

## Endüstriyel Atıkların Pirolizinde Parametrelerin Taguchi Ortogonal Dizaynı ile Optimizasyonu

\*<sup>1</sup>Erkan Sami Kokten, <sup>2</sup>Günay Özbay and <sup>3</sup>Ayhan Özçifçi

\*<sup>1</sup>Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Karabük Üniversitesi, Türkiye

<sup>3</sup>Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Aksaray Üniversitesi, Türkiye

### Özet

Ekonomik büyüme ve nüfus artışıyla birlikte giderek artan enerji talebinin bir kısmının alternatif enerji kaynakları ile karşılanabilmesi amacıyla yoğun bir araştırma ve geliştirme süreci devam etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan biyokütle büyük bir teknik potansiyele sahip olup, yakın gelecekte önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bu çalışmada, daha önce yapılan bir araştırmaya konu olan orman endüstrisi atıklarının farklı sıcaklıklarda katalitik pirolizinden elde edilen sıvı ürünlerin maksimizasyonu için deney faktörlerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Deney tasarımı Taguchi L9 ortogonal dizaynına göre yapılmış olup, 9 adet piroliz deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü oranı kullanılmıştır. Sonuç olarak, 27 deney yerine 9 deney gerçekleştirilerek daha kısa zamanda optimum sonuca ulaşılabileceği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Piroliz, sıvı ürün, biyokütle, deney tasarımı, Taguchi dizaynı

### Abstract

An intensive research and development process continues in order to meet a part of the growing energy demand with alternative energy sources. Biomass as a renewable energy source has an important technical potential. Thus, it is expected to play an important role in the near future. In this paper, it was intended to become optimization of a research studied on the maximization of liquid product obtained by catalytic pyrolysis of wood products waste which was studied before. The design of experiments was carried out according to Taguchi L9 orthogonal array. Thus, 9 pyrolysis experiments were performed. Signal-to-noise ratio used for evaluation of results. As a result, 9 experiments were performed instead of 27 and optimum results were achieved by spending less time.

**Key words:** Pyrolysis, liquid product, biomass, design of experiment, Taguchi design

### 1. Giriş

Çevresel sorunlar ve enerji krizi, önemi her geçen gün artan ve tüm insanlığı etkileyen küresel problemlerdendir. Küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri sera gazlarının (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> ve su buharı...) açığa çıkmasıdır. Sera etkisine neden olan bu gazların açığa çıkmasının en önemli nedenlerinde biri ise fosil yakıtların kullanılması olduğu bilinmektedir [1].

Hem enerji maliyeti açısından hem de yaşanılabilir bir çevre için temiz ve yenilenebilir enerjinin önemi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde ülkeler gelişmişlik düzeylerine bağlı olarak

\*İlgili Yazar: Adres: Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Karabük Üniversitesi, 78050, Karabük TÜRKİYE E-mail adres: erkansamikokten@karabuk.edu.tr, Tel: +903704338300

alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetlerine önem vermektedirler. Yenilenebilir enerji kaynakları: güneş, rüzgâr, biyokütle, su gücü (hidrolik enerji, jeotermal enerji, dalga enerjisi) vb. olarak sınıflandırılmaktadır [2].

Geleceğin yakıt alternatiflerinden biri olarak değerlendirilen biyokütle; çoğunlukla organik içeriklidir ve genel olarak bitki veya hayvan kaynaklı hidrokarbon içeren maddelerdir. Biyokütle kaynağı olan bitkilerin, atmosferden karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve topraktan su alarak; bunları güneş ışığı ve klorofil kullanarak fotosentez yoluyla karbohidratlara dönüştürmesiyle biyokütle meydana gelir [3].

Biyokütle; yakma, gazlaştırma, sıvılaştırma, hidrotermal yöntem ve piroliz gibi termokimyasal işlemler ile yüksek enerji içeriğine sahip ürünlere dönüştürülebilmektedir [4, 5]. Piroliz; katı, sıvı ve gaz ürünler elde edilebilen bir çeşit hidrokarbon geri dönüşüm sürecidir [6]. Biyokütlenin pirolizi sonucu elde edilen sıvı ürün biyoyağlar; ısıtmada, elektrik santrallerinde, kimyasalların ve reçinelerin üretiminde, fosil yakıtların yerine araçlarda, levoglukosan gibi susuz şeker üretiminde, ahşap koruyucu olarak, dizel yakıtlara uygun oranlarda karıştırılarak dizel motorlarda yakıt olarak ve yapıştırıcıların yapımında kullanılmaktadır [7]. Kullanım alanlarının öneminden dolayı piroliz sonucu elde edilen sıvı ürün verimliliğini arttırmaya yönelik gerçekleştirilen çalışmalar önem arz etmektedir.

