

ALEVSİZ YANMA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin Vehbi SERÇE
503941013**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Erhan BÖKE
Diğer Jüri Üyeleri : Y.Doc.Dr. Nemci KAPTAN
Y.Doc.Dr. Ekrem TÜFEKÇİ**

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Ağır sanayi dallarının pek çoğunda, özellikle yonga levha, gıda, tekstil ve kömür sektöründe ciddi bir yangın tehlikesi oluşturan alevsiz yanma, ciddi bir yangın tehlikesi olmasına karşın ülkemizde yeni yeni araştırılmakta ve bilimsel çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışma ile alevsiz yanmanın başlaması ve yayılması konusunda kaynak veri oluşturulmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmamı yapmamda beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Y. Doç. Dr. Erhan BÖKE 'ye, beni her zaman destekleyen aileme ve çalışmamda bana yardımcı olan Kastamonu Entegre Ağaç San. ve Tic. AŞ yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Haziran 2006

Hüseyin Vehbi SERÇE

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Alevsiz Yanmanın Sebep Olduğu Gerçek Facialar	3
2.1.1 Arpa Tozu Patlaması; Oslo Port Silo Haziran 1987	3
2.1.2 Tahıl İhraç Silosu İşletmesindeki Patlama; Corpus Christi Texas, A.B.D. Nisan 1981	3
2.1.3 Alevsiz Yanma Ürünü Gazların Patlaması; Stavanger, Norveç Kasım 1985	4
2.1.4 Alevsiz Yanma Ürünü Gazların Patlaması; Tomylovo, Knibshev SSCB	5
2.1.5 Kömür Silosunda Metan ve Kömür Tozu Karışımı Patlaması; Bernardino Country, California, ABD	6
2.2 Alevsiz Yanma İle İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar	7
2.3 Alevsiz Yanma Sonucu Yangın Başlangıcının Toz Patlamalarından Farkı	11
3. ALEVSİZ YANMA MEKANİZMASI	13
3.1 Teorik Analiz	13
3.2 Alevlenme Enerjisi ve Alevlenme Hassasiyeti	18
3.3 Alevsiz Yanma Mekanizmasına Etki eden Parametreler	19
3.3.1 Oksijen Konsantrasyonu	19
3.3.2 Oksijen Difüzyonu ve Zorlanmış Oksijen Difüzyonu	20
3.3.3 Yakıt İç Yapısı	20
3.3.4 Yakıt Kimyası	21
3.3.5 Sıcaklık Değişimi	22
3.3.6 Alevsiz Yanma Reaksiyonuna Etki Eden Diğer Faktörler	22
3.4 Alevlenme Verimliliği	23
4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA	25
4.1 Deney Düzenegi	25
4.2 Deneyde Kullanılan Malzemeler	27
4.3 Deneyin Yapılışı	28
5. DENEY SONUÇLARI	29
5.1 Paralel Alevsiz Yanma	29
5.2 Yapılan Deneysel Çalışmalar	29
5.2.1 Deney Sonuçlarının Termoelemanlara Göre Mukayesesi	35

5.2.2 Deney Sonuçlarının Maksimum Sıcaklığa Ulaşma Hızına Göre Mukayesesi	38
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	42
6.1 Sonuçların Yorumu	42
KAYNAKLAR	43
ÖZGEÇMİŞ	44

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. 200 mm mantar tozu örneğinde (hacim=6L) sönme için maksimum ilk sıcaklık, alevlenme için minimum ilk sıcaklık ve farklı boyutlarda sıcak cisimler için kritik sıcaklıklar.....	8
Tablo 2.2. Toz birikintilerinde farklı çaplardaki sıcak parçaların alevlenme verimliliği.....	9
Tablo 3.1. Toz-hava karışımının alevlenme hassasiyeti üzerindeki temel etkiler.....	18
Tablo 4.1. Deneyde kullanılan odun talaşlarının elek analizi değerleri.....	27
Tablo 4.2. Deneyde kullanılan odun talaşlarının nem oranları.....	27
Tablo 5.1. Maksimum sıcaklıkların, 3. termoelemandan 4. termoeleman ve 4. termoelemandan 5. termoeleman ulaşma hızı.....	41

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1 : Alevsiz Yanma Teorisi.....	13
Şekil 3.2 : O ₂ Konsantrasyonu ile reaksiyon karakterinin değişimi.....	19
Şekil 4.1 : Deney düzeneğinin şematik görünüşü.....	26
Şekil 4.2 : Deney düzeneği.....	26
Şekil 4.3 : Deney düzeneğinin üstten görünüşü.....	27
Şekil 5.1 : İri taneli odun talaşında yüksek nem ve hava debisinde yanmanın ilerleyişi.....	30
Şekil 5.2 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 13 L/d).....	30
Şekil 5.3 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 13 L/d).....	31
Şekil 5.4 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 5 L/d).....	31
Şekil 5.5 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 5 L/d).....	32
Şekil 5.6 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 5 L/d).....	33
Şekil 5.7 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 5 L/d).....	33
Şekil 5.8 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 13 L/d).....	34
Şekil 5.9 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 13 L/d).....	34
Şekil 5.10 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 2. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	35
Şekil 5.11 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 3. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	36
Şekil 5.12 : Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 4. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	36
Şekil 5.13 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 2. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	37
Şekil 5.14 : Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 3. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	37

Şekil 5.15 :	Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 4. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.....	38
Şekil 5.16 :	Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklığa ulaşma hız-termoeleman grafiği.....	39
Şekil 5.17 :	Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklık-termoeleman grafiği.....	40
Şekil 5.18 :	Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklık-termoeleman grafiği.....	40

SEMBOL LİSTESİ

A_1	: Kontrol hacminin kesiti
A_2	: Kontrol hacminin üst alanı
C_p	: Özgül ısı
d	: Parçacık çapı
E_i	: Aktivans enerjisi
F_i	: Ön üstel faktör
ΔH_i	: Reaksiyon ısıları
k	: Özgül hız
MA	: Mol ağırlık
m	: Kütle
N	: Mol
n	: Sabit
ρ	: Yoğunluk
P	: Basınç
r	: 1/zaman
${}_1q_2$	: Birim kütlede sisteme verilen ısı enerjisi
q_i	: İletim ile olan ısı geçişi
q_t	: Taşınım ile olan ısı geçişi
q_y	: Birim hacimde üretilen ısı miktarı
q_{rad}	: Üst yüzeyden ışıınım ile olan ısı geçişi
q_{kg}	: üst yüzeyden kaçan gazların neden olduğu ısı geçişi
R	: Özgül gaz sabiti
$\underline{R_u}$	: Üniversal gaz sabiti
S	: Yüzey alanı
T	: Sıcaklık
V	: Hacim
V	: Yanma dalgası hızı
${}_1w_2$	: Birim kütlede sistemin çevresine karşı yaptığı iş
x	: Yatay koordinat
ΔX	: Kontrol hacmi uzunluğu
λ	: Isıl geçirgenlik
ϵ	: Yayıcılık
σ	: Stefan-Boltzman sabiti

ALEVSİZ YANMA

ÖZET

Alevsiz yanma, yakıtın heterojen oksidasyonu sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile desteklenen ekzotermik reaksiyon dalgasıdır. Bu yanma modunda, tam bir yakıt oksidasyonu gerçekleşmez, sıcaklık ve yanma hızı düşüktür. Alevsiz yanma alevli yanmaya geçiş potansiyeline sahip olması açısından önemli ölçüde yangın tehlikesi oluşturur. Kömür, tahta, kağıt, selülozik izolasyon malzemeleri, sentetik polimerler ve döşeme malzemeleri poroz yapıları sebebiyle alevsiz yanma kabiliyetine sahiptirler. Oksijen difüzyonu ve bir ısı kaynağı ile temasta olması sonucu koklaşabilirler. Endüstride oksijenle reaksiyona girebilen toz yada tanecik yapıdaki malzemelerde patlama ve alevsiz yanma tehlikesi vardır. Hububat silolarında görülen yangınlar örnek olarak verilebilir.

Bu çalışmada parametre olarak; malzeme yapısı (porozite, nem) ve oksitleyici hava hızı ele alındı. Alevsiz yanmanın başlaması için gerekli tutuşma sıcaklığı, yanma sırasındaki sıcaklık ve yanma ürünlerinin derişiklik değışimleri incelendi. Bunun yanı sıra alevsiz yanma halinden alevli yanma haline geçiş şartları tespit edildi.

Kurulan deney sistemi yardımıyla hava ve yanma cephesi ilerleme yönlerinin aynı olduğu durumlar incelendi. İlk tutuşmayı sağlamak amacıyla elektrikli ısıtıcı kullanıldı. Deneyde düzgün hava akışını sağlayabilmek için bir fan yardımıyla malzeme içerisinden geçirilen oksitleyici hava ilk önce 1 mm aralıklı çelik elekten daha sonra ise 10 mm çapındaki kürelerden geçirildi. Homojen sıcaklık dağılımı için ise 1200 W'lık elektrik ısıtıcısından faydalandı. Isıtıcı sadece tutuşma başlayana kadar devrede kaldı. Eşit aralıklarla yerleştirilen dört termoelemanla merkezde sıcaklıklar ölçüldü. Yanma cephesinin tek boyutlu olduğunu görmek için ise merkez ile cidar arasına yerleştirilen termoeleman yardımıyla malzeme sıcaklığı ölçüldü.

Yukarıda bahsedilen parametrelere göre deney sonuçları değerlendirilerek, büyük bir yangın riski oluşturan alevsiz yanma hakkında kaynak oluşturuldu. Elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldı.

SMOULDERING COMBUSTION

SUMMARY

Smouldering combustion is defined as a self-sustaining, propagation exothermic reaction wave deriving its principal heat from heterogeneous oxidation of fuel. Smouldering yields less complete oxidation of the fuel, lower temperature and much slower propagation rates. Due to the possibility of transition to flaming, smouldering is a major fire safety hazard. Coal, wood, paper, cellulosic insulation materials, upholstery materials, polyurethane foams and organic dusts that are all porous materials, can undergo smouldering combustion. As a result of direct oxygen attack on the fuel surface and to be contact with an ignition source of lower temperature, these materials can form char. In industrial facilities, like cereal bag houses, the oxydable dusts and grains have the hazard of smouldering combustion and explosion.

We have examined smoulder propagation in wood dust comparing forward propagation in two particles size. The influence of oxygen supply rate low velocity, temperature profile has been examined. It is apparent that there are two possible configurations for smoulder propagation through such a permeable fuel bed; the smoulder reaction front can propagate in the same direction as air flow (forward smoulder).

The 17.5 cm-diameter by 19.5 cm-deep sample bed is peripherally insulated and sits a top a flow dispersion bed of steel balls. This dispersion section assures a uniform upflow of the air as it enters the bottom of the sample bed. The igniter is a coiled heater that provides reasonably uniform ignition of the bed. At the bottom of the smoulder apparatus, thus producing forward smoulder propagation. The diameter of the fuel bed was chosen to assure very nearly 1-D behaviour on the bed centreline, where all measurements were made, at least for forward smoulder. Derived data from these experiments will also constitute a database for future studies in I.T.Ü. or some other institutions.

1. GİRİŞ

Alevsiz yanma, kendi kendini besleyen ve bunun için gerekli ısıyı yakıtın heterojen oksidasyonundan temin eden ekzotermik reaksiyon dalgasıdır. Alevsiz yanmanın oluşması için düşük sıcaklıktaki bir ısı kaynağı tarafından yakıtın ısıtılması gereklidir. Bu yanma modunda; tam bir yakıt oksidasyonu gerçekleşmez. Sıcaklık ve yanma hızı düşüktür. Alevsiz yanma, alevli yanmaya geçiş potansiyeline sahip olması açısından önemli ölçüde yangın tehlikesi oluşturur.

Alevsiz yanma, poroz yanıcı malzemelerin iç bölgelerinde ortaya çıkan katı faz yanmasıyla karakterize edilir. Katı faz oksidasyonu sırasında yayılan ısı, henüz reaksiyona girmemiş malzemeye iletim, taşınım ve ışıınım yoluyla transfer edilir. Bu olay, alevsiz yanma yayılımını kolaylaştırır. Bu transfer mekanizmaları yalnızca alevsiz yanma yayılma hızını etkilemez aynı zamanda yanma prosesini sınırlandırır. Örneğin, ateşleme ve sönme, alevlenmeye geçiş ve alevsiz yanma reaksiyonunun yayılması poroz ortamlarda kütle ve ısı transferini ilgilendiren kompleks bir olaydır. Aynı zamanda proliz ve yanma reaksiyonları da işin içindedir.

Alevsiz yanma genel olarak, paralel ve karşı alevsiz yanma olarak iki grupta sınıflandırılır. Bu ayrım, yakıt ve oksitleyicinin reaksiyon bölgesine giriş yönüne doğru yapılır. Karşı alevsiz yanmada oksitleyici reaksiyon bölgesine, reaksiyon yayılımının yönüne zıt yönde girer. Paralel alevsiz yanmada ise, reaksiyon cephesi yayılımı ile oksitleyici yayılımı aynı yöndedir.

Alevsiz yanma özellikle, yonga levha tesislerinde talaş depolama ünitesinde, kömür depolarında, tahıl silolarında pamuk ve selülozik izolasyon malzemesi depolarında ve benzeri işletmelerde önemli ölçüde yangın riskine sebep olmaktadır. Alevsiz yanmanın tespit edilmesi zordur. Çünkü uzun bir alevsiz yanma süreci boyunca birikinti yüzeyinde herhangi bir değişiklik gözlenmez. Lokal sıcaklık ölçümleri ancak zaman zaman sıcak noktanın belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Yanma sonu gazların derişikliklerinin ölçülmesi de büyük ölçüde başarısız olacaktır. Çünkü gazlar toz tarafından emilir.

Oksitlenmenin tamamlanmamış olmasından dolayı, alevsiz yanma çok düşük oksijen içeriğiyle bile sürebilir. Toz patlamaları %6-7'den düşük oksijen miktarlarında mümkün olmazken, alevsiz yanma %2 oksijen düzeyinde sürebilir. Ayrıca doğal karbonlu ürünler (ahşap, yiyecekler) kimyasal bağlı oksijen içerir. Bu oksijen termal bozulma ile açığa çıkacak olursa alevsiz yanmayı beslemek için yeterlidir.

Katı madde birikintilerinde alevsiz yanmayla savaşmak da son derece zordur. Nemlendirici içerse bile, suyun toz içerisine yeterince derin işlemesi mümkün değildir. Eylemsiz gazlar (CO_2 , N_2) toz birikintisi içine difüzyon ile yavaşça aktarılır ve büyük miktarlarda bulunması gerekir, bu da maliyeti yükseltir.

Kömür, tahta, kağıt, selülozik izolasyon malzemeleri, sentetik polimerler ve döşeme malzemeleri poroz yapıları sebebiyle alevsiz yanma kabiliyetine sahiptirler. Oksijen difüzyonu ve bir ısı kaynağı ile temasta olması sonucu koklaşabilirler. Endüstride oksijenle reaksiyona girebilen toz yada tanecik yapıdaki malzemelerde patlama ve alevsiz yanma tehlikesi vardır. Hububat silolarında görülen yangınlar örnek olarak verilebilir.

Kablo izolasyonunun alevsiz yanması, diğer bir yangın tehlikesidir. Bu uzay programını da ilgilendiren bir durumdur. Bugüne kadar yapılan uzay uçuşlarında, fazla ısınmış ve yanmış kablolar ve elektrikli cihaz parçaları tespit edilmiştir. Son zamanlarda uzay çalışmalarında, az yerçekimli ortamdaki yanma ihtimalini veya etkilerini minimuma indirmek amacıyla yapılan çalışmalar artırılmıştır.

Odun talaşı kullanılarak bir boyutlu ileri alevsiz yanma konusunda parametrik deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, malzemenin tanecik büyüklüğü (porozite) nem içeriği ve yakma havası debisi parametre olarak ele alınmıştır. Alevsiz yanmanın başlaması için gerekli tutuşma sıcaklığı ve poroz ortam içinde sıcaklığın zamana göre değişimi ölçülmüştür. Birbiri ardına yerleştirilmiş iki termoelemanndan ölçülen en yüksek sıcaklık değerlerinin zamanı ve ölçüm noktaları arasındaki mesafe değerleri kullanılarak alevsiz yanmanın ilerleme hızı belirlenmiştir. Alevsiz yanmanın başlaması ve yayılması konusunda kaynak veri oluşturulmaya çalışılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Alevsiz Yanmanın Sebep Olduğu Gerçek Facialar

2.1.1 Arpa Tozu Patlaması ; Oslo Port Silo Haziran 1987

Patlama tanıklarının ifadelerine göre sıcak ve kuru bir yaz gününde arpanın boşaltılması sırasında olmuştur. Olayda ölüm ve yaralanma olmamıştır. Kırılan camlar ve havaya uçan silo çatısı dışında binada da hasar olmamıştır.

