

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KİMYA ANABİLİM DALI

ÇAY ÇALISI VE ORMAN GÜLÜNÜN HIZLI PİROLİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kimyager Bekir KARA

**HAZİRAN 2012
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KİMYA ANABİLİM DALI

ÇAY ÇALISI VE ORMAN GÜLÜNÜN HIZLI PİROLİZİ

Kimyager Bekir KARA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (KİMYA)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25.05.2012
Tezin Savunma Tarihi :14.06.2012**

Tez Danışmanı : Prof Dr. Kamil KAYGUSUZ

Trabzon 2012

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalında
Bekir Kara tarafından hazırlanan

ÇAY ÇALISI VE ORMAN GÜLÜNÜN HIZLI PİROLİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 / 05 / 2012 gün ve 1458 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda

YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mustafa USTA

Üye : Prof Dr. Kamil KAYGUSUZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sedat KELEŞ

Prof Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışma, bölgemizde yetişen bitkilerden orman gülü ve zirai atık olarak doğrudan yakılan çay çalısını biyokütle enerji kaynağı olarak daha verimli bir şekilde değerlendirmek için uygulanan piroliz yöntemini esas alarak hazırlanmıştır. Piroliz sonucu biyokütle kaynaklarından elde edilen sıvı biyoyakıt ve çeşitli kimyasal hammadde kaynağı olarak kullanılabilir.

Danışmanlığımı üstlenen ve rehberliğinin yanında bana çalışmalarımın teorik ve deneysel aşamasında desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ'a

Çalışmalarım sırasında sürekli yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Yrd Doç. Dr. Sedat KELEŞ'e

Benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme ve çok sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bekir KARA
Trabzon 2012

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çay Çalısı ve Orman Gülünün Hızlı Pirolizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr Kamil Kaygusuz’un sorumluluğunda tamamladığımı, örnekleri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24 / 05 / 2012

Bekir KARA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNEMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XVIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Birincil Enerji Kaynakları.....	2
1.2.1. Dünyada ve Türkiye’de Birincil Enerji Kaynakları Durumu.....	3
1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları.....	5
1.3.1. Rüzgâr Enerjisi.....	5
1.3.2. Güneş Enerjisi.....	6
1.3.3. Jeotermal Enerji.....	7
1.3.4. Gel-git Enerjisi.....	7
1.3.5. Hidroelektrik Enerjisi.....	8
1.3.6. Dalga Enerjisi.....	8
1.3.7. Biyokütle Enerjisi.....	9
1.4. Dünyada ve Türkiye’de Biyokütle Kullanımı.....	10
1.5. Biyokütlenin Kimyasal Yapısı	10
1.6. Biyokütleyle Uygulanan Isıl Dönüşüm Yöntemleri.....	13
1.6.1. Direkt Yakma.....	14
1.6.2. Gazlaştırma.....	14
1.6.3. Piroliz.....	15
1.6.3.1. Piroliz Yöntemleri.....	17
1.6.3.1.1. Geleneksel Piroliz.....	17
1.6.3.1.2. Hızlı Piroliz	17
1.6.3.1.3. Flash Piroliz.....	18

1.6.3.2.	Piroliz Reaktörleri.....	19
1.6.3.3.	Piroliz Ürünleri.....	21
1.6.3.3.1.	Katı Ürünler.....	21
1.6.3.3.2.	Sıvı Ürünler.....	22
1.6.3.3.3.	Gaz Ürünler.....	23
1.6.3.4.	Piroliz Ürün Verimini Etkileyen Faktörler.....	24
1.6.3.4.1.	Sıcaklık.....	24
1.6.3.4.2.	Isıtma Hızı.....	24
1.6.3.4.3.	Alıkonma Zamanı.....	25
1.6.3.4.4.	Sürükleyici Gaz Akış Hızı.....	25
1.6.3.4.5.	Basınç.....	25
1.6.3.4.6.	Katalizör.....	26
1.6.3.4.7.	Piroliz Ortamı.....	26
1.6.3.4.8.	Parçacık Boyutu.....	27
1.7.	Literatür Özetleri.....	27
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	34
2.1.	Kullanılan Hammadde ve Hazırlanması	35
2.2.	Hammaddeye Uygulanan Kısa Analiz Tayinleri.....	35
2.2.1.	Nem Miktarı Tayini.....	35
2.2.2.	Kül Miktarı Tayini.....	35
2.2.3.	Uçucu Madde Miktarı Tayini.....	36
2.2.4.	Sabit Karbon Tayini.....	36
2.3.	Hammaddeye Uygulanan Bileşim Analizleri.....	36
2.3.1.	Organik Ekstraksif Tayini (Alkol-benzen Çözünürlüğü).....	36
2.3.2.	Holoselüloz Miktarı Tayini.....	37
2.3.3.	Selüloz Miktarı Tayini.....	37
2.3.4.	Hemiselüloz Miktarı Tayini.....	38
2.3.5.	Lignin Tayini.....	38
2.4.	Hammaddenin Elementel Analizi.....	38
2.5.	Hammaddenin Isıl Değerinin Belirlenmesi.....	39
2.6.	Hammaddenin Pirolizi.....	39
3.	BULGULAR.....	44

3.1.	Kullanılan Hammaddenin Özellikleri.....	44
3.2.	Çay Çalısı Piroliz Sonuçları.....	45
3.2.1.	Sabit Parçacık Boyutu ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında Piroliz Sıcaklığı-Ürün Verim Tabloları.....	46
3.2.2.	Sabit Piroliz Sıcaklığı ve Sabit Parçacık Boyutunda Sürükleyici Gaz Akış Hızı-Ürün Verimi Tabloları.....	48
3.2.3.	Sabit Piroliz Sıcaklığında ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Parçacık Boyutu – Ürün Verimi Tabloları.....	50
3.2.4.	Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi.....	54
3.2.5.	Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimi Üzerine Sürükleyici Gaz Akış Hızının Etkisi.....	58
3.2.6.	Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Parçacık Boyutunun Etkisi.....	64
3.3.	Orman Gülü Hızlı Piroliz Sonuçları.....	70
3.3.1.	Sabit Parçacık Boyutu ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında Piroliz Sıcaklığı-Ürün Verim Tabloları.....	70
3.3.2.	Sabit Piroliz Sıcaklığı ve Sabit Parçacık Boyutunda Sürükleyici Gaz Akış Hızı-Ürün Verimi Tabloları.....	72
3.3.3.	Sabit Piroliz Sıcaklığında ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Parçacık Boyutu – Ürün Verimi Tabloları.....	74
3.3.4.	Orman Gülü Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi...	77
3.3.5.	Orman Gülü Piroliz Ürün Verimi Üzerine Sürükleyici Gaz Akış Hızının Etkisi.....	81
3.3.6.	Orman Gülü Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Parçacık Boyutunun Etkisi.....	88
4.	TARTIŞMA.....	94
5.	SONUÇLAR	100
6.	ÖNERİLER.....	102
7.	KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇAY ÇALISI VE ORMAN GÜLÜNÜN HIZLI PİROLİZİ

Bekir KARA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ
2012, 109 Sayfa

Biyokütleyle uygulanan en etkili ısıl dönüşüm yöntemlerinden biri olan hızlı piroliz işlemi sonucunda elde edilen sıvı ürünler enerji kaynağı ya da kimyasal hammadde olarak kullanılabilir. Piroliz işleminin asıl amacı olan sıvı ürün verimini etkileyen parametreler vardır. Bunlar, sıcaklık, ısıtma hızı, alıkonma zamanı, sürükleyici gaz akış hızı, basınç, katalizör, piroliz ortamı ve biyokütlenin parçacık boyutudur. Bu çalışmada, değişik deneysel şartlar altında sabit yataklı bir reaktör içerisinde çay çalısı ve orman gülünün hızlı pirolizi incelenmiştir. Piroliz deneyleri için tarımsal artık olan çay çalısı ve bölgemize has bir bitki türü olan orman gülü biyokütle örnekleri olarak seçilmiştir. Sabit yataklı bir reaktör içerisinde çay çalısı ve orman gülüne uygulanan hızlı piroliz deneyleri sonucunda ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutunun etkileri araştırılmıştır. Deneyler 200 °C/dak ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 °C piroliz sıcaklıklarında gerçekleştirildi. Deneyler sonucunda piroliz ürün veriminin büyük ölçüde piroliz sıcaklığına bağlı olduğu gözlemlendi ve çay çalısı için piroliz sıvısının maksimum verimle elde edildiği en uygun piroliz sıcaklığı 550 °C, orman gülü için ise 600 °C olarak belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Hızlı Piroliz, Biyokütle, Çay Çalısı, Orman Gülü, Biyo-yağ,

Master Thesis

SUMMARY

FAST PYROLYSIS OF TEA TREE AND RHODODENDRON PONTICUM

Bekir KARA

Karadeniz Technical University
Graduate School of Natural and Applied Science
Chemistry Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Kamil KAYGUSUZ
2012, 109 Pages

The liquids can be used both as an energy source and a chemical feedstock as a result of fast pyrolysis which is one of the most effective methods of thermal conversion of a biomass. There are some parameters that effect the yield of the liquid product (bio-oil) which is the main purpose of a pyrolysis process. These parameters are, temperature, heating rate, residence-time, sweep gas flow rate, pressure, catalyst, pyrolysis atmosphere and the particle size of the biomass. In this study, the fast pyrolysis of tea tree which is an agricultural waste and rhododendron ponticum which is commonly found plant in our region were carried out in a fix-bed reactor under different experimental conditions. After the results of the experiments, the effects of pyrolysis temperature, sweep gas flow rate and particle size on pyrolysis product yields were studied. The experiments were carried out at a heating rate of 200 °C/min and at 450, 500, 550, 600 ve 650 °C pyrolysis temperatures. The result of the experiments showed that the pyrolysis product yield is mainly depend on pyrolysis temperature and the optimum pyrolysis temperature was 550 °C to get the maximum efficiency of pyrolitic liquid of the tea tree and the optimum pyrolysis temperature was 600 °C to get the maximum efficiency of pyrolitic liquid of the rhododendron ponticum.

Key Words: Fast Pyrolysis, Biomass, Tea Tree, Rhododendron Ponticum, Bio-oil

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Biyokütlenin temel bileşenleri.....	11
Şekil 2. Biyokütleye uygulanan ısıl dönüşüm prosesleri.....	13
Şekil 3. Biyokütle gazlaştırma sistemleri için uygulamalar.....	15
Şekil 4. Iowa State University’de yapılan akışkan yatak piroliz reaktörü.....	19
Şekil 5. Piroliz sonucu elde edilen birincil ve ikincil ürünler.....	20
Şekil 6. Hızlı piroliz deney düzeneği şeması.....	41
Şekil 7. Hızlı piroliz deney düzeneğini resmi	42
Şekil 8. Hızlı piroliz deney düzeneği reaktör resmi	43
Şekil 9. Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	54
Şekil 10. Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	55
Şekil 11. Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	55
Şekil 12. Çay çalısının pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	56
Şekil 13. Çay çalısının pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	56
Şekil 14. Çay çalısının pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	57
Şekil 15. Çay çalısı için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 450 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	58
Şekil 16. Çay çalısı için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	59
Şekil 17. Çay çalısı için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	59
Şekil 18. Çay çalısı için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 600 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	60
Şekil 19. Çay çalısı için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 650 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	60
Şekil 20. Çay çalısı için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 450 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	61

Şekil 21. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	61
Şekil 22. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	62
Şekil 23. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 600 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	62
Şekil 24. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 650 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	63
Şekil 25. 450 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	65
Şekil 26. 450 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	65
Şekil 27. 450 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	65
Şekil 28. 500 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	66
Şekil 29. 500 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	66
Şekil 30. 500 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	66
Şekil 31. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	67
Şekil 32. 550 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	67
Şekil 33. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	67
Şekil 34. 600 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	68
Şekil 35. 600 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	68
Şekil 36. 600 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	68
Şekil 37. 650 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	69
Şekil 38. 650 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	69
Şekil 39. 650 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	69

Şekil 40. Orman gülü pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	78
Şekil 41. Orman gülü için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	78
Şekil 42. Orman gülü pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	79
Şekil 43. Orman gülü pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	79
Şekil 44. Orman gülü pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	80
Şekil 45. Orman gülü pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi.....	80
Şekil 46. Orman gülü için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 450 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	82
Şekil 47. Orman gülü için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	82
Şekil 48. Orman gülü için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	83
Şekil 49. Orman gülü için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 600 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	83
Şekil 50. Orman gülü için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda 650 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	84
Şekil 51. Orman gülü için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 450 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	84
Şekil 52. Orman gülü için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	85
Şekil 53. Orman gülü için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	85
Şekil 54. Orman gülü için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 600 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	86
Şekil 55. Orman gülü için 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda 650 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi.....	86
Şekil 56. 450 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	88
Şekil 57. 450 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	88
Şekil 58. 450 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	89

Şekil 59. 500 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	89
Şekil 60. 500 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	89
Şekil 61. 500 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	90
Şekil 62. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	90
Şekil 63. 550 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	90
Şekil 64. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	91
Şekil 65. 600 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	91
Şekil 66. 600 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	91
Şekil 67. 600 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	92
Şekil 68. 650 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	92
Şekil 69. 650 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	92
Şekil 70. 650 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi.....	93

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması	3
Tablo 2. Enerji kaynaklarının dünya enerji arzındaki payları.....	4
Tablo 3. Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarındaki durumu	4
Tablo 4. Türkiye'nin yıllık biyokütle üretim ve enerji değeri.....	10
Tablo 5. Bazı biyokütle türlerinin tipik lignoselüloz içerikleri	11
Tablo 6. Piroliz metotları ve değişkenleri	16
Tablo 7. Çay çalısı ve orman gülünün kısa analiz sonuçları.....	44
Tablo 8. Çay çalısı ve orman gülünün bileşen analiz sonuçları.....	45
Tablo 9. Çay çalısı ve Orman gülünün elementel analiz sonuçları	45
Tablo 10. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	46
Tablo 11. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	46
Tablo 12. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	46
Tablo 13. Çay çalısının 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	47
Tablo 14. Çay çalısının 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	47
Tablo 15. Çay çalısının 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	47
Tablo 16. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	48
Tablo 17. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	48
Tablo 18. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	48
Tablo 19. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	49
Tablo 20. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	49

Tablo 21. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	49
Tablo 22. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	49
Tablo 23. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	50
Tablo 24. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	50
Tablo 25. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	50
Tablo 26. Çay çalısının 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	50
Tablo 27. Çay çalısının 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	51
Tablo 28. Çay çalısının 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	51
Tablo 29. Çay çalısının 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	51
Tablo 30. Çay çalısının 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	51
Tablo 31. Çay çalısının 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	52
Tablo 32. Çay çalısının 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	52
Tablo 33. Çay çalısının 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	52
Tablo 34. Çay çalısının 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	52
Tablo 35. Çay çalısının 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	52
Tablo 36. Çay çalısının 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	53
Tablo 37. Çay çalısının 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	53
Tablo 38. Çay çalısının 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	53
Tablo 39. Çay çalısının 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	53

Tablo 40. Çay çalısının 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	53
Tablo 41. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	70
Tablo 42. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	71
Tablo 43. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	71
Tablo 44. Orman gülünün 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 100 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	71
Tablo 45. Orman gülünün 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 200 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	71
Tablo 46. Orman gülünün 0,150 mm \geq D _p parçacık boyutu ve 300 cm ³ /dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	72
Tablo 47. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	72
Tablo 48. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	72
Tablo 49. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	73
Tablo 50. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	73
Tablo 51. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar	73
Tablo 52. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	73
Tablo 53. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	73
Tablo 54. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	73
Tablo 55. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	74
Tablo 56. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	74
Tablo 57. Orman gülünün 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	74
Tablo 58. Orman gülünün 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	74
Tablo 59. Orman gülünün 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	75

Tablo 60. Orman gülünün 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	75
Tablo 61. Orman gülünün 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	75
Tablo 62. Orman gülünün 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	75
Tablo 63. Orman gülünün 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	75
Tablo 64. Orman gülünün 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	76
Tablo 65. Orman gülünün 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	76
Tablo 66. Orman gülünün 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	76
Tablo 67. Orman gülünün 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	76
Tablo 68. Orman gülünün 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	76
Tablo 69. Orman gülünün 100 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	77
Tablo 70. Orman gülünün 200 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	77
Tablo 71. Orman gülünün 300 (cm ³ /dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar.....	77

SEMBOLLER DİZİNİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
FT-IR	: Fourier Transform Infrared Spektroskopisi
GW	: Giga watt
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
LHV	: Düşük ısı değeri
MJ	: Mega joule
MW	: Mega watt
MWe	: Mega watt elektrik
kWh	: Kilo watt saat
MTEP	: Milyon ton eşdeğer petrol
MHV	: Orta ısı değeri
OECD	: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü
TWh	: Terawatt saat
TAPPI	: Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TGA	: Termogravimetrik analiz
cP	: Santi poise
D _p	: Parçacık boyutu
¹ H-NMR	: Nükleer manyetik rezonans
HZSM-5	: Mobil'in seçici zeolit katalizörü
H/C	: Hidrojen-oksijen oranı
kW	: Kilo watt
MCM-41	: Ticari katalizör
O/C	: Oksijen karbon oranı
W/m ²	: Watt / metrekare
ZSM-5	: Ticari zeolit katalizörü

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde gelişmiş ülkelerin kişi başına düşen enerji tüketimi gelişmekte olan ya da az gelişmiş ülkelere daha yüksektir ve buradan da anlaşılacağı üzere bir ülkedeki hayat standardıyla enerji tüketimi arasında bir korelasyon vardır (Klas, 1998). Bu sonucu Avrupa'da 18. yüzyılda başlayan sanayi devrimiyle beraber daha etkili bir biçimde görmekteyiz. Ülkelerin sanayileri geliştikçe enerjiye olan ihtiyaçları da paralel olarak artmaktadır.

Geçmişten günümüze zamanla artan bu enerji ihtiyacı, dünyadaki fosil enerji kaynaklarının (petrol, kömür, doğal gaz vb.) hızla azalmasına ve tüketilen enerji kaynaklarının sonucunda ortaya çıkan SO₂ ve CO gibi gazlar hava kirliliğine, CO₂ ise kirliliğin yanında küresel ısınmaya sebep olmaktadır. Gelişmiş ülkelerdeki enerji tüketimi 1973'den beri ikiye katlanmış olmasına rağmen enerji talebi hala oldukça yüksektir. İki binli yıllarda dünya enerji talebinin yaklaşık olarak % 50 civarında artması ve daha sonraki yıllarda bu artışın iki ya da üç katına çıkması beklenmektedir. Enerjideki yıllık büyüme hızı yaklaşık % 4 olarak alınacak olursa fosil yakıt rezervlerinin yaklaşık 90 yıllık ömürlerinin kaldığı açıktır (Kaygusuz ve Keleş, 2009). Bu hızlı sanayileşme ve artan yatırımlar nedeniyle alışılmış enerji kaynakları hızla tükenmektedir. Bu yenilenemeyen yakıtlar dünya enerji talebinin % 77 sini karşılamaktadır. Dünya enerji konseyi bu oranın 2020 yılında da % 74 olacağını öngörmektedir (Bilgen vd., 2008).

Uluslararası Enerji Ajansı'nın 2004 raporuna göre dünyada bilinen petrol rezervlerinin ömrü 50 yıl, doğal gazın 60 yıl, kömürün ise 227 yıl olarak tahmin edilmektedir. IEA'nın 2011 yılı raporuna göre ise dünyada enerji talebinin üçte bir artacağı bu nedenle günümüzde enerji üretiminde sürekliliğin sağlanabilmesi için, enerji kaynaklarının çeşitliliğinin yaratılması ve alternatif enerji kaynaklarının hayata geçirilmesi gerekmektedir (IEA,2011).

2011 yılı sonu itibariyle toplam enerjinin %81'i (%25 kömür + %35 petrol + %21 doğalgaz) ve elektriğin %67'si (%40 kömür + %7 petrol + %20 doğalgaz) fosil yakıtlardan üretilmiştir. 2035 yılında bu oran %75'e düşecektir (IEA, 2011). Dünya enerjisinin %6'sı ve elektrik üretiminin de %15'i nükleer enerji kaynaklıdır. Enerjinin

geriye kalan %13'lük kısmı ve elektriğin de %18'i çevre dostu olan ve yerine yenisi gelen başta hidroelektrik (%16) olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Dünya elektrik enerjisi üretimi 1973'de 6,1 trilyon kWh'ten 2005'de 18,2 trilyon kWh'e yükselmiştir ve bu süre zarfında yıllık CO₂ emisyonu 15,7 milyar tondan 27,1 milyar tona çıkmıştır. Bu da küresel iklim değişikliği riskini ve dünyanın geleceği ile ilgili kaygıları arttırmaktadır (Çengel, 2009). Bu veriler bize şimdilik yenilenebilir enerji kaynaklarından yeterince yararlanmadığımızı göstermektedir. Fakat Avrupa Yenilenebilir Enerji Konseyi'nin yapmış olduğu çalışmalara dayanarak, global enerji ihtiyacının yaklaşık yarısı 2040 itibariyle yenilenebilirlerden karşılanacaktır (EREC, 2010). 2040 yılı tahminine göre toplam yenilenebilir enerji kaynaklarının ise yaklaşık % 50'si biyokütle kaynaklarından olacaktır (Demirbaş, 2009).

Türkiye'de birincil enerji kaynaklarının (kömür, petrol ve doğalgaz) sınırlı olması ve kullanımlarının yarattığı çevre kirliliği yenilenebilir enerji kaynaklarının ve teknolojilerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmektedir. Hidrolik, biyokütle, rüzgar, güneş ve jeotermal başlıca yenilenebilir enerji kaynaklarımızdır (Bilgen vd., 2008).

Bu çalışmada ülkemizin Doğu Karadeniz Bölgesinde atık olarak doğrudan yakılan çay çalısının ve bölgemize has bitki türlerinden olan orman gülünün biyokütle kaynakları olarak ele alınıp hızlı piroliz yöntemi ile sabit yataklı bir reaktörde, sürükleyici gaz olarak da azot gazının kullanılmasıyla beraber kullanılmasıyla deneysel çalışmanın sonucunda ortaya çıkan sıvı ürün verimleri incelenerek çay çalısının ve orman gülünün verimli bir enerji ya da kimyasal hammadde kaynağı olup olamayacakları araştırılmıştır.

1.2. Birincil Enerji Kaynakları

Enerjinin herhangi bir değişime yada dönüşüme uğramamış biçimi "birincil" olarak adlandırılmaktadır. Uluslararası literatürde, birincil enerji kaynakları olarak; kömür, linyit gibi katı yakıtlar, petrol ve petrol ürünleri, doğalgaz, hidrolik enerji, nükleer enerji ve güneş, jeotermal, rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynakları olarak yer almıştır. Birincil Enerji kaynaklarının dönüştürülmesiyle elde edilen enerji "ikincil" olarak adlandırılır. Tablo 1'de enerji kaynaklarının sınıflandırılması yer almaktadır (Keskin, 2006).

Tablo.1. Enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Keskin, 2006)

Birincil Enerji Kaynakları		İkincil Enerji Kaynakları	
1. Fosil Kaynaklar	Petrol	4. Diğer Enerji Türleri	Elektrik Enerjisi
	Doğalgaz		Hidrojen
	Kömür		
2. Yenilenebilir Kaynaklar	Rüzgar		
	Hidrolik		
	Güneş		
	Jeotermal		
	Biyokütle		
	Dalga Enerjisi		
3. Nükleer Kaynaklar	Uranyum		
	Toryum		

1.2.1. Dünyada ve Türkiye’de Birincil Enerji Kaynakları Durumu

Bugün için dünya enerji gereksiniminin yaklaşık % 84’ü kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil kaynaklardan karşılanmaktadır (Ateşok, 2003). Bugün dünyada ve ülkemizde birincil enerji kaynaklarının dağılımına bakıldığında petrolün yaklaşık % 40’lık payla birinci sırada yer aldığı görülmektedir. Bu oran petrolün dünya ekonomisi için vazgeçilmez bir kaynak olduğunun göstergesi olmasının yanı sıra ekonomi ve refaha olan etkisini de göstermektedir (Ürün, 2003). Kömür dünya enerji tüketiminde % 26’lık bir paya sahiptir. Kömürün gerek dünya gerekse Avrupa’da elektrik üretimindeki katkısı yaklaşık % 40 dolayındadır (Anonim, 2011). Doğal gaz üretimi 2006 yılında 2.86 trilyon m³ gerçekleşmiş olup, bunun %37.5’i Avrupa Asya, %26.4’ü Kuzey Amerika, %13.2’si Asya Pasifik ve %11.7’si Ortadoğu bölgelerinden gerçekleştirilmiştir (Anonim, 2007).

2010-2035 döneminde, dünya enerji talebindeki ortalama yıllık artışının %1,7 olacağı tahmin edilmektedir. Bu dönem sonunda, 2035 yılı itibariyle toplam enerji talebi artışının %45’e ulaşması beklenmektedir (IEA, 2011).

Dünyanın sürekli artan enerji talebini karşılamak için kullanmış olduğu kaynaklar ve bu kaynakların toplam enerji arzı içindeki payları Tablo 2’de gösterilmiştir. Tablo 2’ye göre; 1973 yılında %0,1 olan yenilenebilir enerji kaynaklarının dünya toplam enerji arzı içindeki payı 2008 yılında %2,1’e yükselmiştir. Bu yükselişin devam ederek 2035 yılında %11,8’e ulaşacağı öngörülmektedir. Bu durum, dünya enerji kaynaklarının %45’ini tüketen OECD ülkeleri için daha ilgi çekici bir boyuttadır. 1973 yılında, yenilenebilir

enerji kaynaklarının OECD ülkelerinin enerji arzı içindeki payı %2,5'tir. 2008 yılında bu oran %5,2'ye çıkmış ve 2035 yılında da %19,5 olması beklenmektedir (Kum, 2009).

Tablo 2. Enerji kaynaklarının dünya enerji arzındaki payları (1973-2030) (IEA, 2009)

Enerji Kaynakları (OECD)	1973 (%)	2008 (%)	2035 Tahmini (%)
Petrol	52,5	37,3	30,0
Kömür	22,6	20,9	16,6
Gaz	19,0	23,7	20,5
Nükleer	1,3	10,9	9,5
Hidro	2,1	2,0	3,9
Yenilenebilir Kaynaklar	2,5	5,2	19,5
Enerji Kaynakları (Dünya)	1973 (%)	2008 (%)	2035 Tahmini (%)
Petrol	48,1	34,3	30,1
Kömür	28,5	32,6	28,8
Gaz	19,6	22,9	21,6
Nükleer	1,9	5,9	5,3
Hidro	1,8	2,2	2,4
Yenilenebilir Kaynaklar	0,1	2,1	11,8

Tablo 3 ise Türkiye'deki birincil enerji kaynaklarının durumunu göstermektedir. Tablo 3'ten de görüldüğü gibi Türkiye özellikle taş kömürü, petrol ve doğalgazda enerji ithal eden bir ülke konumundadır (Tuğrul, 2009).

Tablo 3. Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarındaki durumu (Tuğrul, 2009)

Enerji Kaynağı	Tüketim	Üretim
Taş Kömürü (Bin ton)	11,039	2367
Linyit (Bin ton)	64,883	64,883
Doğal gaz (Milyon m ³)	16,339	312
Petrol (Bin ton)	29,661	2,551
Hidrolik (GWh)	24,010	24,010
Jeotermal + Rüzgar (Elektirik) (GWh)	152	152
Jeotermal Isı (Bin TEP)	618	618
Odun (Bin ton)	16,263	16,263
Hayvan ve Bitki Atıkları (Bin ton)	5790	5790
Güneş (Bin TEP)	287	287
Toplam (Bin TEP)	97,044	28,266

1.3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Üzerinde ortak bir terminolojinin oluşmadığı, aslında yeryüzünde hep var olan enerji kaynaklarını “yenilenebilir” olarak ifade etmek için, aşağıdaki öğelerin mevcut olması gerekmektedir (Onbaşıoğlu, 2005) :

- * Kaynak, doğal ortamda sürdürülebilir veya tekrarlanabilir olmalı,
- * Kaynakta, birim zamanda üretilen enerji, birim zamanda kaynaktan çekilen enerjiye eşit olmalı,
- * Enerjinin kaynağı; Güneş, Dünya'nın dönüşü ve yer çekimi olmalıdır.

Bu açıdan, yenilenebilir enerji kaynaklarının büyük bir çoğunluğu enerjisini doğrudan veya dolaylı olarak Güneş'ten almakta, dolayısıyla bu kaynaklar sürekli olarak yenilediğinden tükenmemektedir. Potansiyeli olan ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda son yıllarda yararlanılan enerji kaynakları “yeni”; tükenmeyen, eksilmeyen kaynakları da “yenilenebilir” enerji kaynakları olarak ifade edilmektedir (Enis, 2005).

Yenilenebilir enerji kaynakları; hidrolik, rüzgar, güneş, jeotermal, biyokütle, dalga, ve gelgit gibi fosil olmayan enerji kaynaklarıdır.

1.3.1. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içinde en gelişmiş ve ticari açıdan en elverişli türüdür. Bütünüyle doğa ile uyumlu, çevreye zarar vermeyen ve tükenme ihtimali olmayan enerji kaynağıdır. Rüzgar enerjisi, güneş radyasyonunun yer yüzeylerini farklı ısıtmasından kaynaklanır. Yer yüzeylerinin farklı ısınması, havanın sıcaklığının, neminin ve basıncının farklı olmasına, bu farklı basınç da havanın hareketine neden olur. Güneş ışınları olduğu sürece rüzgar olacaktır. Rüzgar güneş enerjisinin dolaylı ürünüdür. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin yaklaşık % 2 kadarı rüzgar enerjisine çevrilmektedir (Kıncay vd., 2009).

Rüzgar enerjisi, 1990'larda ekonomik olarak görülmeye başlanmasından sonra dünyada en hızlı gelişen enerji kaynağı olmuştur. Almanya'da 1990 yılında Elektrik Besleme Kanunu (Electricity Feed Law) ile rüzgar enerjisini desteklemiştir. Almanya rüzgar gücü geliştirmedeki dünya liderliğini 1997'de A.B.D.'ye vermiştir.

Rüzgar enerjisi kaynağı doğal olsa da, rüzgarın tutularak enerjiye dönüştürülmesi için bir maliyet gereklidir. Rüzgardan verimli enerji eldesi rüzgarın hızına, esme süresine,

seçilecek bölgenin meteorolojik özelliklerine ve seçilecek türbin tasarımına bağlıdır (Erdoğan, 2003).

Türkiye’de rüzgar enerjisi bakımından en zengin olan bölgelerimiz Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz kıyılarıdır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü’nün 113 istasyonunun saatlik rüzgar kayıtlarını temel olarak EİE İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından yapılan değerlendirme çalışmasına göre Türkiye’nin ortalama rüzgar hızı 2,5 m/s, yıllık ortalama rüzgar gücü yoğunluğu 24 W/m²’dir (Altın, 2002).

Türkiye rüzgar enerji potansiyeli, belirlenmiş kriterlerin ışığında rüzgar sınıfı iyi ile sıra dışı arasında 47,849.44 MW olarak belirlenmiştir. Bu araziler Türkiye toplamının %1,30’una denk gelmektedir. Türkiye toplam rüzgar enerjisi potansiyelinin 37386,16 MW’ı karasal alanlarda ve 10463,28 MW’ı ise denizlerde bulunmaktadır (Türkyılmaz, 2008).

1.3.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, güneş çekirdeğinde hidrojen gazının helyuma dönüşmesi sırasında oluşan ışıma ile açıklanır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak sabit ve 1370 W/m² değerindedir, ancak yeryüzünde 0-1100 W/m² değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970’lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşüş göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir (Kıncay vd., 2009).

Güneş enerjisi birçok uygulamada kullanılır. En çok ilgi çekenler, düşük maliyetli solar fırınlar, su ve alan ısıtıcıları, fotovoltaiik (ışılelektriksel/FV) pillerdir. 1972 ile 1992 arasında FV modüllerin fiyatları oldukça düşmüştür. Japonya ve Almanya 400 ve 250 MW’ın üzerinde fotovoltaiiklerle öncü olmuşlardır. Japonya ayrıca dünyanın en ileri gelen ev tipi solar termal kolektörleri kullanıcıdır.

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de mevcut güneş enerjisi sistemlerinin çoğu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmakta olan sıcak su üretme sistemleridir. Halen ülkemizde kurulu olan güneş kollektörü miktarı yaklaşık olarak 12 milyon m² olup, yıllık üretim hacmi 750 bin m²dir. Bu üretimin bir miktarı da ihraç edilmektedir. Bu haliyle ülkemiz dünyada kayda değer bir güneş kollektörü üreticisi ve kullanıcısı durumundadır (Kıncay vd., 2009).

1.3.3. Jeotermal Enerji

Jeotermal enerji, yerkabuğunun çeşitli derinliklerinde bulunan ve yeryüzündeki havzalardan beslenen sularla potansiyelini oluşturan birikmiş ısının meydana getirdiği sıcaklıkları bölgesel olarak değişen ve bünyesinde daha çok erimiş mineral tuzlar ve gazlar içeren su ve buhardan oluşan bir hidrotermal kütledir (Küleççi, 2009). Jeotermal kaynaklar elektrik üretimi, ısıtma, seracılık, termal, kuru buz üretimi gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Boyle, 1996; Eren, 2009).

Türkiye, jeotermal enerji potansiyeli açısından dünyadaki zengin ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye'de toplam 1000 dolayında sıcak ve mineralli su kaynağı bulunmaktadır. Bilinen jeotermal alanların %95'i ısıtmaya ve kaplıca kullanımına uygundur. Türkiye'de az sayıda da olsa yüksek entalpili jeotermal alanlar da keşfedilmiştir. Ancak, ülkemizde jeotermale dayalı elektrik üretimi düşük seviyede kalmıştır. Günümüzde 20,4 MWe brüt kurulu güce sahip Denizli-Kızıldere santrali ve Aydın Salavatlı'da 167°C ile yaklaşık 10 MWe Binary Cycle santrali işletilmektedir. 48 MWe kapasiteli Germencik Jeotermal Elektrik Santrali yatırımının çalışmaları devam etmektedir. Kızıldere Jeotermal Santralinin atığı olan 140°C 'lik jeotermal sudan 6,85 MWe kapasiteli jeotermal santral kurulmaktadır. Bunların yanında, Çanakkale-Tuzla jeotermal santrali ile 10 MWe kapasiteli Simav Jeotermal Elektrik Üretim Santrali proje aşamasındadır (Akpınar vd., 2008).