Günümüz endüstrisinde araştırma ve geliştirme faaliyetleri kapsamında yapılan deneylerde güvenilir bilgiye, en kısa sürede ve en az maliyetle ulaşabilen yöntemlerin önemi her geçen gün artmaktadır. Taguchi metodu, kontrol edilemeyen faktörlerin varlığında kontrol edilebilen etmenlerin en uygun düzeylerini seçerek, üründe ya da süreçteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deney tasarım metodudur [8]. Süreçlerde Taguchi metodu kullanımı, gereksiz deneylerden kaçınmayı ve bu sayede de zaman ve maliyetten tasarruf etmeyi sağlamaktadır [9].

Bu çalışmada sıcaklık, biyokütle çeşidi ve katalizör türünün; bir piroliz ürünü olan sıvı ürün verimliliğine etkileri Taguchi deney tasarımı yöntemiyle araştırılmış olup, en uygun deney şartları belirlenmiştir.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Referans Çalışma

Deney tasarımı için Özbay, G., 2012, “Odun ve Odun Esaslı Kompozit Malzeme Talaşlarının Termal ve Katalitik Piroliz Yöntemi ile Sıvılaştırılması” başlıklı çalışması kullanılmıştır. Belirtilen çalışmada; melamin kaplı yonga levha (MKYL), Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) odunlarının talaşları biyokütle kaynağı olarak seçilmiş olup, sabit yataklı reaktörde pirolizi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde piroliz ürünlerinin verimleri üzerine biyokütle çeşidi, sıcaklık ve katalizör tipi gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Katalizör olarak Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bazik tuzları ile FeCl<sub>3</sub> Lewis asidi kullanılmıştır [10].

## 2.2. Deney Tasarımı

Bu çalışmada sıvı ürün verimliliğine etki eden en uygun faktörler ve seviyeleri olarak sıcaklık (400, 500 ve 600 °C), biyokütle çeşidi (MKYL, sarıçam ve kayın) ve katalizör türü (FeCl<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) belirlenmiştir. Belirlenen 3 faktör ve her bir faktörün 3 farklı seviyesi için Taguchi L9 ortogonal düzlemi kullanılmıştır ve toplam 9 adet deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir.

Taguchi yönteminde sisteme ait varyasyonu ölçmek için S/N (Signal to Noise) oranı kullanılır [11]. Hedeflenen değere bağlı olarak kullanılan 3 farklı S/N oranı vardır. Bunlar; küçük değer iyi, büyük değer iyi, nominal değer iyi yaklaşımlarıdır. Optimizasyon işleminde sıvı ürün verimliliğinin yüksek olması tercih edilmesinden dolayı “Büyük değer iyi” yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımın denklemi 1 numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$S/N = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right\} \quad (1)$$

Burada;

S/N (Signal to Noise): Sinyal gürültü oranı (desibel),

$n$ : Deney sayısı,

$y_i$ : Her bir gözlemin ölçülen değeridir [12].

Kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	Kod	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Sıcaklık (°C)	A	400	500	600
Biyokütle Çeşidi	B	MKYL	Sarıçam	Kayın
Katalizör Türü	C	FeCl <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>

MKYL: Melamin kaplı yonga levha

Tablo 2’de verilen deney tasarımı Minitab 16 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3’de ise kullanılan deney tasarım matrisinin açıklaması verilmiştir.