1976 yılında aynı yerde gerçekleşen patlamadaki gibi arpa çok az miktarda nem içermekte idi. Patlama muhtemelen filtre dibinde yer alan boşaltma üzerindeki sıkışma ile ortaya çıkan ısının alevsiz yanmayı başlatması ile gerçekleşmiştir. Patlama basıncı etkisi ile filtredeki toz akışında geri tepme olmuş ve yanma cephesi havalandırma açıklığının bağlı bulunduğu çatıya doğru yol almıştır. İlerleyen cephe bu silonun çatı boşluğunda genişleme neticesinde yeni bir patlamaya sebep olarak çatıyı havaya uçurmuştur. Ayrıca patlama filtrelerden geçerek açık bulunan bir kovalı konteynerin bulunduğu bölmede üçüncü bir patlamaya neden olmuştur. Buradan da patlama cephesi kamyon yükleme ünitesine sıçramıştır. Bu olayda ilk patlama ile kırılan camlar binanın çökmesine neden olacak aşırı basıncı dengelemiş ve facianın büyümesine imkan vermiştir.

1987 yazındaki bu patlamanın sebebi yapılan bilirkişi incelemesi ile ortaya çıkmıştır. Daha önceki patlama tecrübeleri neticesinde silolarda saklanan tahıl ürünlerinin içereceği maksimum nem oranını açıklayan yönetmeliğe uyulmadığı belirlenmiştir.

2.1.2 Tahıl İhraç Silosu İşletmesindeki Patlama; Corpus Christi Texas, A.B.D. Nisan 1981

Bu patlamada 9 kişi ölmüş ve 30 kişide yaralanmıştır. Tahmini maddi zarar ise 30 milyon Amerikan Dolarıdır. Patlamanın muhtemel sebebi buğday toprakları içinde başlayan alevsiz yanmadır.

Tesiste buğday, kepçeli bir konveyör ile boşaltılmaktadır. Hububat konveyör kepçelerinde havanın oldukça sıcak olduğu bir dönemde 30 gün bekletilmiştir. Hat tekrar çalıştırıldığında ise sıkışma ile oluşan buğday topakları küçük parçaların konveyöre girmesine mani olmuştur. Bu arada sıkışma neticesinde alevsiz yanma reaksiyonuna giren buğday topakları bir şekilde konveyör kepçelerinden geçerek silo içindeki toz bulutunu alevlemiştir.

Patlama bu konveyörden diğer konveyörlere, yönetim binası bodrumuna, buradan da toz kontrol odasının da yer aldığı diğer işletme bölümlerine yayılmıştır. Bodrumdan geçen yanma cephesi yön değiştirerek yanma işleminin gerektirdiğinden fazla tozun bulunduğu ana konveyör besleme odasına ulaşmıştır. Ortamda gelişen yanma hızlanmış ve kendinden ileride ilerleyen bir basınç dalgası yaratmıştır. Bodruma kadarki mesafenin yaklaşık yarısına ulaştığı tahmin edilen basınç dalgası bodrumdan dev bir toz bulutunun çıkmasına sebep olmuştur. Alev dalgası bu bulutu yakalamış ve yeni bir patlama gerçekleşmiştir. Bu patlama dört yana doğru gelişmeler ile sona ermiştir. Bodrumun kuzey duvarı, tahıl silosu tavanı, batı duvarı ve yönetim binası tarafında yer alan doğu duvarı havaya uçmuştur. Patlama daha da fazla yayılarak toz atma sistemi yolu ile ikinci büyük siloya sıçramıştır. Ancak ikinci silo bodrumuna inen patlama cephesi camların kırılması sayesinde dengelenerek durmuştur.

Patlama neticesinde silo kompleksinde yer alan 14 silodan dördü aşağıdan yukarıya tamamen parçalanmıştır. Patlama ile yükleme binası duvarı yerlerinden sökülmüş ve sadece bina iskeleti yerinde kalmıştır.

Alevsiz yanma konusundaki tecrübeleri ile tanınan Kauffman ve Hubbard'a göre Corpus Christi işletmesinin denetimi mükemmel idi. Patlamanın tek açıklaması işletme içinde büyük bir miktarda toz oluşumuna ve boru hatları dahil uzaklaştırma sisteminde yoğunlaşan toza dikkat edilmemesidir. Patlama başlangıcında söz edilen alevsiz yanma reaksiyonunun önceden fark edilmemiş olması ise ihmalin sonucudur.

2.1.3 Alevsiz Yanma Ürünü Gazların Patlaması; Stavanger, Norveç Kasım 1985

Bu kaza esasen bir toz patlaması değildir. Patlamaya bir silo hücresinde kendi kendine ısınma neticesinde serbest kalan yanabilir gazların yanmaya başlamasının neden olduğu tahmin edilmektedir. Temel olarak kazada alevsiz yanmadan daha başka mekanizmalar bulunmaktadır. Ancak buna benzer bir çok olayda görüldüğü

gibi, ortaya çıkan yanabilir gazların da yangın başlangıcı için tehlike olabildiği anlaşılmaktadır.

Patlama çok çeşitli hububat tiplerinin stoklandığı oldukça modern bir tesiste gerçekleşmektedir. Kanada menşeli özel tohumların muhafaza edildiği kısımlardan birinde, alt kısımlardaki malzemenin sıkışma neticesinde topaklaştığı ve bunun sonucunda da silodan çıkartılmasının imkansızlaştığı tespit edilmiştir. Daha sonra kazadan bir süre önce siloda alevler görülmüştür. İtfaiye ekibi tohumları yukarıdan sıkılan köpük ile kaplamıştır. Tehlikenin geçmesinden sonra silonun boşaltılması için bir çok başarısız deneme yapılmıştır. Bu aşamada hava ile karışan fark edilir yoğunluktaki duman sadece silo haznesinde değil, silonun çatı arasında da yoğunlaşmaya başlamıştır.

Muhtemelen tohumların üzeri köpük ile kaplandıktan sonra karbonmonoksit gibi yanabilir gazlar içeren duman patlamıştır. Diğer taraftan çatı arasında birikmiş tozun da etkisinden şüphelenilmektedir. Bu kazada binanın çatısı havaya uçmuş ve enkaz parçaları çevreye dağılmıştır. Kazanın itfaiye ekibi gittikten hemen sonra sabaha karşı 03:00 saatinde olması yaralanma ve ölüm olmamasını sağlamıştır.

2.1.4 Alevsiz Yanma Ürünü Gazların Patlaması; Tomylovo, Knibshev SSCB

Tahıl ve yemlik malzeme depolaması yapılan bu dev tesis her biri 60 silodan oluşan 4 bölüme sahiptir. Her silo 3 x 3 m kare kesitli ve 30 m yüksekliktedir. İlk patlama 1987 Aralık ayında esasen bu tip silolarda kendi kendine yanma riski nedeni ile depolanması uygun olmayan ham ayçiçeği tohumu nedeniyle gerçekleşmiştir. Hiç yapılmaması gerekmesine rağmen bu depolama yapılmış ve kendi kendine ısınma neticesinde ortaya çıkan metan ve karbondioksit silonun boş olan üst kısımlarında birikmiştir. Burada patlayıcı gaz ve hava karışımını yakıt yatağı üzerine kadar ilerleyen alevsiz yanma mekanizmasının ateşlediği tahmin edilmektedir. Patlama aynı işletmede bir yıl içinde gerçekleşen büyüklü küçüklü 20-30 patlamadan oluşan serinin ilkidir.

İşletmedeki bu patlamalar serisinin iki ana sebebi vardır. En önemli sebep alevsiz yanmanın gerçekleştiği hücreden komşu hücrelere ısı geçişidir. Prefabrik malzemenin kötü ısı izolasyonu kabiliyeti ve ısı transfer alanının büyük olması ısı transferini kolaylaştırmıştır. İkinci büyük etken ise bu tip silolarda depolanması riskli olan ayçiçeği kütesinin altında önceki depolamalardan arta kalmış arpa tozudur. Zira böyle kalıntıların silolarda müsaade edilenden daha fazla nem içerdiği

bilinmektedir. Talihsiz patlamalar zinciri sürerken olayları sonlandırmak için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. İnceleme amacıyla silo üst kapakları açılmıştır. Ancak içeriye giren temiz hava alevsiz yanma mekanizmasını besleyerek süreci hızlandırmıştır. İçeriye azot basılarak yanma durdurulmaya çalışılmış ve kısmen başarılı olunmuştur. Ancak günün koşullarında yanmayı tamamen durduracak miktarda azot bulunamamıştır. Kısmi söndürme ise yanmanın düşük hızla da olsa sürmesine olanak vermiştir.

Silolardaki alevsiz yanmanın söndürülmesi için su kullanılmasının fizibil olmadığı kabul edilmektedir. Az miktarda su kullanılması ise silo duvarlarının aşırı yük nedeni ile çökmesine neden olmaktadır.

Patlamalar zincirinden sonra bu silo tesisinin yok edilmesi düşünülmüş ancak yüksek maliyet nedeni ile terk edilerek doğanın yok etmesinin beklenmesine karar verilmiştir.

Silo tesislerine muhafazası tavsiye edilmeyen mahsullerin konmasından kaçınılması yanında silonun belli bölgelerinde yanmaya sebebiyet veren hidrojen, metan ve karbonmonoksit gazları konsantrasyonlarını ölçen gaz analiz cihazlarının yerleştirilmesi, benzer kazaların önlenmesi açısından önem taşımaktadır. Birçok modern tesislerde depolama haznesinin alt kısmına, orta kısmına ve üst kısmına konan 3 adet gaz analiz cihazı ile önlem alınmıştır. Analiz cihazları direkt olarak işletmenin ana kontrol odasındaki dijital panolara bağlanarak gaz konsantrasyonları 24 saat boyunca izlenmektedir. Tehlikeli oranlara kadar yükselme olursa otomatik tertibat ile tehlikedeki haznelere azot basılır.

2.1.5 Kömür Silosunda Metan ve Kömür Tozu Karışımı Patlaması; Bernardino Country, California, A.B.D.

Kaza hemen hemen boş durumdaki 900 ton kapasiteli kömür silosunda kalan 85 ton kömürün boşaltılması esnasında olmuştur. Patlamadan önce silo içindeki kızıl ötesi alıcılar 0.6x1 m boyutlarında sıcak bir bölge tespit etmişlerdir. Bu bölgenin alevsiz yanmaya maruz kaldığına karar verilmiştir. Yanma mekanizması ile metan, karbonmonoksit ve diğer yanıcı gazlar ortaya çıkmıştır. Patlama muhtemelen bu yanıcı gaz karışımı ile kömür kütlesi üzerinde yer alan kömür tozu karışımının ateşlenmesi ile gerçekleşmiştir.

Patlamayı başlatan ısı kaynağı alevsiz yanmadır ve yanma cephesinin yüzeye ulaşması neticesinde ateşleme sağlanmıştır. Siloya yukarıdan yangını ve patlamayı

önlemek için karbondioksit basılmıştır. Ancak yanıcı gazların ve kömür tozunun etkisiz hale getirilmesinde yetersiz kalmıştır.

İleride benzer kazaların önlenmesi için silo tabanı ve tavanına karbondioksit veren sistem yerleştirilmesi tavsiye edilmektedir. Yanıcı ve yakıcı gaz konsantrasyonu bu sayede azaltılabilir. Ancak silo içinde pozitif basınç oluşması neticesinde yanmaya neden olabilecek gazlar, silo içinde birikmeyip silo dışına atılmış olacaktır.

Literatürde toz patlamalarına ilişkin daha bir çok örnek bulunmaktadır. Esasen yanıcı olmayan metal tozlarının da patladığı kazalar görülmüştür. 1973 yılında Norveç'te bir alüminyum işleme tesisinde alüminyum tozu patlamıştır. Depoların dibinde zaman içinde biriken tozlar sıkışma neticesinde alevsiz yanma reaksiyonuna girmişler ve yanma yatağı üzerinde bulunan alüminyum tozunun patlamasına neden olmuşlardır. Temel manada yanmayan bir element olan alüminyumun patlaması, o anda binada bulunan on işçiden beşinin ölümüne, ikisinin ağır, ikisinin hafif yaralanmasına sebep olmuştur. Sadece bir kişi bu faciadan yara almadan kurtulmuştur. Bunun yanında tesiste çok büyük maddi hasar meydana gelmiştir. Hemen hemen her türlü toz belli konsantrasyon değerlerinde patlamaya uğrayabilirler. Bu sebeple toz kütlelerinin bulunduğu bölgelerde alevsiz yanmaya neden olabilecek maddelerin birikmesinin önlenmesi büyük önem taşımaktadır [1].

2.2 Alevsiz Yanma İle İlgili Yapılan Bilimsel Çalışmalar

Krause ve Schmid farklı hacimlerdeki toz birikintileri içerisinde kalan sıcak cisimlerin ve sıcak bölgelerin alevlenme verimliliği üzerinde çalışmışlardır. İncelenen materyaller mantar tozu (büyük ve ince parçacıklar), kayın ağacı talaşı ve kakao tozudur.

Deneyin başında fırında önceden ısıtılmış alevlenme kaynağı çıkarılabilir bir tüp aracılığıyla silindir merkezine hızla gönderilmiştir. Daha sonra tüp deney düzeneğinden çıkarılmıştır. Bu yolla alevlenme kaynağı hızla (beş saniyeden kısa sürede) yerleştirilmiş ve ısı kaybı düşük tutulmuştur.

Silindir içerisinde zamana bağlı sıcaklık gelişimi silindir içinde farklı yarıçaplara ve yüksekliklere on beş adet termokulp ile gözlenmiştir. Ayrıca alevlenme kaynağı merkezine de bir termokulp yerleştirilmiştir. Bazı deneylerde toz örneği içerisinde silindir merkezinden 100 mm mesafede oksijen içeriği de ölçülmüştür.

Birinci deneyde sıcak cisim olarak 25, 30, 35, ve 40 mm çaplı porselen küreler kullanılmıştır.

İkinci deneyde ise 11, 15, 25, 34, 40 ve 45 mm çaplarında tel örgülü silindirik sepetler kullanılmıştır (yükseklik/çap=1). Büyük silindirde olduğu gibi aynı materyalin tozu küçük sepetler içerisine doldurularak alevsiz yanan gerçekçi bölgeler oluşturulmuştur.

İçeriye gömülmüş olan sıcak cisim etrafında alevsiz yanan madde oluşumunun 400°C altındaki sıcaklıklarda başladığı, elde edilen sonuçlardan bir tanesidir. Ancak, sıcak cisim ne kadar küçük olursa, alevsiz yanmaya neden olmak için sahip olması gereken ilk sıcaklık o kadar yüksek olmalıdır.

Ayrıca, büyük hacimli toz birikintilerinde (aynı ilk sıcaklıkta) daha küçük sıcak cisimlerin tozu alevlendirebileceği bulunmuştur. Bunun nedeni büyük birikintilerin izolasyon etkilerinin yüksek olmasıdır. Tablo 2.1’de litre hacminde mantar tozu birikintisinde farklı büyüklüklerdeki sıcak cisimlerin (porselen küreler) kritik ilk sıcaklıkları görülmektedir.

Tablo 2.1: 200 mm mantar tozu örneğinde (hacim=6L) sönme için maksimum ilk sıcaklık, alevlenme için minimum ilk sıcaklık ve farklı boyutlarda sıcak cisimler için kritik sıcaklıklar.

Alevlenme Kaynağı Çapı mm	Alevlenmenin Olmadığı $T_{maks.}^{\circ C}$	Alevlenmenin Başladığı $T_{min.}^{\circ C}$	$T_{kritik}^{\circ C}$
25	489	503	496
35	445	463	454
40	420	435	427

Ayrıca, Tablo 2.1’de belirtilen alevlenme kaynaklarının sıcaklıkları altında tozda kısmi bir reaksiyon gerçekleştiği de tespit edilmiştir. Deneylerde 400°C altındaki sıcaklıklarda alevlenme kaynağı etrafında birkaç santimetre kalınlıkta bir tabaka oluşmuştur. Ancak, bu durumda alevlenme kaynağı kendiliğinden süren alevsiz yanma sürecini başlatmak için çok zayıftır. Alevlenme kaynağı olarak sıcak bölgelerin alevsiz yanmaya neden olmak için belli bir minimum hacme sahip olması gerektiği tespit edilmiştir. Toz birikintisi ne kadar büyük olursa bu minimum hacim o kadar küçük olmaktadır. Tablo 2.2’de farklı boyutlarda toz örneklerinde sıcak yuvaların alevleme verimliliği üzerine bir inceleme sunulmaktadır.

Bazı deneylerde toz birikintisi içine gömülü ve toz içerisine ısı akışı olarak enerji transformasyon kayıplarını sağlayan elektrikli bir cihaz davranışı sergilemek üzere ısıtılmış bobin, alevleme kaynağı olarak kullanılmıştır.

Tablo2.2: Toz birikintilerinde farklı çaplardaki sıcak parçaların alevleme verimliliği.
(*: Alevleme, +: Alevlenme Yok, Boş: İncelenmemiş)

Litre olarak hacim	0.8			6					12			50		
mm olarak sıcak parçacık çapı	25	45	>45	11	15	24	34	40	24	34	40	15	19	40
Mantar tozu (kaba)							+	*	+	+	*			*
Mantar tozu (ince)	+	+	*			*	*					+	*	*
Kayın ağacı tozu									+	*	*			
Kakao tozu				+	*	*		*						*

Alevsiz yanan ön taraf yüzeye ulaşınca kadar toz birikintisi boyunca neredeyse sabit sıcaklıkta yayılır. Yayılma sıcaklığı seviyesi materyal özelliklerine (tahıl ebadı, kitle yoğunluğu, kimyasal kompozisyon) bağlıdır ve birikinti hacmi arttıkça yayılma sıcaklığı azalır. Yapılan deneylerde sıcaklık aralığı 250-350⁰C'dir. Alevsiz yanan alanın yayılma hızı da örnek hacimdeki artışa bağlı olarak azalır ve alevsiz yanma sıcaklığı gibi materyal özelliklerine dayalıdır [2].

