



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**RİJİT POLİÜRETAN KÖPÜĞÜN TERMAL VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ALEV GECİKTİRİCİLERİN  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

**Berk YAMAN**

Danışman  
**Dr. Öğr. Üyesi Elif Hatice GÜRKAN**

SAMSUN  
2022

T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



RİJİT POLİÜRETAN KÖPÜĞÜN TERMAL VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ALEV GECİKTİRİCİLERİN  
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

**Berk YAMAN**

Danışman

**Dr. Öğr. Üyesi Elif Hatice GÜRKAN**

SAMSUN  
2022

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Berk YAMAN** tarafından, **Dr. Öğretim Üyesi Elif Hatice GÜRKAN** danışmanlığında hazırlanan “**Rijit Poliüretan Köpüğün Termal ve Mekanik Özelliklerine Alev Geciktiricilerin Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 18.2.2022 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Unvanı Adı Soyadı</b> <b>Üniversitesi</b> <b>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı</b>	<b>İmza</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Başkan</b>	Doç. Dr. Özlem DOĞAN AYDENİZ Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Dr. Öğr. Üyesi Elif Hatice GÜRKAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Dr. Öğr. Üyesi İsa DEĞİRMENCİ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı		<input checked="" type="checkbox"/> Kabul <input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY  
... / ... / ...  
Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evett  (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

İmza  
12 / 01 / 2022  
Berk YAMAN

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** Rijit Poliüretan Köpüğün Termal ve Mekanik Özelliklerine Alev Geciktiricilerin Etkilerinin İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 12.01.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 6

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza  
12 / 01 / 2022  
Dr. Öğr. Üyesi Elif H. GÜRKAN

## ÖZET

### RIJİT POLİÜRETAN KÖPÜĞÜN TERMAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ALEV GECİKTİRİCİLERİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Berk YAMAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Ocak/2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif H. GÜRKAN

Poliüretan köpükler inşaattan otomobile, mobilyadan yalıtıma kadar birçok önemli ve geniş kullanım alanına sahip polimerik malzemelerdir. Poliöl ve izosiyanat başta olmak üzere çeşitli katkı maddelerinin bir araya gelmesi ile oluşturulurlar. Poliüretan köpükler, sert köpük, ayakkabı tabanı, terlik ve süngerler başta olmak üzere önemli sektörlerin girdisini oluşturmaktadır. Sert poliüretan köpükler, kapalı hücre yapısına sahip, yüksek oranda çapraz bağlı malzemelerdir. İyi yalıtım ve mekanik özellikleri nedeniyle inşaat, ulaşım, havacılık ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Üstün özelliklerinin yanı sıra, oldukça yanıcı malzemelerdir. Bir kez yanmaya başladıklarında kendiliğinden sönmezler ve köpük yapıları nedeniyle alev yayılma hızları çok yüksektir. Tutuşmayı azaltmak ve tutuşmadan sonra köpüklerden zehirli duman çıkışını engellemek için alev geciktiricilerin kullanılması son derece önemlidir. Bu nedenle, birçok alanda alev geciktiricili sert poliüretan köpüklere olan ilgi giderek artmaktadır. Alev geciktiricilerden iki özelliğe sahip olması beklenmektedir. Birincisi alevin yayılmasını engellemesi, ikincisi ise mekanik özelliklerini düşürmemesi hatta iyileştirmesidir.

Çalışma kapsamında 7 farklı alev geciktiricinin (tris (1-kloro-2 propil) fosfat (TCPP), tris (1,3-dikloro-2-propil) fosfat (TDCP), trietil fosfat (TEP), melamin polifosfat (MP), alüminyum trihidrat (ATH), çinko borat (ÇB) ve grafit (GRFT)) poliüretan köpüğün termal ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda sıvı ve toz yanmazlık ajanlarının birbirlerine göre avantajlarını ve dezavantajlarını literatüre kazandırmak amaçlanmıştır.

