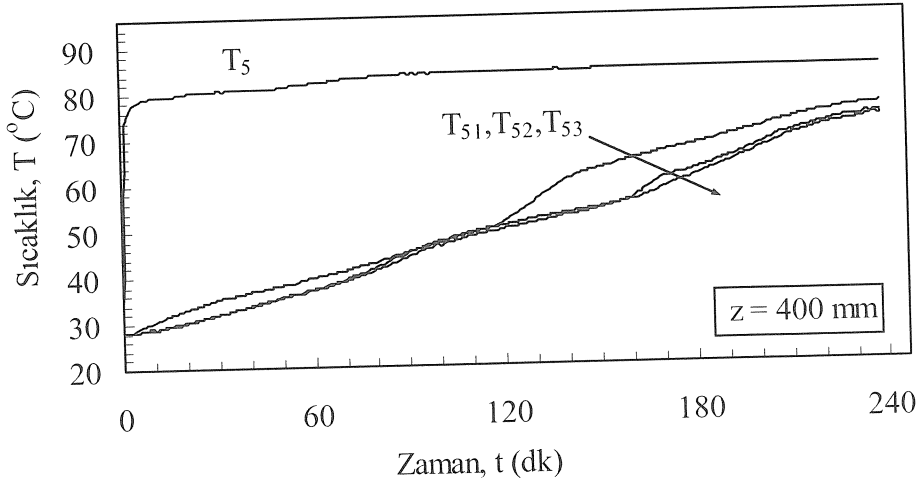
c)

Şekil 3.77. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

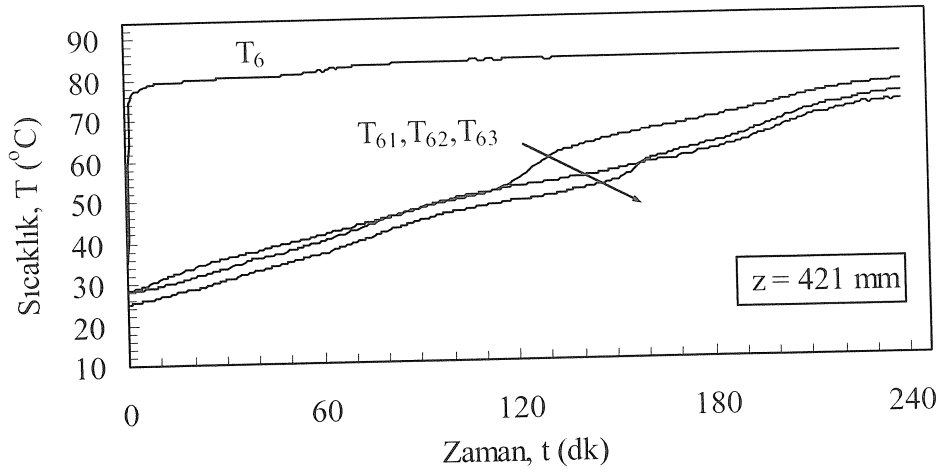
Şekil 3.77'nin devamı



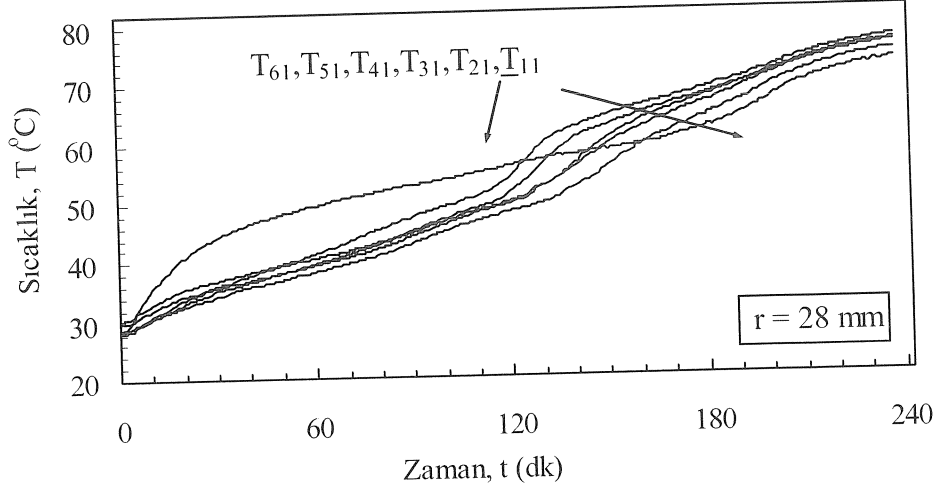
d)



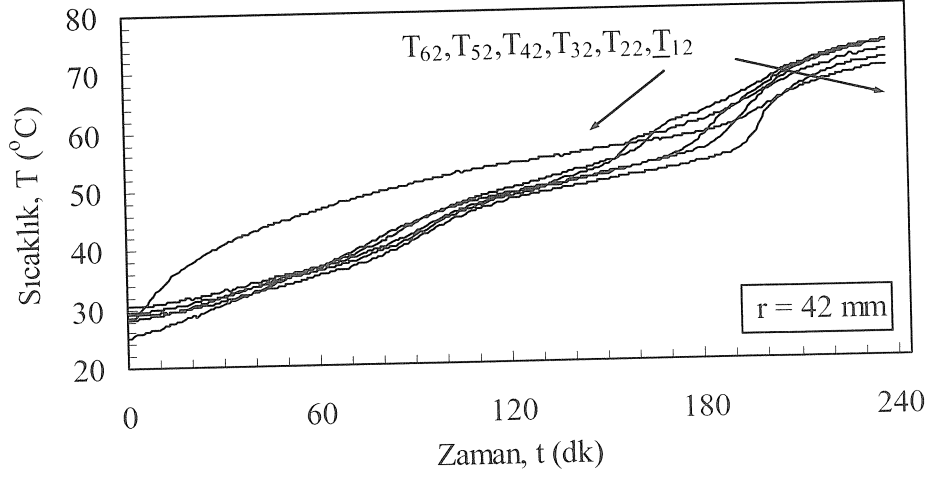
e)



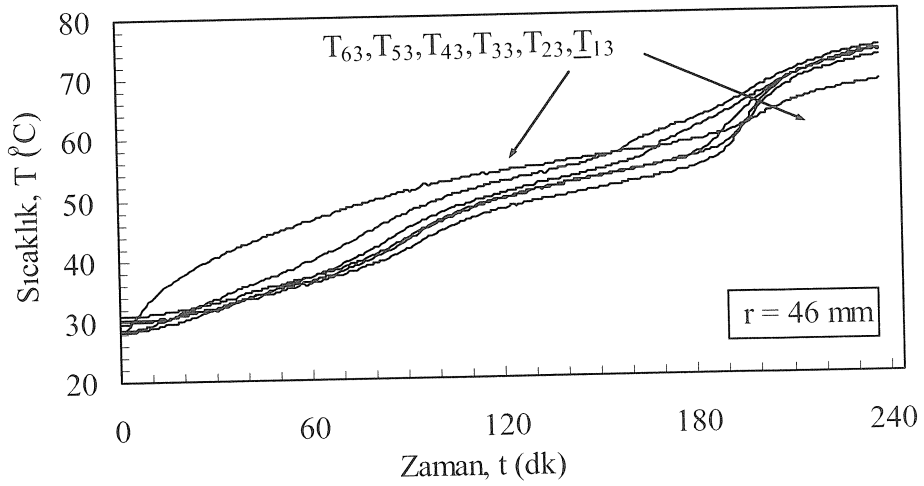
f)



a)

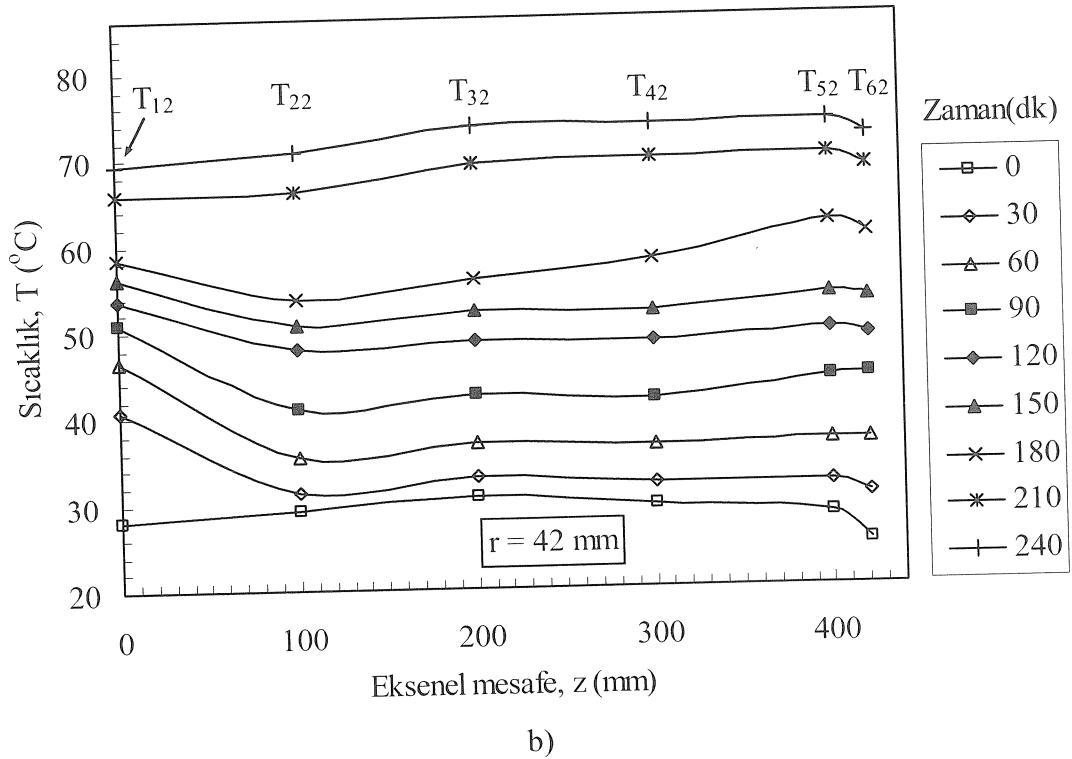
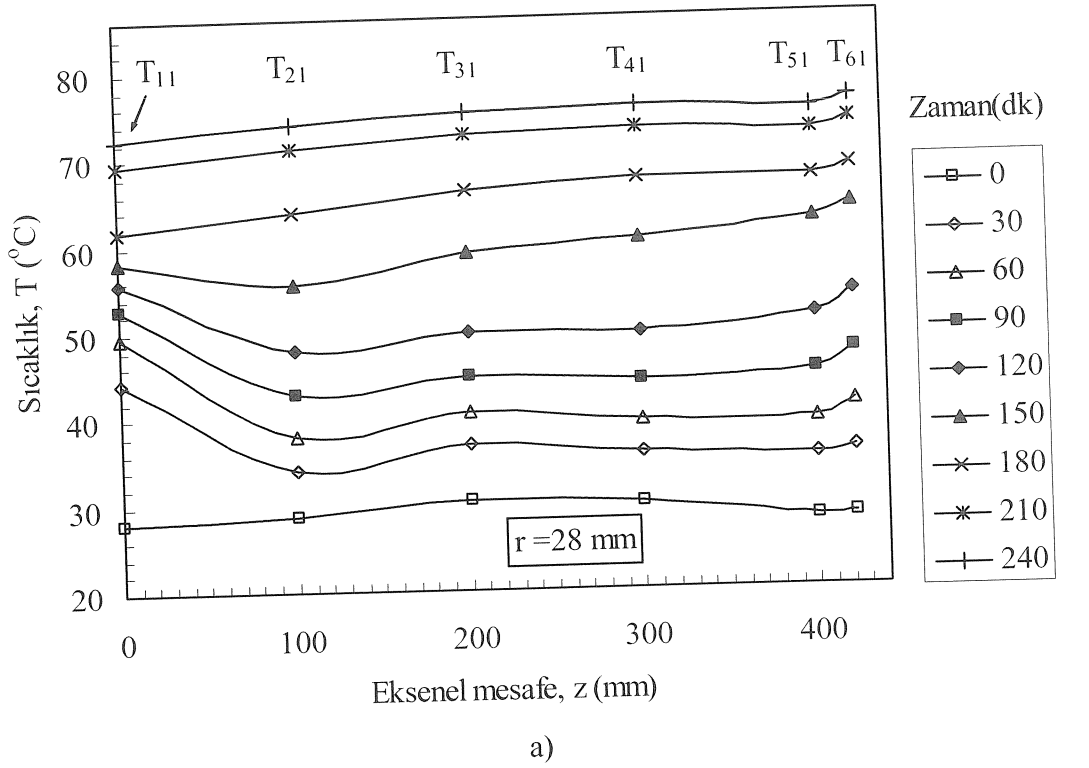


b)

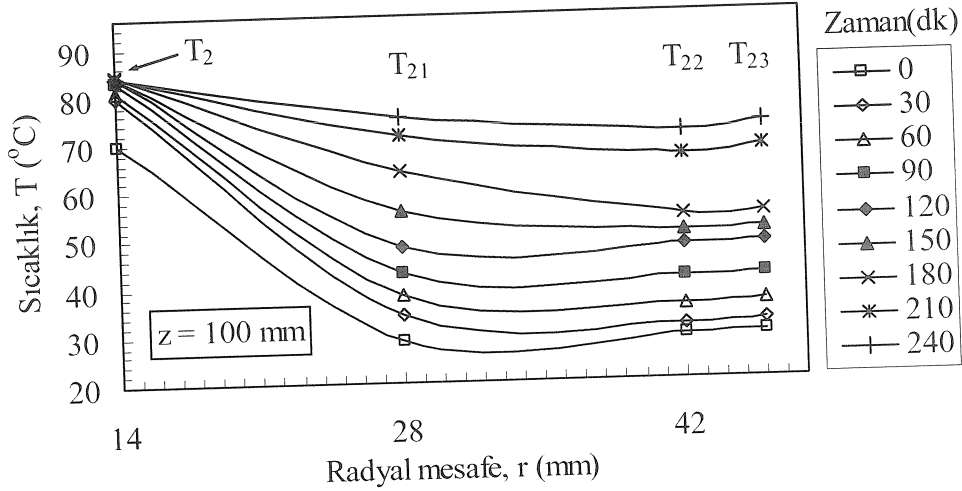


c)

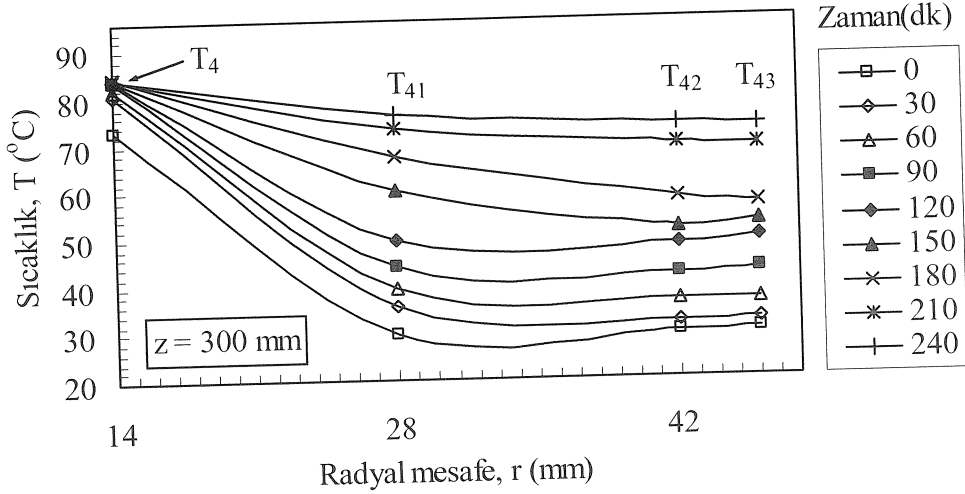
Şekil 3.78. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)



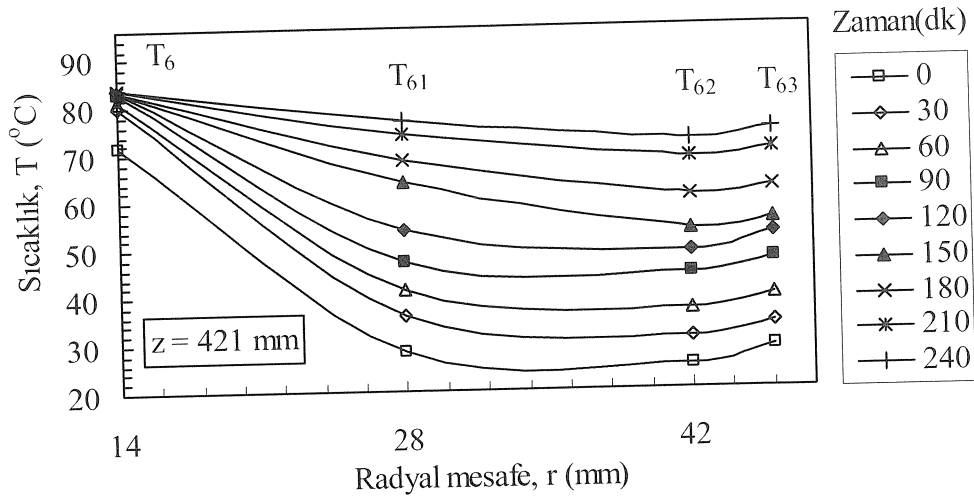
Şekil 3.79. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\phi = 0^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

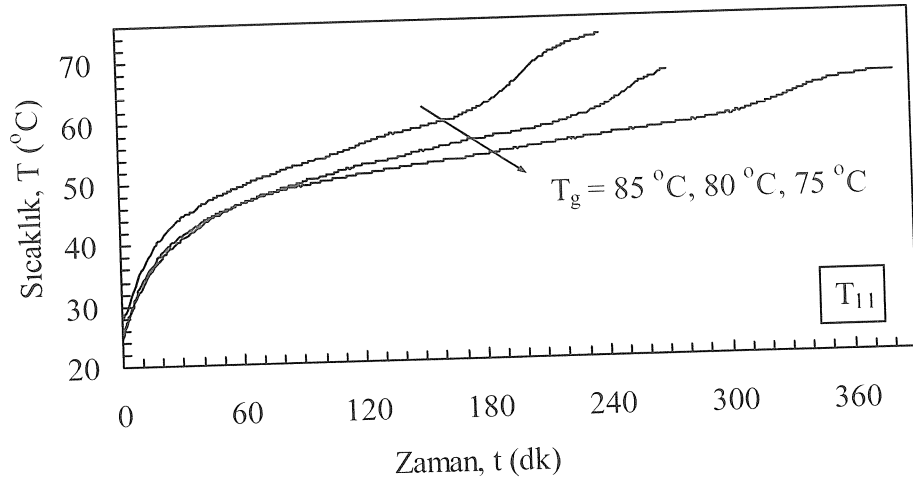


b)

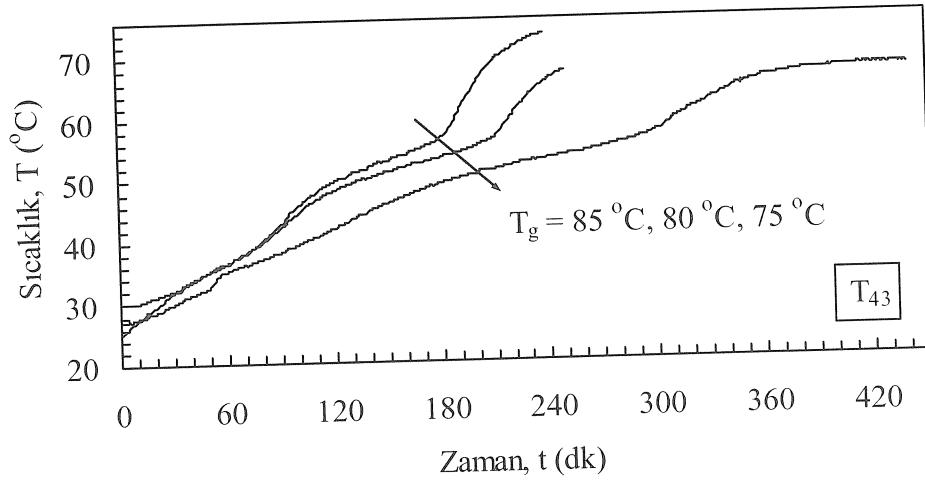


c)

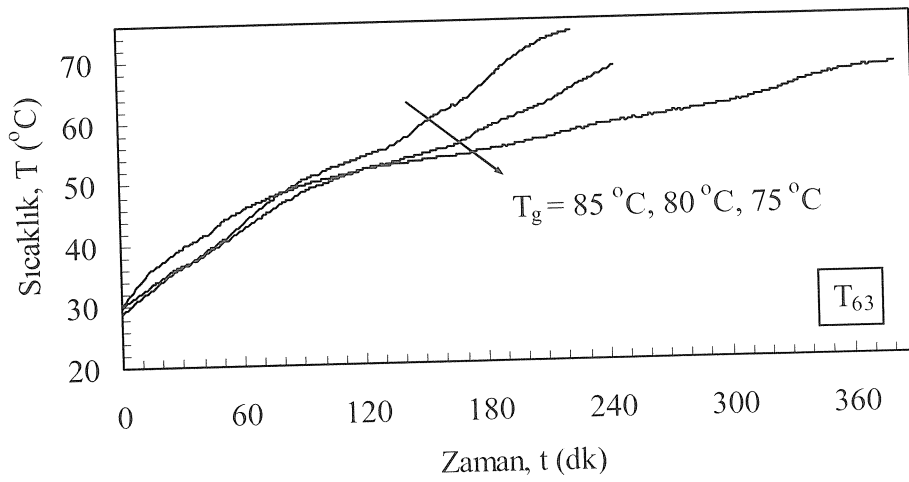
Şekil 3.80. Parafinin (P3) ergimedeki belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

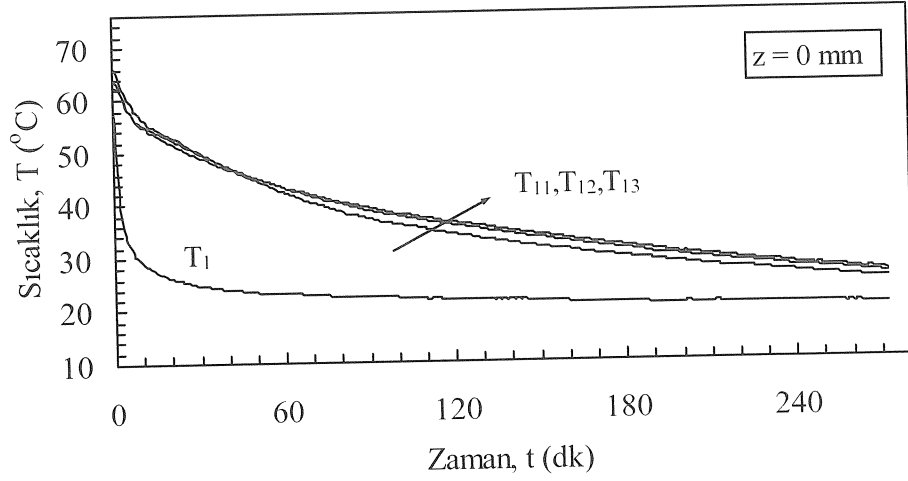


b)

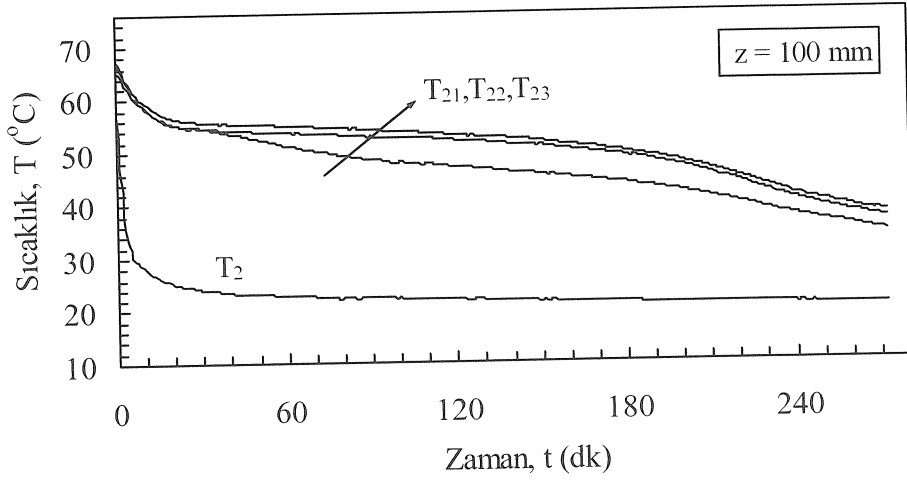


c)

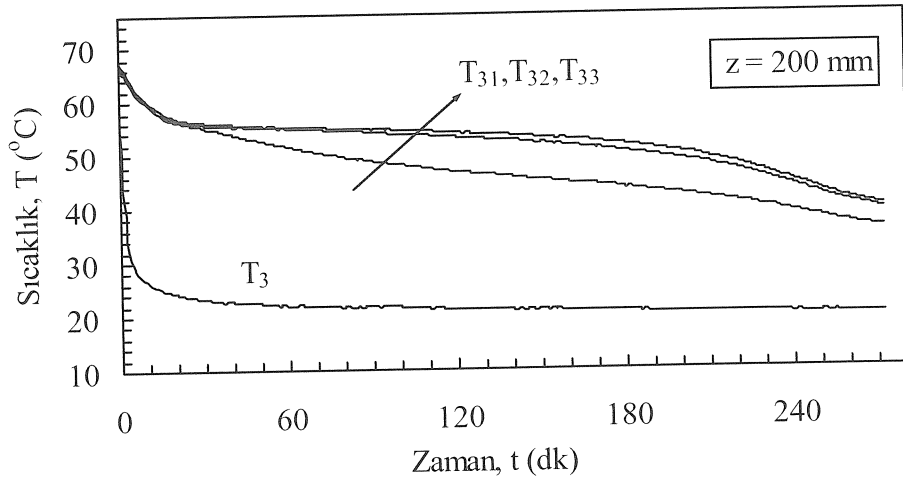
Şekil 3.81. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



a)



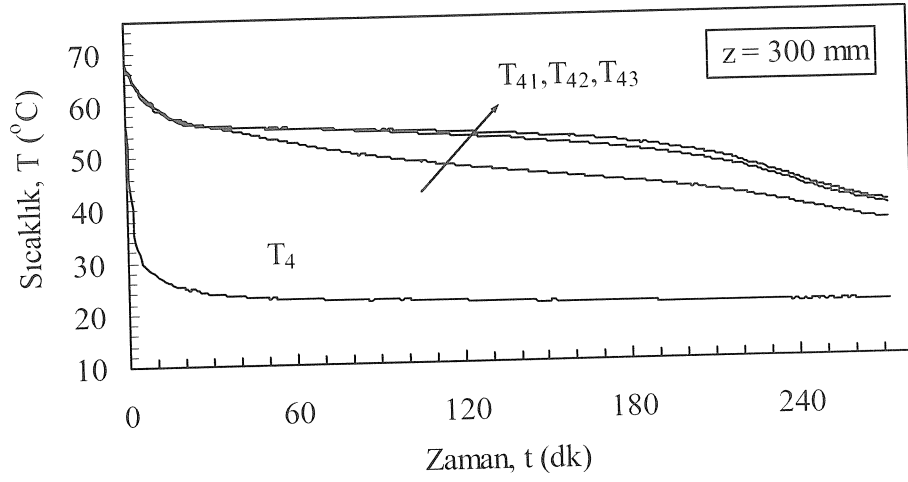
b)



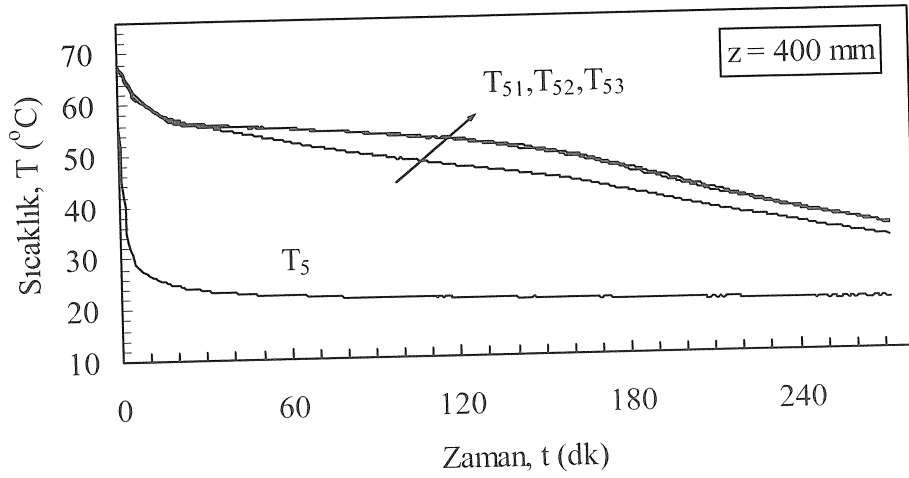
c)

Şekil 3.82. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 4 \text{ kg/dk}$)

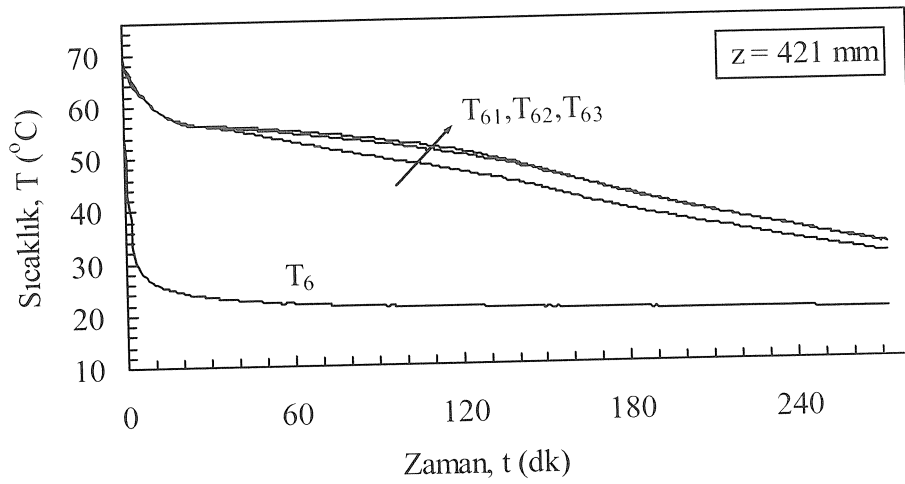
Şekil 3.82.'nin devamı



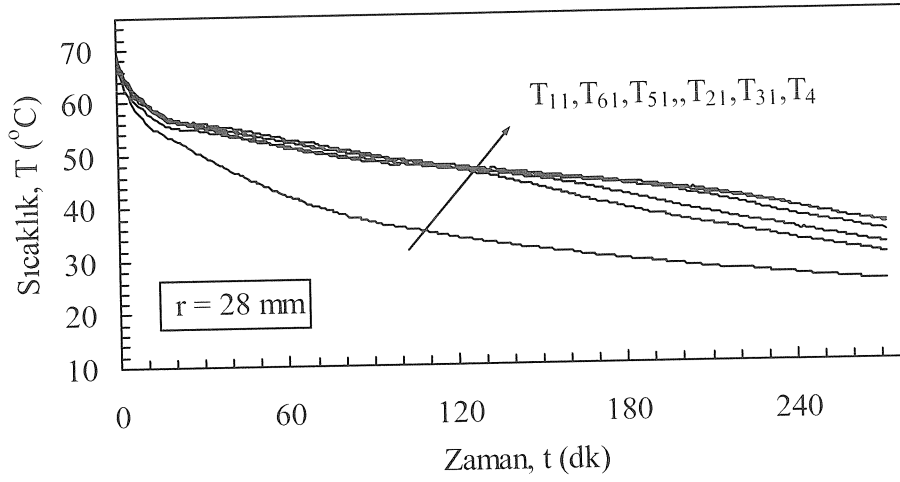
d)



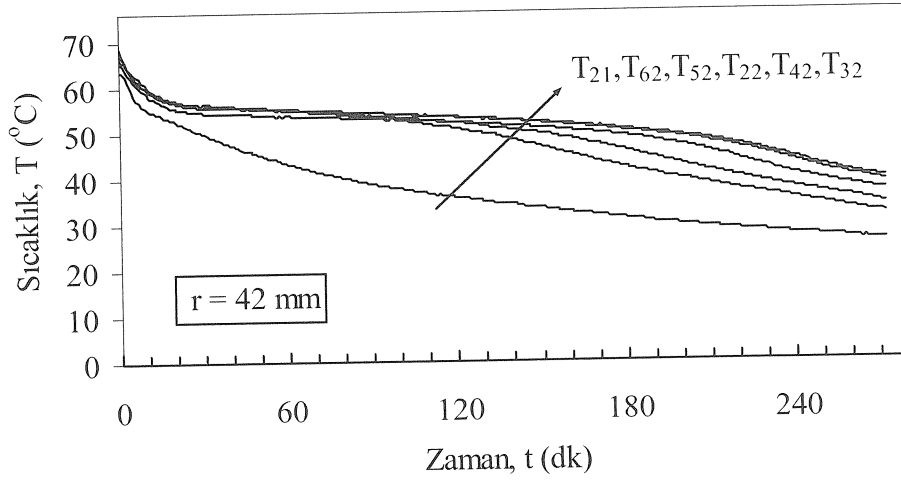
e)



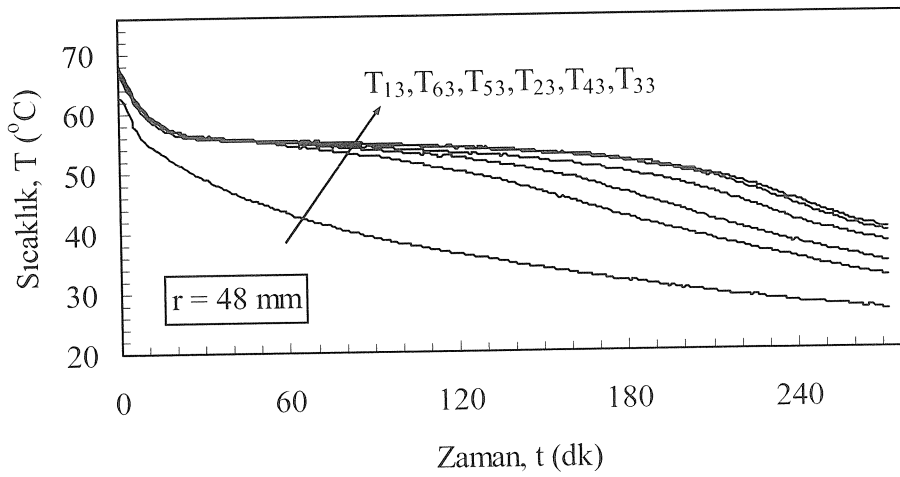
f)



a)

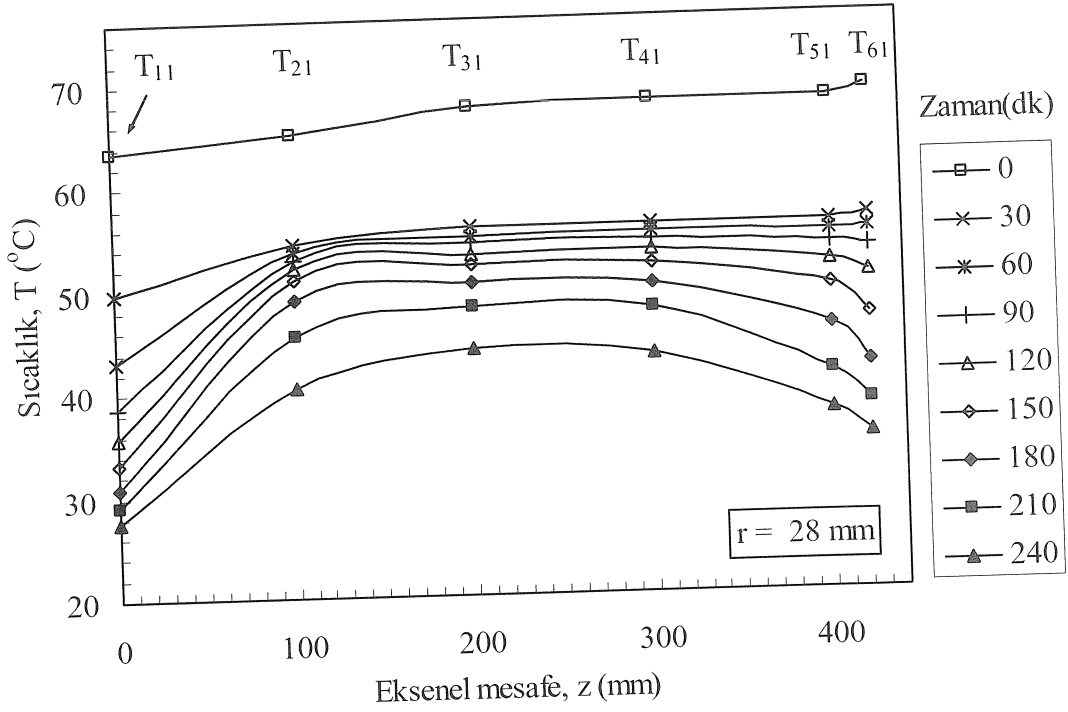


b)

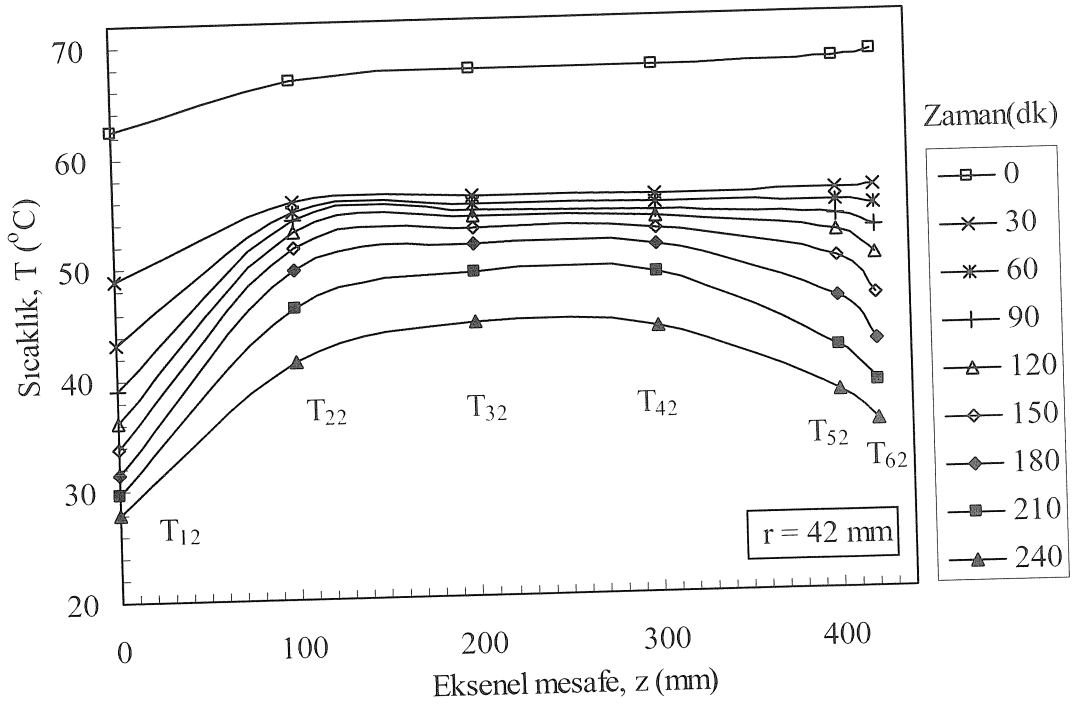


c)

Şekil 3.83. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 0^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $\dot{m} = 4$ kg/dk)

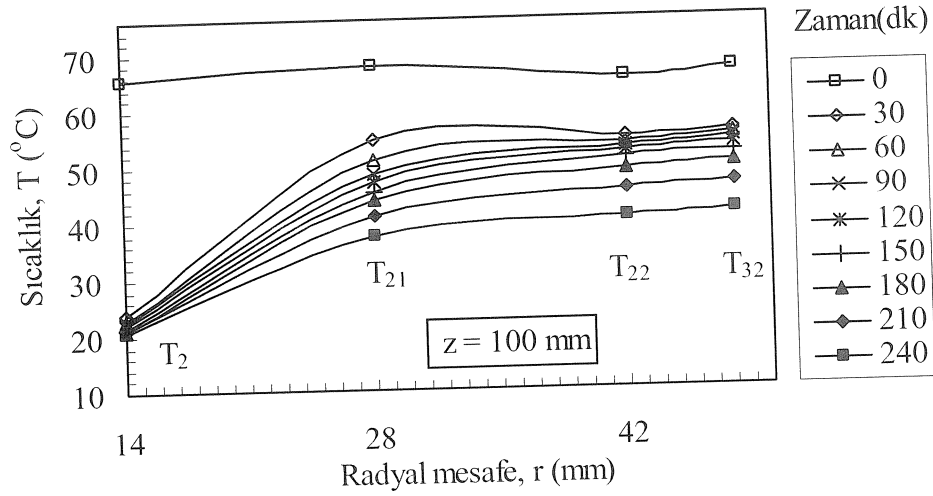


a)

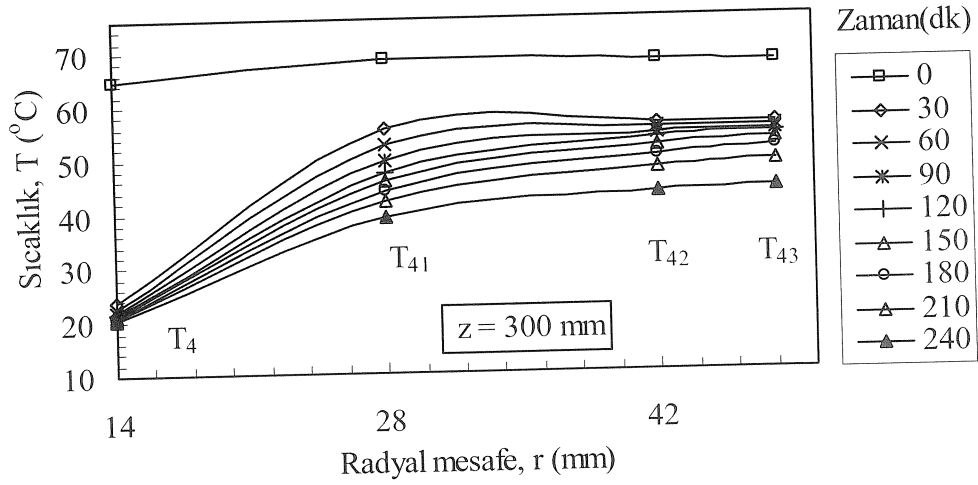


b)

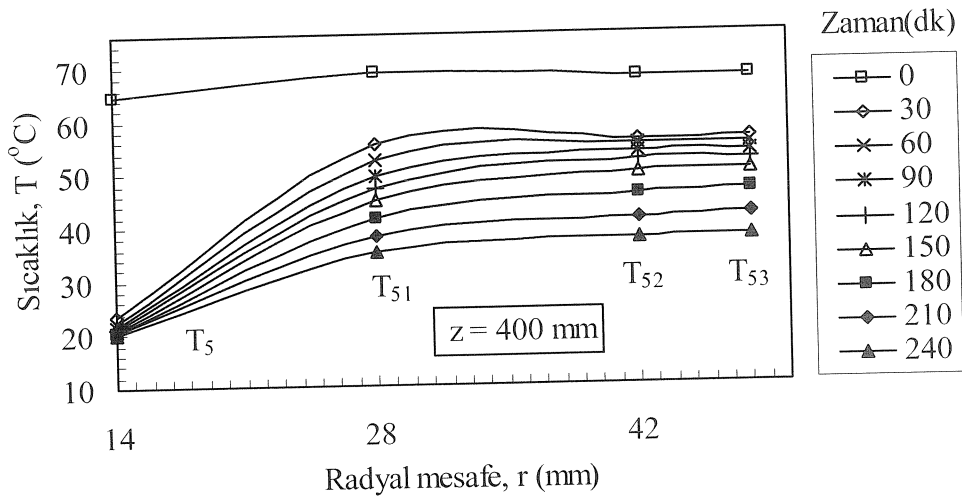
Şekil 3.84. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 0^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 4 \text{ kg/dk}$)



a)



b)



c)

Şekil 3.85. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 4$ kg/dk)

3.2.2. Kabuğu Eğimli Depo (Kabuk açısı, $\theta = 5^\circ$)

Yatay yerleştirilmiş 5° kabuk açılı depo doldurma ve boşaltma deneyleri, silindirik depoda yapılan deneylerle aynı akışkan giriş sıcaklığı ve debide tekrarlanmıştır. Yatay silindirik depolamada eksenal yönde homojen dağılan genleşme boşluğu, bu depo geometrisinde eksenal mesafe arttıkça hacimsel olarak artmaktadır.

Isı değiştirici içerisindeki parafinin radyal yönde zamana bağlı erime davranışları Şekil 3.86.(a-f)'de verilmiştir. Şekil 3.86.(a)'da tabana yakın ($z = 0$ mm) radyal yöndeki maddenin sıcaklığı hızla artarak erime sıcaklığının üzerine çıktığı görülmüştür. Burada, hem düşey yerleştirilmiş 5° kabuk açılı depodan hem de yatay yerleştirilmiş silindirik depodan farklı olarak katı-sıvı faz değişimi, sıcaklık-zaman eğrisi üzerinde belli değildir. Şekil 3.86.(b-f) incelendiğinde, radyal yönde sıcaklık gradyanı depo içerisindeki her bir eksenal noktada birbirine benzer olup, eksenal mesafe arttıkça maddenin radyal yöndeki sıcaklıkları arasındaki fark da artmaktadır. Burada, düşey depolamaya göre daha küçük sıcaklık farkı oluşsa da faz geçiş bölgelerini belirlemek mümkündür.

Parafinin (P3) belirli radyal mesafelerde, eksenal yönde zamana bağlı erime davranışları Şekil 3.87.(a-c)'de verilmiştir. Şekil 3.87.(a), ısı transfer akışkan borusu üzerindeki ($r = 14$ mm) parafinin sıcaklık zaman değişimini vermektedir. Düşey depolamada maddenin sıcaklığı akışkan girişinden çıkışına doğru artmaktayken burada, düzensiz bir sıcaklık dağılımı gözlenmiştir. Radyal yönde borudan uzaklaşıldıkça parafinin sıcaklıkları arasında farkın beklenildiği gibi arttığı Şekil 3.87.(b,c)'de görülmektedir. Deponun kabuğuna yakın noktalardaki (r_{max}) sıcaklık-zaman eğrileri parafinin erime davranışını daha açık ortaya koymaktadır. T_{11} noktasında çok kısa sürede (60 dk.) faz değişimi gerçekleşirken, deponun radyal yönde en alt noktasında (T_{64}) katı-sıvı faz değişim süresi çok uzundur (330 dk.). T_{64} noktasında faz değişim sıcaklığının üzerine çıkılması depolama için faz değişim periyodunun tamamlandığını gösterir. Bu süre, yaklaşık olarak yatay silindirik depolamada 270 dakika, düşey aynı depoda 205 dakika ve burada ise 345 dakika olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.88.(a,b) ve Şekil 3.89.(a,b)'de zamana bağlı olarak sırasıyla eksenal ve radyal yönde parafin sıcaklık değişimleri verilmiştir. Beklenildiği gibi, her iki yönde parafinin sıcaklık değişimi faz değişim sıcaklığına çıkana kadar birbirine yakınken, bu sıcaklıktan sonra tüm madde eriyince kadar farklılıklar görülmüştür.

Farklı akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak deponun farklı noktalarında parafin P3'ün sıcaklık zaman değişimleri Şekil 3.90.(a-c)'de verilmiştir. T_{11} noktasında giriş sıcaklığının parafinin erime davranışında etkin rol oynamadığı, ancak, artan eksenel ve radyal mesafede akışkan giriş sıcaklığının faz değişim süresi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

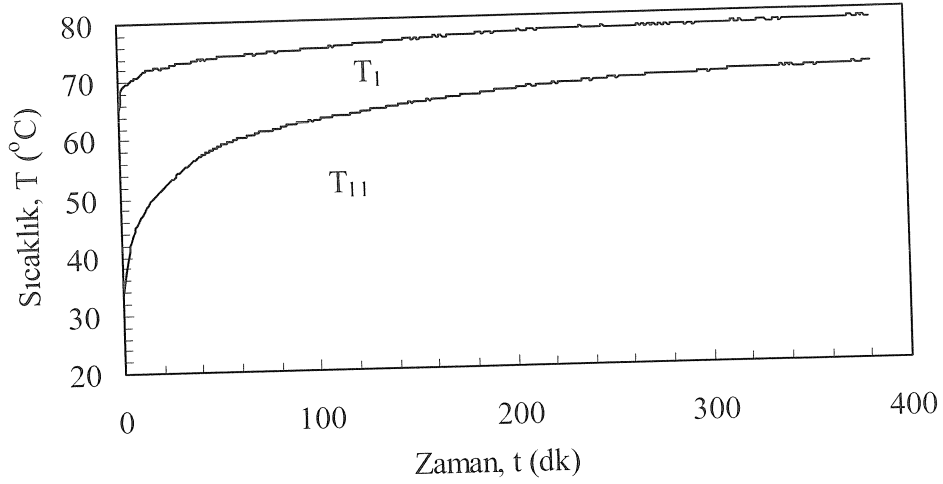
Erime işlemi sırasında farklı akışkan kütleli debisinin parafin P3'ün sıcaklık zaman değişimine etkisi Şekil 3.91.(a-c)'de verilmiştir. Depo içerisinde tüm ölçüm noktalarında sıcaklığın zamanla değişimi benzer olup, yatay depolamada debinin artırılmasının parafinin doldurma süresine etkisi ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür.

Parafinin katılaşma işleminde, eksenel belirli mesafelerde sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 3.92.(a-f)'de verilmiştir. $z = 0$ mm'de parafinin çok kısa sürede ısı transfer akışkanına vererek donduğu görülmüştür. $z = 300$ mm hariç, eksenel doğrultu boyunca radyal yönde sıcaklık gradyanı deponun her noktasında yaklaşık olarak benzerdir. 5° kabuk açılı depo içerisine yerleştirilen parafin, yatay silindirik depolamaya benzer katılaşma davranışı göstermektedir. Yine $z = 445$ mm hariç 5° kabuk açılı düşey depoda da benzer katılaşma davranışı gözlenmiştir. Düşey konumda $z = 445$ mm'de faz değişim sıcaklığı kısa sürede geçilerek parafin bu bölgede donarken, yatay depolamada ise, faz değişim sırasında madde sıcaklığı bir süre sabit kalmakta, sıvı-katı faz değişimi tamamlandıktan sonra hızla akışkan sıcaklığına yaklaşmaktadır.

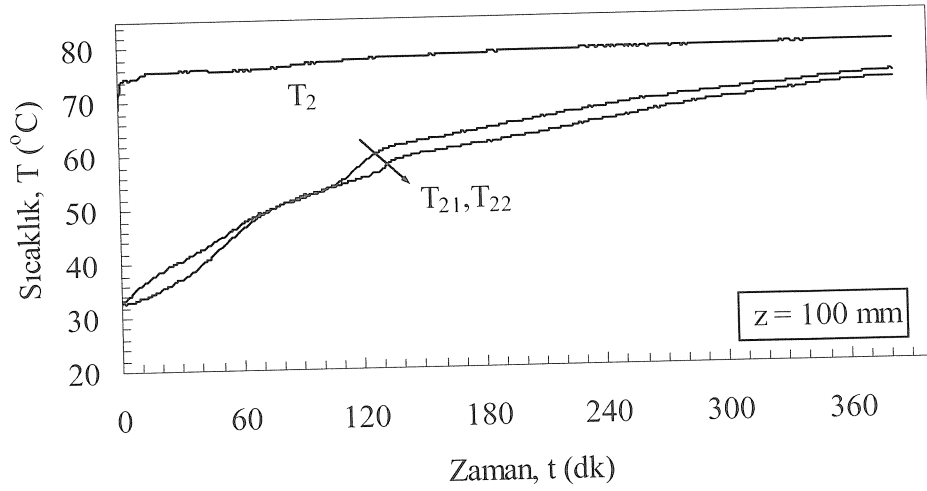
Şekil 3.93.(a,b)'de yatay konumda yerleştirilen 5° kabuk açılı deponun içerisindeki parafin P3'ün katılaşmada belirli radyal mesafedeki ($r = 28$ mm, r_{max}) sıcaklık-zaman değişimi verilmiştir. $r = 28$ mm'de T_{41} noktası hariç eksenel yönde parafinin katılaşma davranışı benzer olup, tabandan eksenel yönde uzaklaştıkça katılaşma süresi artmaktadır. Deponun kabuğuna yaklaştıkça malzemenin katılaşma davranışı daha belirgin olarak birbirine benzemektedir. Deponun tabanından eksenel yönde ve kabuk boyunca (r_{max}) mesafe arttıkça sıvı-katı faz değişim zamanının da arttığı görülmüştür. Deponun düşey olarak yerleştirilmesi durumunda r_{max} noktalarında faz değişimi tamamlandıktan sonra düzensiz olan sıcaklık dağılımlarının yatay depolamada meydana gelmediği belirlenmiştir. Yatay silindirik depolamada yaklaşık 140 dakikada sıvı-katı faz değişimi tamamlanırken, bu süre yatay 5° kabuklu depolamada yaklaşık olarak 180 dakika olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, 5° kabuk açılı depo geometrisinde, maksimum depo çapının silindirik deponun çapından daha büyük olması dolayısıyla deponun uzak noktalarından ısının geriye alınmasını zorlaştırmasıdır.

Şekil 3.94.(a,b) ve Şekil 3.95.(a,b)'de zamana bağlı aksel ve radyal mesafe sıcaklık değişimleri verilmiştir. Depolanan ısının geriye alma süresi arttıkça, donmuş parafinin kötü ısı iletim katsayısından dolayı, hem radyal mesafe hem de aksel mesafelerde ölçüm noktaları arasındaki sıcaklık farkının arttığı görülmüştür.