N.N. Bakhman yaptığı araştırmada herhangi bir kararlı rejimde alevsiz yanmanın meydana gelmediği şartları araştırmıştır. Bu çalışmada gaz faz içindeki oksijen konsantrasyonu, malzemeyi saran minimum dış tabaka kalınlığı ve oksitleyici gazın üst ve alt hız sınır değerleri deneysel olarak saptanmıştır. Aynı katalizörün ve geciktiricinin alevli ve alevsiz yanmayı farklı şekilde etkileyebileceğine dikkat çekilmiştir.

Bakhman'a göre alevsiz yanma, katı yakıtların gözenekli tabakalarında alevsiz, düşük sıcaklıkta yayılan yanmadır. Yakıtın kimyasal enerjisi kısmen ısı enerjisi dönüşür ve reaksiyon ürünleri oksitleyici ile ekzotermik reaksiyona girer.

Belirli dış koşullar (oksijen derişikliği, başlangıç sıcaklığı T_0 gibi) ve iç yapı için yanabilen malzemeler 3'e ayrılır.

- i) Alevsiz ve alevli yanabilen yakıtlar.
- ii) Alevsiz yanabilen ve kendi kendine yanmanın devamını sağlayamayan yakıtlar.
- iii) Yanabilen ve kendi kendine alevsiz yanmayı devam ettirebilen yakıtlar.

Bakhman, alevsiz yanma dalgasının ilerleyişini yakıt tabakasının şekline bağlamış, Yakıt tabakasının şekilleri aşağıdaki gibi sınıflandırmıştır;

- 1) Alt ve üst yüzeyi gaz ile çevrili düz tabaka,

- 2) Bir yüzeyi inert bir tabaka ile temasta diğer yüzeyi gaz ile sınırlı olan düz tabaka,
- 3) İki inert tabaka arasındaki düz yüzey,
- 4) Yan yüzeyi gaz ile çevrili silindirik tabaka,
- 5) Yan yüzeyi inert kabuk ile kaplı silindirik tabaka.

Bu sınıflandırmada 1. ve 4. gruba giren yakıt tabakaları açık, 2. grup yakıt tabakaları yarı açık, 3. ve 5. grup tabakalar ise kapalı sistem olarak adlandırılır.

Alevsiz yanma için kritik durumlarda deney sonuçlarını incelemiştir. Oksijenin kritik konsantrasyonu yakıt tabakasının kritik kalınlığını, hava akışının kritik hızını, alevsiz yanmaya katalizör ve geciktiricilerin etkisini incelemiştir [3].

M. Karim Mualllemi ve arkadaşları da iki boyutlu alevsiz yanmanın matematiksel modellemesi üzerine çalışmışlardır. Hava akımı içerisindeki katıların alevsiz yanma halinin simülasyonu için nümerik çözüm yöntemleri ile birlikte matematiksel model sunmuşlardır.

Tek aşamalı yanma reaksiyonu kabulü yapılarak, problem kütlenin, bileşenlerinin, momentum ve enerjinin korunum denklemleri yardımı ile tanımlanmıştır. Modelde, katı faz içindeki iletimi, katı fazdan ışıınımı, zorlanmış ve tabii gaz faz akışı ve gaz fazdaki ısı transferi dikkate alınmıştır [4].

M. Fatehi ve M. Kaviany de katı yakıt yatağında adyabatik ters yönde yayılan yanmayı incelemişlerdir. Ağaç parçacıklarından oluşmuş yakıt yatağı içerisinde alttan hava beslenip üst taraftan ateşleme yapılmış ve aşağıya doğru yanmanın yayılma hareketi deneysel ve teorik olarak açıklamışlardır [5].

T. J. Ohlemiller ve D. A. Lucca da geçirgen yakıt yataklarında ileri ve geri alevsiz yanma oluşumunu deneysel karşılaştırılması konusunda çalışmışlardır. Alevsiz yanmayı iki durumda incelemişlerdir. Sırasıyla reaksiyon dalga hareketi hava akışıyla ters ve aynı yönde olması durumlarıdır. Deneyler poroz yapıda iki tip yakıt için yapılmıştır. Kullanılan malzemeler ağaç lifleri (talaş) ve polimer madde parçacıklarıdır. Ters yönlü alevsiz yanma çalışmalarında hava akış hızı 0.04 cm/s ile 0.77 cm/s arasında değiştirildiğinde yanma bölgesi yayılma hızının $4 \cdot 10^{-3}$ ile $4 \cdot 10^{-2}$ cm/s aralığında değiştiği görülmüştür. İleri yönlü alevsiz yanma çalışmalarında ise hava akış hızı 0.15 cm/s'den 0.49 cm/s'ye kadar

değiştirildiğinde yayılma hızının da 1.10^{-3} cm/s'den $2.5.10^{-3}$ cm/s'ye kadar değiştiği saptanmıştır. Sıcaklık ve gaz bileşenlerinin (O_2 , CO , CO_2) değişimi tespit edilerek her iki alevsiz yanma dalgasının yapısı araştırılmıştır. İki alevsiz yanma yayılımı şeklinde nitel ve nicel farklılıklar tespit edilmiştir. Ters yönlü alevsiz yanma yayılımı düzensizdir ve yanmış kok yanma stokiyometrisi ile belirlenen limitlerden daha düşük hızlarda hareket ederler. Her iki alevsiz yanma yayılma şekli oksijen difüzyonunun miktarı tarafından belirlenir [6].

Moussa, oksijen/azot karışımı ve basıncın, silindir şeklindeki selülozik malzemelerin maksimum sıcaklığı ve alevsiz yanma hızı üzerindeki etkilerini araştırmıştır [7].

Leisch ve arkadaşları; tahıl, tahıl tozu ve tahta tozu tabakalarının alevsiz yanması, yanma cephesi ilerlemesi ve tutuşma özellikleri üzerine deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlardır [8].

Uzay mekiğinde (yer çekimsiz ortam) ve değişik hızlarda yere yaklaşan uçaklarda (yerçekimi azaldığı durumlarda) yapılan deneylerin, ileriki yıllarda uzayda kurulabilecek bir yerleşim içinde yer alabilecek yanma proseslerinin dizaynına ışık tutacağı umulmaktadır. Çekim azaldığı için taneciklerin birbirine uzaklığı artmış, böylece oksijen difüzyonu artmıştır. Diğer taraftan reaksiyon hızının artması neticesinde sıcaklık artmakta ve alevli yanmaya geçiş (O_2 konsantrasyonu yeterli değerde ise) kolaylaşmaktadır. Reaksiyon hızı artınca yanmamış yakıt miktarı azalmaktadır [9].

Zorlanmış hava akımı ile yapılan deneylerde yatak üstü hava hızının yanma cephesi hızını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemin bir diğer faydası ise alevsiz ve alevli yanmaya geçiş bölgelerinin karakteristiğini ortaya koymasıdır. Yapılan deneylerde kullanılan bazı katalizörlerin alevli ve alevsiz yanmayı farklı şekilde etkilediği görülmüştür [10].

Yüksek yatak üstü hava hızlarında yatağın soğuması nedeniyle alevsiz yanmanın teşekkül etmediği belirlenmiştir [5].

2.3 Alevsiz Yanma Sonucu Yangın Başlangıcının Toz Patlamalarından Farkı

Patlamaya neden olamayacak kadar zayıf alevleme kaynakları benzer felaket sonuçları doğuran yangını başlatabilir. Sıklıkla karşılaşılan bir senaryo potansiyel

alevleme kaynaklarının yanıcı katı madde tabakaları yada yığınlarına gömülmesidir. Patlamaya neden olmak için yeterli enerjiye sahip olmayan bir sıcak cisim yada sıcak bölge depo konteynırı yada silo dolumu sırasında gömülecek olursa tozda birikintinin yüksek termal direnci yüzünden sıcaklık artışına neden olacaktır.

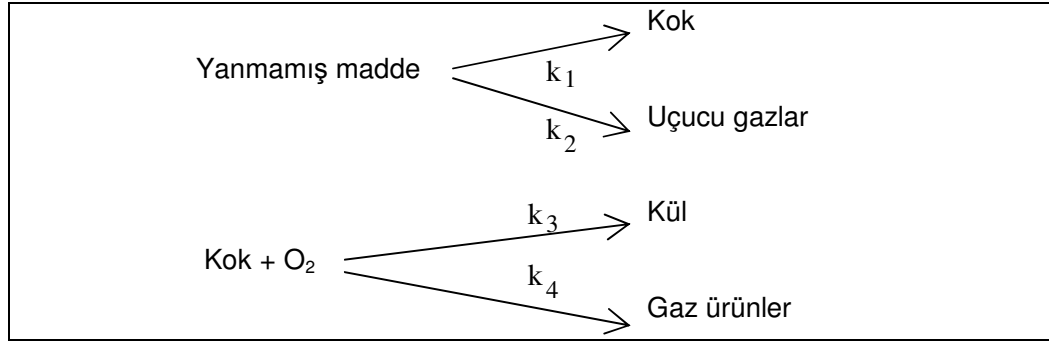
Alevleme kaynağı etrafında kendi kendine ısı enerjisi yayan reaktif bir sıcak nokta oluşur. Reaksiyon ile üretilen sıcaklık toz birikintisi sıcaklık kaybından fazla olursa alevsiz yanma süreci kendiliğinden sürme özelliği gösterir [2].

3. ALEVSİZ YANMA MEKANİZMASI

3.1 Teorik Analiz

M. Karim Muallemi ve arkadaşları da iki boyutlu alevsiz yanmanın matematiksel modellemesi üzerine çalışmışlardır. Hava akımı içerisindeki katıların alevsiz yanma halinin simülasyonu için nümerik çözüm yöntemleri ile birlikte matematiksel model sunmuşlardır [4].

Pratikte alevsiz yanma reaksiyonu üç boyutta gerçekleşmektedir. Ancak burada bir boyutlu hayali bir sistem üzerinde açıklama yapılacaktır. Her ne kadar pratik olaylar ile uzak görünse de böyle bir analiz alevsiz yanma teorisinin açıklanmasında kabul edilebilir bir yaklaşımdır. Şekil 3.1’de alevsiz yanma teorisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Alevsiz yanma teorisi.

Proliz reaksiyonu 1. mertebeden kabul edilirse, yanma reaksiyonunun 1. ve 2. adımlar arasında gerçekleştiği söylenebilir. Literatürde ön üstel faktörlerin genellikle kokun yüzey alanına bağlı oldukları kabul edilmektedir. Buna göre ön üstel faktörler

$$\text{kütle} / [(\text{alan} \times \text{zaman}) \times (\text{basınç})^n] \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilirler. Yukarıdaki ifadede n oksijenin kısmi basıncıdır ve reaksiyon (1+n)’inci mertebededir. n sayısı genellikle 0 ve 1 arasında bulunmaktadır. Kok yanması çalışmaları n genellikle 0.5 alınmaktadır.

Bu analiz uçucu gazların yanmasını açıklamadığı gibi, alevsiz yanmadan alevli yanmaya geçişi de açıklamamaktadır. Ayrıca yatak üstündeki hava hareketsiz alındığından, model hava hızlarının etkisini de açıklayamamaktadır. Reaksiyon hızları Arrhenius eşitliğiyle ifade edilebilir. Yukarıdaki dört reaksiyon için özgül hız denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$k_1 = k_{\text{kok}} = F_{\text{kok}} \exp[-E_{\text{kok}} / R.T] (=) \text{ zaman}^{-1} \quad (3.2)$$

$$k_2 = k_{\text{gaz}} = F_{\text{gaz}} \exp[-E_{\text{gaz}} / R.T] (=) \text{ zaman}^{-1} \quad (3.3)$$

$$k_3 = k_{\text{yan.k}} = F_{\text{yan.k}} \exp[-E_{\text{yan.k}} / R.T] (=) \text{ k\u00fctle} / [(\text{ alan . zaman }) . (\text{ basın\u00e7 })^{0.5}] \quad (3.4)$$

$$k_4 = k_{\text{yan.g}} = F_{\text{yan.g}} \exp[-E_{\text{yan.g}} / R.T] (=) \text{ k\u00fctle} / [(\text{ alan . zaman }) . (\text{ basın\u00e7 })^{0.5}] \quad (3.5)$$

Yukarıdaki ifadelerde F_i \u00f6n \u00fcstel fakt\u00f6rleri, E_i aktivasyon enerjisini, R \u00fcniversal gaz sabitini ve T sıcaklığı g\u00f6stermektedir.

Yanma reaksiyonlarında, reaksiyon hızının belirlenebilmesi i\u00e7in birim k\u00fctleye denk gelen y\u00fczey alanı S değerinin bilinmesi gerekmektedir. Yatağı oluşturan par\u00e7acıkların k\u00fcresel olduğu kabul\u00fc edilirse, ρ yoğunluk, d par\u00e7acık \u00e7apı olarak alındığına S y\u00fczey alanı řu şekilde hesaplanabilir;

$$S = \pi / \rho . dp \quad (3.6)$$

Yanma reaksiyon hızının bulunması i\u00e7in aşağıdaki değişkenler tanımlanır.

$$\bar{r}_{\text{yan.k}} = S.(P_{O_2})^{1/2} . k_{\text{yan.k}} (=) \text{ zaman}^{-1} \quad (3.7)$$

$$\bar{r}_{\text{yan.g}} = S.(P_{O_2})^{1/2} . k_{\text{yan.g}} (=) \text{ zaman}^{-1} \quad (3.8)$$

B\u00f6ylece yanma ve proliz reaksiyonlarına ait hızlar řu şekilde yazılabilir.

$$\dot{w}_c = p_y . k_{\text{kok}} (=) \text{ k\u00fctle} / \text{ hacim . zaman} \quad (3.9)$$

$$\dot{w}_g = \rho_y \cdot k_{gaz} (=) \text{ k\u00fctle / hacim . zaman} \quad (3.10)$$

$$\dot{w}_{yan,k} = \rho_{kok} \cdot \dot{r}_{yan,k} (=) \text{ k\u00fctle / hacim . zaman} \quad (3.11)$$

$$\dot{w}_{yan,g} = \rho_{kok} \cdot \dot{r}_{yan,g} (=) \text{ k\u00fctle / hacim . zaman} \quad (3.12)$$

Bu ifadelerde ρ_y yanmamış parçacıkların ve ρ_{kok} kokun yoğunluğunu göstermektedir.

Alevsiz yanma reaksiyonlarında korunum denklemlerinin uygulanabilmesi için aşağıdaki kabuller yapılır:

- 1) Malzeme özellikleri sadece x yönünde değişmektedir. (Bu kabul, yatak yüzeyinden içeri veya dışarı olabilecek difüzyon ile problemin bir boyut özelliğinin değişmeyeceğini ifade etmektedir.)
- 2) Düzgün yayılma vardır.
- 3) Isıl iletkenlik ve özgül ısı sabittir.
- 4) Reaksiyonun gaz ürünleri, süratle yukarıya çıkarak yatağı terk etmektedir.
- 5) Alevsiz yanma reaksiyonu çok ince bir tabakada gerçekleşmektedir.
- 6) Arrhenius hız kuralı geçerlidir.
- 7) Reaksiyon tabakasında O_2 'nin kısmi basıncı sabittir. (Yatak yüzeyinden difüzyon ile O_2 girişi yanmayı tam olarak destekleyecek miktardadır.)
- 8) Sadece yanma tabakasının üst kısmı adyabatik değildir.

Böylece, reaksiyondaki katılara ait korunum denklemleri reaksiyon dalgasına sabitlenmiş koordinat takımında

$$\text{Yanmamış maddeler için;} \quad \frac{d(\rho_y \cdot V)}{dx} = \rho_y \cdot (k_{kok} + k_{gaz}) = -\dot{w}_{kok} - \dot{w}_g \quad (3.13)$$

$$\text{Kok için; } \frac{d(\rho_{\text{kok}} \cdot V)}{dx} = \rho_y \cdot k_{\text{kok}} - \rho_{\text{kok}} \cdot (\dot{r}_{\text{yan,k}} + \dot{r}_{\text{yan,g}}) = \dot{w}_{\text{kok}} - \dot{w}_{\text{yan,k}} - \dot{w}_{\text{yan,g}} \quad (3.14)$$

$$\text{Kül için; } \frac{d(\rho_k \cdot V)}{dx} = \rho_{\text{kok}} \cdot \dot{r}_{\text{yan,k}} = \dot{w}_{\text{yan,k}} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilirler.

Yukarıdaki ifadelerde V yanma dalgası hızı, x yatay koordinat ve ρ_k kül yoğunluğudur. Yanma tabakası içinde basınç sabit olduğundan ve viskoz kuvveti olmadığından, momentum denklemleri yanma dalgası hızının sabit olduğunu gösterirler.