Belirtilen 7 farklı alev geciktirici %10 ve %20 oranlarında polimikslere ilave edilmiştir. Hazırlanan PU köpüklerin, morfolojik, mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Reaksiyon profili testi ile köpüğün oluşum süreleri, SEM analizleri ile morfolojisi ve hücre oluşumları, basma dayanımı testi ile mekanik mukavemetleri, TGA, DSC analizleri ile termal özellikleri, ISO 11925-2 küçük alev testleri, UL-94 (Dikey) testleri ile, yanmaya dayanıklılıkları karşılaştırılarak incelenmiştir.

Kullanılan alev geciktiricilerin köpüklerin reaksiyon profilini ve polimikslerin viskozitesini değiştirdiği, mekanik özellikleri iyileştirdiği ve termal özelliklerini olumlu anlamda etkilediği görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Poliüretan, Rijit Poliüretan Köpük, Alev Geciktirici

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FLAME RETARDERS ON THE THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF RIGID POLYURETHANE FOAM

Berk YAMAN

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Chemical Engineering

Master, January/2022

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Elif H. GÜRKAN

Polyurethane foams are polymeric materials that have many important and wide usage areas from civil engineering to the automobile industry, furniture manufacturing to insulation products. The combination of various additives, especially polyol and isocyanate, provides their formation. Polyurethane foams constitute the input of important sectors, especially rigid foam, shoe soles, slippers and flexible foam. Rigid polyurethane foams are highly cross-linked materials with a closed cell structure. Because of good insulation and mechanical properties, they are widely used in construction, transportation, aviation and other fields. They are highly flammable materials as well as superior properties. When it starts to burn, it does not go out by itself and the flame spreads quickly due to its foam structure. It is important to use flame retardants in order to reduce the flame and prevent toxic fume from the foams after the flame. Therefore, there is increasing interest in flame retardant rigid polyurethane foams in many areas. Flame retardants are expected to have two properties. The first is to prevent the flame spreading, and the second is to improve mechanical properties.

Within the scope of the study, the effects of 7 different flame retardant agents (tris (1-chloro-2-propyl) phosphate (TCPP), tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (TDCP), triethyl phosphate (TEP), melamine polyphosphate (MP) ), aluminum trihydrate (ATH), zinc borate (ÇB), graphite (GRFT)) were investigated on the thermal and mechanical properties of polyurethane foam. As a result, it is aimed to bring the advantages and disadvantages of liquid and powder fire retardant agents to the literature.

The specified 7 different flame retardant agents were added to the polymixes at 10% and 20% rates. The morphological, mechanical and thermal properties of the prepared PU foams were investigated. Foam formation times with reaction profile test, morphology and cell formations with SEM analysis, mechanical strength with compression strength test, thermal properties with TGA, DSC analysis, ISO 11925-2 small flame tests, UL-94 (Vertical) tests, resistance to fire analyzed and compared.

It was observed that the flame retardants used changed the reaction profile of the foams and the viscosity of the polymixes, improved the mechanical properties and positively affected the thermal properties.

**Keywords:** Polyurethane, Rigid Polyurethane Foam, Flame Retardant

## ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilgi, birikimi ve tecrübeleri ile yol gösteren, desteğini her zaman hissettiren tez danışmanım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Elif Hatice GÜRKAN'a tüm emekleri için teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımı yürütebilmem için gerekli tüm imkânları sağlayan Flokser Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. Genel Müdür'ü Sayın Ekin TÜKEK'e, deneysel çalışmalarında destekleri olan Sayın Yusuf YİVLİK'e, Esra PİŞKİN'e, Nesrin OĞUZ'a, Mehmet BAŞDAL'a ve Gökhan EKSEN'e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez sürecim boyunca desteklerini esirgemeyen Kimya Yüksek Mühendisi değerli arkadaşım Esra KARAKAYA'ya teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her döneminde desteklerini, sevgilerini hissettiren, ilham veren ve inanan annem Filiz YAMAN'a ve babam Recep YAMAN'a şükranlarımı sunarım.