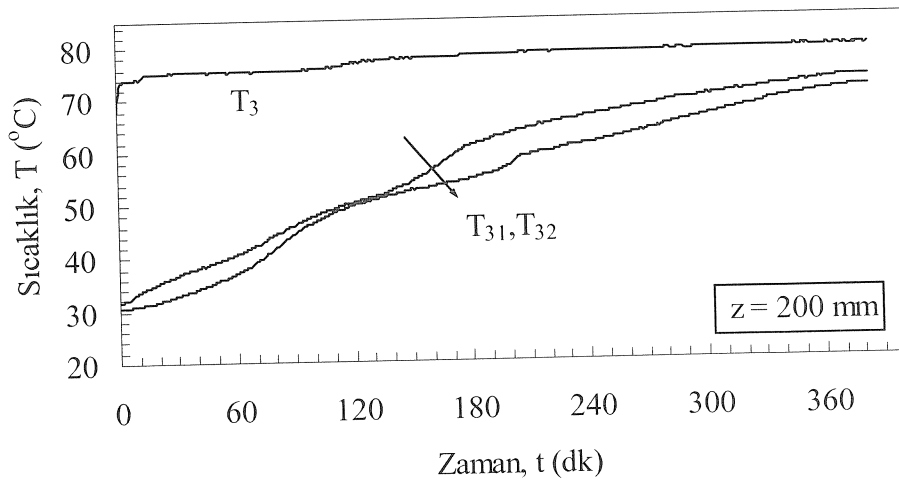
Soğutucu akışkan debisinin parafinin katılma davranışına etkisi Şekil 3.96.(a-c)'de verilmiştir. Deponun farklı noktalarında parafinin katılma davranışı debinin artışından etkilenmemektedir. Ancak; T_{63} noktasında artan debi ile ısının geriye alınma süresi kısalsa da toplam katılma zamanı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



a)



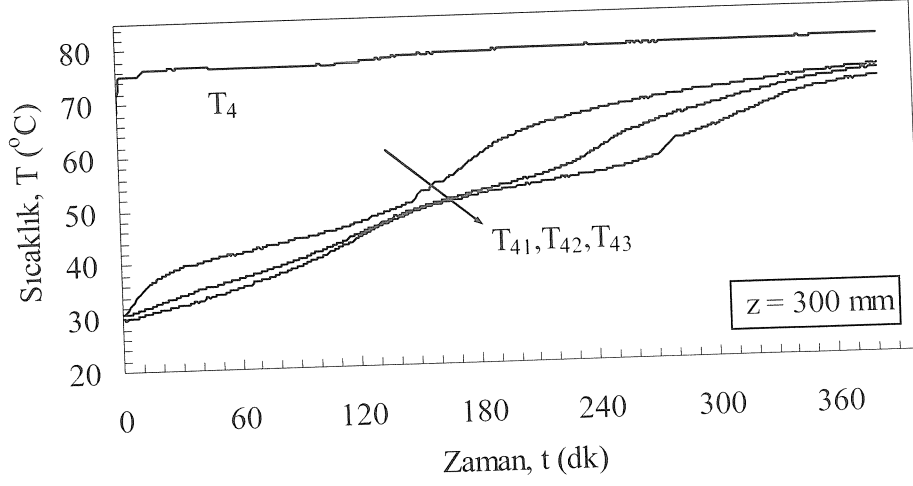
b)



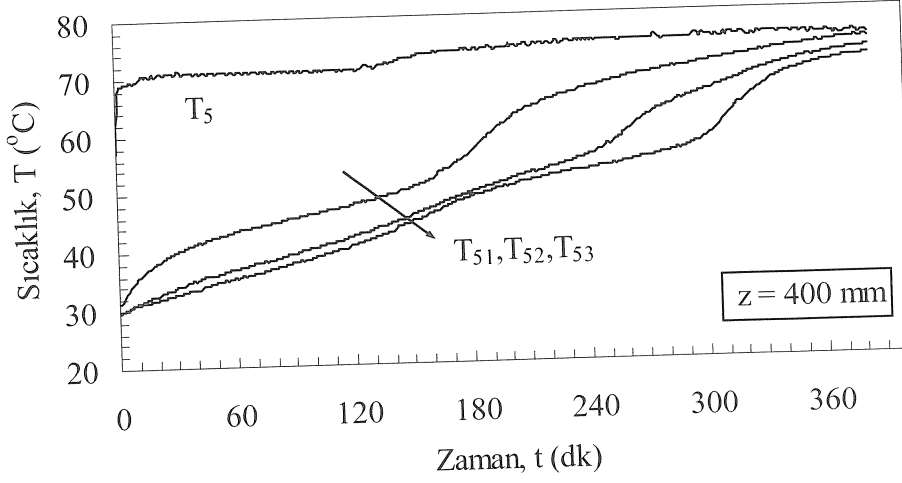
c)

Şekil 3.86. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)

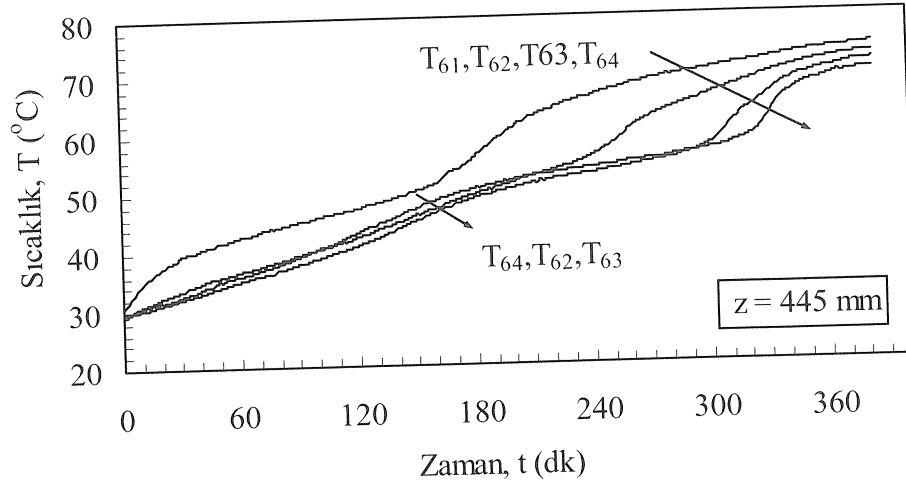
Şekil 3.86.'nin devamı



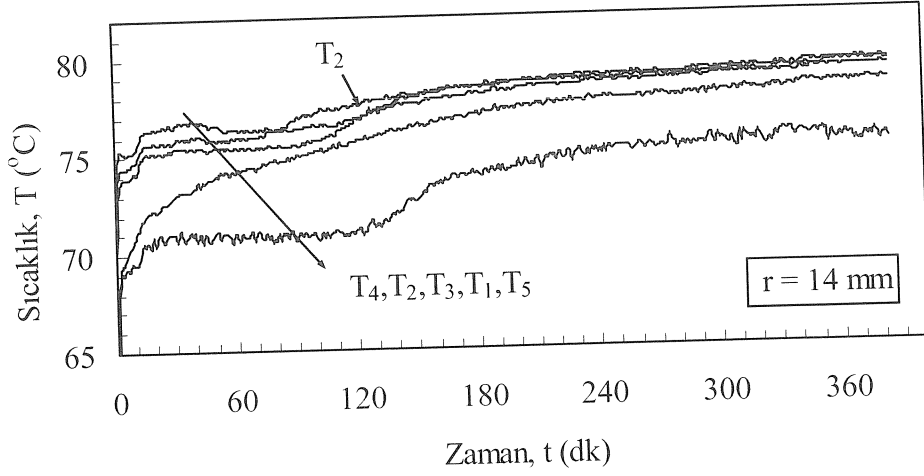
d)



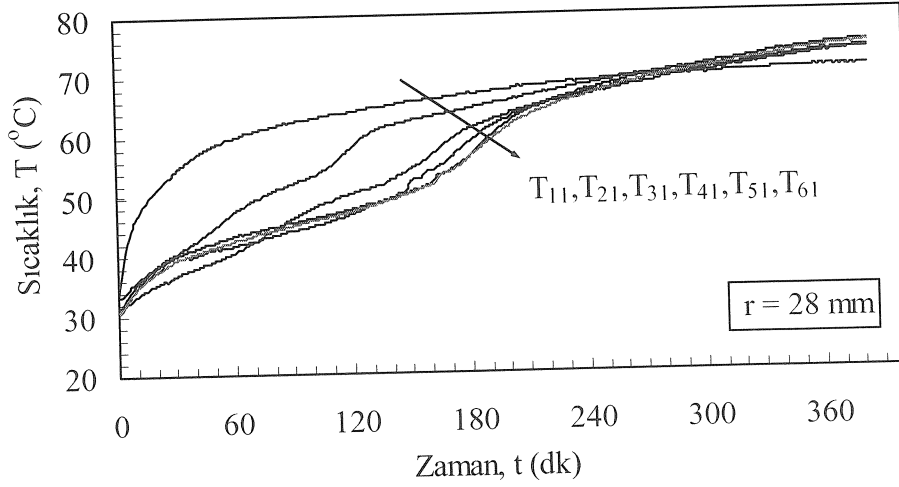
e)



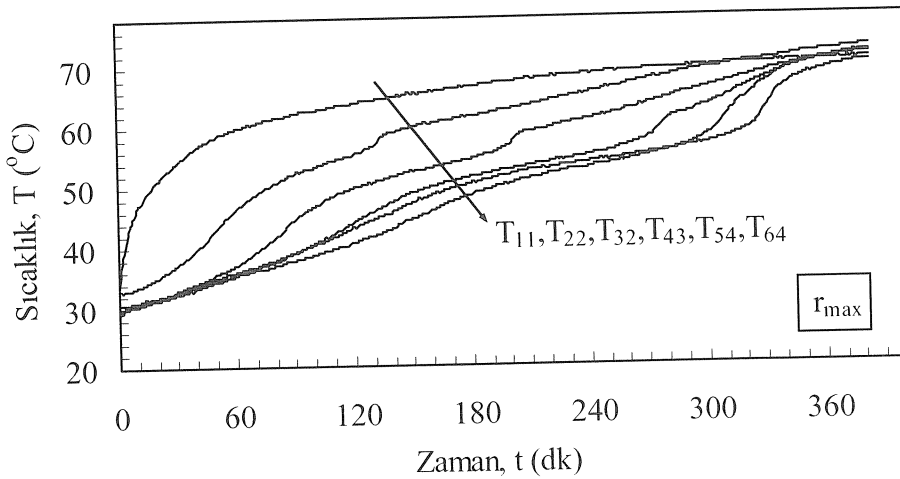
f)



a)

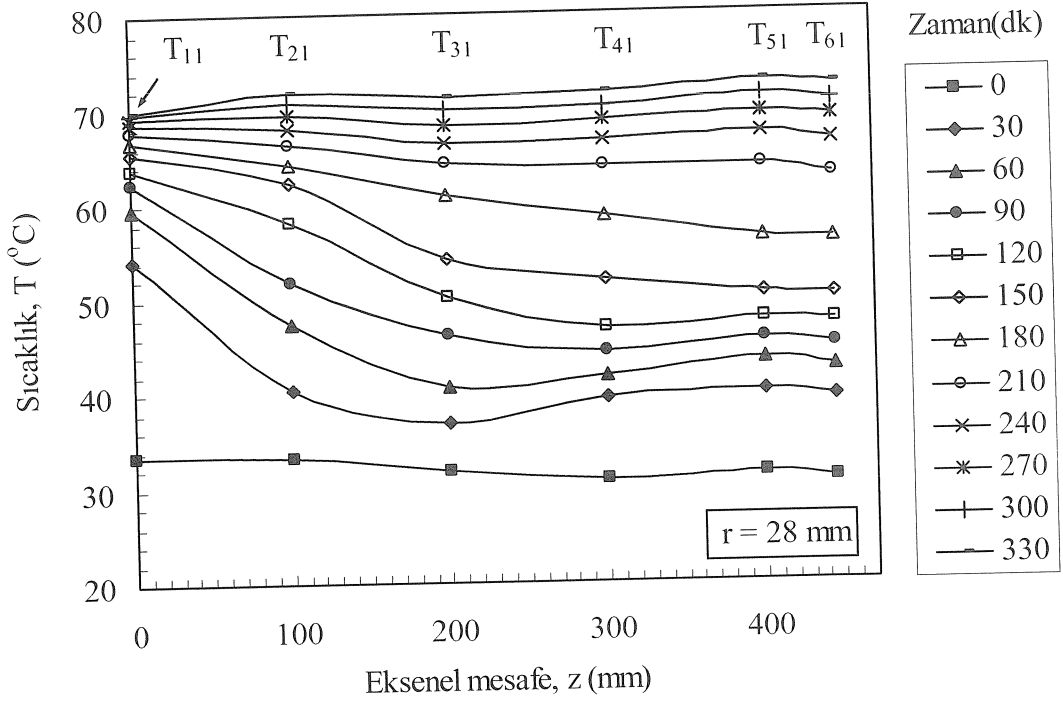


b)

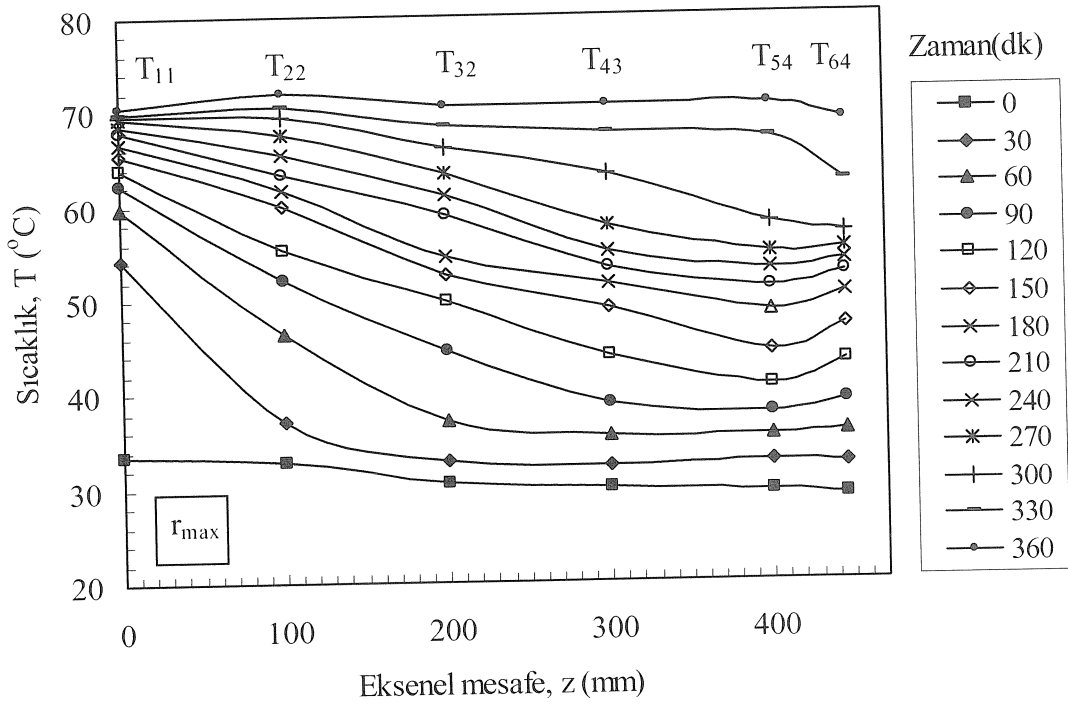


c)

Şekil 3.87. Parafinin (P3) ergirmede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 80^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

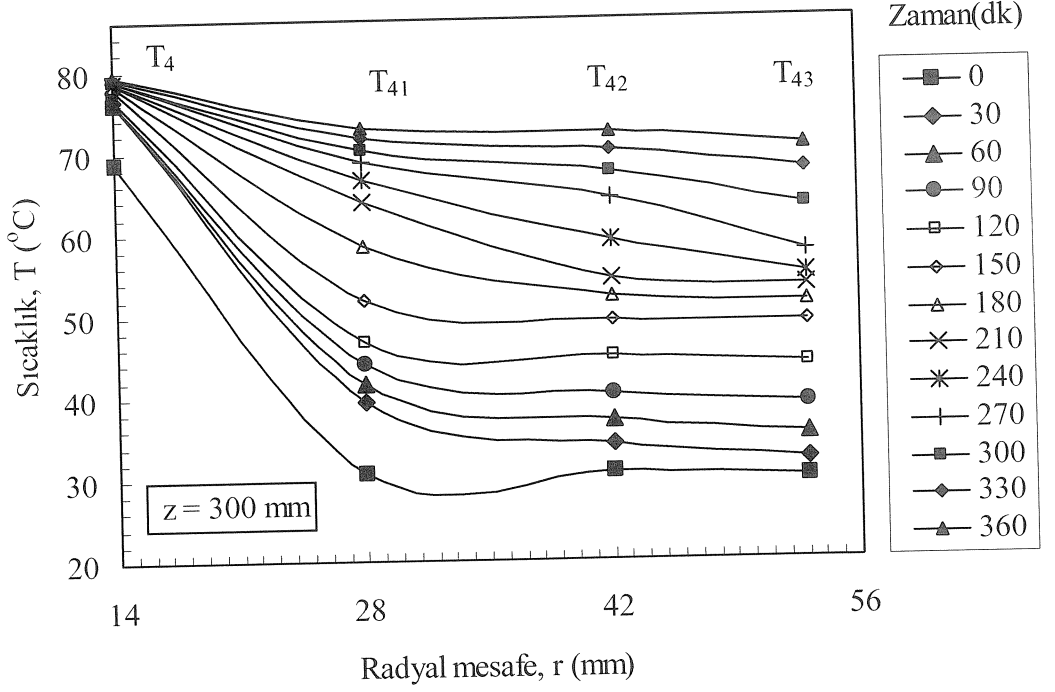


a)

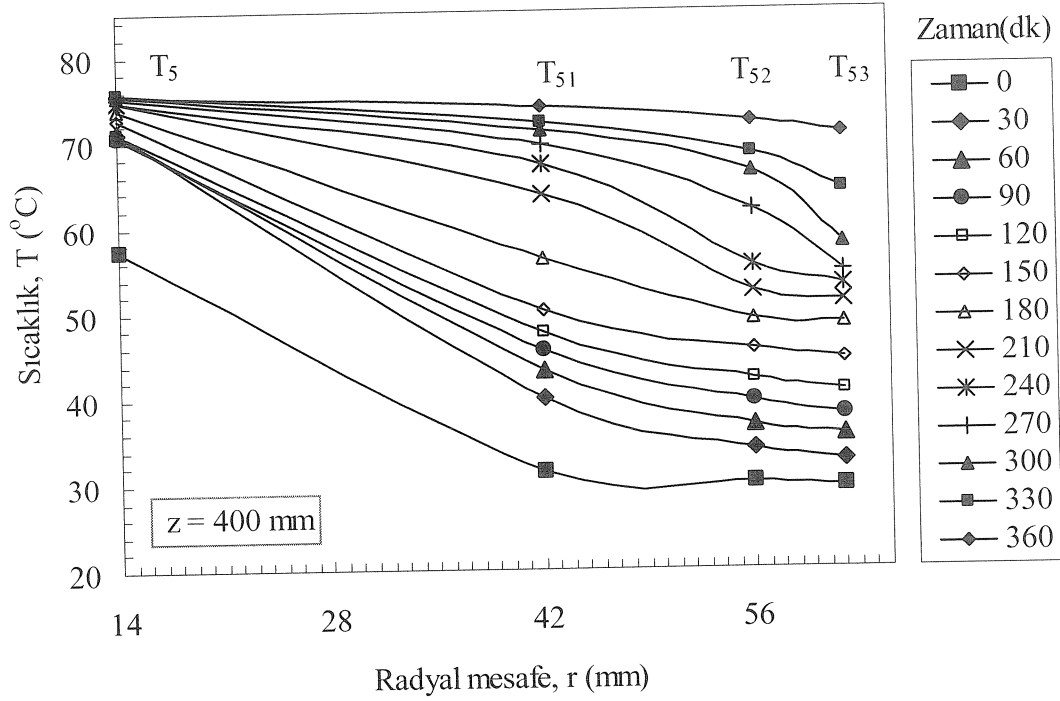


b)

Şekil 3.88. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 80^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

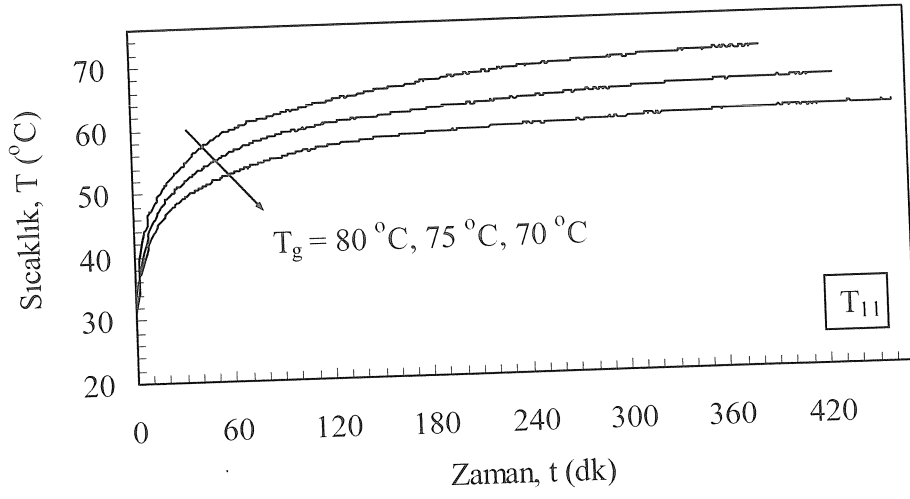


a)

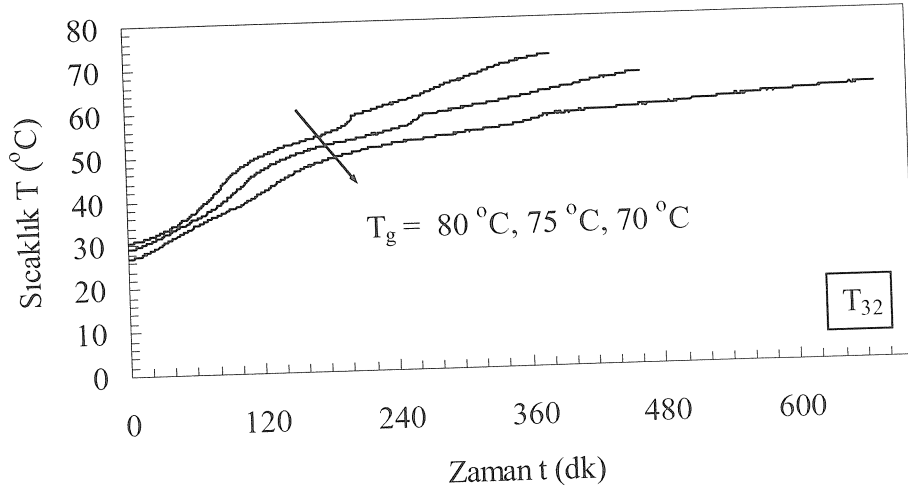


b)

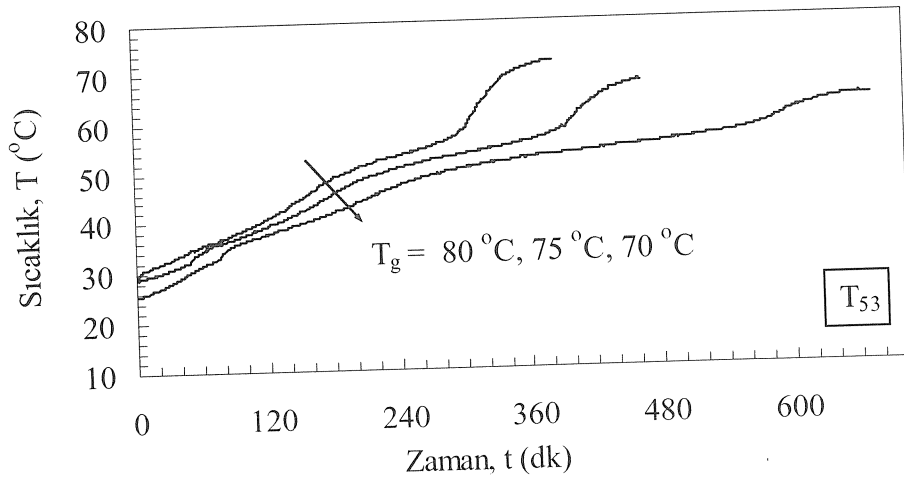
Şekil 3.89. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

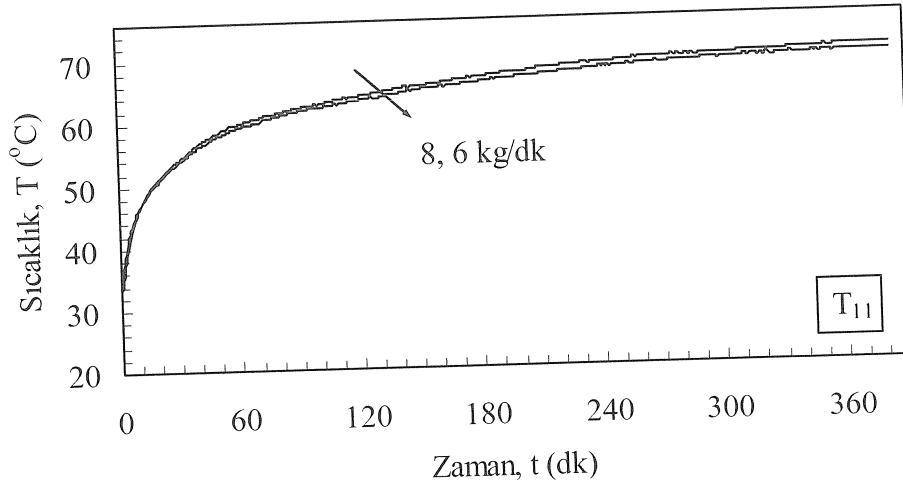


b)

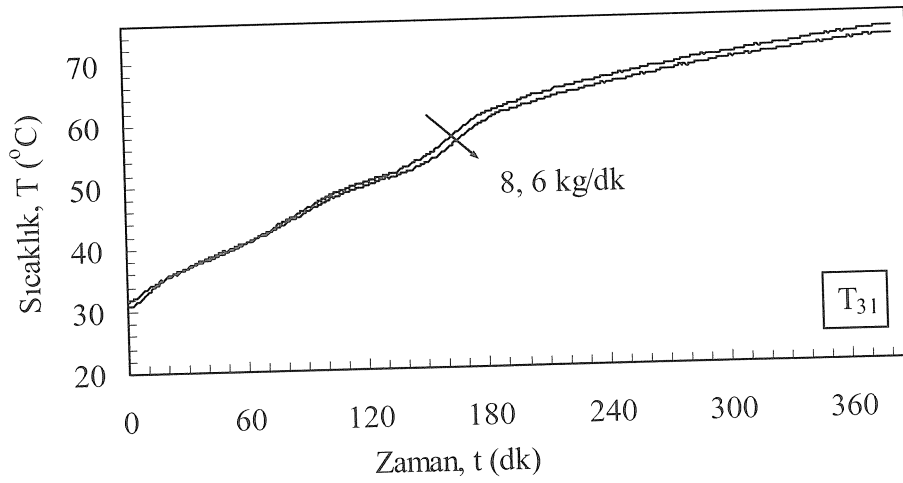


c)

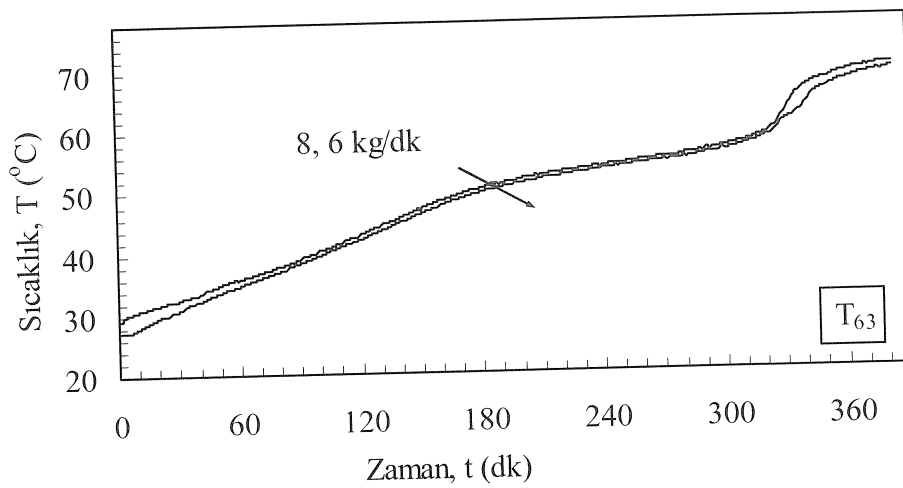
Şekil 3.90. Parafinin (P3) ergirmede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

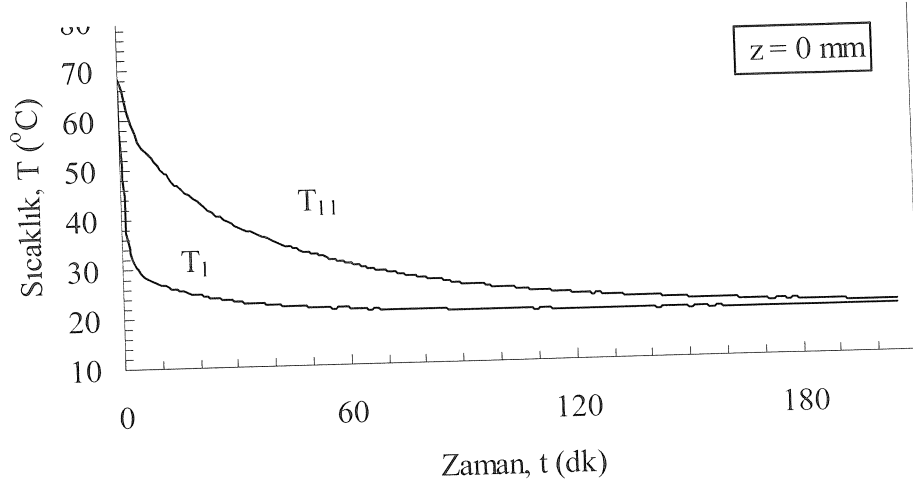


b)

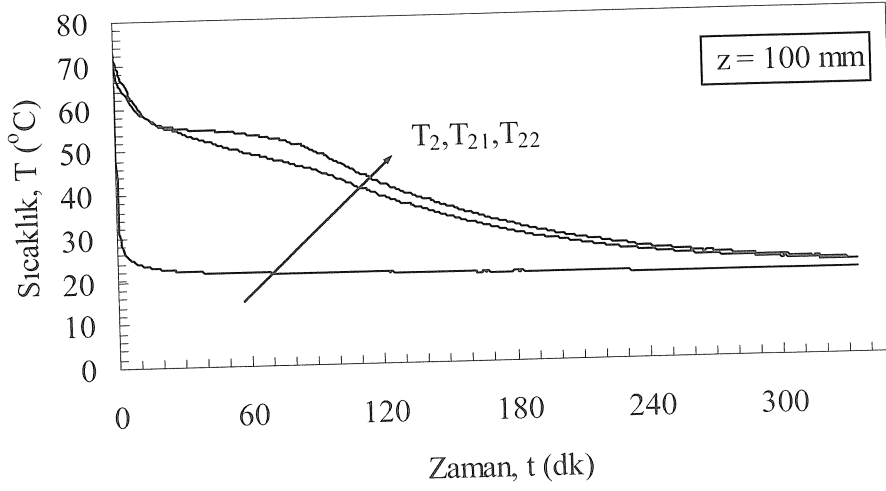


c)

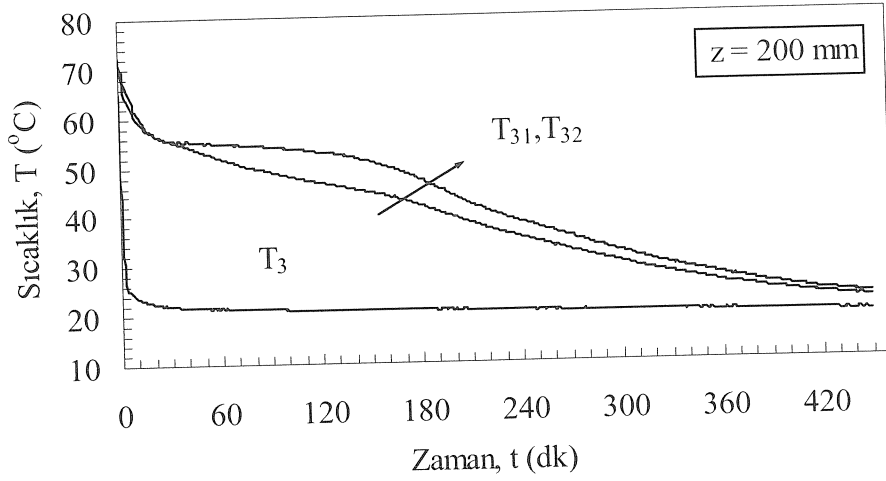
Şekil 3.91. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$)



a)



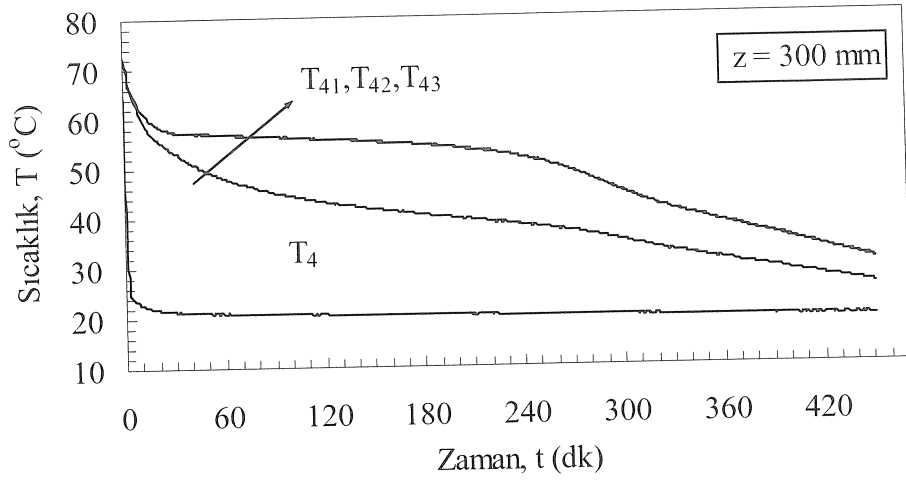
b)



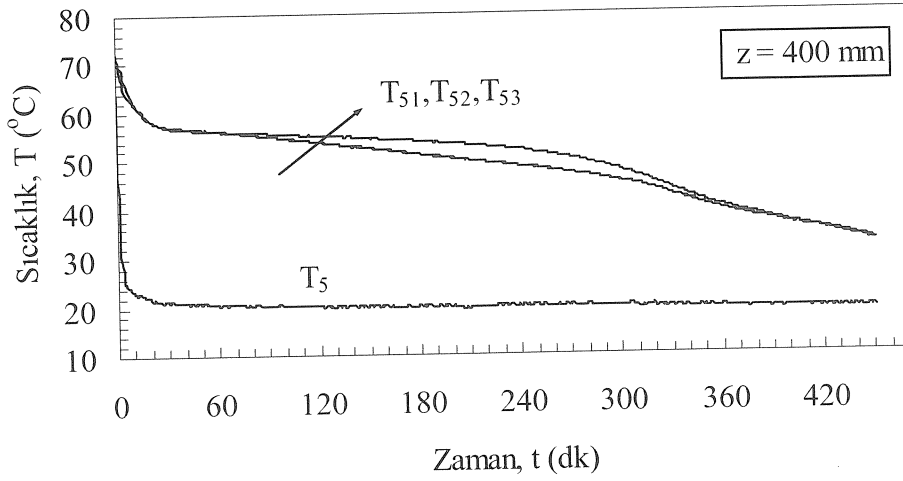
c)

Şekil 3.92. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

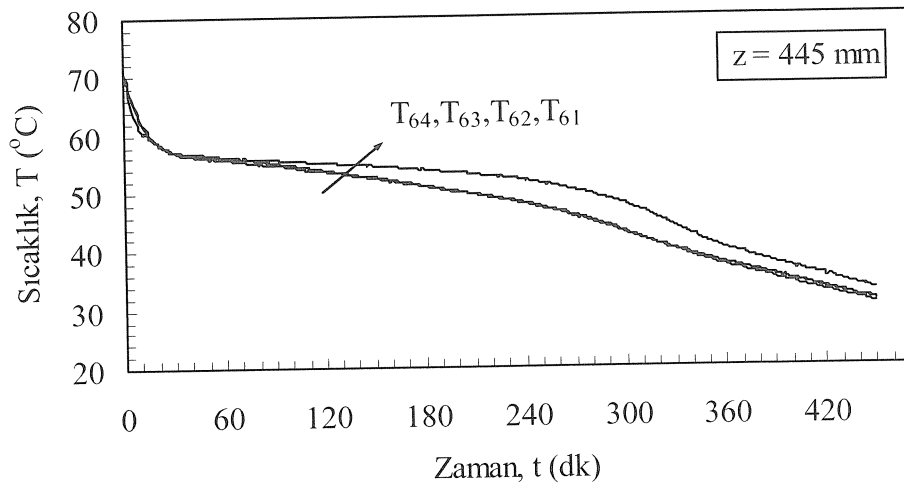
Şekil 3.92.'nin devamı



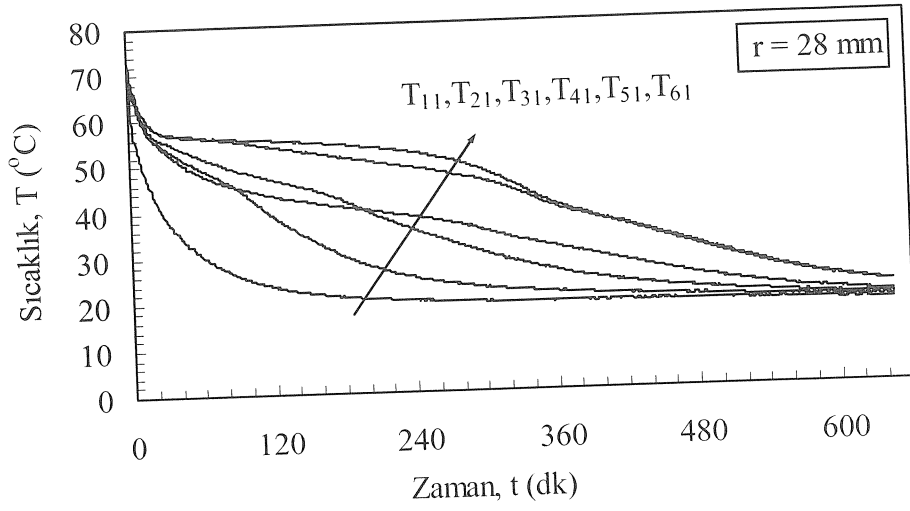
d)



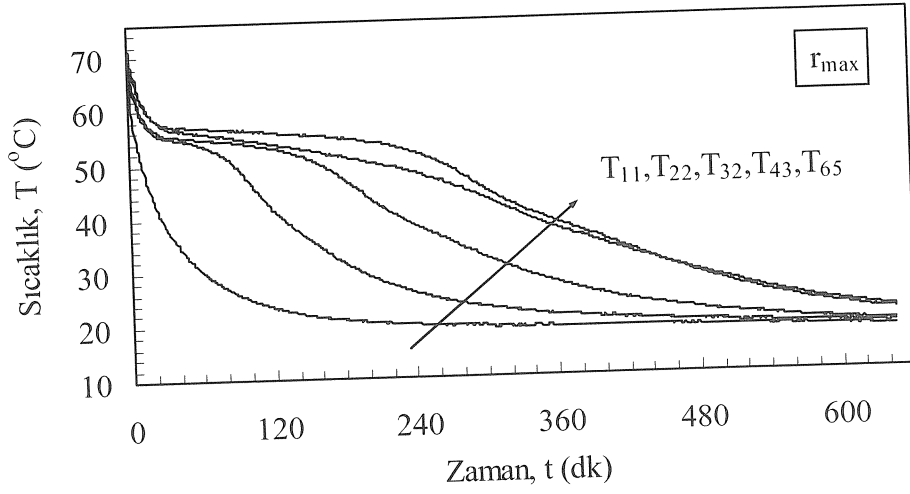
e)



f)

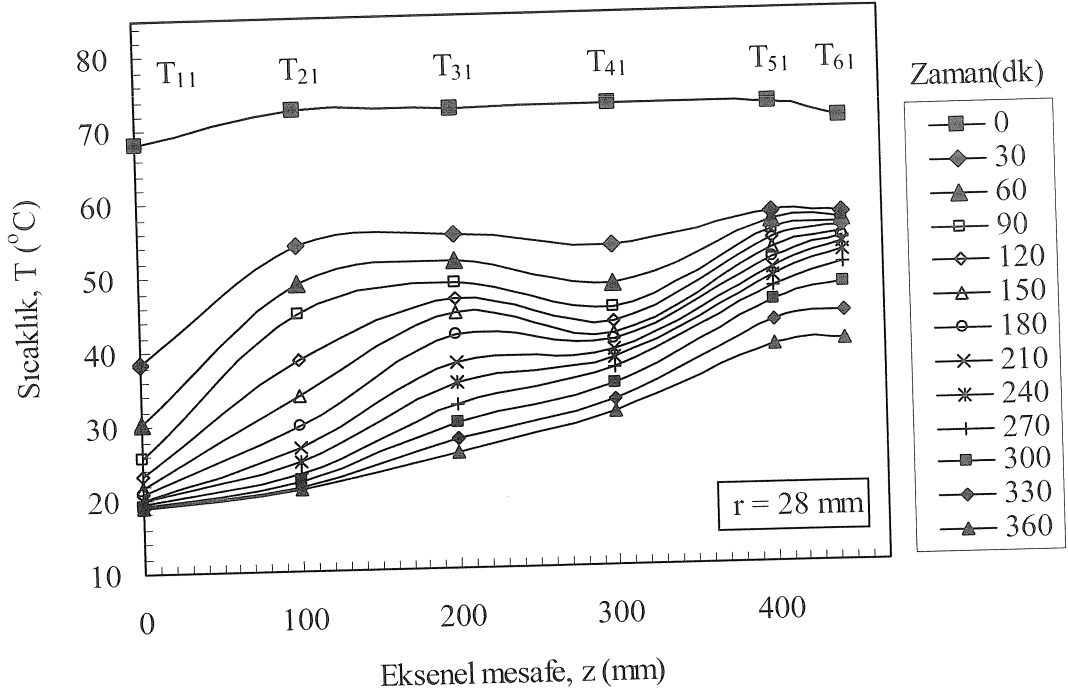


a)

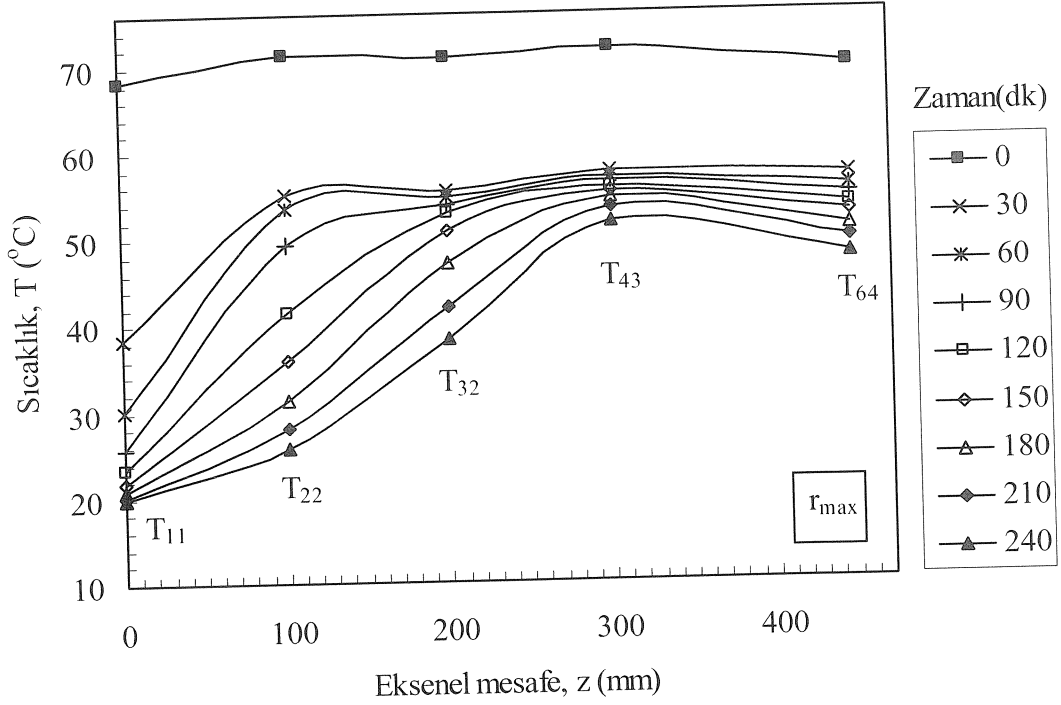


b)

Şekil 3.93. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

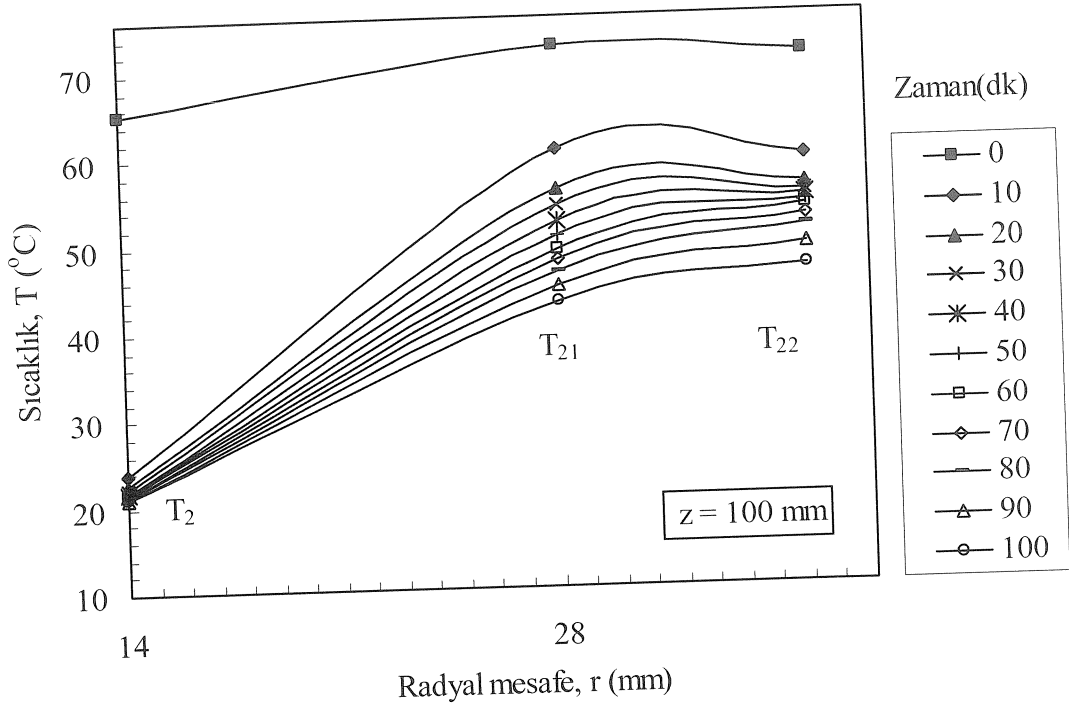


a)

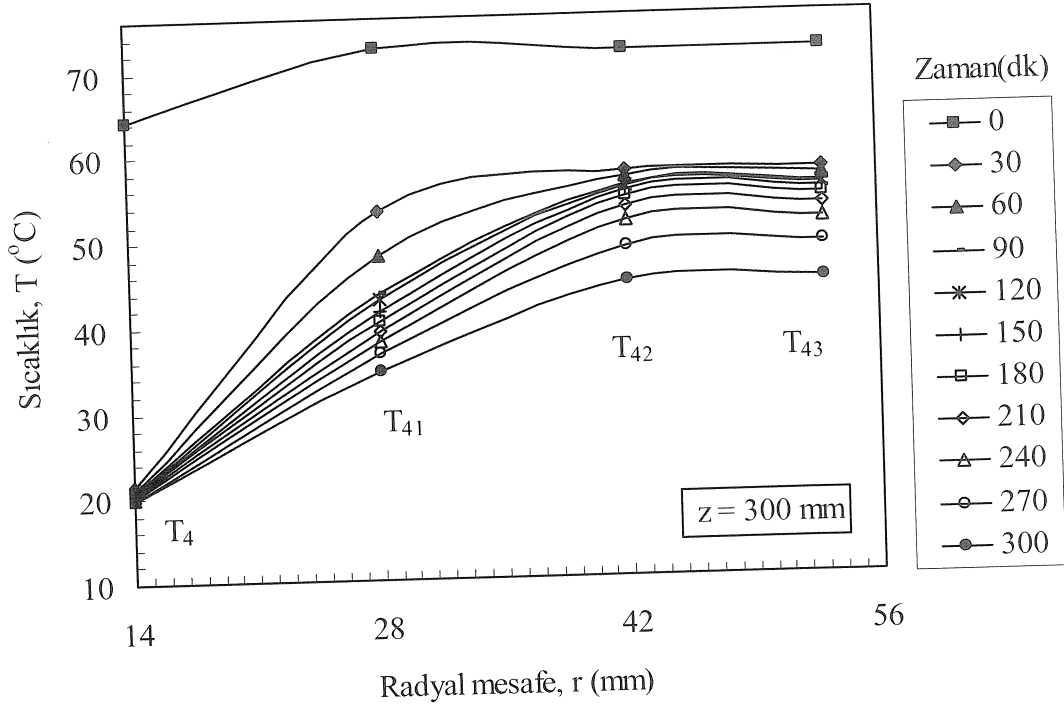


b)

Şekil 3.94. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 0^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

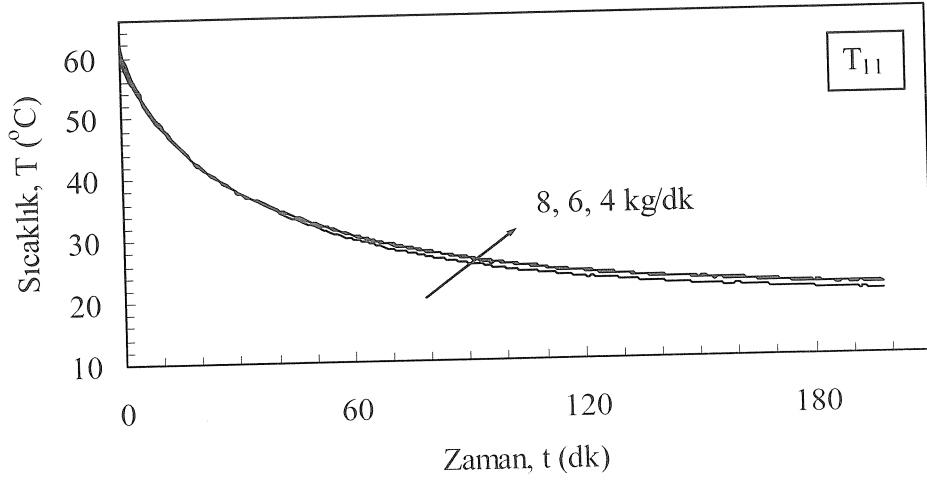


a)

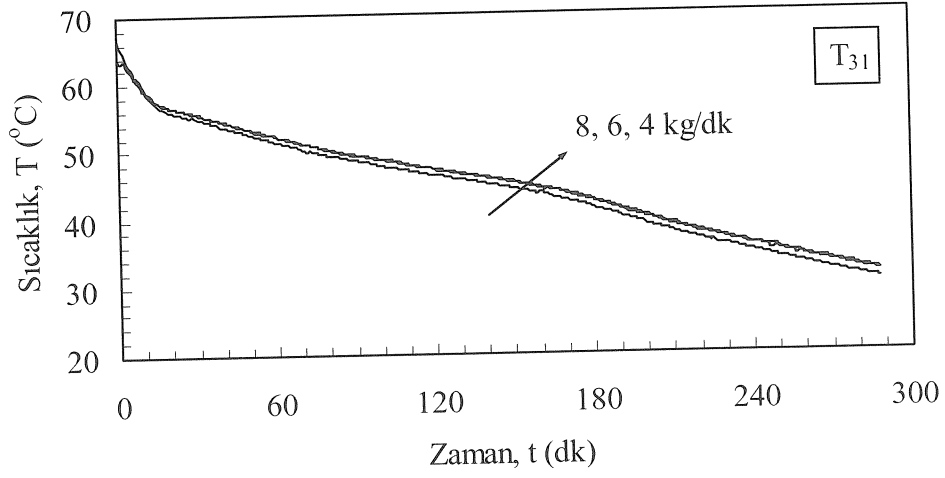


b)

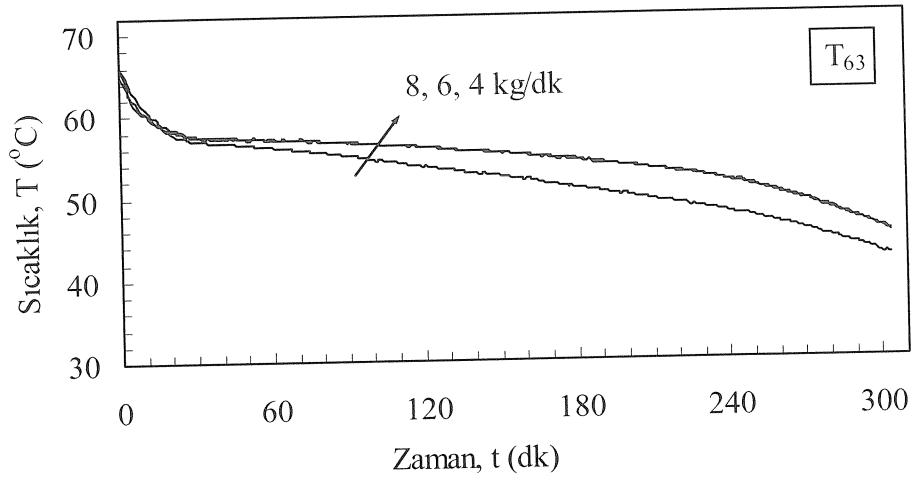
154Şekil 3.95. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20$ °C, $m = 8$ kg/dk)



a)



b)



c)

Şekil 3.96. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)

3.3. Deponun Yatayla Açılı Yerleştirilmesi Durumunda Erime ve Katılaşma

Bu grup deneyler, silindirik ve 5° kabuk açılı depo içerine yerleştirilmiş parafinin P3'ün deponun yatayla yerleştirme açısına bağlı termal davranışını belirlemek için yapılmıştır. Isı depolama tankları sisteme önceden de belirtildiği gibi yatay ve düşey konumda yerleştirilmekte iken yerleştirmenin ara açıları literatürde çalışılmamıştır. Burada yatay ve düşey arasındaki eşit açı adımlarında yerleştirme için 30° ve 60° seçilmiştir. Deneyler deponun yatay ve düşey konumuna benzer şekilde aynı akışkan giriş sıcaklığı ve debisinde yapılmıştır.

3.3.1. Deponun Otuz Derece Yerleştirilmesi ($\theta = 30^\circ$)

3.3.1.1. Silindirik depo (Kabuk açısı, $\theta = 0^\circ$)

Erime işleminde parafinin belirli aksenal mesafelerdeki radyal yönde sıcaklık zaman değişimi Şekil 3.97.(a-f)'de verilmiştir. $z = 0$ mm'de radyal yönde sıcaklık dağılım karakteri hem düşey hem de yatay depolamaya benzerdir. Yatay depolamada, radyal yönde parafinin sıcaklık farkı büyükken, deponun 30° yerleştirilmesi durumunda düşey depolamaya benzer şekilde radyal yönde sıcaklık farkı daha küçüktür. Şekil 3.97.(b-f) incelendiğinde, deponun farklı aksenal noktalarında sıcaklığın zamanla değişimi düşey depolamaya benzer davranış göstermektedir. Faz geçiş bölgeleri yatay depolamaya göre daha belirgin olup, katı-sıvı faz değişimi tamamlandıktan sonra sıvı parafinin denge sıcaklığına çıkması daha kısa sürede gerçekleşmektedir.