Kontrol hacmi kullanılarak yazılan enerjinin korunumu denklemi genel terimleri ile şu şekilde yazılabilir:

$$A_1 \cdot (\dot{q}_{i_g} - \dot{q}_{i_{\square}}) + A_1 (\dot{q}_{t_g} - \dot{q}_{t_{\square}}) + \dot{q}_{\dot{Y}} \cdot A_1 \cdot \Delta X - \dot{q}_{\text{rad}} \cdot A_2 - \dot{q}_{\text{kg}} \cdot A_2 = 0 \quad (3.16)$$

Bu ifadedeki terimlerin ifade ettiği parametreler şunlardır:

A_1 : Kontrol hacminin kesiti

A_2 : Kontrol hacminin üst alanı

ΔX : Kontrol hacmi uzunluğu

$\dot{q}_i$: İletim ile olan ısı geçişi

$\dot{q}_t$: Taşınım ile olan ısı geçişi

$\dot{q}_{\dot{Y}}$: Birim hacimde üretilen ısı miktarı

$\dot{q}_{\text{rad}}$: Üst yüzeyden ışıınım ile olan ısı geçişi

$\dot{q}_{\text{kg}}$: Üst yüzeyden kaçan gazların neden olduğu ısı geçişi

Fourier'in ısı iletimine ait ifadesi, Stefan - Boltzman'ın radyasyon ifadesi ve kimyasal reaksiyon terimleri yerlerine konarak enerji denklemi şu şekilde yazılabilir.

$$\lambda \cdot \frac{d^2T}{dx^2} = \rho_y \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{dT}{dx} + \Delta H_{kok} k_{kok} + \rho_g \cdot C_p \cdot V \frac{dT}{dx} - C_p r_{yan.g} \cdot \frac{T - T_a}{2} +$$

$$+ \Delta H_{yan.g} \cdot r_{yan.k} + \Delta H_{yan.g} \cdot r_{yan.g} + \rho_k \cdot C_p \cdot V \frac{dT}{dx} + \frac{\sigma \cdot \epsilon}{D} \cdot (T^4 - T_k^4) \quad (3.17)$$

Yukarıdaki ifadede T sıcaklık, λ ısıl geçirgenlik, C_p özgül ısı, ΔH_i reaksiyon ısıları, σ Stefan-Boltzman sabiti ve ϵ yayıcılıktır. 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.17 nolu dört adi diferansiyel denklem ρ_y , ρ_{kok} , ρ_k , T ve V'den oluşan beş bilinmeyen için çözülmelidir. Ancak yanma dalgası hızı V'nin sabit olduğu bilinmektedir ve sınır şartlar için bu denklem takımı çözülebilir.

Odun talaşı için fiziksel özellikler ve kinetik sabitler bilinmektedir. Numerik sonuçların deneyler ile elde edilenlerle kıyaslanması böylece mümkün olmaktadır. Odun talaşı için fiziksel özellikler:

$$\lambda = 1.5 \times 10^{-4} \text{ cal/cm.s.K}$$

$$\epsilon = 0.9$$

$$C_p = 0.25 \text{ cal/g.K}$$

$$\Delta H_g = -33 \text{ cal/g}$$

$$\Delta H_{kok} = 880 \text{ cal/g}$$

$$\Delta H_{yan.k} = -3500 \text{ cal/g}, \Delta H_{yan.g} = -500 \text{ cal/g}$$

$$E_{kok} = E_g = 25 \text{ kcal/mol}$$

$$F_{kok} = 4.1 \times 10^9 \text{ sn}^{-1}, F_g = 7.8 \times 10^9 \text{ sn}^{-1}$$

$$F_{yan.k} = 1 \times 10^3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{atm})^{1/2}, F_{yan.g} = 1 \times 10^4 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot (\text{atm})^{1/2}$$

Çözüm yöntemi, doğru akışta başlangıç şartlarının tespiti, yanma dalga hızı V'nin seçilmesi ve yukarıdaki denklemlerin pozitif x eksenine göre integre edilmesidir. Sonuçlar akış sonrasındaki sınır şartları ile kıyaslanır. Eğer sınır şartlarına uygun

değilse yeni bir V değeri seçilerek sınır şartları sağlanana kadar işlemler tekrarlanır. Başlangıç ve sınır şartları,

$$x \rightarrow -\infty \text{ için sınır şartları : } \rho_y = \rho_{y0}, \rho_k = 0, T = T_k$$

$$x \rightarrow +\infty \text{ için sınır şartları : } \rho_y = 0, T = T_k$$

Bu denklemlerin nümerik integrasyonu için 4'üncü dereceden Runge - Kutta integrasyonu gereklidir. Deneysel ve teorik değerlerin kıyaslanması oldukça iyi neticeler vermektedir. Bu analitik model diğer yakıtlar için de kullanılabilir. Ancak öncelikle yakıtın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gereklidir.

Tersten gidilerek analitik sonuçlara uyacak fiziksel değerler tespit edilebilir. Şüphesiz bu şekilde bulunacak değerler tam doğru olmayacaktır. Ancak aynı atomik yapıya ($C_6H_{10}O_5$) sahip olmaları nedeniyle odun talaşı ve arpa tozunun benzer kinetik sabitlere sahip olacakları tahmin edilebilir.

3.2 Alevlenme Enerjisi ve Alevlenme Hassasiyeti

Toz-hava karışımının alevlenmesi için alevlenme kaynağı tarafından yeterli miktarda enerji sağlanmalıdır. Karışımın kendiliğinden sürüp giden yanma reaksiyonuna neden olan alevlenme enerjisi karışımın alevlenme hassasiyetine bağlıdır. Toz-hava karışımının alevlenme hassasiyeti üzerindeki temel etkiler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1: Toz-hava karışımının alevlenme hassasiyeti üzerindeki temel etkiler.

Toz Hava Karışımı;	Alevlenme Hassasiyeti
Parçacık ebadı azalırken	Artıyor
İnce parçacıkların miktarı artarken	Artıyor
Nem oranı azalırken	Artıyor
Hava debisi artarken	Azalıyor
Alevlenme enerjisi artarken	Artıyor

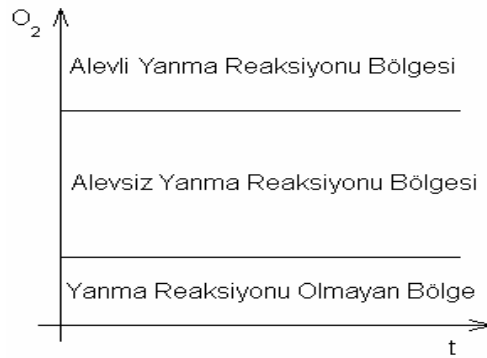
Alevlenme ve alev yayılması ancak yeterli miktarda alevlenme enerjisinin, buna karşılık gelen alevlenme hassasiyetine sahip bir karışıma aktarılmış olması halinde mümkündür.

Ayrıca, belli bir alevlenme olasılığı söz konusudur. Bunun anlamı, sabit sınır koşullarda gerçekleştirilen belli sayıda deneyin sadece belli bir bölümünde

alevlenmenin gerçekleşeceği'dir. Sınır koşullar ilgili sınırlara yaklaştıkça alevlenme olasılığı azalır.

Isı kaynağı, sıkışma ile ortaya çıkabilir. Yada harici bir ısı kaynağı yanmayı başlatabilir. Elektrik kontakları noktasal ısı kaynağı örneği olarak gösterilebilir. Bunun yanında her hangi bir kıvılcım atlaması da yanmayı ateşleyebilir. Başlangıç esnasında tutuşma için birim alana verilmesi gereken ısı enerjisi düzeyine erişildiği anda reaksiyon başlar. İlk ateşleme sırasında küçük bir hacimde başlayan reaksiyon ekzotermik olduğu için yanmanın devamını sağlayan ısı kendiliğinden sağlanmış olur. Malzeme tanecikli yapıda ise başlangıçta kısa bir alevli yanma dönemi gözlemlenebilir. Ancak alevli yanma bölgedeki oksijeni süratle yakar. Çevreden reaksiyona difüze edilen oksijen miktarı ise alevli yanmayı besleyemeyecek düzeye indiğinde alev yok olur. Bundan sonra yanma bölgesine difüzyonla gelen oksijen ancak alevsiz yanma reaksiyonunu besleyecek seviyeye kadar düşer. Oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak, karakteri her an değişebilecek bir kararsız reaksiyon dönemine geçilir.

Alevsiz yanma reaksiyonu, alevli yanmaya yetmeyecek miktardaki oksijen konsantrasyonu miktarı altında geniş bir aralıkta yer alabilir. Şekil 3.2'den görüleceği üzere bu ara hale alevsiz yanma hali denmektedir.



Şekil 3.2: O₂ Konsantrasyonu ile reaksiyon karakterinin değişimi.

3.3 Alevsiz Yanma Mekanizmasına Etki Eden Parametreler

3.3.1 Oksijen Konsantrasyonu

Kapalı bir ortamda yer alan yanma ilk başlarda daha hızlı iken oksijen konsantrasyonunun yanarak azalması neticesinde gittikçe reaksiyon yavaşlar. Yakıcı gaz olan oksijenin tamamen tükenmesi halinde ise yanma biter.

Alevsiz yanma olayında ortamdaki oksijen kadar malzeme içindeki hava habbelerinin içerdiği oksijen de önem kazanmaktadır. Yavaş bir yanma reaksiyonu olan alevsiz yanma reaksiyonunda malzeme içindeki oksijen de yakılmaktadır.

3.3.2 Oksijen Difüzyonu ve Zorlanmış Oksijen Difüzyonu

Alevsiz yanmaya maruz kalan malzemelerin gözenekli dokuya sahip olduğu daha önce de belirtilmişti. Dokudaki gözenekler sayesinde malzeme içlerine kadar hava difüzyonu olmaktadır. Difüze edilen hava, alevsiz yanma reaksiyonunun devamına yeterli ise reaksiyon bu şekilde devam eder. Eğer alevsiz yanma reaksiyonunun gerektirdiğinden daha fazla oksijen difüzyonu mümkün olabilirse yanma alevli hale geçebilir. İhtiyaçtan daha az oksijen difüzyonu ise önce yanma cephesi hızının düşmesine ve daha sonra reaksiyonun tamamen durmasına sebep olur.

Doğal oksijen difüzyonu çoğu alevsiz yanma reaksiyonunda yeterli olmamaktadır. Bu nedenle reaksiyonun devamı için zorlanmış hava akımı ile oksijen beslenmesi gerekmektedir. Tipik bir ahşap bina yangınında atmosferik hava hareketleri bunu sağlayabildiği gibi alevsiz yanmakta olan malzeme yüzeyinden geçen hava akımı da gerekli oksijeni beslemeye yetebilir. Ancak zorlanmış oksijen girişi için en önemli şart malzemenin oksijenin difüzyonunu sağlayacak gözeneklere sahip olmasıdır.

3.3.3. Yakıt İç Yapısı

Malzeme içindeki gözeneklerin büyüklüğü ve pozisyonu yanma reaksiyonu üzerinde etkilidir. Malzeme yüzeyine dik konumda bulunan habbeler, iç yanma bölgelerine kadar oksijen nüfuzunu sağlarlar. Dış yüzeyler üzerinde hava akımı olması içeriye doğru girişi hızlandıran diğer etkindir.

Yanan malzemenin yüzeyine paralel habbeler ise malzemeyi alevsiz yanma bölgesinden alevli yanma bölgesine geçmeye zorlarlar. Zira dış yüzeye dik boşluklar malzeme içlerine doğru oksijen akışını kolaylaştırırlar.

Yapılan deneylerde kullanılan malzemeler tanecikli yapıya sahip maddelerdir. Bu malzemeler içindeki hava habbeleri gelişigüzel yayılmış halde bulunmakta olup boyutları da eşit değildir. Tanecik boyu analizi yöntemi ile yakıtın tanecik boyutu düzeyi tespit edilerek bunun yanma mekanizmasına etkisi irdelenebilir. Tanecik büyüklüğünün saptanması için kullanılacak talaş elekten geçirilmiş ve ortalama bir değer elek analizinden çıkan sonucun ortalaması alınmıştır. Buna rağmen tüm

deneylerde yanma reaksiyonuna giren malzemenin tanecik büyüklüğü en küçük tanecik 1 birim olmak üzere 1 ile 3 birim arasında değişmektedir. Diğer taraftan pratikte rastlanan alevsiz yanma olaylarında da sabit büyüklükteki elemanlardan bahsedilemez. Böylece birbirine yakın tane büyüklüğüne sahip malzemeler ile yapılan deneylerde ortaya çıkan ölçüm hatalarının ihmal edilebileceği kabul edilmiştir.

3.3.4 Yakıt Kimyası

Yanıcı maddenin katı fazı yandığı gibi bu maddeden ısı nedeni ile ortaya çıkan yanıcı gazlarda yanmaktadırlar. Katı yanıcı madde organik tüm malzemelerin molekül yapısında bulunan karbondur. Yanma reaksiyonuna karbon ve oksijen katılmaktadırlar. Malzeme yapısına bağlı olarak ortaya çıkan ürünler değişiklik göstermektedirler. Sonuçta değişik miktarlarda karbondioksit ve karbonmonoksit gazı ortaya çıkmaktadır.

Organik veya inorganik katı maddelerin molekül yapısında bulunan karbondan başka elementler de yanma olayına indirekt olarak iştirak ederler. Organik maddeler içinde bulunan hidrojen ısı neticesinde salıverilir ve yeterli miktarda oksijen ve ısı ile karşılaştığında yanmaya başlar. Petrol ve türevleri için de anı durum söz konusudur. Örneğin doğalgazın (CH_4) yanması bu gazın içerdiği karbon elementi ve hidrojenin yanması demektir. Sıvı petrol türevlerinin tamamının yanması da buharlaşma neticesinde havayla yani oksijen ile karışan yanıcı karbon ve hidrojen elementlerinin reaksiyonudur. Şüphesiz organik maddeler içinde daha başka elementler de bulunmaktadır. Yanma reaksiyonuna bu maddeler girebilir veya hiç bir değişikliğe uğramadan reaksiyondan çıkabilirler.

Sentetik malzemeler arasında özellikle plastik türevleri oldukça yanıcıdırlar. Bu tip malzemelerin imalatında kullanılan petrol yan ürünleri plastik türevlerinin yanıcılığını temin ederler. Karmaşık karbon yapısına sahip olan plastik türleri yüksek yanma sıcaklığına sahiptirler. Yanma neticesinde deformasyona başka bir deyişle erimeye maruz kalan plastik malzemelerin yüzey alanı artar. Alanın artması ise reaksiyona giren malzeme miktarını ve reaksiyona yakıcı gaz olarak giren oksijenin yanma bölgesine kolayca ulaşmasını sağlar.

Yapılan deneylerde kullanılan ilk madde olan ağaç talaşı ise oldukça zengin bir selüloz ($\text{C}_{35}\text{H}_{55}\text{O}_{22}$) deposudur. Selüloz karbon dallanması açısından çok karmaşık bir yapıya sahiptir. Bir çok kombinasyonu bulunan selüloz, elde edildiği kaynağa

göre farklılıklar gösterebilir. Hatta tek bitkide değişik selüloz molekülleri gözlemlenmek dahi mümkündür.

Selülozun yanması da moleküler yapıda görülebilecek farklılıklar nedeniyle önceden ürünlerin tahmin edilmesi zor bir reaksiyondur. Malzemenin tüm bölgelerinde kimyasal bileşimin incelenmesi ile elde edilen sonuçlar ışığında tamamen homojen bir madde elde edilmesinin imkansız olduğu anlaşılmaktadır. Belirsizlikler nedeniyle yakılacak maddenin homojen bir dengesizliğe sahip olduğu kabul edilebilir.

Ağaç talaşı yanmasında tek faktör selülozik yapının belirsizliği değildir. Alevsiz yanma mekanizmasına giren oksijen konsantrasyonu, sıcaklık dağılımının da süreksizlikler göstermesine neden olabilir.

Neticede ağaç talaşının alevsiz yanması reaksiyonunda malzemenin moleküler yapısındaki farklılıklar, tüm malzeme kütleğinde eşit dağılmış kabul edilerek bu etki ihmal edilmiştir.

3.3.5 Sıcaklık Değişimi

Daha önceden ifade edilen etkenlerin tamamı yanma yatağı içindeki sıcaklık gradyanına etki etmektedirler. Parametrelerin birbirinden bağımsız olarak ne şekilde etki yapacağını önceden belirlemek ise yanma mekanizmasının birçok parametreye aynı anda bağlı olmasından dolayı imkansızdır.

Malzeme içindeki sıcaklık dağılımı ortaya çıkan ısı nedeniyle heterojendir. Yanma cephesinin yapısına da bağlı olarak sıcaklık dağılımının teorik yollarla bulunması karmaşık matematiksel yaklaşımlar ile olabilir. Tüm çalışmalarda hedeflerden en önemlisi sıcaklık dağılımının tespit edilmesidir. Alevsiz yanma olayının alevli yanmaya nazaran daha az bilineni olması matematiksel model oluşturma çabalarını olumsuz yönde etkilemektedir.