1.3.4. Gelgit Enerjisi

Gelgit enerjisi ortaçağdan beri kullanılmakta olan bir enerji çeşididir. Orta çağda İngiltere ve Fransa'da mısır öğütmek için nehirlerin üzerine küçük gelgit değirmenleri kurulmaktaydı. Gelgit olayı ayın ve daha az ölçüde güneşin denizler üzerine uyguladıkları yerçekimi etkilerinden kaynaklanmaktadır. Gelgit enerjisi bu çekim kuvvetlerinden dolayı suların alçalması ve yükselmesine bağlı olarak kullanılabilinen bir enerji çeşididir (Boyle, 1996).

1.3.5. Hidroelektrik Enerjisi

Hidroelektrik, Dünyadaki en geniş ve ucuz yenilenebilir elektrik kaynağıdır. Bununla birlikte, hidrogücün çevresel etkilere sahip olmadığı söylenemez. Büyük ölçekli uygulamaların, biyolojik çeşitliliğin kaybolması, toprak erozyonu, serbest akan akarsuların kesilmesi ve çok sayıda insanın yer değiştirmesi gibi önemli ekolojik zararlara yol açtığı iyi bilinmektedir. Bunlara rağmen, hidroelektrik güç direkt olarak sera gazı emisyonu salmaz ve Dünyanın birçok yerinde önemli bir enerji kaynağıdır. Amerika Birleşik Devletleri(A.B.D.), Çin, Kanada, Brezilya önde gelen hidroelektrik üreticileridir (Cleveland, 2004).

Hidroelektrik şu anda dünya elektriğinin yaklaşık %20'sini karşılamaktadır. Eski barajları tekrar güçlendirmek – daha çok enerji üretebilen modern ekipmanlarla donatmak iyi bir çözümdür ve çevreye olan etkilerini azaltabilir. Toplam katkı küçük de olsa (+30GW), barajların yeniden güçlendirilmesi hızlı gerçekleşebilir ve sivil toplum, finans mekanizmaları, sanayi ve hükümetler arasında daha geniş bir diyaloga zemin hazırlayabilir. 30 GW'lık katkı, Uluslararası Büyük Barajlar Komitesi kayıtlarındaki sadece 20 yaş ve üzeri hidro enerji barajlarının sayısına dayanarak tahmin edilmiştir ve bugün (~20 GW) ile 2025 yılı (+10 GW) arasındaki ılımlı bir %10'luk üretim artışı tahmini, hafif, orta ve tam yenileme olanakları karışımına dayanmaktadır (Ayas vd., 2009). Türkiye'nin brüt teorik hidroelektrik potansiyeli 433 TWh'dir ve bu rakam teorik global potansiyelin neredeyse % 1'i ve Avrupa potansiyelinin % 14'ü kadardır. Genel hidrolik enerji potansiyeli ise yıllık 216 TWh'dir. Yetkili kuruluşlar değerlendirilebilir potansiyeli 140 TWh olarak belirlemiştir (Akpınar vd., 2009).

1.3.6. Dalga Enerjisi

Dalgaların sahip olduğu enerji de yenilenebilir enerji çeşididir. Dalga suyun yüzeyinden rüzgârın geçmesiyle oluşmaktadır. Dalgalar uzunlukları, yükseklikleri ve periyotları ile karakterize edilmektedir. Daha geniş dalgalar küçük dalgalardan daha fazla enerji taşımaktadır. Fakat bu teknoloji henüz tam anlamıyla ticari bir kullanım seviyesine ulaşamamıştır. Sadece birkaç ülke özellikle İngiltere büyük bir potansiyele sahiptir (Boyle, 1996).

1.3.7. Biyokütle Enerjisi

Biyokütle kaynakları odun ve odun atıkları, zirai mahsül ve atık yan ürünleri, kentsel katı atıklar, hayvan atıkları, gıda işleme proseslerinin atıkları, suda yaşayan bitkiler ve algleri kapsar. Biyokütle genelde tükenen fosil yakıt kaynakları yerine kullanılabilen yenilenebilir enerji için potansiyel kaynak olarak kabul görmüştür. Biyokütle çoğunlukla odun ve odun atıklarından(%64), kentsel katı atıklardan(%24), tarımsal atıklardan(%5) ve atık gazlardan(%5) üretilir. Birçok biyokütle hemiselüloz, selüloz, lignin ve önemli derecede diğer organiklerden oluşur (Demirbaş, 2009).

Klasik biyokütle enerjisi, ormanlardan elde edilen odun ve yakacak olarak kullanılan bitki ve hayvan atıklarından oluşur. Klasik biyokütle enerjisi, diğer enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bölgelerde, ilkelden gelişmişe kadar kullanılabilen doğrudan yakma teknikleriyle elde edilen enerjidir. Bu tip biyoküteller genellikle pişirme ve ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Modern biyokütle kaynakları ise, enerji ormancılığı, ağaç ve orman endüstrisi atıkları, hayvansal atıklar ve kentsel atıklardır. Modern biyokütle kaynakları, pazar işlemleri ile karakterize edilmekte, sanayi, ulaştırma ve ticaret sektöründe kullanılmaktadırlar (Çukurçayır ve Sağır, 2008).

Endüstride küçük ve büyük ölçekli biyokütle yanma tesislerinde 100-3000 MW enerji üretimi yapılmaktadır. Yüksek verimlilik sağladığı için biyokütle ile kömürün birlikte yakıldığı tesisler ise oldukça ilgi çekici uygulamalardır. Biyokütlenin yakılmasıyla güç üretim tesislerinde verim %20-40 arasında değişmektedir. Eğer biyokütle ile kömür birlikte yakılırsa, daha yüksek dönüşüm elde edilmektedir. Biyokütlenin gazlaştırılmasıyla elde edilen düşük kalorifik değerli gaz (4-6 MJ/m³) gaz motorları ve gaz türbinlerinde yakıt olarak veya kimyasal üretimde (metanol) kullanılabilir. Umut verici diğer bir yöntem entegre gazlaştırma döngüsüdür. Burada gaz türbinleri yüksek verimle gaz yakıttan elektrik enerjisi üretmektedir. Böyle bir tesis yaklaşık % 40-50 verimle çalışarak, 30-60 MW elektrik üretmektedir. Biyokütleden sentez gazı üretimi gelecekte yakıt olarak kullanılması düşünülen metanol ve hidrojenin üretilmesine yol açmaktadır (McKendry, 2002).

1.4. Dünyada ve Türkiye’de Biyokütle Kullanımı

Biyokütle günümüzde sanayileşmiş ülkelerde enerji tüketiminin %3’ünü oluşturmaktadır. Fakat Dünya nüfusunun yaklaşık %50’sini oluşturan gelişen ülkelerdeki kırsal nüfusun büyük kısmı yakıt için odun şeklinde biyokütleyi esas alır. Biyokütle gelişen ülkelerde birincil enerji tüketiminin %35’ini oluşturur; Dünyada birincil enerji tüketiminde %14’e yükselmiştir. Avrupa, Kuzey Amerika ve Orta Doğu’da biyokütle toplam enerji tüketiminin ortalama %2-3’ünü oluşturur (Demirbaş, 2009).

1980’de %20 iken 2005’de %8’e düşmesine karşın, biyokütle Türkiye’nin toplam enerji tüketiminde önemli bir paya sahiptir. Hububat tozu, saman ve fındık kabuğu gibi tarımsal artıklar, odun ve hayvan dışkı biyokütle enerjisinin temel kaynaklarıdır. Bugün ülkenin bazı köylerinde ısınma ve yemek pişirme amacı ile yukarıda bahsi geçen türde biyokütle yakılmaktadır (Özgür, 2008). Tablo 4’de Türkiye’nin yıllık ana biyokütle üretim ve enerji değeri görülmektedir.

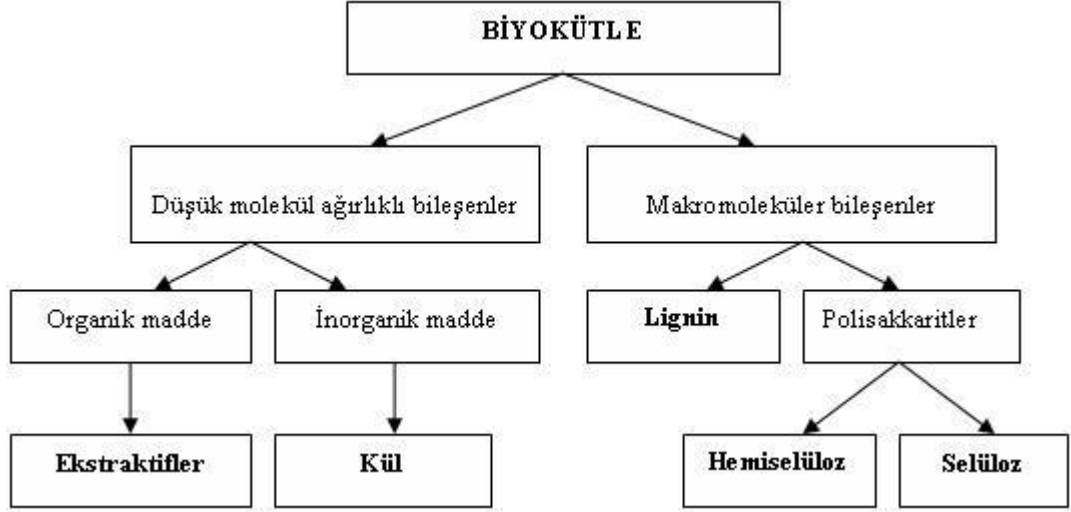
Tablo 4. Türkiye’nin yıllık ana biyokütle üretim ve enerji değeri (Demirtaş, 2010)

Biyokütle	Yıllık Potansiyel (milyon ton)	Enerji Değeri (milyon ton eşdeğer petrol)
Yıllık Bitkiler	55	14,9
Çok Yıllık Bitkiler	16	4,1
Orman Artıkları	18	5,4
Tarım-Sanayi Artıkları	10	3,0
Orman Endüstri Artıkları	6	1,8
Hayvan Artıkları	7	1,5
Diğer	5	1,3
Toplam	117	32,0

1.5. Biyokütlenin Kimyasal Yapısı

Biyokütlenin kimyasal bileşimi, kömür ve petrolün kimyasal bileşimlerinden oldukça farklıdır. Bitki içerisinde yüksek oranda oksijen ihtiva eden karbonhidrat polimerleri nedeniyle diğer fosil yakıtlardan oldukça farklı bir yapıya sahiptir. Biyokütle içerisinde esas yapısal kimyasal bileşenler karbonhidrat polimerleri ve oligomerler (% 65-75) ile

lignindir (% 18-35). Ayrıca odun içerisinde organik ekstraktiflerden ve inorganik maddelerden oluşan (% 4-10) bileşenleri de içermektedir. Özetle; biyokütleyi esas oluşturan bileşenler; selüloz, (bir glukosan polimeri) hemiselüloz, lignin, organik ekstraktifler ve inorganik maddelerdir. Selüloz, hemiselüloz ve ligninin biyokütle içerisindeki ağırlık yüzdeleri biyokütlenin türüne göre farklılıklar göstermektedir (Mohan vd., 2006). Şekil 1’de biyokütlenin temel bileşenleri gösterilmiştir. Biyokütle, kimyasal içerik olarak yaklaşık % 90-99 oranında, üç doğal polimerden; selüloz, lignin ve hemiselülozdan ve daha az oranda olmak üzere (% 1-10) inorganik (kül) ve ekstraktif maddelerden oluşmaktadır (Sjostrom, 1993; Klass 1998).



Şekil 1. Biyokütlenin temel bileşenleri (Mohan vd., 2006)

Selüloz, hemiselüloz ve ligninin biyokütle içerisindeki ağırlık yüzdeleri biyokütlenin türüne göre farklılıklar göstermektedir. Bazı biyokütle türlerinin lignoselüloz içerikleri Tablo 5’de verilmiştir (Mohan vd., 2006).

Tablo 5. Bazı biyokütle türlerinin tipik lignoselüloz içerikleri (Mohan vd., 2006).

Biyokütle türü	Lignoselüloz içeriği (%)		
	Hemiselüloz	Selüloz	Lignin
Bahçe çimleri	40,0	32,0	4,7
Pirinç samanı	27,2	34,0	14,2
Huş odunu	25,7	40,0	15,7

Selüloz; Elementel analize göre, $(C_6H_{10}O_5)_n$ kapalı formülüne sahip olan selüloz, glikoz bağlarının oluşturduğu uzun bir zincirden meydana gelmektedir ve lignine göre daha düşük ısı değere sahiptir. Yapılan çalışmalar, yanıcı ve uçucu bileşenlerin oluşmasına neden olan selülozun 325-400 °C sıcaklıklar arasında bozunduğunu göstermektedir (Şahin, 2005).

Lignin; Biyokütlenin diğer önemli bileşeni ise lignindir. Selülozdan sonra biyoküttelede en fazla bulunan doğal polimer lignindir. Hücre çeperindeki esas görevi, yapıştırıcı özelliğinden dolayı, selüloz liflerini bir arada tutmak olarak özetlenebilir (Sjostrom, 1993). Lignin, tüm lignoselülozik yapılarda bulunmaktadır. Lignin, fenilpropan ve metoksi gruplarından oluşan, bir miktar da polifenolik bileşikler içeren bir polimerdir. Lignin bir karbonhidrat değildir. Ancak alifatik zincirlerle bağlanmış benzen halkalarının polimerleşmiş halidir. Hemiselüloza benzerdir, amorfudur ve selülozdan daha iyi çözünür (Carlo vd., 2005).

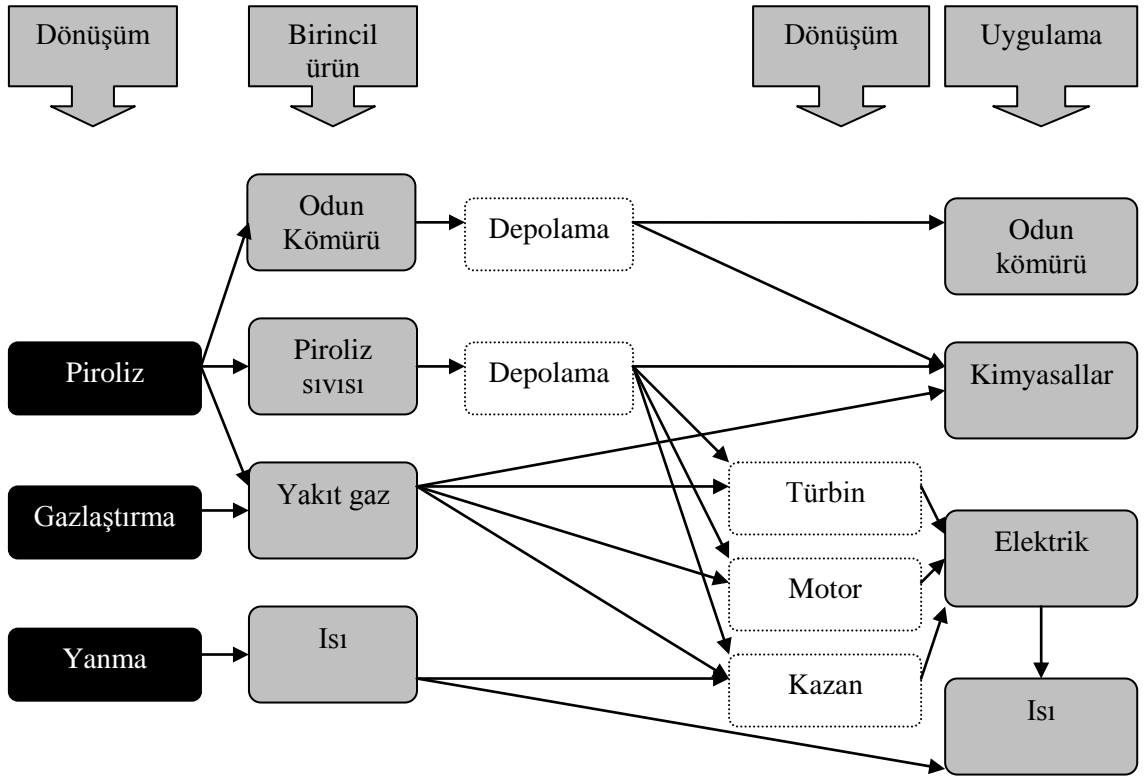
Hemiselüloz; Selüloz düz zincirli polimer (glukoz-glukoz dimeri) olmasına rağmen, hemiselüloz, ksiloz, arabinoz, galaktoz, glukoz ve mannoz gibi dallanmış farklı tipteki şeker zincirlerini de yapısında bulundurmaktadır. Şeker olmayan düşük moleküllü asetil gruplarını da içermektedir. Hemiselüloz, dallanmış olduğundan amorf yapıdadır. Selülozdan daha kolay hidroliz olmaktadır (Carlo ve ark., 2005). Basit şekerlerin değişik tarzda bağlanması ile oluşan hemiselülozlar, biyoküttelede yaklaşık % 20-30 oranında bulunmaktadır. Hemiselüloz, selüloza göre ısı dayanıklılığı daha az olan, yani daha kolay bozulan bir biyokütle bileşenidir. Isıl bozunma sırasında, daha yüksek oranda yanmayan gazlar ve daha az oranda katran oluşumuna sebep olmaktadır. Hemiselülozun bozunma sıcaklığı 250-350 °C aralığındadır. Hemiselüloz kimyasal yapısında içerdiği birçok su molekülü nedeniyle, selüloza göre daha düşük yanma ısısına sahiptir (Young, 1992).

Ekstraktifler; biyokütlenin yapısında bulunan ve uygun çözücüler yardımıyla alınabilen bileşenler olarak tanımlanabilir. Bunlar polar çözücüler (metilen klorür, su ve alkol) ve apolar çözücüler (toluen ve hekzan gibi) yardımıyla ekstrakte edilebilirler. Organik ekstraktifler; yağlar, balmumları, alkaloidler, proteinler, fenolikler, basit şekerler, pektinler, zamklar, sakızlar, reçineler, terpenler, nişastalar ve glikosidler gibi çok çeşitli kimyasal bileşenler içermektedir. Ekstraktifler; enerji kaynağı, mikrop öldürücü ve böcek saldırılarına karşı kullanılmaktadır (Vigouroux 2001; Mohan vd., 2006).

Kül; Biyokütlenin yapısında bulunan inorganik kısım ise Na, K gibi alkali metaller, Mg, Ca gibi toprak alkaliler ve S, Cl, N, P, Si, Al içeren diğer bileşenler ile ağır metallerden (Cd, Zn, As, Pb, Cu, Hg) oluşmaktadır. Yanma olayı gerçekleştikten sonra, inorganik kısımdan geriye kalanlara “kül” adı verilir (Vigouroux, 2001).

1.6. Biyokütleyle Uygulanan Isıl Dönüşüm Yöntemleri

Daha kullanışlı enerji şekillerine dönüştürmek için biyokütleyle uygulanan üç tane ısıl dönüşüm prosesi vardır. Bunlar piroliz, gazlaştırma ve direkt yakmadır. Şekil 2, bu yöntemler sonucunda elde edilen ürünleri ve bu ürünlerin uygulamalarını özetlemektedir. Direkt yakma çok eskiden beri tüm dünyada yaygın olarak ısıtma amacıyla ve son zamanlarda ise elektrik üretiminde de kullanılmaktadır (Klass, 1998; Bridgwater, 2006).



Şekil 2. Biyokütleyle uygulanan ısıl dönüşüm prosesleri (Bridgwater, 2006)

1.6.1. Direkt Yakma

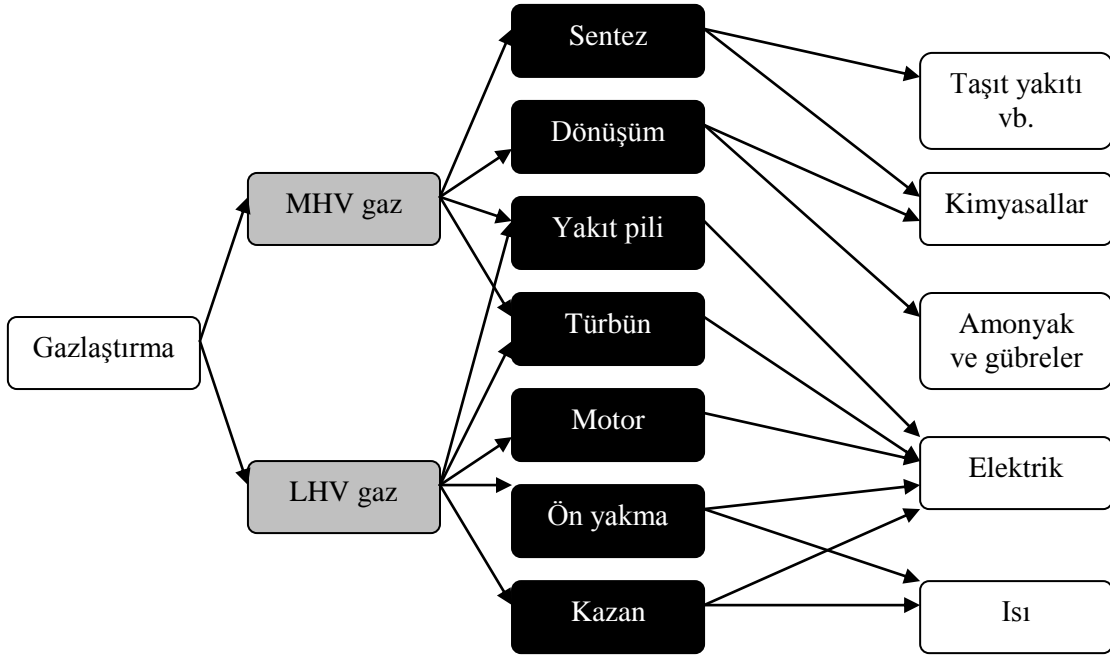
Biyokütlenin doğrudan yanma işlemi, evlerde ısı üretmek için kullanılan klasik bir uygulamadır. Odunun bu şekilde geleneksel kullanımı genellikle çok az verimliliğe (%10) sahiptir ve aynı zamanda önemli ölçüde toz ve is emisyonlarına yol açmaktadır. Teknolojinin gelişimi, otomatik gaz temizleme ve pelet gibi standardize edilmiş yakıtların kullanımını içeren ısıtma sistemlerinin de gelişmesine öncülük etmektedir (Faaij, 2006).

Elektrik enerjisi üretmek için biyokütlenin büyük ölçekli tesislerde yanması tüm dünyada ticari olarak uygulanmaktadır. Tesislerin kapasitesine bağlı olarak büyük ölçekli yanma tesislerinde yaklaşık 100-3000 MW enerji üretilmektedir (Mckendry, 2002).

Kömür ve biyokütlenin birlikte yakıldığı (co-combustion) tesisler birçok Avrupa ülkesinde biyokütle için çok hızlı gelişen bir dönüşüm sürecidir. Bu yöntem yüksek verimlilik ve düşük emisyon değerleri sağlamaktadır.

1.6.2. Gazlaştırma

Katı yakıt gazlaştırma, özellikle başta kömür, linyit, biyokütle ve katı atıklar olmak üzere tüm katı yakıtları katı halden gaz haline dönüştüren temiz enerji dönüşüm sürecidir (Tolay ve ark., 2008). Kısmi oksidasyonla yüksek sıcaklıklarda (800-900 °C) biyokütlenin yanabilir gaz karışımına dönüştürülmesi gazlaştırma olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen düşük kalorifik değerli gaz (4-6 MJ/m³) gaz motorları ve gaz türbinlerinde yakıt olarak veya kimyasal madde üretiminde (metanol) kullanılabilir (Mckendry, 2002). Gazlaştırma vakumlu, atmosferik ve basınçlı ortamda, gazlaştırıcı içinde gerçekleştirilir ve ürün ise CO ve H₂ karışımından oluşan bir gazdır. Çıkan gaz temizlenir ve yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta oksijen veya hava ile yakılarak enerji üretilir veya metanol, amonyak, gübre gibi kimyasal maddelerle, benzin, dizel gibi sıvı yakıtların üretiminde kullanılır. Katı atık ve katı yakıt esaslı elektrik gücü üretim teknolojileri içinde gazlaştırma, düşük düzeyde en uygun hava emisyonlarına, katı atık ve atık su değerlerine sahip en temiz teknolojidir. Yüksek enerji verimliliğinin nedeni, daha az karbondioksit (CO₂) emisyonlarıyla sonuçlanan katı yakıt gazlaştırmada aynı miktarda enerji üretmek için daha az katı yakıt kullanılmasıdır. Gazlaştırma, yakma teknolojilerine göre daha çevreci bir teknolojidir ve CO₂, SO₂, NO_x emisyonları bakımından çok daha avantajlıdır (Tolay vd., 2008).



Şekil 3. Biyokütle gazlaştırma sistemleri için uygulamalar (MHV; orta ısıl değer 15 MJ/Nm³, LHV; düşük ısıl değer 5 MJ/Nm³) (Bridgwater, 2006).

1.6.3. Piroliz

Piroliz (Pyrolysis) kelimesi yunanca bir kelime olup “pyr” ateş, “olysis” ise ortaya çıkmak anlamına gelmektedir. Piroliz, biyokütleden oksijensiz ortamda organik moleküllerin parçalanmasıyla organik uçucular elde etme işlemidir. Kimyasal bağlar, oksijensiz ortamda ısıl olarak bozunurlar. İlk defa, dünyada petrol krizi olduğunda biyokütlenin ve talaşın sıvılaştırılması ve gazlaştırılması ile piroliz, önemli hale gelmiştir. Piroliz sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünler oluşur. Genellikle piroliz yöntemi ile biyokütle sıvılaştırılarak ”biyo-yağ”a çevrilir. Bu sıvı yağ, organik bileşiklerin bir karışımıdır (furfural türevleri, fenol türevleri vb.). Biyokütlenin sıvılaştırılmasıyla elde edilen bu sıvı, türbin veya motorlarda doğrudan kullanım için uygun değildir. Pirolizde elde edilen katı, sıvı ya da gaz ürünlerden hangisinin veriminin en fazla olacağı, biyokütlenin çeşidine, süreç parametrelerine ve reaktör tipine bağlıdır (Üçgül ve Akgül, 2010).

Piroliz biyokütleden sıvı yakıt üretiminde kullanılan en uygun termokimyasal dönüşüm yöntemidir. Biyokütle pirolizi 350-550 °C arasında başlar ve 700 °C’ye kadar sürer. Bu durum kullanışlı biyoyakıt, gaz, katı ürünlerin üretilmesine yol açar (Goyal vd., 2008). Meydana gelen katı ürün (char), organik sıvı, gaz ve su gibi ürünlerin miktarları

biyokütlenin bileşimine, piroliz sıcaklığına, ısıtma hızına ve alıkonma süresi gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Düşük sıcaklık ve alıkonma süresi, katı ürünün (char) verimini, yüksek sıcaklık ve alıkonma süreleri ise gaz ürün verimlerini arttırmaktadır. Orta derecedeki sıcaklıklar ve kısa piroliz buharı alıkonma süreleri ise sıvı ürün verimini arttırmaktadır. Hızlı piroliz yöntemi sıvı ürün verimi üretiminde en etkin yöntemdir. Yaklaşık 500 °C’de en yüksek sıvı ürün verimine ulaşılmaktadır (Goyal vd., 2008).

Tablo.6. Piroliz metotları ve değişkenleri (Mohan vd., 2006).

Piroliz teknolojisi	Alıkonma zamanı	Isıtma hızı	Sıcaklık °C	Ürün
Karbonizasyon	Günler	Çok düşük	400	Odun kömürü
Geleneksel	5–30 dk	Düşük	600	Biyoyakıt, gaz, odun kömürü
Hızlı	0,5–5 s	Çok yüksek	650	Biyoyakıt
Hızlı-sıvı	<1 s	Yüksek	<650	Biyoyakıt
Hızlı-gaz	<1 s	Yüksek	<650	Kimyasallar, gaz
Ultra	<0,5	Çok yüksek	1000	Kimyasallar, gaz
Vakum	2–30 s	Orta	400	Biyoyakıt
Hidropiroliz	<10 s	Yüksek	<500	Biyoyakıt
Metanproliz	<10 s	Yüksek	>700	Kimyasallar

1970’li yıllardan sonra biyokütlenin pirolizi üzerine yapılan detaylı çalışmalar piroliz sıcaklığının ve ısıtma hızının kontrolüyle katı, sıvı ve gaz ürünlerinin bileşimi istenilen seviyeye çekilebilmektedir. Piroliz şartları ile oynayarak yüksek verimli gaz ve sıvı ürünler ile % 5 seviyesinde odun kömürü üretilebilmektedir. Piroliz metotları ve değişkenleri Tablo 6’da verilmiştir (Mohan vd., 2006).

Piroliz sıvısının görünümü genellikle koyu renktedir. Hammaddeye ve kullanılan piroliz teknolojisine bağlı olarak, siyah, koyu kahve, kırmızı ve yeşil olabilir. Piroliz sıvısında bulunan su oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle ürünlerin ısı değerlerinin ve viskozitelerinin düşmesinde, pH’larında ve saflaştırma işlemlerinde etkili olabilmektedir. Ortamdaki su, normal sıcaklıkta distilasyon ile veya 100°C dolaylarında buharlaştırma ile uzaklaştırılmaz. Çünkü 100°C ve daha yüksek sıcaklıkta yapılan işlemlerde, sıvının fiziksel ve kimyasal yapısında değişiklikler olmaktadır. Piroliz sıvılarının oksijen içeriği çok olup, enerji içeriklerinin düşmesine neden olmaktadır (Bridgwater ve Cottom 1992, Bridgwater ve Bridge 1991).

Piroliz sıvılarının yoğunluğu 1.2 kg/l civarında olup oldukça yüksektir. Ham sıvı ürünün viskozitesi 10 cp'den 10000 cp'ye kadar değişebilir. Viskozite; su içeriği, proses koşulları, hammadde, depolama koşulları ve zamana bağlıdır (Bridgwater 2003).

1.6.3.1. Piroliz Yöntemleri

Sıcaklık ve işlem koşullarına bağlı olarak piroliz prosesleri; geleneksel piroliz, hızlı ve flash piroliz olmak üzere üç alt sınıfa ayrılabiliriz..

1.6.3.1.1. Geleneksel Piroliz

Geleneksel yavaş piroliz binlerce yıldır uygulanan bir yöntemdir ve genellikle kullanım amacı odun kömürü üretmektir. Odunun yavaş pirolizinde biyokütle yaklaşık olarak 500 °C'ye ısıtılır ve buhar alıkonma zamanı 5 ile 30 dak arasında değişmektedir. Hızlı pirolizde olduğu gibi buhar hızlı bir şekilde ortamdan uzaklaşmaz, böylece buhar fazındaki bileşenler tamamen odun kömürü olana kadar veya ortamda oluşacak herhangi bir sıvı ürün kalmayana kadar birbirleriyle reaksiyona girmeye devam ederler. Geleneksel pirolizde ki kullanılan bu ısıtma hızı, hızlı pirolizde olandan daha yavaştır. Biyokütle ya yavaş olarak ısıtılır ya da sabit bir sıcaklıkta tutulur. Biyokütle tamamen odun kömürüne dönüşene kadar buharın ortamdan uzaklaştırılmasına izin verilir. Yavaş ve hızlı ısıtma hızında vakum piroliz ayrı bir değişkendir. Yavaş ısıtma hızı ve hızlı ısıtma hızları çoğu açıdan keyfidir (Yaman, 2004; Mohan vd., 2006; Bridgwater, 2006).

1.6.3.1.2. Hızlı Piroliz

Hızlı piroliz yüksek sıcaklıklarda biyokütlenin oksijen yokluğunda hızlı bir şekilde ısıtılarak buharları, aerosoller ve bazı odun kömürü gibi katıları oluşturmak için parçalanma işlemidir. Buhar ve aerosollerin soğutulup yoğunlaştırılmasından sonra ısı değeri yaklaşık olarak fuel-oil'in ısı değerinin yarısına eşit olan koyu kahverenginde bir sıvı oluşur. Hızlı piroliz prosesinde kullanılan biyokütle türüne bağlı olarak ağırlıkça % 60 - % 75 oranında sıvı ürün, % 25 oranında odun kömürü ve % 10 - % 20 arasında gaz ürünler elde edilmektedir. Atık üretilmez, çünkü biyoyakıt ve odun kömürü kullanılabilir

ve gaz ürünler ise prosese yeniden gönderilebilir. Hızlı piroliz de geleneksel pirolize göre çok daha hızlı ısıtma yapılır. Piroliz prosesleri daha yüksek sıvı ürün verebilmek için dikkatli bir şekilde kontrol edilmektedir. Hızlı bir piroliz prosesinde kontrol edilmesi gereken dört farklı özellik vardır. İlk olarak çok yüksek ısıtma ve ısı transfer hızları kullanılır, ikincisi iyi bir şekilde kontrol edilen piroliz sıcaklığı bu sıcaklık genellikle 425 – 500 °C'dir. Üçüncü olarak ise kısa buhar alıkonma zamanı yaklaşık olarak 2 saniyeden daha düşük ve son olarakta piroliz buharları ve aerosoller bio-oili oluşturmak için hızlı bir şekilde soğutulmalıdır. Hızlı ısıtma ve hızlı soğutma piroliz sıvı ürünlerini oluşturur aksi takdirde bunlar yapılmazsa, uzun süre ısıyla muamele olan sıvı buharları içerisindeki yüksek molekül ağırlıklı türlerin parçalanarak gaz ürünlere dönüşmesine neden olmaktadır. Yüksek reaksiyon hızı odun kömürü oluşumunu en aza indirmektedir. Bazı şartlar altında ise hiç odun kömürü oluşmamaktadır. Daha yüksek sıcaklıklardaki hızlı piroliz işleminde ana ürün gaz olmaktadır (Fabgemi vd., 2001; Yanik vd., 2007; Yaman, 2004; Mohan vd., 2006; Bridgwater, 2006).