**Tablo 2.** Taguchi L9 ortogonal deney tasarım matrisi

<b>L9</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>1</b>	1	1	1
<b>2</b>	1	2	2
<b>3</b>	1	3	3
<b>4</b>	2	1	2
<b>5</b>	2	2	3
<b>6</b>	2	3	1
<b>7</b>	3	1	3
<b>8</b>	3	2	1
<b>9</b>	3	3	2

**Tablo 3.** Taguchi L9 ortogonal deney tasarım matrisinin tanımlanması

<b>L9</b>	<b>Sıcaklık (A)</b>	<b>Biyokütle (B)</b>	<b>Katalizör (C)</b>
<b>Deney 1</b>	1 (400 °C)	1 (MKYL)	1 (FeCl <sub>3</sub> )
<b>Deney 2</b>	1 (400 °C)	2 (Sarıçam)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
<b>Deney 3</b>	1 (400 °C)	3 (Kayın)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
<b>Deney 4</b>	2 (500 °C)	1 (MKYL)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
<b>Deney 5</b>	2 (500 °C)	2 (Sarıçam)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
<b>Deney 6</b>	2 (500 °C)	3 (Kayın)	1 (FeCl <sub>3</sub> )
<b>Deney 7</b>	3 (600 °C)	1 (MKYL)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )
<b>Deney 8</b>	3 (600 °C)	2 (Sarıçam)	1 (FeCl <sub>3</sub> )
<b>Deney 9</b>	3 (600 °C)	3 (Kayın)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Deneysel Bulgular

Gerçekleştirilen deney tasarımında, piroliz ürünlerinden sıvı ürün verimliliğinin yüksek olması tercih edilmesinden dolayı “Büyük değer iyi” (Denklemler 1) yaklaşımı kullanılmış olup her bir faktörünün S/N analizi Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 5’de ise sıvı piroliz ürünü verimliliği üzerine her bir faktörün S/N analizi verilmiştir.

**Tablo 4.** Deney sonuçları ve S/N değerleri

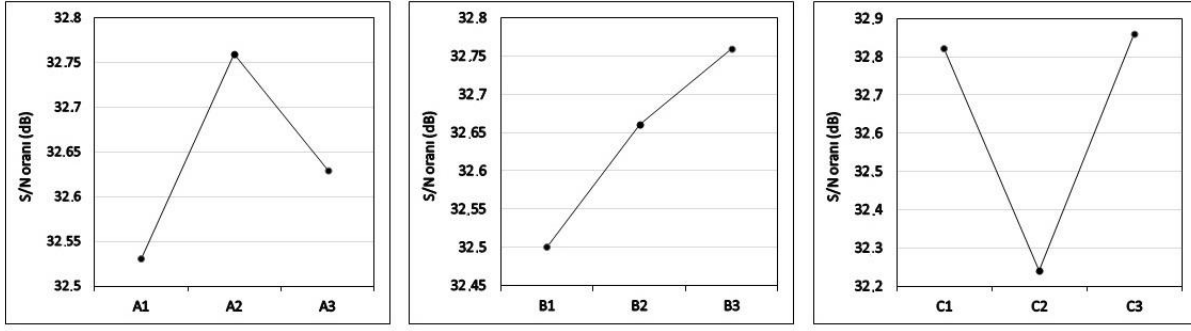
L9	Faktörler ve Seviyeleri			Sıvı Ürün (%)	Sinyal/Gürültü (S/N) oranı (dB)
	Sıcaklık (A)	Biyokütle (B)	Katalizör (C)		
1	1 (400 °C)	1 (MKYL)	1 (FeCl <sub>3</sub> )	42.5	32.5678
2	1 (400 °C)	2 (Sarıçam)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	41.0	32.2557
3	1 (400 °C)	3 (Kayın)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	43.5	32.7698
4	2 (500 °C)	1 (MKYL)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	40.4	32.1276
5	2 (500 °C)	2 (Sarıçam)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	44.7	33.0062
6	2 (500 °C)	3 (Kayın)	1 (FeCl <sub>3</sub> )	45.1	33.0964
7	3 (600 °C)	1 (MKYL)	3 (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	43.7	32.8096
8	3 (600 °C)	2 (Sarıçam)	1 (FeCl <sub>3</sub> )	43.3	32.7298
9	3 (600 °C)	3 (Kayın)	2 (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	41.4	32.3400

**Tablo 5.** Faktör seviyelerinin S/N yanıt tablosu

SEVİYELER	SICAKLIK (A)	BİYOKÜTLE (B)	KATALİZÖR (C)
1	32.53	32.50	32.82
2	<b>32.76</b>	32.66	32.24
3	32.63	<b>32.76</b>	<b>32.86</b>
Delta (Maks-Min)	<b>0.23</b>	<b>0.25</b>	<b>0.62</b>
Sıralama	3	2	1