Şekil 3.98.(a-c)'de erime işleminde belirli radyal mesafelerde aksenal yönde sıcaklığın zamanla değişimi verilmiştir. Şekil 3.98.(a), akışkan borusu üzerinde aksenal yönde sıcaklık değişimlerini vermektedir. Depolamanın başlanıcında (40. dk.) akışkan borusu üzerindeki sıcaklık dağılımı düzgün değilken, bu zamandan sonra aksenal yönde üstten tabana doğru sıcaklık dağılımları düzenli hale gelmiştir. Sıvı parafinde taşınımın etkisi zayıfladıkça boru üzerindeki sıcaklık, diğer aksenal noktalardaki sıcaklık seviyesine hızla yükselmektedir. Şekil 3.98.(b,c)' de görüldüğü gibi aksenal mesafe arttıkça sıcaklık gradyanları arasındaki fark da düşey depolamaya benzer şekilde artmaktadır. Düşey

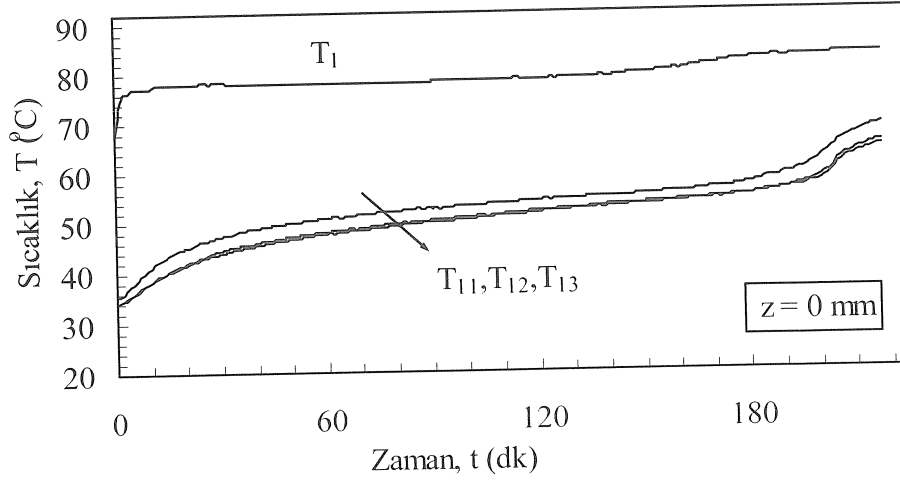
silindirik depolamada parafinin yaklaşık dolma süresi 240 dakika iken, burada yatay depolamaya benzer şekilde 220 dakikadır.

Şekil 3.99.(a,b) ve Şekil 3.100.(a-c)'de zamana bağlı aksel ve radyal mesafe sıcaklık değişimleri verilmiştir. Deponun tabanında parafinin sıcaklığı kısa sürede (60 dk.) faz değişim sıcaklığına çıkmış, bu sıcaklık aralığında artan zamana bağlı olarak aksel yönde yukarıdan aşağıya doğru parafin tamamen eriyinceye kadar yaklaşık sabit kalmış (180. dk.) ve hızla sıcaklığı erimiş parafinin denge sıcaklığına ulaşmıştır. Katı-sıvı faz geçişi tamamlanana kadar radyal yönde boru cidarından $r = 28$ mm'ye kadar sıcaklık ekspanansiyel olarak azalırken, bu mesafeden kabuğa kadar yaklaşık sabit kalmaktadır. Zamana bağlı olarak radyal yönde erimiş bölge ile katı bölge arasında sıcaklık farkları görülmekle birlikte, sıvı ve katı bölgelerin kendi içerisinde sıcaklık farkı radyal yönde çok azdır.

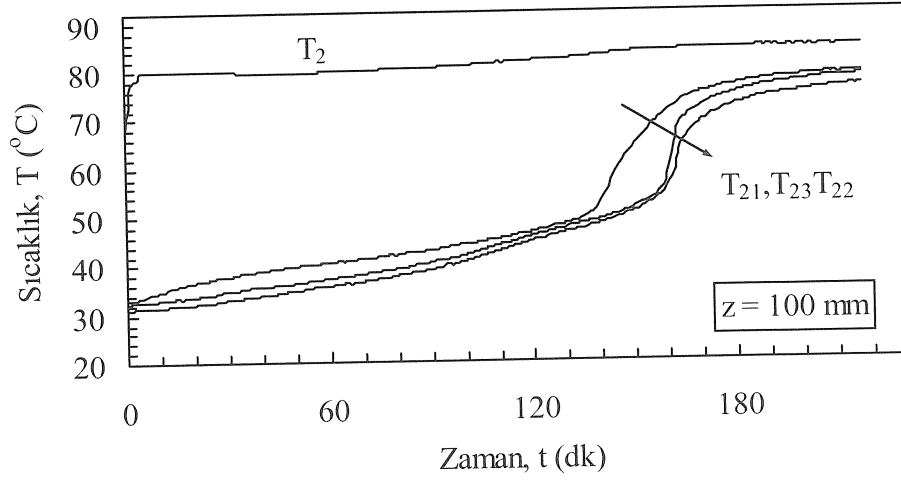
Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı olarak sıcaklığın zamanla değişimi 3.101.(a-c)'de verilmiştir. Düşey ve yatay depolamaya benzer şekilde, akışkan giriş sıcaklığını artırmak parafinin dolma süresini kısaltmaktadır. Akışkan giriş sıcaklığını artırmak, parafinin erime davranışı üzerinde hiçbir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.

Isının depodan geriye alınması işleminde depo yerleştirme açısının ($\theta = 30^\circ$) parafin P3'ün termal davranışına etkisi Şekil 3.102.(a-f)'de verilmiştir. Şekil 3.102.(a-f)'de görüldüğü gibi boru cidarındaki parafinde ($z = 400$ mm noktası hariç) aşırı soğuma etkisi gözlenmiştir. Bu duruma, katılaşma işleminde diğer depo geometrileri ve yerleştirme açılarında rastlanılmamıştır. Silindirik düşey depolamada parafinin sıcaklığı çok hızlı düştüğü için sıvı-katı faz geçiş bölgesi görülmezken, yatay depolamaya benzer şekilde burada sıvı-katı faz geçişi sırasında sıcaklıklar sabit kalmaktadır. Sıcaklığın sabit kalma süresi yatay depolamaya göre daha kısadır. Deponun eğimli yerleştirilmesi durumunda yatay depolamaya göre parafinin katılaşma süresinin daha kısa olduğu belirlenmiştir.

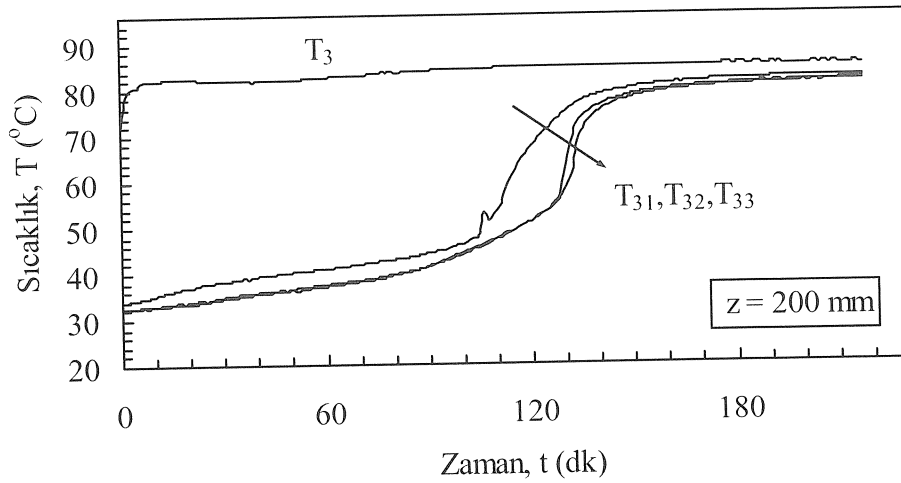
Belirli radyal mesafelerde aksel yönde katılaşma işleminde sıcaklığın zamanla değişimi Şekil 3.103.(a-c)'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, $z = 0$ mm noktası hariç aksel yönde sıvı-katı faz değişimi tamamlanana kadar sıcaklıklar yaklaşık birbirine eşittir. Faz geçişini tamamlayan noktalardaki parafinin sıcaklığı hızla soğutucu akışkan sıcaklığına doğru inmektedir.



a)



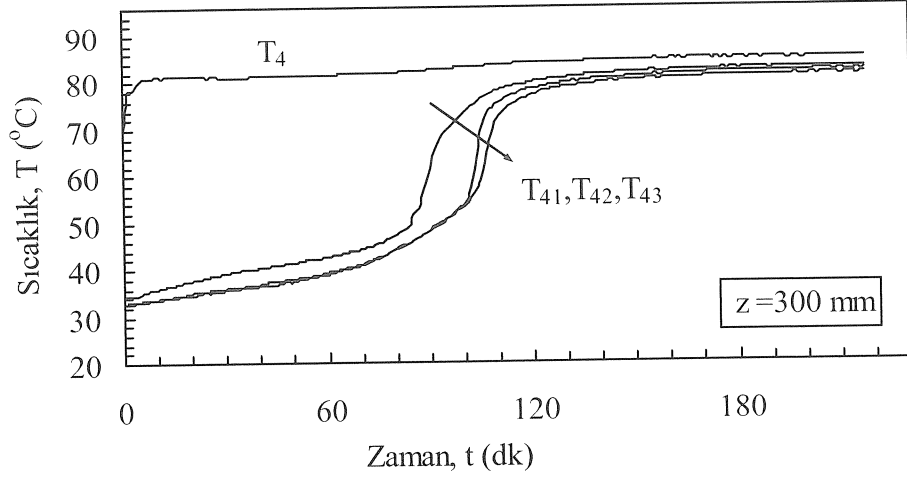
b)



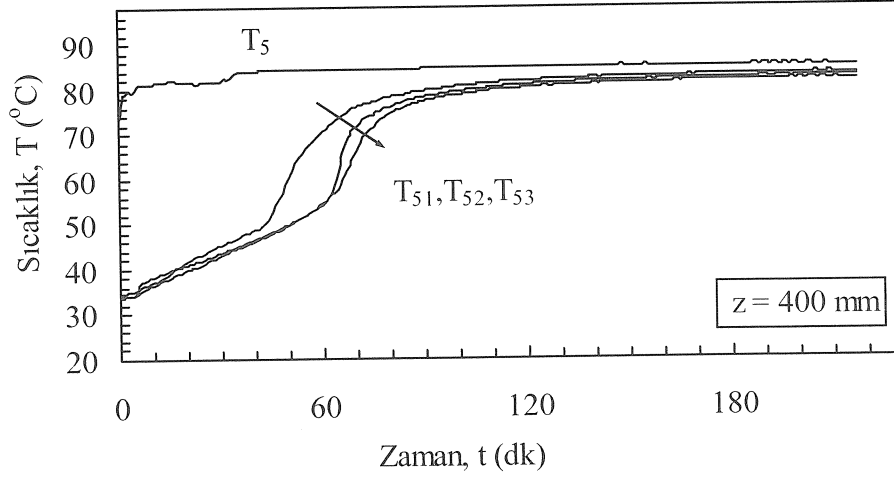
c)

Şekil 3.97. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

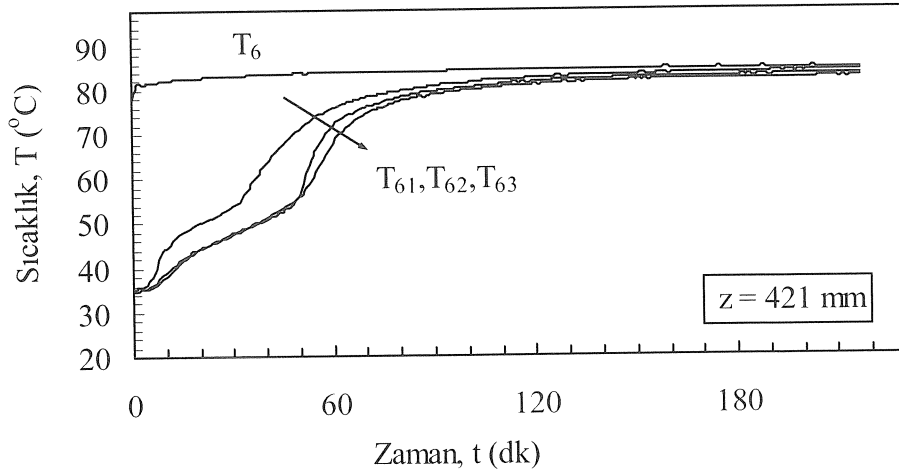
Şekil 3.97.'nin devamı



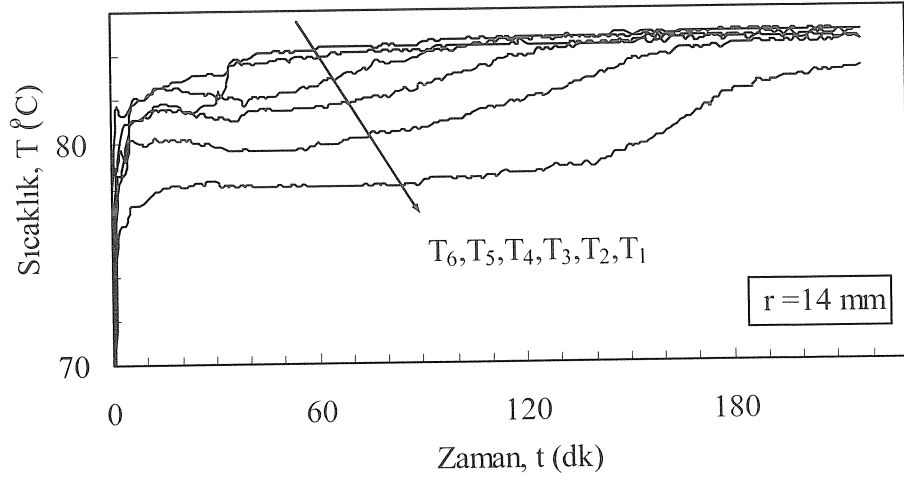
d)



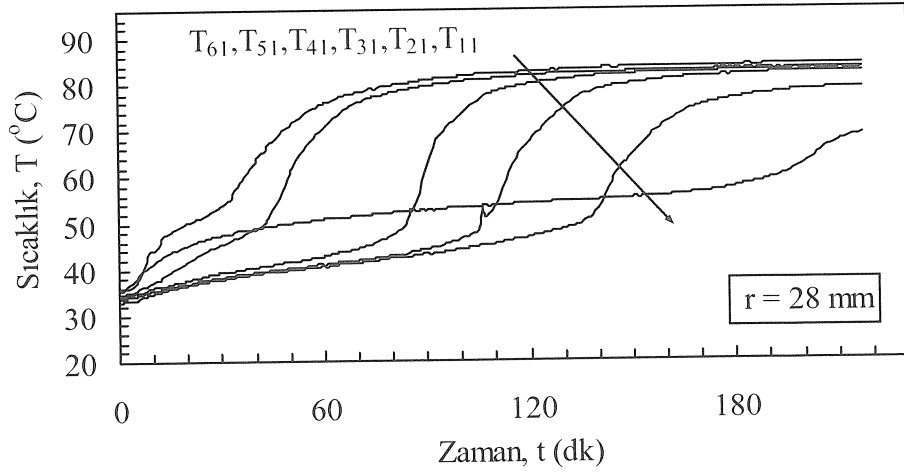
e)



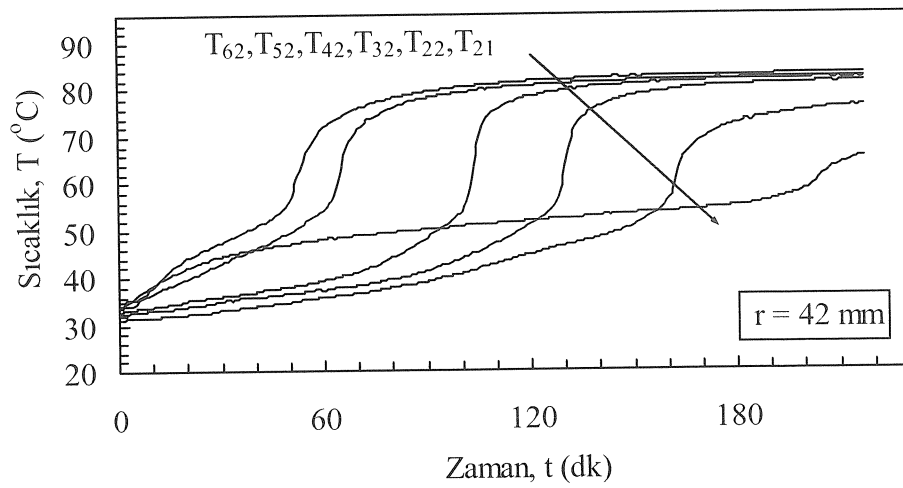
f)



a)

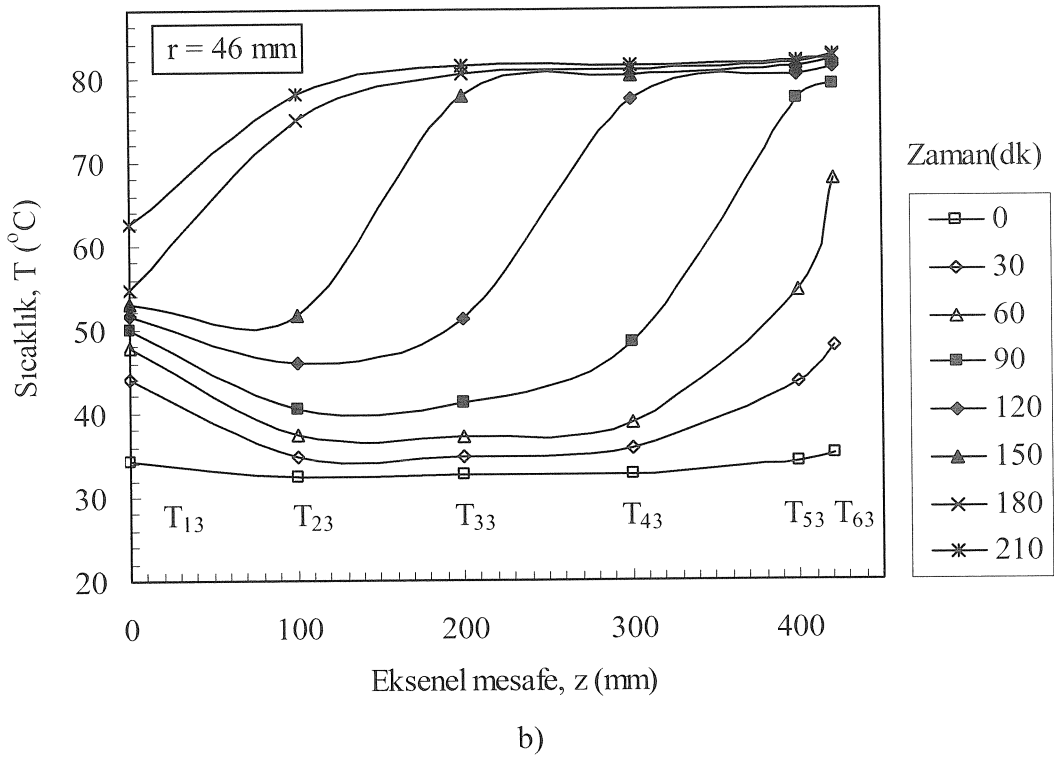
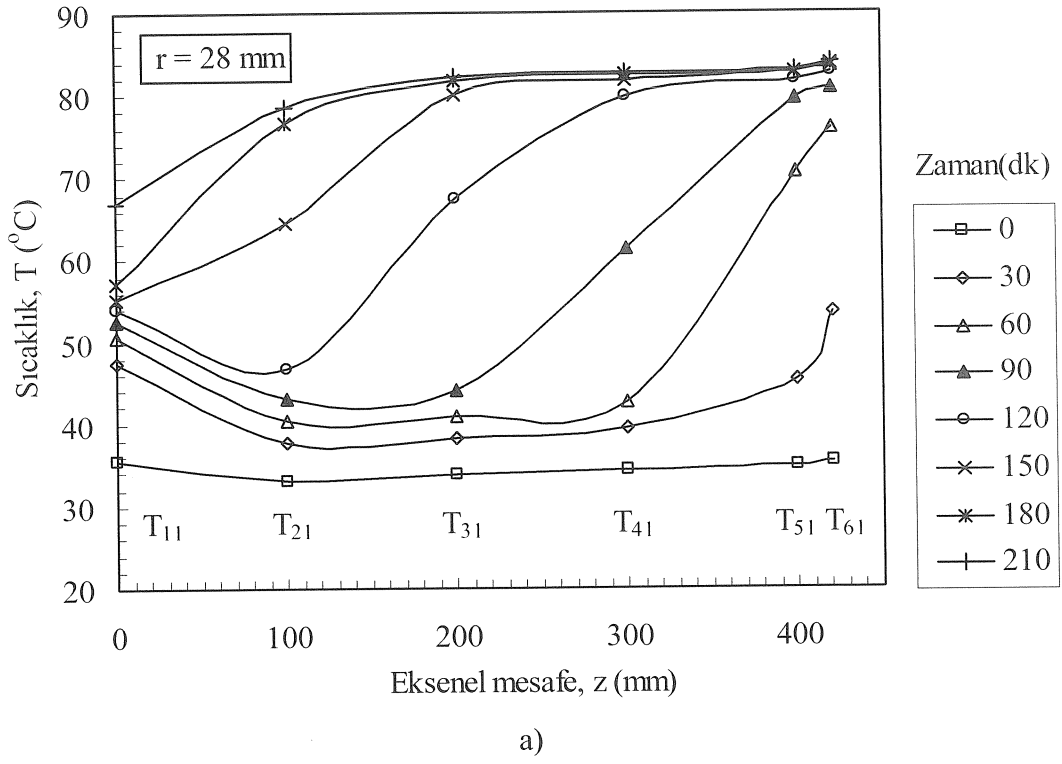


b)

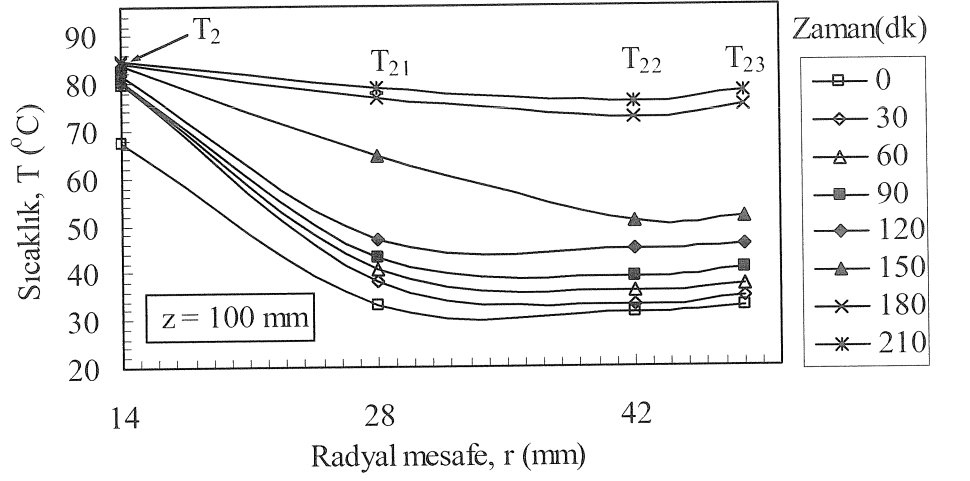


c)

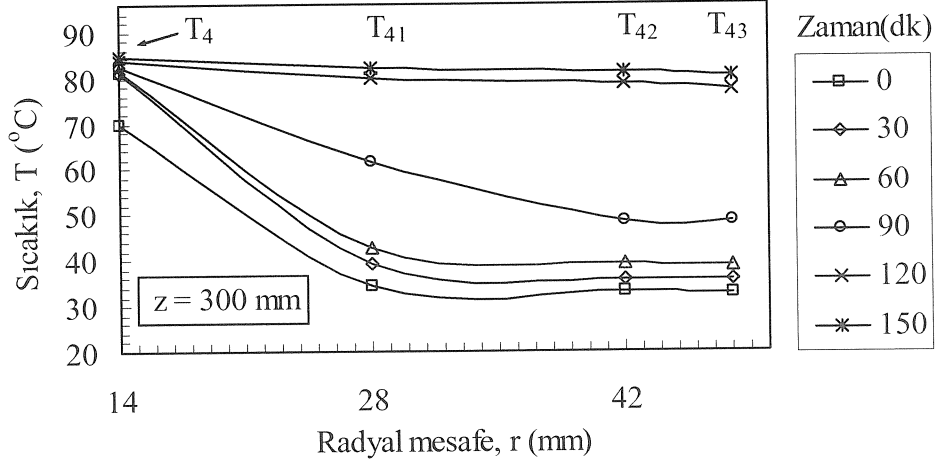
Şekil 3.98. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



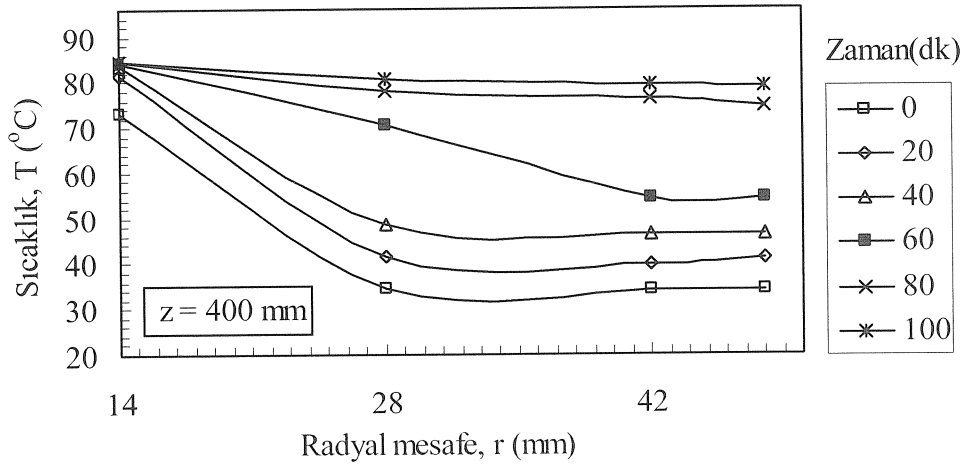
Şekil 3.99. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\theta = 30^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

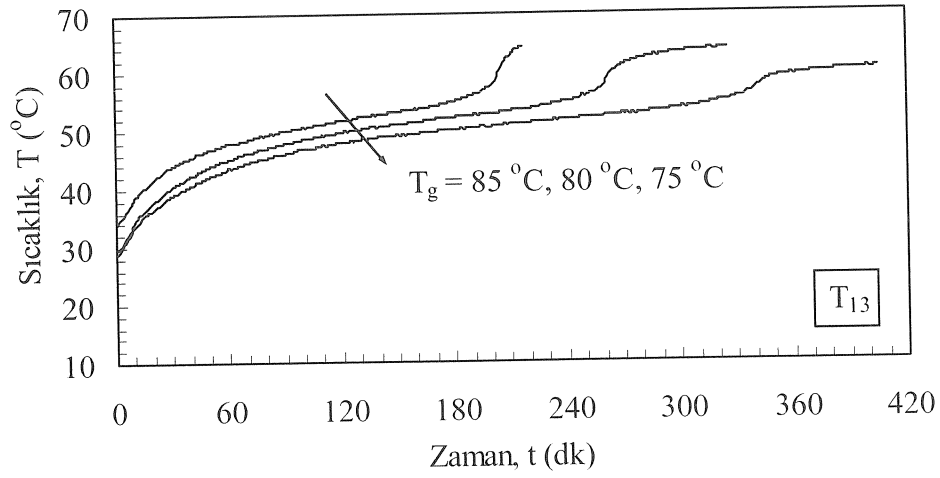


b)

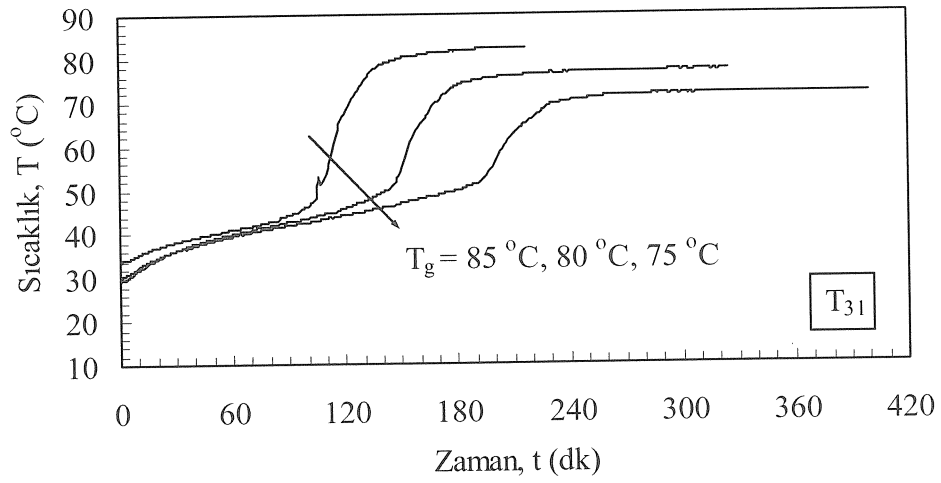


c)

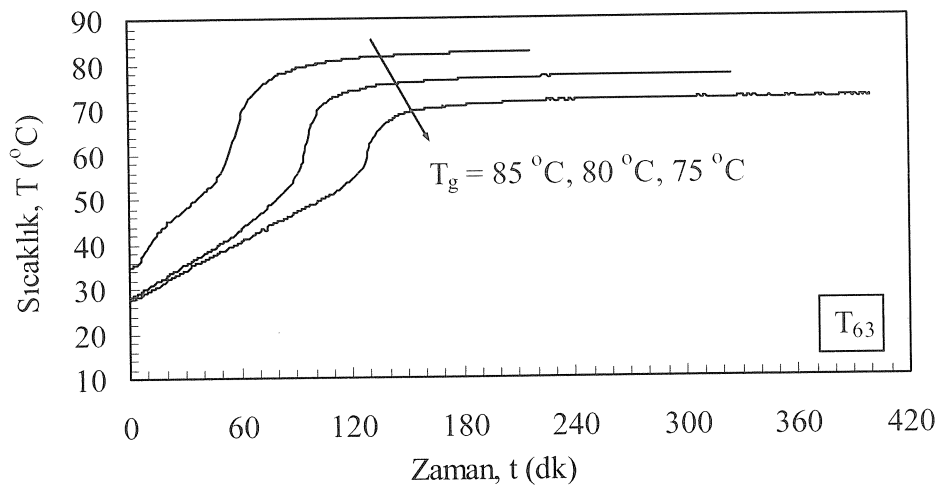
Şekil 3.100. Parafinin (P3) ergimede belirli eksenel mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-radyal mesafe grafikleri ($\theta=30^{\circ}$, $\theta=0^{\circ}$, $T_g=85^{\circ}\text{C}$, $m=8$ kg/dk)



a)

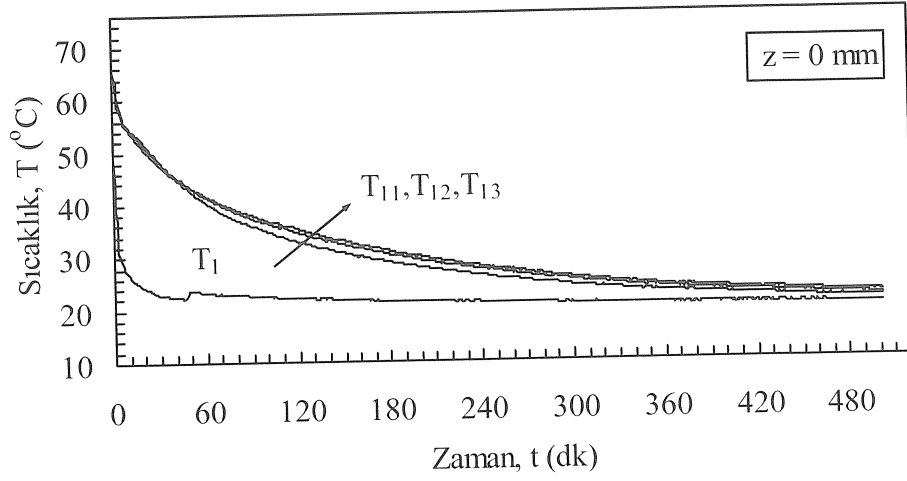


b)

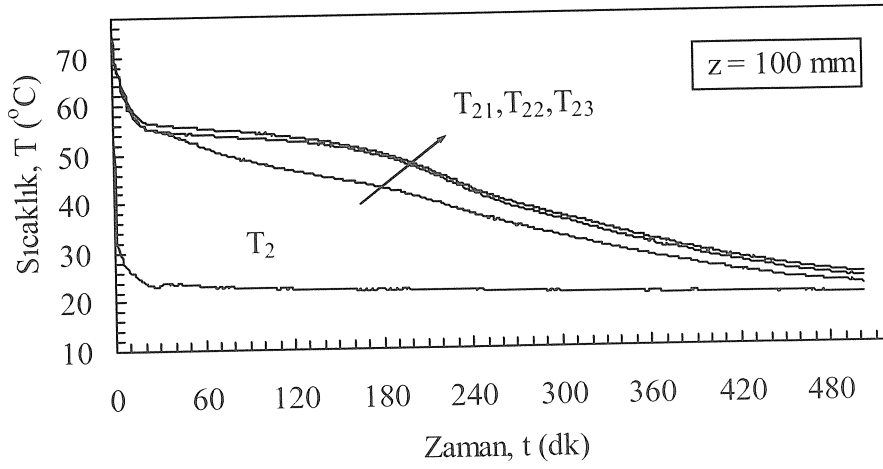


c)

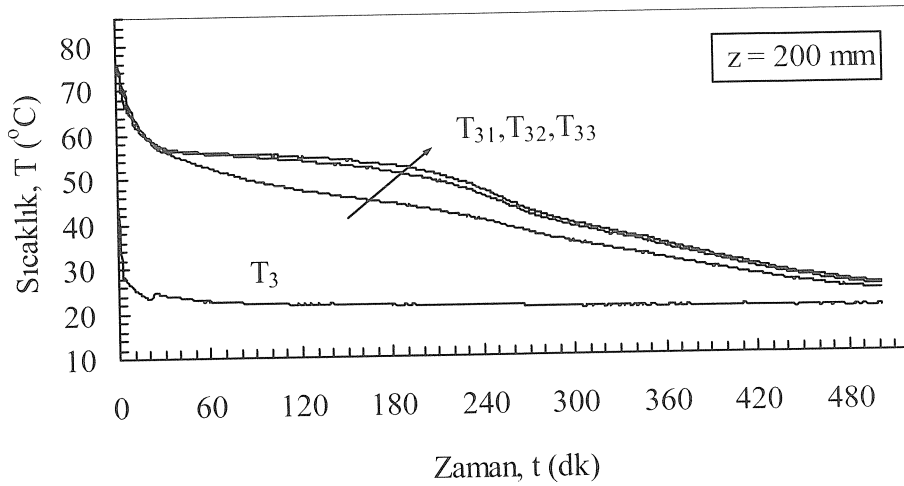
Şekil 3.101. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)



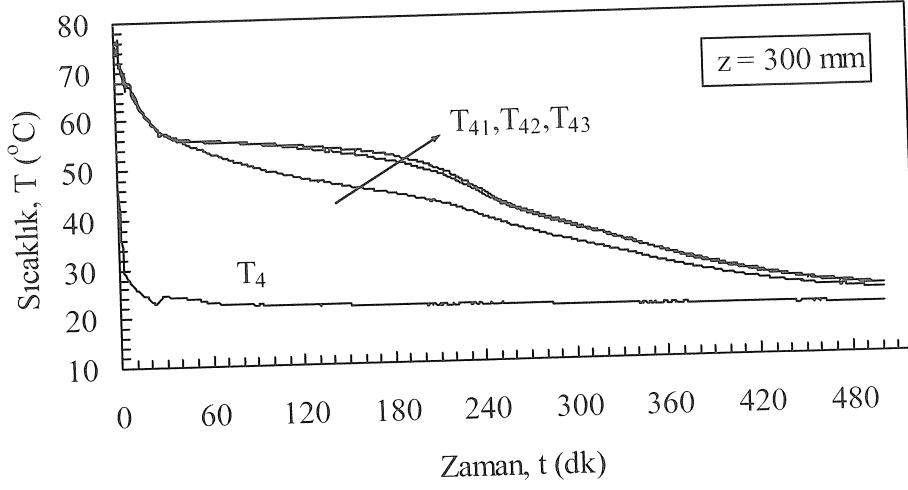
b)



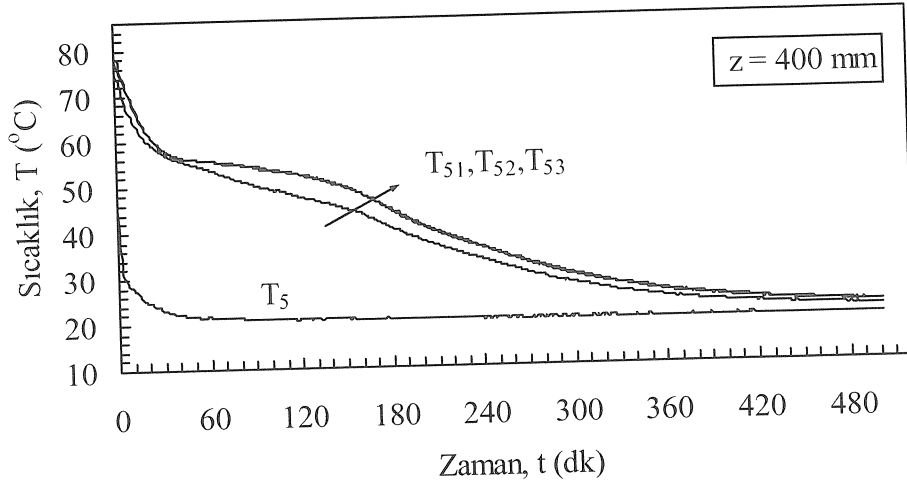
c)

Şekil 3.102. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^{\circ}$, $\theta = 0^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

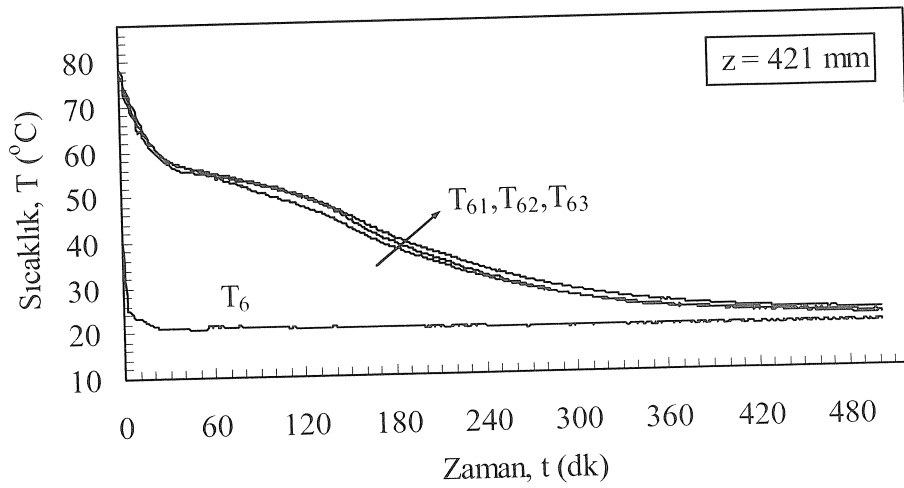
Şekil 3.102.'nin devamı



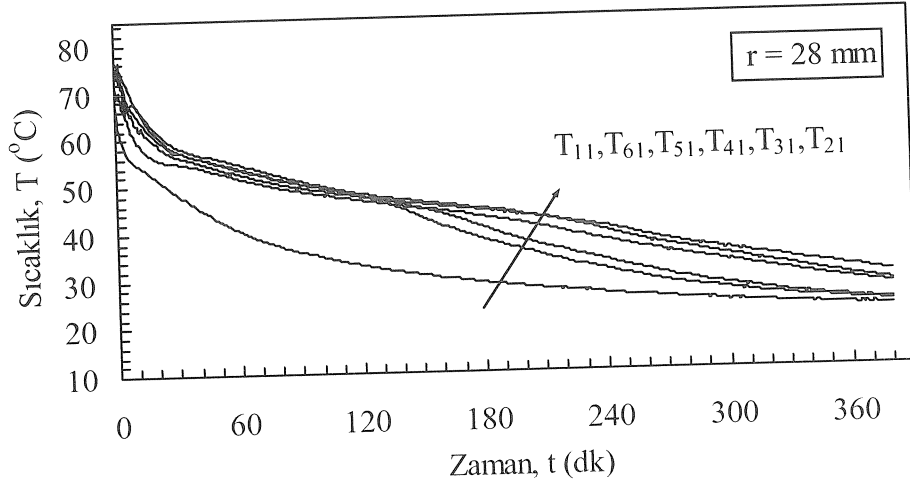
d)



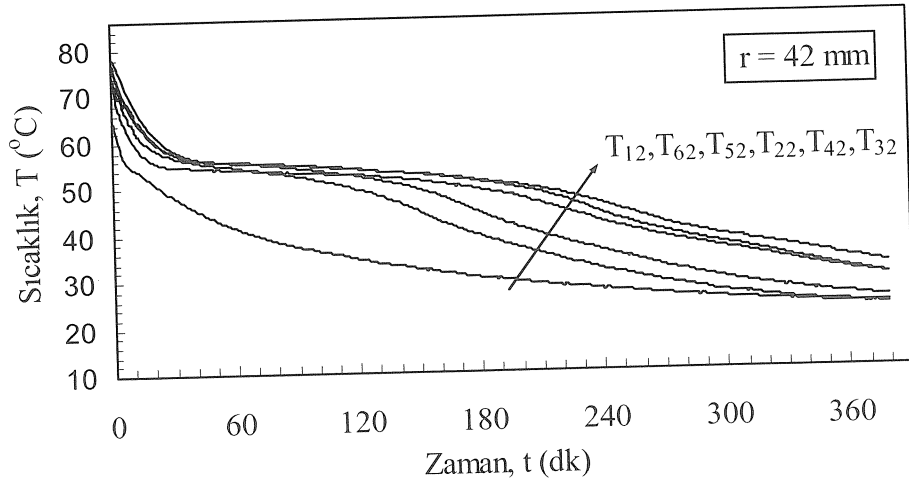
e)



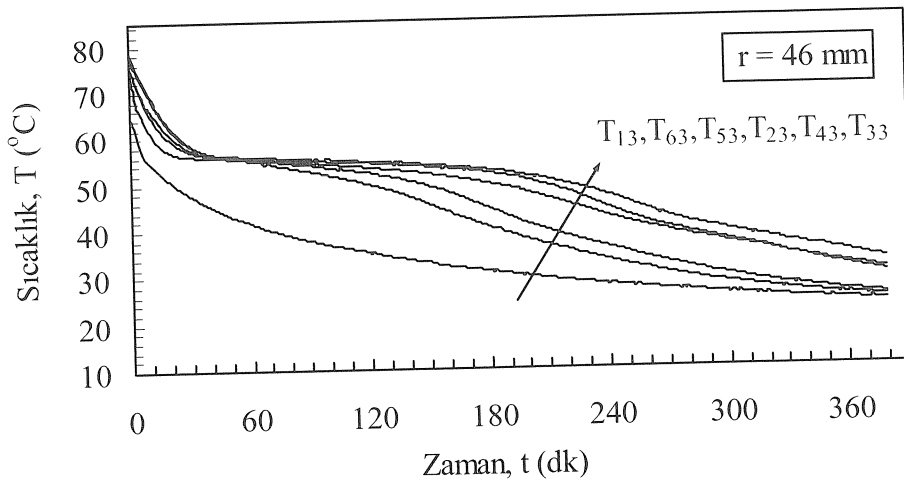
f)



a)



b)



c)

Şekil 3.103. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\Theta = 30^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

3.3.1.2. Depo Kabuk Açısı Beş Derece ($\theta = 5^\circ$)

Erime işleminde parafinin belirli aksenal mesafelerde, radyal yönde sıcaklığın zamanla değişimi Şekil 3.104.(a-f)'de verilmiştir. $z = 0$ mm'de radyal yönde sıcaklık dağılımı yatay depolamadan daha çok düşey depolamaya benzerdir. Çünkü, yatay depolamada T_{11} sıcaklığı hızla faz değişim sıcaklığının üzerine çıkarken burada sıcaklıklar düşey depolamaya benzer şekilde bir süre faz değişim sıcaklığında sabit kalmış ve bu bölgedeki parafin eridiğinde yatay depolamada olduğu gibi parafinin sıcaklığı yavaşça artmıştır. Şekil 3.104.(b-f) incelendiğinde, parafinin aksenal yönde $z = 100$ mm ve 200 mm'deki erime davranışı yatay depolamaya benzerken, $z = 300$ mm ve 400 mm'lerdeki davranışı daha çok düşey depolamaya benzediği görülmüştür. Ancak, $z = 445$ mm'deki erime davranışı düşey depolamaya da benzememektedir. Bunun sebebi, deponun açılı yerleştirilmesinden dolayı erimiş parafinin deponun diğer tarafında birikmesi ve ısı taşınımının bu bölgede daha güçlü olmasıdır. Böylece $z = 445$ mm'de radyal yönde belirlenen sıcaklık dağılımı düşey depolamaya göre daha yavaştır. Düşey depolamada deponun tabanında okunan T_{11} sıcaklığı, yatay depolamada aksenal ve radyal (r_{\max}) en uzun mesafede okunan T_{64} sıcaklığı ve 30° eğimli depolamada kabuk boyunca deponun ortasında okunan T_{43} sıcaklığı, depoda içerisindeki katı parafinin faz değişimini tamamlayarak sıvı faza geçtiğini göstermektedir.

Şekil 3.105.(a,b)'de, belirli radyal mesafelerde aksenal yönde sıcaklığın zamanla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $r = 28$ mm'de aksenal mesafe arttıkça sıcaklık gradyanları arasındaki fark da düşey depolamaya benzer şekilde artmaktadır. Ancak, faz değişimi sırasında depo kabuğu boyunca (r_{\max}) sıcaklık dağılımları benzer değildir. Çünkü, depo yerleştirme açısına ($\theta = 30^\circ$) bağlı olarak parafin deponun altından erimeye başlamış ancak, Şekil 3.105.(b)'de görüldüğü gibi erime alttan yukarıya doğru değil de karışık olarak farklı noktalarda devam etmiştir.

Şekil 3.106.(a,b) ve Şekil 3.107.(a,b)'de zamana bağlı aksenal ve radyal mesafe sıcaklık değişimleri verilmiştir. $r = 28$ mm'de aksenal yönde en son faz değişimi T_{31} noktasında gerçekleşmektedir (Şekil 3.106.(a)). Deponun kabuğu boyunca T_{43} nokta sıcaklığının faz değişim sıcaklığını geçmesi depoda doldurma işleminin tamamlandığını göstermektedir (Şekil 3.106.(b)).

Akışkan giriş sıcaklığına bağlı olarak deponun farklı noktalarında parafin P3'ün sıcaklık zaman değişimleri Şekil 3.108.(a-c)'de verilmiştir. Düşey depolamaya benzer

şekilde eksenel ve radyal mesafe artıca akışkan giriş sıcaklığının faz değişim süresi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

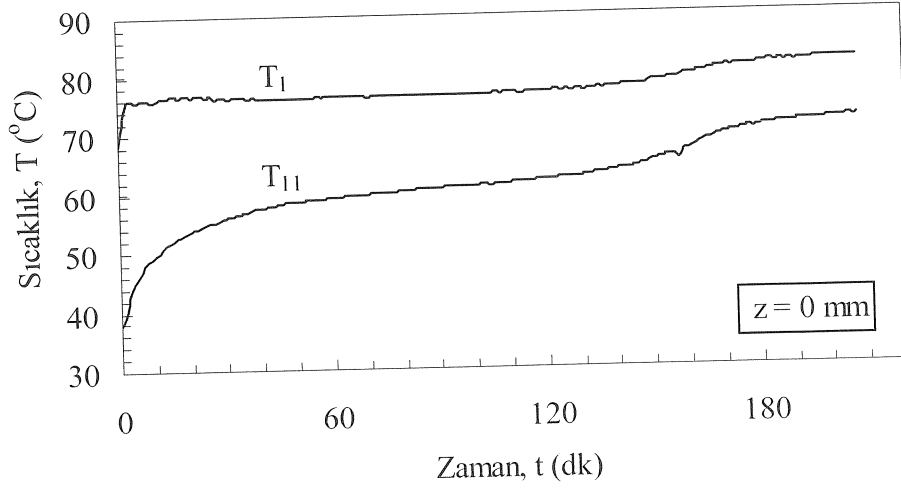
Erime işlemi sırasında akışkan kütleli debisinin parafin P3'ün sıcaklık zaman değişimine etkisi Şekil 3.109.(a-c)'de verilmiştir. Akışkan kütleli debisinin artırılması deponun farklı noktalarında benzer sıcaklık gradyanı meydana getirmektedir. Diğer depo açısı ve geometrilerine benzer şekilde yatayla 30° açı ile yerleştirilmiş depoda erime işlemi debinin artırılmasının parafinin katılma süresine etkisi ihmal edilebilecek kadar az olduğu görülmüştür.

Isının depodan geriye alınması işlemi, depo yerleştirme açısının ($\Theta = 30^\circ$) parafin P3'ün termal davranışına etkisi Şekil 3.110.(a-f)'de verilmiştir. Şekilden, sıvı parafinin sıcaklığı hızla sıvı-katı faz değişim sıcaklığına düştüğü ve bir süre bu sıcaklık aralığında kaldığı ve faz değişimini tamamlayan noktalardaki parafin sıcaklığının soğutucu akışkan sıcaklığına yaklaştığı görülmüştür. Deponun eğimli yerleştirilmesi, eksenel yönde parafinin katılma süresini artırmış ancak, parafinin toplam katılma süresine bu artışın etkisi yoktur. Deponun düşey veya yatay veya açılı ($\Theta = 30^\circ$) sisteme bağlanmasının parafinin katılma davranışına etkisinin olmadığı ancak, katılma süresi üzerinde ihmal edilebilecek bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

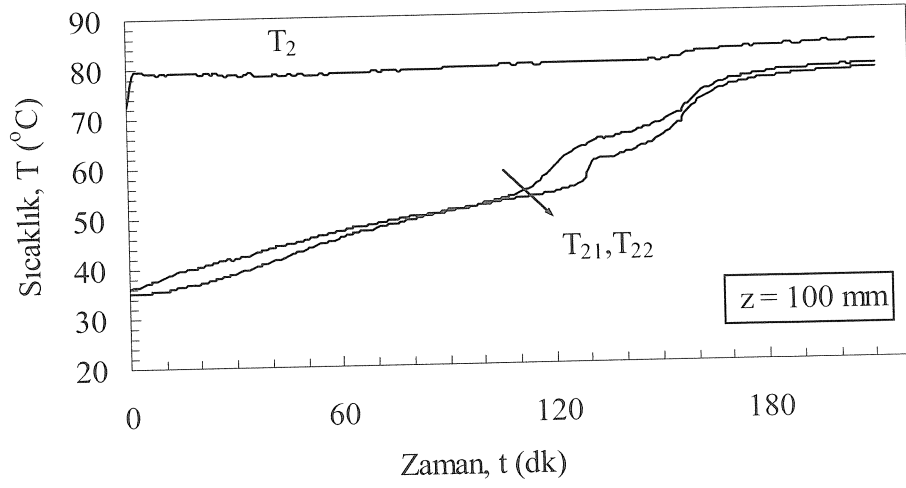
Belirli radyal mesafelerde eksenel yönde katılma sıcaklığının zamanla değişimi Şekil 3.111.(a,b)'de verilmiştir. Eksenel yönde sıcaklığın zamanla değişimi düşey depolamaya daha benzer bir karakter taşımaktadır.

Şekil 3.112.(a,b) ve Şekil 3.113.(a,b)'de zamana bağlı eksenel ve radyal mesafe sıcaklık değişimleri verilmiştir. Depo kabuğu boyunca (r_{\max}) faz değişimi sırasında sıcaklık uzun süre sabit kalmakta (90 dk.) ve katılma tamamlandığında, ısı duyulur olarak parafinden çekilmektedir. Isı transfer borusundan radyal yönde yeterince uzaklaşıldığında (14 mm), parafin sıcaklığı katılma işlemi süresince eksenel yönde yaklaşık sabit kaldığı Şekil 3.113.(b)'den anlaşılmıştır. Burada deponun içerisinde en son sıvı-katı faz değişimi T_{54} noktasında meydana gelmektedir.