1.6.3.1.3. Flash Piroliz

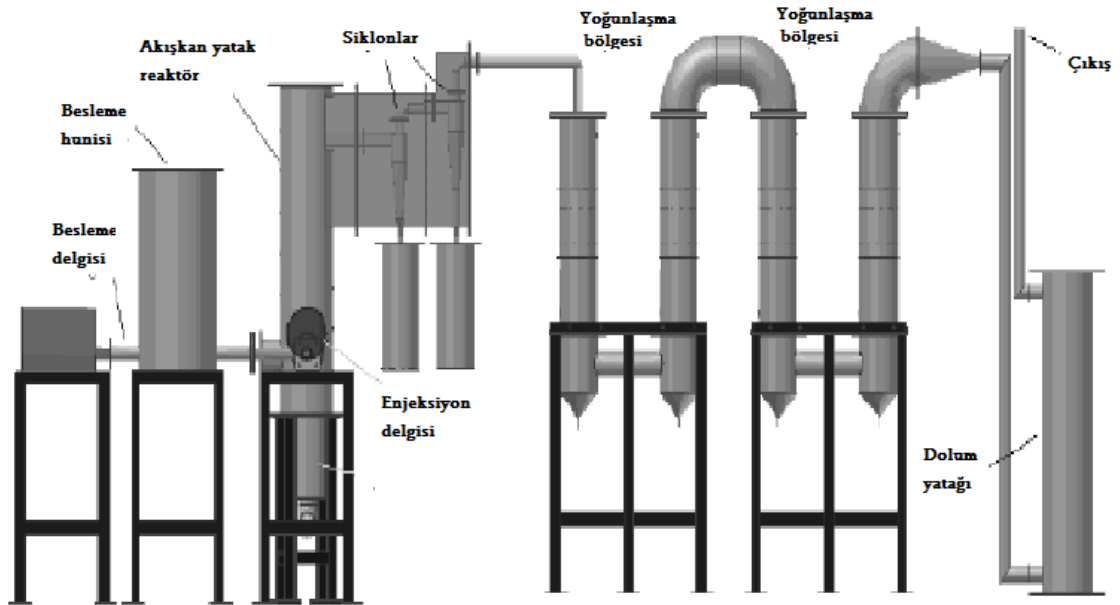
Flash piroliz, orta sıcaklıklar (400-600°C) ve yüksek ısıtma hızları (>2°C /sn) ile karakterize edilir. Buharın alıkonma zamanı genellikle 2 saniyeden azdır. Geleneksel piroliz ile karşılaştırıldığında sıvı ürün en yüksek seviyededir (Sadaka, 2009).

Maksimum sıvı ürün verimi yaklaşık olarak ıslak temelde % 85, kuru temelde % 70'dir. Flash piroliz işlemlerinden elde edilen sıvı ürün, biyokütlenin elementel bileşimine göre, oksijenlenmiş hidrokarbonların çok kompleks bir karışımıdır. Lignin, selüloz ve hemiselülozların bozunumu ile bu karışıklık daha da artar. Ürün bileşimi, sıcaklık, reaksiyon hızı, buharın reaktör içerisindeki alıkonma süresi, soğutma sıcaklığı ile ikincil reaksiyonları kontrol eden prosese son verme süresi ve piroliz sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Sıvı ürün genellikle katran, biyoyakıt ya da biyo hamyakıt olarak adlandırılır ve hidrokarbon yakıtlara dönüştürülebilir. Buradan elde edilen sıvı ürünler kazanlarda, ocaklarda ve motorlarda yakıt olarak kullanılabilir (Bridgwater, 1994).

1.6.3.2. Piroliz Reaktörleri

1970'lerin ortalarında petrol krizinden bu yana lignoselülozik biyokütleden sıvı ürün üretimini geliştirilmesi üzerine dikkatler toplanmıştır. Bu olay bazı hızlı piroliz tekniklerinin gelişmesine yol açmıştır. Tasarlanan bazı reaktör konfigürasyonları sıvı ürün veriminin kuru biyokütle temelinde %70-80'lerde olduğu görülmüştür. Bu tür reaktörler hava kabarcıklı akışkan yataklar, dolaşimli akışkan yataklar, konik reaktörler ve ablative reaktörlerdir.

Kabarcıklı akışkan yataklı reaktör; diğer reaktörlerle karşılaştırıldığında, akışkan yataklı reaktörlerin tasarımı ve yapımı daha basittir. İyi gaz katı teması, mükemmel ısı transfer özellikleri, daha iyi sıcaklık kontrolü ve büyük ısı depolama kapasitesi gibi pek çok avantajı vardır. Akışkan yatak pirolizi kuru besleme temelinde odundan, genellikle ağırlıkça %60-75 yüksek sıvı ürün verimliliği ile iyi ve tutarlı performans sunar. 2-3 mm'den küçük biyokütle parçacık boyutlarının yüksek biyokütle ısıtma hızlarını gerektirir. Iowa State Üniversitesi'nde geliştirilen akışkan yatak reaktörü Şekil 4'te verilmektedir (Tophanecioğlu, 2009).



Şekil 4. Iowa State University'nde yapılan akışkan yatak piroliz reaktörü

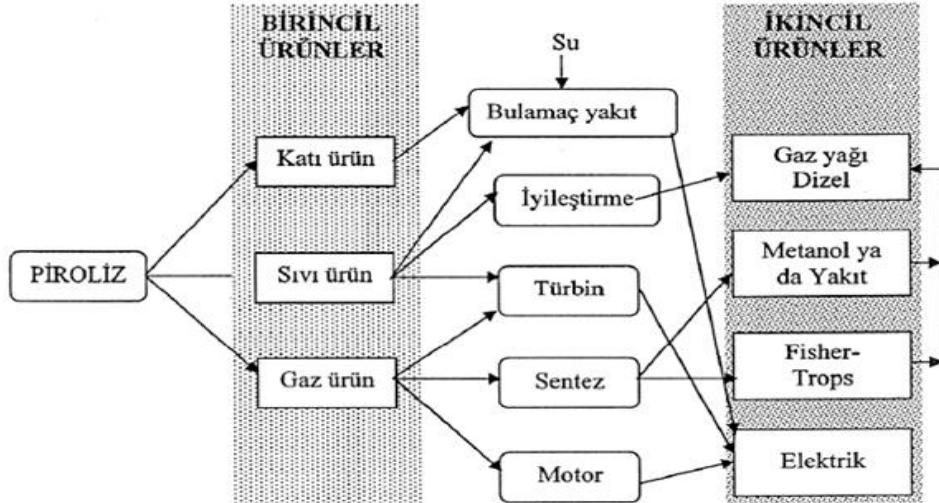
Dolaşımli akışkan yatak ve taşınmış yatak reaktörü; Dolaşımli akışkan yatak piroliz reaktörleri, kabarcıklı piroliz reaktörleri gibi benzer özelliklere sahiptir, fakat kömür ve buharın alıkonma süreleri daha hızlıdır. Kabarcıklı akışkan yatak piroliz reaktörü ile karşılaştırıldığında, buhar ve kömür, daha yüksek gaz hızları nedeniyle, daha hızlı olur. Böylece bio-oildeki kömür içeriği daha fazladır. Dolaşımli akışkan yatak piroliz reaktörü yüksek proses kapasitesi, daha iyi gaz-katı teması sağlamalıdır, yoksa akışkan yatağı akışkanlaştırmak güç olabilir. Bu avantajlarına rağmen dolaşımli akışkan yataklar daha az kullanılmaktadır (Sadaka, 2009).

Ergiten (ablative) piroliz reaktörü; Diğer hızlı piroliz türleriyle karşılaştırıldığı zaman ablative piroliz oldukça farklıdır. Diğer piroliz türlerinde ısı transferi daha önemli olduğu için parçacık büyüklüğü oldukça küçük seçilmekteydi. Halbuki ergiten pirolizde reaksiyonun durumu kızartma tavası içerisindeki yağa benzediğinden erime hızı yağın bastırılmasıyla ve tava üzerinde yağın ileri geri hareket ettirilmesiyle önemli ölçüde artırılabilir. Ergiten pirolizde, ısı sıcak reaktörden basınç altında tutulan oduna aktarılmaktadır, yani piroliz basınç altında gerçekleşmektedir. Odun mekanik olarak hareket ettirildiği için piroliz sırasında oluşan sıvı ürünler odun altında bir yağlayıcı olarak davranarak odunun hareketini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda sıcak tavayla temas eden piroliz sıvısı hızlı bir şekilde buharlaşır ve bu buharlar diğer hızlı piroliz yöntemlerinde olduğu gibi yoğunlaştırılıp toplanmaktadır. Reaksiyon hızı basınç, odunun besleme hızı, ısı değiştirici yüzeyi ve reaktör yüzey sıcaklığıyla önemli ölçüde değişmektedir. (Bridgwater, 2006).

Döner konik reaktör; Döner konik reaktör “University of Twente”de geliştirilmiştir, gaz-katı teması döner konik reaktörde sağlanmıştır. Oda sıcaklığında biyokütle parçacıkları ve sıcak kum parçacıkları katıların karıştırıldığı koninin altı yakınlarında temas ettirilir ve koninin dönme hareketi ile yukarı taşınır. Bu tür reaktörlerde hızlı ısıtma ve kısa gaz alıkonma zamanı sağlanmalıdır. Basınç, atmosfer seviyelerinin hemen üstündedir. Başlangıçta sürüklenen biyokütle, yüzeysel olarak reaktöre girer ve böylece parçacıklar elektrikle 1000 °C sıcaklığa ısıtılan siklon duvarına karşı santrifüjenir (Sadaka, 2009).

1.6.3.3. Piroliz Ürünleri

Termokimyasal dönüşüm yöntemlerinden biri olan piroliz işlemi sonucunda elde edilen birincil ürünler katı, sıvı ve gaz üründür. Katı ürün karbon içeriği bakımından zengindir. Sıvı ve gaz ürün ise biyokütlenin pirolizi sonucu biyokütleden ayrılan uçuculardır. Katı, sıvı ve gaz ürünlerin miktarları kullanılan biyokütleyle uygulanan piroliz koşullarına göre farklılık gösterir. Pirolizden elde edilen birincil ürünler, doğrudan doğruya kullanılabileceği gibi, saflaştırma işlemlerinden sonra ikincil ürünlere dönüştürülerek de kullanılabilir. Elde edilen ürünler çeşitli kimyasal bileşikler veya yakıtlardır (Bridgwater ve Cottom, 1992).



Şekil 5. Piroliz sonucu elde edilen birincil ve ikincil ürünler (Bridgwater and Cottom, 1992).

1.6.3.3.1. Katı Ürünler

Pirolizden elde edilen katı ürün, genellikle gözenekli bir yapıya sahiptir ve karbon içeriklerinin yüksekliği nedeniyle doğrudan veya bir aktifleşme basamağının ardından aktif karbon olarak değerlendirilebilir. Char veya odun kömürü olarak da bilinen katı ürün, inorganik maddeleri, organik bileşiklerin ısıl bozunmasından elde edilen karbonlu atıkları ve dönüşüme uğramayan organik atıkları içermektedir. Kimyasal bileşimi piroliz koşullarına bağlıdır (Yaman, 2004).

Piroliz, aktif karbon üretiminde kullanıldığında kuru beslemenin ağırlıkça % 30-40'ı oranında ürün verimi sağlamaktadır. Katı ürün, yavaş piroliz yolu ile günler ya da saatler süren reaksiyonla elde edilmektedir (Beenockers ve Bridgwater, 1989). Ürünün ısıl değeri 22-28 MJ/kg ve kül içeriği ise biyokütleyle bağlı olarak % 2-20 arasında değişmektedir. Hızlı veya flash piroliz işlemlerinde çok yüksek ısıtma hızlarında çok düşük katı ürün verimi elde edilmektedir. Katı ürün metalurjide (bakır, bronz, çelik, nikel ve elektromanganez üretiminde) ve kimya endüstrisinde (CS₂, CO, Ca₂C, SiC, sodyum siyanat, aktif karbon, karbon siyahı, gübre ilacı üretimi) kullanım alanı bulmaktadır (Bridgwater ve Bridge, 1991). Katı ürün esas olarak karbon ve hidrojen içerir. Bunun yanında inorganik kısım da içermektedir (Goyal vd., 2008).

1.6.3.3.2. Sıvı Ürünler

Elde edilen sıvı ürünün piroliz sıvısı, biyo-yakıt, biyo-ham yakıt, biyo yakıt odun sıvısı, odun distilatı, pirolitik katran olmak üzere birçok ismi bulunmaktadır. Ham piroliz sıvısı koyu kahverengi, kompleks yapıda oksijenli hidrokarbonlarla, yüksek miktarda su içeren bir sıvıdır. Biyoyakıtın içerisinde bulunan asılı katı, alkali metaller, düşük pH, yüksek viskozite, su içeriği, yüksek sıcaklıkta bozunma gibi olumsuz özellikleri bulunmaktadır. Bundan dolayı petrolden türeyen yakıtlar ile odunun pirolizinden elde edilen biyo-yakıt elementel bileşimi arasında farklılıklar vardır (Zhang vd., 2006).

Hızlı piroliz sıvısının yaklaşık olarak % 25'i sudan oluşmaktadır ve bu su kolayca piroliz sıvısından ayrılamamaktadır. Bu sıvının ısıl değeri oldukça yüksektir yaklaşık olarak 16–17 MJ/kg'dır. Piroliz sıvısı içerisinde çok sayıda oksijenlenmiş türler ihtiva ettiği için kullanımı sırasında bazı zorluklar teşkil etmektedir. Biyokütleden elde edilen piroliz sıvısı herhangi bir hidrokarbon yakıtla karışmamaktadır (Bridgwater, 2006).

Biyokütle pirolizinden elde edilen sıvı yakıt, organik kısmının yanı sıra inorganik kısımda içerir. Biyoyakıtta sözü geçen organik kısımlar aşağıda verilmiştir:

- Asitler: Formik, asetik, propanoik, hekzanoik, benzoik vb.
- Esterler: Metil format, metil propionat, butyrolactone, metil bütirat vb.
- Alkoller: Metanol, etanol, 2-propen-1-ol, izobütanol vb.

- Ketonlar: Aseton, 2-bütanon, 2 pentanon, 2-siklopentanon, 2,3 pentendion, 2-hekzanon, siklo-hekzanon vb.
- Aldehitler: Formaldehit, asetaldehit, 2-bütenal, pentanal, etandial vb.
- Fenoller: Fenol
- Alkenler: 2-metil propen, dimetilsiklopenten vb.
- Aromatikler; benzen, toluen, ksilen, naftelen, fenantren vb.
- Azotlu bileşikleri: Amonyak, metilamin, piridin, metilpridin vb.
- Furanlar: Furan, 2-metilfuran, furfural vb.
- Gayakoller: 2 metoksi fenol, 4-metil gayakol, etil gayakol vb.
- Şekerler: Levoglükosan, glükoz, fruktoz vb.

Biyoyakıtların inorganik kısmında ise Ca, Si, K, Fe, Al, Na, S, P, Mg, Ni, Cr, Zn, Li, Ti, Mn, Ln, Ba, V, Cl vb. bulunur (Goyal vd., 2008).

1.6.3.3.3. Gaz Ürünler

Pirolizden elde edilen gaz ürün kompleks ısıl parçalanma proseslerinden elde edilen doymuş (metan gibi), doymamış hidrokarbon karışımları ve gazları (H₂, CO gibi) içerir. Bileşim olarak H₂, CO₂, CO, CH₄, H₂O ve organik bileşimlerinin buharlarından oluşur. Genellikle biyokütle kükürt içermediğinden SO_x gibi çevreye zararlı ürünler piroliz sonunda oluşmaz. Elde edilen gaz ürün; güç santrallerinde, ısıtma işlemlerinde ve beslemenin kurutulmasında kullanılabilir. Gaz bileşimi; besleme bileşimi, su içeriği, reaksiyon sıcaklığı ve piroliz ürünlerinin yükseltgenme derecesi gibi birçok faktörden etkilenir (Bridgwater, 2003).

1.6.3.4. Piroliz Ürün Verimini Etkileyen Faktörler

Piroliz sıcaklığı başta olmak üzere ısıtma hızı, sürükleyici gaz akış hızı, basınç, parçacık boyutu, piroliz ortamı, katalizör, reaktör geometrisi ve reaksiyon süresi piroliz verimlerini etkileyen parametrelerdir. Bunun yanında biyokütlenin organik-inorganik yapısı, nem içeriği, gözenekliliği, kül miktarı, uçucu bileşen miktarı, ısı değeri, sabit karbon/uçucu madde oranı, selüloz/lignin oranı gibi özellikleri de piroliz ürün verimlerini etkilemektedir (McKendry 2002; Klas 1998).

1.6.3.4.1. Sıcaklık

Sıcaklık, uçucu madde miktarı ve bileşimini etkileyen en önemli parametredir. Katı, sıvı ve gaz miktarları piroliz sıcaklığı ile değişmekte ve bunların kimyasal bileşimlerinde de farklılıklar meydana gelmektedir. Sıcaklığın artmasıyla, sıvı ve katı ürünün H/C ve O/C oranlarının azaldığı belirlenmiştir (Li et al., 1999).

Reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak piroliz prosesleri endotermik veya ekzotermik olabilir. Biyokütle hammaddeleri selülozik yapılar içermektedir. Prosesin gerçekleşmesi için gerekli enerji beslemeden veya katı üründen sağlanmaktadır. Düşük sıcaklıklarda meydana gelen reaksiyonlar piroliz hızı kontrollü, yüksek sıcaklıklarda ise kütle transferi kontrollü olarak gerçekleşmektedir (Chen vd., 2003).

1.6.3.4.2. Isıtma Hızı

Biyokütle pirolizinde, piroliz ürünlerinin dağılımını ve kimyasal bileşimini etkileyen önemli değişkenlerden biridir. Ancak ısıtma hızının tek başına piroliz ürünlerine etkisi oldukça azdır. Bu nedenle değerlendirilirken alıkonma süresi ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ele alınmalıdır. Buna göre, yüksek ısıtma hızlarında, kısa ve orta alıkonma sürelerinde; yüksek sıcaklıklarda maksimum gaz ürün verimi elde edilirken; düşük sıcaklıklarda maksimum sıvı ürün verimi elde edilir. Düşük ısıtma hızlarında ve uzun alıkonma sürelerinde; düşük sıcaklıklarda sıvı ve katı ürün verimleri birbirine yakın, gaz ürün verimi ise düşüktür; yüksek sıcaklıklarında ise gaz ürün verimi, katı ve sıvı ürüne göre biraz daha fazladır (Bridgwater et al., 2002).

1.6.3.4.3. Alıkonma Zamanı

Alıkonma zamanı piroliz sırasında oluşan buharların piroliz ortamında tutulma süreleridir. Bu süre ne kadar kısaltılırsa sıvı ürün verimi o oranda fazla olmaktadır. Piroliz buharlarının ortamdaki hızlı bir şekilde uzaklaştırılması, gaz ürün oluşmasına neden olan ikincil reaksiyonların gerçekleşmesini engeller. Aynı zamanda koklaşmayı da engelleyerek katı ve gaz ürün veriminin azalmasını ve sıvı ürün veriminin artmasını sağlamaktadır. Alıkonma zamanı kullanılan pirolizin türüne bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Eğer piroliz işleminde hedeflenen ürün sıvı ürün ise hızlı, ultra ve flash piroliz türleri kullanılacaktır ve bu tür pirolizler de alıkonma zamanı 10 s'den daha düşük tutulmalıdır (Mohan vd., 2006; Bridgwater, 2006; Lede vd., 2006; Tsai vd., 2007; Uzun vd., 2006; Gerçel ve Pütün, 2002).

1.6.3.4.4. Sürükleyici Gaz Akış Hızı

Sürükleyici gaz akış hızı piroliz için önemli bir etkidir. Sürükleyici gaz akış hızının yüksek olması piroliz buharlarının ortamdaki daha hızlı bir şekilde ikincil reaksiyonların gerçekleşmesine izin vermeden ortamdaki uzaklaşmasını sağlar ve bunun sayesinde sıvı ürün verimi yüksek olur. Fakat sürükleyici gaz akış hızının iyi ayarlanması gerekmektedir, eğer sürükleyici gaz akış hızı çok yüksek olursa oluşan buharları hızlı bir şekilde soğutma sistemine gönderilir ve soğutma sisteminde bu buharların tutularak yoğunlaşması zorlaşacaktır. Piroliz işleminde genellikle sürükleyici gaz olarak azot gazı kullanılmaktadır. Piroliz sıcaklığı üzerine sürükleyici gaz akış hızının belirlenmesi için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Putun vd., 2001; Putun vd., 2006; Koçkar vd., 2000; Pütün vd., 2001; Gerçel ve Pütün, 2002; Pütün vd., 2005; Gerçel, 2002; Açıkgöz vd., 2004; Tsai, 2007; Şensöz ve Angın, 2008).

1.6.3.4.5. Basınç

Basınç da uçucu verimini etkiler. Yüksek basınçlar verimi düşürürken, düşük basınç ise artırır. Bununla beraber yüksek basınç kreaking reaksiyonlarını artırır ve böylece uçucu hidrokarbon gazlarının artmasına neden olur. Bunun tersi de mümkün olup düşük basınçlarda katran ve hafif yağların verimleri daha fazladır (Bridgwater, 1996). Basıncın

etkisi, piroliz sıcaklığı yaklaşık 350 °C'nin üzerinde iken gözlemlenebilir. Daha yüksek basınçlar, reaksiyon bölgesinde uçucuların alıkonma zamanını arttırır, böylece parçalanma reaksiyonları nedeni ile sıvı ürün verimi azalır, düşük molekül ağırlıklı gaz ürün verimi artar. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda, gaz-katı reaksiyonları oluşur. Düşük basınç ve düşük alıkonma zamanında, katran molekülleri ve ağır sıvı ürünler daha ileri bozunma tepkimelerine girmeden ortamdaki uzaklaşır. Gaz ürünler, katı kalıntı (char) ile tepkimeye girmeden önce uzaklaşır (Sadaka, 2009).

1.6.3.4.6. Katalizör

Katalizör kullanımı genel olarak sıvı ürün verimini arttırmaktadır. Deneysel çalışmalarda kullanılan alkali katalizörler C-C bağlarını zayıflatarak kararlı kimyasal yapıların oluşumunu önlemektedirler. Alkali katalizörler polimerik zincirlerin moleküller arası etkileşimlerinin zayıflamasına neden olmaktadır (Rustamov, et.al, 1998).

Hızlı pirolizden elde edilen ürünler, katalizör kullanımıyla daha yararlı ikincil ürünlere dönüştürülebilmektedir. Doğal katalizörlerin kullanılmasıyla yüksek verimde kimyasal ürünler elde edilmiş, fakat bu katalizörlerin ortamdaki uzaklaştırılması, ürün verimi ve bileşimini olumsuz yönde etkilemiştir. Bunların yerine zeolit katalizörleri varlığında piroliz buharları katalitik olarak parçalandığında, benzin ve dizel yakıt kaynama aralığında aromatik ve diğer hidrokarbon ürünleri elde edilmiştir (Bridgwater, 1996).

1.6.3.4.7. Piroliz Ortamı

Biyokütlenin pirolizi normal (statik), sürükleyici gaz (N₂, He, Ar, gibi), hidrojen (hidropiroliz) ve su buharı ortamlarında gerçekleştirilebilir. Farklı ortamların kullanılması ürünlerin miktar ve kalitesini etkilemektedir. Sürükleyici gaz olarak N₂, He gibi gazlar kullanılmaktadır. Sürükleyici gaz ortamında sıvı ürün veriminin, statik piroliz ortamına göre, arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, sürükleyici gaz, piroliz sırasında meydana gelen piroliz buharlarını hızlı bir şekilde ısı parçalanma, polimerleşme ve yoğunlaşma gibi ikincil reaksiyonlara girmeden uzaklaştırmakta ve sıvı ürün veriminde artış sağlamaktadır.

Hidrojen ortamında gerçekleştirilen hidropiroliz sonucunda uçucu madde miktarı ve düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonların miktarı artar. Isıl bozundurmada ortama katılan

hidrojen, birincil ürünler ve bozulan organik madde ile arta kalan katı üründen daha hızlı reaksiyona girerek uçucu madde miktarını arttırmakta ve ortamdaki serbest radikalleri kararlı hale getirerek, ikincil reaksiyonların oluşumunu engellemektedir (Barth, 1999).

Su buharı ortamının piroliz ürün dağılımına olumlu etkileri vardır. Su buharı hidrojen bağlarını kırarak, polimerleşmeyi önlemekte ve uçucu maddelerin desorpsiyonunu hızlandırarak sıvı ürün miktarını arttırmaktadır. Su buharının etkisi verim artışının yanı sıra ürün dağılımını polar yapıdan alifatik ve daha az nötral aromatik yapıya kaydırmaktadır (Ayan, 2011).

1.6.3.4.8. Parçacık Boyutu

Parçacık boyutunun düşük olması piroliz işlemi sırasında örnekle reaktör arasındaki ısı transferini artırdığı için piroliz de parçacık boyutu genellikle 2 mm'den daha düşük olarak seçilmektedir. Diğer taraftan 2 mm'den daha yüksek parçacık boyutu ısı transferini azalttığı için piroliz işleminde pek tercih edilmemektedir. Parçacık boyutunun piroliz ürün verimi üzerine etkisini araştırmak için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Onay ve Kockar, 2003; Zhang vd., 2008; Beis vd., 2002; Açıkgöz, 2004; Uzun vd., 2006; Pütün vd., 2005; Pütün vd., 2004).

1.7. Literatür Özetleri

Keleş (2009) tarafından yapılan çalışmada değişik deneysel şartlar altında sabit yataklı bir reaktör içerisinde fındık kupulasının hızlı pirolizi incelenmiştir. Sabit yataklı bir reaktör içerisinde fındık kupulasına uygulanan hızlı piroliz deneyleri sonucunda ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutunun etkileri araştırılmıştır. Deneyler 200 °C/dak ısıtma hızında 400, 500, 600 ve 700 °C piroliz sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda piroliz ürün veriminin büyük ölçüde piroliz sıcaklığına bağlı olduğu gözlenmiştir ve piroliz sıvısının maksimum verimle elde edildiği, en uygun piroliz sıcaklığı 600 °C olarak belirlenmiştir. Hızlı pirolizden elde edilen sıvı ürün verimini artırmak için sabit yataklı reaktör içerisinde katalizörlü deneyler gerçekleştirilmiş ve katalizör olarak ZnO kullanılmıştır. Katalitik deneyler azot atmosferi altında 200 °C/dak ısıtma hızında, 0,250–0,150 mm parçacık boyutunda ve 400, 500, 600

ve 700 °C piroliz sıcaklıklarında gerçekleştirilmiş ve hammaddeye değişik oranlarda katalizör ilave edilerek ürün verimi ve bileşimi üzerine katalizörün etkisi incelenmiştir.,

Pütün ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan bir çalışmada endüstriyel bir atık olan patates kabuklarının üç farklı atmosferde (statik,azot ve buhar) pirolizi yapılarak biyoyağ verimleri araştırılmıştır. Statik atmosferdeki ürün verimi 550 °C 'de % 24,77 azot atmosferinde ise % 27,11 ve en yüksek verim ise buhar atmosferinde 1,3 cm/sn hızında % 41,09 oranında elde edilmiştir.

Encinar ve arkadaşları (2008) tarafından yapılan bir çalışmada 0 ve 100 g. arasında değişen atık zeytin yağı örnekleriyle 500 ve 800 °C arasında katalizörlü (dolomit) ve katalizörsüz ortamda sıcaklığın ürün verimlerine etkisi araştırılmıştır.Çıkan sonuca göre, katalizörlü ya da katalizörsüz ortamda sıcaklığın artırılmasıyla beraber katı ve sıvı ürün veriminde azalma ancak gaz ürün veriminde ise her iki ortamda da artış görülmüştür.Katalizörlü ortamda sıcaklık artırıldığında sıvı ürün veriminde önemli oranda düşüş fakat gaz ürün veriminde ise epeyce bir yükseliş görülmüştür.

Kanmaz (2011) tarafından yapılan çalışmada çam talaşının hızlı pirolizine, çeşitli piroliz parametrelerinin (reaksiyon süresi, piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutu) etkisi araştırılmıştır. Maksimum sıvı ürün verimi, 5 dak reaksiyon süresinde, 500 °C piroliz sıcaklığında, 300 °C /dak ısıtma hızında, 400 cm³/dak azot akış hızında ve 0,85>Dp>0,6 mm parçacık boyutu aralığında elde edilmiştir. Bu koşullarda elde edilen maksimum sıvı ürün verimi % 42,09 olarak bulunmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde ise, elde edilen sıvı ürünün kalitesini arttırmak için çam talaşının katalitik pirolizi gerçekleştirilmiş; katalizör cinsinin ve sıcaklığının ürün verimlerine ve bileşimlerine olan etkisi araştırılmıştır. Çeşitli spektroskopik ve kromatografik yöntemler kullanılarak, elde edilen piroliz sıvı ürünlerinin karakterizasyonu yapılmıştır.

Ayan (2011) tarafından yapılan çalışmada Üzüm küspesinin enerji kullanımı açısından araştırılması için sabit yatak reaktöründe pirolizi gerçekleştirilmiş, katı ve sıvı ürünlerin karakterizasyonu yapılmıştır. Piroliz deneyleri iki asamada gerçekleşmiştir. İlk olarak, ısıtma hızı (10, 30, 50 °C/dk), piroliz sıcaklığı (350, 400, 450, 500, 550, 600 °C), parçacık boyutu ve sürükleyici gaz akış hızı (50, 100, 150, 200 cm³/dk) gibi piroliz parametrelerinin piroliz ürün verimlerine etkisi incelenmiştir.

Zhang ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan bir çalışmada akçam biyokütle örneğinden akışkan yataklı bir reaktörde pirolizi ile CaO'in biyoyağ üzerinde deoksidasyon etkisi araştırılmıştır.Biyoyağ örnekleri 520 °C'de 50 L/dak sürükleyici gaz hızında Cao

eklenerek ve CaO eklenmeden elde edilmiştir. CaO/Biyokütle oranı kütlece 5 olduğunda % 21 ile en yüksek deoksidasyon oranına ulaşılmıştır. Detaylı gaz kromatografisi ve kütle spektrometrisine göre levoglukoz, formik asit ve asetik asitteki göreceli oksijen CaO tarafından azalmıştır.

Pütün ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan bir çalışmada pamuk çekirdeği küspesinin farklı piroliz şartlarında katalitik pirolizi gerçekleştirildi. İncelenen bu değişkenler piroliz sıcaklığı, zeolit içeriği ve sürükleyici gaz akış hızıdır. Deneyler izotermal olarak gerçekleştirildi. Piroliz ürünleri olarak sıvı, gaz ve odun kömürü elde edilmiştir. Dört farklı piroliz sıcaklıklarında bu ürünlerin dağılımı ağırlıkça katalizör içeriklerine göre araştırıldı (ağırlıkça katalizör içeriği % 1, 5, 10 ve 20). Maksimum sıvı ürün verimi 500 °C sıcaklıkta 100 cm³/dak sürükleyici gaz akış hızında ve ağırlıkça % 20 clinoptilolite katalizörü varlığında % 30,84 olarak elde edildi.

Koçkar ve çalışma arkadaşları (2000) tarafından fındıkkabuğu örneklerine sabit yataklı bir reaktör içerisinde yavaş ve hızlı piroliz uygulandı. Deneyler iki farklı piroliz reaktöründe gerçekleştirildi. Bunlardan ilki sabit yataklı hainze reaktörü ve diğeri ise sabit yataklı borusal reaktör. Çalışmada piroliz ürün verimleri ve kimyasal bileşim üzerine ısıtma hızı, piroliz sıcaklığı, parçacık boyutu ve sürükleyici gaz akış hızının etkileri araştırılmıştır. Heinze reaktöründe 7 °C/dak ısıtma hızında, 550 °C piroliz sıcaklığında, parçacık boyutunun $0,85 < D_p < 1,8$ mm ve sürükleyici gaz akış hızının 100 cm³/dak olduğu şartlarda piroliz sıvı ürün verimi % 22,5 ile maksimum olarak elde edildi. Sabit yataklı reaktörde ise 300 °C/dak ısıtma hızında sürükleyici gaz atmosferinde elde edilen maksimum sıvı verimi ise % 34 olmuştur. Fındık kabuğunun piroliz işlemlerinde elde edilen sıvı ürünlerin yenilenebilir yakıt ve kimyasal madde eldesinde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Lede ve arkadaşları (2007) tarafından biyokütle üzerine bir çalışma yapıldı. Bu çalışmada gerçekleştirilen piroliz deneyleri duvardan ısıtılan bir siklon reaktör içerisinde gerçekleştirildi. Maksimum sıvı ürün verimini elde etmek için piroliz sıcaklığı 900 K ve 983 K olarak seçildi. Bu şartlarda elde edilen ürünler sırasıyla sıvı ürün için % 74, gaz ürün için % 16 ve katı ürün için ise % 10 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sıvı ürünler soğutucu kaplarda toplandı.

Ioannidou ve çalışma arkadaşları (2009) mısır saplarının pirolizini incelemişlerdir. Bu çalışmada mısır sapları ve mısır koçanının termogravimetrik analizleri, TGA verilmiştir. Her iki biyokütle örneği için iki farklı reaktör tasarımı kullanılarak piroliz

deneyleri gerçekleştirildi. Bunlardan ilki örnek yakalayan bir reaktör içerisinde hızlı piroliz ve ikincisi ise, sabit yataklı bir reaktör içerisindeki yavaş ve katalitik pirolizdir. Deneyler atmosfer basıncında üç farklı sıcaklıkta gerçekleştirildi. Düşük sıcaklık (360–380 °C), orta sıcaklık (500–600 °C) ve yüksek sıcaklık (600–700 °C). Mısır saplarının yüksek sıcaklıklarda gazlaştırma ile enerji üretimi için uygun bir hammadde olduğunu belirlemişlerdir, çünkü elde edilen piroliz gazı 13–15 MJ/m³ gibi orta düşük ısıl değere (LHV) sahiptir. Mısır koçanları ise yüksek düşük ısıl değere (24- 26 MJ/m³) sahip olduğu tespit edilmiştir.