Tablo 5’de gösterilen faktörlerin sahip oldukları en büyük S/N değeri, o faktörün en iyi, sıvı ürün veriminin ise en yüksek olduğu sonucu göstermektedir. Buna göre optimum sıvı ürün miktarı, sıcaklığın ikinci seviyesinde (A2), biyokütle çeşidinin üçüncü seviyesinde (B3) ve katalizör türünün üçüncü seviyesinde (C3) elde edilmiştir. Tablo 5’de delta değerleri incelendiğinde, sıvı ürün verimi üzerinde seçilen faktörlerin etkisi birbirine yakın olmasına rağmen, en etkili faktörlerin sırasıyla katalizör türü ( $\Delta=0.62$ ), biyokütle çeşidi ( $\Delta=0.25$ ) ve sıcaklık ( $\Delta=0.23$ ) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 1’de; Tablo 1’de verilen faktörlerin en iyi seviyeleri grafik olarak gösterilmiş olup, grafik çizgilerinin en yüksek olduğu noktalar optimum tasarımı vermektedir. Şekil 1’e göre optimum tasarımın A2B3C3 şeklinde olduğu görülmektedir ve söz konusu parametreler Tablo 6’da verilmiştir.



Şekil 1. Faktör etkileri- A: Sıcaklık, B: Biyokütle, C: Katalizör

Tablo 6. Optimum parametreler

Faktör	Seviye	Değer
Sıcaklık (A)	2	500 °C
Biyokütle Çeşidi (B)	3	Kayın
Katalizör Türü (C)	3	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>

### 3.2. Varyans Analizi

Faktörlerin etki oranlarını belirlemek amacıyla deneysel sonuçların varyans tablosu (ANOVA) oluşturulmuştur (Tablo 7). Bu tabloda, sıvı ürün miktarına etki eden faktörlerin etki oranları yüzde (%) olarak görülmektedir. Sıvı ürün miktarına etki eden faktörler Tablo 7’de incelendiğinde en etkili faktörün %46.5 ile katalizör türünün olduğu onu sırasıyla %22.5 ve %21.7 ile biyokütle çeşidi ve sıcaklığın izlediği tespit edilmiştir.

Tablo 7. Taguchi ortogonal dizaynı ANOVA tablosu

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	F-Oranı	Etki Oranı(%)
Sıcaklık	2	2.196	1.098	1.462	21.7
Biyokütle	2	2.462	1.231	1.639	22.5
Katalizör	2	17.269	8.634	11.496	46.5

### 3.3. Doğrulama Deneyleri

Gerçekleştirilen deney tasarımına göre, incelenen her faktör için optimum sıvı ürün verimine ulaşılmasını sağlayacak olan seviyeler A2B3C3 olarak tespit edilmiştir. Taguchi deney tasarım metodunda elde edilen optimum sonuçlar bazen L9 dizininde yer alan mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen ise yapılan deneylerin haricinde bir deney sonucu olabilmektedir. Yapılan bu çalışmada da optimum sıvı ürün verimine ulaşılmasını sağlayacak olan seviyeler

(A2B3C3) L9 deney tasarımı içerisinde yer almamaktadır. Ancak matematiksel olarak bu seviyeler için beklenen S/N oranı 2 numaralı eşitlik yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$n_{opt} = n_m + \sum_{i=1}^j (n_i - n_m) \quad (2)$$

Burada; j: Kontrol faktörlerinin sayısı,  $n_{opt}$  : Tahmin edilen optimum S/N oranı,  $n_m$  : S/N değerlerinin aritmetik ortalaması,  $n_i = i$  sayılı faktörün optimum seviyesinin ortalama S/N oranıdır [13].

Buna göre A2B3C3 optimum seviyesi için hesaplanan S/N oranı 33.1 (dB) olarak tespit edilmiştir. Elde edilen değer (33.1), daha önce S/N oranının bulunduğu 1 numaralı eşitliğe yerleştirildiğinde elde edilen sıvı ürün verimi 45.18 (%) olarak tespit edilmektedir. Yani, gerçekleştirilen Taguchi deney tasarımına göre tahmin edilen optimum sıvı ürün verimliliği % 45.18'dir.