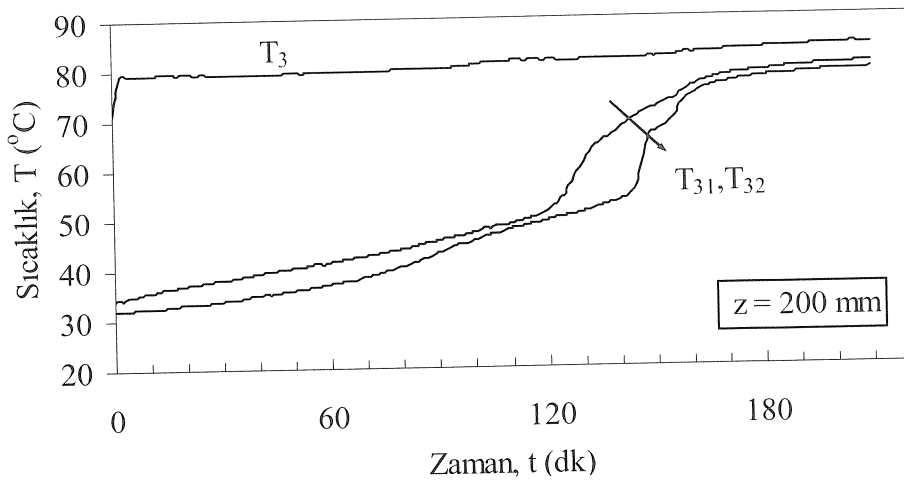
Soğutucu akışkan debisinin deponun katılma davranışına etkisi Şekil 3.114.(a-c)'de verilmiştir. Beklenildiği gibi, deponun sisteme açılı bağlanması ($\Theta = 30^\circ$) durumunda da artan kütleli debinin parafin P3'ün katılma zamanı üzerinde bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.



a)



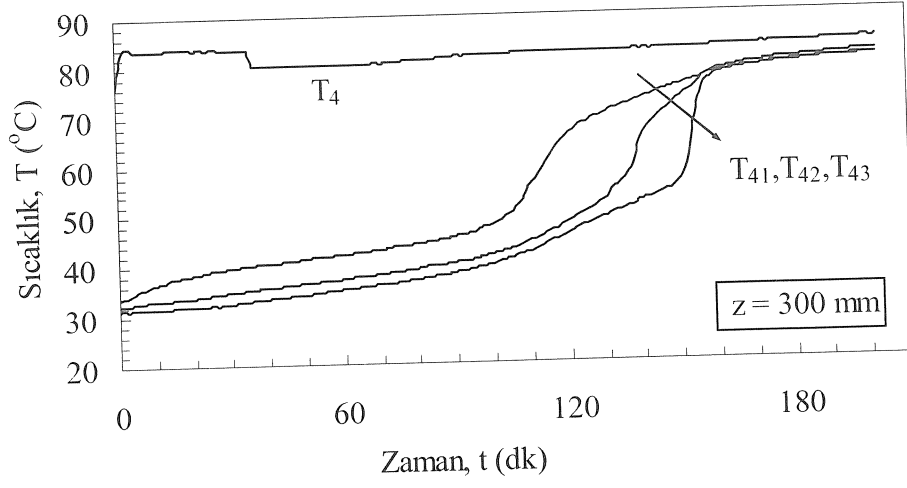
b)



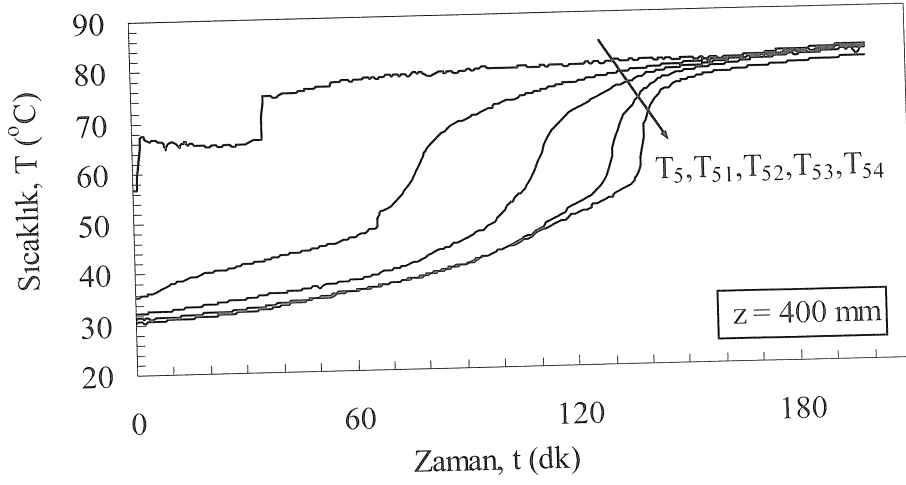
c)

Şekil 3.104. Parafinin (P3) ergimedeki belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)

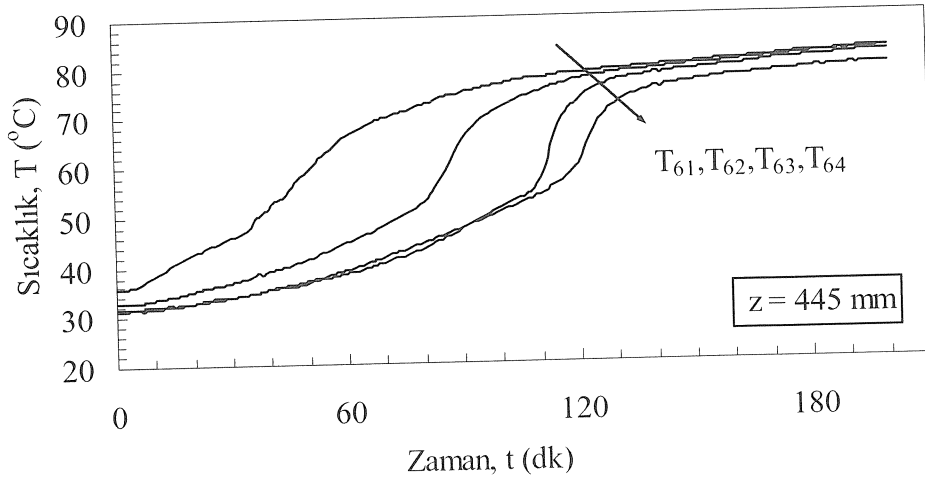
Şekil 3.104.'ün devamı



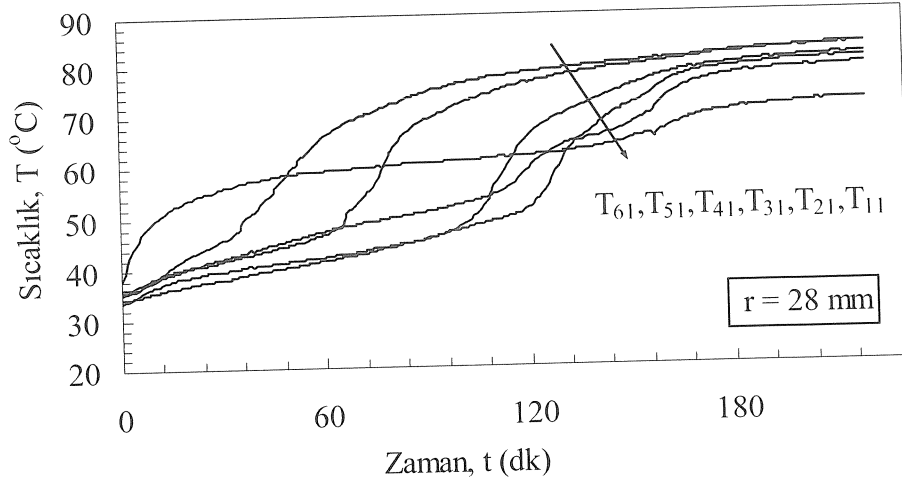
d)



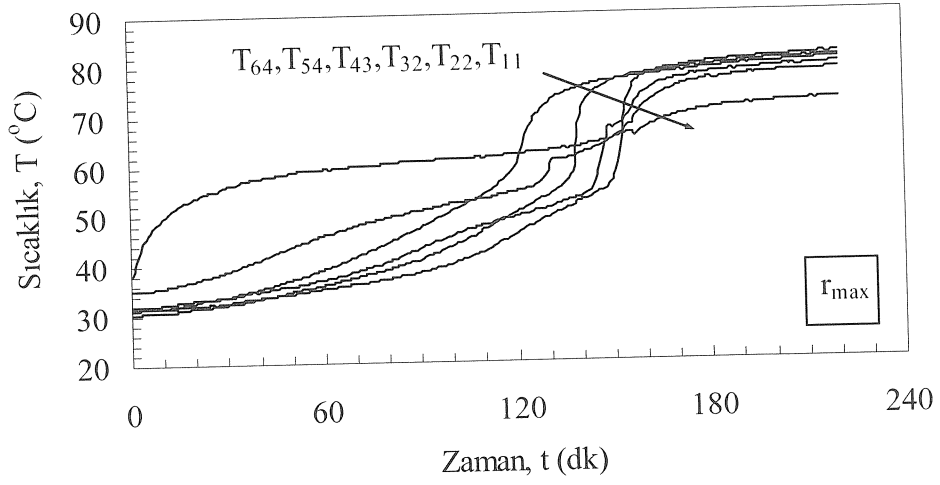
e)



f)

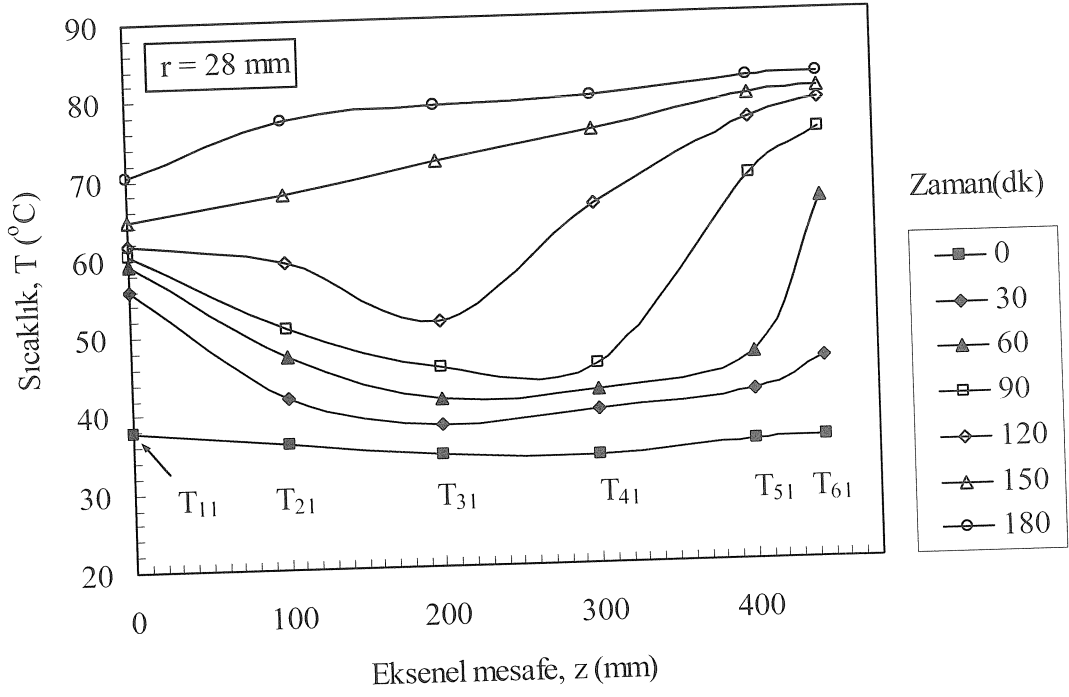


a)

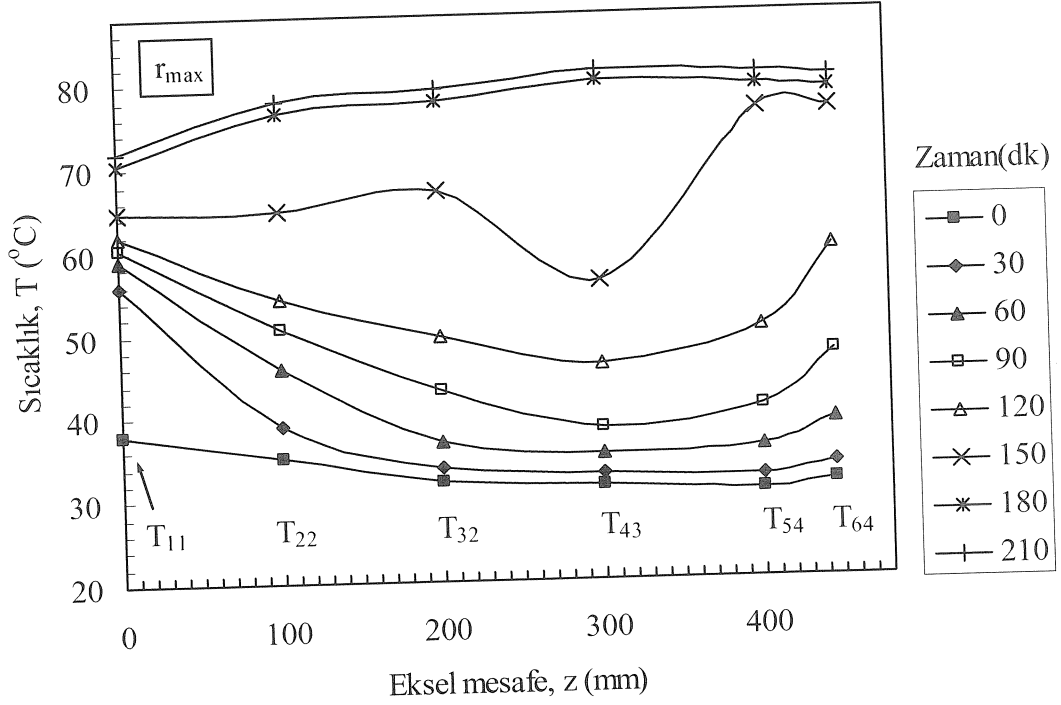


b)

Şekil 3.105. Parafinin (P3) ergirmede belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

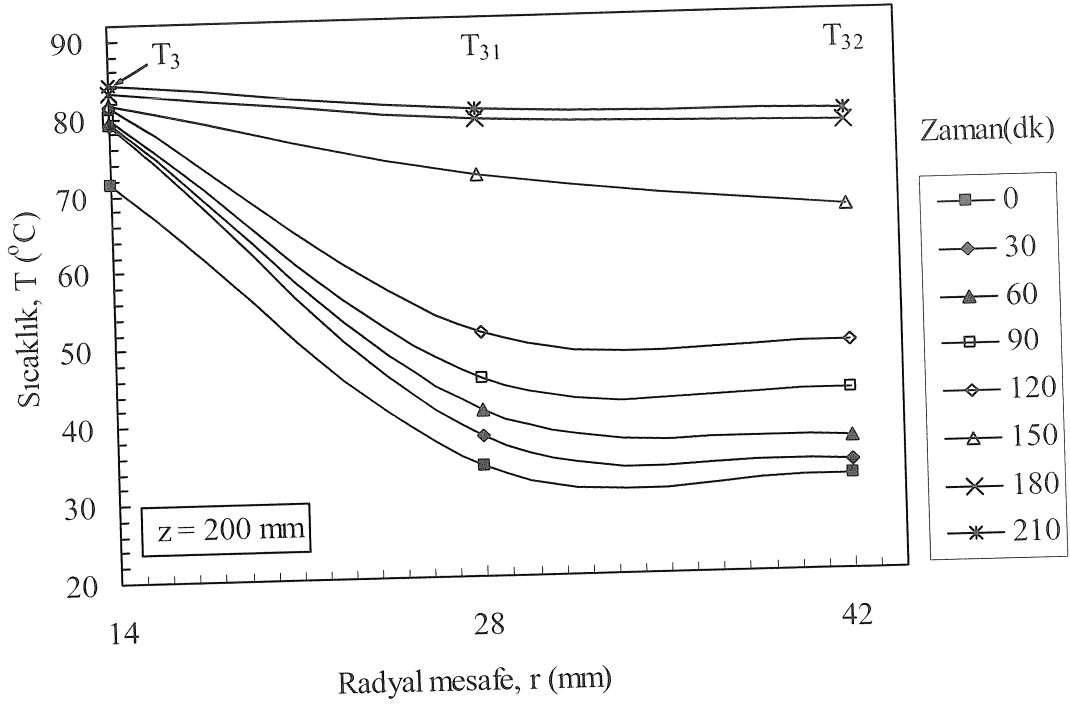


a)

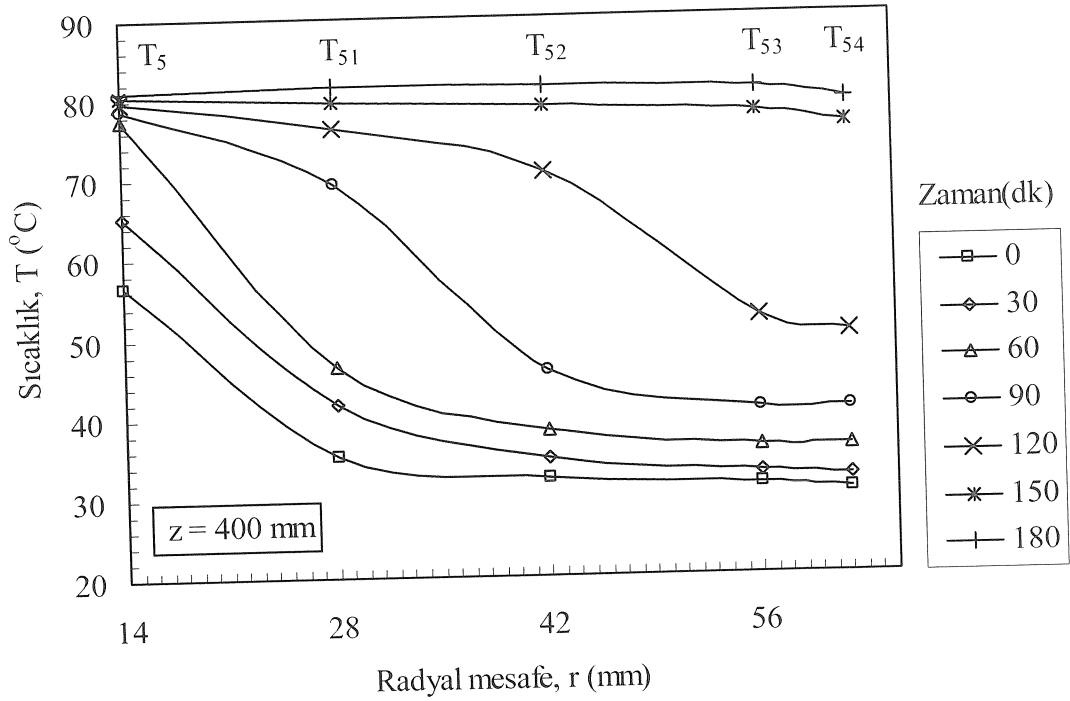


b)

Şekil 3.106. Parafinin (P3) ergirmede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 30^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

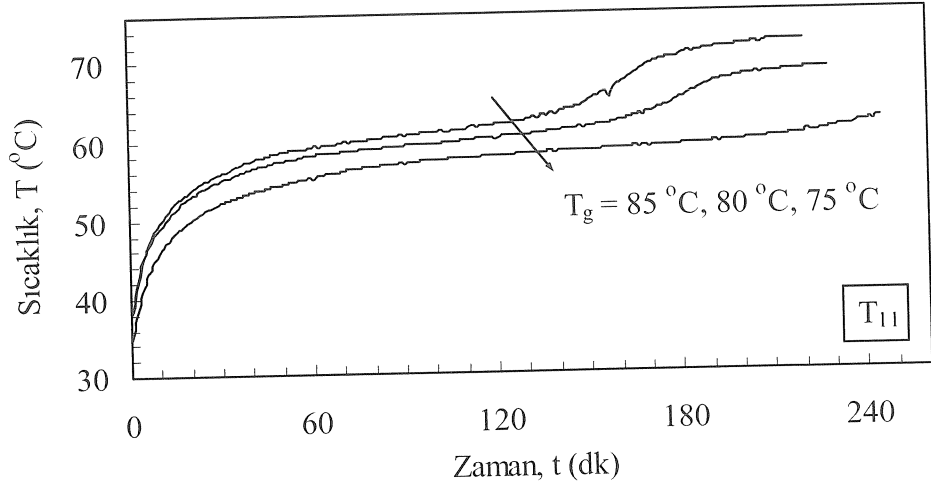


a)

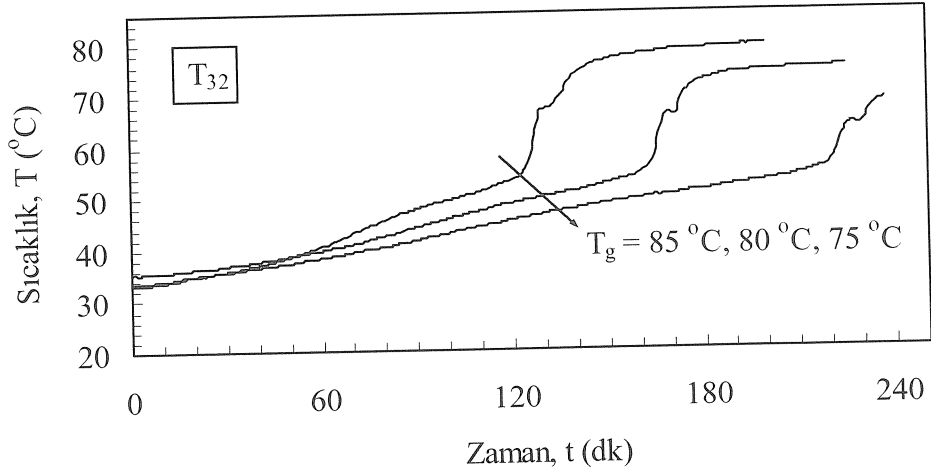


b)

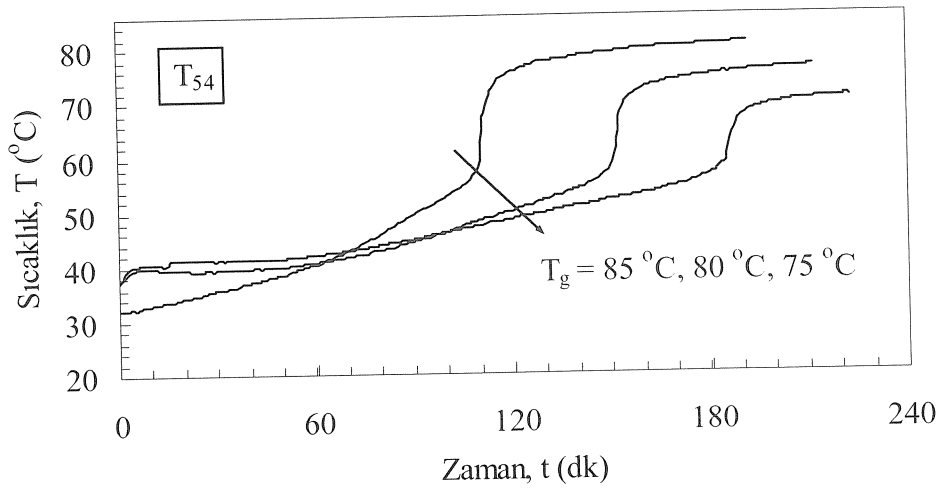
Şekil 3.107. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

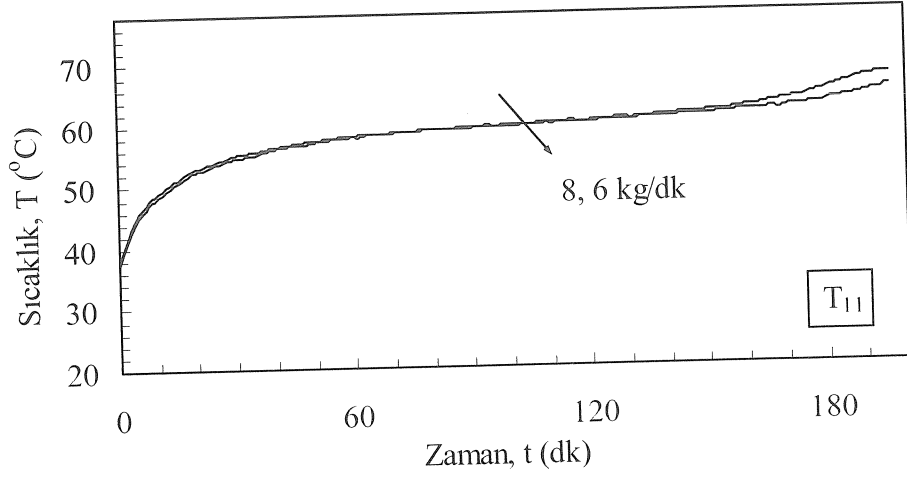


b)

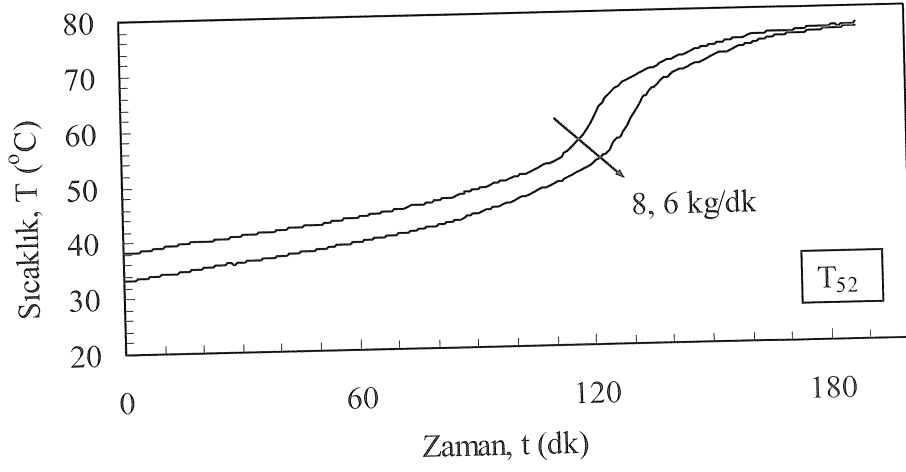


c)

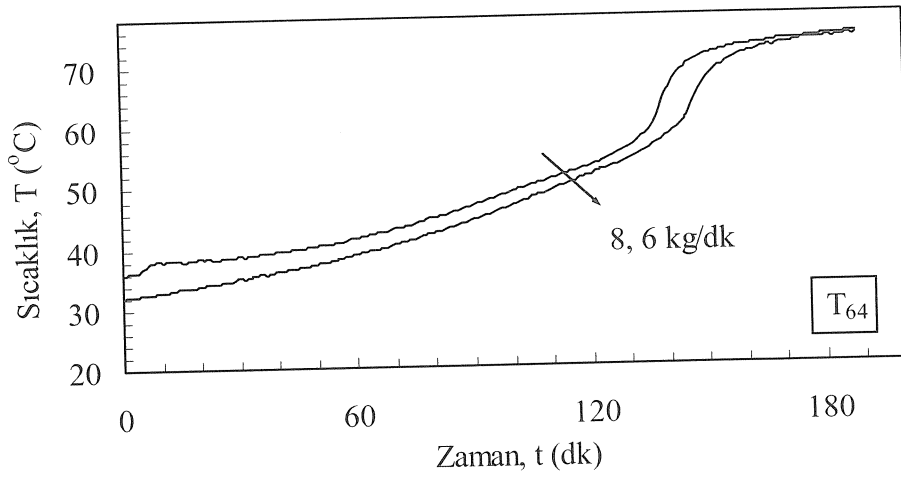
Şekil 3.108. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

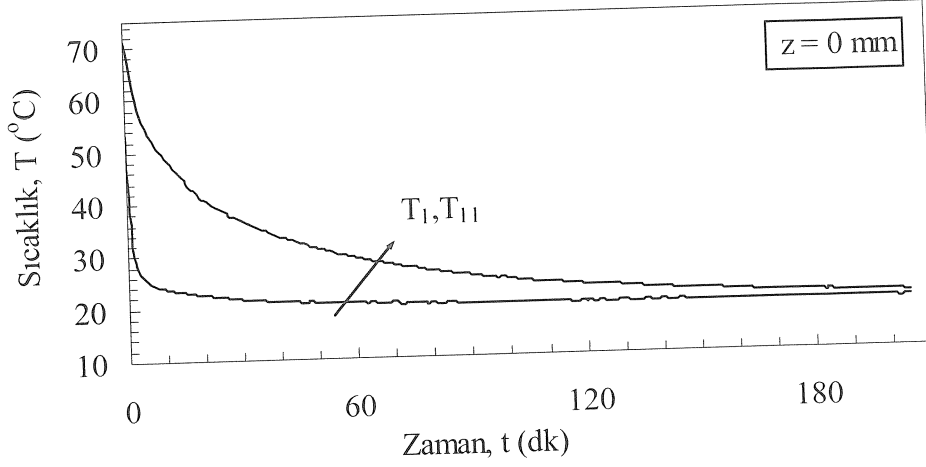


b)

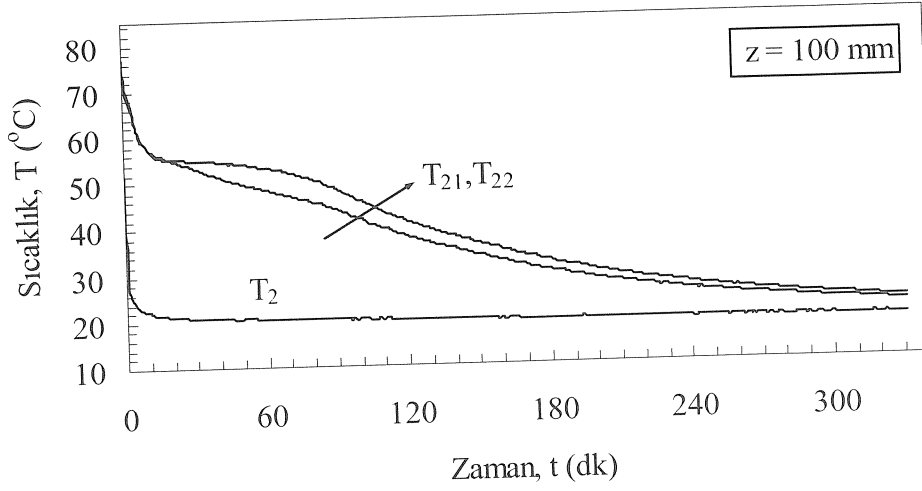


c)

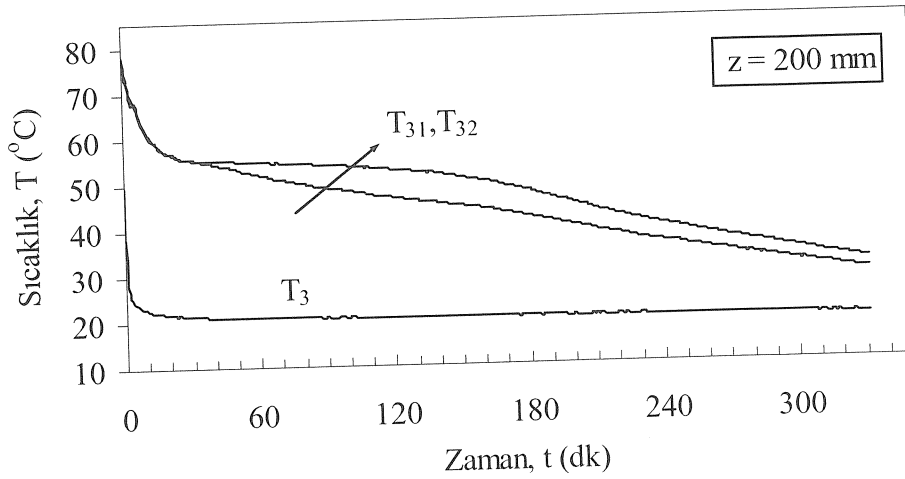
Şekil 3.109. Parafinin (P3) ergirmede belirli noktalarda, suyun kütlelesel debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$)



a)



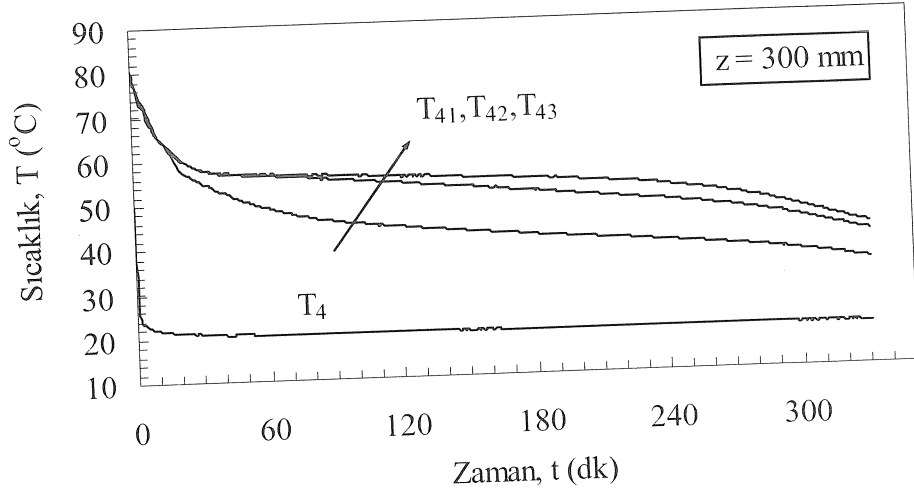
b)



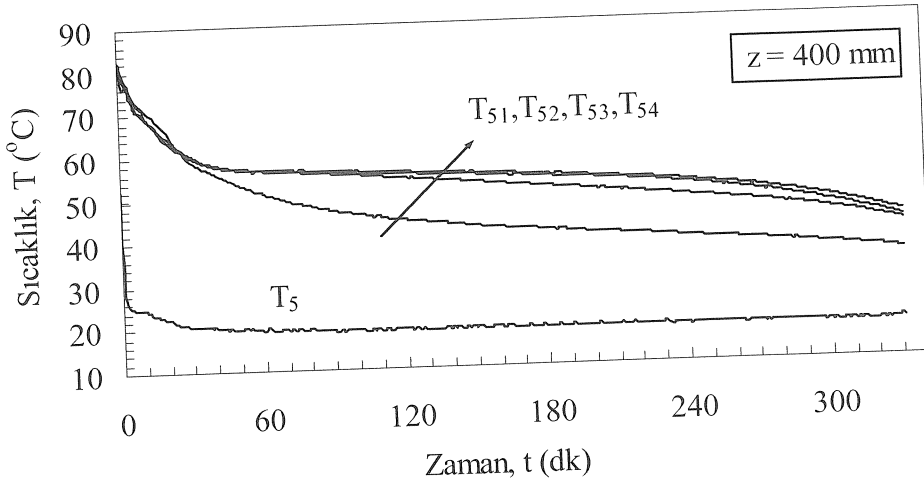
c)

Şekil 3.110. Parafinin (P3) katılaşmada belirli eksenel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\delta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8$ kg/dk)

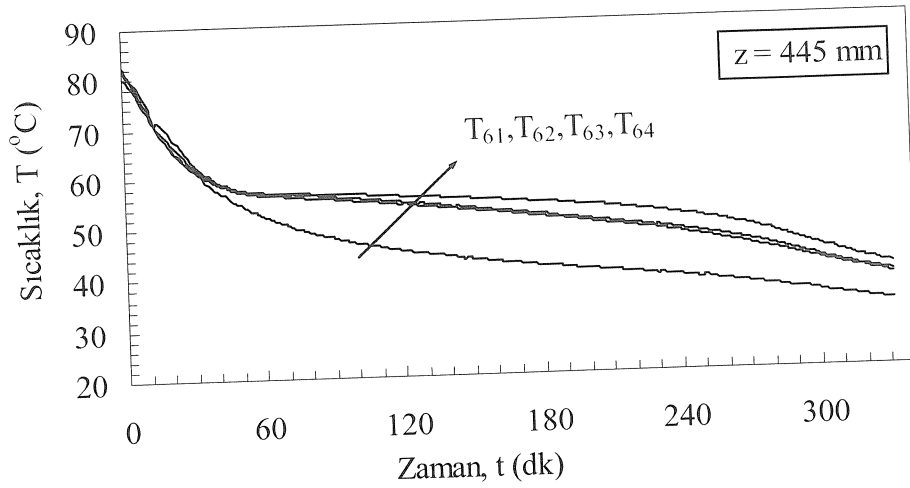
Şekil 3.110.'nun devamı



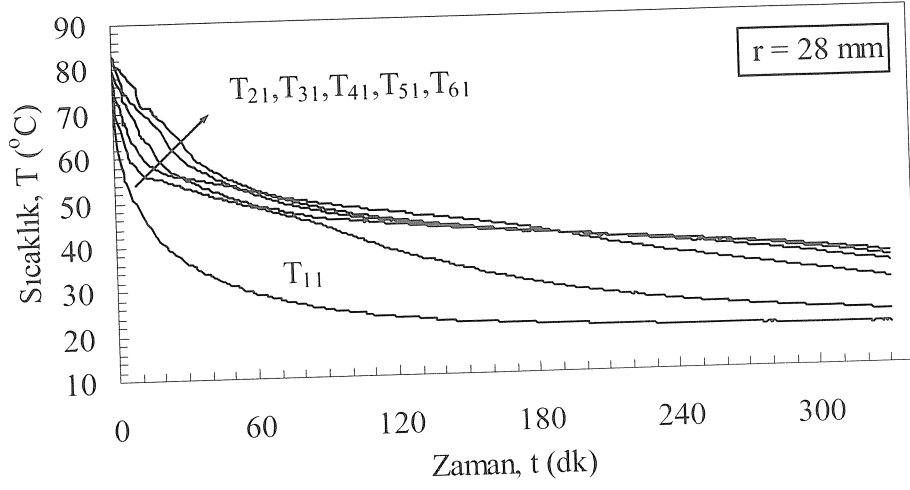
d)



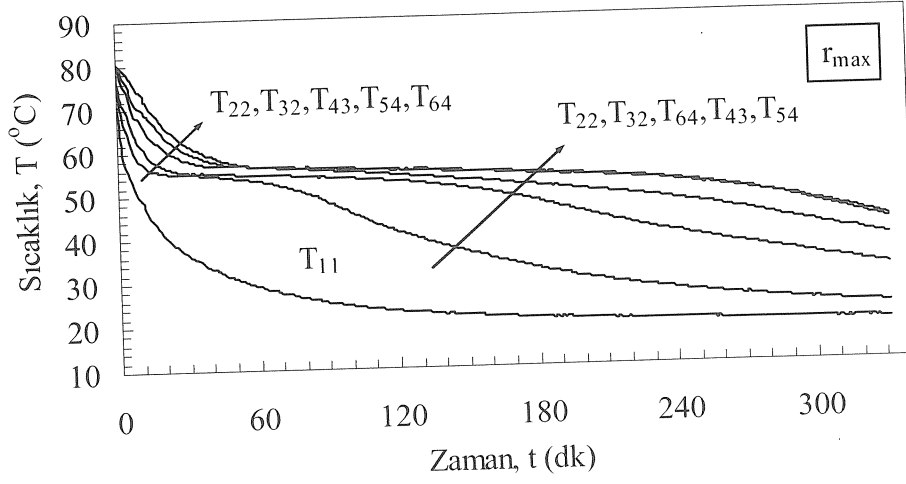
e)



f)

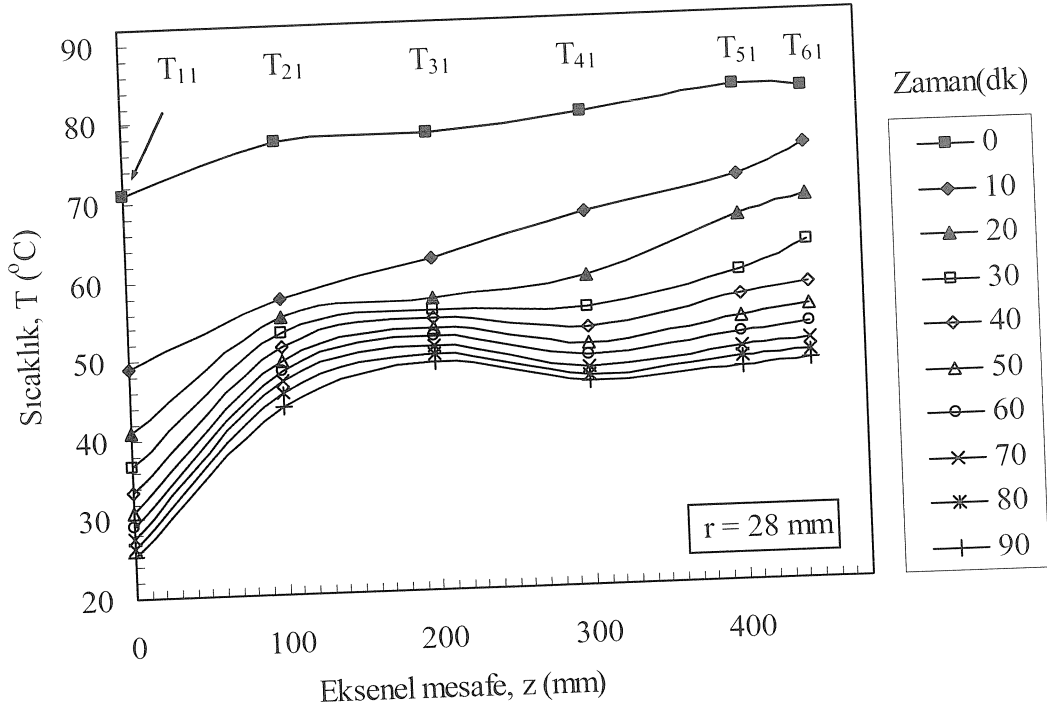


a)

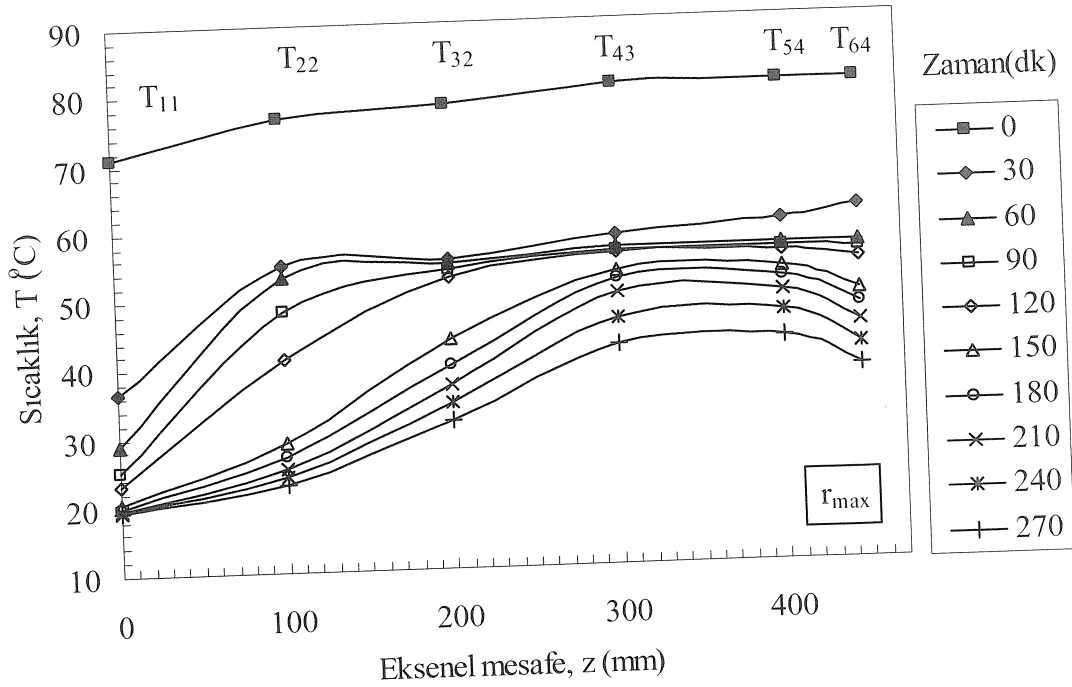


b)

Şekil 3.111. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

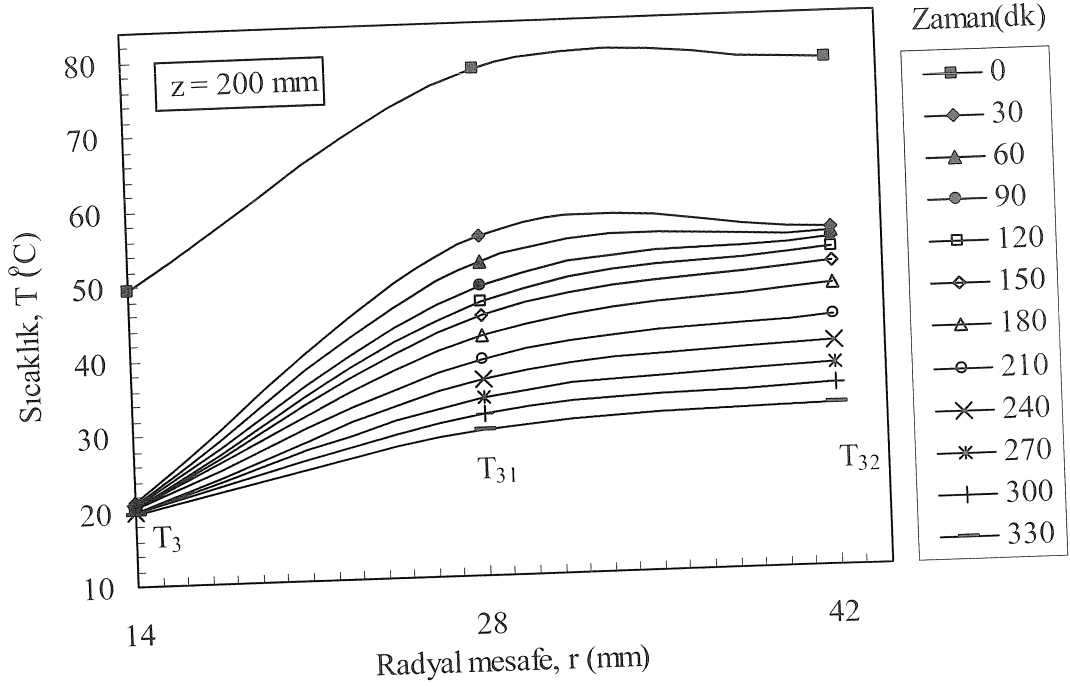


a)

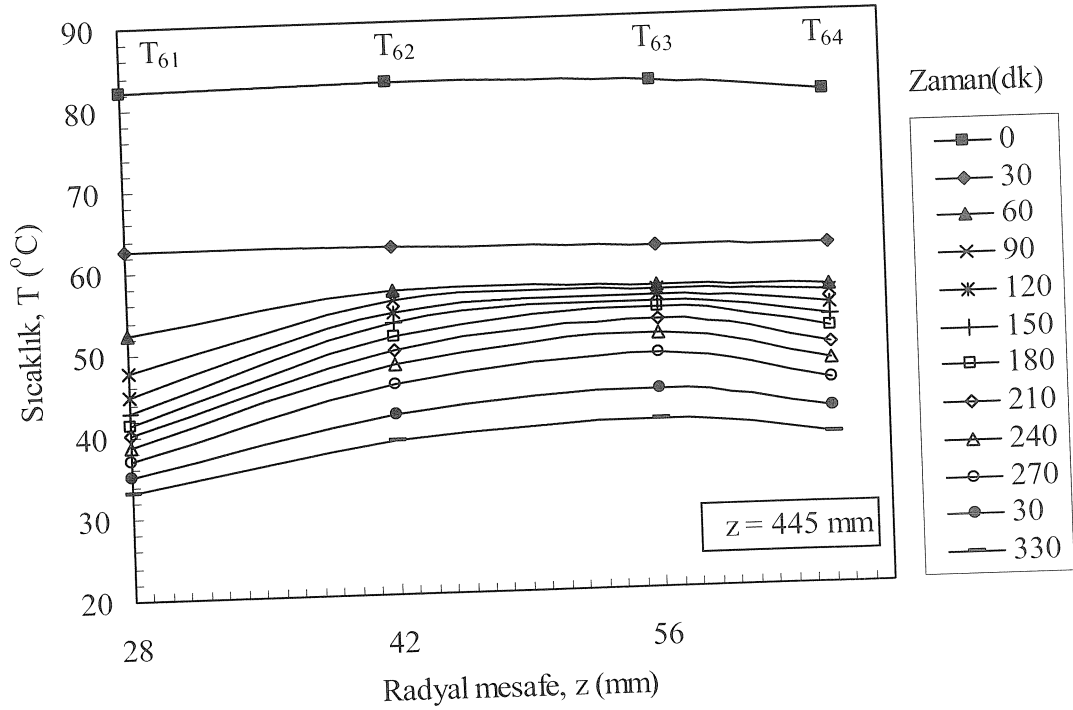


b)

Şekil 3.112. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\emptyset = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

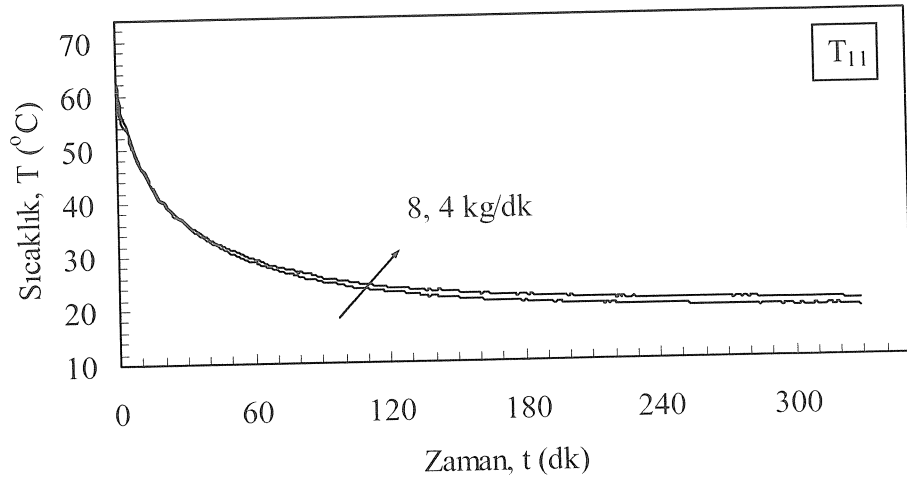


a)

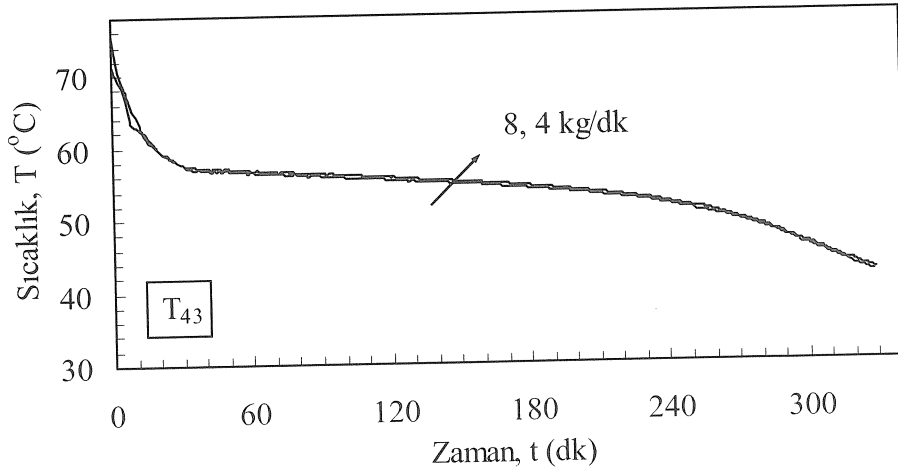


b)

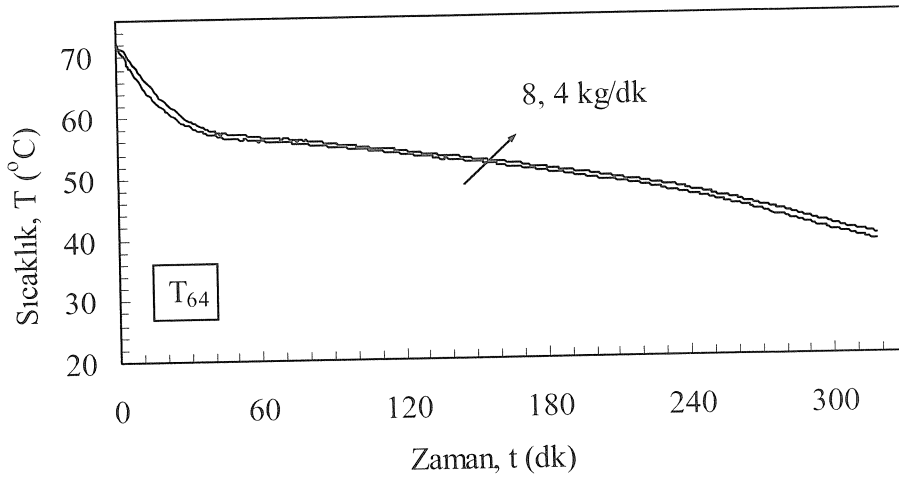
Şekil 3.113. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)



b)



c)

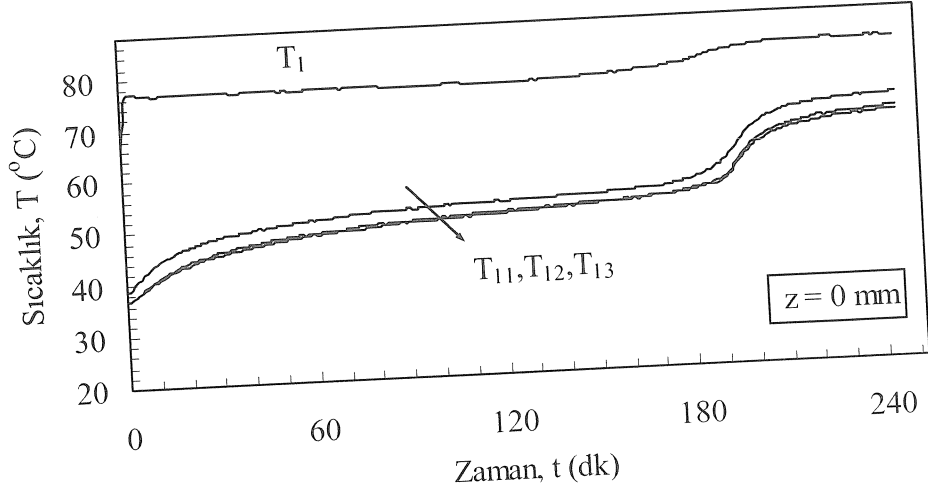
Şekil 3.114. Parafinin (P3) katılaşmada belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)

3.3.2. Deponun Altmış Derece Yerleştirilmesi ($\theta = 60^\circ$)

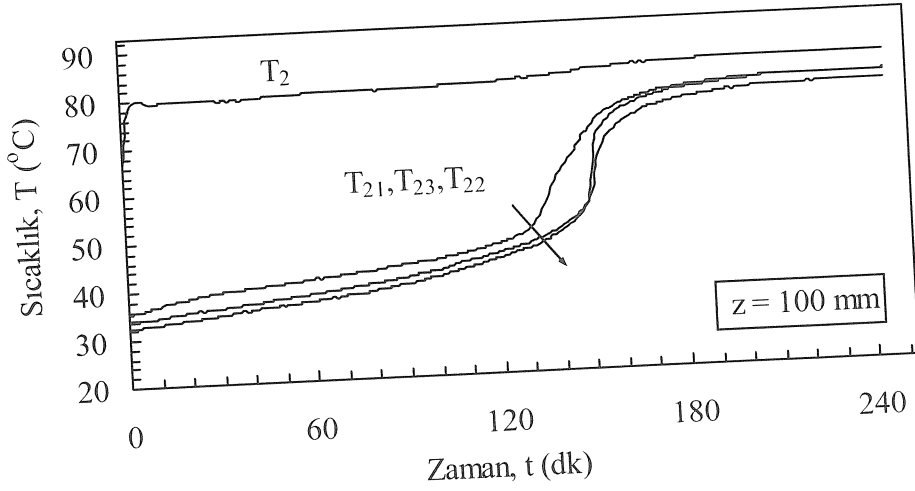
3.3.2.1. Depo Kabuk Açısı Sıfır Derece ($\theta = 0^\circ$)

Erime işleminde parafinin P3'ün belirli aksenal mesafelerde, radyal yönde sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.115.(a-f)'de verilmiştir. $z = 0$ mm'de radyal yönde parafinin sıcaklık dağılım karakteri deponun düşey ve yatayla 30° yerleştirilme durumuna benzerdir. Ancak T_{11} noktasındaki parafinin erime süresi birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Tabandan itibaren aksenal mesafe arttıkça parafinin erime süresi kısalmakta; ancak, erime davranışı değişmemektedir.