Gerçel ve Pütün (2002) ayçiçeği küspesi için piroliz deneyleri gerçekleştirdiler. Preslenmiş ayçiçeği küspelerine uygulanan piroliz deneyleri sabit yataklı borusal bir reaktör içerisinde gerçekleştirildi. Piroliz ürünleri ve kimyasal bileşimleri üzerine azot akış hızı ve piroliz sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Maksimum sıvı ürün verimi 5 °C /saniye ısıtma hızında, 550 °C piroliz sıcaklığında, 50 cm³/dak azot gazı akış hızında ağırlıkça % 52,85 olarak elde edilmiştir. Yapılan kimyasal karakterizasyon deneyleri bu biyokütle örneğinden elde edilen sıvı ürünün yakıt ve kimyasal madde üretiminde bir hammadde olarak kullanılmasının faydalı olacağı kanısına varılmıştır.

Yamaguchi ve arkadaşları (2006) selüloz için piroliz deneyleri yaptılar. Selüloza uygulanan piroliz deneyleri sürekli akışlı diferansiyel bir reaktör içerisinde gerçekleştirildi. Bu tür reaktörde katı ürün ve gaz ürünler reaksiyon zamanına göre fraksiyonlara ayrılabilir. 673 K'de selülozun pirolizinde hem sıvılar için hem de hafif molekül ağırlıklı gazlar için benzer davranışlar tespit edilmiştir.

Pütün ve arkadaşları (2005) biyokütle örnekleri için piroliz deneyleri yaptılar. Bu çalışmada, pamuk saplarının pirolizi ve bu pirolizden elde edilen sıvı ve katı ürünlerin yapılarını ve miktarlarını belirlediler. 400–700 °C piroliz sıcaklıklarında, 0,25 mm'den 1,8 mm'ye kadar değişen parçacık büyüklüklerinde ve 50'den 400 cm³/dak akış hızlarında piroliz deneyleri gerçekleştirildi. Tüm deneyler 7 °C/dak ısıtma hızında gerçekleştirildi. Partikül büyüklüğü ve azot akış hızı önemli ölçüde piroliz verimlerini etkilediğini tespit etmişlerdir. Sıvı ürünler ve pentanda çözünebilir kısım elementel analiz, FT-IR spektroskopisi ile analiz edildi ve pentan alt fraksiyonları gaz kromatografisi ile analiz edildi. Odun kömüründe sıcaklığın artmasıyla H/C ve O/C oranlarının azaldığı gözlemlendi. FT-IR sonuçları yüksek sıcaklıklarda hidroksil ve karbonil fonksiyonel gruplarının kaybolduğunu göstermişlerdir.

Özbay ve arkadaşları (2006) pamuk çiğili küspesi üzerine yapılan sabit yataklı hızlı piroliz deneylerinde sıvı ürünün piroliz verimleri ve kimyasal bileşimi üzerine piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve sürükleyici gaz akış hızının etkisi belirlenmiştir. Sıvı ürünler ve pentanda çözünen alt fraksiyon elementel analiz, FT-IR, H-NMR ve pentan alt fraksiyonu gaz kromatografisi ile analiz edildi. Maksimum sıvı ürün verimi 500 °C piroliz sıcaklığında, 700 °C /dak ısıtma hızında ve 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 34,8 olarak belirlenmiştir.

Uzun ve arkadaşları (2007) yaptıkları bu çalışmada biyokütlenin ısı bozunmasını incelemişlerdir. Sabit ısıtma hızında (300 °C /dak) farklı piroliz sıcaklıklarında (400, 500, 550 ve 700 °C) biyokütlenin termal bozunmasında elde edilen ürünlerin analizleri yapılmıştır. Sıvı ürünün kalorifik değeri hesaplandı ve hammaddeninkiyle karşılaştırıldı. Değişik piroliz sıcaklıklarında elde edilen sıvı ürünler asfaltenler uzaklaştırıldıktan sonra kolon kromatografisine maruz bırakılmıştır. Elde edilen bio-oil alifatik, aromatik ve polar alt gruplara ayrılmıştır. Odun kömürünün analizleri yapıldı, H/C ve O/C oranları incelendi.

Demirbaş (2004) tarafından biyokütlenin pirolizi üzerine nemin etkisi ile ilgili bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada ladin odunu, fındikkabuğu ve buğday sapının geleneksel pirolizinden elde edilen sıvı ürünlerin başlangıç nem içeriklerinin etkisi araştırılmıştır. Toplam sıvı ürün içerikleri piroliz sıcaklığının 573 den 700 K' e çıkarılmasıyla ladin odunu için (nem içeriği % 6,5) % 8,4 'den % 33,7'ye, fındikkabuğu için (nem içeriği % 6) 6,7'den % 30,7'ye ve buğday sapları (nem içeriği % 7) için % 6,2 den % 27,4'e yükseldiği gözlenmiştir. Sıcaklığın 600 K'den 689 K'e yükselmesiyle toplam sıvı ürün verimi azot ortamında ladin odunu için (nem içeriği % 60,5) % 17,2'den % 37,2'ye yükseldiği gözlenmiştir. Aynı şartlarda nem içeriği % 0 olduğu durumda ladin odunu için elde edilen sıvı ürün yüzdeleri ise % 12,6'dan % 26,7'ye yükseldiği. Nem içeriği % 30,7 olan fındikkabuğu için piroliz sıcaklığının 600'den 703 K'e çıkarılmasıyla elde edilen toplam sıvı ürün yüzdesi % 14,6'dan % 35,9'a ve nem içeriğinin % 0 olduğu durumda ise fındikkabuğu için elde edilen toplam sıvı ürün verimi % 10,8'den % 23,8'e yükseldiği belirlenmiştir. Nem içeriği % 34,7 olan buğday saplarının piroliz sıcaklığının 600'den 693 K'e çıkarılmasıyla elde edilen toplam sıvı ürün verimi % 12,1 den % 33,6'ya yükseldiği, nem içeriğinin buğday sapı için % 0 olduğu durumda ise bu oran % 10,3'den % 23,0'a yükseldiği gözlenmiştir. Sonuçta nem içeriğinin değişmesi pirolizden elde edilen ürünlerinde önemli ölçüde değişmesine neden olduğunu belirlemiştir.

Zansi ve arkadaşları (2007) biyokütlenin pirolizi üzerine deneysel bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada pilot tesis olarak düşünülmüş serbest düşüslü bir reaktör içerisinde zeytin ve buğday atıkları gibi tarımsal biyokütle örneklerinin yüksek sıcaklıkta (800 -1000 °C) hızlı pirolizleri incelenmiştir. Bu çalışmada, yüksek sıcaklıklarda ürün dağılımı üzerine ısıtma hızı, piroliz sıcaklığı ve parçacık boyutu gibi proses değişkenlerinin değiştirilmesiyle nasıl değiştiğini belirlemiştir.

Tsai ve arkadaşları (2007) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise laboratuvar ölçekli bir hızlı piroliz sistemi kullanılarak tarımsal bir atık olan pirinç kabuklarının pirolizi gerçekleştirildi. Bu çalışmada ürün verimleri ve kimyasal bileşimleri üzerine piroliz sıcaklığı, alıkonma zamanı, sürükleyici gaz akış hızı, yoğunlaştırma sıcaklığı ve parçacık boyutu gibi özelliklerin etkisi incelenmiştir. En uygun piroliz şartlarında elde edilen sıvı ürün verimi % 40 olduğunu belirlediler. Elde edilen sıvı ürünlerin yapısını aydınlatmak için elementel, kalorifik, kromatografik ve spektroskopik yöntemler kullanılmıştır.

Şensöz ve Angın (2008) tarafından yapılan bir çalışmada safran tohum küspesinin sabit yataklı bir reaktörde pirolizi gerçekleştirildi. Ürün verimleri üzerine piroliz sıcaklığı, ısıtma hızı ve sürükleyici gaz akış hızının etkisi incelenmiştir. Piroliz işlemleri 400–600 °C sıcaklık aralığında ve 10, 30 ve 50 °C/dak ısıtma hızlarında gerçekleştirildi. Elde edilen katı, sıvı ve gaz verimleri sırasıyla katı için ağırlıkça % 25 ve % 34 arasında, sıvı ürün verimi % 28 ve % 36 arasında ve gaz ürün verimi ise % 19 ile % 25 arasında değiştiği gözlenmiştir. Maksimum sıvı veriminin elde edildiği şartlar sürükleyici gaz olarak kullanılan azot gazının akış hızı 100 cm³/dak, ısıtma hızı 50 °C/dak ısıtma hızında ve 500 °C piroliz sıcaklığı olduğu belirlendi. Bu çalışmada bu şartlarda elde edilen sonuçlara göre; piroliz sıcaklığının ve sürükleyici gaz akış hızının etkisi ısıtma hızının etkisinden daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.

Strezov ve çalışma arkadaşları (2008) bol bulunan ve hızlı büyüme özelliğine sahip olan elephant bitkisinin yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak önemli bir potansiyele sahip olduğunu ve ısıl dönüşümle yüksek kalorili değerli bir yakıtla dönüştürülebileneceğini düşünmüşlerdir. 10 ve 50 °C/dak olan iki farklı ısıtma hızı ile elephant bitkisine, biyogaz, piroliz sıvısı ve odun kömürü elde etmek için termal dönüşüm prosesi uygulanmıştır. Elephant bitkisinin pirolizi için gerekli olan enerji termal analiz teknikleri yarımıyla bilgisayar kullanılarak belirlendi. Elde edilen piroliz sıvıları ve gazları ise gaz kromatografisi ve kütle kromatografisi teknikleri kullanılarak belirlendi. 500 °C sıcaklıkta

elde edilen piroliz gazları esas olarak CO ve CO₂ ve küçük miktarda metan ve düşük molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan oluştuğu belirlendi. Piroliz sıvısı ise esas olarak organik asitler, esterler, benzen bileşikleri ve amidlerden oluştuğu tespit edilmiştir. 50 cm³/dak ısıtma hızında ise organik asitlerin ve benzen bileşiklerinin miktarı azalırken ester ve naftalin bileşiklerinin miktarı arttığı gözlemlendi. Isıtma hızının artması ile piroliz sıvı ürünlerinde ki bu değişimin nedeninin piroliz buharlarının alıkonma zamanlarının azalması nedeniyle ikincil reaksiyonların azalması sonucu ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Zhang ve çalışma arkadaşları (2008) tarafından biyokütlenin pirolizi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada akışkan bir yatak içerisinde ki mısır koçanların katalizörlü ve katalizörsüz hızlı pirolizi gerçekleştirildi. Piroliz parametrelerinin (sıcaklık, gaz akış hızı, yatak boyutu ve parçacık büyüklüğü) ve HZSM-5 zeolit katalizörünün ürün verimi ve sıvı bileşimi üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçta 550 °C piroliz sıcaklığın da, gaz akış hızının 3,4 L/dak olduğu, yatak yüksekliğinin 10 cm olduğu ve parçacık boyutunun 1,0-2,0 mm olduğu optimum şartlarda sıvı ürün verimi % 56,8 ile maksimuma ulaştığı gözlemlenmiştir. Katalizörün varlığında yoğunlaşmayan gaz, su ve kok verimi artarken, sıvı ve odun kömürü verimi azaldığı belirlendi. İkinci yoğunlaştırıcıya yerleştirilen HZSM-5 katalizörü ilavesiyle toplanan sıvı ürün içerisinde ki oksijen içeriğinde katalizörsüz olanla karşılaştığı zaman % 25 oranında azaldığı belirlenmiştir. Katalizörlü toplanan piroliz sıvılarının H/C, O/C molar oranları ve üst ısıl değeri sırasıyla 1,511, 0,149 ve 34,6 MJ/kg olarak belirlendi. İkinci yoğunlaştırıcı da toplanan sıvının yüksek kaliteye sahip olduğu ve transport yakıtı olarak kullanılabilineceğini belirlemişlerdir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çayın kalitesini artırmak için Çaykur tarafından zorunlu olarak budamaya tabi tutulan çay çalıları üretici tarafından çay bahçelerinde doğrudan yakılmaktadır. Bu yüzden biyokütle örneği olarak Doğu Karadeniz Bölgesinde yetişen ve zirai atık olarak kullanılan çay çalısı ve bölgemize has bitki türlerinden olan orman gülü seçildi.

Bu biyokütle örneklerine ısı dönüşüm proseslerinden biri olan hızlı piroliz işlemi uygulandı. Öncelikle hammaddeler olan çay çalısı ve orman gülü KTÜ Orman Endüstri Mühendisliği Kâğıt Hamuru Hazırlama Laboratuvarında 1 mm delik çapına sahip olan değirmende öğütüldü ve elde edilen biyokütle örneği elek yardımıyla $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ ve $1,00 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ olmak üzere iki farklı parçacık boyutuna ayrıldı.

Daha sonra öğütülmüş çay çalısından ve orman gülünden $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutundaki kısmı seçilerek kısa analiz tayinleri (nem, sabit C miktarı, uçucu madde miktarı, kül) yapıldı.

Bileşen tayinlerinden selülozu belirlemek için Kurscher ve Hoffner'in "Nitrik asit" yöntemi, holoselüloz oranının belirlenmesinde ise Wise ve arkadaşları tarafından geliştirilen klorit yöntemi, lignin oranının tayin edilmesinde ise "Klason lignini" yöntemi kullanıldı. Holoselüloz, selüloz ve hemiselülozdan oluştuğu için holoselüloz miktarından selüloz miktarını çıkararak hemiselüloz miktarı belirlendi (Boran, 2003).

Bu ön analiz işlemlerinin yanında numunenin elementel analizi yapılarak karbon, hidrojen, oksijen ve azot içerikleri ile enerji değeri, H/C ve O/C oranları belirlendi.

Hammaddenin ısı değeri bölümümüz laboratuvarlarında bulunan Costech Elemental Combustion System CHNS-O cihazında belirlenen azot, karbon, hidrojen ve oksijen miktarları kullanılarak Dulong formülü yardımıyla hesaplandı.

Öğütülmüş çay çalısı ve orman gülü ile laboratuvarımızda tasarlanan sabit yataklı bir reaktör içerisinde katalizörsüz ortamda $200 \text{ }^\circ\text{C/dk}$ ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 $^\circ\text{C}$ piroliz sıcaklıklarında, $1,00 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ ve $D_p \leq 0,150 \text{ mm}$ parçacık boyutlarında ve 100, 200 ve 300 cm^3/dk sürükleyici gaz akış hızlarında hızlı piroliz deneyleri gerçekleştirildi. Hızlı piroliz deneylerinde elde edilen sıvı, katı ve gaz ürün miktarları üzerine piroliz sıcaklığı, sürükleyici gaz akış hızı ve parçacık boyutunun etkisi incelendi.

2.1. Kullanılan Hammadde ve Hazırlanması

Deneysel çalışmada kullanılan çay çalısı ve orman gülü Giresun Eynesil yöresinden toplandı. Toplanan çay çalısı ve orman gülü KTÜ Orman Endüstri Mühendisliği Kâğıt Hamuru Hazırlama Laboratuvarında değirmende öğütülerek 1,0 mm den küçük parçacık boyutu halinde ayrıldı. Elek yardımıyla $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $D_p \leq 0,150$ mm olmak üzere iki farklı parçacık boyutuna ayrılarak kullanılmak üzere laboratuvar ortamında depolandı.

2.2. Hammaddeye Uygulanan Kısa Analiz Tayinleri

2.2.1. Nem Miktarı Tayini

Nem miktarı tayini, ASTM D 2016-74'den faydalanılarak yapılmıştır. Öğütülerek hazırlanmış olan fındık kupulası örneğinden bir saat camı üzerine %0,2 duyarlılıkta 5 g alınarak, 103 ± 2 °C'ye ayarlanmış etüvde bekletildi. Desikatörde soğutularak tartıldı. İki tartım arasındaki fark eşitleninceye kadar iki saat daha bu sıcaklıkta tutulup işlem tekrarlandı. Nem miktarı örneğin ağırlığından faydalanarak aşağıdaki eşitlikten hesaplandı.

$$\text{Nem (\%)} = [g_1 - g_2 / g_2] \times 100 \quad (1)$$

Burada; g_1 : örneğin başlangıç ağırlığı (g), g_2 : Örneğin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı(g)

2.2.2. Kül Miktarı Tayini

Kül oranının belirlenmesinde, 575 ± 25 °C sıcaklıktaki fırında yakma metodunun uygulandığı TAPPI T 211 om-93 standart yöntemine göre deneyler yapıldı ve sonuçlar tam kuru biyokütle ağırlığına oranla % olarak verildi.

2.2.3. Uçucu Madde Miktarı Tayini

Uçucu madde miktarı tayini ASTM E 987-82'den faydalanılarak yapıldı. Bunun için sabit tartıma getirilmiş kroze içine, havada kurutulmuş örnekten 0,1 mg duyarlılıkta yaklaşık 1 g tartıldı ve kroze kapağı ile örtülerek 950 ± 20 °C'deki fırına konuldu. Burada örneğin yanmamasına dikkat edildi. Kroze fırında tam olarak 7 dakika bekletildikten sonra fırından çıkartılarak desikatörde bekletilerek soğutuldu ve tartıldı. Örnekteki uçucu madde miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplandı;

$$\text{Uçucu madde miktarı(\%)} = [g_1 - g_2 / g_2] \times 100 - M \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

g_1 : Kullanılan örneğin ağırlığı (g)

g_2 : Örneğin ısıtmadan sonraki ağırlığı (g)

M: Kullanılan örneğin nem miktarı (g)

2.2.4. Sabit Karbon Tayini

Örneğin uçucu madde, nem ve kül miktarları belirlendikten sonra sabit karbon yüzdesi aşağıdaki eşitlikten hesaplandı;

$$\% \text{ Sabit karbon} = 100 - (\text{nem} + \text{kül} + \text{uçucu madde}) \quad (3)$$

2.3. Hammaddeye Uygulanan Bileşim Analizleri

2.3.1. Organik Ekstraktif Miktarı Tayini (Alkol- Benzende Çözünürlük)

Alkol-benzen karışımında çözünen madde miktarları, TAPPI T 204cm-97 standardına göre 2/1 oranında benzen alkol karışımı (33 hacim %95'lik etil alkol, 67 hacim benzen) ile örnek 4 saat ekstarkte edilerek belirlenmiştir. Karışımda çözünen kısım, tam kuru ağırlığa oranla % olarak hesaplanmıştır.

2.3.2. Holoselüloz Miktarı Tayini

Holoselüloz oranının belirlenmesinde Wise ve arkadaşları tarafından geliştirilen klorit yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem klor uygulanmasının yanı sıra, klorlama ve ClO_2 yöntemine oranla, ligninle birlikte uzaklaştırılan karbohidrat oranının daha az olması nedeniyle tercih edilmektedir. Kullanılan bu yöntemle, holoselülozun %2-4 oranında kaybı olmadan ligninin tümünü uzaklaştırmak mümkün olmamaktadır (Huş vd., 1975).

Klorit yönteminde holoselüloz miktarını belirlemek için 5 g hava kurusu örnek, 160 mL su, 1,5 g NaClO_2 ve 10 damla (0,5 mL) asetik asitle birlikte 250 mL'lik bir erlenmayere konularak bir termostat yardımıyla sıcaklığı 78 °C'ye ayarlanan su banyosunda bir saat süreyle muamele edilmiştir. İçine örnek koyulan erlenin ağzı, ters çevrilmiş 50 mL'lik bir erlenle kapatıldı.

Reaksiyon süresince erlen zaman zaman çalkalanarak karıştırıldı ve bir saat sonra karışıma 1,5 g NaClO_2 ve 10 damla buzlu asetik asit ilave edildi. Bu işlem dört kez tekrar edildi. İşlem sonrasında süspansiyon bir buz banyosunda soğutularak krozedden süzüldü. Kalıntı önce asetonla ve daha sonra soğuk su ile yıkanarak 105 ± 3 °C'de kurutuldu. Burada, asetik asit ortamın pH'sını 4 dolayında tutmakta ve reaksiyon sonucunda ClO_2 çıkmasını sağlamaktadır. Çıkan ClO_2 lignini oksitleyerek, klorolignin halinde çözünmesini ve karbohidratlardan ayrılmasını sağlamaktadır (Huş vd., 1975).

2.3.3. Selüloz Miktarı Tayini

Selüloz oranının belirlenmesinde Kurscher ve Hoffner'in "Nitrik asit" yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, alkol-benzen ekstraksiyonuna uğratılmış yaklaşık 2 g örnek bir balona koyularak üzerine 10 mL 40° Be'lik HNO_3 ile 40 mL % 96'lık etil alkol karışımı ilave edilmiş ve soğutucu altında bir saat süreyle su banyosunda kaynatılmıştır. Bu süre sonunda balondaki sıvı, kroze yardımıyla süzülmüş ve 10 mL HNO_3 ile 40 mL etil alkolden oluşan 50 mL'lik yeni karışım kroze üzerindeki deney örnekleri ile birlikte tekrar balona koyularak bir saat süreyle kaynatılmıştır. Bu işlem üç defa tekrarlanmıştır.

Süzme yapıldıktan sonra kroze de kalan deney örnekleri sıcak su ile yıkanmış ve 105 ± 3 °C'de sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutularak tartılmıştır. Sonuç tam kuru ağırlığa oranla yüzde olarak hesaplanmıştır (Huş vd., 1975; Boran, 2003).

2.3.4. Hemiselüloz Miktarı Tayini

Hemiselüloz miktarı, holoselüloz miktarından selüloz miktarını çıkararak bulundu. Holoselüloz selüloz ve hemiselülozdan oluştuğu için holoselüloz miktarından selüloz miktarını çıkararak hemiselüloz miktarı belirlendi (Boran, 2003).

2.3.5. Lignin Miktarı Tayini

Biyokütlerde hücre çeperinin önemli bileşenlerinden biri olan lignin, bitkinin lifsel olmayan amorf yapıdaki hidrofobik bir bileşiği olduğundan, lifler arasındaki hidrojen bağlarının oluşumunu olumsuz yönde etkilemektedir (Boran, 2003).

Bitkisel maddelerdeki lignin oranının tayin edilmesin de en çok “Klason lignini” yöntemi kullanılır. Belirlenmiş koşullarda konsantre sülfürik asit karbohidratları hidrolizleyerek çözer ve aside dayanıklı olan lignin kalıntı olarak elde edilir (Casey, 1961).

Lignin oranı, %72’lik sülfürik asidin kullanıldığı TAPPI T 222 om-02 standart yöntemine göre belirlendi. Bu yöntemde; ekstrakte edilmiş yaklaşık 1 g hava kurusu örnek bir behere koyularak üzerine 12- 15 °C sıcaklıkta %72’lik H₂SO₄ ilave edilip 2 saat bekletildi. Bu süre sonunda beherdeki madde bir litrelik erlene konularak asit konsantrasyonu %3 olacak şekilde sıvı miktarı 560 mL’ye kadar destile su ile seyreltildi. Karışım soğutucu altında 4 saat süre ile kaynatıldı ve sonuç, ağırlığının yüzdesi olarak belirlendi.

2.4. Hammaddenin Elementel Analizi

Hammaddenin içerdiği karbon, oksijen, hidrojen ve azot içeriklerini belirlemek amacıyla uygulanan elementel analiz, bölümümüz laboratuvarlarında bulunan Costech Elemental Combustion System CHNS-O cihazında gerçekleştirildi. Bu analiz için hammadde özel bir kapsüle yerleştirildi ve miktarı mg mertebesinde hassas olarak ölçüldü. Analiz sırasında hammaddenin bulunduğu kapsül, yanma reaktörü içerisine otomatik olarak aktarıldı ve oksijen ile 1700–1800 °C sıcaklıkta yakıldı ve elementlerin oranına göre elementel pikler oluşturularak orman gülü ve çay çalısının bileşimindeki C, H, N ve O yüzdeleri belirlendi.

2.5. Hammaddenin Isıl Değerinin Belirlenmesi

Hammaddenin ısıl değeri bölümümüz laboratuvarlarında bulunan Costech Elemental Combustion System CHNS-O cihazında belirlenen azot, karbon, hidrojen ve oksijen miktarları kullanılarak Dulong formülü yardımıyla hesaplandı.

$$\text{Kalorifik değer (kJ/g)} = 0,3491C + 1,1783 H - 0,1034 O - 0,0211 A + 0,1005 S - 0,0151 N \quad (4)$$

Burada C: karbon, H: hidrojen, O: oksijen, A: kül, S: kükürt ve N: azotu ifade etmektedir.

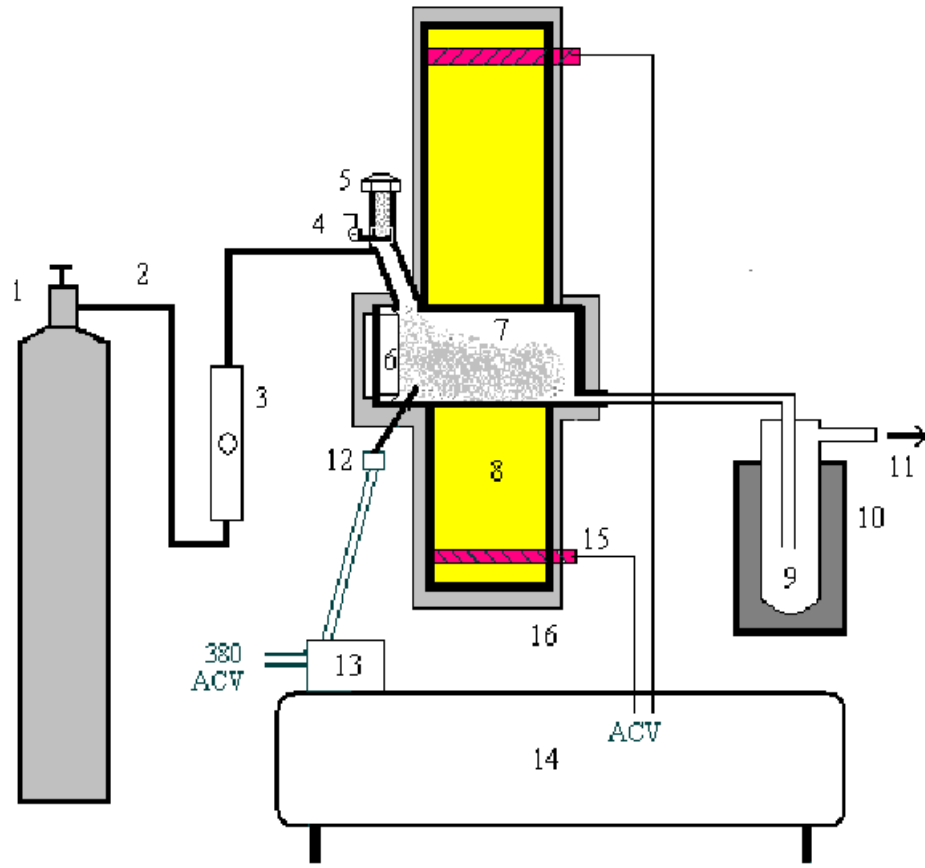
2.6. Hammaddenin Pirolizi

Piroliz deneylerini gerçekleştirmek için Şekil 13’de görölen 90 cm³ hacminde 316 paslanmaz krom-nikel sabit yataklı bir reaktör ile bunu saran 316 paslanmaz krom-nikel endiktüf bir reaktör kullanıldı. Deney süresince reaktör sıcaklığının denetlenmesi amacıyla reaktör içerisine PT 100 sıcaklık ölçer monte edildi. Sıcaklık ölçer bir güç kaynağı ile reaktöre verilen akıma karşı reaktörün göstermiş olduğu direnç yardımıyla istenilen deney sıcaklığına ulaşabilmektedir. Bu değer güç kaynağının üzerine monte edilmiş olan sıcaklık elektronik kontrol ünitesi yardımıyla kontrol edildi. Deney sistemindeki tüm bağlantıların sızdırmazlıkları kelepçe ve sıvı contalarla sağlandı. Deney sisteminin fotoğrafı Şekil 7’de görölmektedir.

Piroliz buharlarını yoğuşturmak için kullanılan soğutma sistemi camdan yapılmış, sızdırmazlıkları teflon bantla sağlandı ve sıvı azot ihtiva eden bir banyo içerisine yerleştirildi.

Piroliz deneylerini gerçekleştirmek için piroliz sisteminin öncelikle istenilen sıcaklığa ulaşması sağlandı. Değirmende öğütölerek parçacık boyutlarına göre ayrılan hava kurusu çay çalıısı ve orman gülü örneklerinden istenilen parçacık boyutuna göre 2,00 ±0,01 g hassas terazide tartılarak numune doldurma vanası yardımıyla reaktörün numune bekleme kısmına doldurularak vana kapatıldı. Sürükleyici gaz olarak kullanılacak olan azot gazı akış metre yardımıyla debisi ayarlanarak reaktör içerisine gönderildi. İstenilen deney sıcaklığına gelmiş olan reaktör içerisinden azot gazı geçirilerek reaktör ortamının tamamen inert olması sağlandıktan sonra vana açılarak numune reaktörün içerisine gönderildi ve

vana kapatıldı. Piroliz deneyleri; 30 dak süresince reaktör sıcaklığı deney sıcaklığında tutularak, gaz çıkışı gözlenmeyene kadar sürdürüldü. Deney sırasında çıkan buharlar reaktörden sıvı toplama ünitesine gönderildi ve sıvılaştırıldı. Sıvılaşmayan kısım ise tahliye hortumu yardımıyla atmosfere gönderildi. Sıvı toplama kabında birikmiş olan piroliz sıvısı sıvı azot banyosu içerisinde çıkartılarak sıcaklığının oda sıcaklığına gelmesi beklendi. Oda sıcaklığına gelmiş olan piroliz sıvısı % 99'luk diklorometanla yıkanarak 250 mL'lik bir ayırma hunisine alındı. Burada bir saat kadar bekletildikten sonra sulu faz ve organik faz ayrıldı. Daha yoğun olan organik faz ayırma hunisinin altından alınarak 100 mL'lik bir balona aktarıldı ve döner buharlaştırıcıda içerisindeki diklorometan uçurulduktan sonra tartılarak miktarı belirlendi. Miktarı belirlenmiş olan piroliz sıvısı 50 mL destile pentanda bir gece bekletildi ve pentanda çözünen kısım 100 mL'lik başka bir balona alınarak çözücüsü döner buharlaştırıcıda uzaklaştırıldıktan sonra tartılarak miktarı belirlendi. Katı ürün miktarı reaktör içerisinde kalan katı ürün alınarak tartıldı ve miktarı belirlendi. Gaz ürün miktarı ise farktan belirlendi.



- | | | |
|------------------------------------|---------------------------|---|
| 1. Azot tüpü | 7. Piroлиз ünitesi | 13. Reaktör sıcaklık elektronik kontrol ünitesi |
| 2. Azot akış hattı | 8. Endüktif reaktör | 14. Güç kaynağı |
| 3. Akış metre | 9. Sıvı ürün toplama kabı | 15. Reaktör elektrik giriş ve çıkışı bağlantı aparatı |
| 4. Reaktöre numune transfer vanası | 10. Soğutma ünitesi | 16. İzolasyon |
| 5. Numune doldurma vanası | 11. Gaz çıkışı | |
| 6. Katı ürün alma kapağı | 12. PT100 sıcaklık ölçer | |

Şekil 6. Hızlı piroliz deney düzeneği şeması

Deneyler için çay çalısı ve orman gülü $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $D_p \leq 0,150$ mm parçacık boyutuna ayrıldı. Sürükleyici gaz akış hızı olarak 100, 200 ve 300 cm^3/dak seçildi ve piroliz sıcaklığı olarak ta 450, 500, 550, 600 ve 650 $^\circ\text{C}$ sıcaklıklar seçildi.

Her bir deney için için 2'şer g hammadde reaktöre yerleştirildi ve 450, 500, 550, 600 ve 650 $^\circ\text{C}$ 'de $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $1,00 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutları için ayrı ayrı 100, 200 ve 300 cm^3/dak sürükleyici gaz akış hızları için deneyler gerçekleştirildi. Sıvı, katı ve gaz ürün verimleri ile piroliz dönüşümü belirlendi. Deneylerden sonra Çay çalısı ve orman gülü için ayrı ayrı ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi, ürün

verimi üzerine sürükleyici gaz akış hızının etkisi ve ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisi araştırıldı.



Şekil 7. Hızlı piroliz deney düzeneğini resmi



Şekil 8. Hızlı piroliz deney düzeneği reaktör resmi

3. BULGULAR

Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Öncelikle, deneylerde kullanılan biyokütle örneklerinin (çay çalısı ve orman gülü) nem, kül, uçucu madde içeriklerini belirlemek için kısa analizleri yapıldı. Karbon, oksijen, hidrojen ve azot içerikleri ile ısı değeri belirlemek için elementel analizi yapıldı. Ayrıca lignoselülozik olduğu bilinen hammaddenin selüloz, hemiselüloz, holoselüloz, lignin ve organik ekstraktlarını belirlemek için bileşen analizleri yapılarak hammadde hakkında temel bilgiler elde edildi. Çay çalısının ve orman gülünün özellikleri belirlendikten sonra biyokütlelere uygulanan hızlı piroliz deneylerinden elde edilen sonuçlar tablolar ve grafikler halinde verildi. Ayrıca piroliz ürün verimi üzerine sıcaklığın, sürükleyici gaz akış hızının ve parçacık boyutunun etkisi tartışıldı.