Tespit edilen optimum tasarım olan A2B3C3'e göre (sıcaklık: 500 °C, biyokütle çeşidi: kayın, katalizör:  $K_2CO_3$ ) piroliz deneyi gerçekleştirilmiş olup, sıvı ürün verimliliği % 45.4 olarak tespit edilmiştir. Bu deneysel sonuç Taguchi yöntemiyle tahmin edilen optimum tasarımın sonucuna (% 45.18) oldukça yakındır (Tablo 8).

**Tablo 8.** Optimum tasarım için ölçülen ve tahmin edilen değerler

Optimum Tasarım	Tahmin (%)	Deney Sonucu (%)	Doğruluk (%)
A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	45.18	45.4	99.51

## Sonuçlar

Taguchi yöntemi ile, optimum değerlere daha kısa zamanda ulaşılarak zaman ve maliyetten tasarruf sağlanabilmektedir. Bu çalışmada Taguchi L9 ortogonal deney tasarım yöntemi kullanılarak 27 deney yerine 9 deney ile daha kısa zamanda optimum sonuca ulaşılabilineceği gösterilmiştir. Ayrıca, doğrulama deneyleri sonuçlarına göre odun veya odunsu materyallerden piroliz yöntemi ile sıvı ürün elde edilmesi işleminde Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulanabileceği görülmüştür.

Gerçekleştirilen piroliz deneylerinde sıvı ürün miktarını etkileyen en etkili faktörlerin sırasıyla katalizör türü, biyokütle çeşidi ve sıcaklık olduğu tespit edilmiştir. Optimum sıvı ürün miktarının ise, sıcaklığın ikinci seviyesinde (A2), biyokütle çeşidinin üçüncü seviyesinde (B3) ve katalizör türünün üçüncü seviyesinde (C3) elde edildiği tespit edilmiştir. Taguchi deney tasarımı ile optimum sıvı ürün miktarının tahmini % 99.51 doğrulukla gerçekleştirilmiştir.

## Kaynaklar

[1] Zengin H, Asan Ü, Destan S, Özkan UY. Küresel Isınmanın Önlenmesinde Ormanların Rolü ve Önemi. Uluslararası Süreçte Acilen Eyleme Dönüştürülmesi Gereken Konular, Mevzuat ve

- Yapılanmaya Yansımaları Sempozyumu. Antalya. Türkiye. 2005; 231-242.
- [2] Karaosmanoğlu F. Biyoyakıt teknolojisi ve İTÜ araştırmaları. İTÜ Enerji Çalıştay ve Sergisi. İstanbul. Türkiye. 2006; 110-125.
- [3] Kantarelis E, Zabaniotou A. Valorization of cotton stalks by fast pyrolysis and fixed bed air gasification for syngas production as precursor of second generation biofuels and sustainable agriculture. *Bioresource Technology* 2009; 100: 942-7.
- [4] McKendry P. Energy production from biomass (part II) conversion Technologies. *Bioresource Technology* 2002; 83: 147-154.
- [5] Bridgewater AV. Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 1999; 51: 3-22.
- [6] Qi WY, Hu CW, Li GY, Guo, LH, Yang Y, Luo J, Miao X, Du Y. Catalytic pyrolysis of several kinds of bamboos over zeolite NaY. *Green Chemistry* 2006; 8: 183-190.
- [7] Goyal HB, Seal D, Saxena RC. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008; 12: 504-517.
- [8] Mezarciöz S, Oğulata RT. Süprem Kumaşlarda Patlama Mukavemeti Değerinin Taguchi Ortogonal Dizayna Göre Optimizasyonu. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2010; 4: 320-8.
- [9] Fan KC, Wang W, Chiou HS. Fabrication Optimization of a Micro-Spherical Fiber Probe with the Taguchi Method. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2008; 18: 8.
- [10] Özbay G. Odun ve Odun Esaslı Kompozit Malzeme Talaşlarının Termal ve Katalitik Piroliz Yöntemi ile Sıvılaştırılması. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Karabük. Türkiye. 2012.
- [11] Pınar AM, Güllü A. Sayısal denetimli hidrolik pozisyonlama sisteminin Taguchi metodu ile optimizasyonu. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 2010; 25: 93-100.
- [12] Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley and Sons. New Jersey; 2005.
- [13] Ross PJ. *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. McGraw-Hill International Editions. 1996