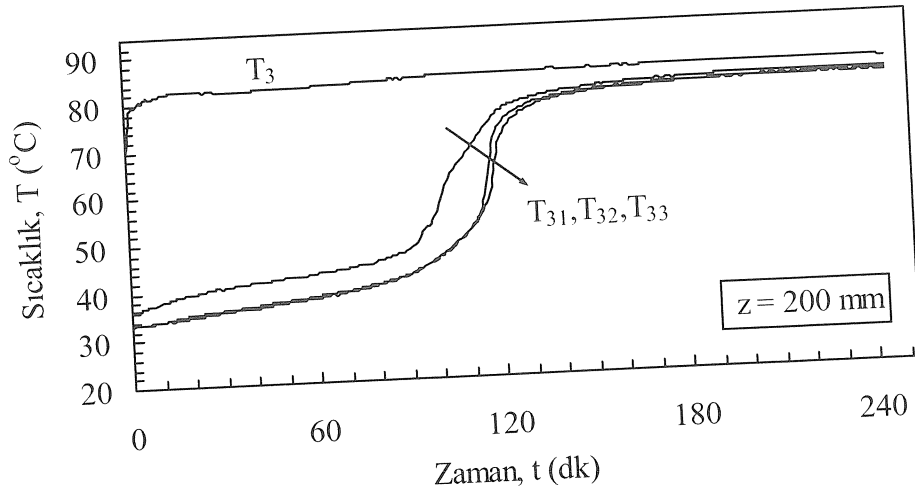
Şekil 3.116.(a-c), belirli radyal mesafelerde aksenal yönde zamanla sıcaklığın değişimini göstermektedir.. Düşey silindirik depolamada olduğu gibi, $z = 0$ mm'de parafinin sıcaklığı hızla faz değişim sıcaklığına eriştiği ve radyal yönde yukarıdan aşağıya doğru parafinin eridikçe kendi aksenal doğrultusunda $z = 0$ mm sıcaklığını geçtiği görülmektedir. T_{13} sıcaklığının ani olarak katı-sıvı faz değişim sıcaklığının üzerine çıkması, gizli ısı depolama periyodunun tamamlandığını gösterir.



a)



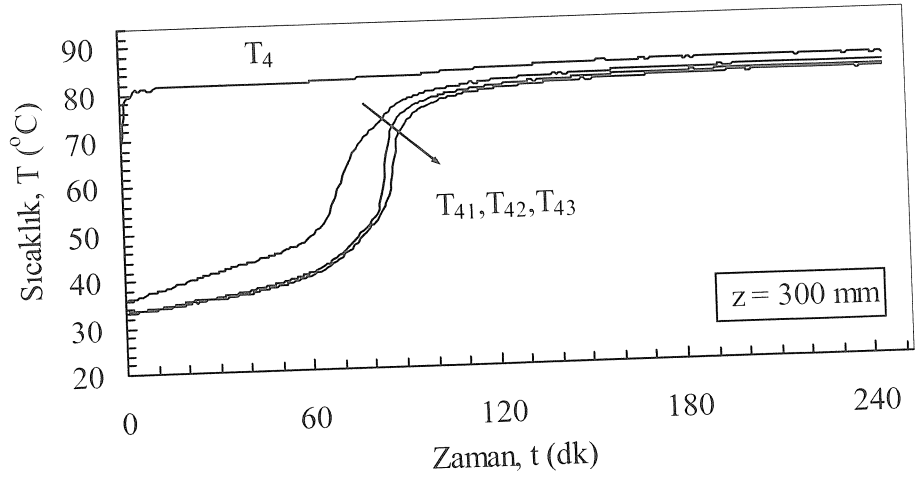
b)



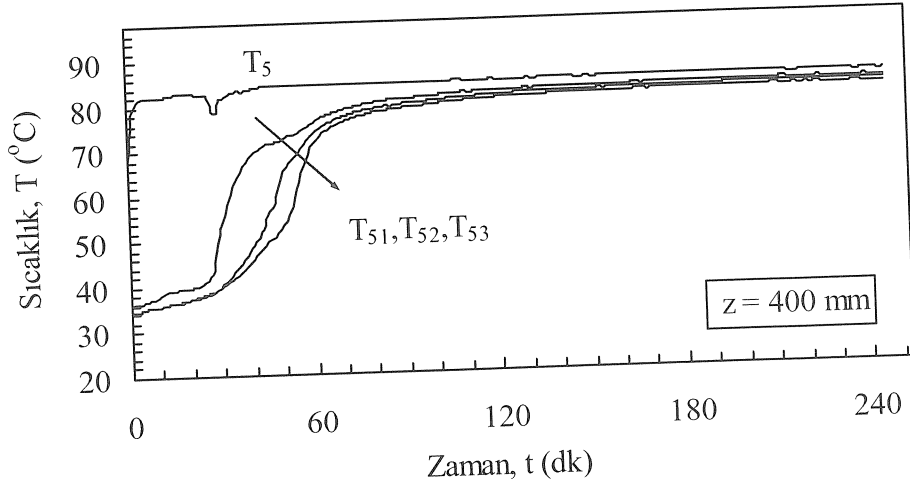
c)

Şekil 3.115. Parafinin (P3) ergimede belirli aksel mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 5^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

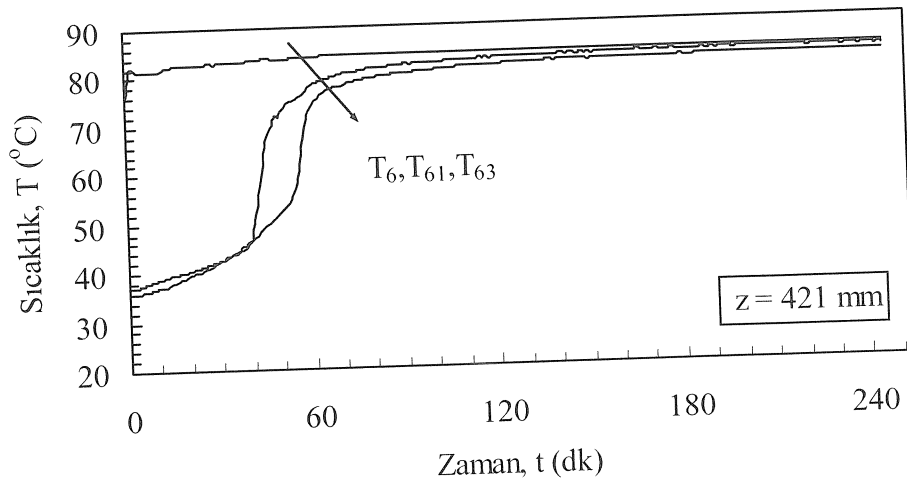
Şekil 3.115'in devamı



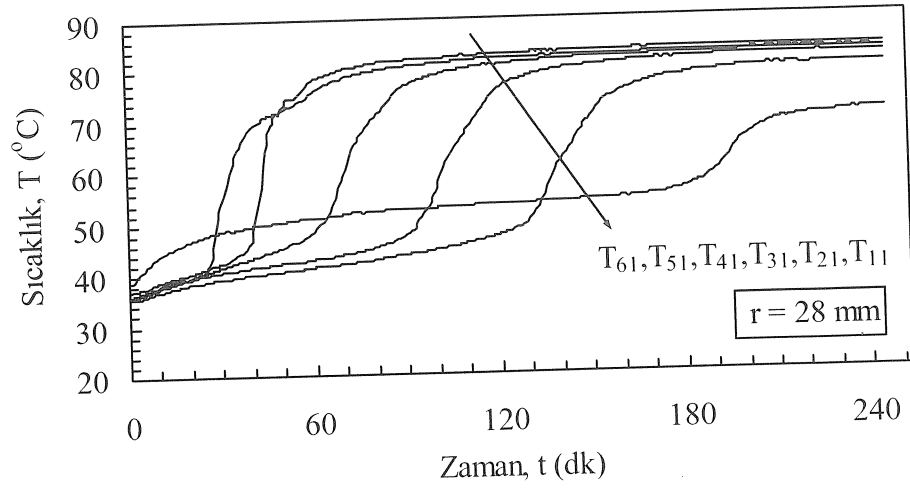
d)



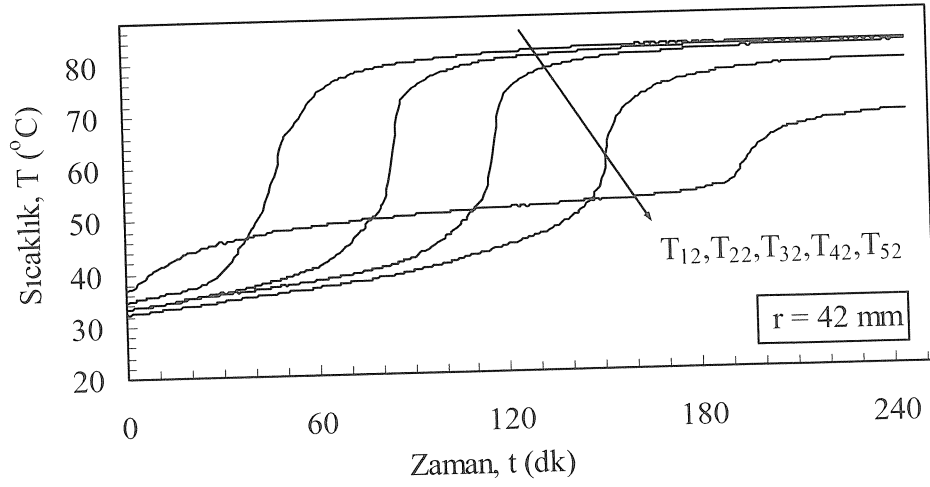
e)



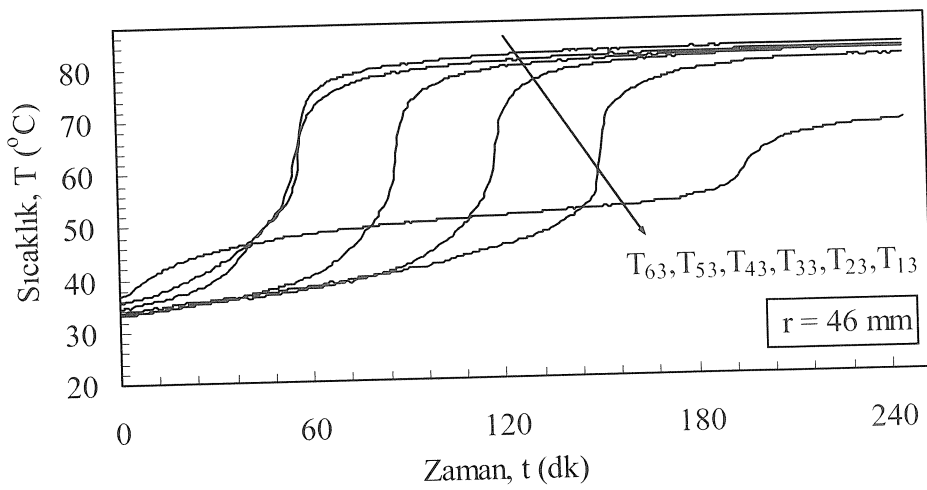
f)



a)



b)



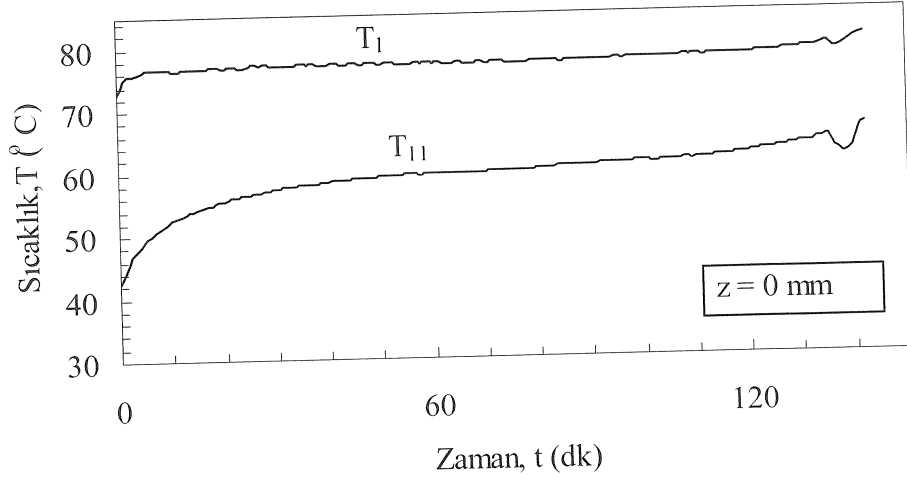
c)

Şekil 3.116. Parafinin (P3) ergimedeki belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 0^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

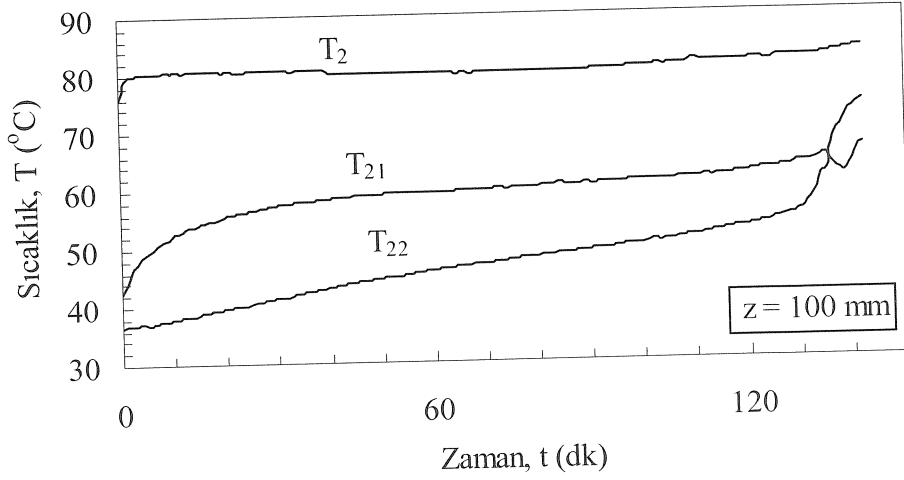
3.3.2.2. Depo Kabuk Açısı Beş Derece ($\theta = 5^\circ$)

Beş derece kabuk açılı deponun, depolama sistemine yatayla 60° açı ile bağlanması durumunda parafin P3'ün erime ve katılaşma davranışı Şekil 3.117.- Şekil 3.127.'de verilmiştir. Bu depolama şeklinde elde edilen eğriler, deponun düşey ve 30° açıyla sisteme bağlanması durumu erime ve katılaşma eğrilerinin yaklaşık ortalaması olduğu görülmüştür.

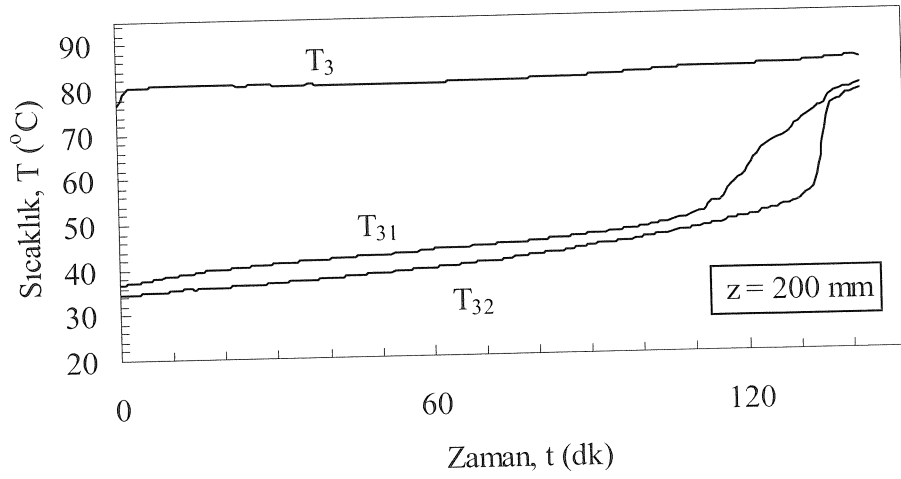
Katı-sıvı faz değişiminin en son gerçekleştiği yerin T_{32} noktası olduğu Şekil 3.119.(b)'de görülmektedir. Bu depo yerleştirme açısı ($\theta = 60^\circ$) için, T_{32} sıcaklığının ani olarak katı-sıvı faz değişim sıcaklığının üzerine çıkması gizli ısı depolama periyodunun tamamlandığını göstermektedir. Benzer şekilde, aynı depolama sisteminde, depodan ısının geriye alınması sırasında depo içerisine yerleştirilen parafinin en son olarak sıvı-katı faz değişimini tamamladığı noktanın T_{43} olduğu Şekil 3.124. ve Şekil 3.125.'de görülmektedir. Grafiklerden anlaşılmaktadır ki, erime ve katılaşma işleminde depo yerleştirme açısına bağlı olarak deponun içerisindeki katı-sıvı veya sıvı-katı faz değiştirme bölgeleri farklıdır. Akışkan giriş sıcaklığının düşük seçilmesi beklenildiği gibi depolama süresini çok fazla uzatmaktadır (Şekil 3.121.(a)).



a)



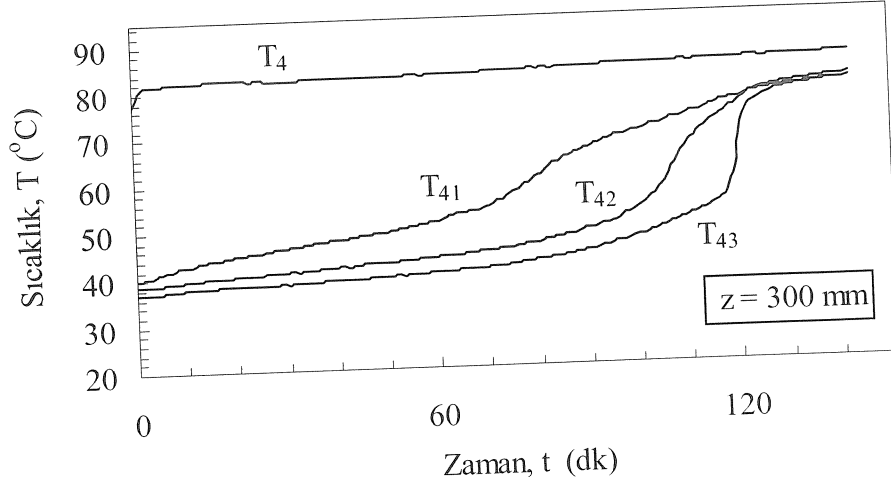
b)



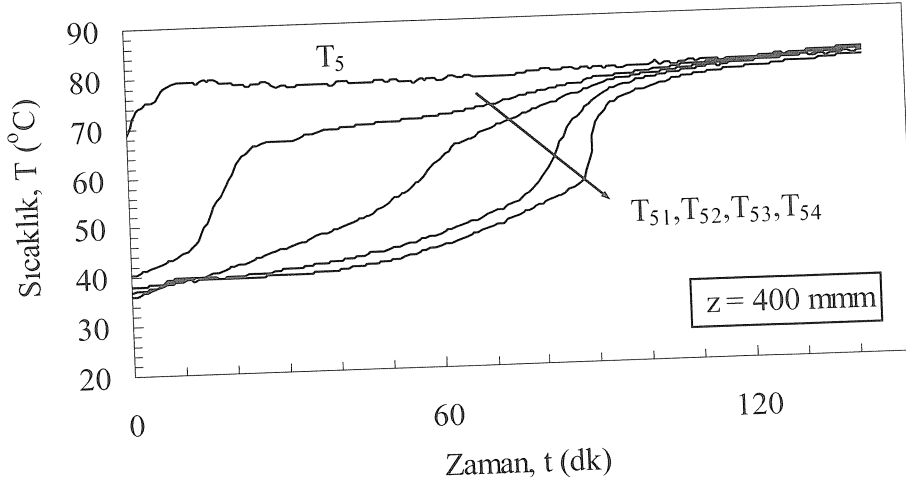
c)

Şekil 3.117. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\theta = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)

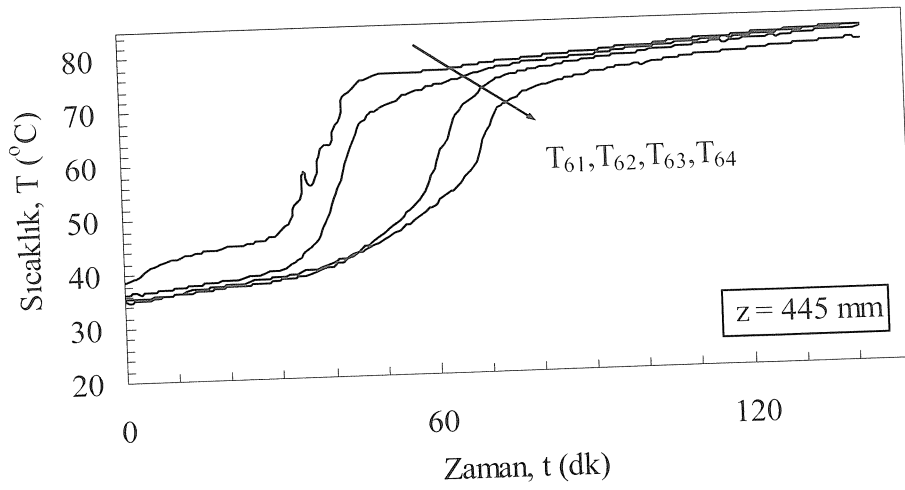
Şekil 3.117.'nin devamı



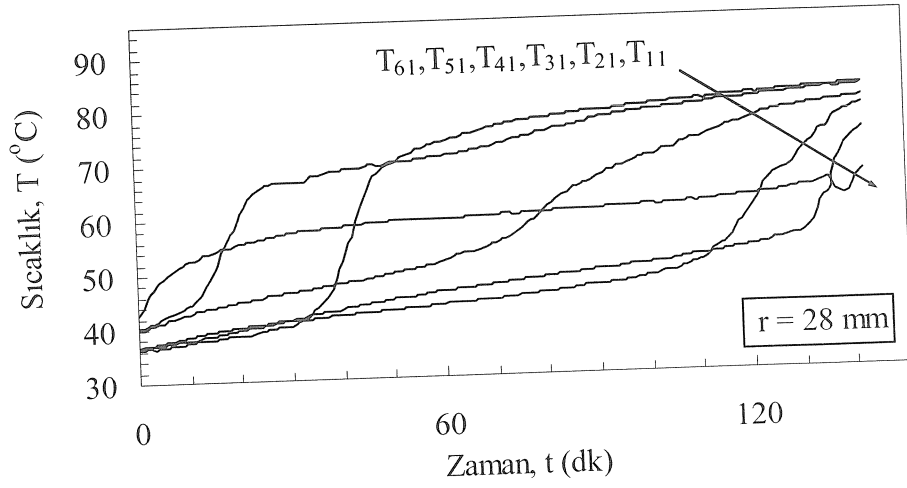
d)



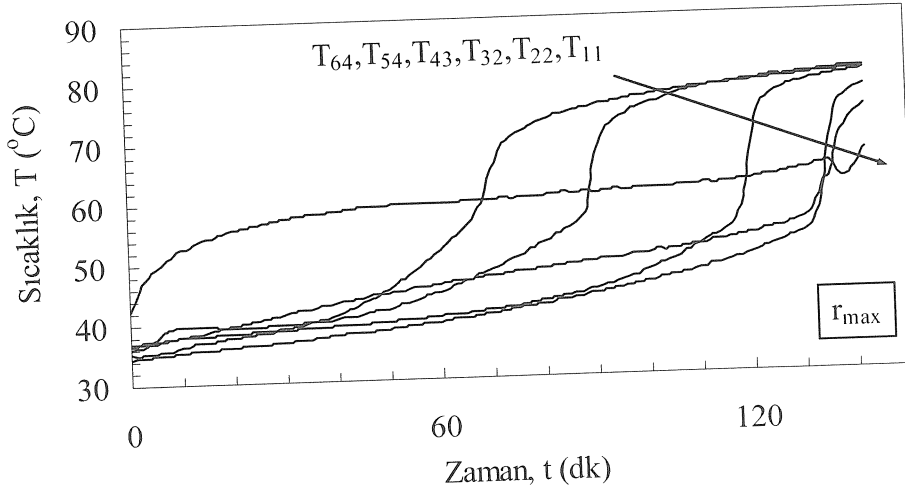
e)



f)

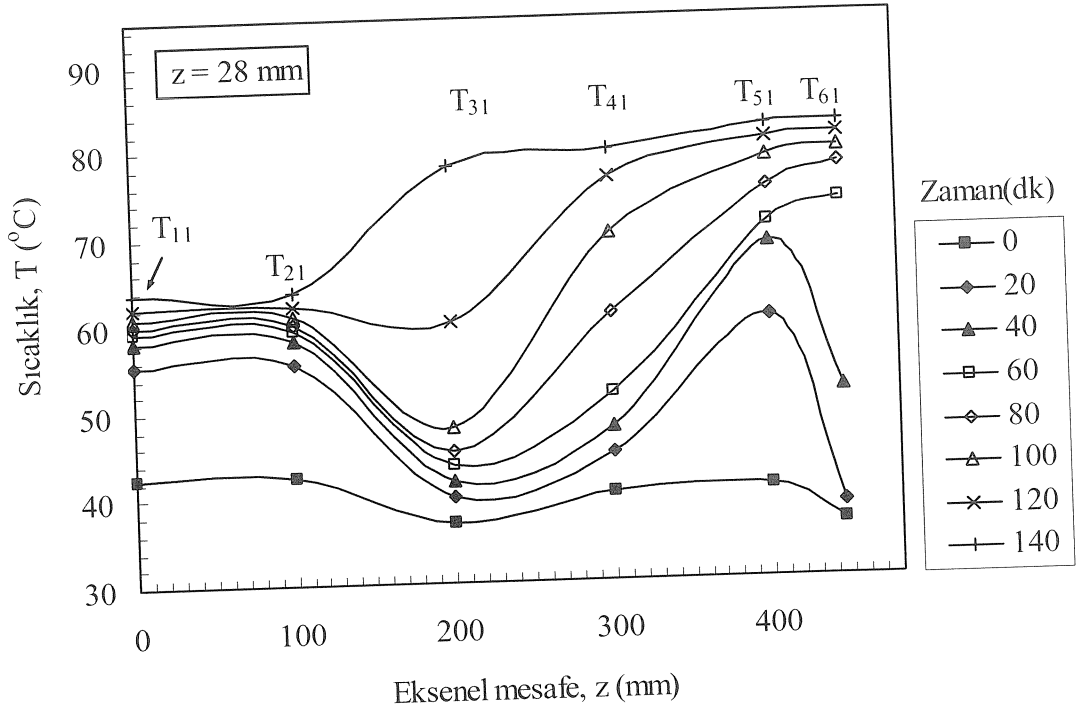


a)

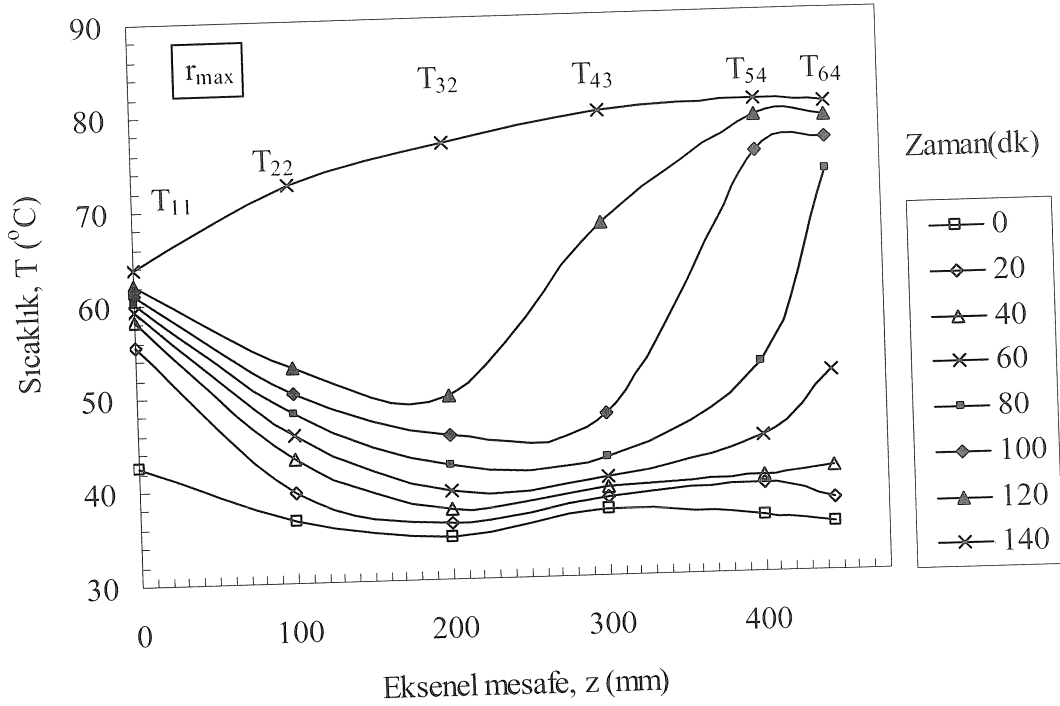


b)

Şekil 3.118. Parafinin (P3) ergimedeki belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 60^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

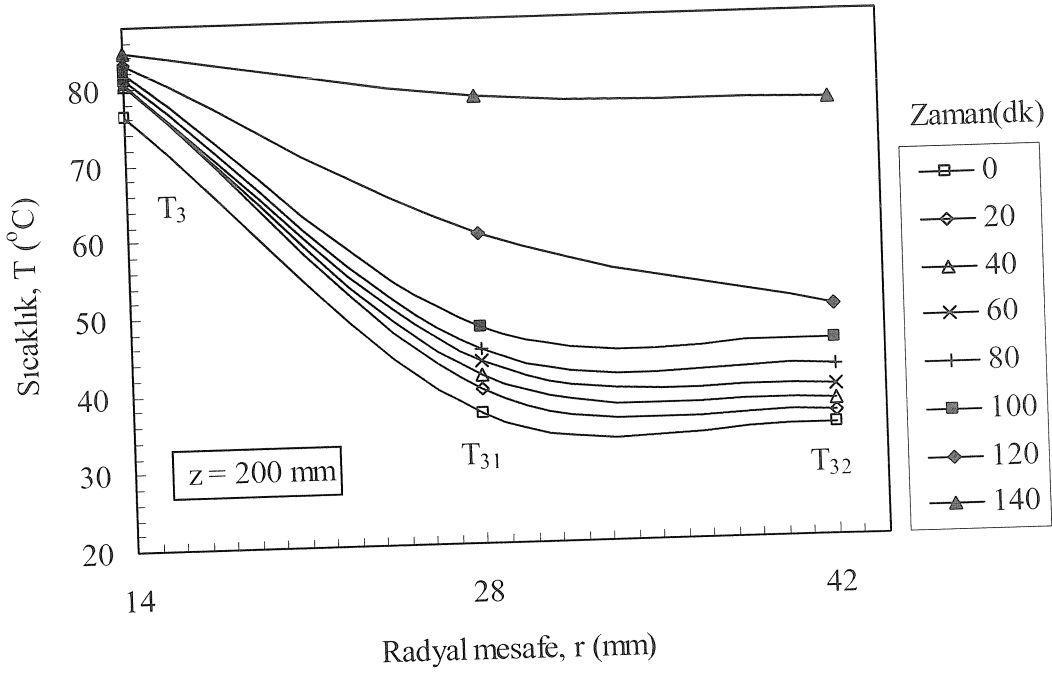


a)

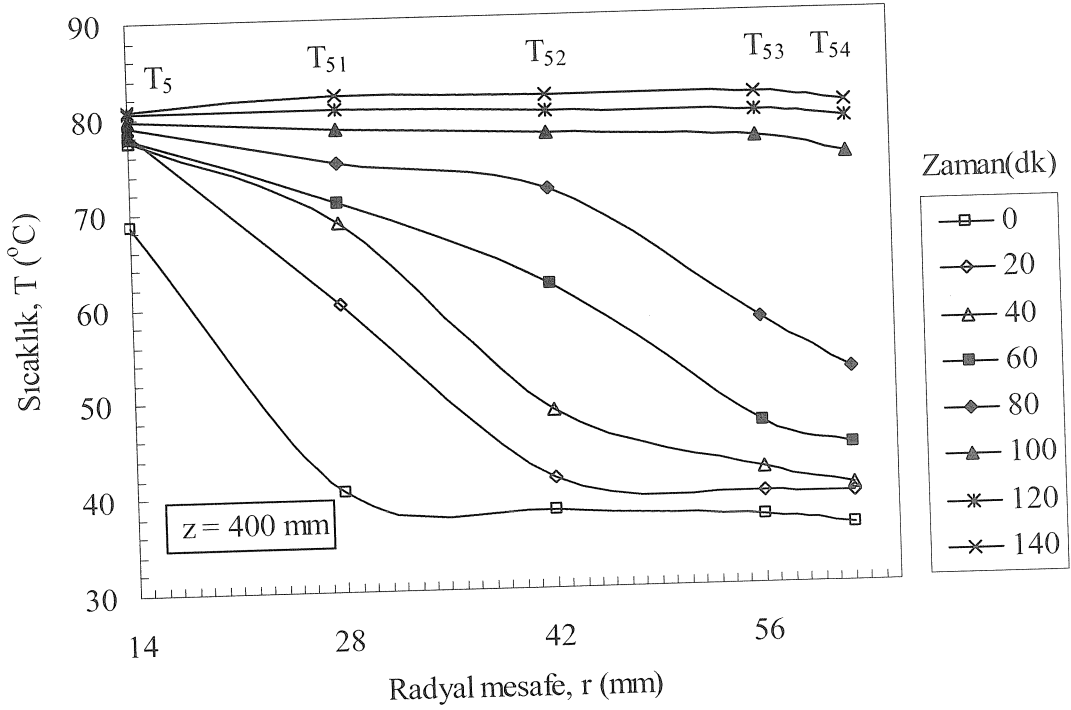


b)

Şekil 3.119. Parafinin (P3) ergimede belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık-eksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

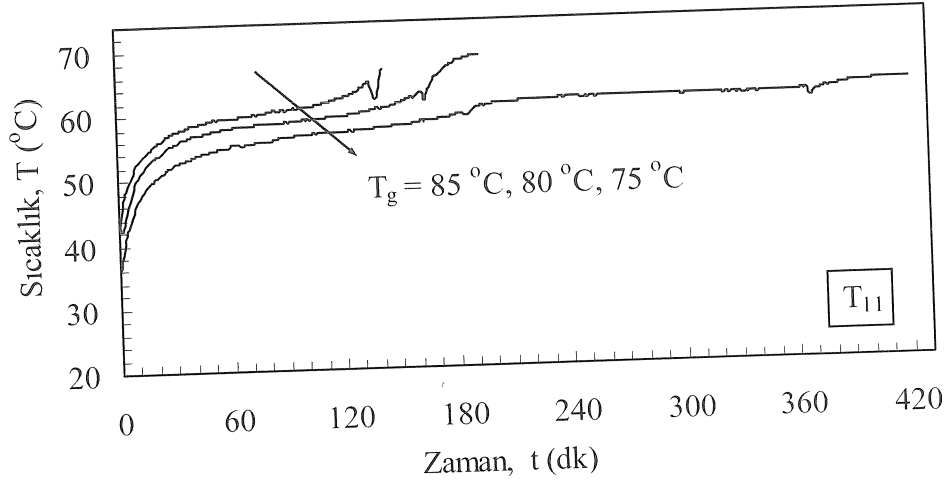


a)

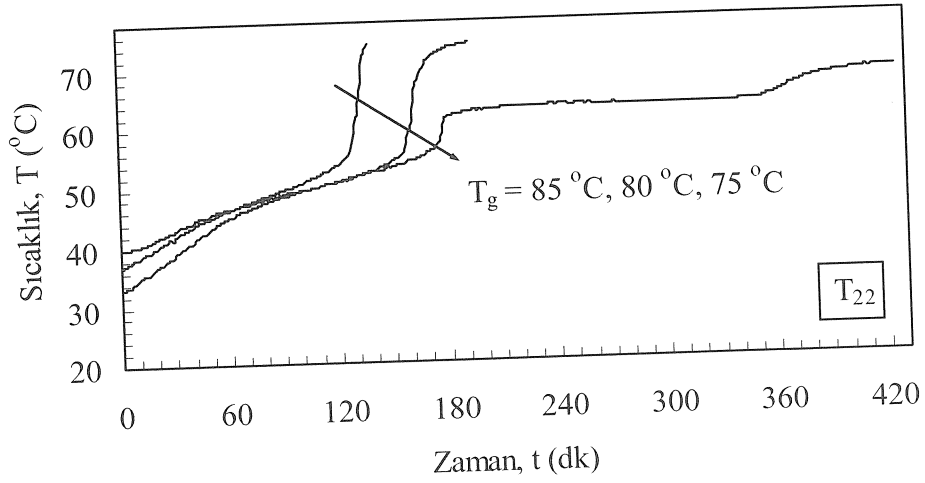


b)

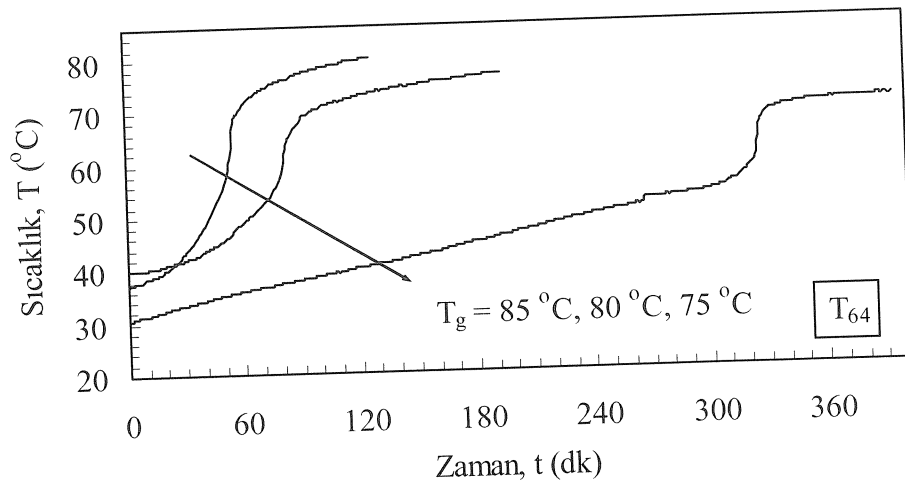
Şekil 3.120. Parafinin (P3) ergimede belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



a)

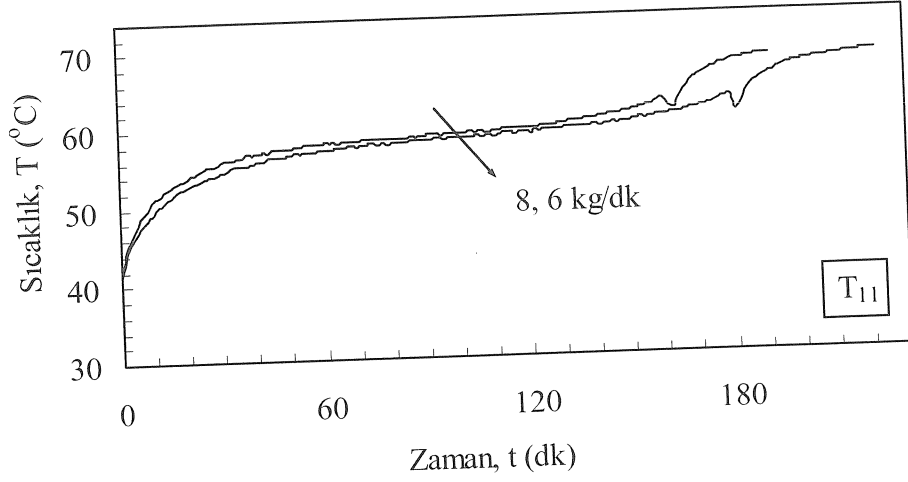


b)

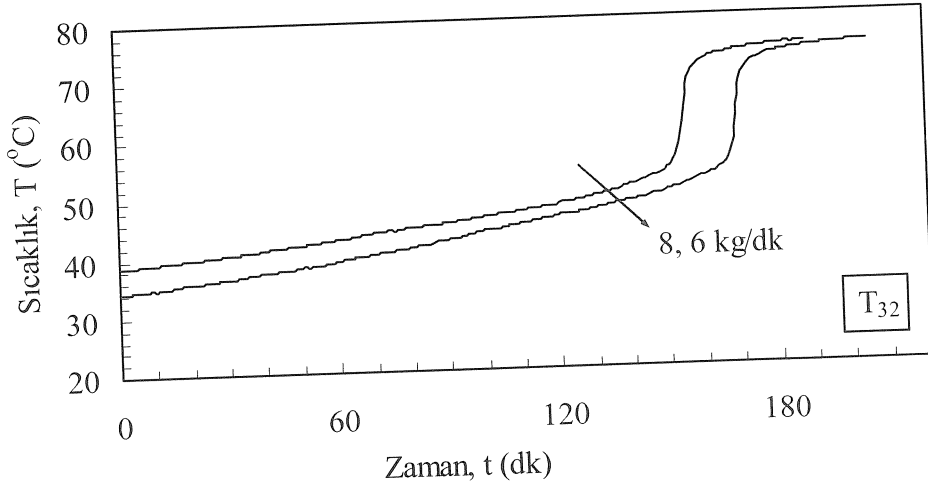


c)

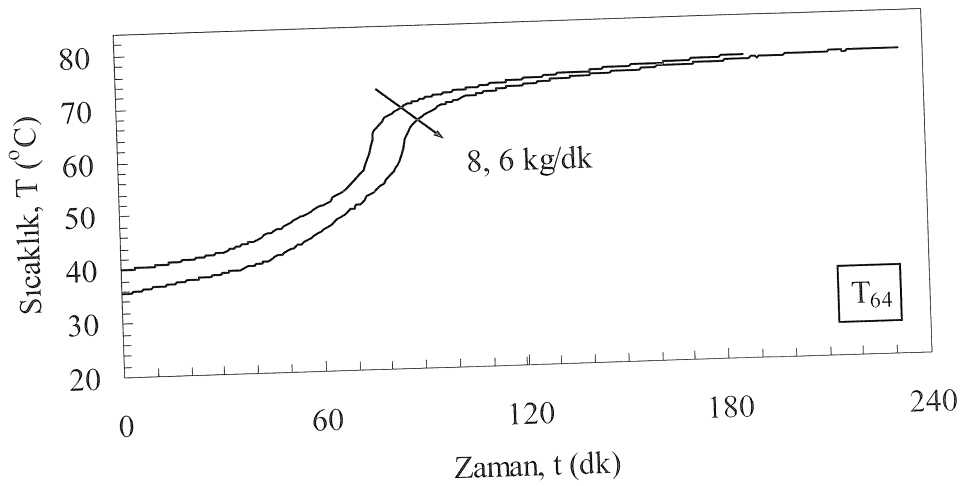
Şekil 3.121. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun giriş sıcaklığına bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8$ kg/dk)



a)

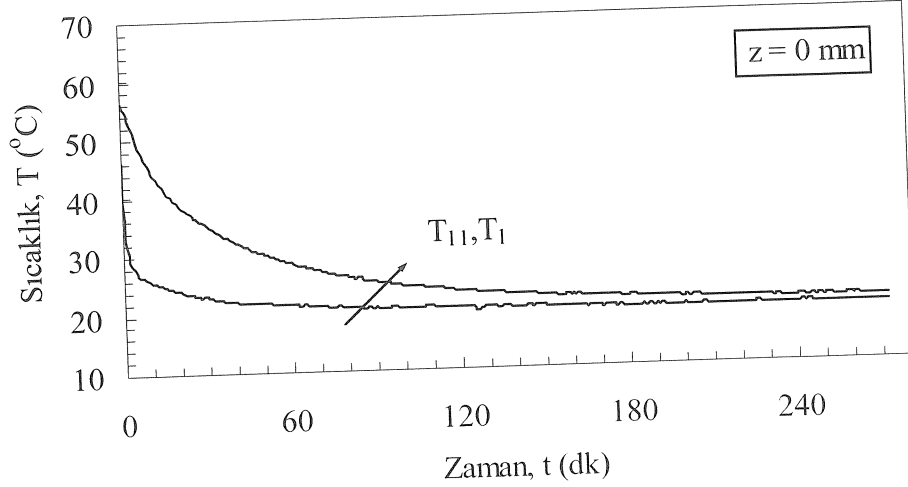


b)

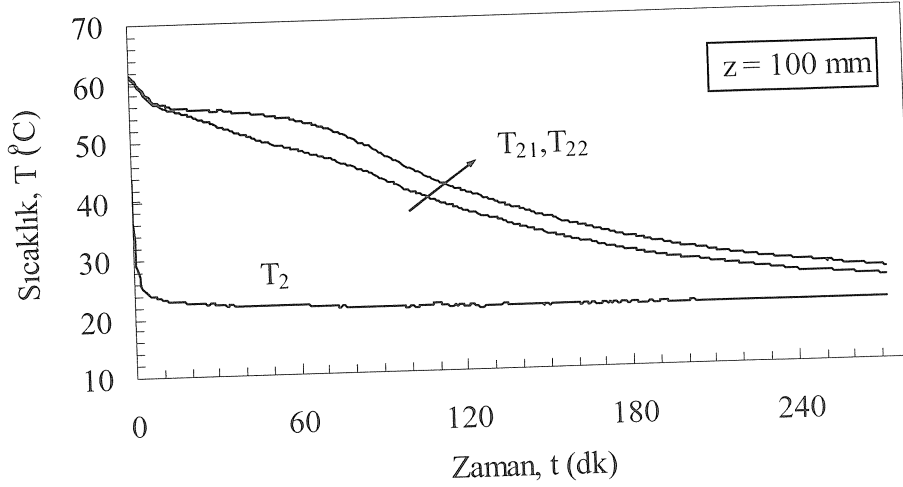


c)

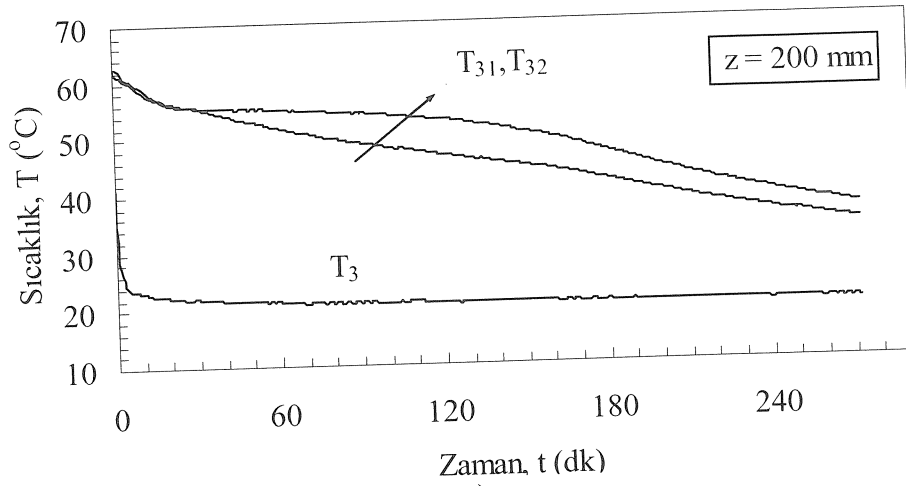
Şekil 3.122. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$)



a)



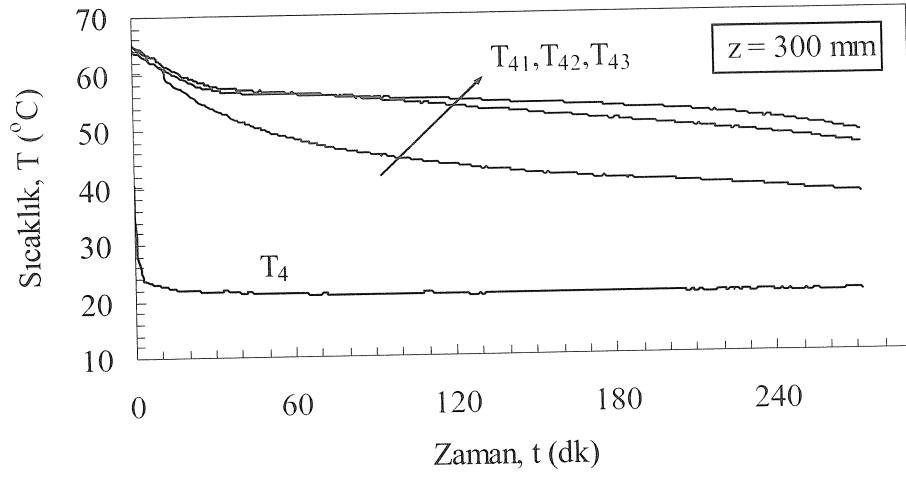
b)



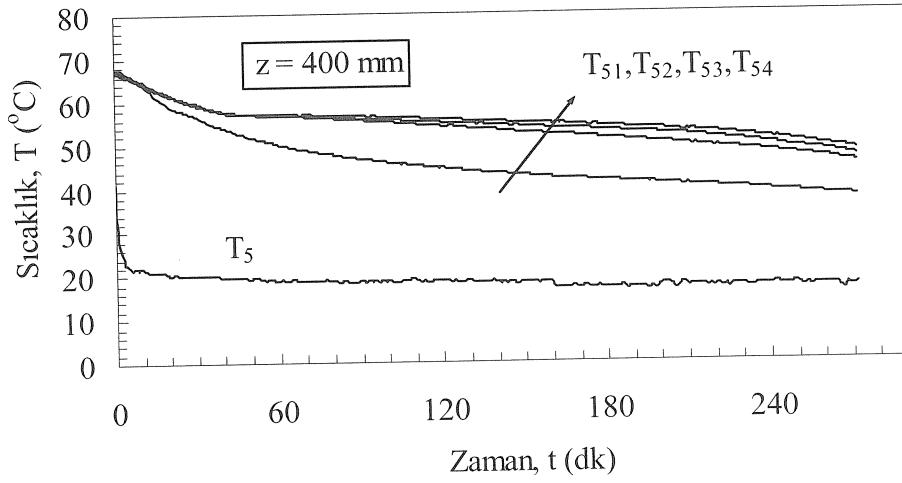
c)

Şekil 3.123. Parafinin (P3) katılaşmada belirli aksenal mesafelerde, radyal yöndeki sıcaklık-zaman grafikleri ($\emptyset = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)

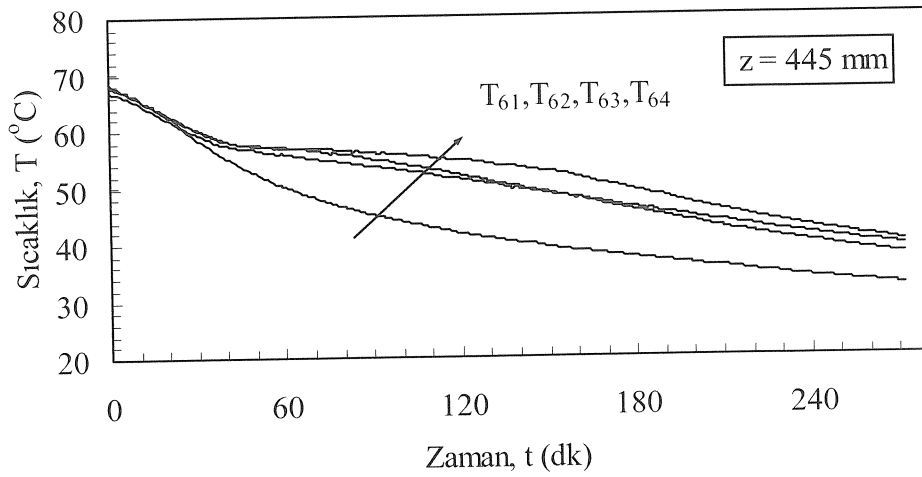
Şekil 3.123.'ün devamı



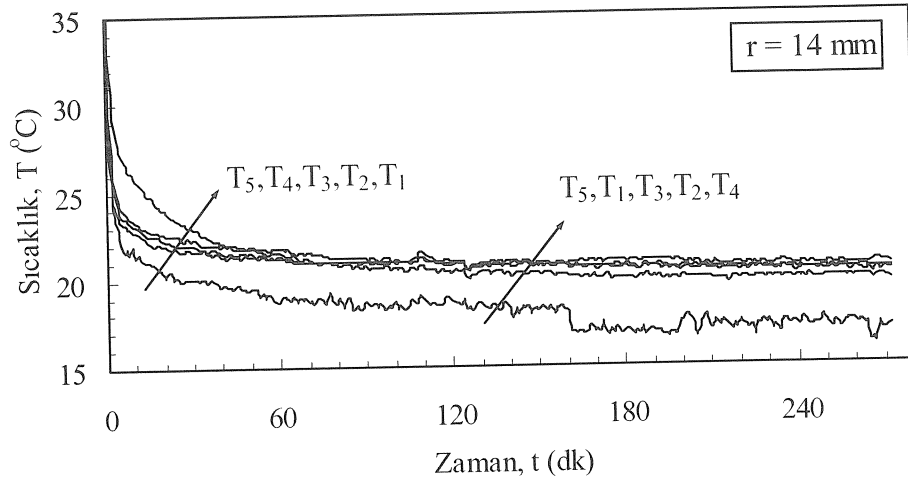
d)



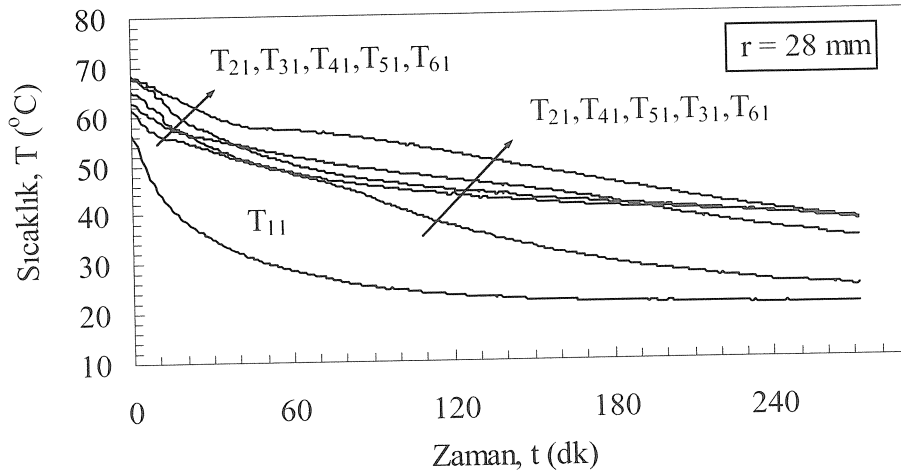
e)



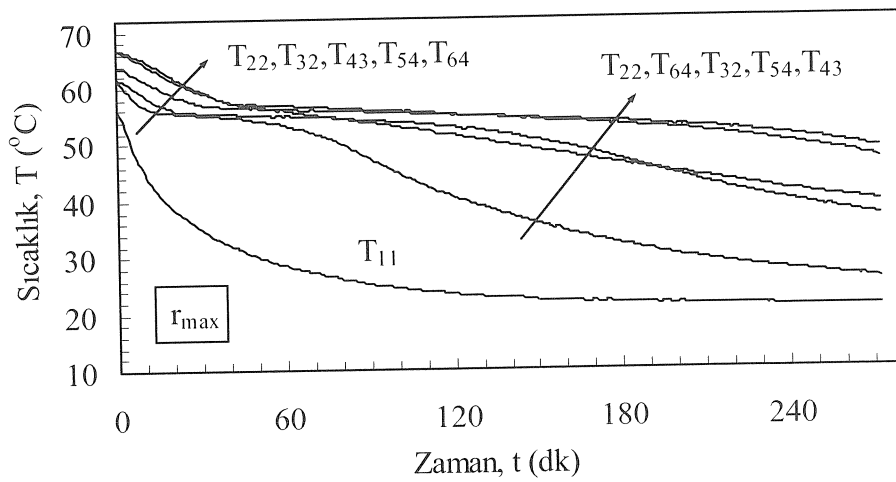
f)



a)

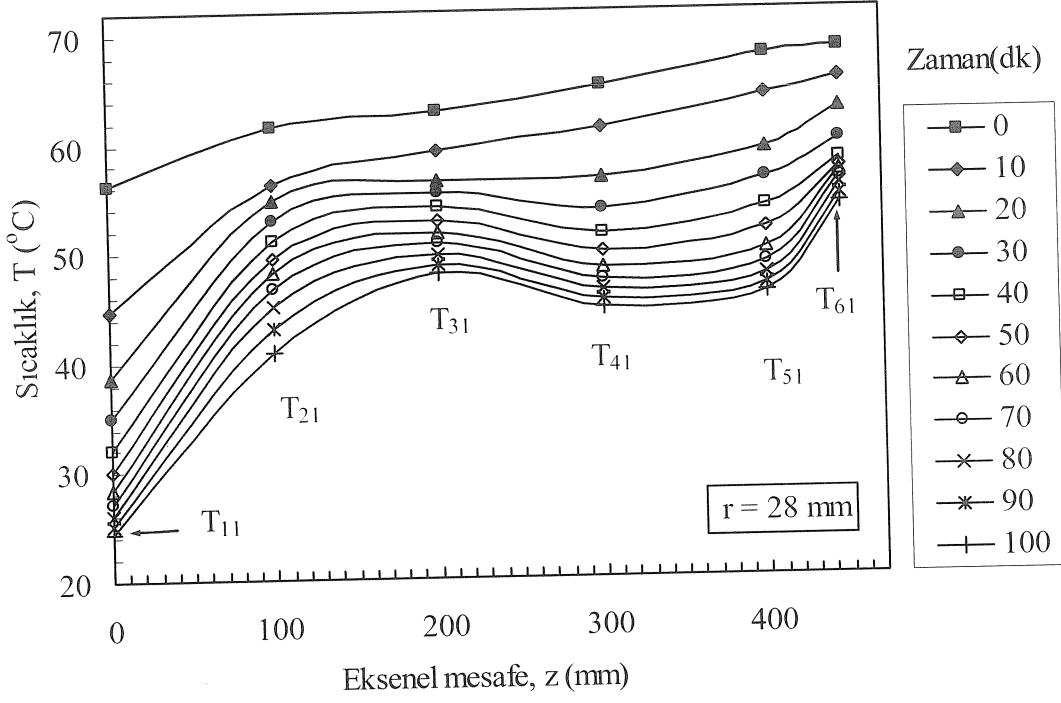


b)