3.3.6 Alevsiz Yanma Reaksiyonuna Etki Eden Diğer Faktörler

İlk beş maddede ele alınan faktörler alevsiz yanmanın en göze çarpan faktörleridir. Yukarıda sayılan faktörler, alevsiz yanma olayına etki eden tüm faktörler arasında en büyük ağırlıkta olanlardır. Daha az önemli olan diğer etkenlerden ise bazıları aşağıda ele alınmıştır.

Tüm maddelerin yapısında su bulunmaktadır. İçerilen su miktarına göre malzemelerin yanma eğilimi değişmektedir. Su miktarı arttıkça yanma hızı azalmaktadır. Bunun iki sebebi vardır. Birinci sebep suyun yanmayan bir madde olması ve yanma reaksiyonunu durdurucu niteliğidir. İkinci sebep ise ısı ile buharlaşan suyun yanma dokusunu soğutmasıdır.

Yanmakta olan maddenin içerdiği su miktarı için bir kritik değerden söz edilebilir. Birim hacim başına su miktarı kritik değerden yüksek olursa yanma gerçekleşmez. Kritik değerın altında su içeren malzeme ise yanma reaksiyonuna maruz kalabilir. Yanma ile ortaya çıkan ısı yanmayı durdurucu nitelikteki suyu buharlaştırarak sistemden dışarı atar.

Su ile ilgili bir diğer etken de havanın içerdiği su buharı konsantrasyonu olan nemdir. Hava içindeki nem miktarı arttıkça malzeme içine nüfuz eden su miktarı da artmaktadır. Malzemenin içerdiği su ise yanmayı güçleştirmektedir. Bu sebeple reaksiyonun gerçekleşeceği ortamın nem oranının reaksiyona direkt etkisinden söz edilebilir.

Yanma reaksiyonun gerçekleştiği ortamın sıcaklığı yanma hızı bakımından büyük önem taşır. Yanma neticesinde ortaya çıkan ısı konveksiyon ile ortama geçmektedir. Eğer ortam sıcaklığı çok düşükse ısı süratle havaya geçer. Bu hızlı ısı transferi neticesinde yanma cephesi soğur ve yanma hızı azalır. Oysa sıcaklığı yüksek ortamlarda geçen ısı miktarı daha az olacağından yanma cephesinin soğuması zorlaşacaktır.

3.4 Alevlenme Verimliliği

Her alevlenme kaynağı rasgele bir karışımı alevlendirmeyecektir. Örneğin yanıcı gazlarla hava karışımlarının minimum alevlenme sıcaklığı değeri çok düşüktür ve herhangi bir alevlenme kaynağı ile alev alabilirler.

Koni boşalımlar iletken olmayan tozları alevlendirebilmektedir. Bunun tipik bir örneği, boya tozunun topraklanmamış büyük bir keseden topraklanmış siloya doldurulmasıdır. Ayrıca, boya gibi yapay tozların minimum alevlenme sıcaklığı değerleri çok düşüktür.

Doğal ürünler (reçinesiz ahşap tozları, kömür, yiyecekler) aşırı incelmış ve kuru olmadıktan sonra elektrostatik boşalmalar sonucu alev almazlar. Doğal pek çok ürün için minimum alevlenme sıcaklığı değeri 30 mJ'ün üzerindedir.

Toz bulutları belli koşulların gerçekleşmesi halinde, silo boşaltılması sırasında toz bulutu içerisinden geçebilecek sıcak parçacıklar nedeniyle alevlenmesi mümkündür. Sıcak parçanın ebadı minimum olmalı (mevcut deneyimler $>50 \text{ cm}^3$ olduğunu göstermektedir) ve yüzey sıcaklığı, söz konusu toz hava karışımının minimum alevlenme sıcaklığı değerinin üzerinde olmalıdır. Yüzeyde hava akımından dolayı, sıcak bölge oluşturan katı parçacıkların ışınlama yeterli yüzey ısını oluşturması beklenir. Şüphesiz, sıcak bölgenin yüzey sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, alevlenmeye sebep olabilecek hacim o kadar küçük olur. Alevlenme kaynağı olarak mekanik kıvılcımlar genellikle sıcak yüzeylerle ilişkilidir. Tipik bir örnek, makinenin devir yapan parçacıklarının arızaya geçişleridir. Çoğu durumda geçişler ve sürtünme etkilerinde alevlenmenin, kıvılcımlardan değil sıcak yüzeylerden dolayı gerçekleştiği varsayılmaktadır. Sıcak bir yüzeyin enerji yoğunluğu (birim alan başına enerji) kıvılcımlara göre çok daha yüksektir.

3. sınıf yanma özelliği taşıyan tozlar için, toz birikintilerine düşen kıvılcımlar sıcak bölge yada kor oluşumuna neden olabilir. Bunlar daha sonra ikincil yanma alevlenme kaynağı olarak hareket eder. Teknolojik işlemin birincil hatası kıvılcım anında alevlenmeye neden olmaz ancak daha yüksek enerjiye sahip yeni bir alevlenme kaynağı oluşturur. İkincil bir alevlenme kaynağı ile gerçekleşen yangın yada patlamanın, birincil bir hatadan kaynaklanan yangın yada patlamaya göre ekipmanın tamamen farklı bir bölümde ve belli bir gecikme ile (saatler hatta günler sonra) oluşabileceği dikkate alınmalıdır.

Sıcak cisimlerin alevlenme kaynağı olduğu yangın yada patlama senaryoları da benzer bir süreçten geçer. Sıcak cisimler makinenin parçaları (vida, somun, civata, rulman bilyeleri) yada silo doldurma sırasında ayıklanmamış yabancı parçalar olabilir. Bu parçalar duvarlara yada taşıma sırasında borulara çarparak ısınır ve alevlenme kaynağı haline gelirler. Bu sıcak cisimlerin yüzey sıcaklıkları toz bulutunun doğrudan alevlenmesi için yeterli olmayabilir ancak toz birikintisi içinde kalırsa, sıcak yuva oluştururlar [2].

4. YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMA

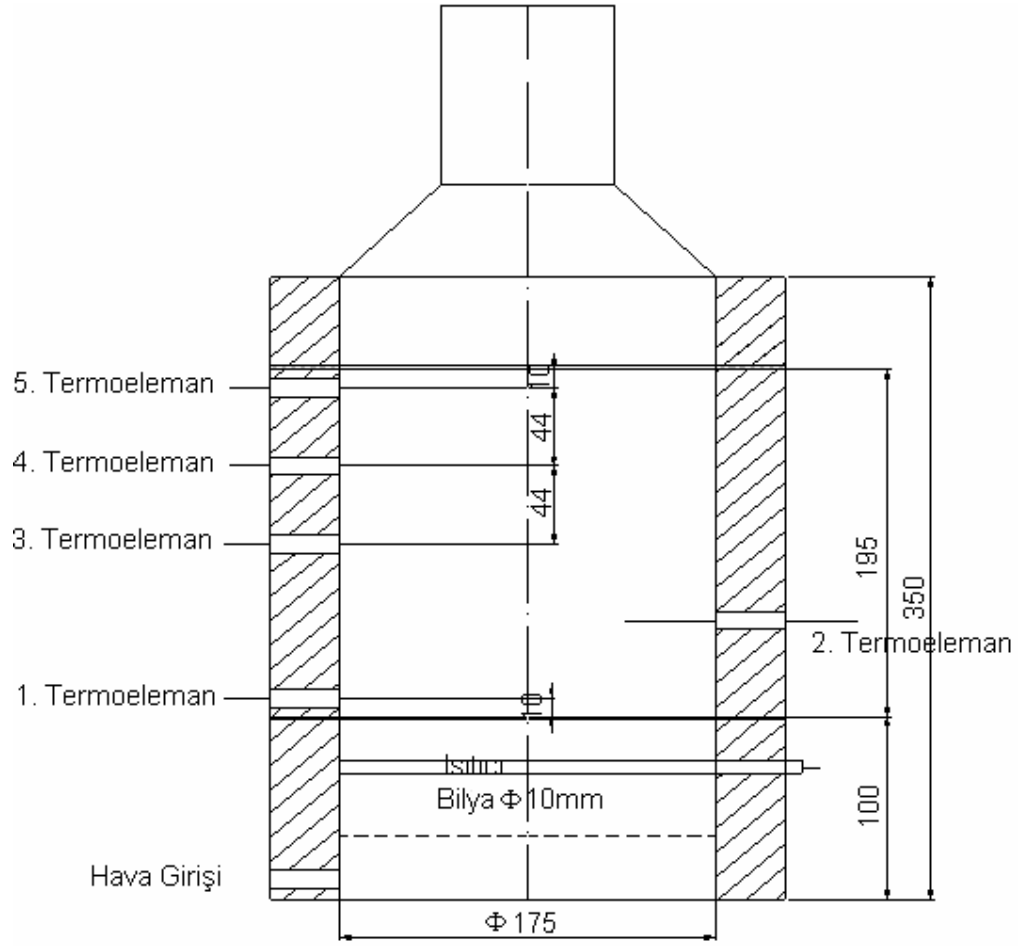
4.1 Deney Düzeneği

Yapılan deneysel çalışmada deney düzeneği üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan havanın verildiği ve 1200 W gücündeki elektrikli ısıtıcı vasıtasıyla ilk ateşlenmenin sağlandığı tutuşma ön haznesidir. İkinci bölüm yanma haznesidir. Yanma haznesindeki yanmayı gözlemleyebilmek amacıyla beş adet termoeleman kullanılmıştır. Silindir içerisinde zamana bağlı sıcaklık gelişimini saptaya bilmek için yanma merkezine dört adet ve yanma haznesinin iç yüzeyi ile merkezi arasına bir adet termoeleman yerleştirilmiştir. Üçüncü bölüm ise yanma sonucu ortaya çıkan gazların atılabilmesi için yapılan baca bölümüdür. Şekil 4.1’de deney düzeneği ve termoelemanların yerleştirilişi görülmektedir.

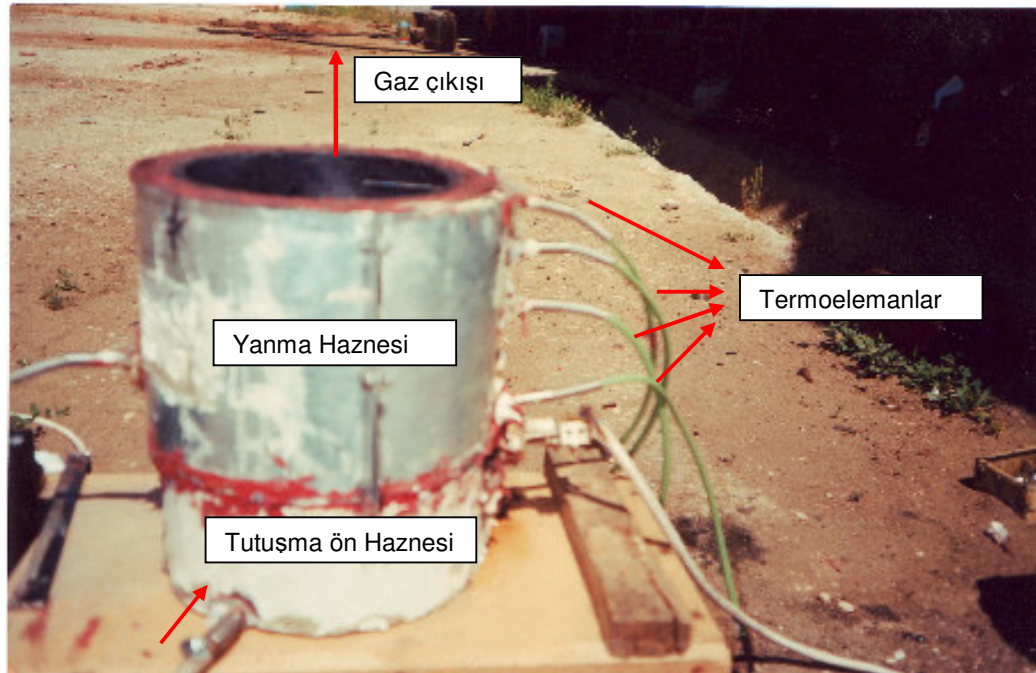
Isı yalıtımını sağlayabilmek için deney düzeneğinin dışı 50 mm kalınlığında refrakter çamur ile sıvanmıştır. Sızdırmazlık için ise ısıya dayanıklı kırmızı silikon kullanılmıştır. Hava debisini düzenleye bilmek amacıyla, hava girişinin üzerine 1 mm çapında delikli elek yerleştirilmiş, üzerine de hava akımını düzgünleştirmek için çelik bilyeler konulmuştur. Böylece hava akımının deney düzeneğinin her tarafında düzgün dağılmış olması sağlanmıştır.

Deney düzeneğine verilen hava miktarını ölçebilmek için deney tesisatının hava girişine debimetre yerleştirilmiştir. Hava debisinin ayarı, deney süresince debimetreden kontrol edilmiştir.

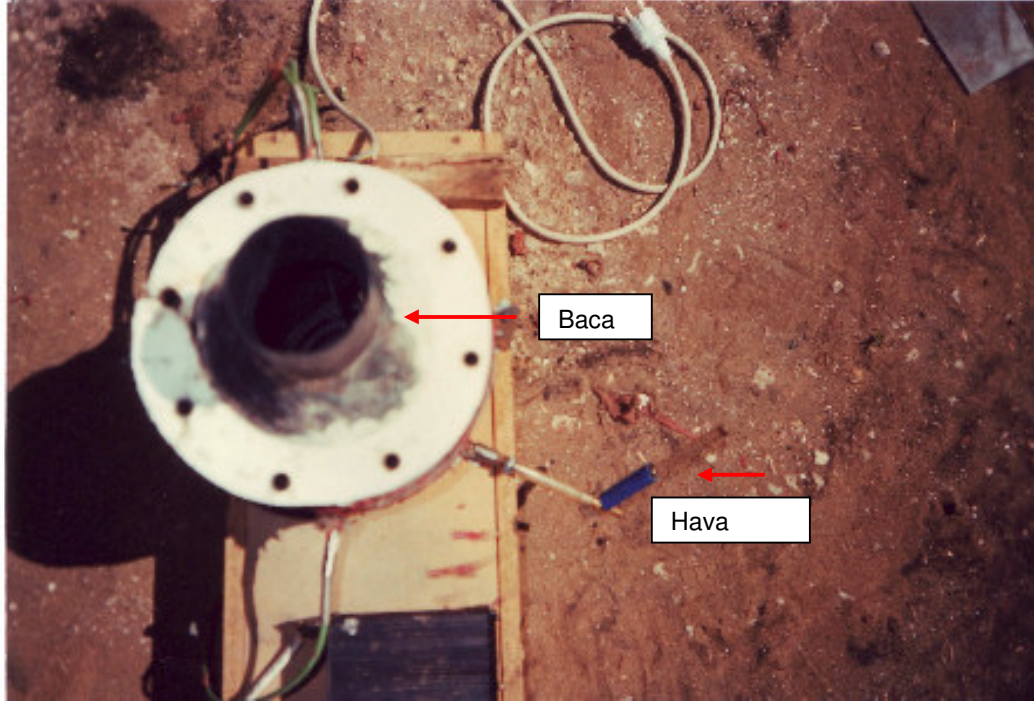
Deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.1: Deney düzeneğinin şematik görünüşü.



Şekil 4.2: Deney düzeneği.



Şekil 4.3: Deney düzeneğinin üstten görünüşü.

4.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneyde kullanılan malzeme, çam-kavak karışımı odun talaşıdır. Kullanılan talaşlara elek analizi yapılarak tanecik büyüklükleri tespit edildi. Tablo 4.1’de kullanılan odun talaşlarına ait elek analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1: Deneyde kullanılan odun talaşlarının elek analizi değerleri.

Deneyde Kullanılan odun talaşı	4mm %	3.2mm %	2mm %	1mm %	0.5mm %
Ortalama 4.0mm	72	18	10		
Ortalama 2.0mm		10	50	28	12

Elek analiziyle ayrılan talaşların nem oranları ölçüldü. Nemin alevsiz yanmaya etkisinin de incelenebilmesi için odun talaşı, dışarıdan su vermek suretiyle nemlendirildi. Tablo 4.2’de kullanılan odun talaşlarının nem miktarları görülmektedir.

Tablo 4.2: Deneyde kullanılan odun talaşlarının nem oranları.

Deneyde Kullanılan odun talaşı	% Nem Miktarı
Ortalama 4.0 mm	3.4 14.0
Ortalama 2.0 mm	3.4 14.0

4.3 Deneyin Yapılışı

Üç parçadan oluşan deney düzeneğinin tutuşma ön haznesine, 1200 W gücündeki elektrikli ısıtıcı ve hava akımını düzenlemek için çelik bilyeler yerleştirilmiştir. Yanma haznesi ile tutuşma ön haznesinin arasına ısıya karşı dayanıklı silikon conta konularak hava sızdırmazlığı sağlanmıştır. Yanma haznesi ve tutuşma ön haznesi birbirine monte edildikten sonra, 1 kg olarak tartılan odun talaşları yanma haznesine yerleştirilmiştir. Talaş yoğunluğunun 0.203 gr/cm^3 de sabit kalmasına dikkat edilmiştir. Daha sonra, baca bölümüyle yanma haznesi arasına hava sızdırmazlığı için conta konularak düzenek hazır hale getirilmiştir.