3.1. Kullanılan Hammaddelerin Özellikleri

Çay çalısı ve orman gülünden elde edilen ham örnekler üzerine gerçekleştirilen nem, kül, uçucu madde miktarı ve sabit karbon yüzdesi Tablo 7’de, hemiselüloz, selüloz, holoselüloz, lignin, organik ekstrat değerleri Tablo 8’de ve elementel analiz sonuçları ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 7. Çay çalısı ve orman gülünün kısa analiz sonuçları

Kısa Analiz (Ağırlıkça %)	Çay Çalısı	Orman Gülü
Nem	7,52	5,68
Kül	1,68	0,67
Uçucu Madde	76,58	82,05
Sabit Karbon*	14,22	11,60
*Sabit C= 100- (Nem + Kül + Uçucu madde)		

Tablo 8. Çay çalısı ve orman gülünün bileşen analiz sonuçları

Bileşen (Ağırlıkça %)	Çay Çalısı	Orman Gülü
Selüloz	21,15	43,25
Holoseküloz	54,78	72,12
Hemiselüloz	33,63	30,87
Lignin	32,14	19,16
Organik Ekstrat	3,87	3,53

Tablo 9. Çay çalısı ve orman gülünün elementel analiz sonuçları

Bileşen	Çay Çalısı	Orman Gülü
Karbon	45,64	45,69
Hidrojen	5,88	5,73
Azot	0,85	0,75
Oksijen*	47,63	47,83
Isıl Değer (MJ/Kg)	17,88	17,70
H/C Molar Oranı	1,54	1,50
O/C Molar Oranı	0,78	0,79
Ampirik Formül	C ₆₃ H ₉₆ O ₄₉ N	C ₆₃ H ₉₄ O ₄₉ N
*Oksijen farktan hesaplandı		

3.2. Çay Çalısı Hızlı Piroliz Sonuçları

Deneşler 200 °C/dk ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 °C piroliz sıcaklıklarında, $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $D_p \leq 0,150$ mm parçacık boyutlarında ve 100, 200 ve 300 cm³/dk sürükleyici gaz akış hızlarında çay çalısı üzerine ürün verimlerinin değişimi incelenmiştir. Deneş sonuçları üç ayrı kategoride tablo halinde verilmiştir. Birincisi; sabit parçacık boyutu ve sabit sürükleyici gaz akış hızında, Piroliz Sıcaklığı – Ürün Verimi tabloları, ikincisi; sabit piroliz sıcaklığı ve sabit parçacık boyutunda, Sürükleyici Gaz Akış Hızı – Ürün Verimi tabloları, üçüncüsü; sabit piroliz sıcaklığında ve sabit sürükleyici gaz akış hızında Parçacık Boyutu – Ürün Verimi tablolarıdır. Tablo (10 - 40)

3.2.1. Sabit Parçacık Boyutu ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Piroliz Sıcaklığı – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.10. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 100 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	63,19	40,10	36,81	23,09
500	66,29	41,55	33,71	24,74
550	74,40	45,25	25,60	29,15
600	76,75	51,17	23,25	25,58
650	77,82	45,29	22,18	32,53

Tablo.11. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 200 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	62,05	39,50	37,95	22,55
500	69,88	40,25	30,12	29,63
550	75,74	48,08	24,26	27,66
600	77,25	44,28	22,75	32,97
650	79,66	42,52	20,34	37,17

Tablo.12. Çay çalısının 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 300 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	63,50	36,04	36,50	27,46
500	69,92	41,00	30,08	28,92
550	75,50	46,50	24,50	29,00
600	76,76	46,00	23,24	30,76
650	77,94	43,05	22,06	34,89

Tablo.13. Çay çalısının $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $100 \text{ cm}^3/\text{dk}$ daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: $100 \text{ cm}^3/\text{dk}$		Parçacık boyutu: $0,150 \text{ mm} \geq$		
Piroliz Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	72,50	43,12	27,50	29,38
500	77,65	44,08	22,35	33,57
550	78,56	48,56	21,44	30,09
600	80,38	46,55	19,62	33,83
650	82,75	36,62	17,25	46,13

Tablo.14. Çay çalısının $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $200 \text{ cm}^3/\text{dk}$ daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: $200 \text{ cm}^3/\text{dk}$		Parçacık boyutu: $0,150 \text{ mm} \geq$		
Piroliz Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	69,85	44,05	30,15	25,80
500	76,80	46,10	23,20	30,70
550	78,94	49,28	21,06	29,66
600	81,62	47,06	18,38	34,56
650	83,38	38,24	16,92	45,14

Tablo.15. Çay çalısının $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $300 \text{ cm}^3/\text{dk}$ daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: $300 \text{ cm}^3/\text{dk}$		Parçacık boyutu: $0,150 \text{ mm} \geq$		
Piroliz Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	69,68	38,02	30,32	31,66
500	71,78	42,50	28,21	29,28
550	76,54	50,82	23,46	25,72
600	79,90	45,38	20,10	34,52
650	81,75	39,18	18,25	42,57

3.2.2. Sabit Piroliz Sıcaklığı ve Sabit Parçacık Boyutunda, Sürükleyici Gaz Akış Hızı – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.16. Çay çalısının 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 450 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	63,19	40,10	36,81	23,09
200	62,05	39,50	33,71	22,55
300	63,50	36,04	25,60	27,46

Tablo.17. Çay çalısının 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 500 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	66,29	41,55	33,71	24,74
200	69,88	40,25	30,12	29,63
300	69,92	41,00	30,08	28,92

Tablo.18. Çay çalısının 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 550 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	74,40	45,25	25,60	29,15
200	75,74	48,08	24,26	27,66
300	75,50	46,50	24,50	29,00

Tablo.19. Çay çalısının 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 600 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	76,75	51,17	23,25	25,58
200	77,25	44,28	22,75	32,97
300	76,76	46,00	23,24	30,76

Tablo.20. Çay çalısının 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 650 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	77,82	45,29	22,18	32,53
200	79,66	42,52	20,34	37,17
300	77,94	43,05	22,06	34,89

Tablo.21. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 450 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	72,50	43,12	27,50	29,38
200	69,85	44,05	30,15	25,80
300	69,68	38,02	30,32	31,66

Tablo. 22. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 500 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	77,65	44,08	22,35	33,57
200	76,80	46,10	23,20	30,70
300	71,78	42,50	28,21	29,28

Tablo.23. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 550 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	78,56	48,56	21,44	30,09
200	78,94	49,28	21,06	29,66
300	76,54	50,82	23,46	25,72

Tablo.24. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 600 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	80,38	46,55	19,62	33,83
200	81,62	47,06	18,38	34,56
300	79,90	45,38	20,10	34,52

Tablo.25. Çay çalısının 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 650 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	82,75	36,62	17,25	46,13
200	83,38	38,24	16,92	45,14
300	81,75	39,18	18,25	42,57

3.2.3. Sabit Piroliz Sıcaklığında ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Parçacık Boyutu – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.26. Çay çalısının 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	63,19	40,10	36,81	23,09
0,150 mm \geq	72,50	43,12	27,50	29,38

Tablo.27. Çay çalışının 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	62,05	39,50	37,95	22,55
0,150 mm ≥	69,85	44,05	30,15	25,80

Tablo.28. Çay çalışının 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	63,50	36,04	36,50	27,46
0,150 mm ≥	69,68	38,02	30,32	31,66

Tablo.29. Çay çalışının 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	66,29	41,55	33,71	24,74
0,150 mm ≥	77,65	44,08	22,35	33,57

Tablo.30. Çay çalışının 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	69,88	40,25	30,12	29,63
0,150 mm ≥	76,80	46,10	23,20	30,70

Tablo.31. Çay çalısının 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	69,92	41,00	30,08	28,92
0,150 mm ≥	71,78	42,50	28,21	29,28

Tablo.32. Çay çalısının 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	74,40	45,25	25,60	29,15
0,150 mm ≥	78,56	48,56	21,44	30,09

Tablo.33. Çay çalısının 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	75,74	48,08	24,26	27,66
0,150 mm ≥	78,94	49,28	21,06	29,66

Tablo.34. Çay çalısının 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	75,50	46,50	24,50	29,00
0,150 mm ≥	76,54	50,82	23,46	25,72

Tablo.35. Çay çalısının 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	76,75	51,17	23,25	25,58
0,150 mm ≥	80,38	46,55	19,62	33,83

Tablo.36. Çay çalısının 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	77,25	44,28	22,75	32,97
0,150 mm ≥	81,62	47,06	18,38	34,56

Tablo.37. Çay çalısının 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	77,94	43,05	22,06	34,89
0,150 mm ≥	81,75	39,18	18,25	42,57

Tablo.38. Çay Çalısının 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	77,82	45,29	22,18	32,53
0,150 mm ≥	82,75	36,62	17,25	46,13

Tablo.39. Çay Çalısının 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

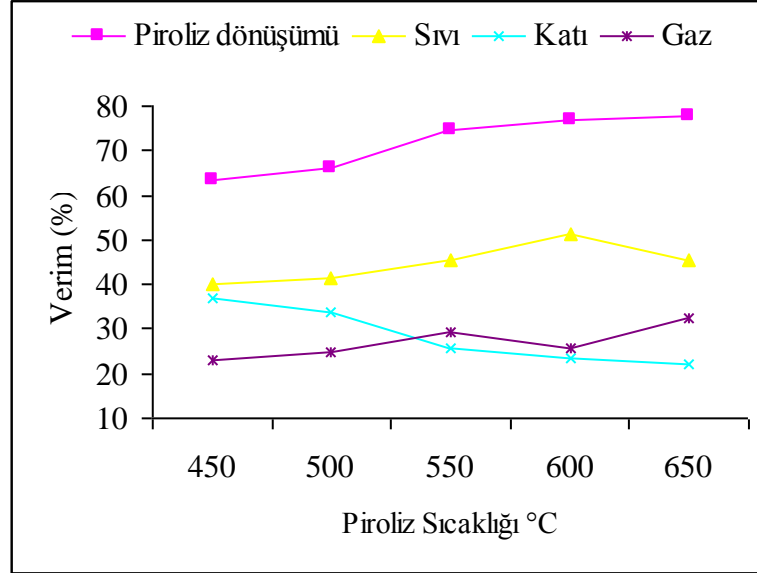
Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	79,66	42,52	20,34	37,17
0,150 mm ≥	83,38	38,24	16,92	45,14

Tablo.40. Çay Çalısının 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

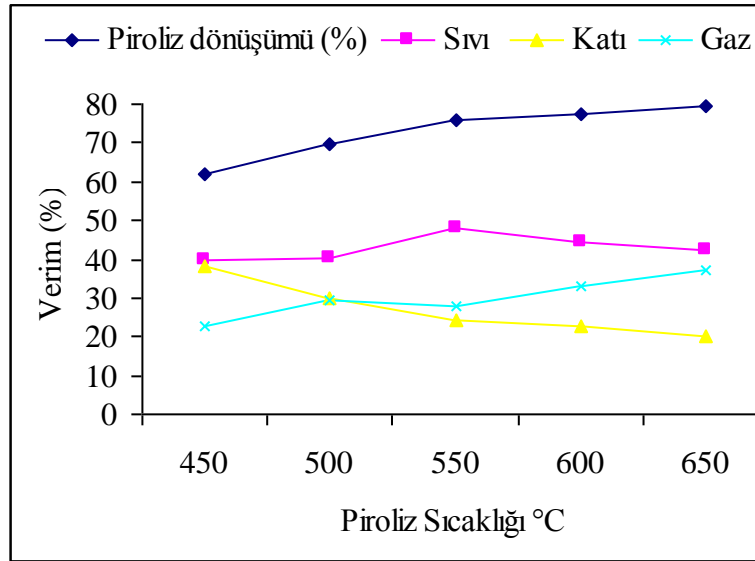
Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	76,76	46,00	23,24	30,76
0,150 mm ≥	79,90	45,38	20,10	34,52

3.2.4. Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi

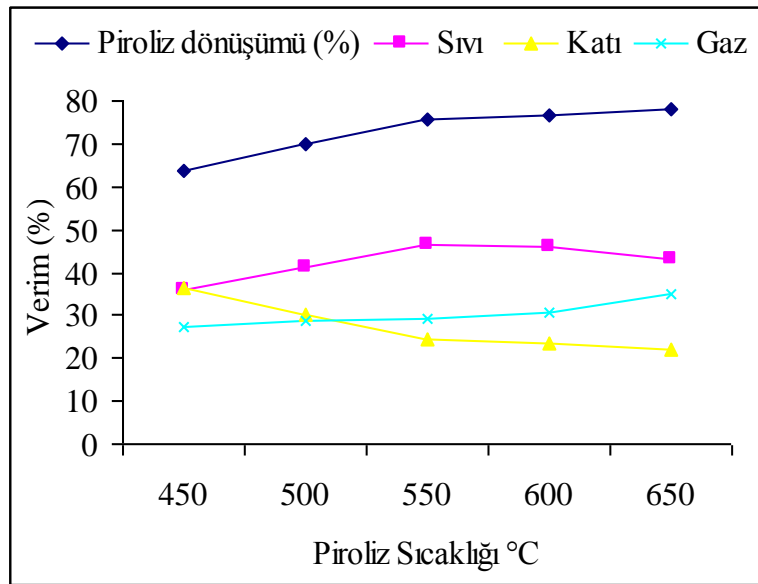
Piroliz sıcaklığı ürün verimini etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Biyokütlenin pirolizinde en uygun sıcaklık 400 °C ve 700 °C arasındır. Biyokütle örneği olarak çay çalısı kullanılan bu deneylerde (450 °C ile 650 °C arasında) beş farklı piroliz sıcaklığı kullanıldı. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek sıvı ürün verimlerine % 51,17 ile $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutu, 100 cm³/dk azot akış hızı , 600 °C de ve % 50,82 sıvı ürün verimi ile $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu, 300 cm³/dk azot akış hızı ve 550 °C de ulaşılmıştır. Her iki değer birbirine yakın olduğu için bu sebeble her iki parçacık boyutunda piroliz ürün verimi üzerine sıcaklığın etkisi aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 9- 14).



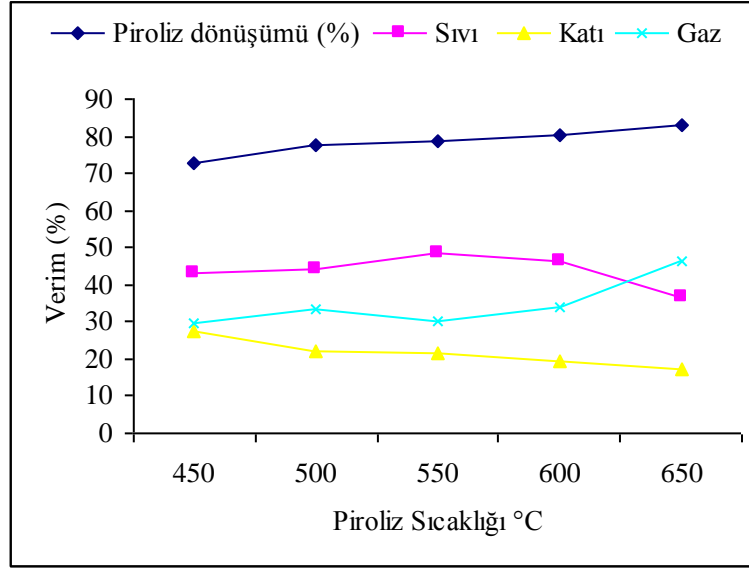
Şekil 9 . Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



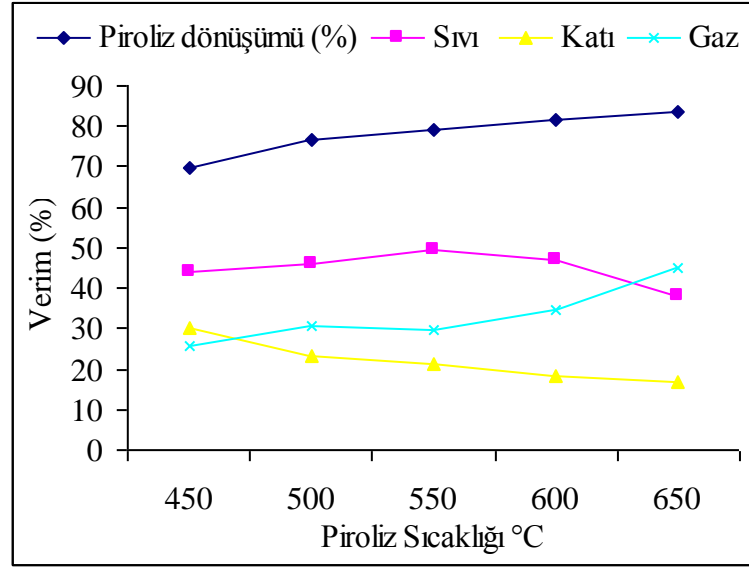
Şekil 10. Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



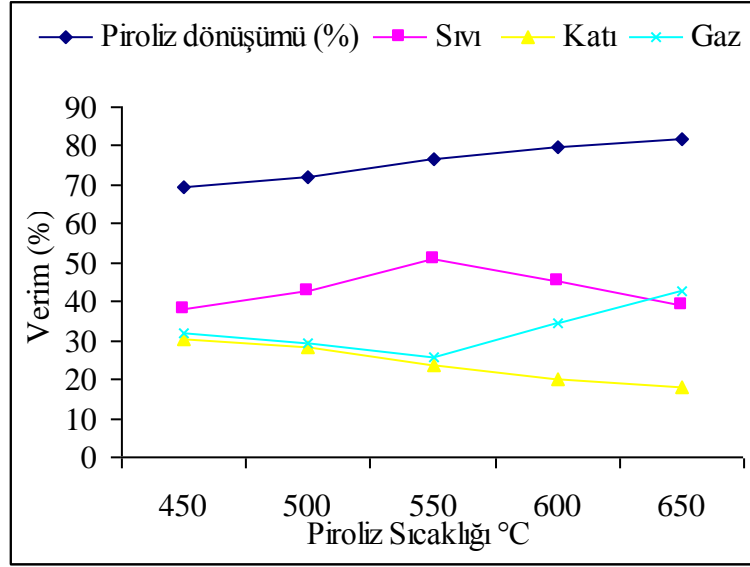
Şekil 11. Çay çalısının pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 12. Çay çalısının pirolizi için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 13. Çay çalısının pirolizi için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



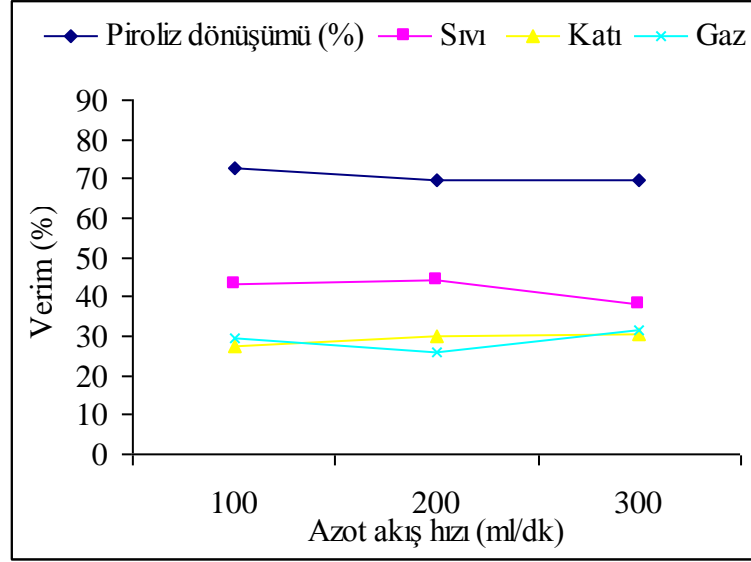
Şekil 14. Çay çalısının pirolizi için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $300 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi

Çay çalısı için piroliz sıcaklığının verime karşı çizilmesiyle elde edilen grafikler (Şekil 9–14) incelendiğinde, en yüksek sıvı ürün verimine $1-0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda, $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızı, 600 °C 'deki grafikte görülmesine rağmen diğer grafiklerin hepsinde 550 °C olarak görülmektedir. Bu sonuç Şekil 15'in deneysel ortamında bir hata yapıldığını göstermektedir. Tüm şekillerden anlaşılacağı üzere piroliz sıcaklığının 450 °C 'den 650 °C 'ye çıkması ile piroliz dönüşümünün sürekli bir artış gösterdiği, bu artışa 550 °C 'ye kadar sıvı ürün verimindeki artışın neden olduğu, 550 °C 'den sonra ise gaz ürün verimindeki artışın neden olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 450 °C 'den 650 °C 'ye çıkması ile piroliz dönüşümü $\% 62,05 - \% 72,50$ aralığından, $\% 77,82 - \% 83,38$ aralığına kadar yükseldiği görülmüştür.

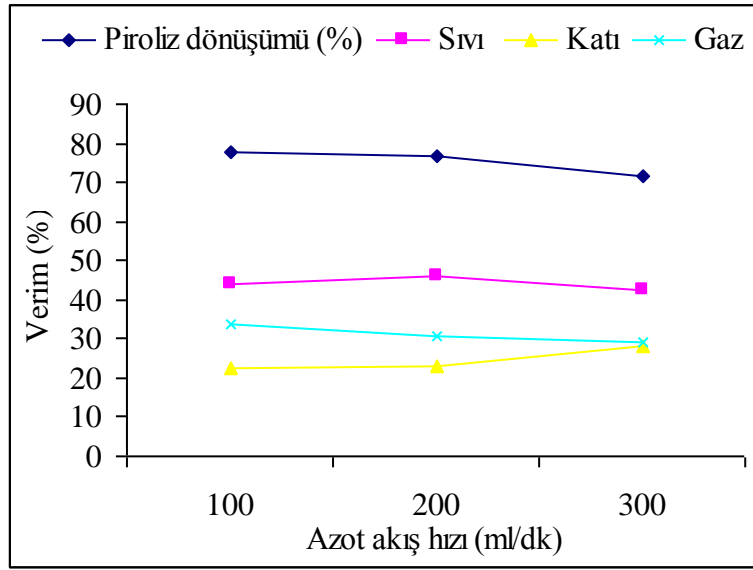
Şekil 9–14'deki grafikler incelendiğinde katı ürün veriminin piroliz sıcaklığının artması ile azalma eğilimi içinde olduğu gözlenmiştir. En düşük katı ürün verimi ise 650 °C 'de $\% 16,92$ bulundu. Yine bu grafikler incelendiğinde Şekil 18'de görüldüğü üzere gaz ürün veriminin $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında, 650 °C de $\% 46,13$ ile maksimum düzeyde olduğu görülmüştür.

3.2.5. Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimi Üzerine Sürükleyici Gaz Akış Hızının Etkisi

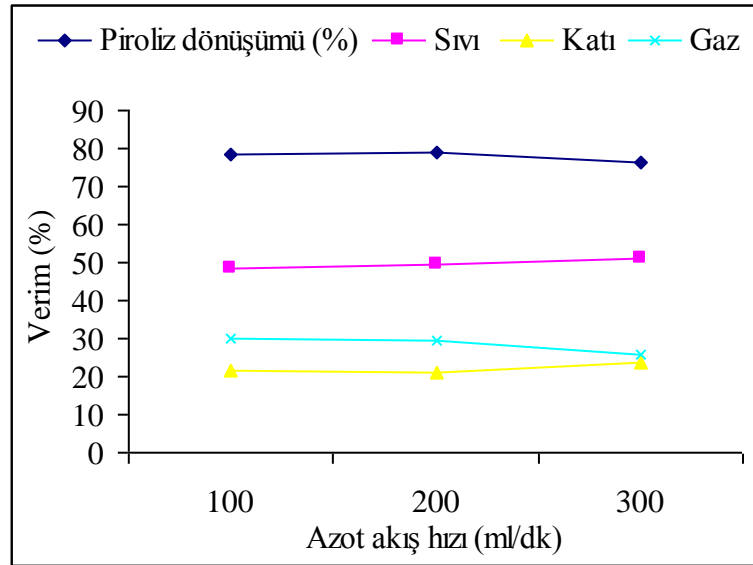
Biyokütle örneği olarak Çay çalısı kullanılan bu deneylerde $1,0 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, $450 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $650 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında beş farklı piroliz sıcaklığında üç farklı azot akış hızı kullanıldı. Bu kısımda hızlı piroliz yönteminde ürün verimi üzerine sürükleyici gaz akış hızının etkisi incelendi. Bu deneylerde sürükleyici gaz olarak azot gazı kullanıldı. Deney sonuçlarına göre her iki parçacık boyutunda ki ($1,0 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150 \text{ mm} \geq D_p$) piroliz ürün verimleri üzerine sürükleyici gaz akış hızının etkisi araştırıldı. Elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 15–24).



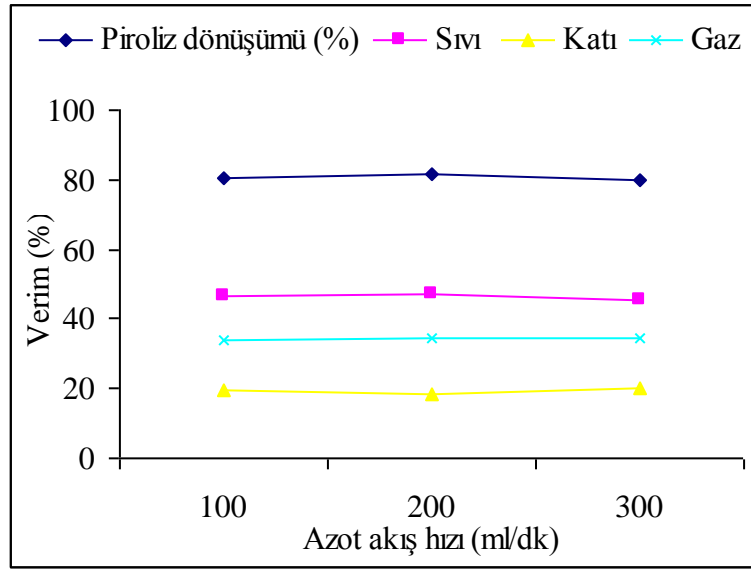
Şekil 15. Çay çalısı için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $450 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



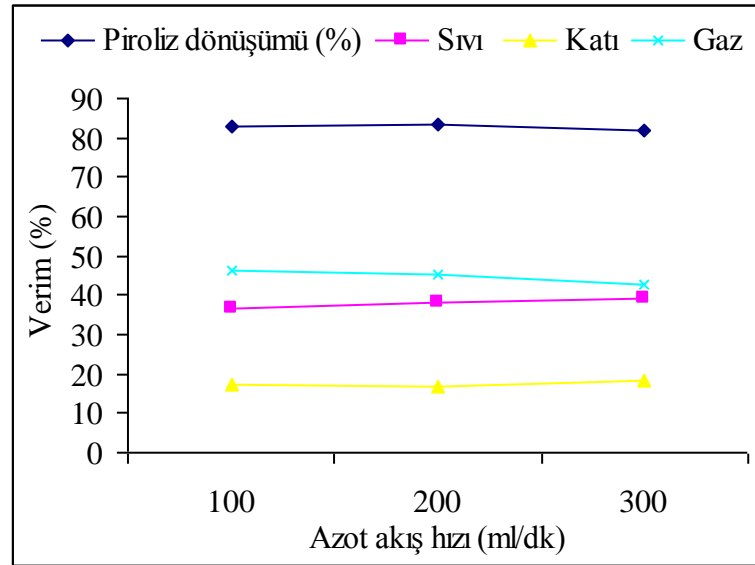
Şekil 16. Çay çalısı için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $500 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



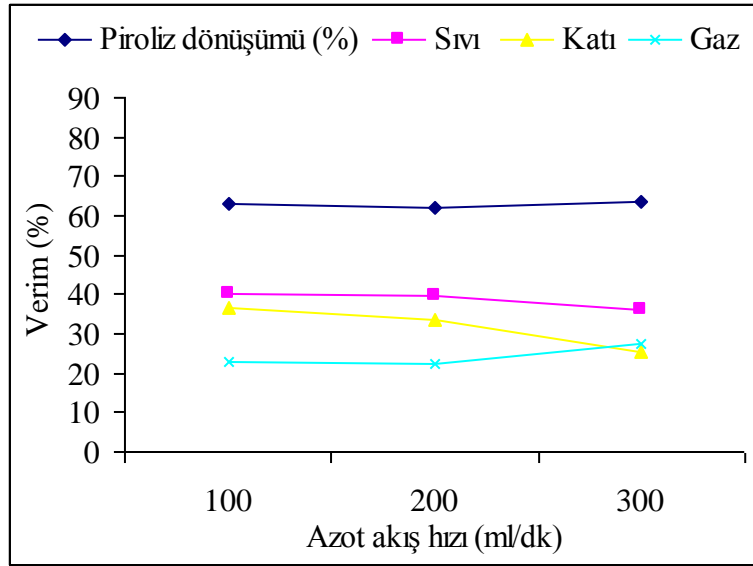
Şekil 17. Çay çalısı için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $550 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



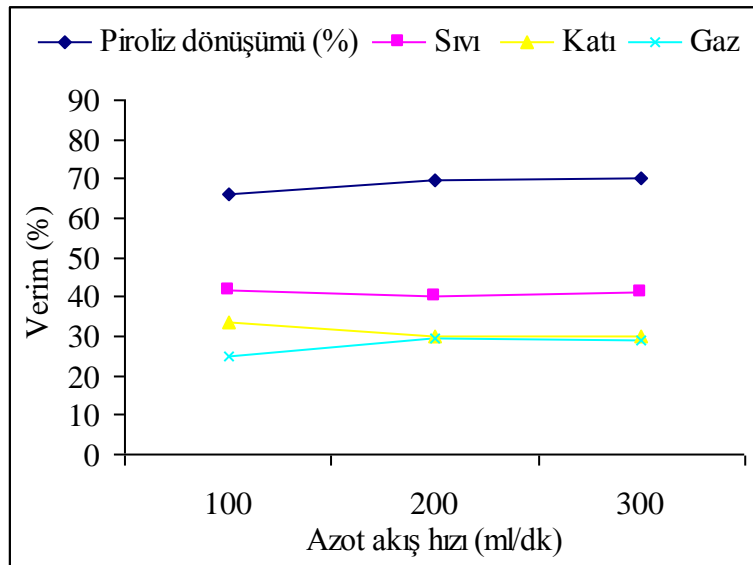
Şekil 18. Çay çalısı için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $600 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



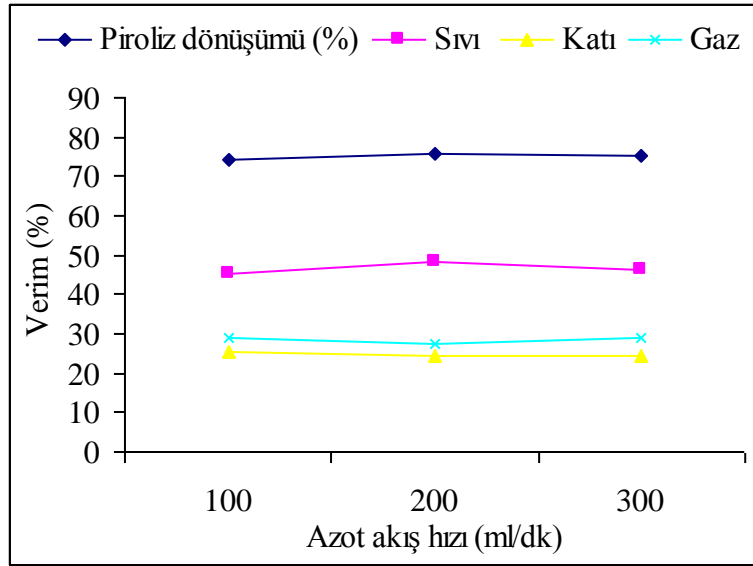
Şekil 19. Çay çalısı için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $650 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



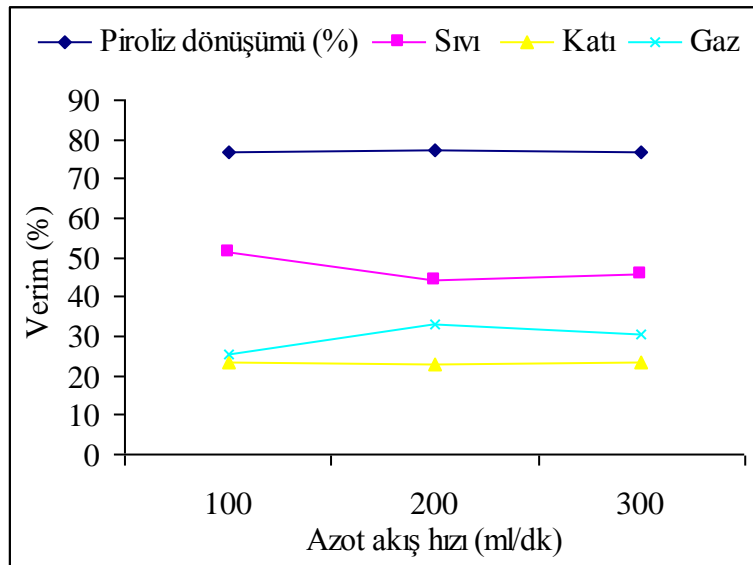
Şekil 20. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 450 °C'deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



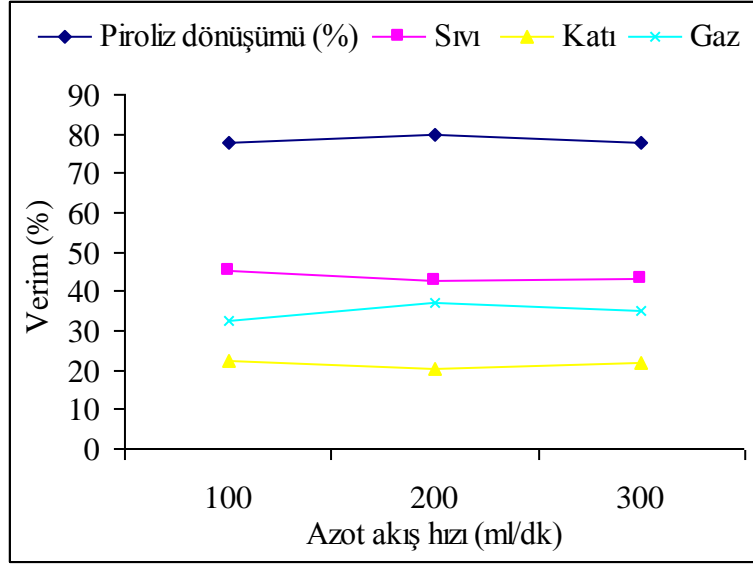
Şekil 21. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 500 °C'deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 22. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 23. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 600 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 24. Çay çalısı için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda $650\text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi

Şekil 15’den Şekil 19’a kadar incelendiğinde $0,150\text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $450\text{ }^\circ\text{C} - 650\text{ }^\circ\text{C}$ arası sabit sıcaklıklarda azot gazı akış hızı arttıkça piroliz dönüşüm verimi azalmaktadır. Bunun aksine Şekil 19’dan Şekil 24’e kadar incelendiğinde $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda $450\text{ }^\circ\text{C} - 650\text{ }^\circ\text{C}$ arası sabit sıcaklıklarda azot akış hızı ile piroliz dönüşüm verimi için herhangi bir bağıntı kurulamamıştır. En yüksek piroliz dönüşümü verimine $0,150\text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $450\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $100\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 72,50 ile, $500\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta $300\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 77,65 ile, $550\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 78,94 ile, $600\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 81,62 ile, $650\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 83,38 ile, $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda ise $450\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $300\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 63,50 ile, $500\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta $300\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 69,92 ile, $550\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 75,74 ile, $600\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $300\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 76,76 ile $650\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200\text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 79,66 ile ulaşılmıştır.

Azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda ($450\text{ }^\circ\text{C}$ ve $500\text{ }^\circ\text{C}$) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer yüksek sıcaklıklarda ($550\text{ }^\circ\text{C}$, $600\text{ }^\circ\text{C}$ ve $650\text{ }^\circ\text{C}$) ise herhangi bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir. En yüksek sıvı ürün verimine $0,150\text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $450\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, 200

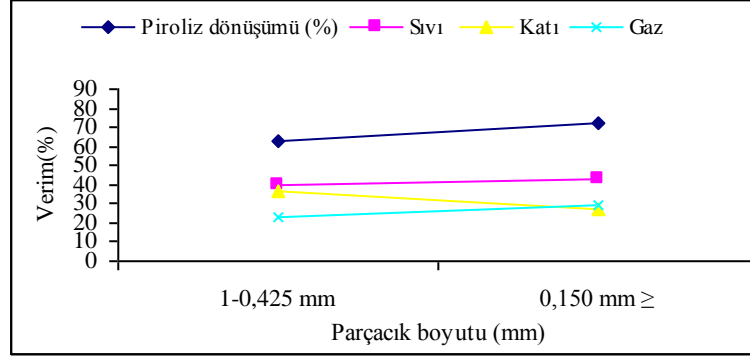
cm³/dak azot gazı akış hızında % 44,05 ile , 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,10 ile, 550 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 50,82 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 47,06 ile, 650 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 39,18 ile, 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda ise 450 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 40,10 ile, 500 °C sıcaklıkta 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 41,55 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 48,08 ile, 600 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 51,17 ile 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 45,29 ile ulaşılmıştır.

Azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C , 500 °C ve 550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminin azaldığı diğer yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) ise çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. En yüksek katı ürün verimi 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda, 450 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 36,81 ile en düşük katı ürün verimi ise 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında %16,92 ile gözlenmiştir.

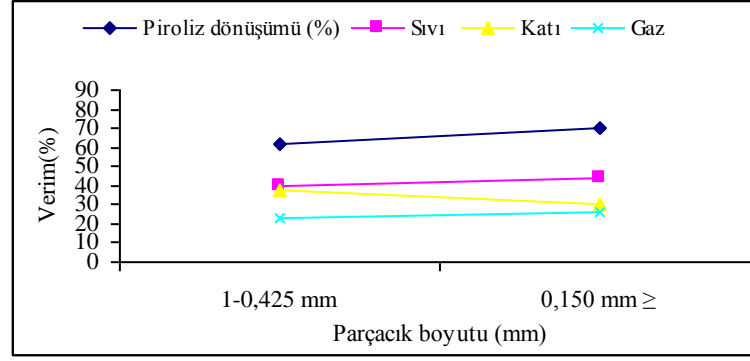
Sürükleyici gaz akış hızının artması ile ve farklı parçacık boyutlarında gaz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi incelendiğinde bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir. En yüksek gaz verimi ise 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,13 ile gözlenmiştir.

3.2.6. Çay Çalısı Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Parçacık Boyutunun Etkisi

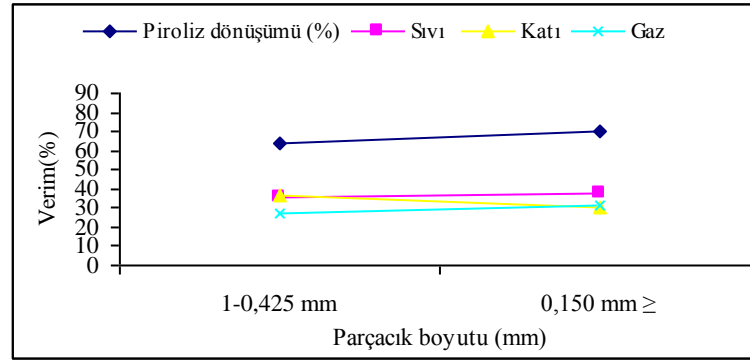
Ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelenmesi amacıyla, 450 °C ile 650 °C arasında beş farklı piroliz sıcaklığında , 100, 200 ve 300 cm³/dak üç farklı azot gazı akış hızında 1,00 < D_p < 0,425 mm ve 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda olmak üzere iki farklı parçacık boyutunda piroliz ürün verimlerinin nasıl değiştiği araştırıldı. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 25- 39).



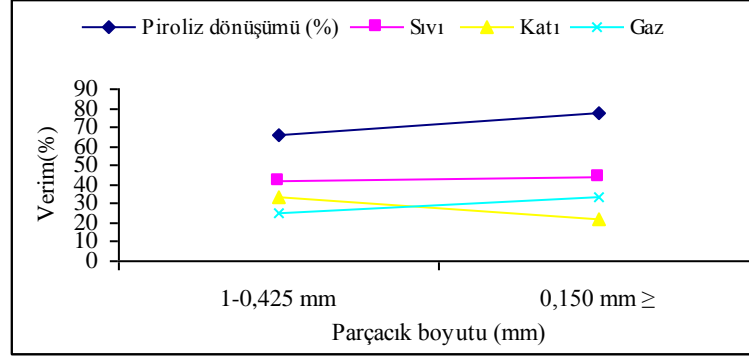
Şekil 25. 450 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



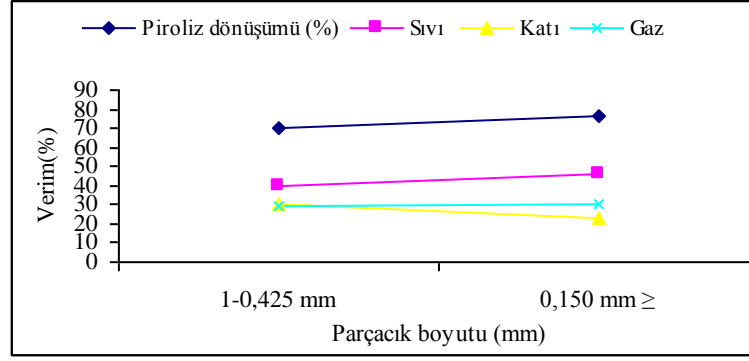
Şekil 26. 450 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



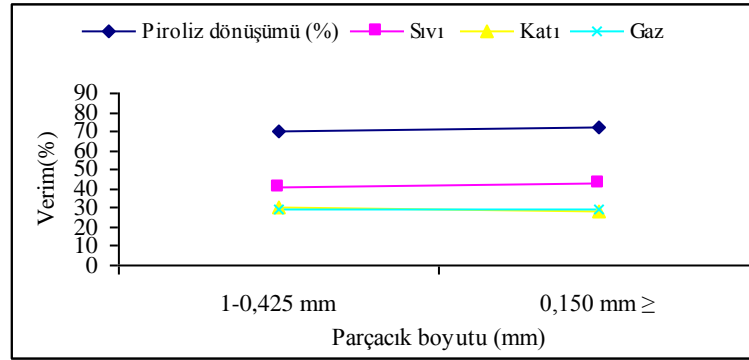
Şekil 27. 450 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



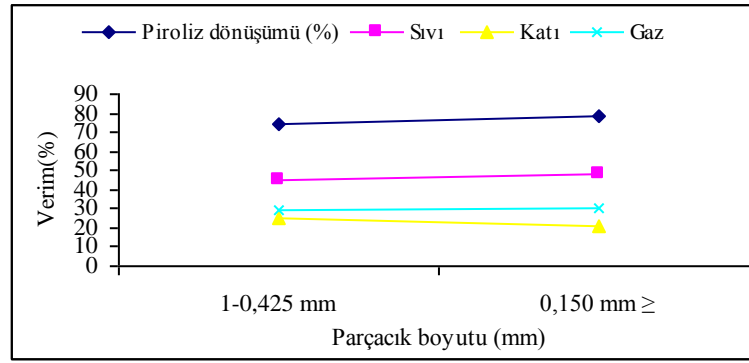
Şekil 28. 500 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



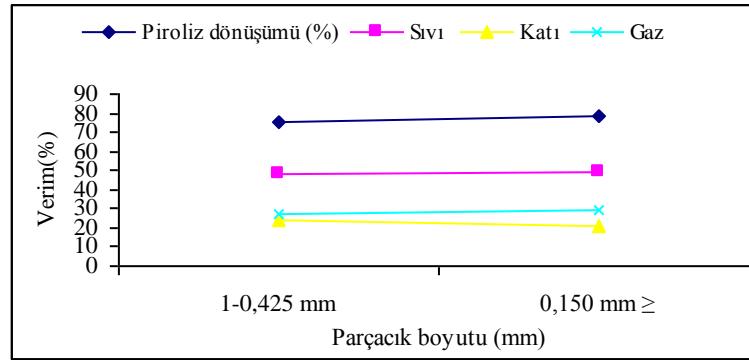
Şekil 29. 500 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



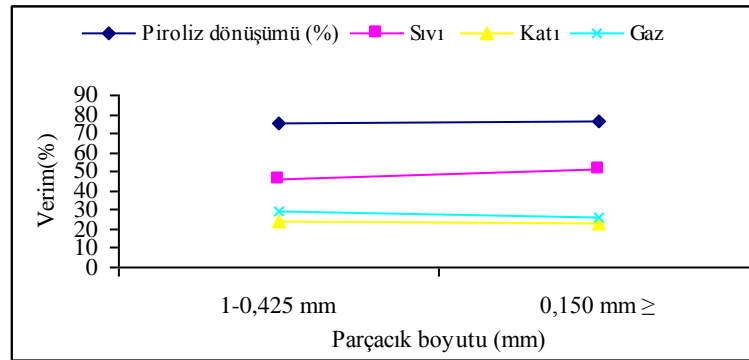
Şekil 30. 500 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



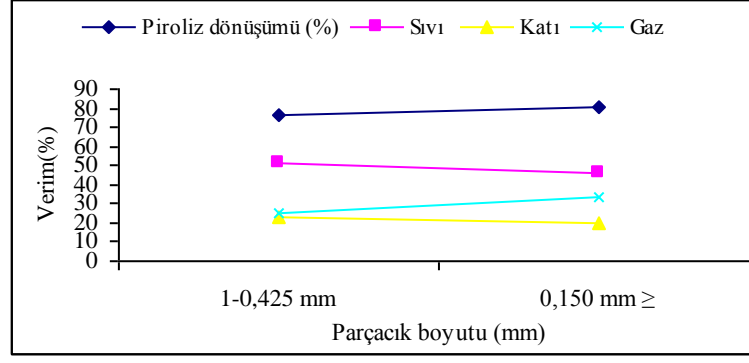
Şekil 31. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



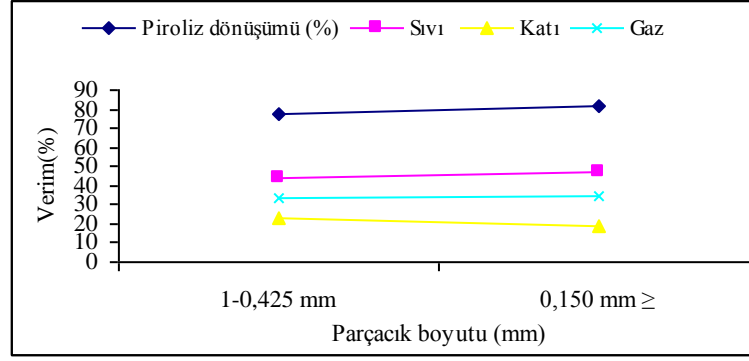
Şekil 32. 550 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



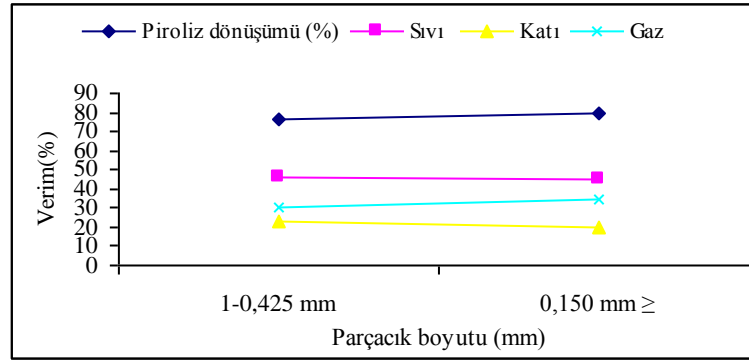
Şekil 33. 550 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



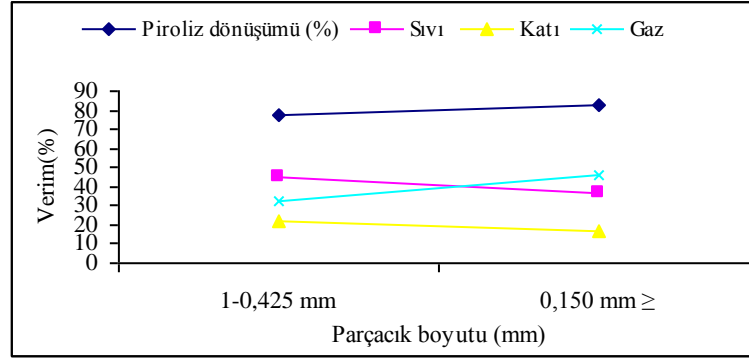
Şekil 34. 600 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



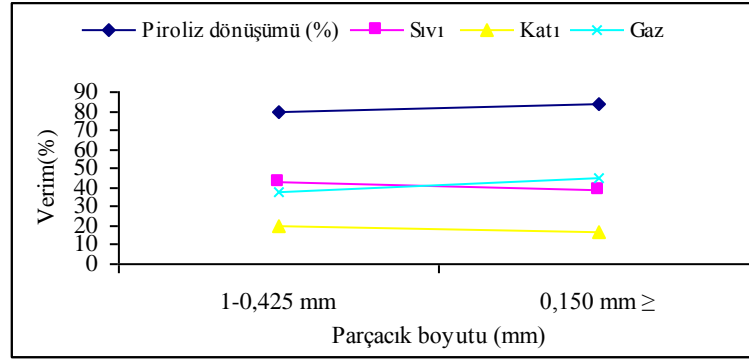
Şekil 35. 600 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



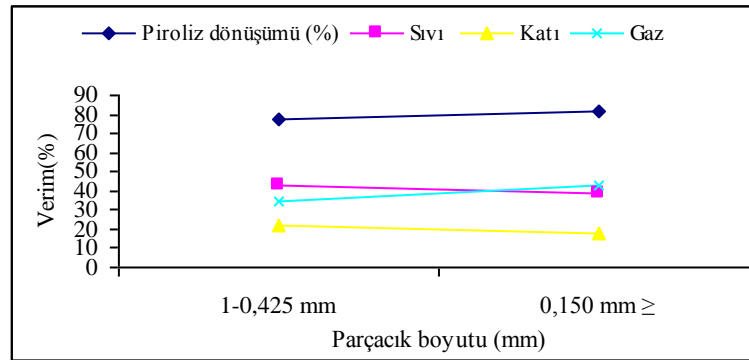
Şekil 36. 600 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 37. 650 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 38. 650 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 39. 650 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında çay çalısının pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi

Piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği bu bölümde (Şekil 31–45) 450 °C, 500 °C ve 550 °C piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürününün arttığı görülmüştür fakat bunun aksine 600

$^{\circ}\text{C}$ ve $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150\text{ mm}$) piroliz sıvı ürünün genelde azaldığı görülmüştür. Genel olarak hızlı piroliz de kullanılan biyokütlenin parçacık boyutunun 2 mm den daha düşük olduğu durumlarda parçacık boyutunun değişmesi ürün verimini çok fazla etkilememektedir.

3.3. Orman Gülü Hızlı Piroliz Sonuçları

Deneyle 200 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 $^{\circ}\text{C}$ piroliz sıcaklıklarında, $1,00 < D_p < 0,425\text{ mm}$ ve $D_p \leq 0,150\text{ mm}$ parçacık boyutlarında ve 100, 200 ve 300 cm^3/dk sürükleyici gaz akış hızlarında orman gülü üzerine ürün verimlerinin değişimi incelenmiştir. Deney sonuçları üç ayrı kategoride tablanmıştır. Birincisi; sabit parçacık boyutu ve sabit sürükleyici gaz akış hızında, Piroliz Sıcaklığı – Ürün Verimi tabloları, ikincisi; sabit piroliz sıcaklığı ve sabit parçacık boyutunda, Sürükleyici Gaz Akış Hızı – Ürün Verimi tabloları, üçüncüsü; sabit piroliz sıcaklığında ve sabit sürükleyici gaz akış hızında Parçacık Boyutu – Ürün Verimi tablolarıdır. Tablo (41 - 71)

3.3.1. Sabit Parçacık Boyutu ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Piroliz Sıcaklığı – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.41. Orman gülünün $1-0,425\text{ mm}$ parçacık boyutu ve $100\text{ cm}^3/\text{dk}$ daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: $100\text{ cm}^3/\text{dk}$		Parçacık boyutu: $1-0,425\text{ mm}$		
Piroliz Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	70,80	35,21	29,20	35,59
500	72,45	36,15	27,55	36,30
550	78,82	39,35	21,18	39,47
600	83,86	46,22	16,17	37,64
650	84,09	37,54	15,90	46,55

Tablo.42. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 200 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	71,54	37,06	28,46	34,48
500	72,62	38,43	27,38	35,56
550	78,98	41,38	21,02	37,60
600	83,96	53,26	16,04	30,70
650	84,12	42,30	15,88	41,82

Tablo.43. Orman gülünün 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 300 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	70,82	35,58	29,18	35,24
500	71,96	36,85	28,04	35,11
550	76,32	38,64	23,68	37,68
600	82,94	46,08	17,06	36,86
650	83,68	39,92	16,32	43,76

Tablo.44. Orman gülünün 0,150 mm ≥ parçacık boyutu ve 100 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 100 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 0,150 mm ≥		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	75,72	38,16	24,28	37,56
500	77,33	39,52	22,67	39,17
550	79,85	41,58	20,15	38,27
600	84,76	50,24	15,24	34,52
650	85,34	40,36	14,66	44,98

Tablo.45. Orman gülünün 0,150 mm ≥ parçacık boyutu ve 200 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 200 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 0,150 mm ≥		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	75,80	40,10	24,20	35,70
500	77,84	42,22	22,16	35,62
550	80,15	42,94	29,85	37,21
600	84,80	54,21	15,20	30,59
650	85,38	43,24	14,62	42,14

Tablo.46. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 300 cm³/dk daki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Azot Akış Hızı: 300 cm ³ /dk		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Piroliz Sıcaklığı (°C)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
450	75,64	37,92	24,36	37,72
500	77,16	38,69	22,84	38,47
550	79,33	41,46	20,67	37,87
600	84,61	49,85	15,39	34,76
650	85,08	40,17	14,92	44,91

3.3.2. Sabit Piroliz Sıcaklığı ve Sabit Parçacık Boyutunda, Sürükleyici Gaz Akış Hızı – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.47. Orman gülünün 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 450 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	70,80	35,21	29,20	35,59
200	71,54	37,06	28,46	34,48
300	70,82	35,58	29,18	35,24

Tablo.48. Orman gülünün 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 500 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	72,45	36,15	27,55	36,30
200	72,62	38,43	27,38	35,56
300	71,96	36,85	28,04	35,11

Tablo.49. Orman gülünün 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 550 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	78,82	39,35	21,18	39,47
200	78,98	41,38	21,02	37,60
300	76,32	38,64	23,68	37,68

Tablo.50. Orman gülünün 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 600 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	83,86	46,22	16,17	37,64
200	83,96	53,26	16,04	30,70
300	82,94	46,08	17,06	36,86

Tablo.51. Orman gülünün 1–0,425 mm parçacık boyutu ve 650 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650 °C		Parçacık boyutu: 1-0,425 mm		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	84,09	37,54	15,90	46,55
200	84,12	42,30	15,88	41,82
300	83,68	39,92	16,32	43,76

Tablo.52. Orman gülünün 0,150 mm ≥ parçacık boyutu ve 450 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm ≥		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	75,72	38,16	24,28	37,56
200	75,80	40,10	24,20	35,70
300	75,64	37,92	24,36	37,72

Tablo.53. Orman gülünün 0,150 mm ≥ parçacık boyutu ve 500 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm ≥		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	77,33	39,52	22,67	39,17
200	77,84	42,22	22,16	35,62
300	77,16	38,69	22,84	38,47

Tablo.54. Orman gülünün 0,150 mm ≥ parçacık boyutu ve 550 °C’deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm ≥		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	79,85	41,58	20,15	38,27
200	80,15	42,94	29,85	37,21
300	79,33	41,46	20,67	37,87

Tablo.55. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	84,76	50,24	15,24	34,52
200	84,80	54,21	15,20	30,59
300	84,61	49,85	15,39	34,76

Tablo.56. Orman gülünün 0,150 mm \geq parçacık boyutu ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650 °C		Parçacık boyutu: 0,150 mm \geq		
Azot Akış Hızı (cm ³ /dk)	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
100	85,34	40,36	14,66	44,98
200	85,38	43,24	14,62	42,14
300	85,08	40,17	14,92	44,91

3.3.3. Sabit Piroliz Sıcaklığında ve Sabit Sürükleyici Gaz Akış Hızında, Parçacık Boyutu – Ürün Verimi Tabloları

Tablo.57. Orman gülünün 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	70,80	35,21	29,20	35,59
0,150 mm \geq	75,72	38,16	24,28	37,56

Tablo.58. Orman gülünün 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	71,54	37,06	28,46	34,48
0,150 mm \geq	75,80	40,10	24,20	35,70

Tablo.59. Orman gülünün 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 450 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 450		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	70,82	35,58	29,18	35,24
0,150 mm ≥	75,64	37,92	24,36	37,72

Tablo.60. Orman gülünün 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	72,45	36,15	27,55	36,3
0,150 mm ≥	77,33	39,52	22,67	39,17

Tablo.61. Orman gülünün 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	72,62	38,43	27,38	35,56
0,150 mm ≥	77,84	42,22	22,16	35,62

Tablo.62. Orman gülünün 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 500 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 500		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	71,96	36,85	28,04	35,11
0,150 mm ≥	77,16	38,69	22,84	38,47

Tablo.63. Orman gülünün 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	78,82	39,35	21,18	39,47
0,150 mm ≥	79,85	41,58	20,15	38,27

Tablo.64. Orman gülünün 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	78,98	41,38	21,02	37,60
0,150 mm ≥	80,15	42,94	29,85	37,21

Tablo.65. Orman gülünün 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 550 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 550		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	76,32	38,64	23,68	37,68
0,150 mm ≥	79,33	41,46	20,67	37,87

Tablo.66. Orman gülünün 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	83,86	46,22	16,17	37,64
0,150 mm ≥	84,76	50,24	15,24	34,52

Tablo.67. Orman gülünün 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	83,96	53,26	16,04	30,70
0,150 mm ≥	84,80	54,21	15,20	30,59

Tablo.68. Orman gülünün 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 600 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 600		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	82,94	46,08	17,06	36,86
0,150 mm ≥	84,61	49,85	15,39	34,76

Tablo.69. Orman gülünün 100 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 100		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	84,09	37,54	15,90	46,55
0,150 mm ≥	85,34	40,36	14,66	44,98

Tablo.70. Orman gülünün 200 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

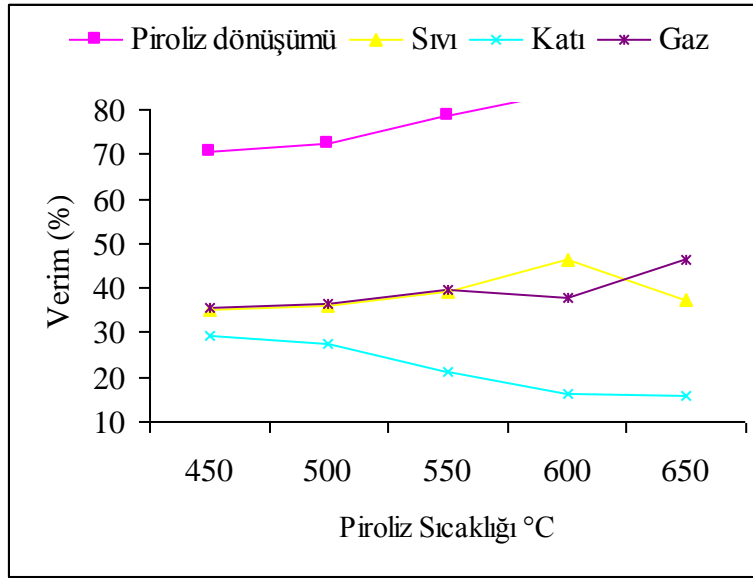
Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 200		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	84,12	42,30	15,88	41,82
0,150 mm ≥	85,38	43,24	14,62	42,14

Tablo.71. Orman gülünün 300 (cm³/dk) azot akış hızında ve 650 °C'deki pirolizinden elde edilen deneysel sonuçlar

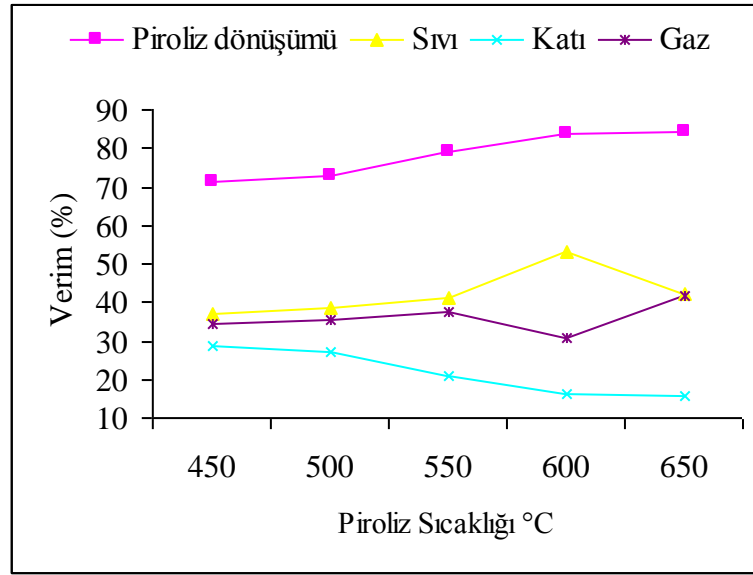
Piroliz Sıcaklığı (°C): 650		Azot Akış Hızı (cm ³ /dk) : 300		
Parçacık boyutu	Piroliz dönüşümü (%)	Sıvı ürün (%)	Katı ürün (%)	Gaz ürün (%)
1-0,425 mm	83,68	39,92	16,32	43,76
0,150 mm ≥	85,08	40,17	14,92	44,91

3.3.4. Orman Gülü Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi

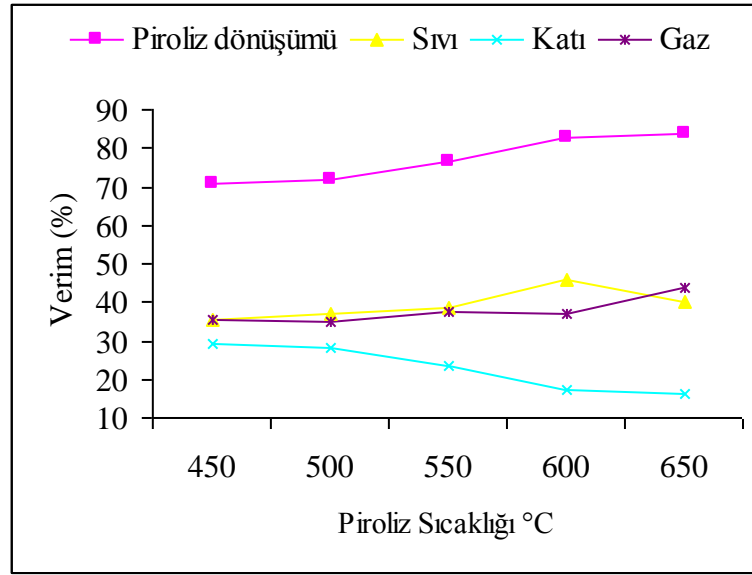
Biyokütle örneği olarak Orman Gülü kullanılan bu deneylerde (450 °C ile 650 °C arasında) beş farklı piroliz sıcaklığı kullanıldı. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek sıvı ürün verimine % 54,21 ile 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutu, 200 cm³/dk azot akış hızında ve 600 °C de ulaşılmıştır. Bu bölümde iki farklı parçacık boyutunda (0,150 mm ≥ D_p ve 1,0 < D_p < 0,425 mm) ve üç farklı azot gazı akış hızında (100-200 ve 300 cm³/dk) piroliz ürün verimi üzerine sıcaklığın etkisi aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 40- 45).



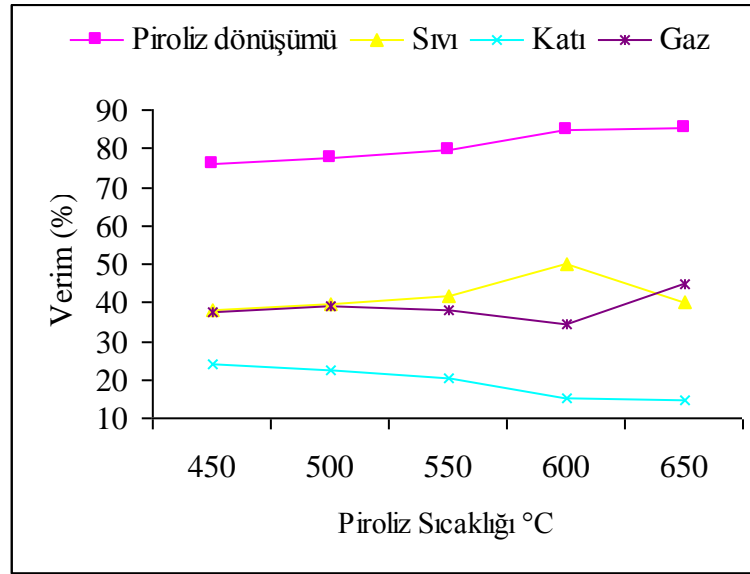
Şekil 40. Orman gülü pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 100 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



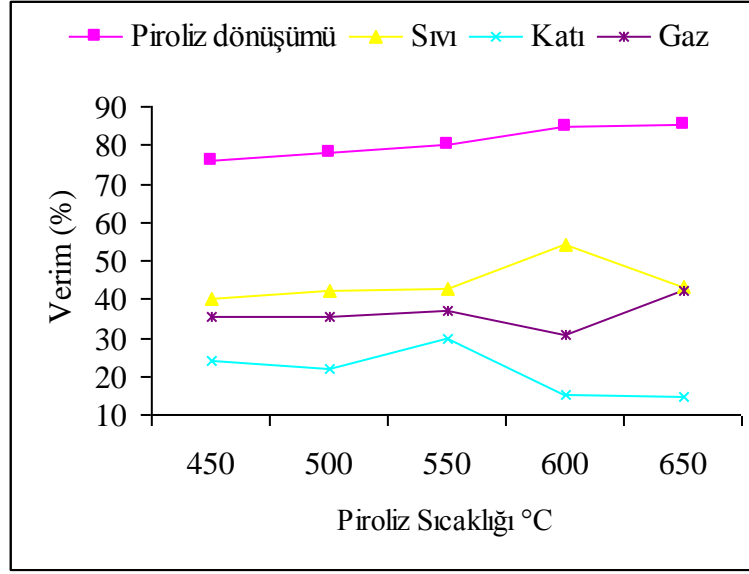
Şekil 41. Orman gülü pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 200 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



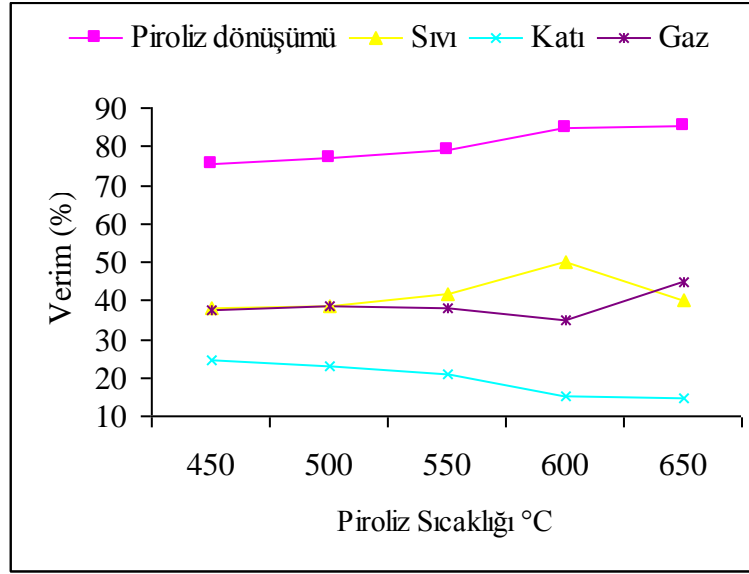
Şekil 42. Orman gülü pirolizi için 1-0,425 mm parçacık boyutu ve 300 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 43. Orman gülü pirolizi için 0,150 mm $\geq D_p$ parçacık boyutu ve 100 cm³/dak azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 44. Orman gülü pirolizi için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi



Şekil 45. Orman gülü pirolizi için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve $300 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi

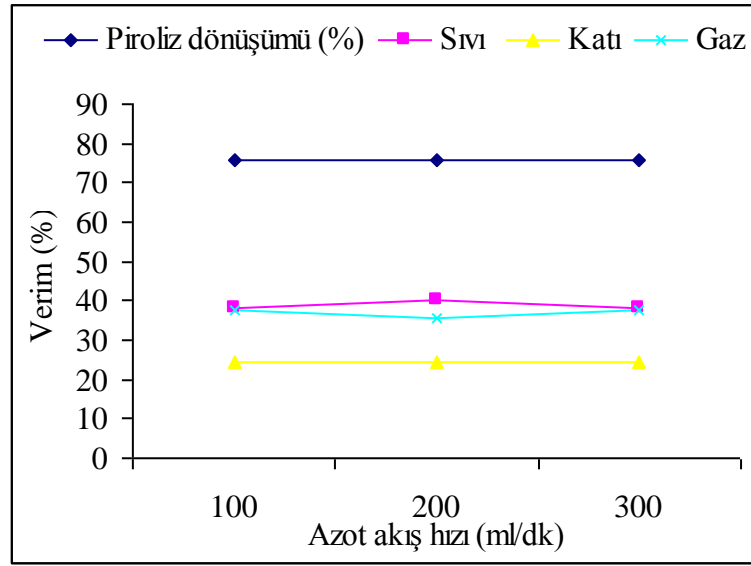
Orman gülü için piroliz sıcaklığının verime karşı çizilmesiyle elde edilen grafikler (Şekil 40–45) incelendiğinde, en yüksek sıvı ürün verimine $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızı, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki grafikte görülmüştür. Tüm şekillerden anlaşılacağı üzere piroliz sıcaklığının $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkması ile piroliz

dönüşümünün sürekli bir artış gösterdiği, bu artışa 600 °C'ye kadar sıvı ürün verimindeki artışın neden olduğu, 600 °C'den sonra ise gaz ürün verimindeki artışın neden olduğu görülmektedir. Sıcaklığın 450 °C'den 650 °C'ye çıkması ile piroliz dönüşümü % 70,80 - % 75,80 aralığından , % 83,68 - % 85,38 aralığına kadar yükseldiği görülmüştür.