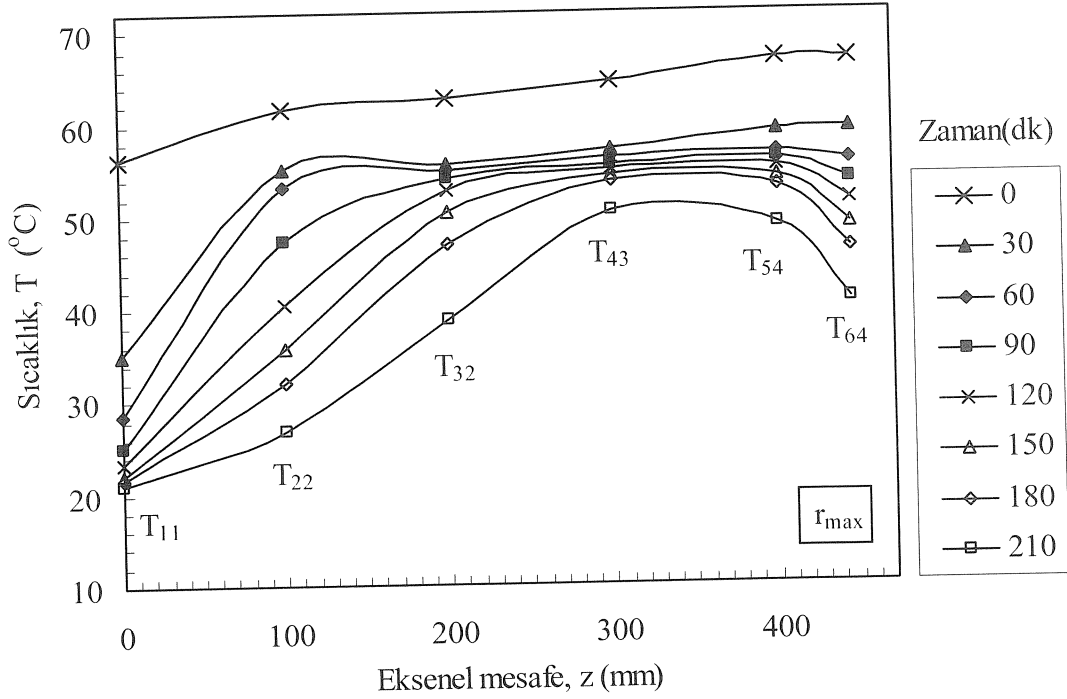


c)

Şekil 3.124. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 60^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $\dot{m} = 8$ kg/dk)

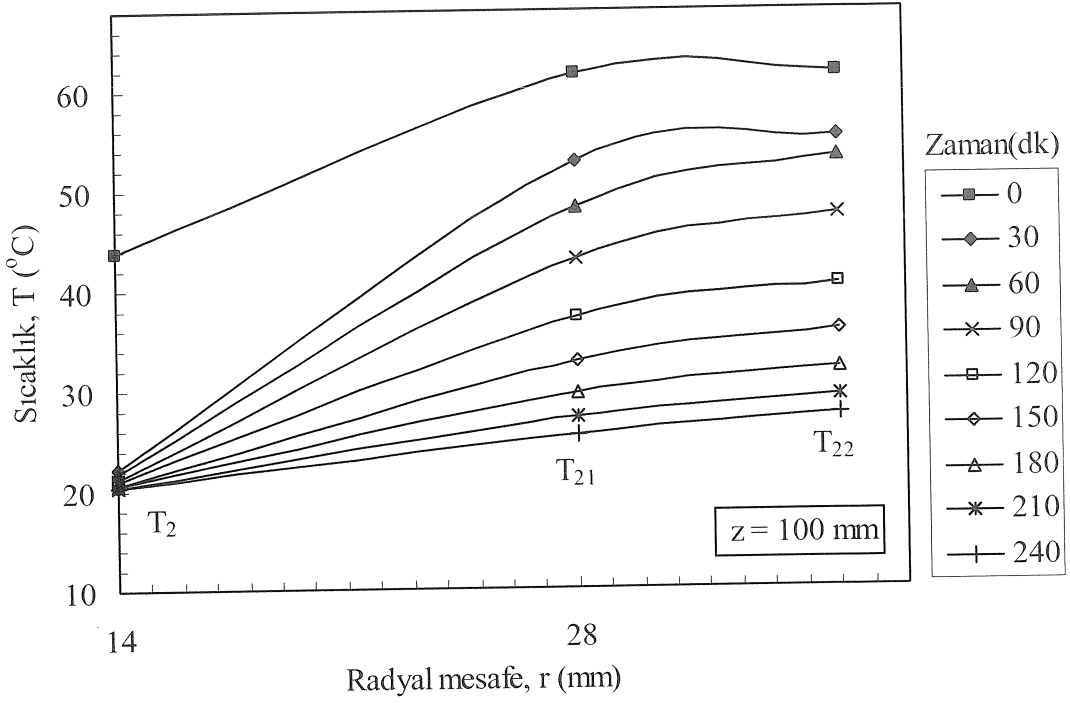


a)

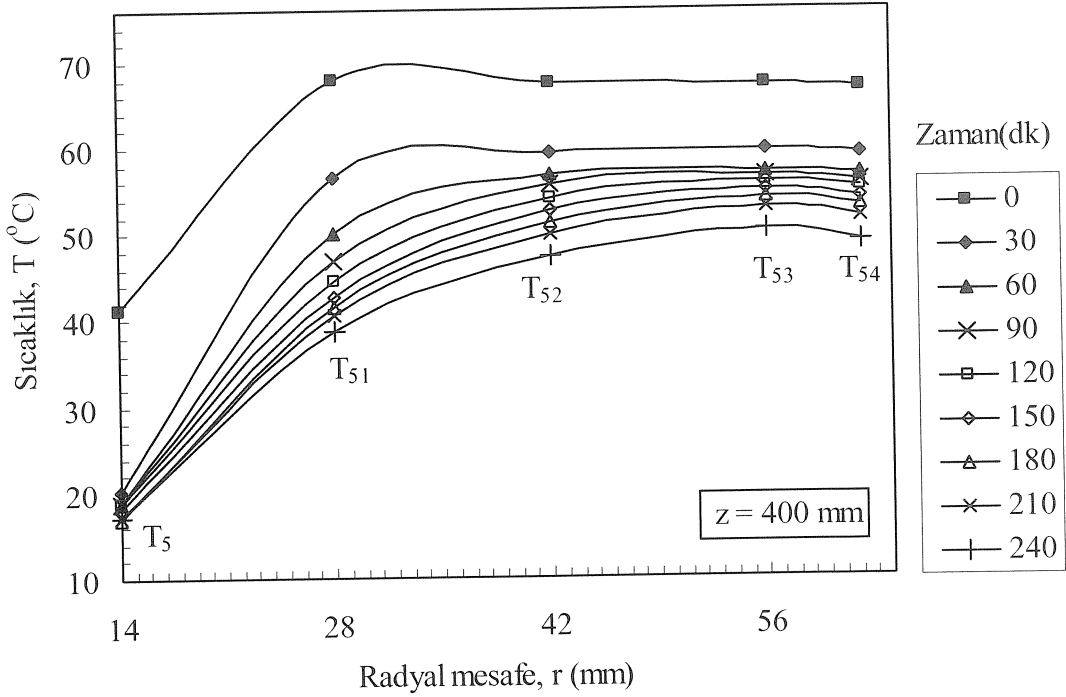


b)

Şekil 3.125. Parafinin (P3) katılaşmada belirli radyal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- eksenel mesafe grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20$ °C, $m = 8$ kg/dk)

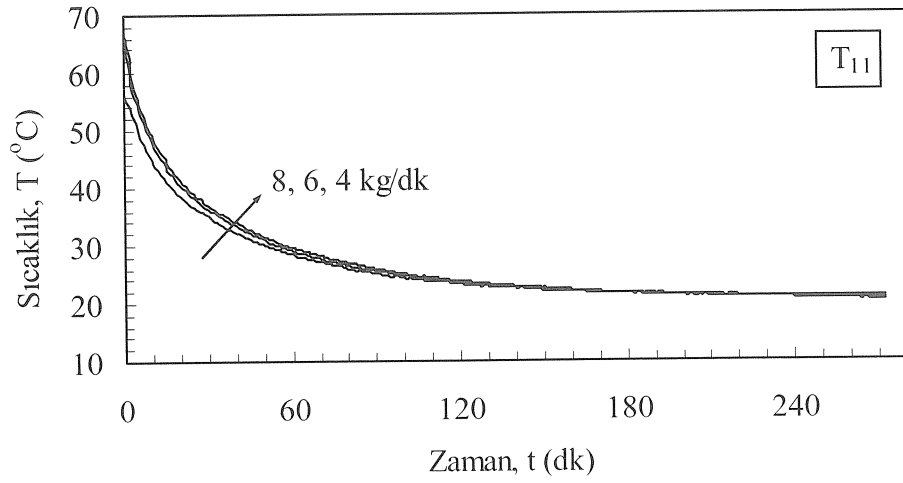


a)

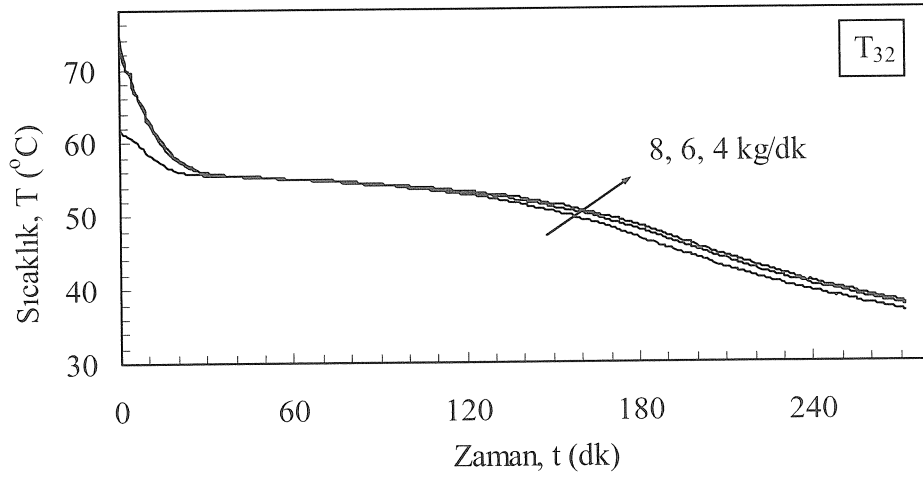


b)

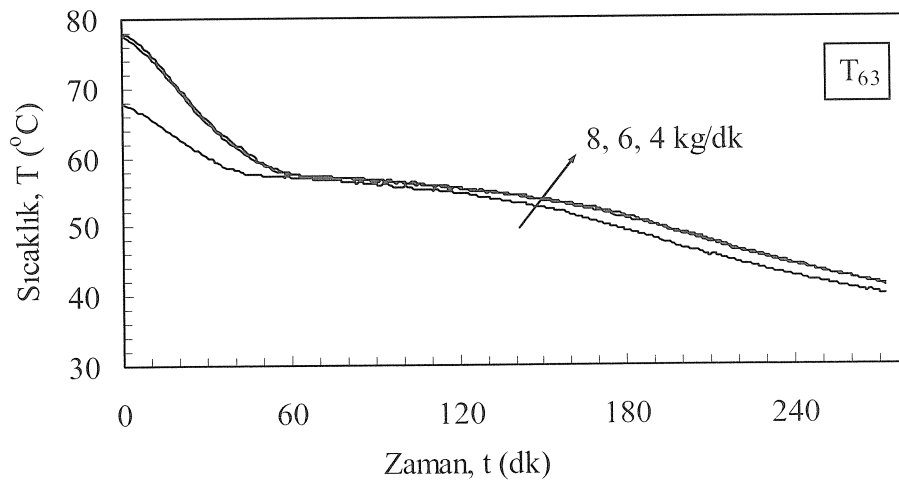
Şekil 3.126. Parafinin (P3) katılışmada belirli aksenal mesafelerde, zamana bağlı sıcaklık- radyal mesafe grafikleri ($\Theta = 60^{\circ}$, $\theta = 5^{\circ}$, $T_g = 20^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)



b)



c)

Şekil 3.127. Parafinin (P3) ergimede belirli noktalarda, suyun kütleli debisine bağlı sıcaklık-zaman grafikleri ($\varnothing = 60^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$)

3.4. Performans Analizi

Daha önceden de belirtildiği üzere, düşey depolamada, farklı maddeler için farklı dış kabuk açıları elde edilen erime ve katılaşma davranışları radyal olarak aksenel yönde simetriktir.

Farklı noktaların sıcaklığının zamanla değişiminde görüldüğü gibi erime depo iç cidarına (ısı transfer akışkan borusuna) yakın bölgede başlamakta ve sonra ısı transfer akışkan borusuna yakın oluşan doğal taşınım sınır tabakalarının bir sonucu olarak depo üst kısmına doğru genişlemektedir. Böylece erime veya doldurma süresince eş zamanlı iki bölge oluşur: sıvı fazındaki erimiş FDM ve katı fazındaki erimemiş FDM. Katı bölgede ısı geçişi FDM'nin katı maddesi içerisindeki iletimle gerçekleştirmekte olup, bu bölge erimiş bölgeden başlangıçta iletimle ısı alırken belli bir zamandan sonra taşınım ile ısı alır. Parafin eridiğinde veya erimiş bölgede, ısı transferinin taşınım mekanizması FDM içerisindeki dönmeli akışı sürüklemektedir. Bu dönmeli akışı, yerçekimi ivmesi altında sıcaklık farklarından kaynaklanan yoğunluk gradyanlarının oluşturduğu kaldırma kuvveti oluşturmaktadır. Dönmeli akış, erimiş FDM içerisindeki karışmayı ve ısı geçişini iyileştirir. Üst kısma yakın noktaların alt kısma yakın noktalardan daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasının nedeni budur. Artan zamanla erimiş FDM, depo içerisinde daha geniş bölgeleri kapsayacak şekilde radyal olarak genişler. Daha önceden de bahsedildiği üzere, deponun alt dış cidarına yakın bölgedeki FDM uzun bir süre katı fazda kalarak toplam erime süresini geciktirmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere 5° lik dış kabuk açısına sahip depo en kısa toplam erime süresini vermektedir. Ancak, bu noktada ısı transfer akışkanı ile faz değiştiren akışkan arasındaki enerji dengesinin yazılmasında yarar vardır:

$$\frac{Q}{t} = hA\Delta T_{lm} \quad (64)$$

Burada, Q; FDM nin depoladığı enerjiyi, t; zamanı, h; ITA'nın aktığı tüpün içi yüzeyindeki ısı taşınım katsayısını ve ΔT_{lm} ise logaritmik ortalama sıcaklığı temsil etmektedir.

Bu enerji dengesinden,

Erime zamanı $\sim 1/(\text{Isı transfer alanı})$

veya simgesel olarak;

$$t \sim \frac{1}{2\pi r_o L} \quad (65)$$

olduğu anlaşılır. Sabit bir r_o değeri için yukarıdaki ilişkilerden,

$$t \sim \frac{1}{L} \quad (66)$$

olduğu anlaşılır. Görüldüğü gibi, erime zamanı FDM deposunun yüksekliği ile ters orantılıdır. Bu grup çalışmada kullanılan FDM kütlesi ve ısı transfer akışkanının aktığı borunun çapı sabit tutulmuştur. 0 ve 5° lik kabuk açıları için aynı depo yüksekliği kullanılmıştır (L = 465 mm). Bu iki açı erime zamanları karşılaştırıldığında, 0° lik deponun 5° lik depodan daha fazla erime zamanları gerektirdiği görülmüştür. Örneğin, bu iki açı için $T_{11} \sim t$ değişiminden (Şekil 3.1.(a) ve Şekil 3.14.(a)) 0° için 240 dakika iken, 5° için 140 dakikaya düştüğü görülebilir. Burada 5°'lik kabuk açısına sahip deponun 0° kabuk açısına sahip depoya göre toplam erime zamanı açısından %40 daha üstün olduğu anlaşılmıştır. Burada bu iyileştirmenin hiçbir ek maliyet (aynı ısı taşınım katsayısı ITA'nın aynı giriş sıcaklığı ve debisi) olmaksızın elde edildiği vurgulanmalıdır. 10°, 15° ve 20°'lik kabuk açısına sahip depolar için farklı depo yükseklikleri kullanılmıştır. Depo yüksekliklerinin farklı olması nedeni ile bu kabuk açıları için elde edilen toplam erime zamanları 0° ve 5° için elde edilenle karşılaştırılamaz. Ancak, (66) ifadesindeki orantı, bir katsayısı ile eşitlik haline dönüştürülebilir. Bu katsayı sabit 5°'lik kabuk açısına sahip depo için elde edilen veriler kullanılarak belirlenebilir. Belirlenen bu katsayı ile elde edilen ifadeden, 10°, 15° ve 20°'lik kabuk açıları için toplam erime zamanları yaklaşık olarak kestirilebilir. Bu yaklaşımla, toplam erime zamanları 10° için 215 dakika, 15° için 274 dakika ve 20° için 332 dakikadır. Şekil 3.31.(a) ve Şekil 3.46.(a)'dan görüldüğü gibi 10° ve 15° için deneysel olarak elde edilen toplam erime zamanları ile elde edilen ekstrapolasyon verileri uyum içindedir. Fakat 20°'lik kabuk açısına sahip depo için deneysel sonuç ekstrapolasyon verilerinden daha yüksek erime zamanı sunmaktadır (Şekil 3.63.(a)). Bu sonuçlardan, 5°-15° arasındaki kabuk açılı depolardan, 0° veya 20°'lik kabuk açılı depolara göre daha kısa toplam erime süresi ve dolayısıyla daha iyi bir depolama performansı elde edilmiştir. Erime işleminde depo kabuk açısının parafin P3'ün belirli noktalarda sıcaklık-

zaman değişimine etkisi Şekil 3.128.(a-c)'de verilmiştir. Şekil 3.128.(a)'da dişey depo içerisinde parafinin tamamen eridiği $z = 0$ mm ve r_{max} noktasında (kabuk açısı 5° , 10° , 15° , 20° için $r_{max} = 28$ mm ve 0° için $r_{max} = 36$ mm'dir) depo kabuk açısının erime zamanına etkisi gösterilmiştir. Buradan, 5° kabuk açılı depo içerisinde bulunan parafinin en kısa zamanda katı-sıvı faz değişimini tamamladığı, daha sonra ise sırasıyla 10° , 0° , 15° ve 20° kabuk açılı depolarda bulunan parafinin faz değişimini tamamlayarak eridiği görülmüştür. Eksenel mesafe artıkça kabuk açısına bağlı olarak erime zamanı değişmektedir. z_{max} ve r_{max} noktasında parafinin zamana bağlı erime eğrileri birbirine benzer olup, depo kabuk açısının küçülmesi parafinin erime zamanını azalttığı belirlenmiştir (Şekil 3.128.(c)). Depo kabuk açısı artıkça, ısı transfer akışkanını ile FDM arasındaki ısı iletim alanını azalmaktadır. Böylece, FDM'ye olan ısı geçişi zorlaşmakta ve beklenildiği gibi, depo yüksekliğinin (L) azalması FDM'nin erime süresini uzatmaktadır.

Literatürde yaygın olarak kullanılan silindirik depo geometrisi ile Şekil 3.128.(a)'da verilen en kısa enerji depolama zamanına sahip 5° kabuk açılı deponun farklı noktalarında parafinin erime davranışı Şekil 3.129'da karşılaştırılmıştır. Deponun st noktalarında parafinin erime süresi silindirik depolamada daha kısa iken, depo tabanına yakın noktalarında parafinin erime süresi 5° kabuk açılı depoda daha uzundur. Bunun sebebi daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi silindirik deponun taban genişliği daha fazla olduğunda bu bölgedeki parafinin geç erimektedir. Böylece, silindirik deponun toplam depolama süresi uzamaktadır.

Depo yüksekliği ile FDM'nin erime zamanı arasında geliştirilen $t \sim \frac{1}{L}$ bağıntısına bağlı olarak elde edilen sonuçlarla deneylerden elde edilen verilerin karşılaştırılması Şekil 3.130.'da görülmektedir. Daha önce anlatıldığı gibi, depo açısı artıkça (20°) kestirim sonuçlar ile deneysel verilerin uyuşmadığı belirlenmiştir.

Silindirik deponun şarj işleminde, parafinin P3'n depo yerleştirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.131.(a-c)'de verilmektedir. Şekil 3.131.(a)'da, depo yerleştirme açısı değişse de parafinin en son eridiği noktanın T_{13} olduğu görülmektedir. Buradan, silindirik depolamada yerleştirme açısı 0° (yatay) durumunda en kısa erime zamanı gerçekleşmektedir. Başka bir değişle; 75°C akışkan giriş sıcaklığı ve 8 kg/dk debi için, T_{13} noktasında parafinin katı-sıvı faz değişimi silindirik deponun dişeyden yataya doru (90° , 60° , 30° ve 0°) yerleştirilmesi durumu zamana bağlı olarak karşılaştırıldığında, sırasıyla 400 dk., 344dk., 340 dk. ve 320 dk. olduğu tespit

edilmiştir. Benzer şekilde, P3, $T_g = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $m = 8 \text{ kg/dk}$ için T_{13} noktasında katı-sıvı faz değişim zamanı sırasıyla 180 dk., 195 dk., 205 dk. ve 225 dk. olduğu belirlenmiştir.

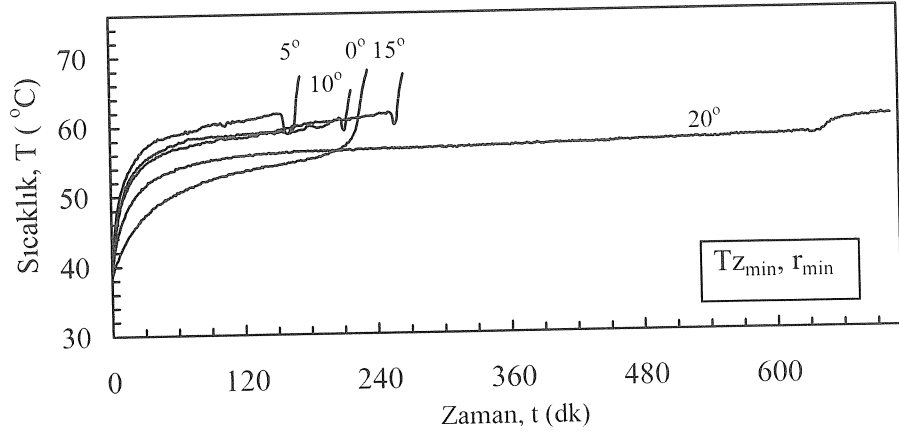
Eksenel mesafe arttıkça (T_{33} ve T_{53} noktası) T_{13} noktasının tam tersi olarak erime düşeyden yataya doğru artan zamanla gerçekleştiği Şekil 3.131.(c)'de görülmektedir. Sonuç olarak, silindirik depolamada en uygun depo yerleştirme konumunun yatay olduğu belirlenmiştir.

5° kabuk açılı deponun şarj işleminde, parafin P3'ün depo yerleştirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.132.(a-c)'de verilmiştir. $z = 0 \text{ mm}$ 'de (T_{11}), depo yerleştirme açısına bağlı olarak parafinin erime davranışının değişmekte olduğu Şekil 3.132.(a)'da görülmektedir. Bu değişim, eksenel yükseklik arttıkça daha da farklılık göstermektedir Şekil 3.132.(b). Depo yerleştirme açısı değiştiğinde parafinin en son eridiği nokta da değişmektedir. Buna göre, 5° kabuk açılı deponun erime açısına (90° , 60° , 30° ve 0°) bağlı olarak en son erime noktaları sırasıyla; T_{11} , T_{32} , T_{43} ve T_{64} 'dür (Şekil 3.132.(c)). Bu değişimin sebebi, depo üst çapının alt çapından daha büyük olmasıdır. Depo, düşeyden yataya doğru indirildiğinde genleşme boşluğu yer değiştirmekte ve yatay konumda Şekil 3.153.'de görüldüğü gibi, deponun radyal olarak üst kısmında kalmaktadır. Bu durumda, ısı transfer borusunun parafine temas ettiği alan artmış ancak, erimiş parafin içerisinde taşınım ile ısı transferi sadece akışkan borusu ile üst kısmında kalan hacimde gerçekleşirken, alt kısımda ise iletimle ısı geçişi meydana gelmektedir. Parafinin çoğunun deponun alt kısmında toplanması ve parafinin kötü ısı iletiminden dolayı deponun yatay konumunda depolama süresi uzamaktadır. Şekil 3.132.(c) incelendiğinde (sıcaklık okuma noktaları farklı), düşey yerleştirilmiş depo içerisindeki parafinin daha önce faz değişimini tamamladığı, 30° ve 60° açı ile yerleştirilen deponun erime sürelerinin yaklaşık aynı olduğu, fakat, yatay yerleştirilen deponun erime süresinin çok daha uzun olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, 5° kabuk açılı deponun en kısa erime zamanı deponun düşey (90°) yerleştirilmesi durumunda gerçekleşmiştir.

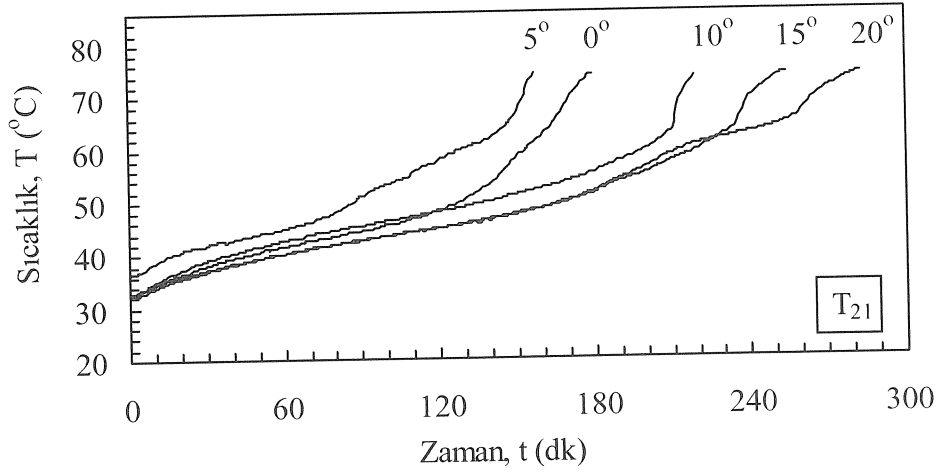
Silindirik depolamada, deponun yerleştirme açısına bağlı olarak parafin P3'ün katılaşmada sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.133.(a-c)'de verilmiştir. Isı transfer borusuna yakın bölgelerde ($r = 28 \text{ mm}$), parafinin hızla sıvı- katı faz değişimini tamamlayarak donduğu Şekil 3.133.(a)'dan anlaşılmaktadır. Bu noktada, deponun düşey konumunda diğer yerleştirme açılara göre daha hızlı katılaşma görülmüştür. Ancak, eksenel ve radyal mesafe arttıkça düşey depolamada parafinin sıvı-katı faz değişim zamanı diğer yerleştirme açılara göre daha yavaş olduğu Şekil 3.133.(b,c)'de görülmektedir.

Sonuç olarak; parafin için düşey silindirik depolama nispeten diğer yerleştirme açlarına göre en uygun katılma davranışı göstermektedir.

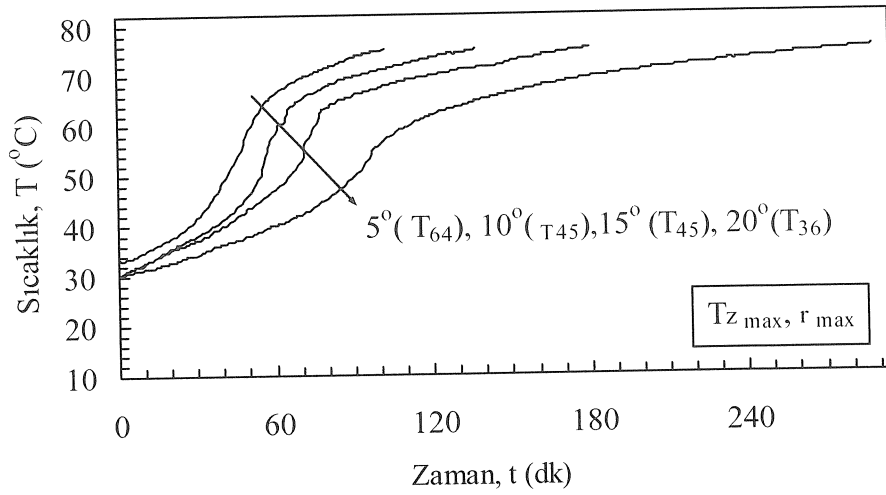
5° kabuk açılı depolamada, deponun yerleştirme açısına bağlı olarak parafin P3'ün katılma sıcaklık-zaman değişimi Şekil 3.134.(a-c)'de verilmiştir. Silindirik depolamaya benzer şekilde T_{11} noktasında deponun yerleştirme açlarına bağlı olarak sıvı-katı faz değişimi çok hızlı gerçekleşmektedir. Radyal yönde transfer borusundan uzaklaştıkça yatay depolamanın daha hızlı faz değişim noktasına inildiği Şekil 3.134.(b,c)'de görülmektedir. Ancak, ilerleyen zamanlarda depo yerleştirme açısının parafinin katılma davranışına bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak; 5° kabuk açılı depo geometrisi için depo yerleştirme açısının parafinin katılma davranışına bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.



a)

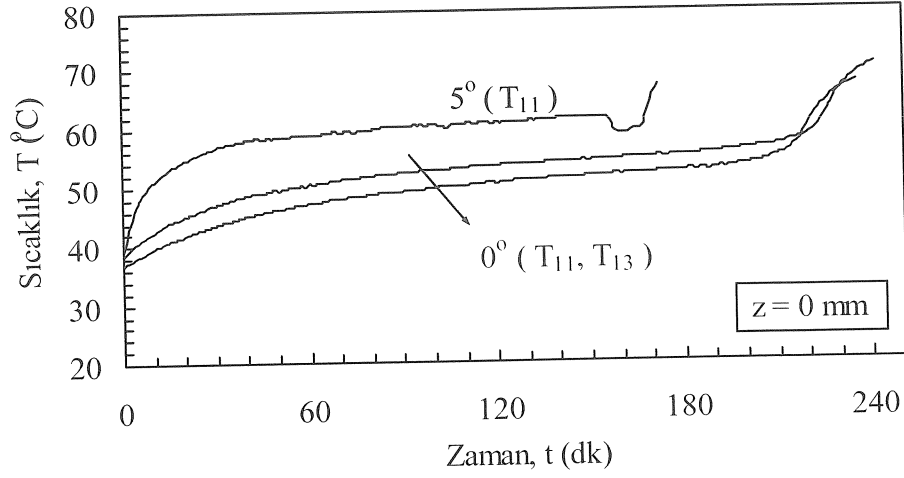


b)

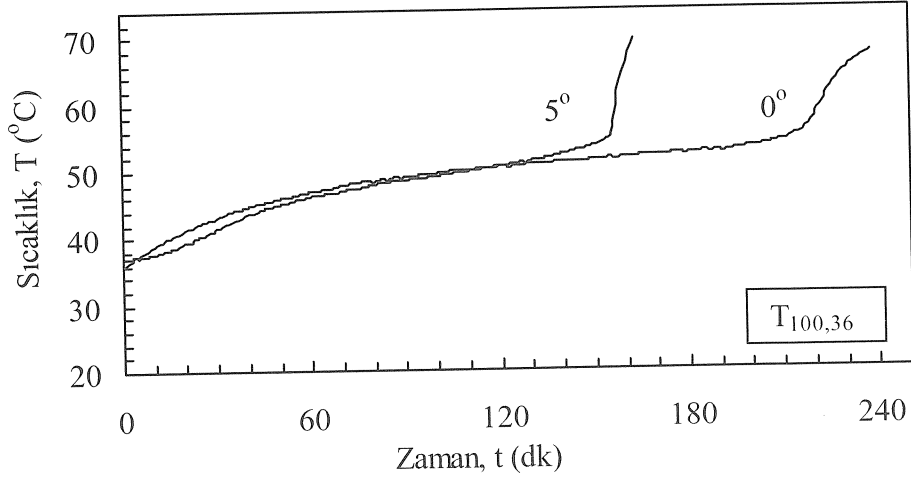


c)

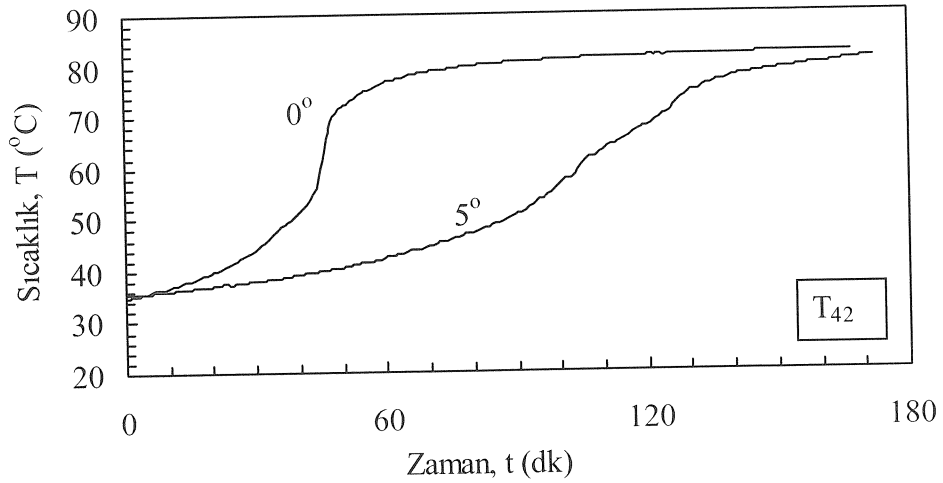
Şekil 3.128. Erime işlemi, parafin P3'ün depo kabuk açısına bağlı sıcaklık-zaman grafiği ($\theta = 90^{\circ}$, $T_g = 85^{\circ}\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)

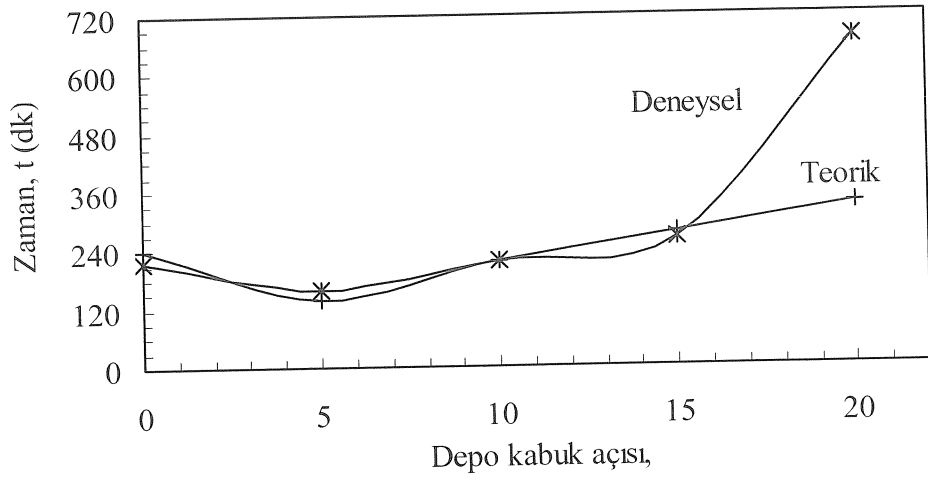


b)

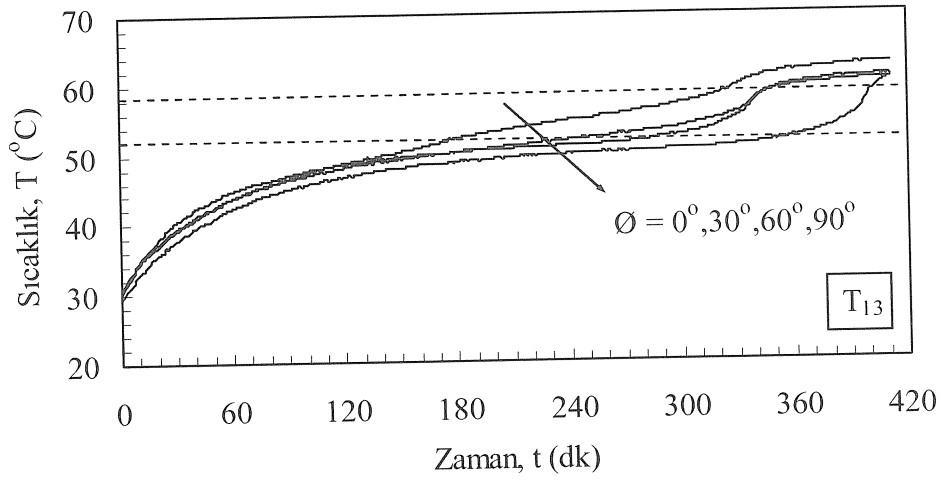


c)

Şekil 3.129. Silindirik ve 5° kabuk açılı deponun farklı noktalarında parafinin erime davranışının karşılaştırılması ($\emptyset = 90^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $m = 8$ kg/dk)



Şekil 3.130. Depo kabuk açısı-erime zamanı grafiği

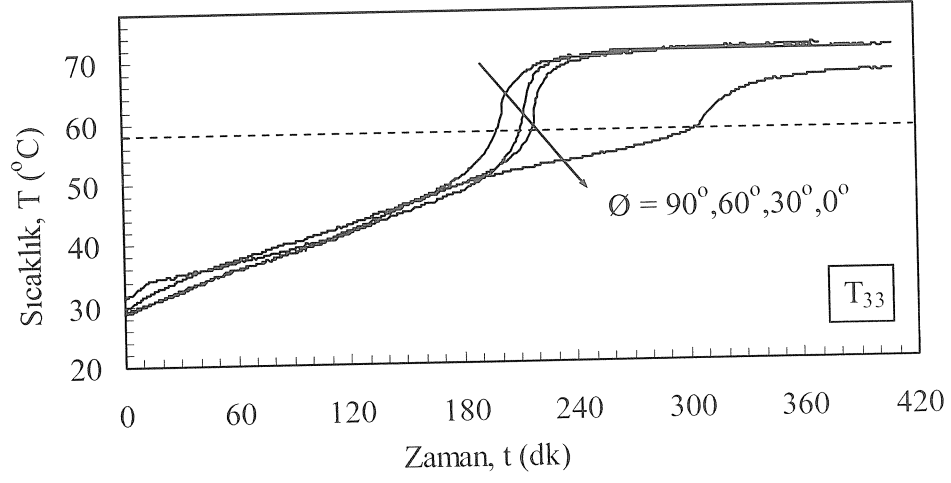


a)

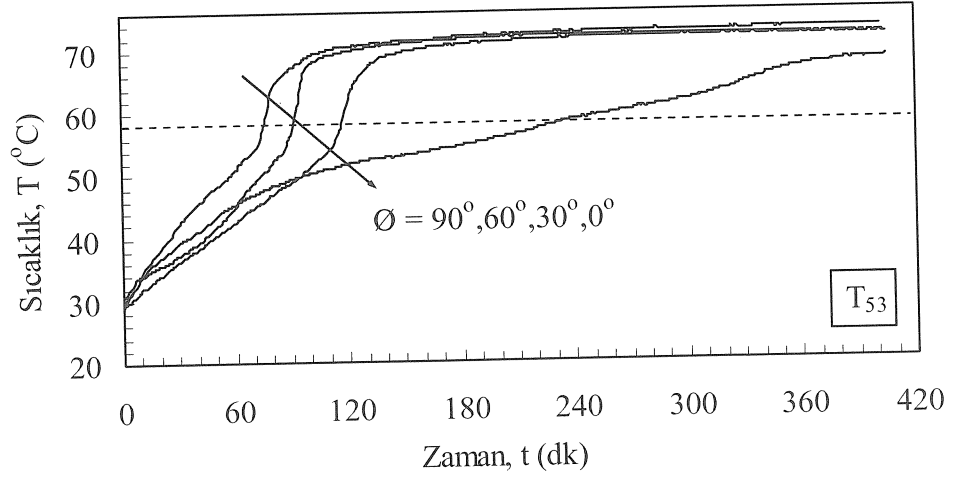
Şekil 3.131. Erime işlemi sırasında, parafin P3'ün depo yerleştirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık zaman grafiği ($\theta=0^\circ$,

$T_g = 75^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

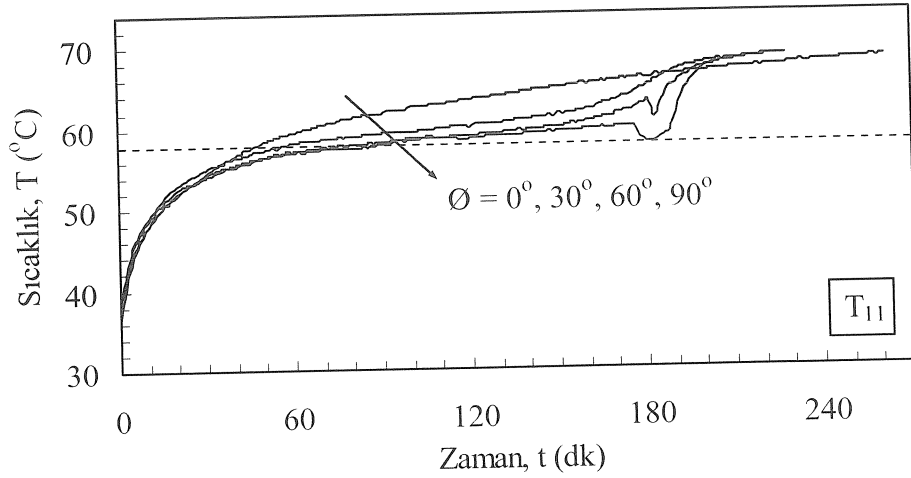
Şekil 3.131.'in devamı



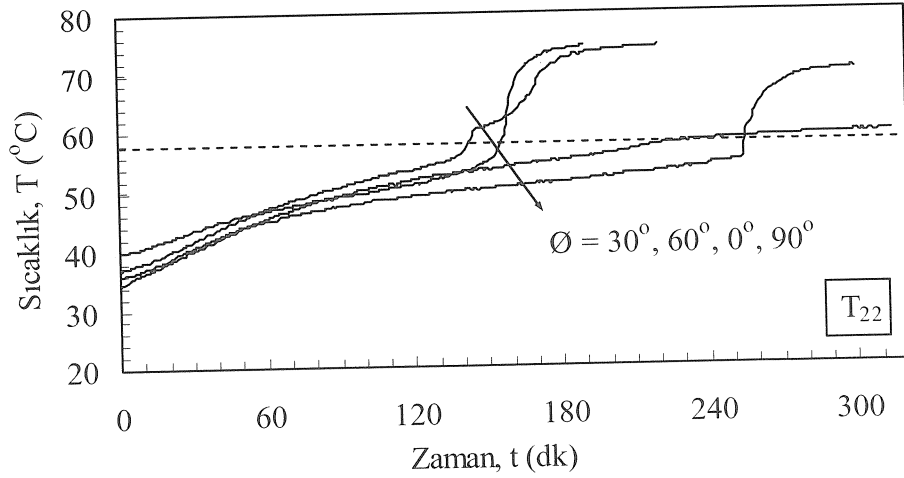
b)



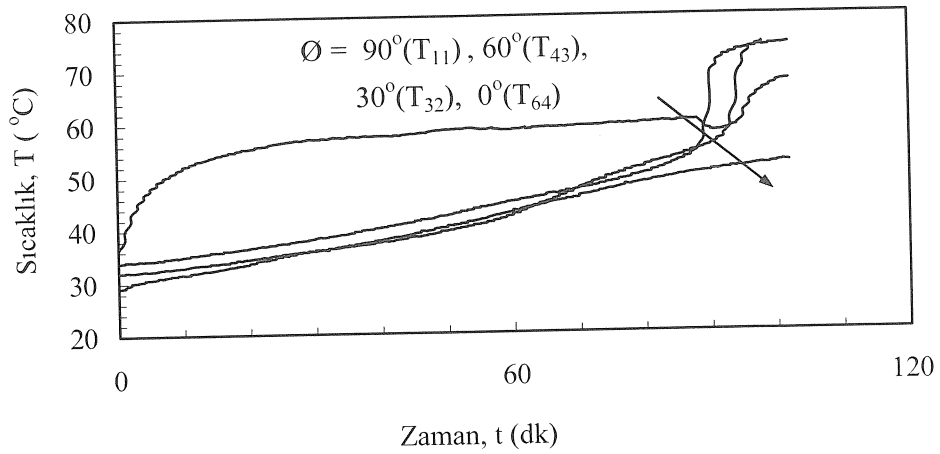
c)



a)

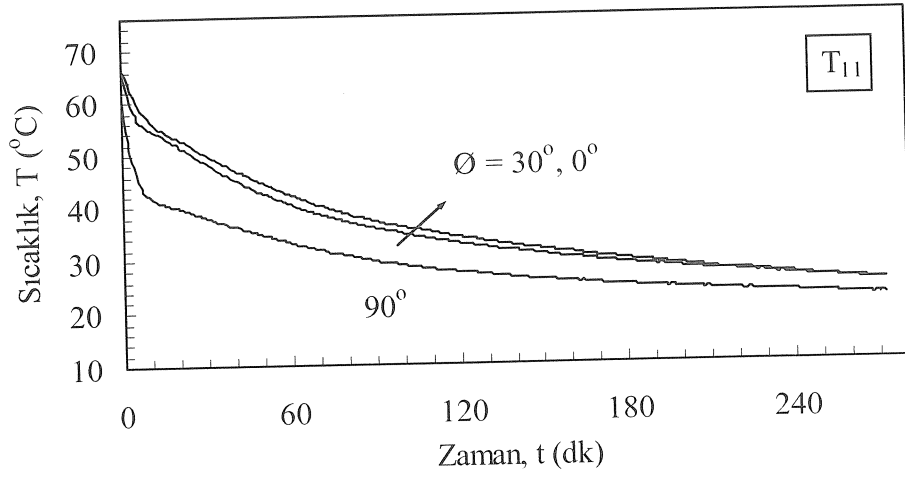


b)

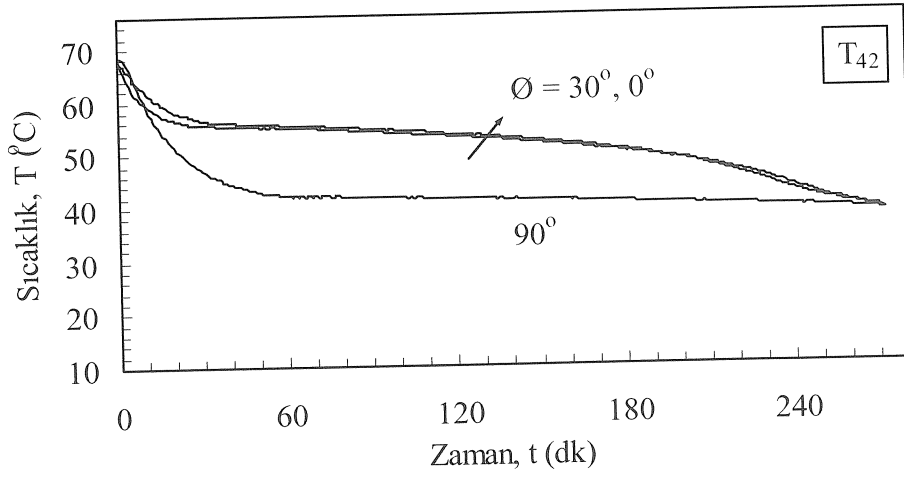


c)

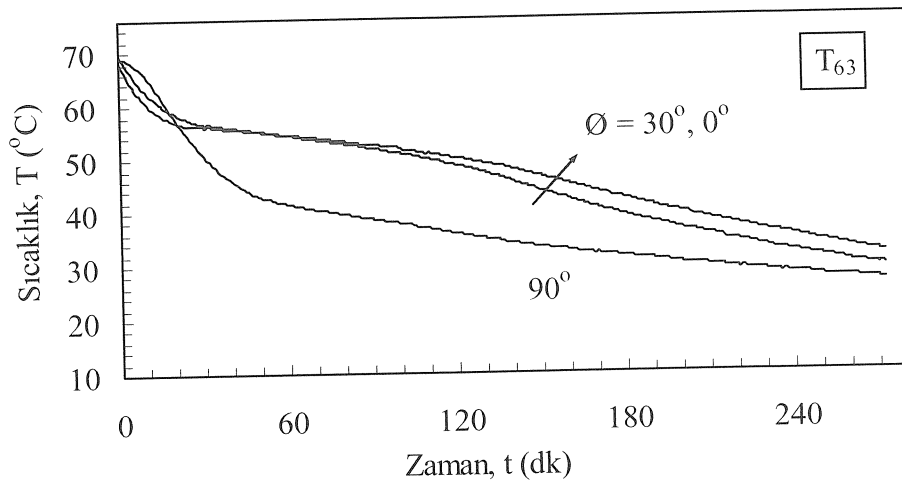
Şekil 3.132. Erime işleminde, parafin P3'ün depo yerleşirme açısına bağlı olarak belirli noktalarda sıcaklık zaman grafiği ($\theta = 5^\circ$, $T_g = 80^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)



a)

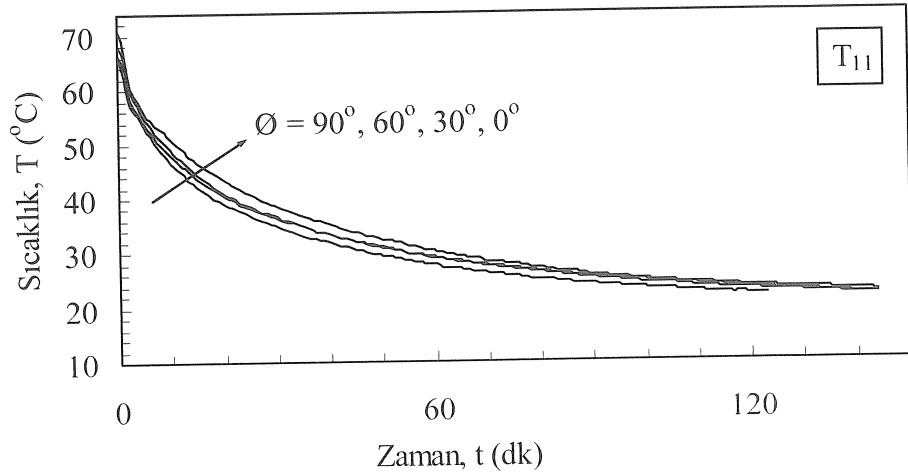


b)

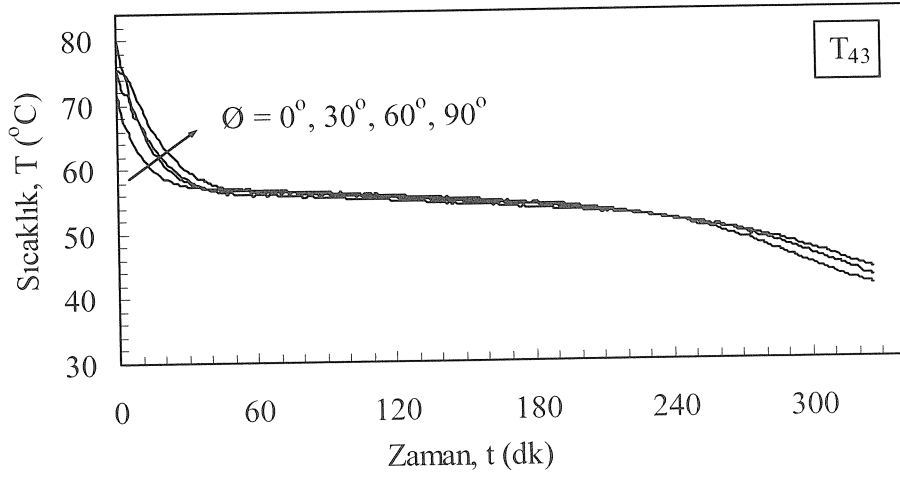


c)

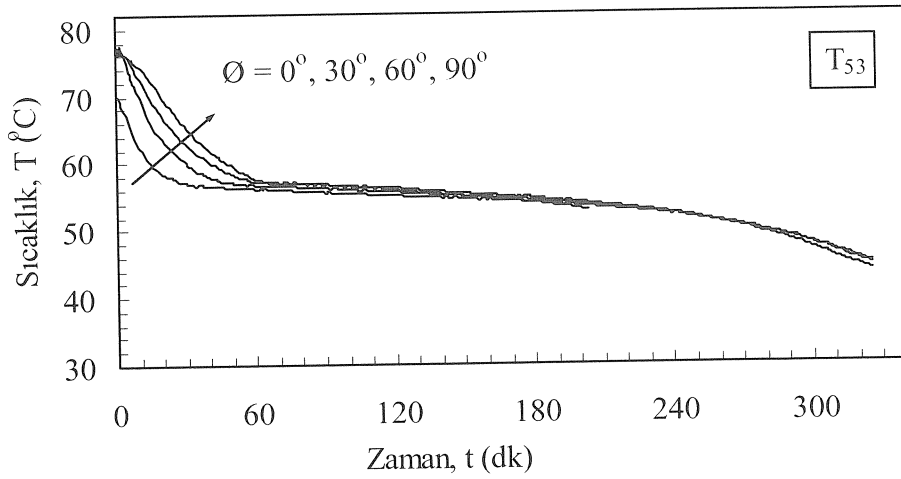
Şekil 3.133. Deponun yerleştirme açısına bağlı olarak P3'ün katılarda sıcaklık-zaman değişimi ($\theta = 0^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8\text{ kg/dk}$)



a)



b)



c)

Şekil 3.134. Deponun farklı yerleştirme açılarına bağlı olarak P3'ün katılaşmada sıcaklık-zaman değişimi ($\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

3.4.1 Sistemin Termodinamik Analizi

Bölüm 2.5.'de Termodinamiğin I. Kanunu ve Termodinamiğin II. Kanunu esas alınarak, depolama sisteminin verimliliğini ifade eden bağıntılar ortaya konulmuştur. Bu bağıntılar kullanılarak Şekil 3.135.-Şekil 3.141. de depo kabuk açısı, depo yerleştirme açısı ve akış sıcaklıklarına bağlı olarak I. ve II. kanun verimleri ile birlikte boyutsuz entropi üretimi verilmiştir.

Şekil 3.135.'de I. ve II. kanun veriminin depo kabuk açısına bağlı değişimi verilmektedir. I. ve II. kanun esas alınarak yapılan değerlendirmede sistem veriminin ortalama olarak % 2-3 düzeyinde olduğu görülmektedir. Sistem veriminin bu düzeyde düşük olması, FDM'nin anlık ısı alma kabiliyetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Depo kabuk açısı, $\theta = 5^\circ$ durumunda, sistemin I. ve II. kanun verimi diğer depo kabuk açılarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, ısı transfer borusuna yakın bölgede meydana gelen doğal taşınım şiddetinin daha büyük olmasından ileri gelmektedir. Kabuk açısının 10° ve 15° durumlarında verimin giderek düşmesi, sıvı faz içerisindeki doğal taşınım şiddetinin azalması ve sıcak akışkan komşuluğundaki ısı transfer yüzey alanının küçülmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.136.'da farklı depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi görülmektedir. I. ve II. kanun esas alınarak yapılan değerlendirmede sistem veriminin ortalama olarak % 1-2 arasında olduğu görülmektedir. Sistem veriminin bu düzeyde düşük olması, kabuk açısına bağlı olarak yapılan I. ve II. Kanun analizine benzer sebeptendir.

Depo yerleştirme açısının artmasıyla verim atmakta ve 60° 'den sonra verim yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bu durum, depo yerleştirme açısının, FDM içerisindeki sıvı bölgede doğal taşınım alanı ve şiddetini etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Silindirik deponun yatay konumunda, FDM içerisinde sıcak cidar komşuluğunda ısı transferi iletim ve taşınım ile gerçekleşmektedir. Depo yerleştirme açısının artmasıyla iletimsel ısı transferi etkisini yitirmekte, taşınım etkisi baskın hale gelmektedir.