Deneyde hava debisi, hava vanası kısılarak debimetreden ayarlanmıştır. Sıcaklıkları ölçmek için dijital termometre kullanılmıştır.

Deneyin sağlıklı sonuç verebilmesi amacıyla deney düzeneği sürekli kontrol altında tutulmuş, verilen hava debisinin deney süresince değişmemesine dikkat edilmiştir. Özellikle ilk tutuşmanın başladığı sırada ortaya çıkan yoğun miktardaki baca gazının, deney düzeneği ek yerlerinden veya termoelemanların bağlantı yerlerinden kaçmaması ve direkt bacadan çıkması sağlanmıştır. Talaş yoğunluğunun bütün deneylerde mümkün olduğunca sabit kalması sağlanmıştır. Talaş nemi her deneyden önce ölçülerek kaydedilmiştir. 1. termoelemanda sıcaklık yükselmeye başladığı anda ısıtıcı devreden çıkarılmıştır ve talaşın kendi kendine yanması sağlanmıştır.

Alevsiz yanmayı etkileyen çok sayıda parametrenin oluşması nedeniyle bazı deneylerde düzgün olmayan sonuçlara rastlanmıştır. Bütün talaşın birden tutuşması, yanan kısmın çökmesi ve hava kanallarının açılması görülen deney hatalarıdır.

5. DENEY SONUÇLARI

5.1 Paralel Alevsiz Yanma

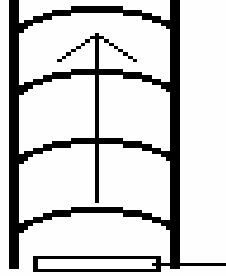
Paralel alevsiz yanma halinde, hava ile yanma bölgesinin ilerleme hızı aynı yöndedir. Deney düzeneğinin konstrüksiyonu göz önüne alınırsa aşağıdan yukarıya doğrudur. Deney başlangıcında ilk ateşleme, deney tesisatının altına yerleştirilen elektrikli ısıtıcı yardımıyla sağlanmıştır. Yanma havası, ateşleyicinin altındaki bilyelerden geçirilerek düzgün bir şekilde sisteme verilmiştir. Yanma cephesinin yapısı incelendiğinde en sıcak bölge ısıtıcının üzerinde oluşmaktadır. Yanma üst kısımlara doğru ilerledikçe ölçülen maksimum sıcaklık değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. Yanma cephesine ulaşan hava önce bu sıcak bölge ile karşılaşmaktadır. Oksijenin büyük bir kısmı yanma cephesinin sıcaklığının yüksek olduğu bölümde tüketilmektedir. Malzemenin içerdiği nem, yanma gazlarının ve malzemenin su buharlaşma sıcaklığının üstünde olduğu yakıt yatağı bölgesinde buharlaşmakta ve sıcaklığın düşük olduğu yakıt yatağındaki malzemede tekrar yoğunlaşmaktadır. Bu durum üst tabakalarda nem miktarının artmasına ve nemin buharlaştırılması için sarf edilen enerjinin de artmasına sebep olmaktadır.

Özellikle ilk ateşlemenin yapıldığı sırada ve bunu takip eden alt bölgede sıcaklığın yükseldiği anda yoğun bir gaz çıkışı yaşanmaktadır. Bölgedeki oksijenin bitmesi ve sadece yanma için gerekli havanın sisteme verilmesi, bununla birlikte yanma bölgesindeki nem miktarının düşmesi baca gazı yoğunluğunu düşürmektedir. Nem oranı yüksek olan numunelerle yapılan deneylerde baca gazının, nem oranı düşük numunelere nazaran daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.

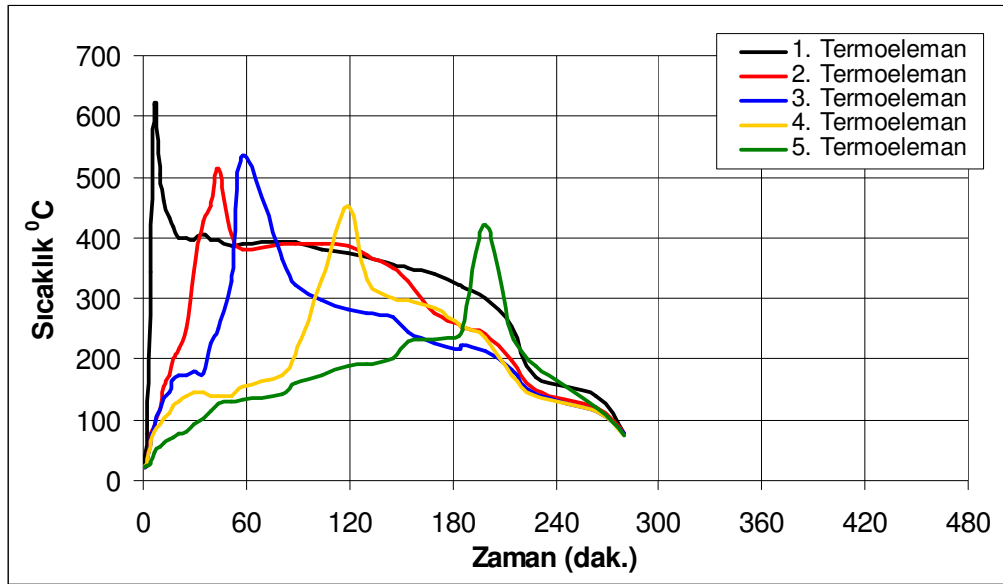
5.2 Yapılan Deneysel Çalışmalar

4.0 mm tane büyüklüğündeki talaşlarla yapılan deneylerde, hava debisi artırıldığı durumda (13 L/d hava debisi, 0.009 m/s hava hızında) sıcaklığın, yanma haznesinin merkezinde bulunan bütün termoelemanlarda aynı anda ve paralel bir şekilde arttığı görülmüştür. Yanma haznesinin kenarına yerleştirilen 2 numaralı termoelemanda,

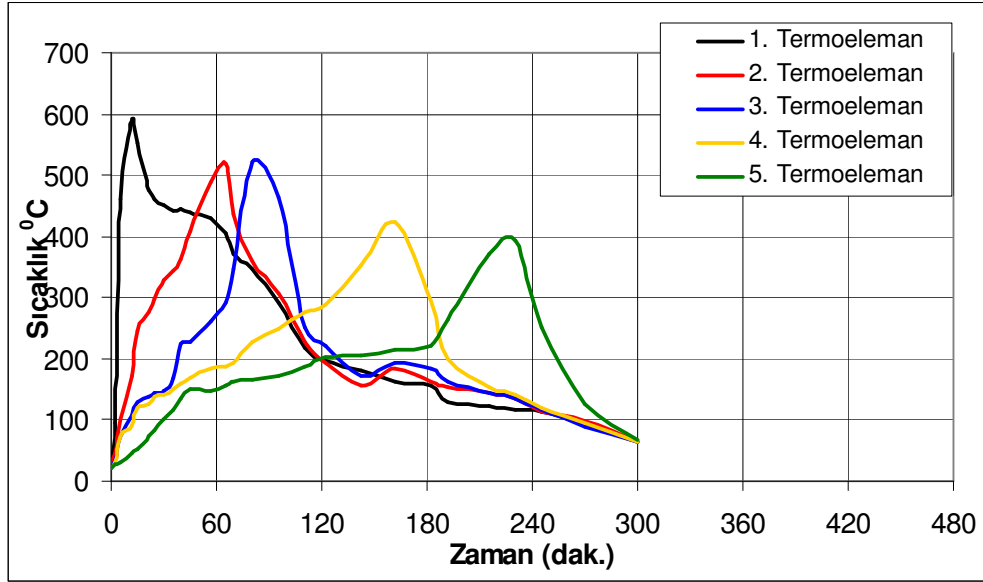
sıcaklığın daha yavaş yükseldiği ve maksimum sıcaklığın nispeten düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de de görüleceği gibi nem oranı yükseldikçe yanma haznesinin cidarında yanma gecikmektedir. Yüksek nem ve yüksek hava debisi sebebiyle ısı taşınımının arttığı ve yanmanın merkezden başlayıp cidarlara doğru yayıldığı düşünülmüştür. Şekil 5.1'de yanmanın ilerlemesi şematik olarak gösterilmiştir. Nemin ve hava debisinin düşük olduğu durumda (5 L/d hava debisi, 0.0033 m/s hava hızında) yanmanın nispeten daha yavaş ilerlediği ve ulaşılan maksimum sıcaklığın diğerlerine nazaran daha yüksek olduğu saptanmıştır. Yanmanın ilerleme yönü yine Şekil 5.1'deki gibidir.



Şekil 5.1: İri taneli odun talaşında yüksek nem ve hava debisinde yanmanın ilerleyişi.

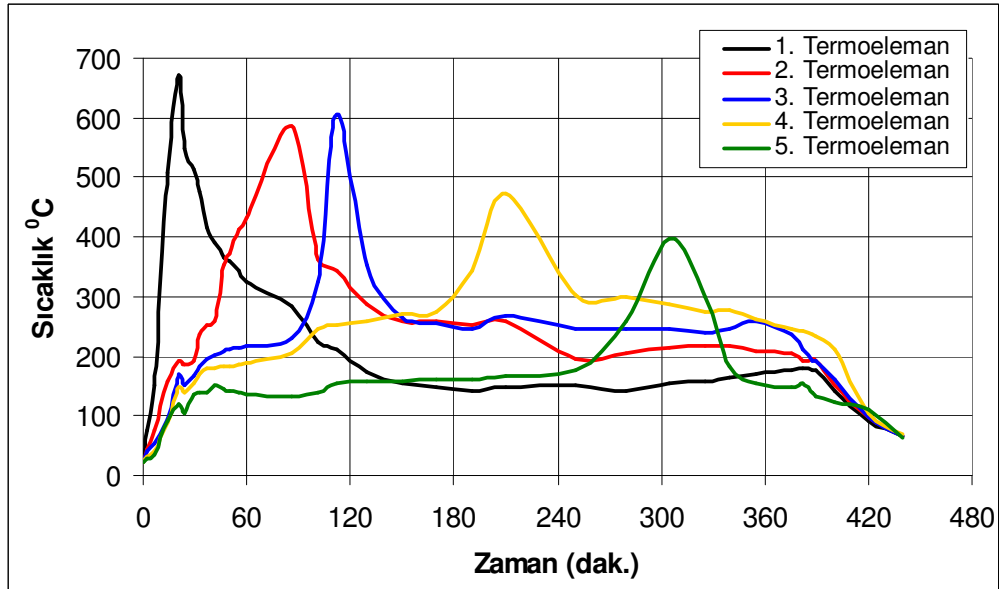


Şekil 5.2: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 13 L/d).

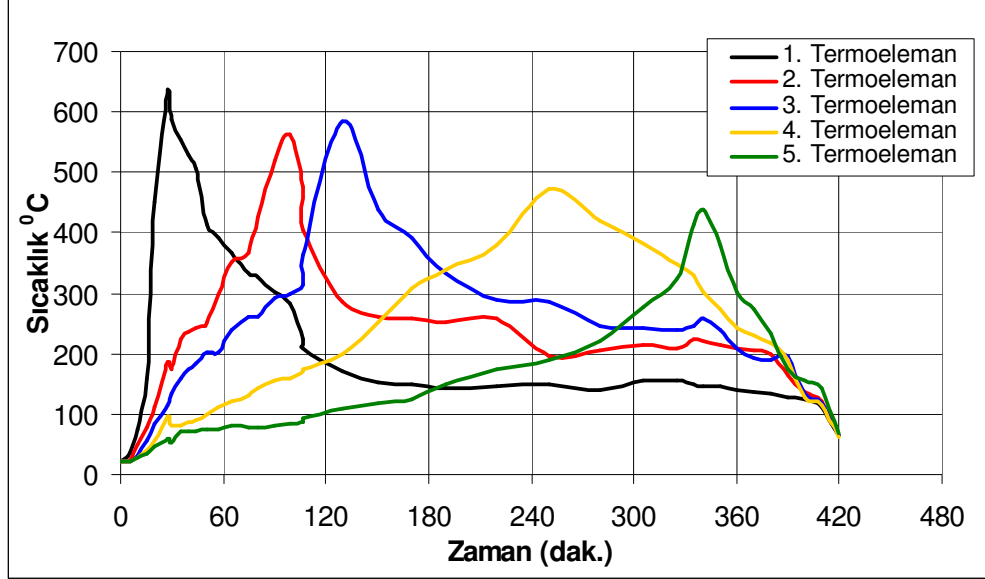


Şekil 5.3: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 13 L/d).

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de 4.0 mm tane büyüklüğünde ve düşük hava hızındaki talaşın farklı nemlerdeki sıcaklık –zaman grafiği verilmiştir.



Şekil 5.4: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 5 L/d).

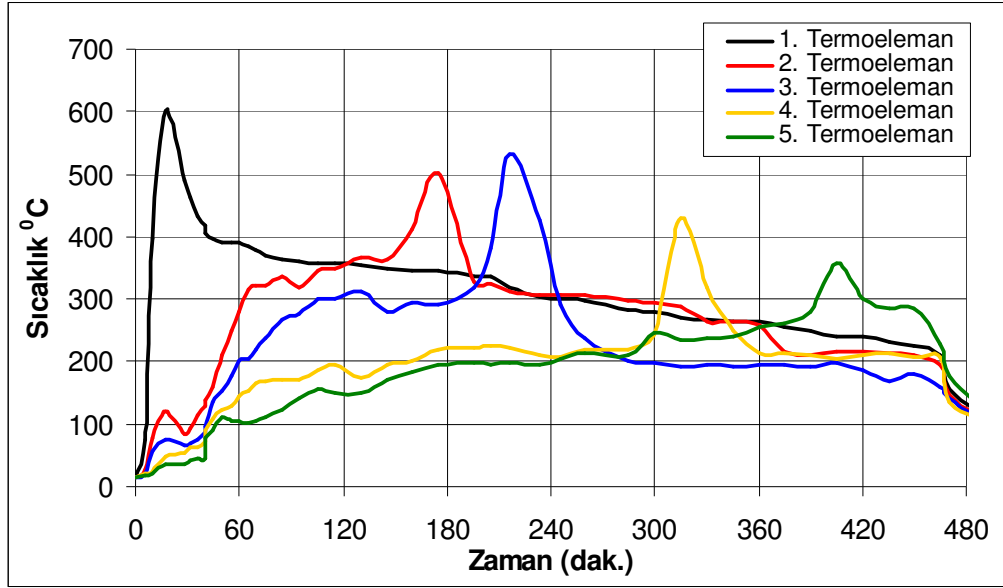


Şekil 5.5: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 5 L/d).

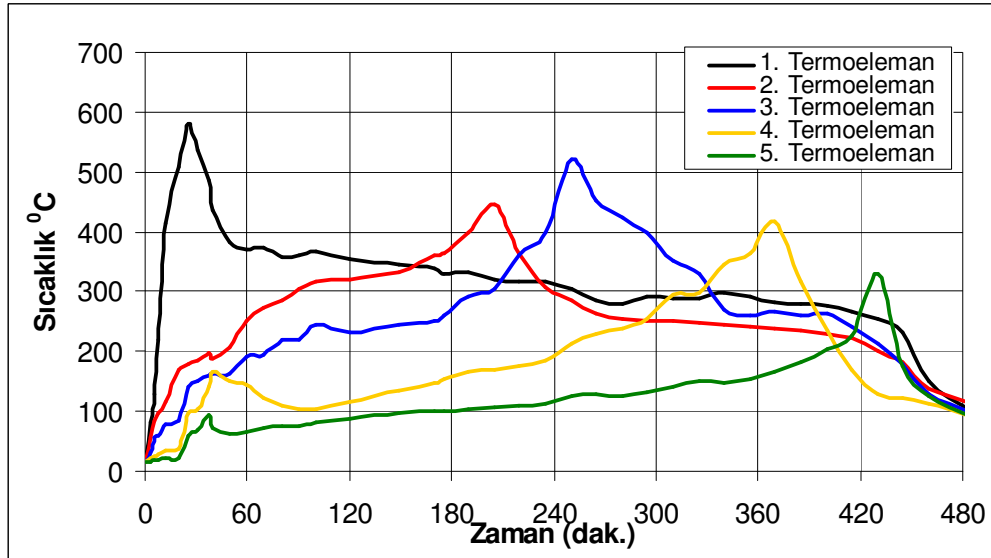
Tane büyüklüğü 4.0 mm ve düşük hava debisinde yapılan deneylerde nem miktarlarını değiştirdiğimizde, yüksek nemin yanma haznesinde soğutma etkisi yaptığı ve yanma reaksiyonunun daha yavaş ilerlediği tespit edilmiştir. Ulaşılan maksimum sıcaklıkların da nispeten daha düşük oldukları görülmüştür. Benzer sonuçlar aynı tanecik büyüklüğü için yüksek hızlarda da tespit edilmiş. Nem yükseldiği takdirde, yanma hızının nispeten yavaşladığı ve ulaşılan maksimum sıcaklıkların düştüğü görülmüştür.