Berk YAMAN

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI .....	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ .....	13
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ.....	17
2.1. Poliüretan .....	17
2.2. Polimerik Köpükler.....	19
2.3. Poliüretan Köpükler .....	20
2.3.1. Hücre Yapılarına Göre Poliüretan Köpükler.....	21
2.3.1.1. Açık Hücreli Poliüretan Köpükler .....	22
2.3.1.2. Kapalı Hücreli Poliüretan Köpükler .....	23
2.3.2. Poliüretan Köpük Üretiminde Kullanılan Hammaddeler.....	24
2.3.2.1. İzosiyanatlar .....	24
2.3.2.2. Polioller.....	28
2.3.2.3. Zincir Uzaticılar ve Çapraz Bağlayıcılar .....	33
2.3.2.4. Katalizörler .....	35
2.3.2.5. Silikonlar.....	35
2.3.2.6. Şişirme Ajanları .....	36
2.3.2.7. Diğer Yardımcı Maddeler .....	37
2.3.3. Rijit (Sert) Poliüretan Köpükler.....	38

2.4. Yanma.....	39
2.4.1. Gaz Fazı Alev Geciktiriciler.....	40
2.4.2. Endotermik Alev Geciktiriciler.....	40
2.4.3. Kömür Oluşturan Alev Geciktiriciler.....	40
2.4.3.1. Halojenli Alev Geciktiriciler.....	41
2.4.3.2. Fosfor Bazlı Alev Geciktiriciler.....	41
2.4.3.3. Mineral Alev Geciktiriciler.....	42
2.4.3.4. Şişen Alev Geciktiriciler.....	42
2.4.3.5. İnorganik Alev Geciktiriciler.....	43
<b>3. MATERYAL YÖNTEM.....</b>	<b>44</b>
3.1. Kullanılan Hammaddeler.....	44
3.2. Kullanılan Cihaz Ve Ekipmanlar.....	44
3.3. Deneysel Çalışmalar.....	45
3.3.1. Viskozite Analizi.....	45
3.3.2. Reaksiyon Profili Testi ve Poliüretan Köpüklerin Hazırlanması.....	45
3.3.3. Alev Geciktirici Ajanlarının Poliüretan Köpüğün Sentezinde Kullanımı.....	46
3.3.4. SEM Analizi.....	47
3.3.5. Mekanik Dayanım Testi.....	47
3.3.6. Serbest Yoğunluk Analizi.....	48
3.3.7. TGA Analizi.....	48
3.3.8. DSC Analizi.....	49
3.3.9. ISO 11925-2 Küçük Alev Testi.....	49
3.3.10. UL 94 (Dikey) Testi.....	49
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>52</b>
4.1. Viskozite Testi.....	52
4.1.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler.....	52
4.1.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler.....	52
4.2. Reaksiyon Profili Testi.....	53

4.2.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	53
4.2.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	54
4.3. SEM Analizi.....	54
4.3.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	54
4.3.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	56
4.4. Mekanik Dayanım Testi.....	57
4.4.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	57
4.4.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	57
4.5. Serbest Yoğunluk Testi.....	58
4.5.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	58
4.5.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	59
4.6. TGA Analizi.....	61
4.6.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	61
4.6.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	62
4.7. DSC Analizi .....	64
4.7.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	64
4.7.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	66
4.8. Küçük Alev Testi .....	68
4.8.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	68
4.8.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	69
4.9. UL-94 (Dikey) Testi .....	70
4.9.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	70
4.9.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler .....	71
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>73</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>75</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>µm</b>	: Mikrometre
<b>ATH</b>	: Alüminyum Trihidrat
<b>cP</b>	: Centipoise
<b>ÇB</b>	: Çinko Borat
<b>d</b>	: Yoğunluk
<b>dk</b>	: Dakika
<b>DSC</b>	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Cihazı
<b>f</b>	: Fonksiyonalite
<b>GRFT</b>	: Grafit
<b>kg</b>	: Kilogram
<b>kPa</b>	: Kilopaskal
<b>m</b>	: Ağırlık
<b>m<sup>3</sup></b>	: Metreküp
<b>MP</b>	: Melamin Polifosfat
<b>PCL</b>	: Polikaprolakton Poliöl
<b>PMDI</b>	: Polimerik Metilen Difenil Diizosiyanat
<b>PU</b>	: Poliüretan
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TCPP</b>	: Tris (1-Kloro-2 Propil) Fosfat
<b>TDCP</b>	: Tris (1,3-Dikloro-2-Propil) Fosfat
<b>TEP</b>	: Trietil Fosfat
<b>TGA</b>	: Termogravimetrik Analiz