Şekil 3.137.'de düşey silindirik depolamada, verimin akışkan giriş sıcaklığına bağlı değişimi görülmektedir. Verim, akışkan giriş sıcaklığının 70°C değerinde maksimum iken sıcaklığın artması ile azalmakta ve 75°C 'den sonra yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. 70°C 'de verimin en yüksek olması, çevreye kaybedilen enerjinin artan giriş sıcaklık değerlerine kıyasla daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

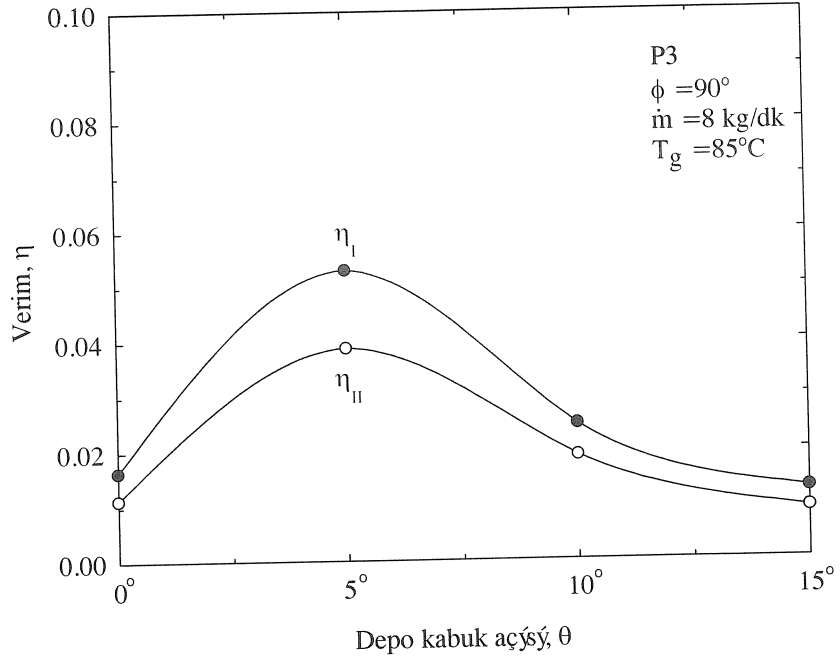
Parafin P3'ün kullanıldığı 5° kabuk açılı depoda, depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi Şekil 3.138.'de görülmektedir. Depo yerleştirme açısının artmasıyla verimin arttığı ve deponun düşey konumunda maksimum değerine ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, silindirik depolamada (Şekil 3.136.), depo yerleştirme açısının belli bir değerinden sonra (30°) verim sabit kalırken, bu geometri için depo yerleştirme açısı artışı verimi yaklaşık dört kat artırmakta olduğu görülmüştür.

Şekil 3.139.'da 5° kabuk açılı deponun sisteme düşey bağlanması durumunda, verimin akışkan giriş sıcaklığına bağlı değişimi görülmektedir. Verim üzerinde, akışkan giriş sıcaklığı artışının etkisi düşey silindirik depolamaya (Şekil 3.137.) benzer bir değişim göstermektedir.

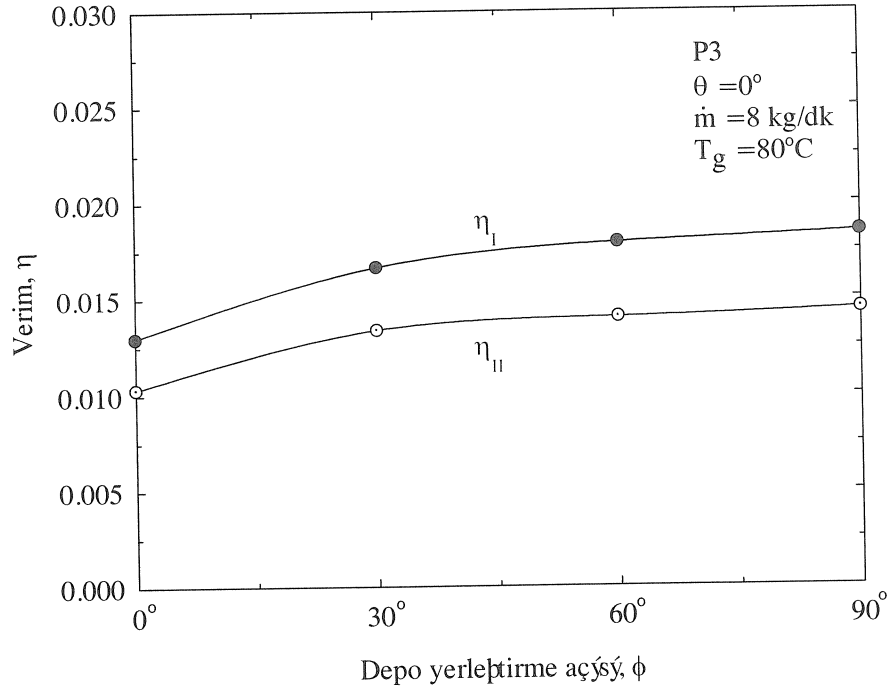
Boyutsuz entropi üretiminin depo yerleştirme açısı ve akışkan giriş sıcaklığına bağlı değişimi sırasıyla Şekil 3.140. ve Şekil 3.141.'de verilmektedir. Deponun yatay konumunda entropi üretiminin maksimum olduğu ve depo yerleştirme açısının artmasıyla entropi üretiminin azaldığı belirlenmiştir. Fakat, bu azalışın oldukça düşük bir düzeyde olduğu görülmüştür. Akışkan giriş sıcaklığının artmasıyla boyutsuz entropi üretimi artmakta olduğu ve belirli bir sıcaklık değerinden sonra yaklaşık olarak sabit kaldığı Şekil 3.141.'den anlaşılmaktadır.

Ortalama olarak boyutsuz entropi üretiminin 0.99 düzeyinde olması; ısı transferi işlemi, depolama süreci ve çevre üzerinde entropi üretiminin oldukça yüksek olmasından dolayıdır. Burada ifade edilen bağımlı değişkenler içerisinde en yüksek entropi üretimi çevreye atılan ısıdan kaynaklanmaktadır.

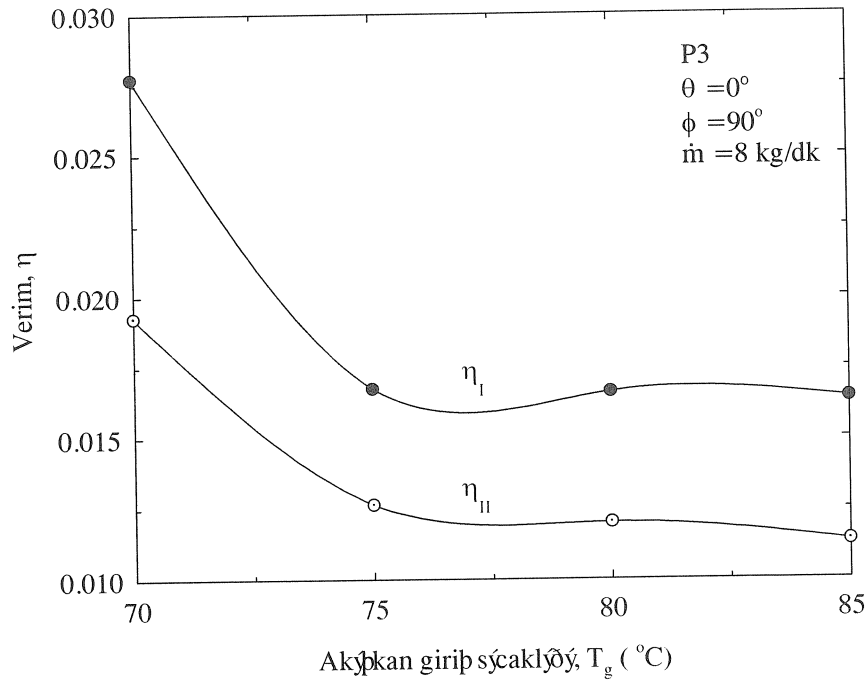
Burada, silindirik ve 5° kabuk açısına sahip depo içerisindeki parafine, ısı transfer akışkanından gerçekleşen toplam ısı geçişinin zamana bağlı değişimi Şekil 3.142. ve Şekil 3.143.'de verilmiştir. Şekil 3.142.'den görüldüğü gibi, düşey konumda yerleştirilen iki tip deponun içerisinde bulunan parafinin P1'e olan ısı geçişi beklenildiği gibi 5° kabuk açılı depoda daha hızlı ve daha fazladır. Depoların içerisinde aynı miktar parafin olmasına rağmen düşey silindirik depo içerisindeki parafinin daha geç erimesi, depodan çevreye olan ısı kayıplarını artırmıştır. Benzer şekilde, parafin P3 ve 85 °C akışkan giriş sıcaklığında yapılan deneylerden elde edilen verilere bağlı olarak hesaplanan ısı geçişi zaman eğrileri Şekil 3.142.'de verilen eğrilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, düşey yerleştirilmiş 5° kabuk açılı depoda bulunan parafin daha hızlı erimiş ve kurulan sayısal modele uygun olarak da deneysel veriminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



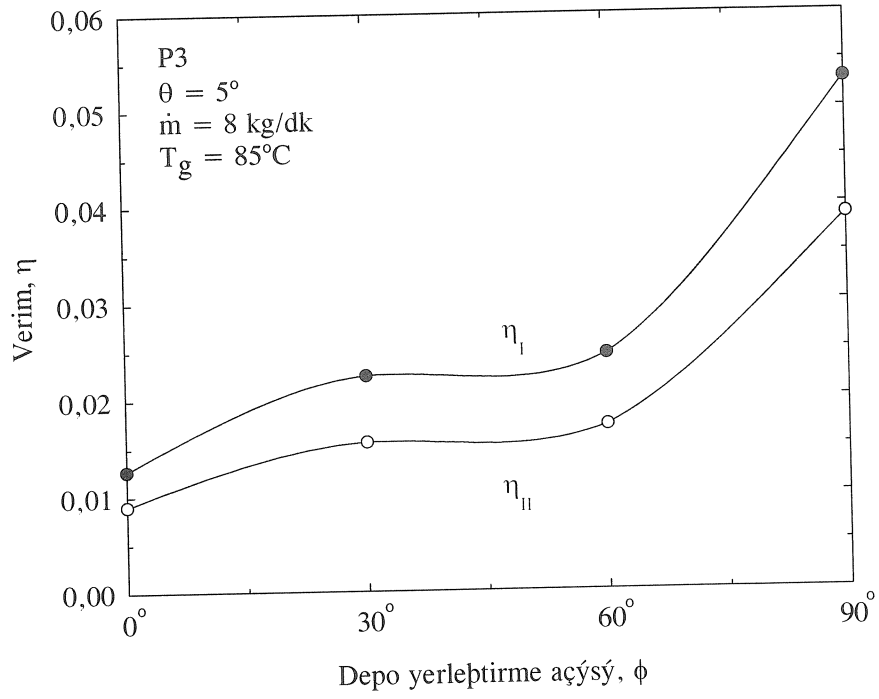
Şekil 3.135. Erime işleminde kabuk açısının verim üzerindeki etkisi



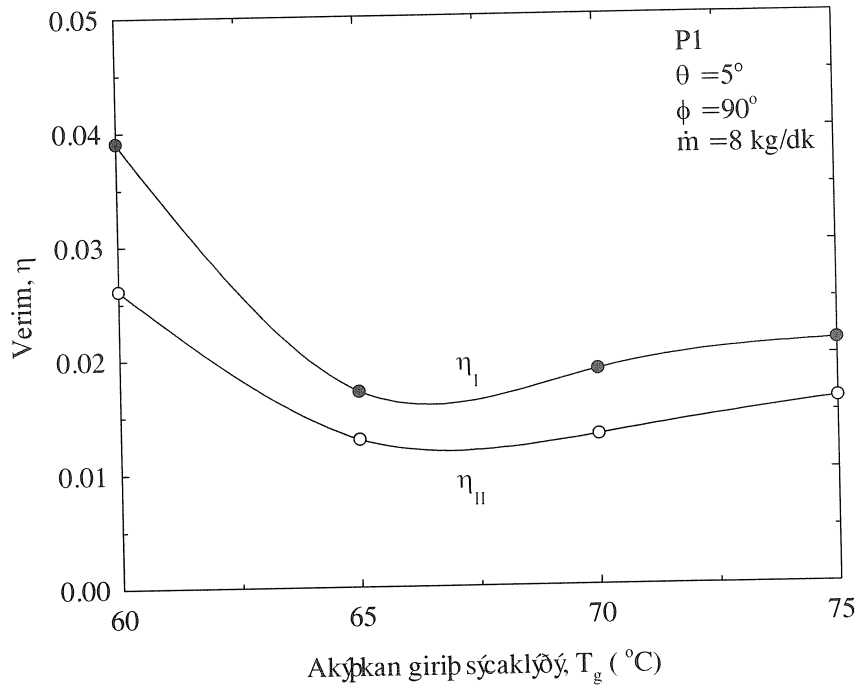
Şekil 3.136. Erime işleminde depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi



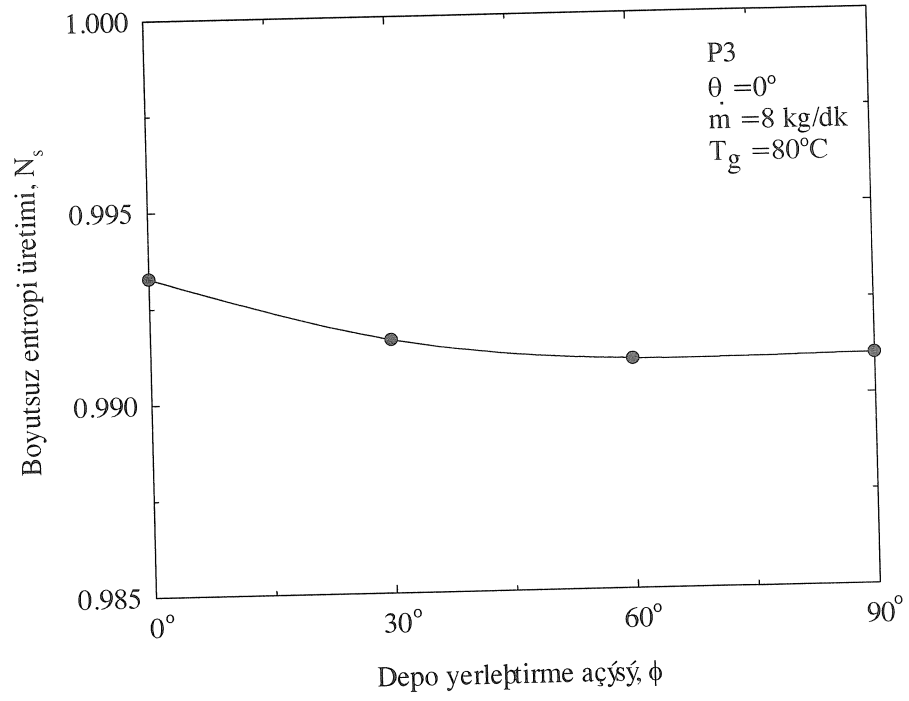
Şekil 3.137. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının verim üzerindeki etkisi



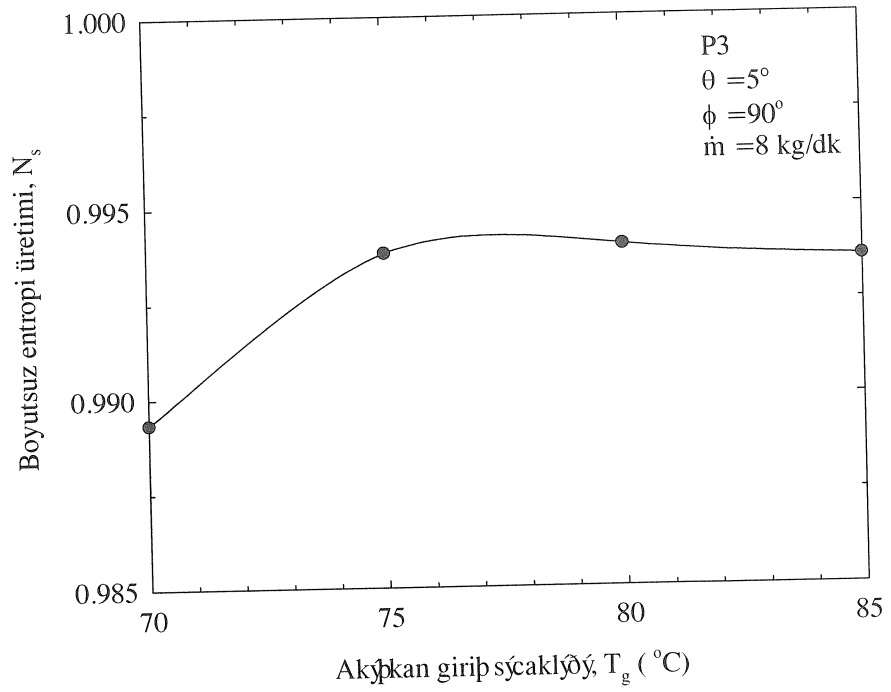
Şekil 3.138. Erime işleminde depo yerleştirme açısının verim üzerindeki etkisi



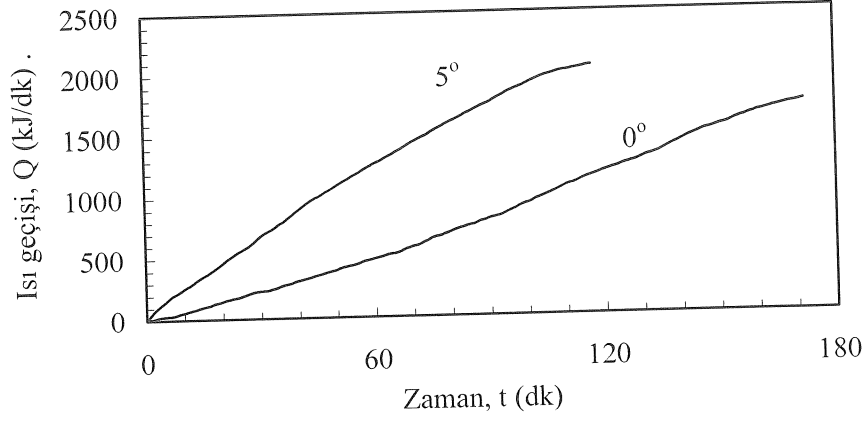
Şekil 3.139. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının verim üzerindeki etkisi



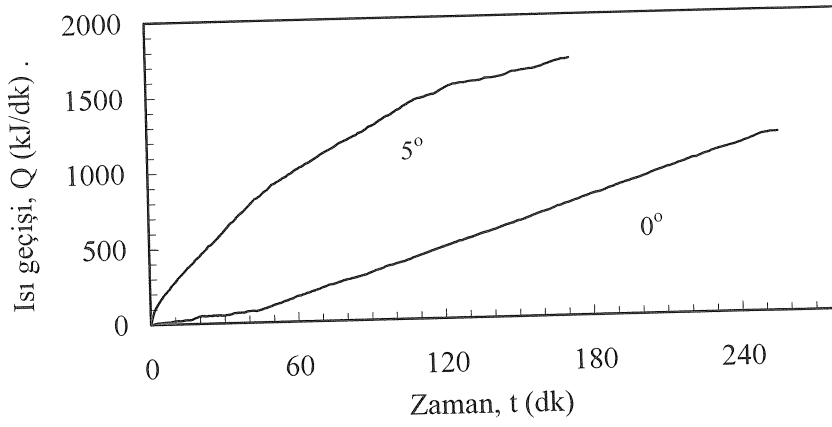
Şekil 3.140. Erime işleminde depo yerleştirme açısının boyutsuz entropi üretimi üzerindeki etkisi



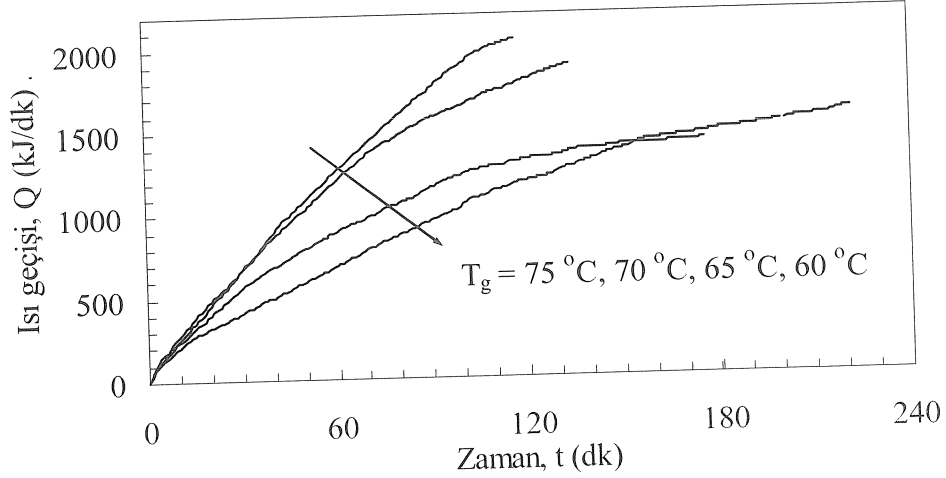
Şekil 3.141. Erime işleminde akışkan giriş sıcaklığının boyutsuz entropi üretimi üzerindeki etkisi



Şekil 3.142. Parafinin (P1) erimede, deponun farklı kabuk açılarına bağlı olarak ısı geçişi-zaman grafiği ($\Theta = 90^\circ$, $T_g = 75^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



Şekil 3.143. Parafinin (P3) erimede, deponun farklı kabuk açılarına bağlı olarak ısı geçişi-zaman grafiği ($\Theta = 90^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



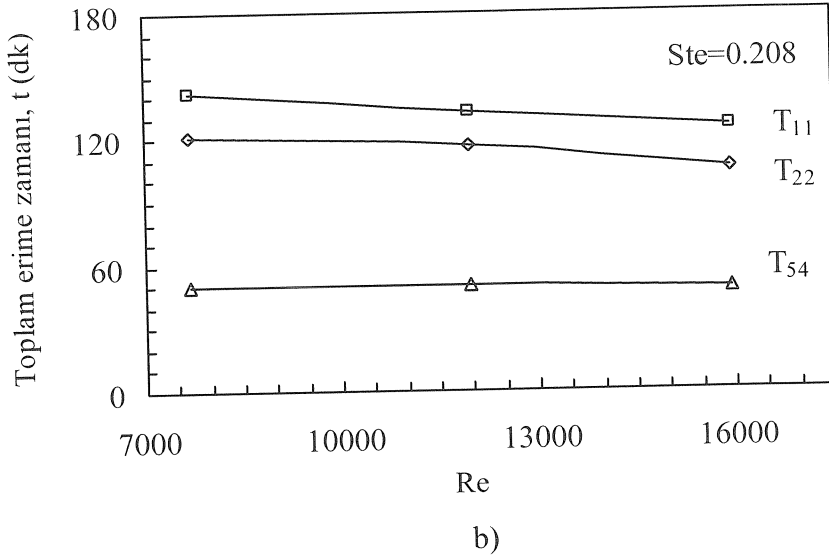
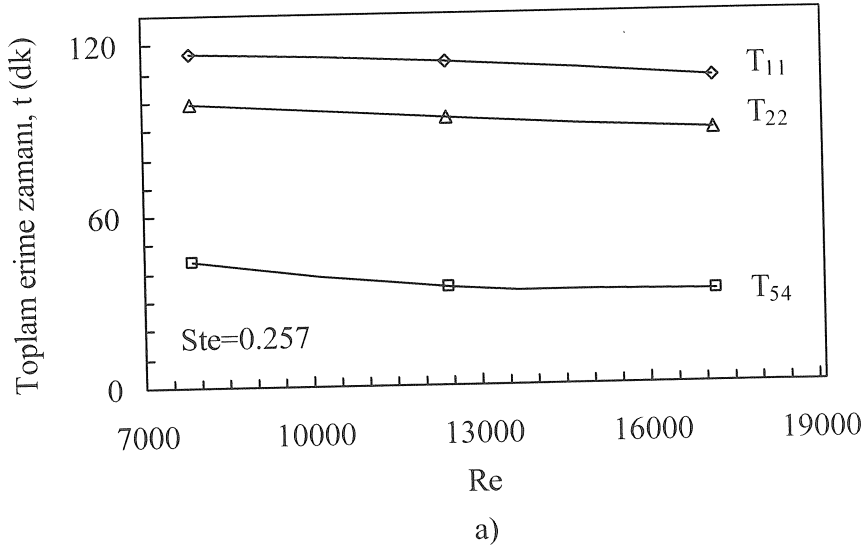
Şekil 3.144. Parafinin (P1) erimede, deponun akışkanın giriş sıcaklığına bağlı olarak ısı geçişi-zaman grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)

3.4.2. Boyutsuz Sayılar Cinsinden Analiz

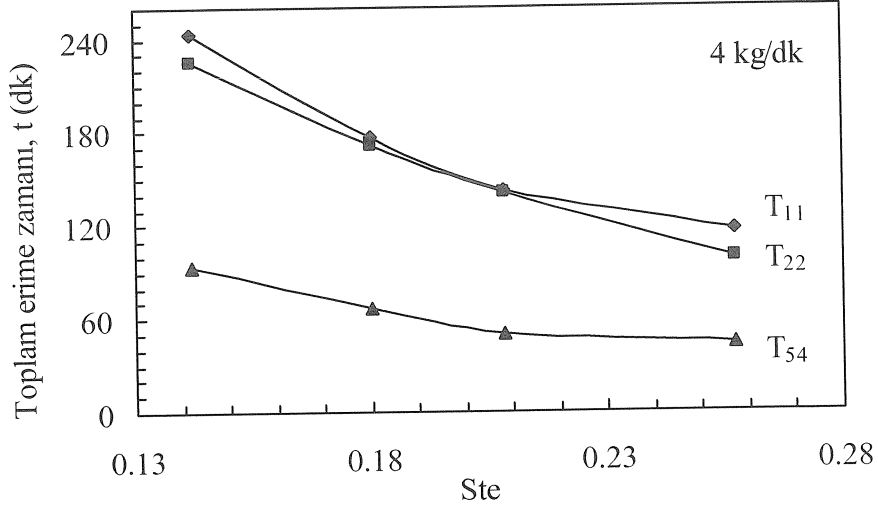
FDM içerisindeki bütün noktaların oda sıcaklığından FDM'nin erime sıcaklığına erişmesi için geçen süre toplam erime zamanı olarak tanımlanmıştır. Reynolds sayısı ve Stefan sayısının toplam erime zamanı üzerindeki etkisi Şekil 3.144. – Şekil 3.149.'da gösterilmiştir. Reynolds sayısının artması toplam erime zamanı üzerinde ihmal edilebilir düşümlere neden olmaktadır. Reynolds sayısı, ısı transfer akışkanının debisi ile doğru orantılıdır. Diğer deyişle, artan ısı transfer akışkan debisiyle Reynolds sayısı doğrusal olarak artmaktadır. Esasında artan Reynolds sayısı veya akışkan debisi artan akış entalpisine karşılık gelmektedir. Bundan dolayı belirli bir termal enerji depolama sistemi için Reynolds sayısı ve akışkan debisi, küçük seçilmelidir.

Şekil 3.145.'de görüldüğü üzere artan Stefan sayısı ile toplam erime zamanı önemli derecede azalmaktadır. Tanımından anlaşılacağı üzere, Stefan sayısı ısı transfer akışkan giriş sıcaklığı ve FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Belirli bir FDM tipi için erime sıcaklığı sabit olacaktır. Dolayısıyla ısı transfer akışkan giriş sıcaklığının artması Stefan sayısının artmasına karşılık gelecektir. Giriş sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, deponun iç cidarı ve ısı transfer akışkanının ortalama sıcaklıkları arasındaki farkın artmasıyla ısı geçişi de o kadar yüksek olacaktır. Şekil 3.144'de görüldüğü üzere giriş sıcaklığının 70°C 'den 75°C 'ye 5° 'lik artışı (ki bu artış Ste'nin 0.208 den 0.256'ya artışına karşılık gelmektedir), daha kısa erime zamanına sebep olmaktadır.

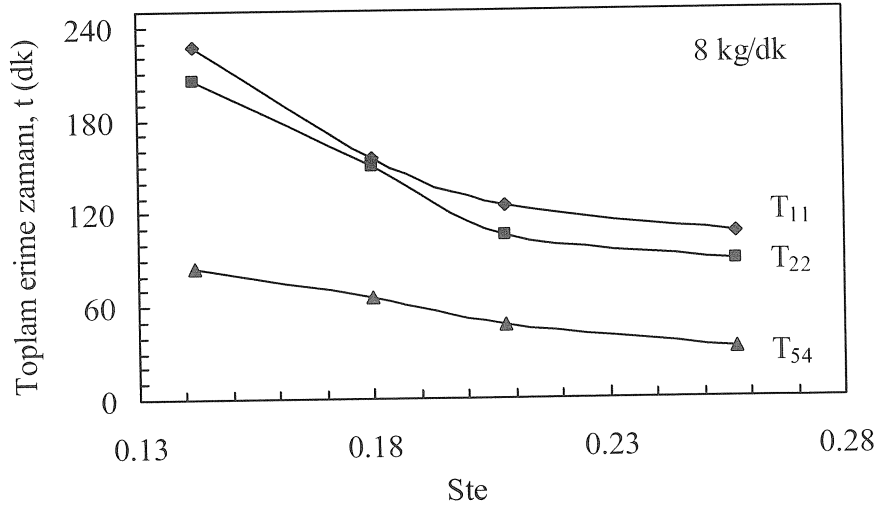
Artan giriş sıcaklığı daha yüksek enerji girişi anlamına geldiğinden, ısı transfer akışkan sıcaklığını optimum değerlerde tutulması termal enerji depolama sisteminin enerji verimliliği açısından önemlidir. Burada, P1 için giriş akışkan sıcaklığının optimum değeri 70 °C olarak tavsiye edilmiştir. Şekil3.146. - Şekil 3.147.'den görüldüğü üzere P2 ve P3 için benzer davranışlar elde edilmiştir.



Şekil 3.144. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P1'in erime işleminde Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 75$ °C,
b. $T_g = 70$ °C ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8$ kg/dk)



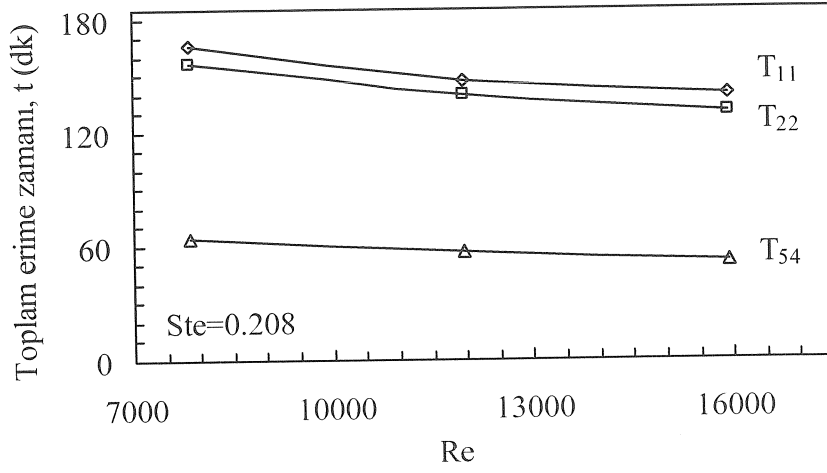
a)



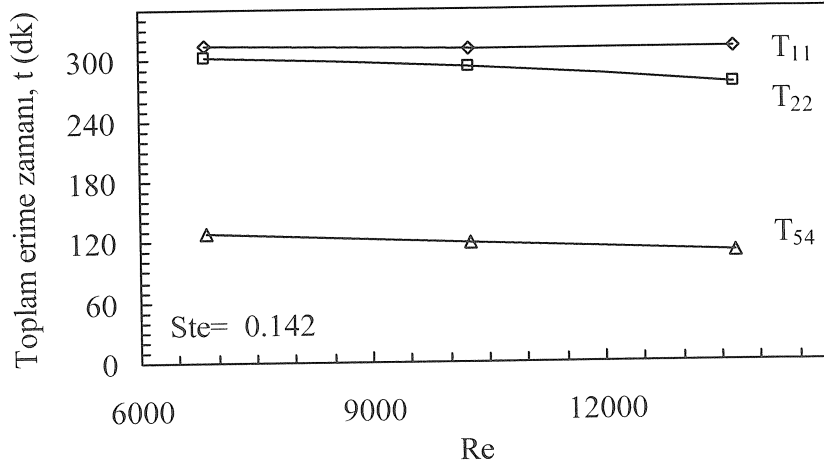
b)

Şekil 3.145. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P1'in erime işleminde Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$,

a. $m = 4$ kg/dk, b. $m = 8$ kg/dk)

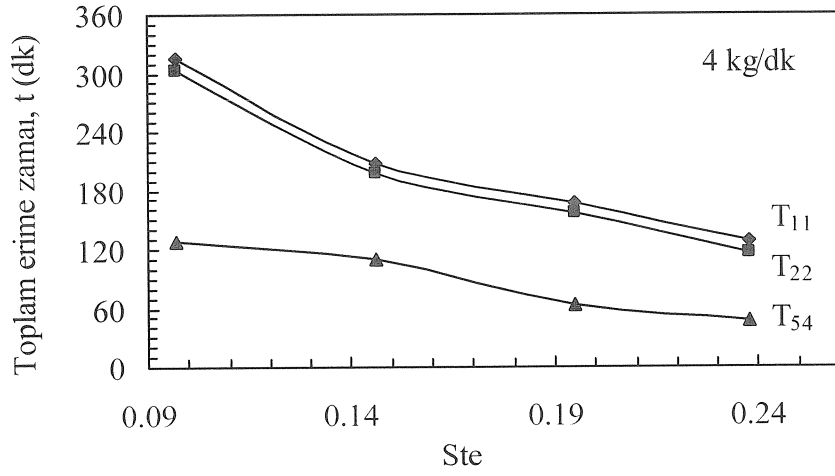


a)

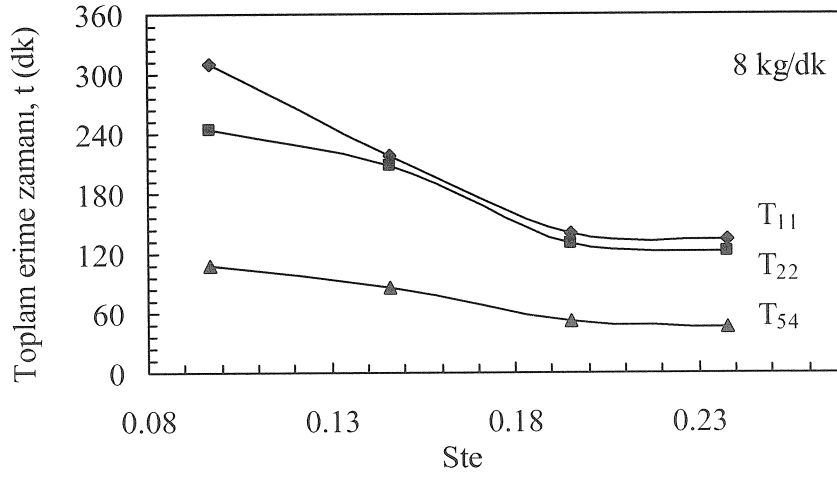


b)

Şekil 3.146. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P2'in erime işleminde Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 70^\circ\text{C}$, b. $T_g = 60^\circ\text{C}$ ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)

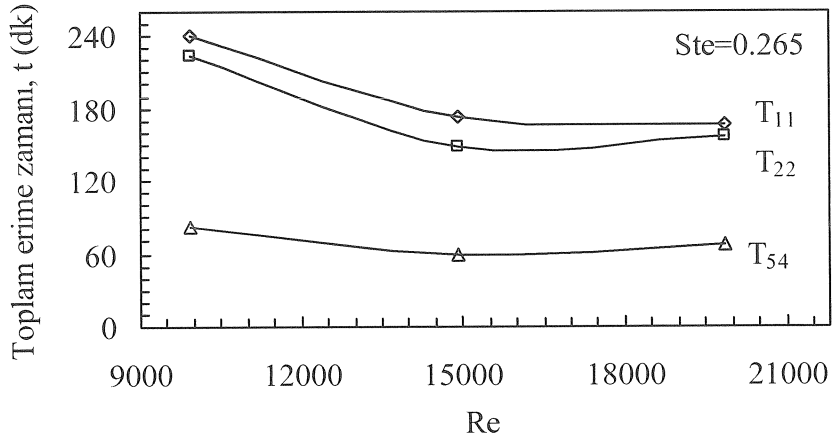


a)

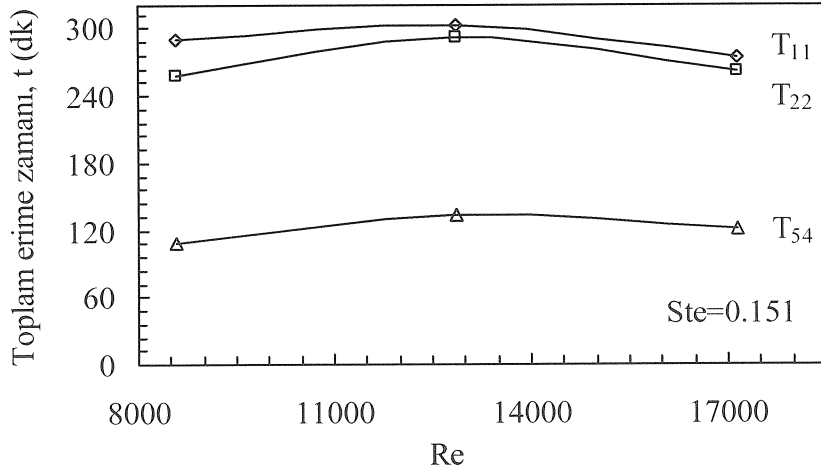


b)

Şekil 3.147. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafın P2'in erime işleminde Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\epsilon = 5^\circ$, a. $\dot{m} = 4 \text{ kg/dk}$, b. $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)



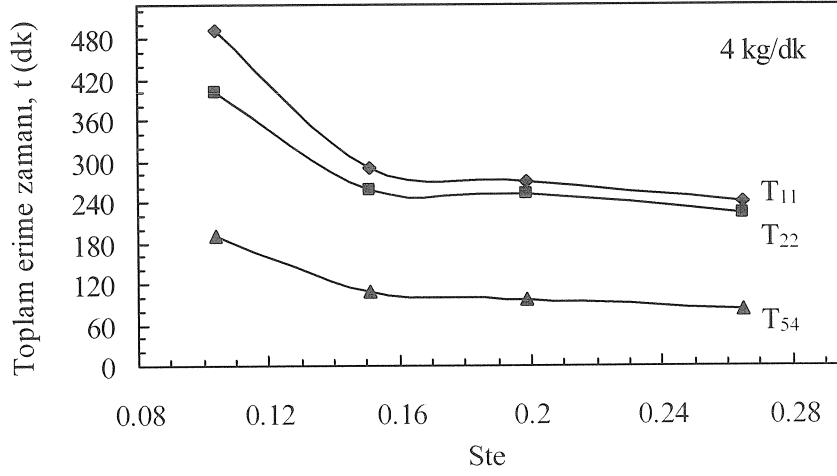
a)



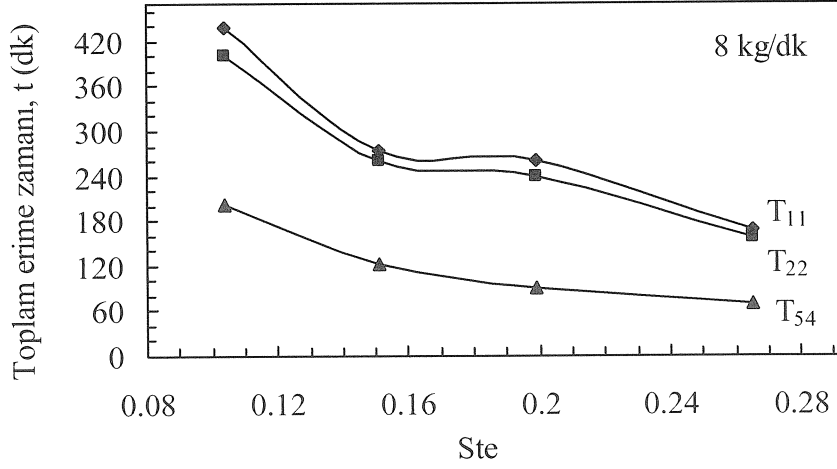
b)

Şekil 3.148. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P3'ün erime işlemi Reynolds sayısı-toplam erime zamanı grafiği a. $T_g = 85 \text{ }^\circ\text{C}$,

b. $T_g = 75 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $m = 8 \text{ kg/dk}$)



a)



b)

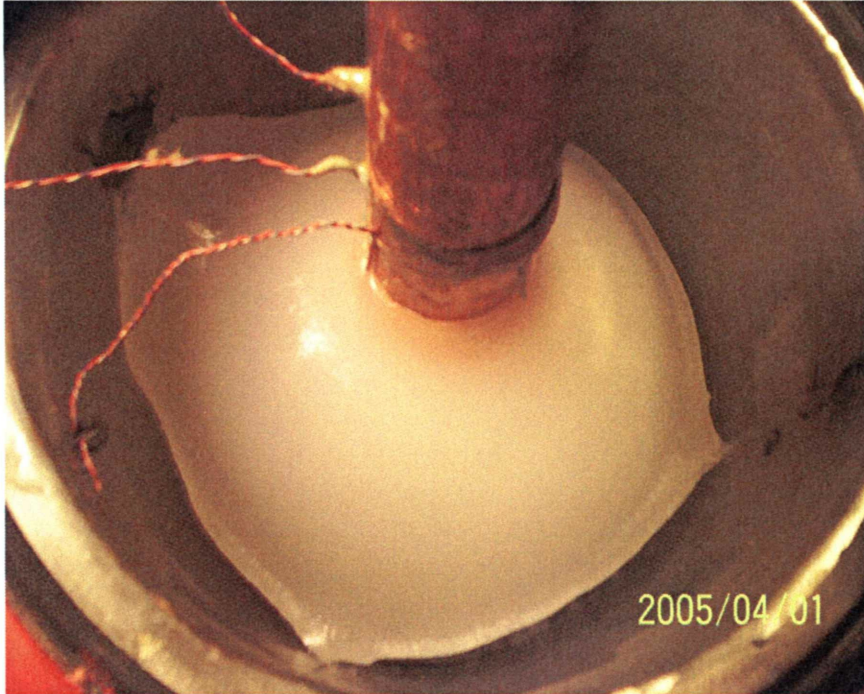
Şekil 3.149. Depo içerisindeki belirli noktalarda parafin P3'ün erime işlemi için Stefan sayısı-toplam erime zamanı grafiği ($\theta = 90^\circ$, $\epsilon = 5^\circ$, a. $m = 4$ kg/dk, b. $m = 8$ kg/dk)

3.5. Parafinin Erime ve Katılaşma Fotoğrafları

Deneyler sırasında, parafinin erime ve katılaşma sıcaklığı zamana bağlı olarak bilgisayar aracılığı ile okunmuş ve kayıt altına alınmıştır. Ancak, ölçülen sıcaklık değerleri ile gerçek durumun karşılaştırmasını yapmak için parafinin erime ve katılaşma davranışı zamana bağlı olarak belirli adımlarda fotoğraflanmıştır. Burada verilen fotoğraflar, en

uygun depolama kapasitesine sahip depolama geometrisi olan 5° halka aralık açısına sahip depoda parafinin (P3) erime ve katılaşma davranışını belirlemek için çekilmiştir.

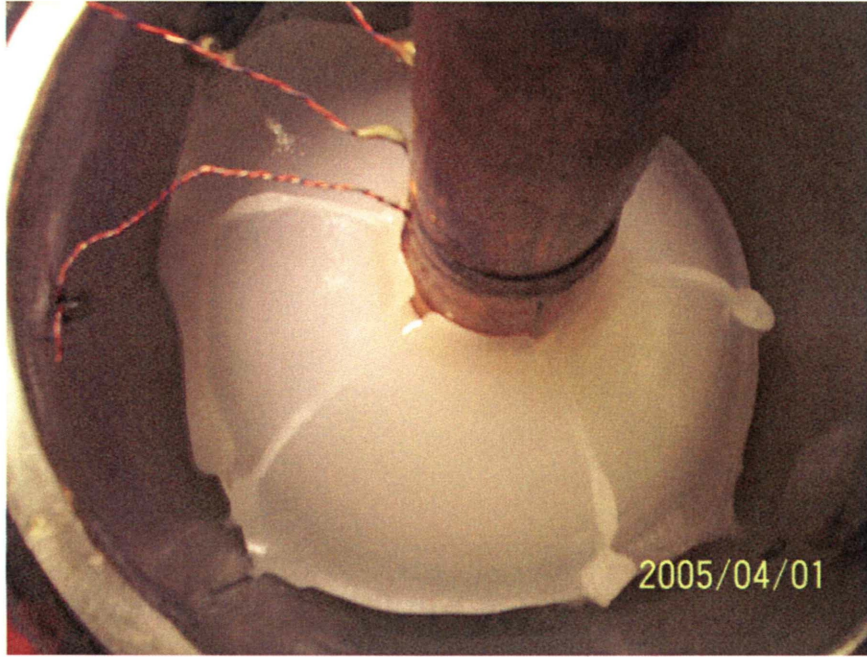
Isı transfer akışkanının 85 °C giriş sıcaklığı ve 8 kg/dk debisinde erime ve akışkanın 20 °C giriş sıcaklığı ve 8 kg/dk debisinde zamana bağlı katılaşma fotoğrafları Şekil 3.150. - Şekil 3.152.'de verilmiştir. Erime ve katılaşmanın fotoğraflanma periyodu deneysel verilere bağlı olarak çizilen parafinin sıcaklık-zaman değişimine uygun olarak belirlenmiştir. Fotoğraf çekimi deneylerin başlangıcında daha sık, devam eden erime işleminde sabit zaman aralıklarında ve periyodik olarak gerçekleştirilmiştir. Erime veya katılaşma bittiğinde fotoğraf çekimlerine son verilmiştir. Ayrıca, yatayla 30° açı ile yerleştirilen deponun içerisindeki parafinin katılaşma hali Şekil 3.153.'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katılaşma boru boyunca gerçekleştiğinden, katılaşmanın ilk safhasında parafin boru cidarına yapışmakta ve donarken yoğunluğu artan parafinin hacimsel küçülmesi sıvı olan borudan uzak bölgelerde oluşmaktadır. Böylece katılaşmanın ileri safhalarında deponun kabuk bölgesinde hacimsel daralma gerçekleşir ve parafinsiz boşluklar oluşmuştur.



Şekil 3.150. 5° kabuk açılı depo içerisinde donmuş parafinin erime başlangıcında fotoğrafı



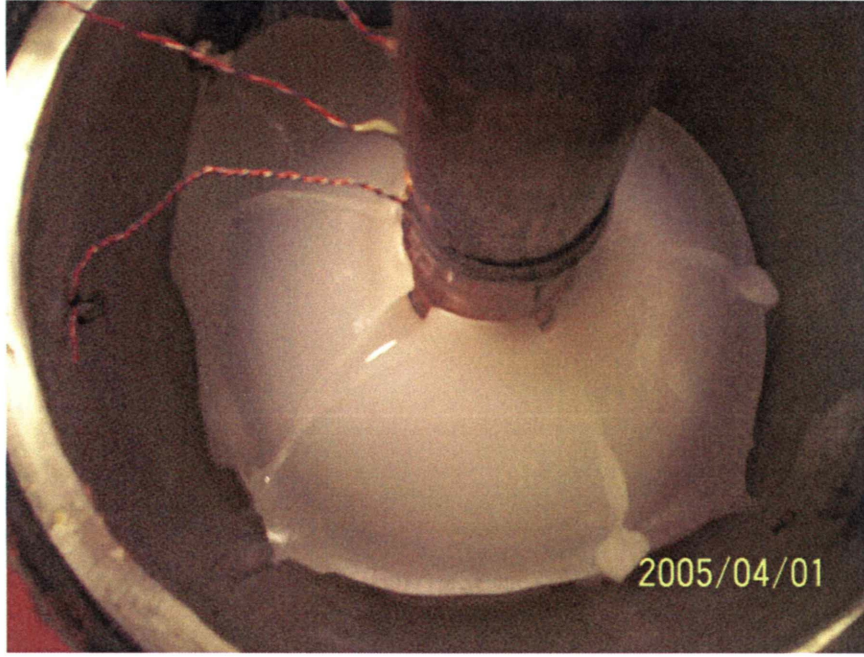
a) 1. dakika erime şekli



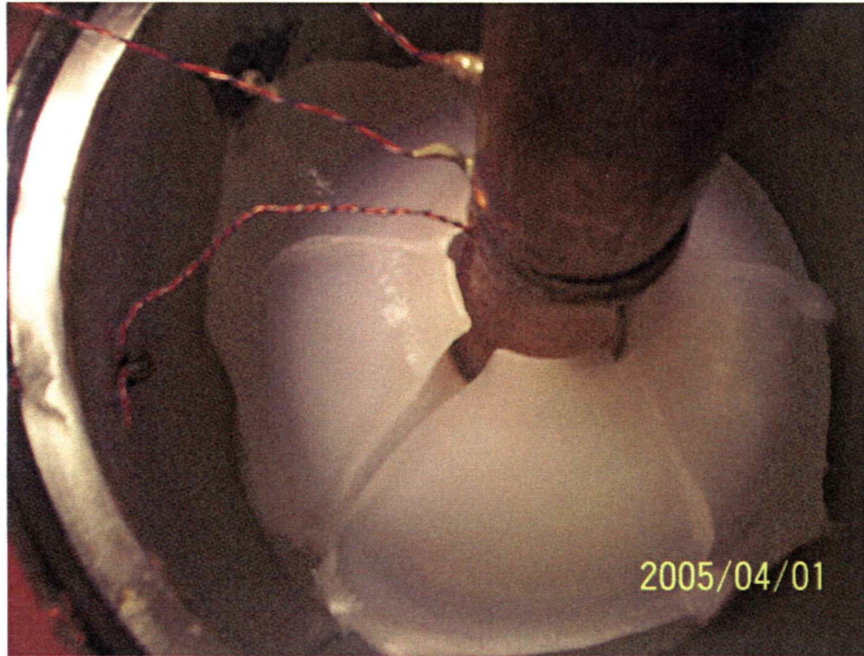
b) 2. dakika erime fotoğrafı

Şekil 3.151. Parafin P3'ün zamana bağlı erime fotoğrafları (a -j) ($\theta = 90^\circ$,
 $\theta = 5^\circ$, $T_g = 85^\circ\text{C}$ ve $m = 8\text{ kg/dk}$)