Tane büyüklüğü 4.0 mm ve düşük nem oranında farklı hava debilerindeki yanma reaksiyonunu inceleyecek olursak, yüksek hava debisinin yanma için gerekli olan oksijen miktarını artırdığı ve dolayısıyla yanma reaksiyonunu hızlandırdığı tespit edilmiştir. Yüksek hava debisinin aynı zamanda ısı taşınımını artırdığı ve bu sebepten dolayı ulaşılan maksimum sıcaklıkların nispeten düşük hava debisiyle yapılan deneylere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Ortalama 2.0 mm tane büyüklüğündeki odun talaşı ile yapılan deneylerde büyük taneciklilerle yapılan deneylere paralel sonuçlar elde edilmiştir. Yanma reaksiyonunun nispeten daha yavaş ilerlediği ortaya çıkmıştır. Her iki hava hızında da düşük nemdeki ulaşılan maksimum sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de 2.0 mm tane büyüklüğü için düşük hava debisinde ve farklı nem oranlarındaki sıcaklık-zaman grafikleri verilmiştir.

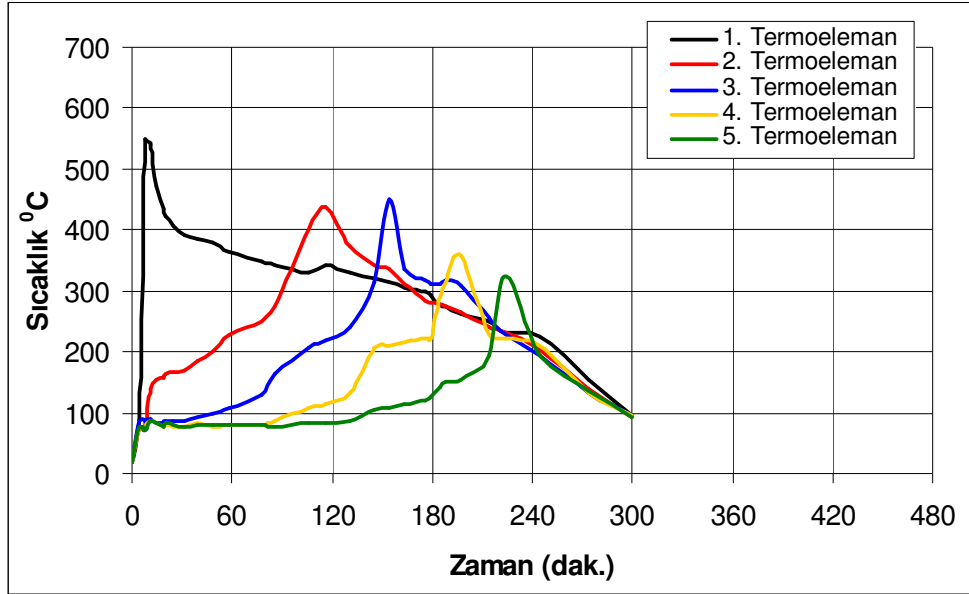


Şekil 5.6: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 5 L/d).

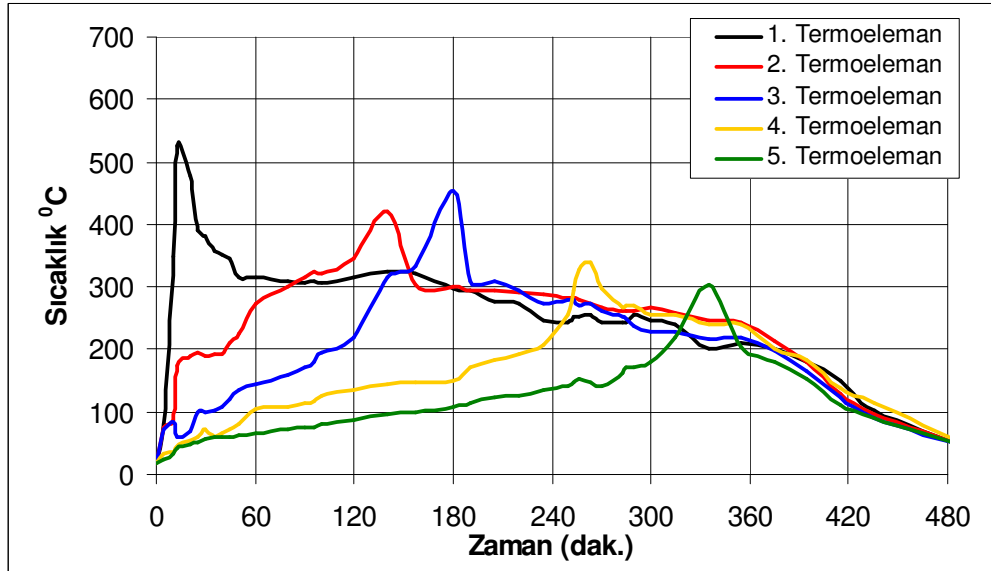


Şekil 5.7: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın düşük hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 5 L/d).

Nem oranı arttıkça, büyük tanecikli deneylerde de olduğu gibi yanma reaksiyonunun daha yavaş ilerlediği ve ulaşılan maksimum sıcaklıkların nispeten daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da 2.0 mm tane büyüklüğü için yüksek hava debisinde ve farklı nem oranlarındaki sıcaklık-zaman grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.8: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve düşük nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %3.4 Hava debisi: 13 L/d).



Şekil 5.9: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın yüksek hava debisi ve yüksek nemde Sıcaklık-Zaman grafiği (Nem: %14 Hava debisi: 13 L/d).

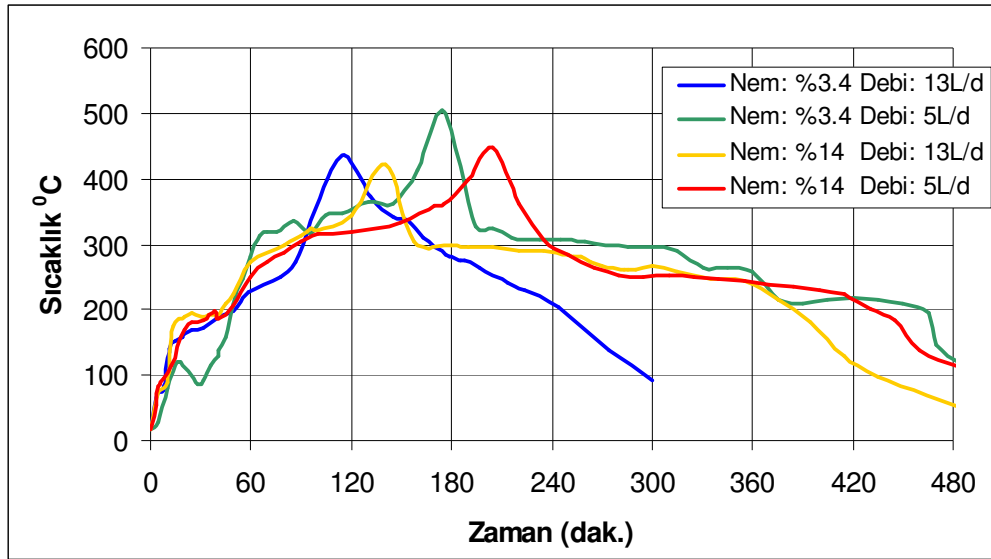
Ortalama 2.0 mm tane büyüklüğünde ve yüksek hava hızındaki odun talaşıyla yapılan deneylerde nem oranının yükselmesi yanma reaksiyonunu yavaşlatmaktadır. Maksimum sıcaklıklar iri tanecikli odun talaşıyla yapılan deneylerde olduğu gibi düşüktür. Hava hızlarının artması farklı nem oranlarında da yanma haznesine giren oksijen miktarı arttığı için gene yanma reaksiyonunu hızlandırmaktadır. Yanma cephesinin ilerleyişi, iri tanecikli odun talaşıyla yapılan deneylerdeki profile benzemektedir. Yanma hızı yanma haznesinin cidarlarında

düşük, merkezinde nispeten daha hızlıdır. Yanma cephesinin ilerleyişi Şekil 5.1'e benzemektedir.

Tane büyüklüğünün artması odun talaşları arasındaki boşluğun dolayısıyla porozitenin artmasına neden olmaktadır. Buda yanma haznesindeki oksijen miktarını artırmakta ve yanma reaksiyonunu hızlandırmaktadır.

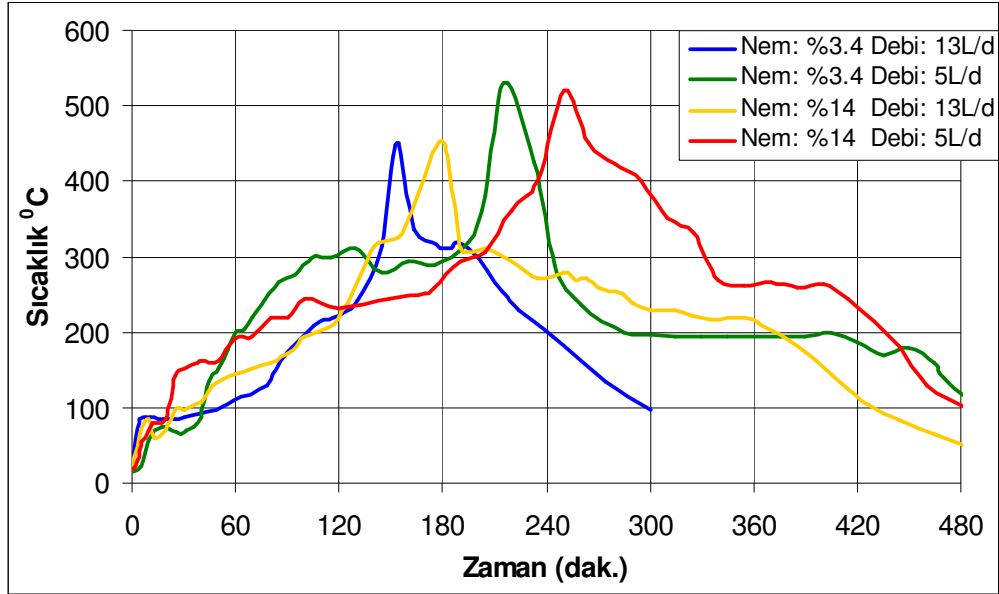
5.2.1 Deney Sonuçlarının Termoelemanlara Göre Mukayesesi

Yapılan deneysel çalışmada farklı tanecik çaplarına göre farklı pozisyonlardaki termoelemanların ölçtüğü sıcaklık değerlerinin, tek bir sıcaklık-zaman grafiğinde incelenmesi, alevsiz yanma reaksiyonu hakkındaki sonuçların yorumlanmasına kolaylık sağlamaktadır. Şekil 5.10'da yanma haznesinin kenarında bulunan 2. termoelemandan ölçülen sıcaklık-zaman grafiği verilmektedir.

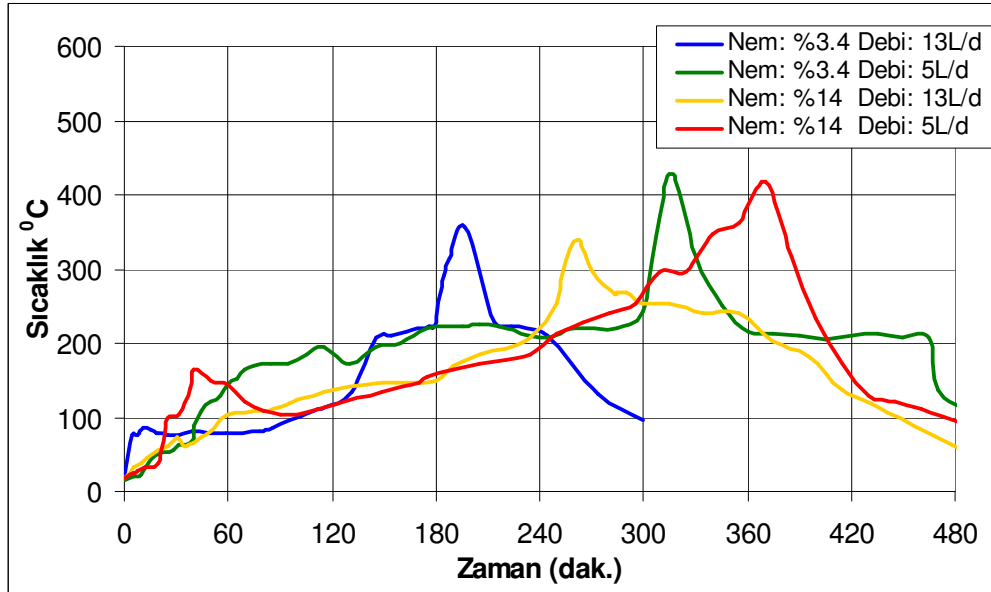


Şekil 5.10: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 2. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.

Ortalama 2.0 mm tane büyüklüğündeki odun talaşında, hava debisindeki artış, nem oranının düşmesine nazaran alevsiz yanma reaksiyonunu daha fazla hızlandırmaktadır. Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de 3. ve 4. termoelemanlara göre sıcaklık-zaman grafikleri verilmiştir.



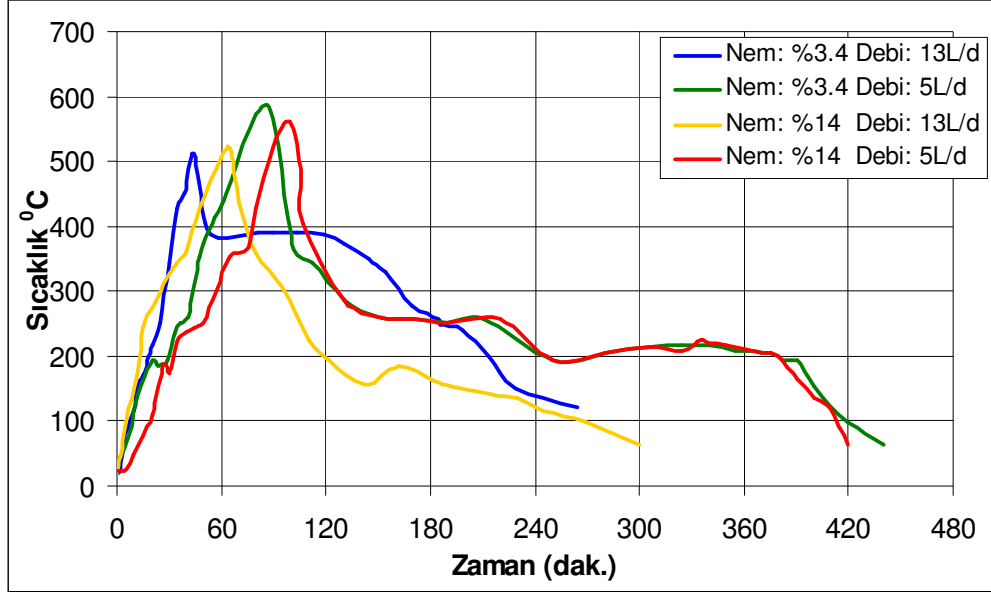
Şekil 5.11: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 3. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.



Şekil 5.12: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 4. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.

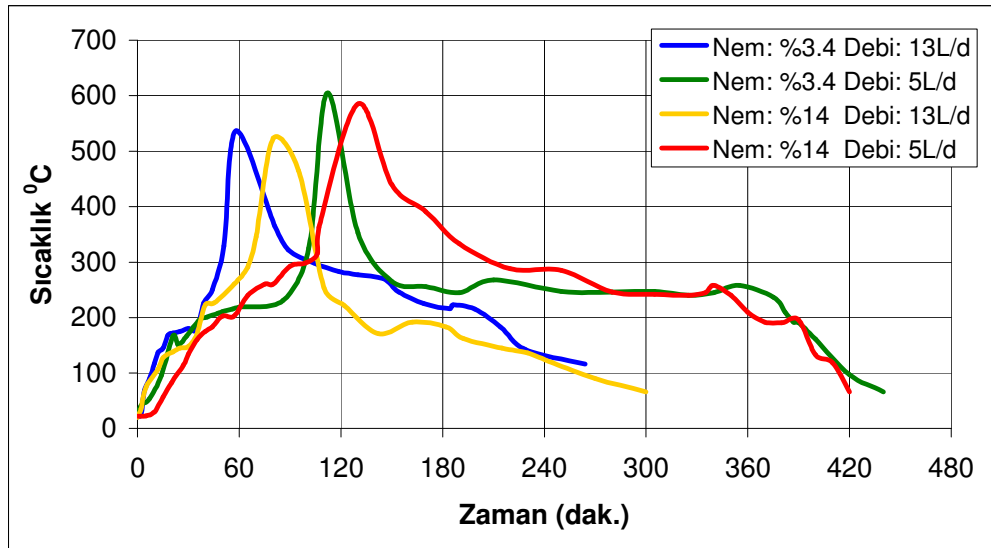
Yanma haznesinin merkezine yerleştirilen termoelemanlardan ölçülen değerlerden de yanma havasının alevsiz yanma reaksiyonu için nemden daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Aynı nem oranında yapılan deneylerde hava debisi artırıldığında yanma hızının arttığı fakat fazla havanın yanma reaksiyonunu soğutmasından dolayı maksimum sıcaklıkların azaldığı tespit edilmiştir.