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Poliüretanların kullanım alanları.....	13
Şekil 1.2. Poliüretan eldesi.....	14
Şekil 1.3. Küresel son kullanıcı endüstrisine göre 2020 % poliüretan pazar geliri .....	15
Şekil 1.4. Ülkelere göre 2021-2026 yılları öngörülen poliüretan pazarı .....	15
Şekil 2.1. Poliüretan oluşumu. ....	17
Şekil 2.2. PU yapı blokları .....	17
Şekil 2.3. Poliüretan sistemlerinde bulunan grupların H bağı ile bağlanma yapıları.....	18
Şekil 2.4. PU'larda yapı özellik ilişkisi .....	18
Şekil 2.5. Reaksiyon profili testi şematik gösterimi .....	21
Şekil 2.6. Açık ve kapalı hücreli köpük görüntüsü .....	22
Şekil 2.7. Esnek poliüretan köpüklerin hücre yapısı .....	23
Şekil 2.8. Sert poliüretan köpüklerin hücre yapısı.....	23
Şekil 2.9. Ticari olarak önemli izosiyanatların örnekleri .....	25
Şekil 2.10. Polieter polioliol başlangıç molekülleri.....	30
Şekil 2.11. Poliester polioliol üretiminde yaygın olarak kullanılan dikarboksilik asitler .....	31
Şekil 2.12. Poliester polioliol üretiminde yaygın olarak kullanılan glikoller .....	32
Şekil 2.13. Poliüretan köpüğün oluşum mekanizması.....	37
Şekil 2.14. Eşdeğer ısı yalıtım sağlayan malzeme kalınlıkları .....	38
Şekil 2.15. Kömür oluşturan alev geciktiriler .....	41
Şekil 2.16. Şişen alev geciktiricilerin çalışma şeklinin şematize gösterimi .....	43
Şekil 3.1. Reaksiyon profili testinde kullanılan Black&Decker marka mekanik karıştırıcı. ....	45
Şekil 3.2. Hazırlanan PU köpükler. ....	47
Şekil 3.3. Instron cihazı.....	48
Şekil 3.4. ISO 11925-2 küçük alev testinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 3.5. UL-94 (Dikey) testi şematik gösterimi.....	50
Şekil 3.6. UL-94 test kabini. ....	51
Şekil 4.1. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.2. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.3. Mekanik dayanım ve serbest yoğunluk sonuçları grafiği.....	60

Şekil 4.4. Mekanik dayanım ve serbest yoğunluk arasındaki ilişki.....	61
Şekil 4.5. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.....	62
Şekil 4.6. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.....	63
Şekil 4.7. Standart ve alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.....	64
Şekil 4.8. Alev geciktirici ajan içermeyen rijit poliüretan köpüğün DSC grafiği.....	65
Şekil 4.9. Sıvı alev geciktirici ajan içeren rijit poliüretan köpüklerin DSC grafiği.....	66
Şekil 4.10. Toz alev geciktirici ajan içeren rijit poliüretan köpüklerin DSC grafiği.....	67
Şekil 4.11. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin küçük alev testi sonuçları.....	68
Şekil 4.12. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin küçük alev testi sonuçları.....	69