Şekil 3.151.'in devamı

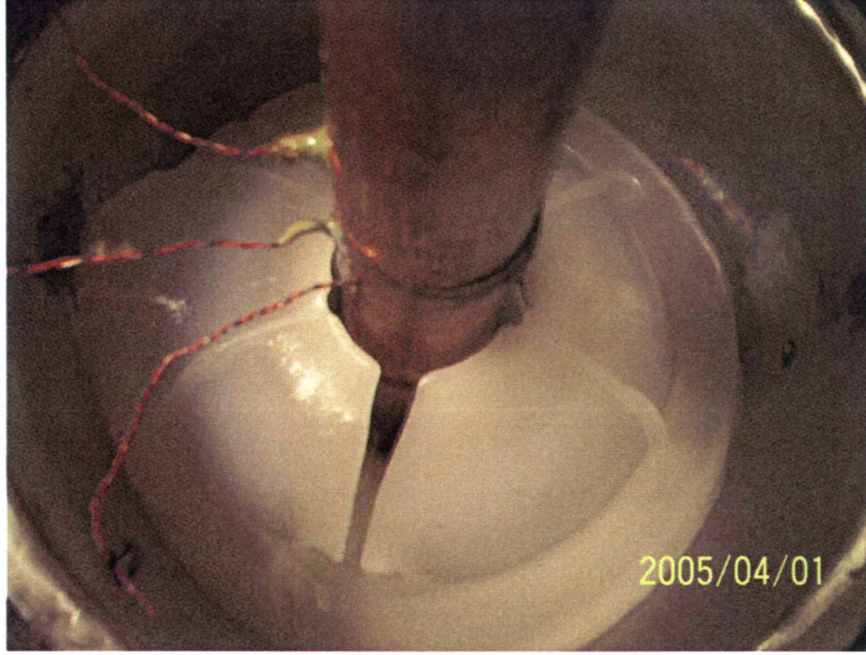


c) 5. dakika erime fotoğrafı

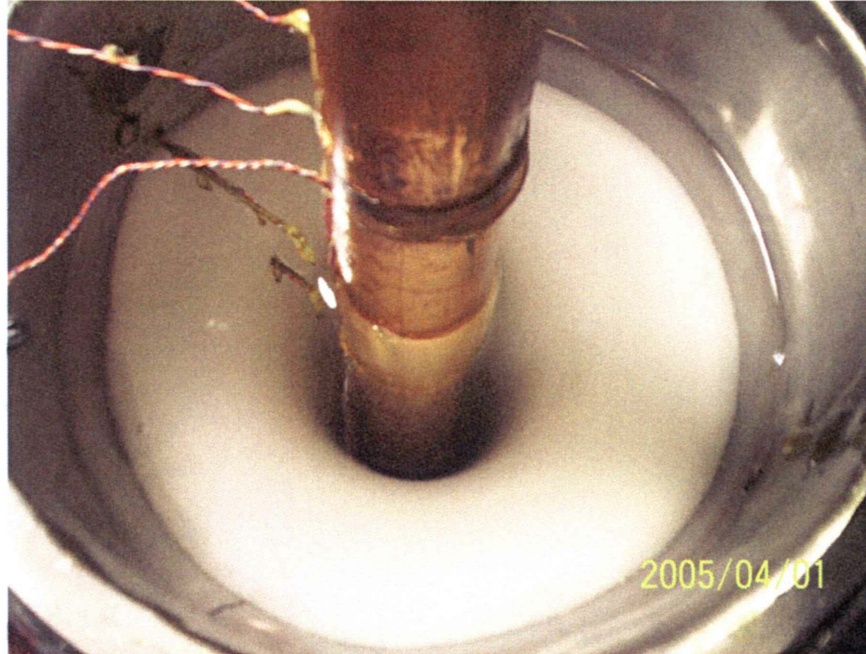


d) 10. dakika erime fotoğrafı

Şekil 3.151.'in devamı

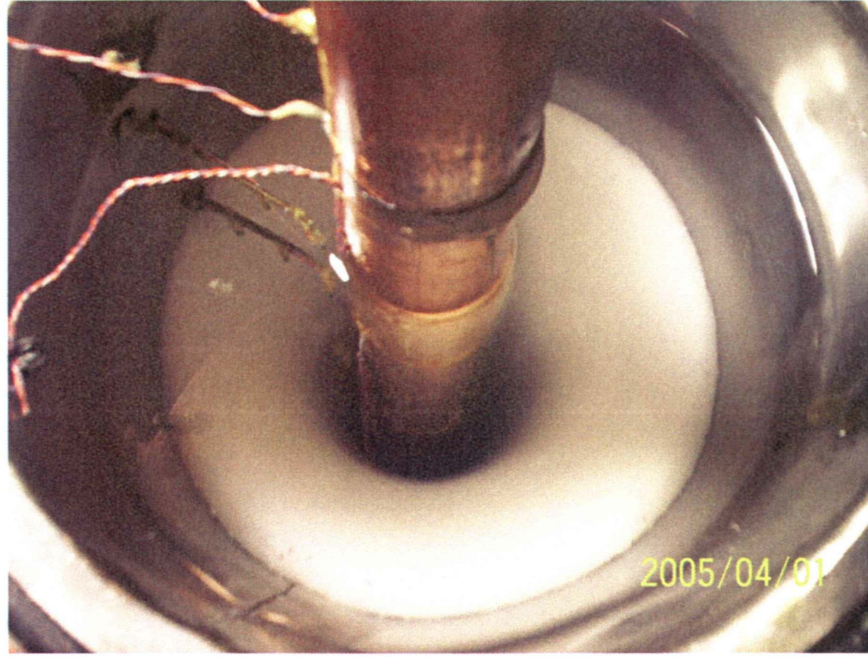


e) 30. dakika erime fotoğrafı

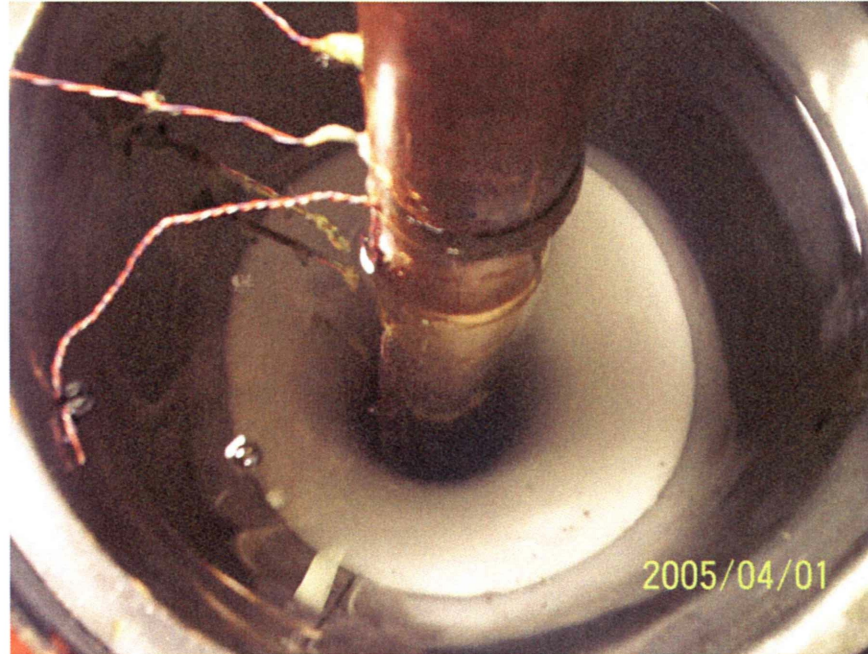


f) 60. dakika erime fotoğrafı

Şekil 3.151.'in devamı

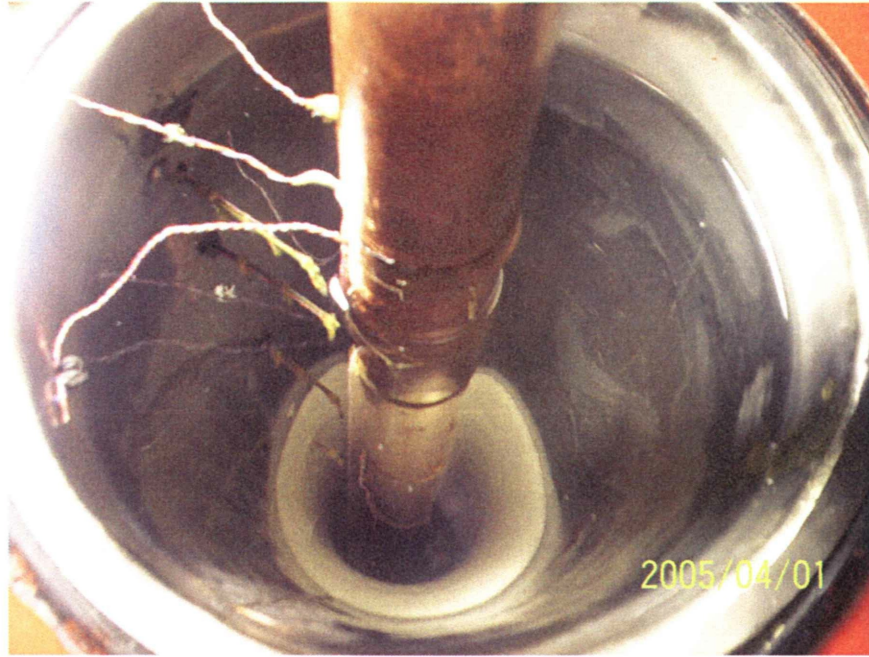


g) 90. dakika erime fotoğrafı

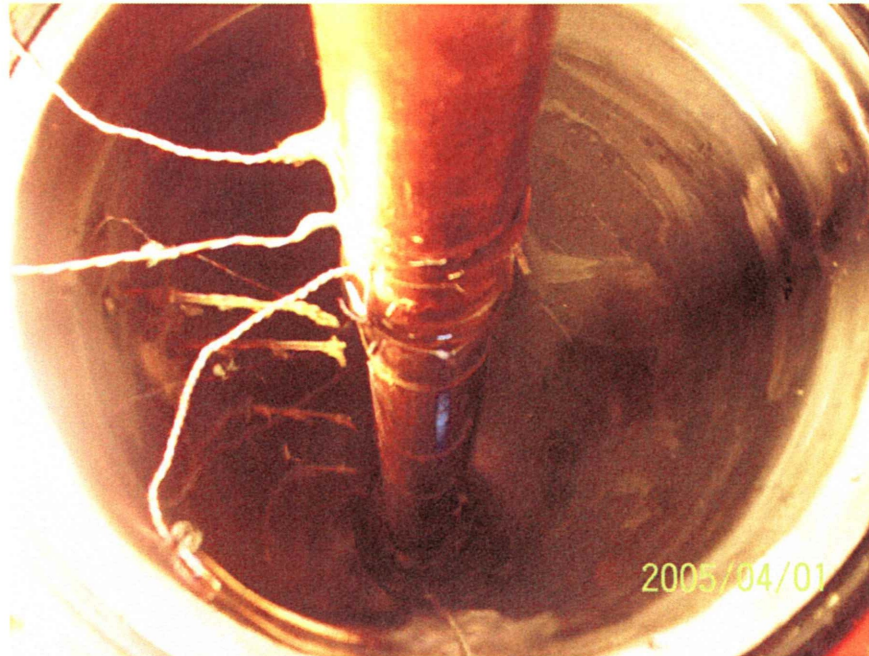


h) 120. dakika erime fotoğrafı

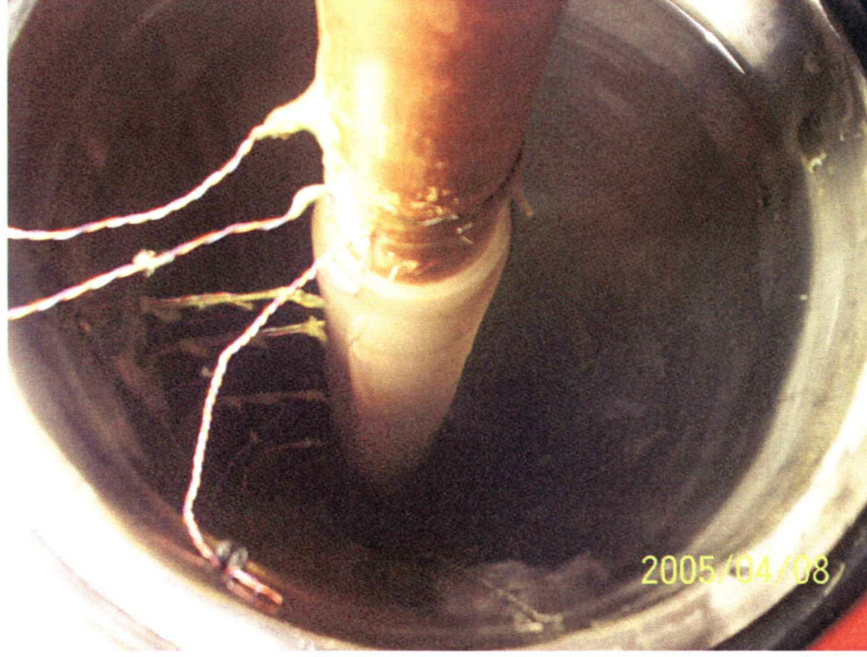
Şekil 3.151.'in devamı



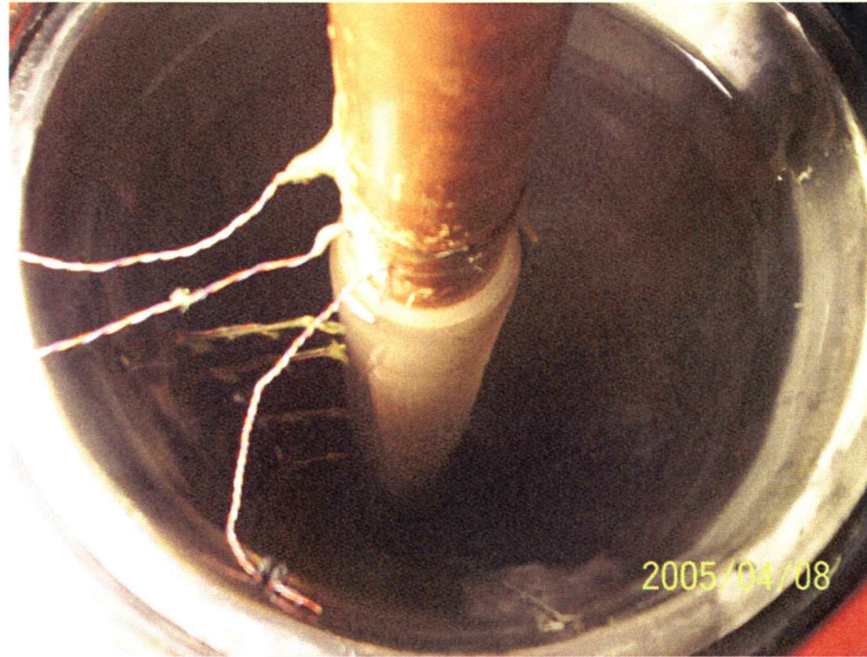
i) 160. dakika erime fotoğrafı



j) 190. dakika erimenin tamamlanmış fotoğrafı



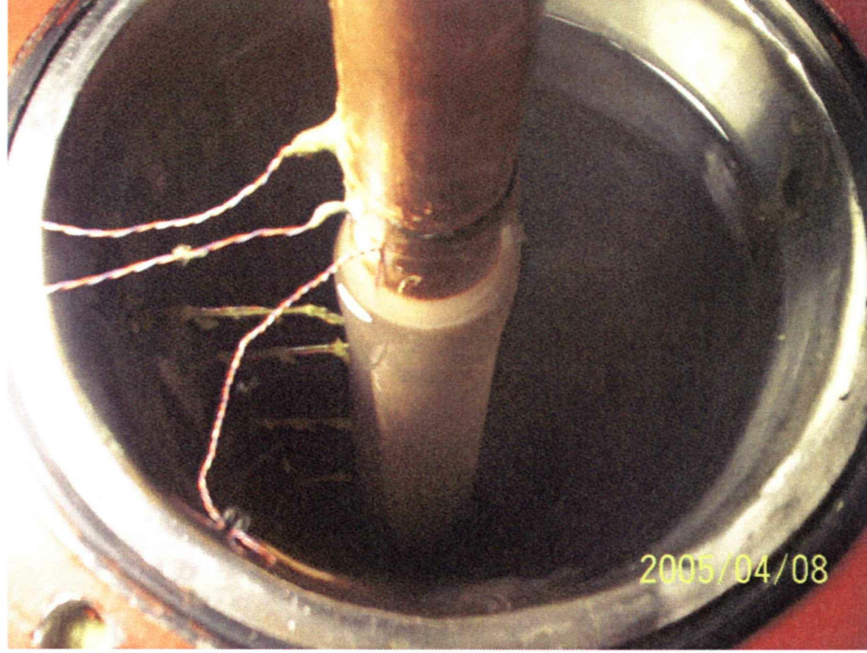
a) 5. dakika katılaşma fotoğrafı



b) 10. dakika katılaşma fotoğrafı

Şekil 3.152. Parafin P3'ün zamana bağlı katılaşma fotoğrafları (a-g)
($\theta = 90^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$ ve $\dot{m} = 8 \text{ kg/dk}$)

Şekil 3.152.'nin devamı

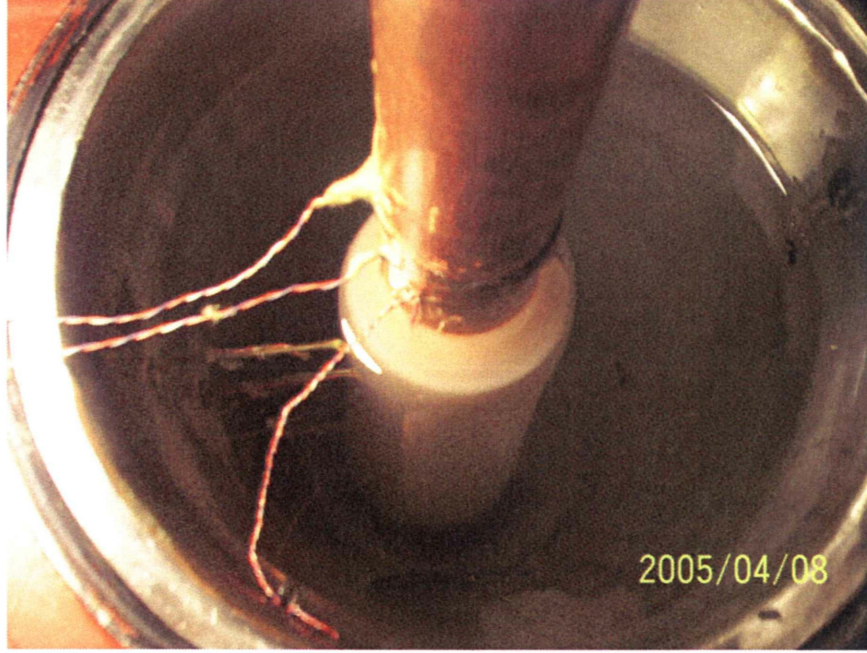


c) 20. dakikadaki katılaşma fotoğrafı



d) 30. dakikadaki katılaşma fotoğrafı

Şekil 3.152.'nin devamı



e.) 50. dakikadaki katılaşma fotoğrafı

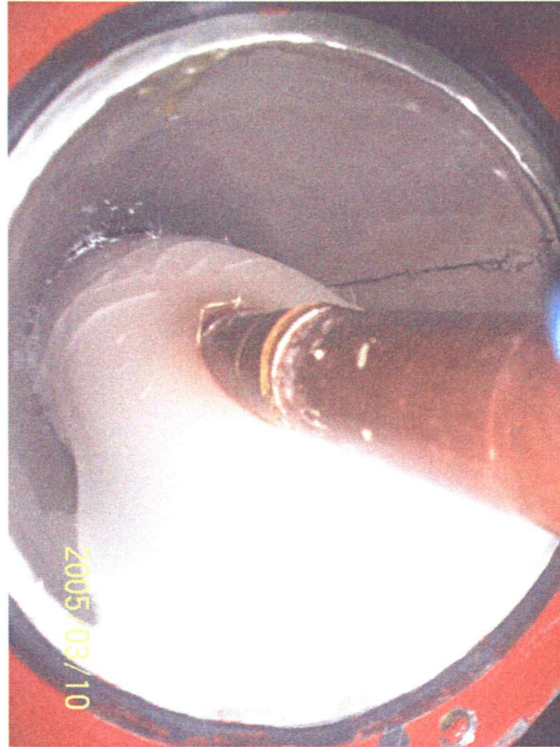


f.) 60. dakikadaki katılaşma fotoğrafı

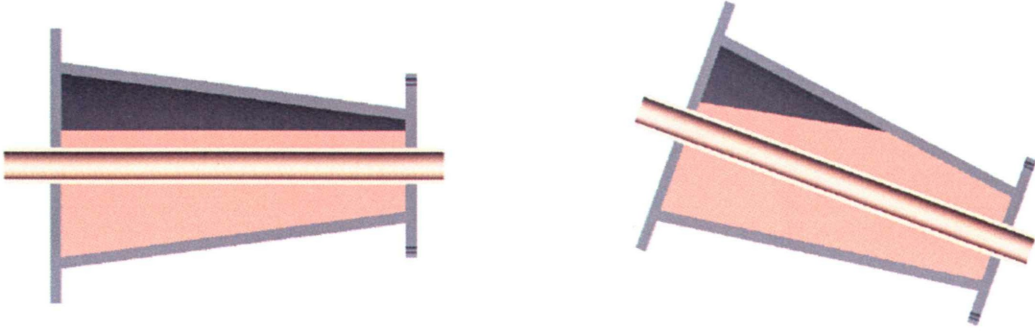
Şekil 3.152.'nin devamı



g.) 80. dakika katılaşma fotoğrafı



Şekil 3.153. Deponun yatayla 30° açı yapacak şekilde yerleştirilmesi durumunda parafin P3'ün katılaşma fotoğrafı ($\varnothing = 30^\circ$, $\theta = 5^\circ$, $T_g = 20^\circ\text{C}$ ve $m = 8 \text{ kg/dk}$)



Şekil 3.154. 5° kabuk açılı deponun yerleştirme açısına bağlı olarak oluşan genişleme boşluğunun yeri

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, doldurma veya boşaltma (erime veya katılaşma) sırasında meydana gelen ısı geçişini artırmak veya toplam erime veya katılaşma süresini azaltmak için depo geometrisinde değişikliğe dayanan pasif bir yöntem uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılan depo, düşey silindirik bir boru ve etrafındaki kabuk arasındaki halka aralık hacminden oluşur. Literatürde verilen erime açılarına bağlı olarak, depolama süresini kısaltmak ve depolama sisteminin performansını artırmak için, silindirik depoların tabanı daraltılırken, tavanı belirli bir açı (5° , 10° , 15° , 20°) ile genişletilmiştir. Sistemde kullanılan 3 farklı tip FDM yukarıda anlatılan depolama sistemine yerleştirilmiş ve her bir FDM için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır. Ayrıca, deponun yerleştirme açısının FDM'nin erime veya katılaşma davranışı üzerindeki etkisini görmek için depo yatayla farklı açılarda (0° , 30° , 60° ve 90°) konumlandırılmıştır. Her bir depo geometrisi ve konum açısı için, ısı transfer akışkanının giriş sıcaklığı ve debisinin, parafinin doldurma/boşaltma süresi ve erime/katılaşma davranışı üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Depolama sisteminde kullanılan parafinlerin katı-sıvı faz değişimi sırasında depoladığı gizli ısı miktarı diğer yaygın olarak kullanılan FDM'lere (tuz hidratlar ve yağ asitleri) çok yakındır.
2. Parafinlerin, korozyona neden olmaması, uzun süreli kullanıma uygunluğu, yoğunluğunun düşük olması, aşırı soğuma etkisinin ihmal edilir olması ve kimyasal kararlılık gibi üstünlükleri nedeniyle enerji depolama malzemesi olarak kullanımı uygundur.
3. Parafinler, kullanılabilir enerji kaynaklarının ısısından maksimum faydayı sağlayacak şekilde, kaynağın sıcaklığına uygun depolama yapabilecek çok farklı erime sıcaklığına sahip olmaları dolayısıyla gizli ısı depolama malzemesi olarak çok uygundur.
4. Literatürde yaygın olarak kullanılan silindirik depoların termal verimini artırmak için hiç bir ek enerji kullanmadan enerji depolama süresini kısaltan bir pasif depolama sistemi geliştirilmiştir.

5. Her türlü enerji kaynağının ısısından verimli bir şekilde faydalanılabilecek, daha sonrada ihtiyaç olan zaman ve yoğunlukta enerji sağlayabilecek şekilde kurulan bu depolama sistemi araştırmacılar için minimum hatalı bir model deney düzeneğidir.
6. Öncelikle karşılaştırma amacıyla literatürde çok yaygın olarak çalışılan silindirik depo geometrisi için deneyler yapılmıştır. FDM'nin erime ve katılaşma davranışlarının literatüre uygun olduğu görülmüştür.
7. FDM'nin düşey depolamada erime davranışı, zamanla radyal olarak genişleyen ve dışarı doğru açılarak erimesini deponun üstünden altına doğru zamanla tamamlamayan bir geometriye sahiptir. Silindirik ısı depolayıcılarda deponun tabanına yaklaştıkça FDM'nin doğal dolaşımının etkisi azalmakta ve bu bölgede erime hızı düşmektedir. Silindirik depolayıcıların termal verimini düşüren ve toplam depolama süresini artıran depo tabanındaki verimsiz bölge, depo dış kabuğu eğimli tasarlanarak azaltılmaya çalışılmıştır. 5° , 10° , 15° ve 20° olmak üzere dört farklı kabuk açısında ısı depolayıcılar imal edilmiştir.
8. Dış kabuk eğim açısı parafinin erime süresini etkilemektedir. Aynı ısı transfer alanına sahip düşey 5° kabuk açılı depo, düşey silindirik depoya göre %40 daha kısa sürede katı-sıvı faz değişimini tamamlamaktadır. Bununla birlikte, ısı transfer alanı daha küçük olmasına rağmen düşey 10° kabuk açılı depo, düşey silindirik depolamaya göre % 6 daha kısa sürede katı-sıvı faz değişimini tamamlamaktadır.
9. Isı transfer akışkan giriş sıcaklığının artması beklenildiği gibi parafinin katı-sıvı faz değişim süresini kısaltmaktadır. Kullanılan FDM'nin erime sıcaklığına yakın akışkan giriş sıcaklığı seçmek enerji depolama süresini çok uzatmaktadır. Minimum akışkan giriş sıcaklığı $T_{g,min} = T_m + 15$ ($^{\circ}\text{C}$) bağıntısı ile belirlenmelidir. Böylece, hem depolanacak enerji kaynağından verimli yararlanılacak hem de depolama zamanının kısalması ile depodan çevreye enerji kayıpları azalacaktır.
10. Isı transfer akışkanı kütleli debisinin parafinin toplam erime süresine etkisinin az olduğu görülmüştür. Isı transfer akışkanı depolama ortamına pompa aracılığı ile sürülmektedir. Debinin artması pompalama gücünün, dolayısıyla da tüketilen enerjinin artması demektir. Enerjinin optimum verimli kullanımına yol veren ekonomik bir depolama sistemi için, ısı transfer akışkan debisinin düşük seçilmesi mantıklıdır.

11. Silindirik deponun şarj işleminde, depo yerleştirme açısı değişse de parafinin en son eridiği noktanın T_{13} olduğu belirlenmiştir. Silindirik depolamada en uygun depo yerleştirme konumu yatay'dır.
12. 5° kabuk açılı deponun şarj işleminde, depo yerleştirme açısı değiştiğinde parafinin en son eridiği nokta da değişmektedir. Buna göre, 5° kabuk açılı deponun yerleştirme açısına (90° , 60° , 30° ve 0°) bağlı olarak en son erime noktaları sırasıyla; T_{11} , T_{32} , T_{43} ve T_{64} 'dir. Bu değişimin sebebi, depo üst çapının alt çapından daha büyük olmasıdır.
13. FDM'nin katılma davranışı ve toplam katılma süresi üzerinde debinin etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle ekonomik bir depolama sistemi için, düşük ısı transfer akışkan debisi tercih edilmelidir.
14. Katılma sırasında, ısı transfer borusuna yakın noktalarda parafinin sıcaklığı soğutucu akışkan sıcaklığına hızla inerken, daha uzak noktalarda ısının geriye alınma süresi uzamaktadır. Deponun yerleştirme açısının katılma süresi üzerinde etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.
15. Sabit bir depo taban yarıçapı (r_o) değeri için, FDM'nin erime zamanı ile ısı transfer akışkan boru boyu arasında $t \sim \frac{1}{L}$ bağıntısı elde edilmiştir. Erime zamanı FDM deposunun yüksekliği ile ters orantılıdır. 0 ve 5° lik kabuk açıları için aynı depo yüksekliği ($L = 465$ mm) için bu iki açı erime zamanları karşılaştırıldığında, 0° lik deponun 5° lik depodan daha fazla erime zamanları gerektirdiği görülmüştür. 5° - 15° arasında kabuk açısına sahip depolar, 0° ve 20° 'lik kabuk açılı depolardan daha kısa toplam erime süresine ve dolayısıyla daha iyi bir performansa sahip olduğu anlaşılmıştır.
16. Uygulanan termodinamik analizden belirli bir FDM için optimum giriş sıcaklığı,
- $$T_{g.opt} = \frac{T_m^2}{T_0}$$
- şeklinde elde edilmiştir.
17. I. ve II. Kanun esas alınarak yapılan değerlendirmede sistem veriminin ortalama olarak % 2-3 düzeyinde olduğu görülmektedir. Sistem veriminin bu düzeyde düşük olması, FDM'nin anlık ısı alma kabiliyetinin düşük olmasından kaynaklanmaktadır.
18. Depo kabuk açısı, $\theta = 5^\circ$ durumunda, sistemin I. ve II. kanun verimi diğer depo kabuk açılarına göre daha yüksektir. Bu durum, ısı transfer borusuna yakın bölgede meydana gelen doğal taşınım şiddetinin daha büyük olmasından ileri gelmektedir.

Kabuk açısının 10° ve 15° olması durumunda verimin giderek düşmesi, sıvı faz içerisindeki doğal taşınım şiddetinin azalması ve sıcak akışkan komşuluğundaki ısı transfer yüzey alanının küçülmesinden kaynaklanmaktadır.

19. Silindirik deponun yatay konumunda boyutsuz entropi üretiminin maksimum olduğu ve depo yerleştirme açısının artmasıyla entropi üretiminin azaldığı belirlenmiştir. Fakat, bu azalışın oldukça düşük bir düzeyde olduğu görülmüştür.
20. 5° kabuk açılı deponun düşey konumunda akışkan giriş sıcaklığının artmasıyla boyutsuz entropi üretimi artmış ve belirli bir akışkan giriş sıcaklığından sonra yaklaşık olarak sabit kalmıştır.
21. Ortalama olarak boyutsuz entropi üretiminin 0.99 düzeyinde olması; ısı transferi işlemi, depolama süreci ve çevre üzerinde entropi üretiminin oldukça yüksek olmasından dolayıdır. Burada ifade edilen bağımlı değişkenler içerisinde en yüksek entropi üretimi çevreye atılan ısıdan kaynaklanmaktadır.
22. Reynolds sayısının artması toplam erime zamanı üzerinde ihmal edilebilir düşüşlere neden olmaktadır. Reynolds sayısı veya akışkan debisinin artması artan akış entalpisine karşılık gelmektedir. Bundan dolayı ekonomik bir termal enerji depolama sistemi için Reynolds sayısı ve akışkan debisi, küçük seçilmelidir.
23. Artan Stefan sayısı ile toplam erime zamanı önemli derecede azalmaktadır. Stefan sayısı ısı transfer akışkan giriş sıcaklığı ve FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıyla doğru orantılıdır. Isı transfer akışkan giriş sıcaklığının artması Stefan sayısının artmasına karşılık gelmektedir. Giriş sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, deponun iç cidarı ve ısı transfer akışkanının ortalama sıcaklıkları arasındaki farkın artmasıyla ısı geçişi de o kadar yüksek olacaktır.
24. Yapılan belirsizlik analizi ile deneysel sonuçların değerlendirilmesinde maksimum hata %14.2'dir. Bu hata değeri, deneysel çalışma için olası, kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer almaktadır.

5. ÖNERİLER

1. Pasif termal enerji depolama sistemlerinde depo geometrisi çok önemlidir. Depolama sisteminin tasarım ve işletilmesine ek maliyet getirmeden depolama sistemin performansı yeni depolama geometrileri ile artırılabilir. Bu bağlamda; tasarlanabilecek yeni geometri değişiklikleri şu şekilde sunulabilir:
 - a. Mevcut deponun taban çapı değiştirilerek FDM'nin erime ve katılma davranışı incelenebilir.
 - b. Deponun yüksekliği sabit tutulacak şekilde aynı kabuk açıları için yeni depo geometrilerinin etkileri incelenebilir.
 - c. Depo taban çapı ile akışkan borusu çapı arasındaki ilişki araştırılabilir.
 - d. Depo içerisine FDM'nin taşınım etkisini bozmayacak şekilde kanatçık ilaveleri yapılabilir.
 - e. Depo kabuk açısının değiştirilmesi yerine, ısı transfer akışkan borusunun daralan bir geometrisi çalışılabilir.
2. Gizli ısı depolama kapasitesi yüksek başka maddeler mevcut depo geometrisinde denenebilir.
3. Çalışılan ısı depolama geometrisi, güneş enerjisinden yararlanacak evsel sıcak su temini sistemlerine entegre edilerek daha uzun süreli ve daha büyük miktarlarda güneş enerjisinden fayda sağlanabilir.
4. Parafinlerin elektronik aletlerin soğutulması, bina duvarı uygulamaları, mikro kanal uygulamaları gibi alanlarda etkinliği araştırılabilir.
5. Depo içerisinde FDM'nin erime ve katılma davranışı sayısal olarak çalışılmalıdır. Bu sayısal çalışmalarda CFD yazılımlarından (Fluent gibi) yararlanılabilir.
6. Sistemin ekonomik analizi yapılarak, sistemin uygulanabilirliği sorgulanabilir.
7. Gizli ısı termal depolama sistemlerinin ulusal düzeyde yaygınlaştırılması için büyük çaplı model depolama sistemleri kurulmalı ve güneş enerjisi panelleri üreten firmalara gösterilmelidir.
8. Ulusal ve yerel basının aracılığı ile termal ısı depolamaya dikkat çekilmeli ve bu sistemlerin kullanımı teşvik edilmelidir.

9. Seçilecek FDM'nin erime sıcaklığı, depolanacak enerji kaynağının sıcaklığına uygun olmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Abhat, A., 1983. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials, Solar Energy, 30, 313–331.
- Adebiyi, G.A. ve Russell, L.D., 1987. A Second Law Analysis of Phase Change Thermal Energy Storage Systems, Proceeding of The ASME Winter Annual Meeting, 80, 9-20.
- Adebiyi, G.A., 1991. A Second–Law Study Packed Bed Energy Storage Systems Utilizing Phase–Change Materials, Journal of Solar Energy Engineering, 113, 146-156.
- Akgün, M., Kalsiyum Klorür Hekzahidratın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Silindirik Depolayıcıda Isı Kapasitesinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1994.
- Asan, H. ve Namlı, L., 1997. Deneysel Isı Transferi ve Basınç Kaybı Çalışmalarında Belirsizlik Analizi, 11.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, Bildiriler Kitabı, 369-378
- Banaszek, J., Domanaski, R., Rebow, M. ve El-Sagier, F., 1999. Experimental Study of Solid-Liquid Phase Change in a Spiral Thermal Energy Storage Unit, Applied Thermal Engineering, 20, 323-354.
- Banaszek, J., Domanaski, R., Rebow, M. ve El-Sagier, F., 2000. Numeric Analysis of the Paraffin Wax-Air Spiral Thermal Energy Storage Unit, Applied Thermal Engineering, 19: 1253–1277.
- Baran, G., ve Sarı, A., 2003. Phase Change and Heat Transfer Characteristics of a Eutectic Mixture of Palmitic and Stearic Acids as PCM in Latent Heat Storage System, Energy Conversion and Management, 44, 3227-3246.
- Bellecci, C. ve Conti, M., 1994. Phase Change Energy Storage: Entropy Production, Irreversibility, and Second Law Efficiency, Solar Energy, 53, 2, 163-170.
- Benard, C., Gobin, D. ve Zanolli, A., 1986. Moving Boundary Problem : Heat Conduction in the Solid Phase of a Phase-Change Material During Melting Driven by Natural Convection in the Liquid, Int. J. Heat Mass Transfer, 29, 11, 1669-1681.
- Bıyıklıoğlu, A., 2003. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu, G. Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 16(3), 523-542.
- Bjurstrom, H. ve Carlsson, B., 1985. An Exergy Analysis of Sensible and Latent Heat Storage, Heat Recovery Systems, 5, 233-250.

- Buddhi, D. Sharma, A., Balpande R. ve Balpande, A., 2003. Experimental Thermal Performance Evaluation of a Heat Exchanger Having PCM For He Storage of Waste Heat., IEA, ECESIA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials And Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects, 4th Workshop, Indore, India.
- Cabeza, L.F., Badia, F., Illa, J., Roca, J., Mehling, H. ve Ziegler, F., 2001. Corrosion Experiments on Salt Hydrates Used as Phase Change Materials in Cold Storage, IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Engineering Storage Techniques-Feasibility Studies and Through Demonstration Projects Planning Workshop, Lleida, Spain.
- Cao, Y. ve Faghri, A., 1992, A study of thermal energy storage systems with conjugate turbulent forced convection, Journal of Heat Transfer, 114, 1019-1027.
- Cao, Y., Faghri, A. ve Juhasz, A., 1991. A PCM/Forced Convection Conjugate Transient Analysis of Energy Storage Systems with Annular and Countercurrent Flows, Journal of Heat Transfer, 113, 37-42.
- Carlsson, B. ve Wettermark, G., 1979. Heat Transfer Properties of a Heat-of-Fusion Storage Based on $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Solar Energy, 24, 239-247.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., Mühendislik Yaklaşımı ile Termodinamik, Literatür Yayıncılık Ltd. Şti, İstanbul, 1996.
- Charach, Ch. ve Zemel, A., 1992. Thermodynamic Analysis of Latent Heat Storage in a Shell-and-Tube Heat Exchanger, Journal of Solar Energy Engineering, 114, 93-99.
- Chen, S., Chen, C., Tin, C., Lee, T. ve Ke, M., 2000. An Experimental Investigation of Cold Storage in an Encapsulated Thermal Storage Tank, Experimental Thermal and Fluid Science, 23, Pp: 133-144.
- Cho, K. ve Choi, S.H., 2000. Thermal Characteristics of Paraffin in a Spherical Capsule During Freezing and Melting Process, International Journal of Heat and Mass Transfer, 43, 3183-3196.
- Choi, H.S., Shin, B.C. ve Kim, D.S., 1989. Heat Transfer in a Latent Heat-Storage System, Solar Energy, 14, 513-524.
- Choi, J.C. ve Kim, S.D., 1992. Heat Transfer Characteristics of a Latent Heat Storage System Using $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Energy, 17, 1153-1164.
- Christenson, M.S. ve Incropera, F.P., 1989. Experiment on Solidification of an Aqueous Sodium Carbonate Solution in a Horizontal Cylindrical Annulus, Journal of Heat Transfer, 111, 998-1005.
- Conti, M., Bellecci, C. ve Charach, C., 1996. Thermodynamic Design of a Phase Change Thermal Storage Module, Journal of Solar Energy Engineering, 118, 89-96.

- De Lucia, M., ve Bejan, A., 1990, Thermodynamics of Energy Storage by Melting Due to Conduction or Natural Convection, Journal of Solar Energy Engineering, 112, 110-116.
- De Lucia, M. ve Bejan, A., 1991. Thermodynamics of Phase-Change Energy Storage: The Effects of Liquid Superheating During Melting, and Irreversibility During Solidification, Journal of Solar Energy Engineering, 113, 2-10.
- Demirsoy, M., Motorlu Araçlar Cilt I, Kurtiş Matbası, İstanbul, 1989.
- Dietz, D., 1984. Thermal Performance of a Heat Storage Module Using Calcium Chloride Hexahydrate, Journal of Solar Energy Engineering, 106, 106-111.
- Dimaano, M.N.R. ve Watanabe, T., 2002. The Capric-Lauric Acid and Pentadecane Combination as Phase Change Material for Cooling Application, Applied Thermal Engineering, 22, 365-377.
- Dimaano, M.N.R. ve Watanabe, T., 2003. The Transient Behavior Analysis of The Capric Acid and Lauric Acid Mixture in a Vertical Tube, Journal of Chemical Engineering of Japon, 36, 12, 1421-1431.
- Dinçer, İ. ve Rosen, M.A., Thermal Energy Storage Systems and Applications, John Wiley and Sons Ltd., England, 2002.
- Domanski, R. ve Fella, G., 1996. Energy Analysis For The Evaluation of a Thermal Storage System Employing PCM with Different Melting Temperatures, Applied Thermal Engineering, 16, 11, 907-919.
- Erek, A., İlken, Z. ve Acar, M.A., 2005. Experimental and Numerical Investigation of Thermal Energy Storage with a Finned Tube, Int.J.Energy Research, 29, 283-301.
- Esen, M. ve Ayhan, T., 1996. Development of a Model Compatible with Solar Assisted Cylindrical Energy Storage Tank and Variation of Stored Energy with Time for Different Phase Change Materials, Energy Convers. Mgmt., 37, 12, 1775-1785.
- Esen, M., Durmuş, A. ve Durmuş, A., 1998. Geometric Design of Solar- Aided Latent Heat Storage Depending on Various Parameters and Phase Change Materials, Solar Energy, 62, 1, 19-28.
- Ettouney, H.M., Alatiqi, I., Al-Sahali, M. ve Al-Ali, S.A., 2004. Heat Transfer Enhancement by Metal Screens and Metal Spheres in Phase Change Energy Storage Systems, Renewable Energy, 29, 841-860.
- Farid, M.M. ve Hussain, R.M., 1990. An electrical storage heater using the phase-change method of heat storage, Energy Conversion and Management, 30, 3, 219-230.
- Farid, M.M. ve Khalaf, A.N., 1994. Performance of Direct Contact Latent Heat Storage Units with Two Hydrated Salts, Solar Energy, 52, 2, 179-189.

- Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack S.A.K. ve Al-Hallaj S., 2004. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, Energy Conversion and Management, 45,1597-1615.
- Fouda, A.E., Despault, G.J.G., Taylor , J.B. ve Copes, C.E., 1984. Solar Storage Systems Using Salt Hydrate Latent Heat and Direct Contact Heat Exchange-III Operating Characteristics of a Sodium Sulphate-Sodium Phosphate Mixture, Solar Energy, 33, 6, 633-635.
- Garg, H.P., Mullick, S.C. ve Bhargava, A.K., 1985. Solar Thermal Energy Storage, D.Reidel Publishing Company, New Delhi, India.
- Gong, Z., Time-Dependent Melting and Freezing Heat Transfer in Multiple Phase Change Materials, Doktora tezi, Department of Chemical Engineering McGill University, Montreal, Quebec, Canada. 1996.
- Gong, Z. X. ve Mujumdar, A. S., 1996. Enhancement of Energy Charge-Discharge Rates in Composite Slabs of Different Phase Change Materials, Int. J. Heat Mass Transfer, 39, 4, 725-733.
- Gong, Z.X. ve Mujumdar, A.S. 1997 (a). Finite-Element Analysis of Cyclic heat Transfer in a Shell and Tube Latent Heat Energy Storage Exchanger, Applied Thermal Engineering, 17, 6, 583-591.
- Gong, Z. X. ve Mujumdar, A.S., 1997 (b). Thermodynamic Optimization of The Thermal Process in Energy Storage Using Multiple Phase Change Materials, Applied Thermal Engineering, 17, 11, 1067-1083.
- Güllüce, H., Güneş Enerjisinden Faydalanarak Hacim Isıtma ve Güneş Enerjisinin Depolanması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2003.
- Hadjieva, M., Kanev, S. ve Argirov, J., 1992. Thermophysical Properties of Some Paraffins Applicable to Thermal Energy Storage, Solar Energy Materials and Solar Cells, 27, 181-187.
- Hale, D.V., Hoover, M.J. ve O'Neill, M.J., 1971. Phase Change Materials Hand Book, NASA, Marshal Space Flight Center, Alabama.
- Hamdan, M.A. ve Al-Hinti, I, 2004. Analysis of Heat Transfer During The Melting of a Phase-Change Material, Applied Thermal Engineering, 24, 1935-1944.
- Hariri, A.S. ve Ward I.C., 1988. A Review of Thermal Storage Systems Used in Building Applications, Building and Environment, 23, 1-10.
- Hasan, A., 1994. Thermal Energy Storage System with Streearic Acid as Phase Change Material, Energy Convers. Mgmt, 30, 10, 843-856.

- Hasnain, M.S., 1998 (a). Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials on Techniques, Energy Convers. Mgmt., 39, 11, 1127-1138.
- Hasnain, M.S., 1998 (b). Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part II : Cool Thermal Storage, Energy Convers. Mgmt., 39, 11, 1139-1153.
- Hayashi, Y., Takimoto, A. ve Kawahara, S., 1987. Study of Combined Latent and Sensible Heat and Thermal Storage (1 st Report Charging and Discharging Characteristics), Scripa Techica, 77-91.
- He, Q. ve Zhang, W., 2001. A Study on Latent Heat Storage Exchangers with The High Temperature Phase Change Material, International Journal of Energy Research, 25, 331-341.
- Hendra, R., Hamdani, Mahlia, T.M.I. ve Masjuki, H.H., 2005. Thermal and Melting Heat Transfer Characteristics in a Latent Heat Storage System Using Micro, Applied Thermal Engineering, 25, 1503-1515.
- Henze, R. H. ve Humphrey, J. A. C., 1981. Enhanced heat conduction in phase –change thermal energy storage devices, Int. J. Heat Mass Transfer, 24, 459-474.
- Hiran, S., Suwondo, A. ve Mansoori, G., 1994. Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes fo Application as Phase Change Energy Storage Medium, Energy Sources 16, 117-128.
- Ho, C. J. ve Viskanta, R., 1984 (a). Heat Transfer During Inward Melting in a Horizontal Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 27, 5, 705-716.
- Ho, C. J. ve Viskanta, R., 1984 (b). Inward Solid-Liquid Phase-Change Heat Transfer in a Rectangular Cavity with Conducting Vertical Walls, Int. J. Heat Mass Transfer, 27, 7, 1055-1065.
- Holman, J.P., Experimantal Methods for Engineers, Fifth Edition, Mc Graw Hill Book Co., New York, 1989.
- İlken, Z. ve Toksoy, M., 1993. The Role of Extended Surface in a Latent Heat Energy Storage System, Doğa-Tr. J. Of Engineering and Environmental Sciences, 17, 7-13.
- Inaba, H. ve Morita, S., 1995. Flow and Cold Heat Storage Characteristics of Phase-Change Emulsion in a Coiled Double Tube Heat Exchanger, Journal of Heat Transfer, 117, 440-446.
- Ismail, K.A.R. ve Melo, C.A., 1998. Convection-Based Model for a PCM vertical storage Unit, Int. J. Energy Research, 22, 1249-1265.
- Ismail, K.A.R. ve Henriquez, J. R., 2000. Solidification of PCM Inside a Spherical Capsule, Energy Conversion and Management, 41, 173-187.

- Ismail, K.A.R., ve Abugderah, M.M., 2000. Performance of a Thermal Storage System of The Vertical Tube Type, Energy Convers. Mgmt., 41, 1165-1190.
- Ismail, K.A.R. ve Jesus, A.B., 2001., Parametric Study of Solidification of PCM Around a Cylinder for Ice-Bank Applications, I. Journal of Refrigeration, 24, 809-822.
- Ismail, K.A.R., Alves C.L.F. ve Modesto, M.S., 2001. Numerical and Experimental Study on the Solidification of PCM Around a Vertical Axially Finned Isothermal Cylinder, Applied Thermal Engineering, 21, 53-57.
- Jurinak, J.J., ve Abdel-Khalik, S.I., 1978. Properties Optimization for Phase Change Energy Storage in Air –Based Solar Heating Systems, Solar Energy, 21, 377-383.
- Katayama, K., Saito, K., Utaka, Y., Saito, A., Matsui, H., Maekawa, H. ve Saifullah, Z.A., 1981. Heat Transfer Characteristics of The Latent Heat Thermal Energy Storage Capsule, Solar Energy, 27, 2, 91-97.
- Kauranen, P., Peippo, K. ve Lund, P.D., 1991. An Organic PCM Storage System with Adjustable Melting Temperature, Solar Energy, 46, 275–278.
- Kawamura, M., Ono, S. ve Higano, S., 1982. Experimental Studies on The Behaviours of Hydride Heat Storage System, Energy Convers. Mgmt., 22, 95-102.
- Kaygusuz, K., Karadeniz Bölgesindeki Konutların Güneş Destekli Isı Pompaları Yardımıyla Isıtılabilirliğinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1992.
- Khillarkar, D.B., Gong, Z.X. ve Mujumdar, A.S., 2000. Melting of a Phase Change Material in Concentric Horizontal Annuli of Arbitrary Cross-Section, Applied Thermal Engineering, 20, 893-912.
- Kılıkış B. ve Kakaç, S., Energy Storage Systems, NATO ASI Series Kluwer Academic Publishers, London, England, 1989.
- Kıncay O. ve Örenel, M.B., 2002. Isıl Enerji Depolama Yöntemleri ve Malzemeleri, Termodinamik, 92-98.
- Lacroix, M., 1993. Numerical Simulation of Melting and Resolidification of a Phase Change Material Around Two Cylindrical Heat Exchangers, Numerical Heat Transfer, 24, 143-160.
- Lacroix, M., 1993. Study of The Heat Transfer Behaviour of a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with a Finned Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, 36, 8, 2083-2092.
- Lacroix, M. ve Duong, T., 1998. Experimental Improvements of Heat Transfer in a Latent Heat Thermal Energy Storage Unit with Embedded Heat Sources, Energy Convers. And Mgmt., 39, 8, 703-716.

- Lane, G.A., *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, Vol. I. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1983.
- Lane, G.A., Phase Change Thermal Storage Materials. In: *Hand Book of Thermal Design*. In: Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co, 1989.
- Lee, R.T. ve Chiou, W.Y., 1995. Finite-Element Analysis of Phase Change Problems Using Multi Level Techniques, Numerical Heat Transfer, 27, 277-290.
- Li, W., Zhang, D., Zhang, T., Wang, T., Ruan, D., Xing, D. ve Li, H., 1999. Study of Solid-Solid Phase Change of $(n-C_nH_{2n+1}NH_3)_2MCl_4$ for Thermal Energy Storage, Thermochemica Acta, 326, 183-186.
- Lim, J.S., Bejan, A. ve Kim, H.J., 1992. Thermodynamic Optimization of Phase-Change Energy Storage Using Two or More Materials, Journal of Energy Resources Technology, 114, 84-90.
- Liu, R.H., Bonanno, J., Yang, J., Lenink, R., Grodzinski, P., Single-use, 2004., Thermally Actuated Paraffin Valves for Microfluidic Applications, Sensors and Actuators, 98, 328-336.
- Liu, Z., Sun, X. ve Ma, C., 2005 (a). Experimental Investigation on The Characteristics of Melting Processes of Stearic Acid in an Annulus and Its Thermal Conductivity Enhancement by Fins, Energy Conversion and Manegement, 46, 959-969.
- Liu, Z., Sun, X. ve Ma, C., 2005 (b). Experimental Study of The Characteristics of Solidification of Stearic Acid in an Annulus and Its Thermal Conductivity Enhancement, Energy Conversion and Manegement, 46, 971-984.
- Lou, D.Y.S., 1982. Solidification Process in a Glauber's Salt Mixture, Solar Energy, 30, 2, 115-121.
- Marin, J.M., Zalba, B., Serrano, R. ve Sanchez-Valverde, B., 2001. Desing of Experiments (DOE) for Thermal Energy Storage (TES) with Phase Change Materials (PCM), IEA, ACESIA Annex 17, Advenced Thermal Energy Storage Techniques-Feasibility Studies and Demonstration Projects Planning Workshop, 5-6 April 2001, Lleida, Spain.
- Moore, F. E. ve Bayazitoglu, Y., 1982. Melting Within a Spherical Enclosure, Journal of Heat Transfer, 104, 19-23.
- Nagano, K., Ogawa, K., Mochida, T., Hayashi, K. ve Ogoshi, H., 2004. Thermal Charecteristic of Magnesium Chloride Hexahydrate Mixture as a Phase Change Material for Effective Utilization of Urban Waste Heat, Applied Thermal Engineering, 24, 221-232.
- Ng, K.W., Gong, Z.X. ve Muzumdar, A.S., 1998. Heat Transfer in Free Convection-Dominated Melting of a Phase Change Material in a Horizontal Annulus, Int. Comm. Heat. Mas Transfer, 25, 5, 631-640.

- Ouyang, T. ve Tamma, K.K., 1994. Finite-Element Developments for Two-Dimensional, Multiple-Interface Phase-Change Problems, Numerical Heat Transfer, 29, 257-271.
- Pal, D., Application of Phase Change Materials to Passive Thermal Control of Electronic Components, Doktora Tezi, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland at Collage Park, 1996.
- Pal, D. ve Joshi, Y.K., 2001. Melting in a Side Heated Tall Enclosure by a Uniformly Dissipating Heat Source, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 375-388.
- Ramayya, A.V. ve Ramesh, K.N., 1998. Exergy Analysis of Latent Heat Storage Systems with Sensible Heating and Subcooling of PCM, I.J. Energy Research, 22, 411-426.
- Rosen, M.A., Hooper, F.C. ve Barbaris, L.N., 1988. Exergy Analysis Fort He Evaluation of The Performance of Closed Thermal Energy Storage Systems, J.of Solar Energy Engineering, 110, 255-261.
- Rozanna, D., Chuah, T.G., Salmiah, A., Choong, T.S.Y. ve Saari, M., 2004. Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review, Int. J. Green Energy, 1, 4, 495-513.
- Saito, A., Okawa, S., Shintani, T. ve Iwamoto, R., 2001. On The Heat Removal Characteristics and The Analytical Model of a Thermal Energy Storage Capsule Using Gelled Glauber's Salt as The PCM, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 4693-4701.
- Sari, A. ve Kaygusuz, K., 2002 (a). Thermal Performance of Eutectic Mixture of Lauric and Stearic Acids as a PCM Encapsulated in The Annulus of Two Concentric Pipes, Solar Energy, 72, 6, 493-504.
- Sari, A. ve Kaygusuz, K., 2002 (b). Thermal Performance of Palmitic Acid as a Phase Change Energy Storage Material, Energy Conversion and Management, 43, 863-876.
- Sari, A., 2003. Thermal Charecterisics of a Eutectic Mixture of Myristic and Palmitic Acids as Phase Change Material for Heating Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 1005-1017.
- Sari, A., 2004. Form-Stable Paraffin/High Density Polyethylene Composites as Solid-Liquid Phase Change Material for Thermal Energy Storage: Preparation and Thermal Properties, Energy Convers. Mgmt., 45, 2033-2042.
- Schmid, W.F. ve Willmott, A.J., Thermal Energy Storage and Regeneration, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1981.

- Sharma, S.D., Buddhi, D. ve Sawhney, R.L., 1998. Accelerated Thermal Cycle Tests of Industrial Grade Phase Change Materials. Proc. National Solar Energy Convention-97: Towards Commercialization of Clean Energy. Chennai. India. Anna University, 73-77.
- Sharma, S.D., Buddhi, D. ve Sawhney, R.L., 1999. Accelerated Thermal Cycle Test of Latent Heat Storage Materials, Solar Energy, 66, 483-490.
- Sharma, A. ve Buddhi, D., 2005. Effect of Thermophysical Properties of The PCM and Heat Exchanger Material on the Performance of a Latent Heat Storage System, Journal of Sustainable Energy, 24, 2, 99-105.
- Sharma, S.D. ve Sagara, K., 2005. Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review, International Journal of Breen Energy, 2, 1-56.
- Siahpush, A.S. Performance Enhancement of solid/Liquid Phase-Chance Thermal Energy Systems Through the Use of a High Conductivity Porous Metal Matrix, Doktora Tezi, Universty of Idaho, 2002.
- Silva, P.D., Gonçalves, L.C. ve Pires, L., 2002. Transient Behaviour of a Latent-Heat Thermal-Energy Store: Numerical and Experimental Studies, Applied Energy, 73, 83-98.
- Son, C.H. ve Morehouse, J.H., 1991. An Experimental Investigation of Solid-State Phase-Change Materials for Solar Thermal Storage, Journal of Solar Energy Engineering, 113, 244-249.
- Telkes, M., 1974. Solar Energy Storage, Ashrae Journal, September, 38-44.
- Thangmanosodsikul, W. Development of Assesment Tool for the Preliminary Evaluation of Thermal energy Storage Strategies, Yüksek Lisans Tezi, King Mongkut's Institute of Techonology, Tronbori, Bangkok, Thailand, 1995.
- Trp, A., 2005. An Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer During Technical Grade Paraffin Melting and Solidification in a Shell-and-Tube Latent Thermal Energy Storage Unit, Solar Energy, (in press).
- Vakialtojjar, S.M. ve Saman, V., 2001. Analysis and Modelling of a Phase Change Storage System for Air Coditioning Applications, Applied Thermal Engineering, 21, 249-263.
- Vargas, J.V.C., Bejan, A. ve Dobrovicescu, A., 1994. The Melting of an Ice-Shell on a Heated Horizontal Cylinder, Journal of Heat Transfer, 116, 702-708.
- Velraj, R., Seeniraj, R.V., Hafner, B., Faber, C. ve Schwarzer, K., 1997. Experimental Analysis and Numerical Modeling of Inward Solidification on Finned Vertical Tube for a Latent Heat Storage Unit, Solar Energy, 60, 65, 281-290.

- Velraj, R., Seeniraj, B., Hafner, B., Faber, C. ve Schwarzer, K., 1999. Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage System, Solar Energy, 65, 171–180.
- Wang, K.Y., West, R.E., Kreith, F. ve Lynn, P., 1985. High-Temperature Sensible-Heat Storage Options, Energy, 10, 10, 1165-1175.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W., Liu, T., Shi, Z., Tang, R. ve Wang, C., 2000 (a). Heat Storage Performance of The Binary Systems Neopentyl Glycol/Pentaerythritol and Neopentyl Glycol/Trihydroxy Menthylaminomethane as Solid Phase Change Materials, Energy Conservation and Management, 41, 129-134.
- Wang, X., Lu, E., Lin, W. ve Wang, C., 2000 (b). Micromechanics of Heat Storage in a Binary system of Two Kinds of Polyalcohols as a Solid-Solid Phase Change Material, Energy Conversion and Management, 41, 135-144.
- Wang, J., Ouyang, Y. ve Chen, G., 2001. Experimental Study on Charging Processes of a Cylindrical Heat Storage Capsule Employing Multiple-Phase-Change Materials, I. J. Energy Research, 25, p439-447.
- Yimer, B. ve Senthil, K., 1998. Experimental and Analytical Phase Change Heat Transfer, Energy Convers. Mgmt., 39, 9, 889-897.
- Zalba, B., Marín, J.M., Cabeza, L.F. ve Mehling, H., 2003. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 251-283.
- Zhang, J.J., Zhang, J.L., He, S.M., Wu, K.Z. ve Liu, X.D., 2001. Thermal Studies on the Solid–Liquid Phase Transition in Binary Systems of Fatty Acids, Thermochemica Acta, 369, 157-60.
- Zheng, N. Methodology and Figures of Merit for Designing a Hybrid Thermal Energy Storage Unit, Doktora Tezi, University of Nevada, Reno, 2001.
- Zhu, Y., Zhang, Y., Li, G. ve Yang, F., 2001. Heat Transfer Process During an Unfixed Solid Phase Change Material Melting Outside a Horizontal Tube, Int. J. Therm. Sci., 40, 550-563.

ÖZGEÇMİŞ

Mithat AKGÜN, 1969 yılında Ordu'nun Perşembe ilçesinde doğdu. İlk ve ortaokulu Perşembe'de, lise öğrenimini ise Ordu Lisesi'nde tamamladı. 1986 yılında girdiği Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1990 yılında Makina Mühendisi olarak mezun oldu. 1990 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalında Yüksek Lisans programına başladı. Bu programdan hazırlamış olduğu "Kalsiyum Klorür Hekzahidratın ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) Silindirik Depolayıcılardaki Gizli Isı Depolama Kapasitelerinin İncelenmesi" başlıklı Yüksek Lisans tezini tamamlayarak 1994 yılında "Makina Yüksek Mühendisi" unvanı ile mezun oldu. 1996 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalında Doktora programına başladı. 1991 yılında Trabzon Endüstri Meslek Lisesine öğretmen olarak, 1995 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Ordu Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölümü Makine Resim ve Konstrüksiyon Programına Öğretim Görevlisi olarak atandı. 1999 yılında Teknik Programlar Bölüm Başkanlığına, 2001 yılında Ordu Meslek Yüksekokulu müdür yardımcılığına atandı. Bu görevinden 2004 yılında ayrıldı. Halen Yüksekokuldaki görevine devam etmekte olup, evli ve iki çocuk basıdır.