Ortalama tane büyüklüğü 4.0 mm olan odun talaşının 2., 3. ve 4. termoelemanlara göre sıcaklık-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de verilmiştir.

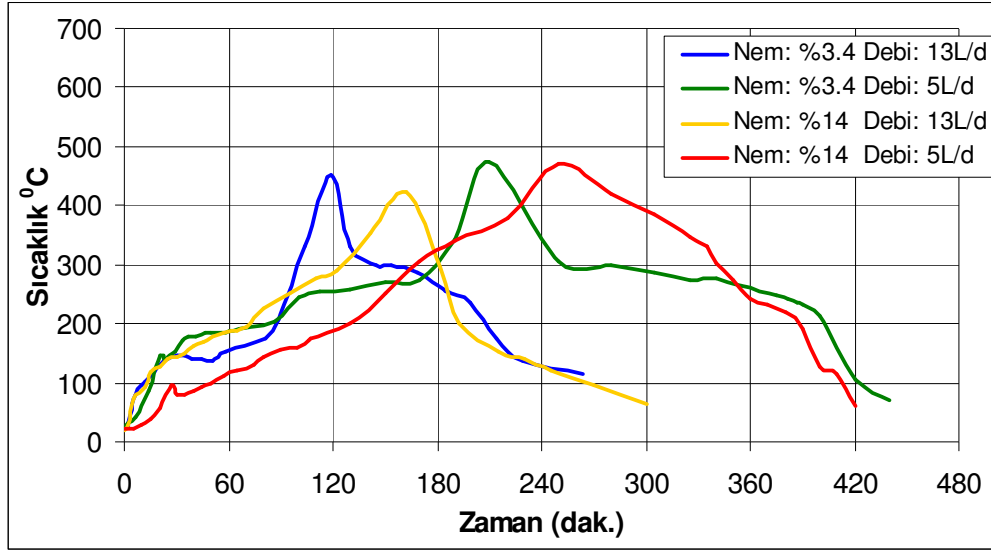


Şekil 5.13: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 2. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.

Yanma haznesinin kenarına yerleştirilen 2. termoelemandan ölçülen değerler karşılaştırıldığında yine hava debisinin alevsiz yanma reaksiyonunu, nem oranına nazaran daha fazla tetiklediği anlaşılmıştır. Ayrıca tane büyüklüğünün artmasının alevsiz yanma reaksiyonunu oldukça hızlandırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.14: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 3. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.

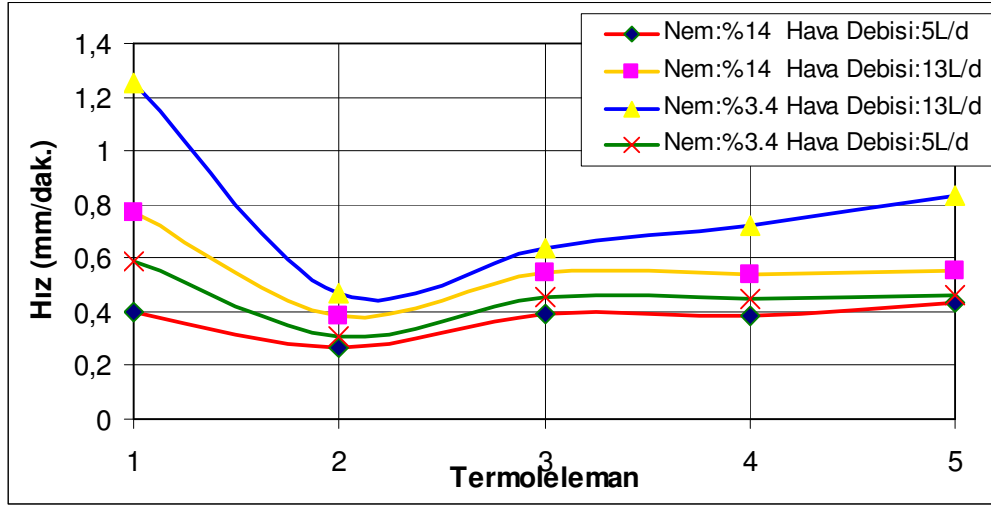


Şekil 5.15: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın farklı hava debisi ve nem oranlarında, 4. termoelemanına göre Sıcaklık-Zaman grafiği.

Yanma haznesinin merkezine yerleştirilen termoelemanlardan ölçülen değerlere göre de yanma havasının artması yanma haznesinde yanma için gerekli olan oksijen miktarını arttırdığından alevsiz yanma reaksiyonunu hızlandırmaktadır. Nemin alevsiz yanma reaksiyonunda, yapılan deneylere göre 3. derecede öncelikli olduğu tespit edilmiştir.

5.2.2 Deney Sonuçlarının Maksimum Sıcaklığa Ulaşma Hızına Göre Mukayesesi

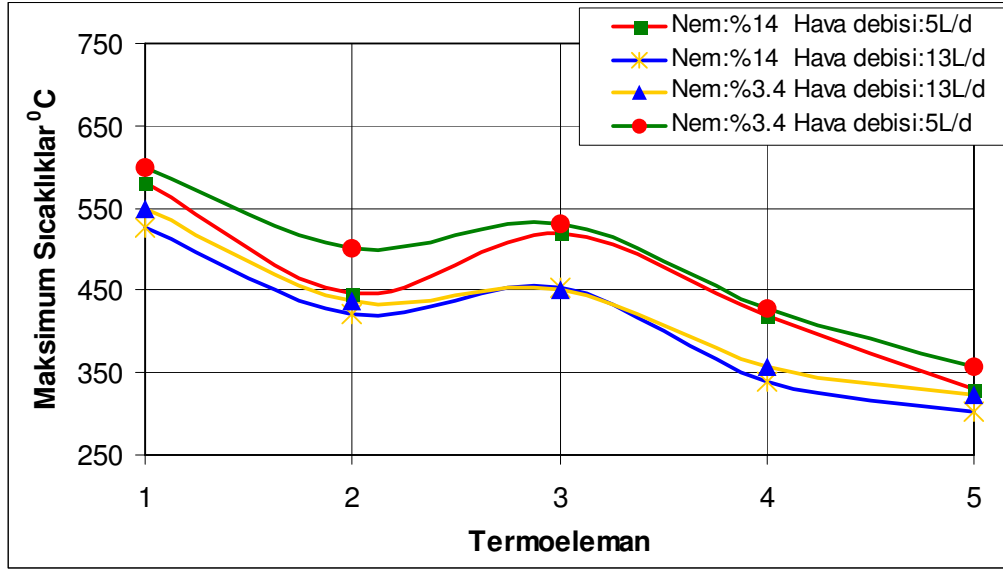
Maksimum sıcaklıklara ulaşma hızı, alevsiz yanma reaksiyonunun gelişimini yorumlamamıza yardım edecek diğer bir parametredir. Yanma cephesinin profilini tespitimize yardımcı olmaktadır. Şekil 5.16'da ortalama 2.0 mm tanecik büyüklüğündeki odun talaşı için termoelemanlarda ölçülen maksimum sıcaklık grafiği verilmiştir.



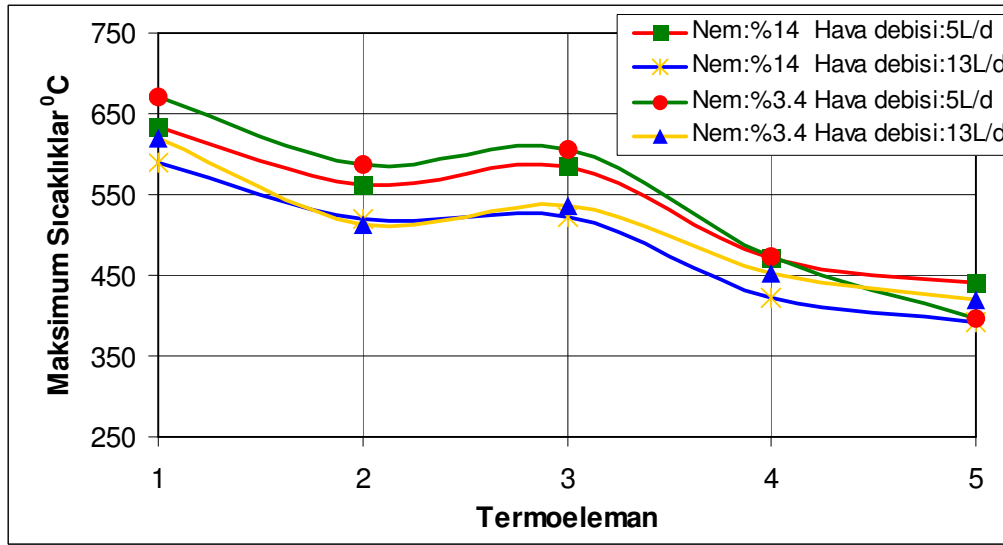
Şekil 5.16: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklığa ulaşma hız-termoeleman grafiği.

1. termoeleman, deney tesisatının altına yerleştirilen ısıtıcıya yakın olduğu için maksimum sıcaklığa ulaşma hızları yüksek çıkmıştır. Deney tesisatının yan duvarına yakın yerleştirilen 2. termoelemanda, maksimum sıcaklığa ulaşma hızı, orta bölgelere nazaran daha düşük çıkmıştır. Buda yanma cephesinin ilerleyişinin Şekil 5.1'deki gibi olduğunu göstermiştir. Deney tesisatının çıkışına doğru yerleştirilen termoelemanlarda yanma hızı artarak devam etmiştir. Yüksek hava debisiyle yapılan deneylerde yanma cephesi ilerleme hızı, düşük hava debisiyle yapılan deneylere nazaran daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde odun talaşının nem oranının düşmesi, yanma cephesi ilerleme hızını artırıcı yönde rol oynamıştır.

Termoelemanlarda ölçülen maksimum sıcaklıkların değişimi Şekil 5.17'de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, düşük hava debisiyle yapılan deneylerde daha yüksek sıcaklıklara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Odun talaşının neminin yüksek olması, yanma haznesinde soğutma etkisi yapmış ve ulaşılan maksimum sıcaklıkların düşmesine neden olmuştur. Tanecik çapının büyümesi de odun talaşının porozitesini artırmış, dolayısıyla yanma için gereken oksijen miktarının armasına sebep olmuş, buda ulaşılan maksimum sıcaklıkları artırmıştır. Ortalama 4.0 mm büyüklüğündeki odun talaşının termoelemanlarda ölçülen maksimum sıcaklıklarının değişimi Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.17: Tane büyüklüğü 2.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklık-termoeleman grafiği.



Şekil 5.18: Tane büyüklüğü 4.0 mm olan talaşın maksimum sıcaklık-termoeleman grafiği.

2.0 mm ve 4.0 mm tane büyüklüğündeki odun talaşlarının maksimum sıcaklıklarının 3. termoelemandan 4. termoelemanına ve 4. termoelemandan 5. termoelemanına ulaşma hızı Tablo 5.1'de verilmiştir. Yapılan deneylerde, V_{45} ilerleme hızı V_{34} 'e nazaran daha yüksek çıkmıştır. Alevsiz yanma reaksiyonunun sonuna gelmesi, yanma için gerekli oksijenin bir kısmının bacadan yanma haznesine girmesi reaksiyon hızını artırıcı yönde rol oynamıştır. Her iki tanecik büyüklüğü içinde düşük hız ve yüksek nemdeki V_{34} hızı en düşük seviyededir. Yine aynı tanecik büyüklüğünde düşük nem ve yüksek hava hızında V_{34} hızı en yüksek seviyededir.

Hava debisinin artması, yanma reaksiyon hızını artırmaktadır. Odun talaşını nem miktarının artması alevsiz yanma reaksiyonunun ilerleme hızını yavaşlatmıştır. Tanecik büyüklüğünün artması da alevsiz yanma reaksiyonunun hızını kısmi olarak artırıcı yönde rol oynamıştır. V_{34} hızı her iki tanecik büyüklüğü içinde yaklaşık aynı çıkmıştır. Bununla sebeplerinden biri her deneyde talaş yoğunluğunun sabit tutulmuş olmasıdır.

Tablo 5.1: Maksimum sıcaklıkların, 3. termoelemandan 4. termoeleman ve 4. termoelemandan 5. termoeleman ulaşma hızı.

Yapılan Deneyler	V_{34} (mm/d)	V_{45} (mm/d)
2.0 mm Nem:%3.4 Hava debisi: 5L/d	0.44	0.49
2.0 mm Nem:%3.4 Hava debisi:13L/d	1.02	1.63
2.0 mm Nem:%14 Hava debisi: 5L/d	0.37	0.73
2.0 mm Nem:%14 Hava debisi:13L/d	0.53	0.61
4.0 mm Nem:%3.4 Hava debisi: 5L/d	0.45	0.46
4.0 mm Nem:%3.4 Hava debisi:13L/d	0.72	0.55
4.0 mm Nem:%14 Hava debisi: 5L/d	0.37	0.49
4.0 mm Nem:%14 Hava debisi:13L/d	0.54	0.65

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Sonuçların Yorumu

Endüstride büyük bir yangın riski oluşturan alevsiz yanma ile ilgili olarak yapılan bu deneysel çalışmada, alevsiz yanmanın oluşma şartları incelenmiştir. Farklı tanecik büyüklüğünde ve nemindeki odun talaşına, farklı hava debileri verilerek alevsiz yanma kabiliyeti incelenmiştir.

Özellikle ilk tutuşmanın başlangıcında yoğun duman çıkışı oluşmaktadır. İlerleyen zamanlarda oksijen miktarının düşmesiyle duman yoğunluğu azalmakta, çok düşük hava debilerinde dahi alevsiz yanma reaksiyonunun devam ettiği tespit edilmiştir.

Odun talaşıyla yapılan deneylerde tanecik büyüklüğü arttıkça alevsiz yanma reaksiyonunun hızlandığı tespit edilmiştir. Tanecikler arasındaki boşlukların fazla olması yanma için gerekli olan oksijen miktarını artırmış, dolayısıyla yanma reaksiyonunu artırmıştır.

Nem miktarının artması, yanma haznesini soğutmakta buda alevsiz yanma reaksiyonunu geciktirmektedir.

Hava debisinin artması, yanma için gerekli oksijen miktarını artırdığı için alevsiz yanma reaksiyonunu hızlandırmaktadır. Düşük hava debileriyle yapılan deneylerde, ulaşılan maksimum sıcaklıklar, yüksek hava debilerine oranla çok daha yüksektir.

Yanma cephesinin ilerleyişi, yanma haznesinin kenarlarında yavaş, merkezinde nispeten daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışma, ileride farklı malzemelerle ve değişik malzeme parametreleriyle yapılacak yeni deney sonuçlarının mukayese edilmesine yardımcı olacaktır.

Alevsiz yanmanın başlaması ve yayılması konusunda kaynak veri oluşturulmaya çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Önder, Y.E.**, 1999. Üzerinde hava akımı olan, yatay yakıt yatağındaki alevsiz yanmanın incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Krause, U.**, 1999. Yangın ve Toz Patlamaları Seminer Notları, Frankfurt, Germany, March
- [3] **Bakhman, N.N.**, 1993. Smoldering Wave Propagation Mechanism. I. Critical Conditions, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 29(1), 14.
- [4] **Moallemi, M.K., Zhang, H., Kumar, S.**, 1993. Numerical Modeling of Two-Dimensional Smoldering Processes, *Combustion and Flame*, 95, 170-182.
- [5] **Fatehi, M., Kaviany, M.**, 1994. Adiabatic Reverse Combustion in a Packed Bed, *Combustion and Flame*, 99, 1-17.
- [6] **Ohlemiller, T.J., Lucca, D.A.**, 1983. An Experimental Comparison of Forward and Reverse Smolder Propagation in Permeable Fuel Beds, *Combustion and Flame*, 54, 131-147.
- [7] **Moussa, N.A., Toong, T.Y. and Garris, C.A.**, 1977. Sixteenth Sym. (Int.) on Comb., *The Combustion Institute*, P. 1447
- [8] **Leisch, S.O., Kauffman, C.W., Sichel, M.**, 1984. Smoldering Combustion in Horizontal Dust Layers, 20th Sym. (Int.) on Comb. *The Combustion Institute*,
- [9] **McKenzie, L.M., Hao, W.M., Richards, G.N., Ward, D.E.**, 1994. Quantification of Major Components Emitted from Smoldering Combustion of Wood, *Atmospheric Environment*, 28, 3285-3292.
- [10] **Ohlemiller, T.J.**, 1990. Forced Smoldering Combustion Propagation and the Transition to Flaming in Cellulasic Insulation, *Combustion and Flame*, 81, 354-365.

ÖZGEÇMİŞ

Kasım 1973 tarihinde Isparta'da doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Isparta'da tamamladıktan sonra 1990 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesini kazandım. 1994 yılında makina mühendisi olarak mezun oldum. Aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Anabilim Dalı Enerji Bölümünde yüksek lisans programına başladım. 1996-1997 yılları arası Çapa Makine Mühendislik Ltd. Şirketinde proje yöneticisi olarak, 1998-2003 yılları arası ORMA Orman Mahsülleri AŞ'de makine mühendisi olarak çalıştım. 2003 yılından itibaren Kastamonu Entegre Ağaç San. ve Tic. AŞ'de makine mühendisi olarak çalışmaktayım.