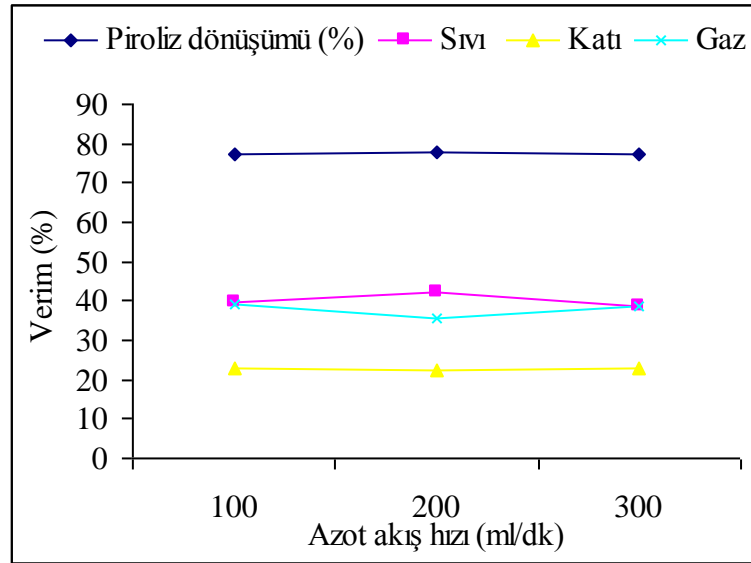
Şekil 40–45'deki grafikler incelendiğinde katı ürün veriminin piroliz sıcaklığının artması ile azalma eğilimi içinde olduğu gözlenmiştir. En düşük katı ürün verimi ise 650 °C'de % 14,62 bulundu. Yine bu grafikler incelendiğinde Şekil 40'ta görüldüğü üzere gaz ürün veriminin $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutu ve $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında , 650 °C de % 46,55 ile maksimum düzeyde olduğu görülmüştür.

3.3.5. Orman Gülü Piroliz Ürün Verimi Üzerine Sürükleyici Gaz Akış Hızının Etkisi

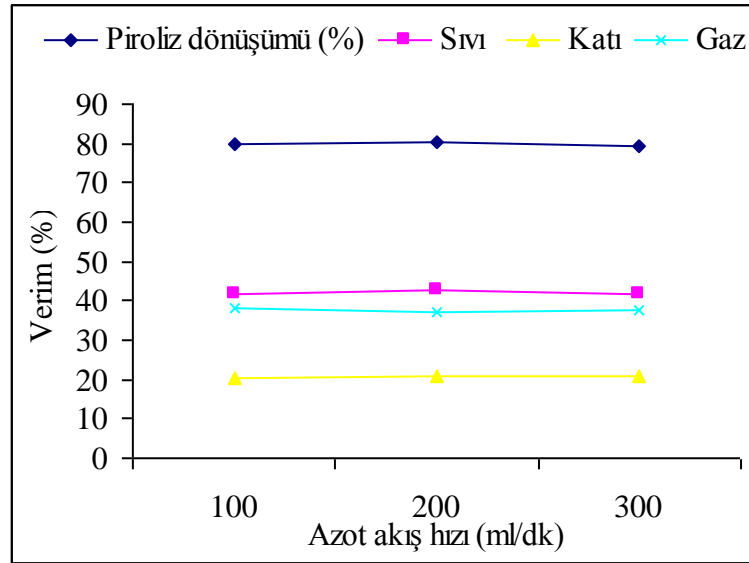
Biyokütle örneği olarak Orman Gülü kullanılan bu deneylerde $1,0 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, 450 °C ile 650 °C arasında beş farklı piroliz sıcaklığında üç farklı azot akış hızı kullanıldı. Bu kısımda hızlı piroliz yönteminde ürün verimi üzerine sürükleyici gaz akış hızının etkisi incelendi. Bu deneylerde sürükleyici gaz olarak azot gazı kullanıldı. Deney sonuçlarına göre her iki parçacık boyutunda ki ($1,0 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150 \text{ mm} \geq D_p$) piroliz ürün verimleri üzerine sürükleyici gaz akış hızının etkisi araştırıldı. Elde edilen deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 46–55).



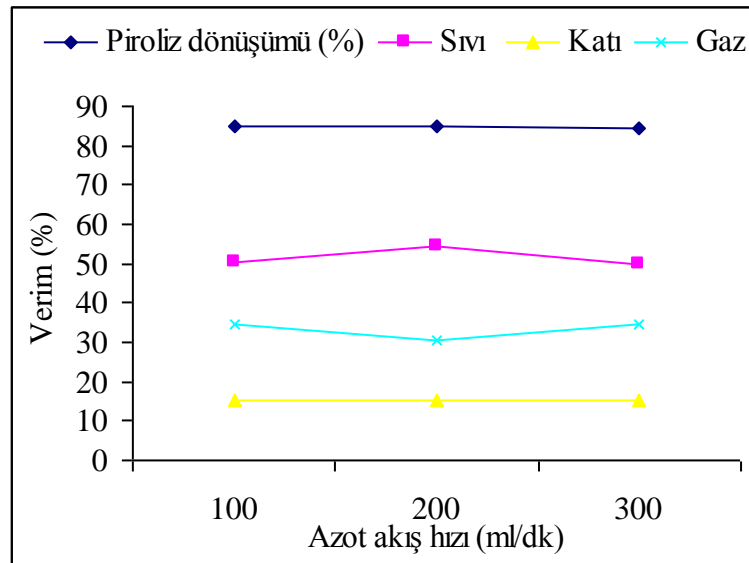
Şekil 46. Orman gülü için 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutunda 450 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



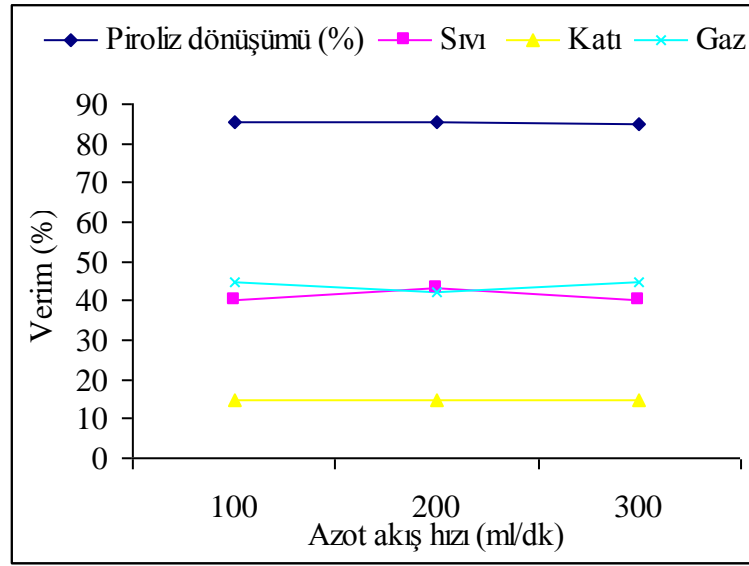
Şekil 47. Orman gülü için 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



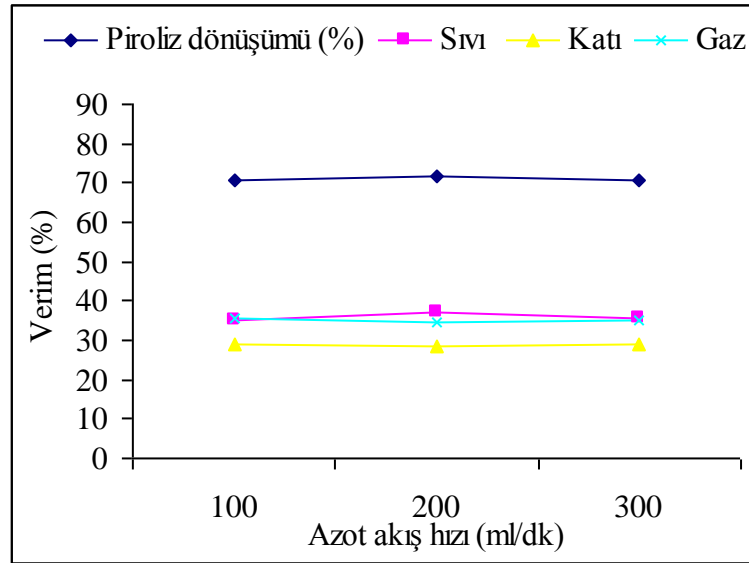
Şekil 48. Orman gülü için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $550 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



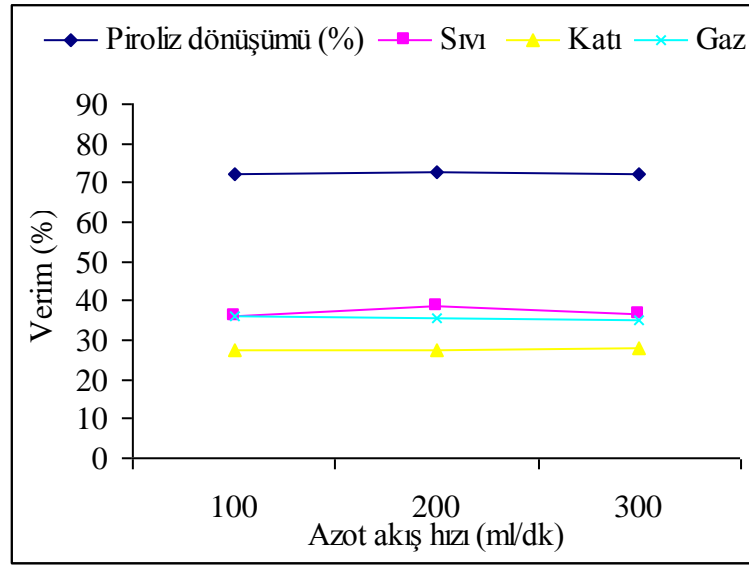
Şekil 49. Orman gülü için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $600 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



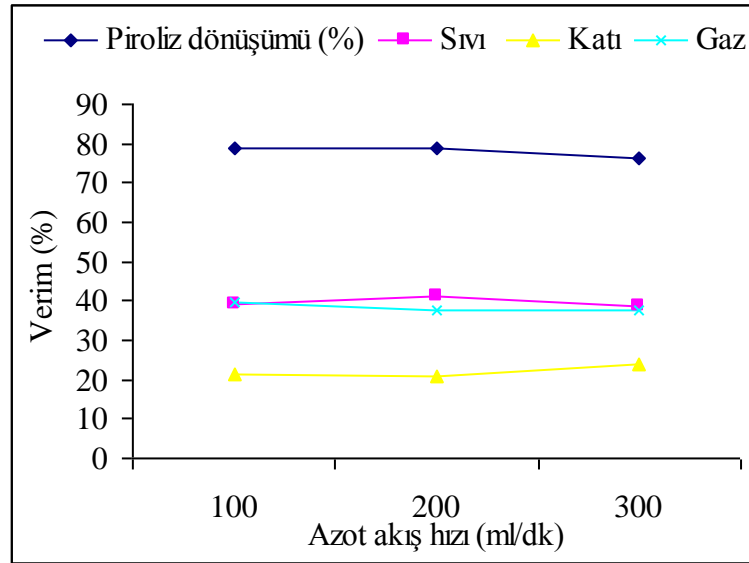
Şekil 50. Orman gülü için $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda $650 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



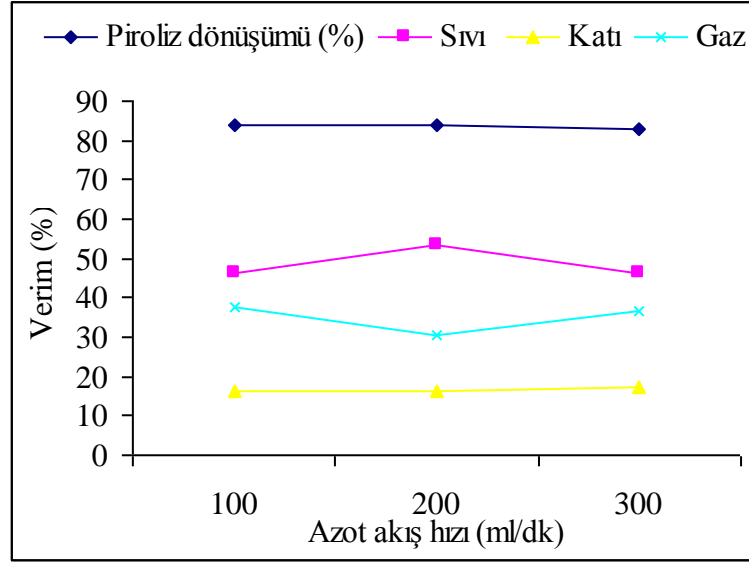
Şekil 51. Orman gülü için $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda $450 \text{ }^\circ\text{C}$ deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



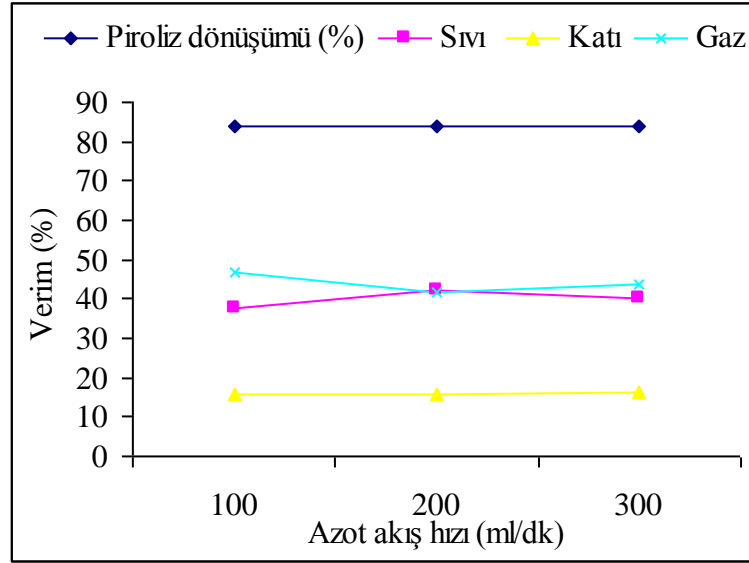
Şekil 52. Orman gülü için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 500 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 53. Orman gülü için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 550 °C deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 54. Orman gülü için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 600 °C'deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi



Şekil 55. Orman gülü için $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda 650 °C'deki piroliz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi

Şekil 46'dan Şekil 55'e kadar olan grafikler incelendiğinde her iki parçacık boyutunda da 450 °C – 650 °C arası sabit sıcaklıklarda azot gazı akış hızı arttıkça piroliz dönüşüm verimini çok önemli bir şekilde etkilememektedir. En yüksek piroliz dönüşümü verimine ($0,150$ mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda) 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 75,80 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 77,84 ile,

550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 80,15 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 84,80 ile, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 85,38 ile, (1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda) ise 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 71,54 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 72,62 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 78,98 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 83,96 ile 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 84,12 ile ulaşılmıştır.

Azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C, 500 °C ve 550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) 200 cm³/dak azot gazı akış hızında diğer akış hızlarına göre en yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda ise tüm sıcaklık değerlerinde 200 cm³/dak azot gazı akış hızında diğer akış hızlarına göre en sıvı ürün veriminde en yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. En yüksek sıvı ürün verimine 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 40,10 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,22 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,94 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 54,21 ile, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 43,24 ile, 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda ise 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 37,06 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 38,43 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 41,38 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 53,26 ile 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,30 ile ulaşılmıştır.

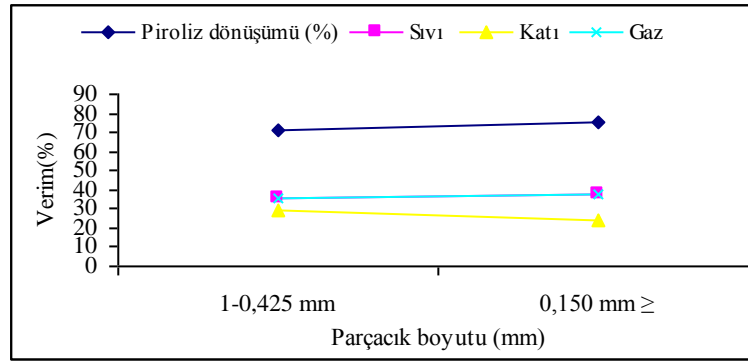
Azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman 1,0 < D_p < 0,425 mm ve 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutlarında tüm sıcaklıklarda sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminde çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir fakat tüm sıcaklıklarda hafif bir farkla da olsa 300 cm³/dak azot gazı akış hızında katı ürün veriminin en yüksek değerde olduğu görülmüştür. En yüksek katı ürün verimi 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda, 450 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 29,18 ile en düşük katı ürün verimi ise 0,150 mm ≥ D_p parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 14,62 ile gözlenmiştir.

Şekil 46'dan Şekil 55'e kadar olan her bir grafikte gaz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi incelendiğinde 100 cm³/dak ve 300 cm³/dak akış hızlarına göre 200 cm³/dak

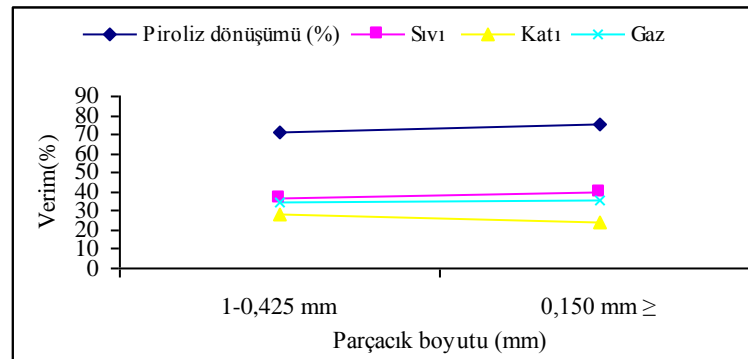
akış hızındaki gaz ürün verimi daha düşüktür. En yüksek gaz verimi $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,55 ile gözlenmiştir.

3.3.6. Orman Gülü Piroliz Ürün Verimleri Üzerine Parçacık Boyutunun Etkisi

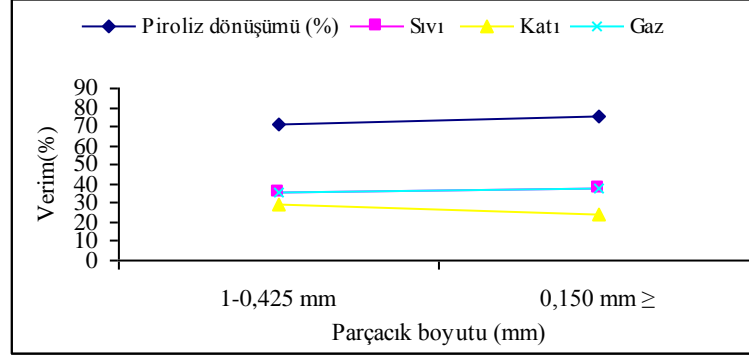
Ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelenmesi amacıyla, 450 °C ile 650 °C arasında beş farklı piroliz sıcaklığında, 100 , 200 ve 300 cm³/dak üç farklı azot gazı akış hızında $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150$ mm $\geq D_p$ parçacık boyutunda olmak üzere iki farklı parçacık boyutunda piroliz ürün verimlerinin nasıl değiştiği araştırıldı. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 56- 70).



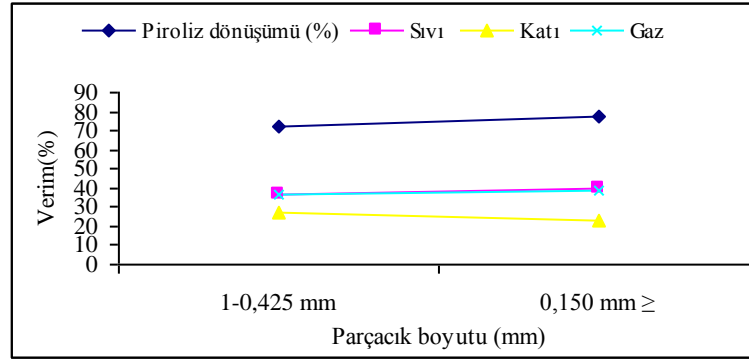
Şekil 56. 450 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



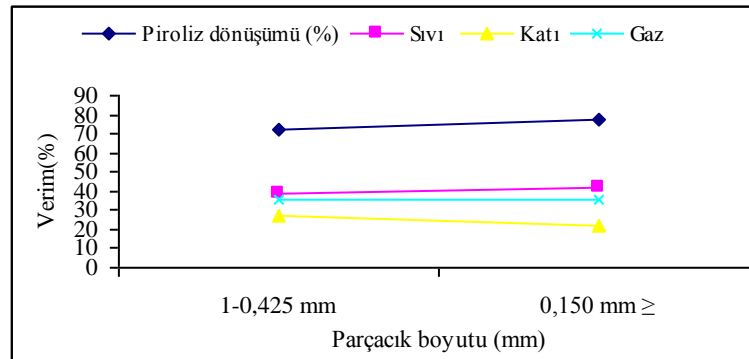
Şekil 57. 450 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



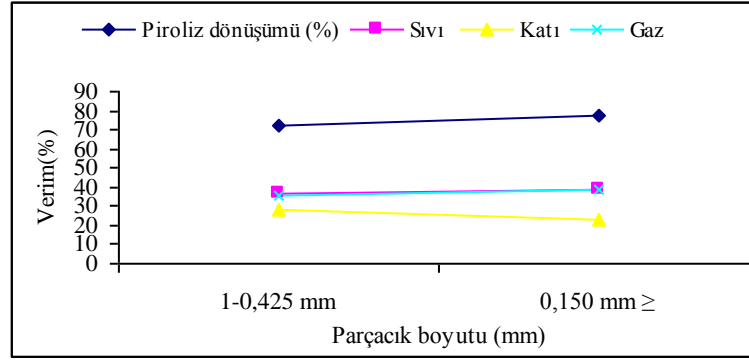
Şekil 58. 450 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



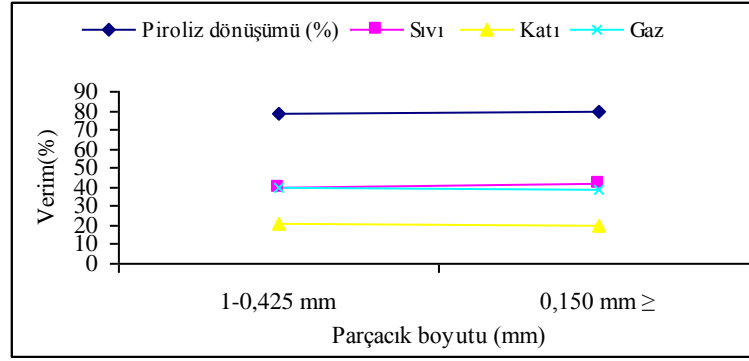
Şekil 59. 500 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



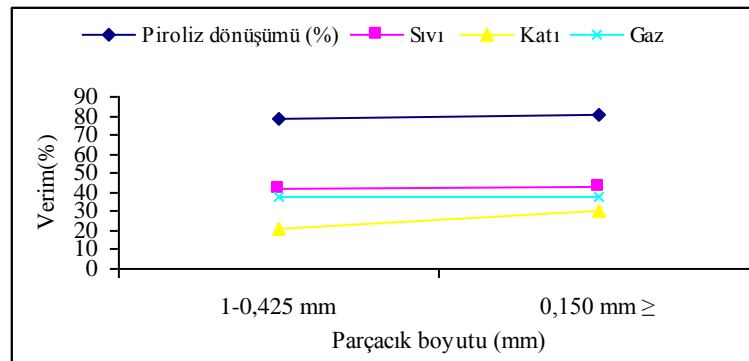
Şekil 60. 500 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



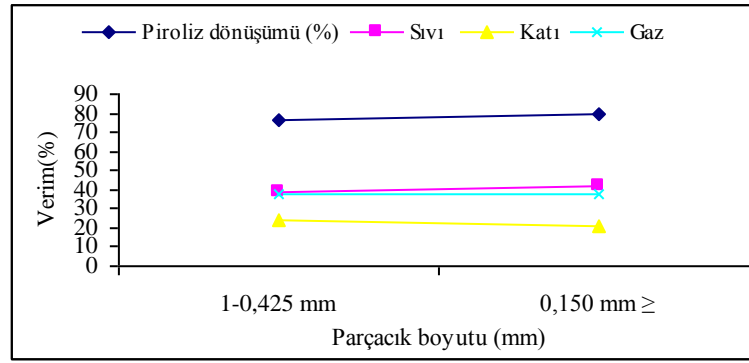
Şekil 61. 500 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



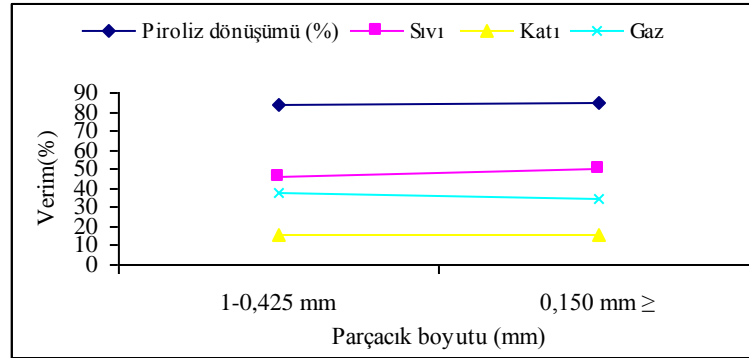
Şekil 62. 550 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



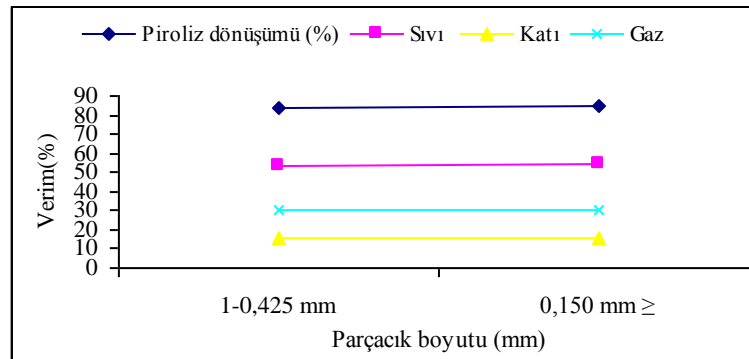
Şekil 63. 550 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



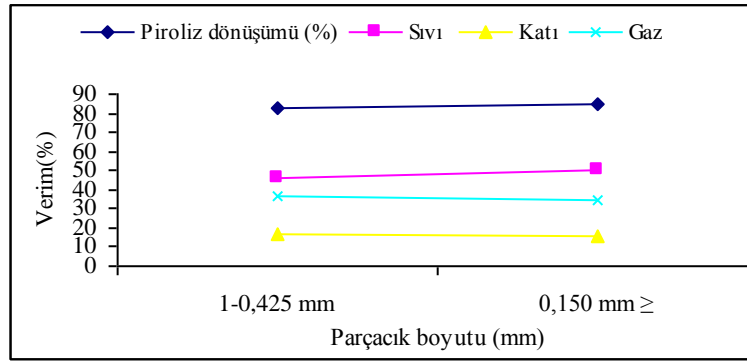
Şekil 64. 550 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



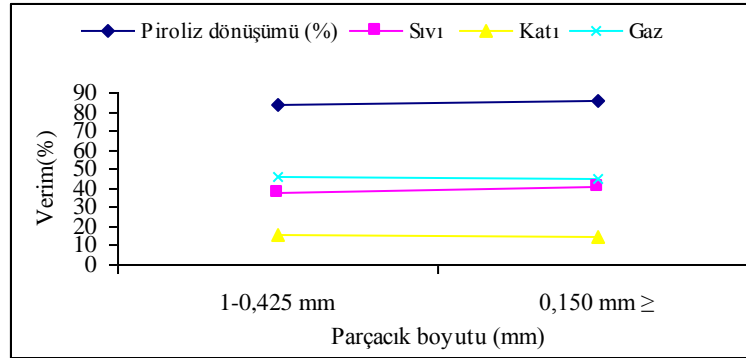
Şekil 65. 600 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



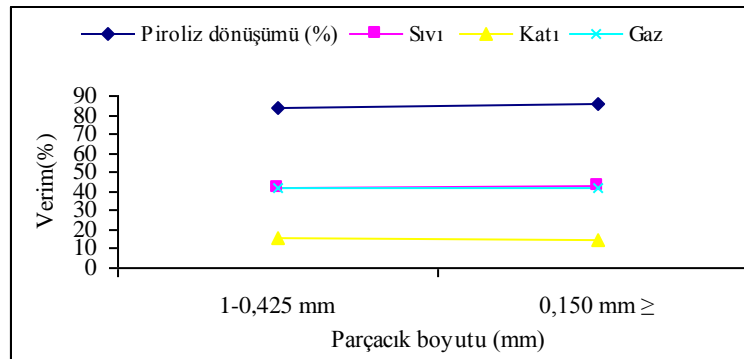
Şekil 66. 600 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



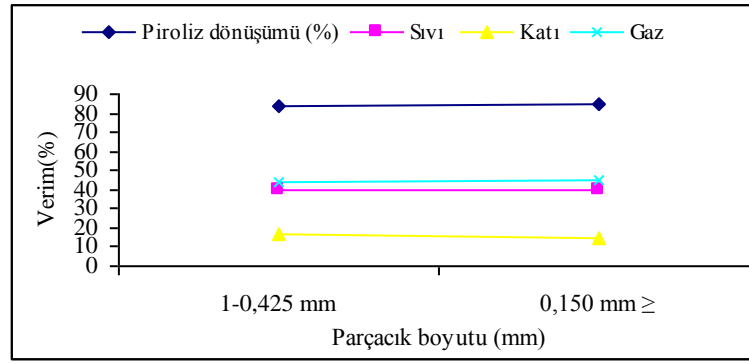
Şekil 67. 600 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 68. 650 °C sıcaklıkta ve 100 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 69. 650 °C sıcaklıkta ve 200 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi



Şekil 70. 650 °C sıcaklıkta ve 300 mL/dak azot akış hızında orman gülünün pirolizinde parçacık boyutunun ürün verimi üzerine etkisi

Piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği bu bölümde (Şekil 56–70) tüm piroliz sıcaklıklarında ve tüm akış hızlarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürününde hafif bir artış görülmüştür. Genel olarak hızlı piroliz de kullanılan biyokütlenin parçacık boyutunun 2 mm den daha düşük olduğu durumlarda parçacık boyutunun değişmesi ürün verimini çok fazla etkilememektedir.

4. TARTIŞMA

Çay çalısının ve orman gülünün nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon içeriklerini belirlemek için kısa analizleri yapılmış ve analizler sonucunda çay çalısı için % 7,52 nem, % 1,68 kül, % 76,58 uçucu madde ve % 14,22 sabit karbon içerdiği orman gülünün ise % 5,68 nem, % 0,67 kül, % 82,05 uçucu madde ve % 11,60 sabit karbon içerdiği belirlenmiştir. Çay çalısı ve orman gülünün kısa analizleri sonucunda elde edilen nem ve kül miktarlarına bakıldığı zaman literatür bilgilerine göre her iki örneğinde biyokütle kaynağı için uygun bir hammadde olduğu tespit edilmiştir (Mohan vd., 2006).

Çay çalısı ve orman gülünün içerdiği bileşenleri belirlemek için bileşen analiz tayinleri yapıldı ve bu işlemler sonucunda çay çalısı numunesinin % 21,15 selüloz, % 54,78 holoselüloz, % 33,63 hemiselüloz, % 32,14 lignin ve % 3,87 organik ekstrat içerdiği, orman gülünün ise % 43,25 selüloz, % 71,12 holoselüloz, % 30,87 hemiselüloz, % 19,16 lignin ve % 3,53 organik ekstrat içerdiği belirlenmiştir. Orman gülünün holoselüloz oranının çay çalısına göre yüksek olması deneyler sonucunda orman gülünden elde edilen piroliz sıvısının alifatik içeriğinin çay çalısına göre daha fazla olması ve çay çalısının lignin içeriğinin orman gülüne göre yüksek olması ise çay çalısının aromatik içeriğin daha fazla olması anlamına gelmektedir (Klas, 1998). Çay çalısı ve orman gülünden elde edilen bileşen analiz sonuçlarına bakıldığı zaman selüloz ve hemiselülozun toplamı olarak verilen holoselüloz miktarının yüksek orman gülünde daha yüksek olduğu ve orman gülü lignin miktarının ise çay çalısına nazaran daha düşük oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

Çay çalısı ve orman gülü örneklerinin ayrıca elementel analiz tayinleride yapıldı. Bu tayinler sonucunda, çay çalısının % 45,64'ünün karbon, % 5,88'inin hidrojen, % 0,85'inin azot ve % 47,63'ünün oksijenden oluştuğu orman gülünün ise % 45,69'unun karbon, % 5,73'ünün hidrojen, % 0,75'inin azot ve % 47,83'ünün ise oksijenden oluştuğu belirlenmiştir. H/C oranı çay çalısı için 1,54, orman gülü için ise 1,50 olarak belirlendi. H/C oranı 1'in altında ise katı yakıt, 1–2 arasında ise sıvı yakıt ve 4 civarında olması gaz yakıt olarak kullanılabilineceğini göstermektedir. Çay çalısı ve orman gülünün H/C oranı sıvı yakıt değerleri arasında olduğu için biyoyakıt olarak kullanılabilceği ve bu değerlere göre ise çay çalısını orman gülüne göre biraz daha iyi bir biyoyakıt olduğu düşünülmektedir.

Çay çalısının O/C oranı 0,78, orman gülünün ki ise 0,79 olarak hesaplanmış ve elde edilen bu değerın yakıt olarak kullanılan biyokütlelerin O/C oranlarına yakın olduğu belirlenmiştir. Fakat O/C oranının yüksek olması yakıtın enerji değerini düşmesine sebep olmaktadır (Bridgwater, 2006). Çay çalısının üst ısıl değeri 17,88 kJ/g , orman gülünün üst ısıl değeri ise 17,70 kJ/g belirlenmiştir. Bu sonuçlar, elde edilen biyoyakıtın petrol türevi yakıtların (benzin için 43,8 kJ/g) yaklaşık yarı enerji içeriğine sahip olduğunu ama yine de elde edilen bu yakıtın yenilenebilir bir yakıt olarak kullanılabilineceği düşünölmektedir (Klas,1998). Elementel analiz sonuçlarından çay çalısının ampirik formölü $C_{63}H_{96}O_{49}N$, orman gülünün ise $C_{63}H_{94}O_{49}N$ olarak belirlenmiştir.

Deneyler 200 °C/dk ısıtma hızında 450, 500, 550, 600 ve 650 °C piroliz sıcaklıklarında, $1,00 < D_p < 0,425$ mm ve $D_p \leq 0,150$ mm parçacık boyutlarında ve 100, 200 ve 300 cm^3/dk sürükleyici gaz akış hızlarında çay çalısı ve orman gülü biyokütle örnekleri üzerine ürün verimlerinin değışimi incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deneylerde ilk önce piroliz ürün verimi üzerine piroliz sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Piroliz sıcaklığı, piroliz ürün verimlerini etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu için piroliz sıcaklığının değışmesi ile piroliz ürün verimi büyük oranda değıştirmektedir (Putun, 2001). Piroliz sıcaklığı ürün verimini etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Biyokütlenin pirolizinde en uygun sıcaklık 400 °C ve 700 °C arasındır. Biyokütle örneği olarak çay çalısı ve orman gülü kullanılan bu deneylerde (450 °C ile 650 °C arasında) beş farklı piroliz sıcaklığı kullanılmıştır.

Çay çalısında en yüksek sıvı ürün verimine $1-0,425$ mm parçacık boyutunda , 100 cm^3/dak azot akış hızında , 600 °C’de ulaşılmasına rağmen diğer çay çalısı deneylerinde en yüksek sıvı verimi 550 °C olarak görölmektedir. Bu sonuç çay çalısının deneysel ortamında bir hata yapıldığını göstermektedir. Yapılan deneylerden anlaşılacağı üzere piroliz sıcaklığının 450 °C’den 650 °C’ye çıkması ile piroliz dönüşümünün sürekli bir artış gösterdiği, bu artışa 550 °C’ye kadar sıvı ürün verimindeki artışın neden olduğu, 550 °C’den sonra ise gaz ürün verimindeki artışın neden olduğu görölmektedir. Sıcaklığın 450 °C’den 650 °C’ye çıkması ile piroliz dönüşümü % 62,05 - % 72,50 aralığından , % 77,82 - % 83,38 aralığına kadar yükseldiği görölmüştür. Deneysel veriler incelendiğinde katı ürün veriminin piroliz sıcaklığının artması ile azalma eğilimi içinde olduğu gözlenmiştir. En düşük katı ürün verimi ise 650 °C’de % 16,92 bulundu. Yıbe deneysel verilerden anlaşılacağı üzere gaz ürün veriminin $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu ve 100 cm^3/dak azot akış hızında , 650 °C de % 46,13 ile maksimum düzeyde olduğu görölmüştür.

Orman gülünün deneysel sonuçları incelendiğinde en yüksek sıvı ürün verimine % 54,21 ile $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutu, $200 \text{ cm}^3/\text{dk}$ azot akış hızında ve $600 \text{ }^\circ\text{C}$ de ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlardan anlaşılacağı üzere piroliz sıcaklığının $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkması ile piroliz dönüşümünün sürekli bir artış gösterdiği, bu artışa $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar sıvı ürün verimindeki artışın neden olduğu, $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den sonra ise gaz ürün verimindeki artışın neden olduğu görülmektedir. Sıcaklığın $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkması ile piroliz dönüşümü % 70,80 - % 75,80 aralığından , % 83,68 - % 85,38 aralığına kadar yükseldiği görülmüştür. Yine veriler incelendiğinde katı ürün veriminin piroliz sıcaklığının artması ile azalma eğilimi içinde olduğu gözlenmiştir. En düşük katı ürün verimi ise $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de % 14,62 bulunmuştur. Gaz ürün veriminin ise $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutu ve $100 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot akış hızında , $650 \text{ }^\circ\text{C}$ de % 46,55 ile maksimum düzeyde olduğu görülmüştür. Her iki biyokütle örneğinin sonuçlarına göre piroliz ürün veriminin sıcaklık arttıkça artış gösterdiği, ve bu sonuçların literatüre uygun olduğu görülmüştür. Çay çalışının orman gülüne göre daha erken bir sıcaklıkta en yüksek sıvı verimine ulaşması kimyasal içeriklerinin farklı olduğunu göstermektedir ve çay çalışının daha iyi bir biyoyakıt örneği olduğu düşünülmektedir.

Sürükleyici gaz akış hızı piroliz için önemli bir etkidir. Sürükleyici gaz akış hızının yüksek olması piroliz buharlarının ortamdaki hızla ikincil reaksiyonların gerçekleşmesine izin vermeden ortamdaki uzaklaşmasını sağlar ve bunun sayesinde sıvı ürün verimi yüksek olur. Fakat sürükleyici gaz akış hızının iyi ayarlanması gerekmektedir, eğer sürükleyici gaz akış hızı çok yüksek olursa oluşan buharları hızlı bir şekilde soğutma sistemine gönderilir ve soğutma sisteminde bu buharların tutularak yoğunlaşması zorlaşacaktır. Piroliz işleminde genellikle sürükleyici gaz olarak azot gazı kullanılmaktadır. Piroliz sıcaklığı üzerine sürükleyici gaz akış hızının belirlenmesi için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Pütün vd., 2001)

En yüksek piroliz dönüşümü verimine $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, $650 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta, $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 83,38 ile, $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda ise $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ azot gazı akış hızında % 79,66 ile ulaşılmıştır.

Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere çay çalışısı için en yüksek piroliz verimi elde etmede en uygun azot gazı akış hızı $200 \text{ cm}^3/\text{dak}$ olarak gözlenmiştir.

Çay çalışısı için azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda ($450 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $500 \text{ }^\circ\text{C}$) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer yüksek

sıcaklıklarda (550 °C , 600 °C ve 650 °C) ise herhangi bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir. En yüksek sıvı ürün verimine $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 44,05 ile , 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,10 ile, 550 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 50,82 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 47,06 ile, 650 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 39,18 ile, $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda ise 450 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 40,10 ile, 500 °C sıcaklıkta 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 41,55 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 48,08 ile, 600 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 51,17 ile 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 45,29 ile ulaşılmıştır.

Çay çalısı için azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C , 500 °C ve 550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminin düştüğü diğer yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) ise çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir. En yüksek katı ürün verimi $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda, 450 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 36,81 ile en düşük katı ürün verimi ise $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında %16,92 ile gözlenmiştir.

Çay çalısı için sürükleyici gaz akış hızının artması ile ve farklı parçacık boyutlarında gaz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi incelendiğinde bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir. En yüksek gaz verimi ise $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,13 ile gözlenmiştir.

Orman gülü deneylerinde her iki parçacık boyutunda da 450 °C – 650 °C arası sabit sıcaklıklarda azot gazı akış hızı arttıkça piroliz dönüşüm verimini çok önemli bir şekilde etkilememektedir. En yüksek piroliz dönüşümü verimine ($0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutunda) 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 85,38 ile, ($1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda) ise 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 84,12 ile ulaşılmıştır.

Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere orman gülü için için en uygun azot gazı akış hızı 200 cm³/dak olarak gözlenmiştir.

Orman gülü için azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425 \text{ mm}$ parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C , 500 °C ve 550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer

yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) 200 cm³/dak azot gazı akış hızında diğer akış hızlarına göre en yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutunda ise tüm sıcaklık değerlerinde 200 cm³/dak azot gazı akış hızında diğer akış hızlarına göre en sıvı ürün veriminde en yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. En yüksek sıvı ürün verimine 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutunda 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 40,10 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,22 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,94 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 54,21 ile, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 43,24 ile, 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda ise 450 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 37,06 ile, 500 °C sıcaklıkta 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 38,43 ile, 550 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 41,38 ile, 600 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 53,26 ile 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 42,30 ile ulaşılmıştır.

Orman gülü için azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman 1,0 < D_p < 0,425 mm ve 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutlarında tüm sıcaklıklarda sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminde çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir fakat tüm sıcaklıklarda hafif bir farkla da olsa 300 cm³/dak azot gazı akış hızında katı ürün veriminin en yüksek değerde olduğu görülmüştür. En yüksek katı ürün verimi 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda, 450 °C sıcaklıkta, 300 cm³/dak azot gazı akış hızında % 29,18 ile en düşük katı ürün verimi ise 0,150 mm \geq D_p parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 200 cm³/dak azot gazı akış hızında % 14,62 ile gözlenmiştir.

Orman gülü için gaz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi incelendiğinde 100 cm³/dak ve 300 cm³/dak akış hızlarına göre 200 cm³/dak akış hızındaki gaz ürün verimi daha düşüktür. En yüksek gaz verimi 1,0 < D_p < 0,425 mm parçacık boyutunda, 650 °C sıcaklıkta, 100 cm³/dak azot gazı akış hızında % 46,55 ile gözlenmiştir.

Parçacık boyutunun düşük olması piroliz işlemi sırasında örnekle reaktör arasındaki ısı transferini artırdığı için piroliz de parçacık boyutu genellikle 2 mm'den daha düşük olarak seçilmektedir. Diğer taraftan 2 mm'den daha yüksek parçacık boyutu ısı transferini azalttığı için piroliz işleminde pek tercih edilmemektedir. Parçacık boyutunun piroliz ürün verimi üzerine etkisini araştırmak için literatürde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Onay ve Kockar, 2003; Zhang vd., 2008; Beis vd., 2002; Açıkgöz, 2004; Uzun vd., 2006; Pütün vd., 2005; Pütün vd., 2004).

Çay çalısı için piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği 450 °C, 500 °C ve 550 °C piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürünün arttığı görülmüştür fakat bunun aksine 600 °C ve 650 °C piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürünün genelde azaldığı görülmüştür.

Bu deney sonuçlarından görüldüğü üzere çay çalısı için daha küçük parçacık boyutunda daha fazla piroliz ürün verimi elde edilmektedir.

Orman gülü için piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği tüm piroliz sıcaklıklarında ve tüm akış hızlarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürününde hafif bir artış görülmüştür.

Deney sonuçlarından anlaşılacağı üzere elde edilen verilerin literatürdeki verilere uygun olduğu görülecektir. Elde edilen sonuçlardaki bazı hatalar deneysel ortamdan kaynaklanabileceği gibi piroliz reaktörünün ısıtma hızındaki dengesizliklerden de kaynaklanmış olabilir bunlara ek olarak alıkonma zamanı da ürün verimini etkilediğinden ama bu deneylerde etkisini araştırmadığımızdan diğer piroliz ürün verimini etkileyen faktörlerden de kaynaklanan hatalar olduğu düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR

Çay çalısı ve orman gülünün kısa analizleri sonucunda elde edilen nem ve kül miktarlarına bakıldığı zaman literatür bilgilerine göre her iki örneğinde biyokütle kaynağı için uygun bir hammadde olduğu tespit edilmiştir.

Çay çalısı ve orman gülünden elde edilen bileşen analiz sonuçlarına bakıldığı zaman selüloz ve hemiselülozun toplamı olarak verilen holoselüloz miktarının yüksek olduğu ve lignin miktarının ise buna nazaran daha düşük oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

Çay çalısı ve orman gülünün H/C oranı sıvı yakıt değerleri arasında olduğu için biyoyakıt olarak kullanılabilmesi ve bu değerlere göre ise çay çalısını orman gülüne göre biraz daha iyi bir biyoyakıt olduğu düşünülmektedir.

Çay çalısının üst ısıl değeri 17,88 kJ/g , orman gülünün üst ısıl değeri ise 17,70 kJ/g belirlenmiştir. Bu sonuçlar, elde edilen biyoyakıtın petrol türevi yakıtlarının (benzin için 43,8 kJ/g) yaklaşık yarı enerji içeriğine sahip olduğunu ama yine de elde edilen bu yakıtın yenilenebilir bir yakıt olarak kullanılabilineceğini göstermektedir.

Elementel analiz sonuçlarından çay çalısının ampirik formülü $C_{63}H_{96}O_{49}N$, orman gülünün ise $C_{63}H_{94}O_{49}N$ olarak belirlenmiştir.

Her iki biyokütle örneğinin sonuçlarına göre piroliz ürün veriminin sıcaklık arttıkça artış gösterdiği, ve bu sonuçların literatüre uygun olduğu görülmüştür.

Çay çalısının orman gülüne göre daha erken bir sıcaklıkta en yüksek sıvı verimine ulaşması kimyasal içeriklerinin farklı olduğunu göstermektedir ve çay çalısının daha iyi bir biyoyakıt örneği olduğu düşünülmektedir.

Çay çalısı için en yüksek piroliz verimi elde etmede en uygun azot gazı akış hızı 200 cm^3/dak olarak gözlenmiştir.

Çay çalısı için azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C ve 500 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer yüksek sıcaklıklarda (550 °C , 600 °C ve 650 °C) ise herhangi bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir.

Çay çalısı için azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C , 500 °C ve

550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminin düştüğü diğer yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) ise çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir.

Çay çalısı için sürükleyici gaz akış hızının artması ile ve farklı parçacık boyutlarında gaz ürün verimi üzerine azot akış hızının etkisi incelendiğinde bir bağıntının kurulamadığı gözlenmiştir.

Orman gülü deneylerinde her iki parçacık boyutunda da 450 °C – 650 °C arası sabit sıcaklıklarda azot gazı akış hızı arttıkça piroliz dönüşüm verimini çok önemli bir şekilde etkilememektedir.

Orman gülü için için en uygun azot gazı akış hızı 200 cm³/dak olarak gözlenmiştir.

Orman gülü için azot gazı akış hızının sıvı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425$ mm parçacık boyutunda düşük sıcaklıklarda (450 °C , 500 °C ve 550 °C) sürükleyici gaz akış hızının artması ile sıvı ürün veriminin fazla değişmediği diğer yüksek sıcaklıklarda (600 °C ve 650 °C) 200 cm³/dak azot gazı akış hızında diğer akış hızlarına göre en yüksek değerler elde edildiği görülmüştür.

Orman gülü için azot gazı akış hızının katı ürün verimi üzerine etkisine bakıldığı zaman $1,0 < D_p < 0,425$ mm ve $0,150 \text{ mm} \geq D_p$ parçacık boyutlarında tüm sıcaklıklarda sürükleyici gaz akış hızının artması ile katı ürün veriminde çok fazla bir değişimin olmadığı gözlenmiştir fakat tüm sıcaklıklarda hafif bir farkla da olsa 300 cm³/dak azot gazı akış hızında katı ürün veriminin en yüksek değerde olduğu görülmüştür.

Çay çalısı için piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği 450 °C, 500 °C ve 550 °C piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürünün arttığı görülmüştür fakat bunun aksine 600 °C ve 650 °C piroliz sıcaklıklarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürünün genelde azaldığı görülmüştür.

Çay çalısı için daha küçük parçacık boyutunda daha fazla piroliz ürün verimi elde edilmektedir.

Orman gülü için piroliz ürün verimi üzerine parçacık boyutunun etkisinin incelendiği tüm piroliz sıcaklıklarında ve tüm akış hızlarında daha küçük parçacık boyutunda ($D_p \leq 0,150$ mm) piroliz sıvı ürününde hafif bir artış görülmüştür.

6. ÖNERİLER

Günümüzde “Sürdürülebilir” kavramı giderek daha fazla kullanılmakta ve bilim dünyasında önem kazanmaktadır. Sürdürülebilir enerji kavramından ise tükenmekte olan fosil kaynaklardan çok yenilenebilir enerji kaynakları anlaşılmaktadır. Biyokütle de yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynakları çeşitlerinden bir tanesidir. Bu enerji kaynağından daha verimli yararlanmak içinde çeşitli dönüşüm metodları vardır. Burada yapılan çalışmada biyokütleyi ısıl bozundurmaya biyo-yağ elde etmeyi sağlayan hızlı piroliz metodu kullanılmıştır.

Burada yapılan deneylerde biyokütle kaynağı olarak bölgemizde yetişen bitkilerden orman gülü ve belli bir yaşı geçtikten sonra budanan ve zirai atık olan çay çalısı kullanılmıştır. Bu deneyler için küçük ölçekli bir piroliz reaktörü kullanılmıştır ve piroliz ürün verimine etki eden çeşitli parametreler araştırılmıştır. Bu parametreler arasında en etkili olan sıcaklıktır. Elde edilen sıvı biyoyakıt olarak kullanılabilir. Eğer burada yapılan piroliz reaktörü gibi büyük ölçekli sanayi tipi bir reaktör yapılırsa ülkemizin büyük ölçekte dışa bağımlı olduğu enerji sorununa kendi öz kaynaklarımızı kullanarak önemli bir çözüm bulabiliriz. Ayrıca bu kaynak yenilenebilir olduğu için de çevreye fazladan karbon salınımı yapmayacağı için çevreci bir enerji kaynağı olacaktır.

Piroliz sonucu elde edilen sıvı ürünün biyoyakıt olarak kullanılabilmenin yanında kimyasal hammadde kaynağı olarakta kullanılabiliriz. Pirolitik sıvıdan elde edilecek kimyasal maddeler gelecekte tükenen fosil yakıtlar ve türevlerinin yerini biraz olsun karşılayabilecek niteliktedir.

Biyokütlenin pirolizinden sıvı yakıt yada kimyasal hammadde eldesi için maliyet hesabı yapılabilir ve gelir-gider dengesi hesaplanabilir.

7. KAYNAKLAR

- Açıkgöz, C., Onay, O. ve Kockar, O.M., 2004. Fast pyrolysis of linseed: product yields and compositions, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 71, 417-429.
- Akpınar A., Kömürcü M., Filiz M., 2008. Türkiye’de Enerji Kaynakları ve Çevre, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 12-24, Aralık, İstanbul.
- Altın, V. 2002. Yeni Ufuklara Enerji, Bilim ve Teknik, Ocak.
- Anonim, 2007. IEA Bioenergy Task34 : Biomass Pyrolysis
- Anonim, 2011. Bp Statistical Review of World Energy, Haziran 2011
- Ateş, F., Pütün, A. E. ve Pütün, E., 2005. Catalytic pyrolysis of perennial shrub, *Euphorbia rigida* in the water vapour atmosphere, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 73, 299-304.
- Ates, F., Pütün, A.E. ve Pütün, E., 2005. Fixed-bed pyrolysis of *Euphorbia rigida* with different catalysts, Energy Conversion and Management, 46, 421-432.
- Ateşok, G. 2003. Enerjinin Stratejik Önemi ve Türkiye, Türkiye 9. Enerji Kongresi, DEKTMK Yayını, İstanbul.
- Ayan, E. A., 2011. Üzüm Küspesinin Pirolizi ve Elde Edilen Ürünlerin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ayas, C., Demirayak, F., Karaosmanoğlu, F., İş, G., Kumbaroğlu, G., Or, İ., Can, O., Yenigün, O., Arıkan, Y., 2009, İklim Çözümleri: 2050 Türkiye Vizyonu, X-Press Baskı, İstanbul.
- Barth, T., 1999. Similarities and differences in hydrolysis and source rocks, Organic Geochemistry, 30, 1495-1507.
- Beenackers, A.A.C.M. ve Bridgewater, A.V. 1989. Gasification and Pyrolysis of biomass in Europe, Proceeding of an International Conference of Pyrolysis and Gasification, Luxembourg.
- Bilgen, S., Keleş, S., Kaygusuz, A., Sarı, A. ve Kaygusuz, K, 2008. Global warming and renewable energy sources for sustainable development: A case study in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 372-396.
- Boran, S., 2003. Antrakinin Kullanılarak veya Kullanılmadan Sülfat Yönteminin Etil Alkol veya Etilen Glikolle Modifiye Edilmesinin Hamur ve Kağıt Özellikleri Üzerine Etkisi Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Boyle, G., 1996. Renewable Energy; Power for a Sustainable Future, Oxford University Press, United Kingdom.
- Bridgwater, A.V. ve Bridge, S.A. 1991. A review of pyrolysis and pyrolysis technologies, Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilisation, Elsevier Applied Science, London and New York.
- Bridgwater, A. V. and Cottom, L.M., 1992. Costs and Opportunities for Biomass Pyrolysis Liquids Production and Upgrading, Biomass for Energy, Industry and Environment, 6th E.C. Conference, Edited by G. Grassi, A. Collina and H. Zibetta, Elsevier Applied Science, London and New York, 679-692.
- Bridgwater, A.V., 1994. Catalysis in thermal biomass conversion, Applied Catalysis A: General, 116, 5-47.
- Bridgwater, A.V., Toft, A.J. and Brammer, J.G., 2002. A Techno-Economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6, 181-248.
- Bridgwater, A.V., 2003. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass, Chemical Engineering Journal, 91, 87-102.
- Bridgwater, T., 2006. Review Biomass for Energy, Journal of the Science of Food and Agriculture, 86, 1755-1768.
- Carlo N.H., Geertjevan H. ve Pcfaaij A. 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term, Biomass and Bioenergy, 28, 384-410.
- Casey J.P., 1961. Pulp and Paper Second Edition, Interscience Publishers Inc., New York,
- Çengel, Y., 2009. Tükenmez Bir Enerji Kaynağı Olarak Enerji Verimliliği, Nuclear&Renewable Energy Resources Conference, Ankara.
- Chen, G., Andries, J. ve Luo, Z., 2003. Biomass pyrolysis/gasification for product gas production the overall investigation of parametric effects, Energy Conv. Manag., 44, 1875-1884.
- Cleveland, C., 2004. Encyclopedia of Energy, Elsevier Academic Press Boston,.
- Çukurçayır, M.A., Sağır, H., Enerji Sorunu, Çevre ve Alternatif Enerji Kaynakları [http://www.sosyalbil.selcuk.edu.tr/sos_mak/articles/2008/20/ACUKURCAYIRH S AGIR.PDF](http://www.sosyalbil.selcuk.edu.tr/sos_mak/articles/2008/20/ACUKURCAYIRH%20S%20AGIR.PDF) 02.05.2012
- Demirbaş, A., 2004. Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 71, 803-815.
- Demirbaş, A., 2009. Green Energy and Technology, Biohydrogen Future For Engine Fuel Demands, London, Springer.

- Demirtaş S., 2010. Avrupa Birliği ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları ve bunlarda biyokütlenin önemi, 46. Dönem AB Temel Eğitim Kursu, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Enis A. 2005. Enerji Politikaları; Yerli, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları, TMMOB Türkiye 5. Enerji Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB Yayınları, 177.
- Erdoğan, S. 2003. Alternatif Enerji kaynakları ve Türkiye Enerji potansiyeli, 3e Electrotech Dergisi, 110.
- EREC, Renewable Energy Scenario to 2040, http://www.erec.org/fileadmin/erec_docs/Documents/Publications/EREC_Scenario_2040.pdf, 03.05.2012.
- Eren, E., 2009. Jeotermal enerji bugün ve yarın, 15. Uluslar arası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, Mayıs, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 28, 125-138
- Faaij, A., 2006. Modern Biomass Conversion Technologies. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, 343-375.
- Fagbemi, L., Khezami, L. ve Capart, R., 2001 Pyrolysis Products from Different Biomasses, Applied Energy, 69, 293-306.
- Gerçel, H.F. ve Pütün, E., 2002. Fast pyrolysis on sunflower-press bagasse: Effect of sweeping gas flow rate, Energy Sources, 24, 451-460.
- Goyal, H.B., Seal, D. ve Saxseno, R.C., 2008. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 504-517.
- Huş, S., Tank, T. ve Göksel, E., 1975. Türkiye (Tarsus Karabucak)’de yetişen okaliptüs türü odunlarının morfolojik yönden etüdü ve yarıkimyaal selülozunun kağıt sanayinde değerlendirilme imkanları, 275, TÜBİTAK Yayınları.
- IEA, The International Energy Agency, World Energy Outlook 2009, <http://www.iea.org>, 04.05.2012.
- IEA, The International Energy Agency, World Energy Outlook 2011, http://www.tusiad.org/_rsc/shared/file/WEO-Raporu-2011---Turkce-Ozet-Bulgular.pdf, 03.05.2012.
- Ioannidou, O., Zabaniotou, A., Antonakoi, E.V., Papazisi, K.M., Lappas, A.A. ve Attanassiou, C., 2009. Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 750-762.
- Kanmaz G., 2011. Biyokütlenin Katalitik Pirolyzi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Kaygusuz, K. ve Keleş, S., 2009. Use of Biomass as a Transitional Strategy to a Sustainable and Clean Energy System, Energy Sources, 31, 86-97.
- Keleş S., 2009. Hızlı Piroлиз Yöntemi İle Fındık Kupulasının Katalitik Piroлиз Ve Sıvı Ürünlerin Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Keskin, M.H., 2006. Stratejik Açından Avrupa Birliği Enerji Politikası Ve Uluslararası Güvenlik Sistemine Etkisi, Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Kıncay, O., Utlu Z., Ağustos H., Akbulut U. ve Açıkgöz Ö., 2009. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Birleşme Eğilimi, Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 27, 60-8.
- Klass, D.L., 1998. Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals, Academic Press, San Diego, USA.
- Koçkar, Ö.M., Onay, Ö., Pütün, A.E. ve Pütün, E., 2000. Fix-Bed Pyrolysis of Hazelnut Shell: A study on mass transfer limitations on product yields and characterization of the pyrolysis oil, Energy Sources, 22, 913-924.
- Kum, H., 2009, Yenilenebilir Enerji Kaynakları: Dünya Piyasasındaki Son Gelişmeler ve Politikalar, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 33, 207-223.
- Külekcı, Ö. C. 2009. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Arasında Jeotermal Enerjinin Yeri ve Türkiye Açısından Önemi, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, 2, 83-91.
- Lede, J., Broust, F., Ndiaye, F.T. ve Ferrer. M., 2007. Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor, Fuel, 86, 1800-1810.
- Li, A.M., Li., X.D., Li, S.Q., Ren, Y., Chi, Y., Yan, J.H. and Cen, K.F., 1999, Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: Influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products, Journal of Ana. And Appl. Pyrolysis, 50, 149-162.
- McKendry, P., 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion Technologies, Bioresource Technology, 83, 47-54.
- Mohan, D., Pittman, J., Charles, U. ve Steele, P.H., 2006. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-Oil: A Critical Review, Energy & Fuels, 20, 848 – 889.
- Onay, O. ve Kockar, O.M., 2003. Slow, fast and flash pyrolysis of rapeseed, Renewable Energy, 28, 2417-2433.
- Onbaşıoğlu, S. 2005. Neden Yenilenebilir Enerji?, Termodinamik Dergisi, 128, 59.

- Özbay, N., Pütün, A.E. ve Pütün, E., 2006. Bio-oil production from rapid pyrolysis of cottonseed cake: product yields and compositions, Int. J. Energy Res., 30, 501-510.
- Özgür, M.A., 2008. Review of Turkey's Renewable Energy Potential, Renewable Energy, 33, 2345-2356.
- Öztürk, N., Bilgiç, M., Arslan, C., Hidrojen Enerjisi ve Türkiye'deki Hidrojen Potansiyeli, http://www.emo.org.tr/ekler/51c5ffd6b62cc21_ek.pdf. 02.05.2012
- Pütün, A.E., Ozcan, A., Gercel, H.F. and Putun, E., 2001. Production of biocrudes from biomass in a fixed-bed tubular reactor: product yields and compositions, Fuel, 80, 1371-1378.
- Pütün, A.E., Özbay, N., Önal, E.P. ve Pütün, E., 2005. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products, Fuel Processing Technology, 86, 1207-1219.
- Pütün, A.E., Uzun, B.B., Apaydin, E. ve Pütün, E., 2005. Bio-oil from olive oil industry wastes: Pyrolysis of olive residue under different conditions, Fuel Processing Technology, 87, 25-32.
- Pütün, E., Uzun, B.B. ve Putun, A.E., 2006. Fixed-bed catalytic pyrolysis of cotton-seed cake: Effect of pyrolysis temperature, natural zeolite content and sweeping gas flow rate, Bioresource Technology, 97, 701-710.
- Pütün, E., Uzun, B.B. ve Putun, A.E., 2007. Production of bio-fuels from cottonseed cake by catalytic pyrolysis under steam atmosphere, Biomass and Bioenergy, 30, 592-598.
- Rustamov, VR., Abdullayev, KM. ve Samedov, EA., 1998. Biomass Conversion to Liquid Fuel by Two- Stage Thermochemical Cycle. Energy Conversion and Management, 39, 869 – 876.
- Sadaka, P.E. 2009. Pyrolysis, <http://bioweb.sungrant.org/General/Biopower/Technologies/Pyrolysis/Pyrolysis+of+Biomass+Resources/Default.htm>, Associate Scientist Center of Sustainable Environment Technologies, Iowa State University, Nevada, 03.05.2012
- Sensöz, S. ve Angın, D., 2008. Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed pres cake: Part 1. The effects of pyrolysis parameters on the products yields, Bioresource Technology, 99, 5492-5497.
- Sensöz, S. ve Angın, D., 2001. Pyrolysis of safflower (*Charthamus tinctorius* L.) seed pres cake in a fixed-bed reactor: Part 2. Structural characterization of pyrolysis bio-oils, Bioresource Technology, 99, 5498-5504.
- Sjostrom, E. 1993. Wood Chemistry, Academic Press, New York.

- Strezov, V., Evans, T.J. ve Hayman, C., 2001. Thermal conversion of elephant grass (*Pennisetum Purpureum Schum*) to bio-gas, bio-oil and charcoal, Bioresource Technology, 99, 8394-8399.
- Şahin, H.T. 2005. Kağıt ve kompozit ürünleri için hammadde kaynakları, Orman Mühendisliği, 4-5-6, 21-25.
- TAPPI Standarts, 1979. Official Test Methods and Provisional Test Methods, Technical Association of the Pup and Paper Industry, Atlanta.
- Tophanecioğlu, S. Ö., 2009. Tarımsal Atıklardan Hızlı Piroliz Yöntemiyle Sentetik Sıvı Yakıt Eldesinde Piroliz Parametrelerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tolay, M., Yamankaradeniz, H., Daradimos, G., Hirschfelder, H., Vostan, P. 2008. Temiz enerji üretimi için gazlaştırma teknolojisi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES 2008, İstanbul.
- Tsai, W.T., Lee, M.K. ve Chang, Y.M., 2007. Fast pyrolysis of rice husk: Product yields and compositions, Bioresource Technology, 98, 22-28.
- Tugrul, A.B., 2009. Türkiye'nin enerji açılımları, 15. Uluslar arası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı, Mayıs, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 15-17.
- Türkyılmaz, O., 2008. Türkiye'nin Yerli ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Mühendis ve Makine Dergisi, 576, 52-64.
- Uzun, B.B., Pütün, A.E. ve Pütün, E., 2006. Fast pyrolysis of soybean cake: Product yields and compositions, Bioresource Technology, 97, 569-576.
- Uzun, B.B., Pütün, A.E. ve Pütün, E., 2007. Composition of products obtained via fast pyrolysis of olive-oil residue: Effect of pyrolysis temperature, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 79, 147-153.
- Üçgül, İ. ve Akgül, G. 2010. Biyokütle Teknolojisi, Yekarum Dergi, 1, 3-11.
- Ürün, G., 2003. Petrol Piyasalarının Yapısı, Petrolün Etkileşim Ağları ve Petrol Şirketleri Arasındaki Rekabet Ortamı, Avrasya Dosyası, Cilt 9, Sayı 1, 94.
- Vigouroux, R.Z., 2001. Pyrolysis of Biomass, Doktora tezi, Royal Institute of Technology, Department of Chemical Engineering and Technology, Stockholm.
- Yamaguchi, Y., Fushimi, C., Tasaka, K., Furusava, T. ve Tusutsumi, A., 2006. Kinetik study on the pyrolysis of cellulose using the novel continuous cross-flow moving bed tipe differantiel reactor, Energy&Fuels, 20, 2681-2685.
- Yaman, S., 2004. Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks, Energy Conversion and Management, 45, 651-671.

- Yanik, J., Kornmayer, C., Saglam, M. ve Yüksel, M., 2007. Fast Pyrolysis of Agricultural Wastes: Characterization of Pyrolysis Products, Fuel Processing Technology, 88, 942-947.
- Young, R. A., 1992. Wood and Wood Products, Riegels Handbook of Industrial Chem., 9th ed., New York.
- Zansi, R., Sjöström, K. ve Björnbom, E., 2002. Rapid pyrolysis of agricultural residues at high temperature, Biomass&Bioenergy, 23, 357-366.
- Zhang, H., Xiao, R., Huang, H. ve Xiao, G., 2008. Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor, Bioresource Technology.
- Zhang, M., Zhang C., Zhang J. ve Yuyu Lin, 2010. Deoxygenation of Bio-oil during Pyrolysis of Biomass in the Presence of CaO in a Fluidized-Bed Reactor, Energy and Fuels, 24, 5686-5695.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında KDZ Ereğli’de doğdu. İlkokulu Armutçuk Madenci İlköğretim Okulu, ortaokulu KDZ Ereğli Anadolu Lisesi ve lise tahsilini de Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesinde tamamladı. 1997–1998 eğitim öğretim yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya bölümüne girdi. 2004 yılı Şubat ayında bu bölümden Kimyager unvanı ile mezun oldu. 2005 yılında kısa dönem er olarak askerlik görevini tamamladı. 2006 yılında Giresun Sayca İlköğretim Okuluna İngilizce Öğretmeni olarak atandı. 2009 Bahar döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı ve yükümlü olduğu dersleri vererek tez aşamasına geldi. Şu anda Espiye Yunus Emre Anadolu Lisesinde İngilizce Öğretmeni olarak görev yapmaktadır. Evli, bir kız çocuğu babasıdır ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.