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. PU köpüklerin oluşum yöntemleri .....	21
Tablo 2.2. Poliöl özelliklerinin karşılaştırılması .....	29
Tablo 2.3. Yaygın kullanılan bazı çapraz bağlayıcılar ve yapıları .....	34
Tablo 2.4. Yaygın kullanılan bazı zincir uzatıcılar ve yapıları.....	34
Tablo 3.1. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar.....	44
Tablo 3.2. PU köpük üretiminde kullanılan hammaddeler ve oranları.....	46
Tablo 3.3. UL-94 (Dikey) testi sınıflandıma kriterleri.....	50
Tablo 4.1. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan polimikslerin viskozite sonuçları.....	52
Tablo 4.2. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan polimikslerin viskozite sonuçları.....	53
Tablo 4.3. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin reaksiyon profili testi sonuçları.....	54
Tablo 4.4. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin reaksiyon profili testi sonuçları.....	54
Tablo 4.5. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.....	57
Tablo 4.6. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.....	58
Tablo 4.7. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.....	58
Tablo 4.8. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.....	59
Tablo 4.9. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.....	59
Tablo 4.10. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.....	60
Tablo 4.11. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.....	62
Tablo 4.12. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.....	63
Tablo 4.13. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.....	64
Tablo 4.14. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin DSC sonuçları.....	65
Tablo 4.15. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin DSC sonuçları.....	68
Tablo 4.16. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin UL-94 (Dikey) testi sonuçları.....	71
Tablo 4.17. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin UL-94 (Dikey) testi sonuçları.....	72

# 1. GİRİŞ

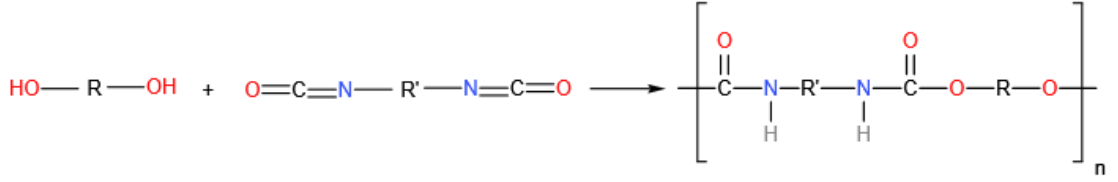
Polimer, çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiktir (Singh ve Dubey, 2009). Polimerler, pek çok alanda yaşamımızın temel ihtiyaçlarını karşılayan, hayatımızda önemli bir yer tutan malzemelerdir ve birçok endüstriyel alanda çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Güler, 2017). Polimerik malzemeler, düşük maliyeti, kolay işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği ile 20. yüzyılın başlarından itibaren günlük hayatta birçok uygulamada sayısız malzeme üretmek için kullanılmaktadır.

Polimer endüstrisinin en dinamik ürün gruplarından biri poliüretanlardır. Poliüretan, dünyada geniş uygulama alanlarına sahip, insanların yaşam kalitesini arttıran, Ar-Ge çalışmaları ile geliştirilmeye açık önemli bir endüstridir (Lonescu, 2005).



Şekil 1.1. Poliüretanların kullanım alanları (Poliüretan, 2020).

Poliüretanlar, yapısında üretan grubunu içeren organik polimerlerdir. Bir diolün bir diizosiyanat ile reaksiyonuyla üretilirler. Reaksiyona, son kullanıma bağlı olarak katalizörler, şişirme ajanları, silikonlar, çapraz bağlayıcılar, alev geciktiriciler ve birçok katkı maddeleri eklenerek istenilen ürünlerin özellikleri sağlanabilir (Lonescu, 2005; Yıldız, 2016).

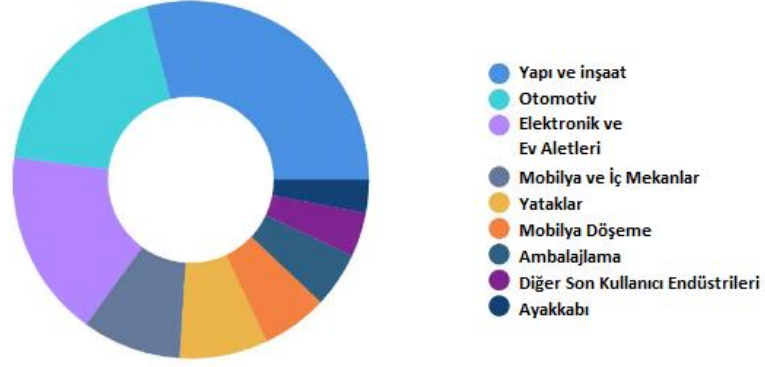


Şekil 1.2. Poliüretan eldesi (Hamidov, 2020).

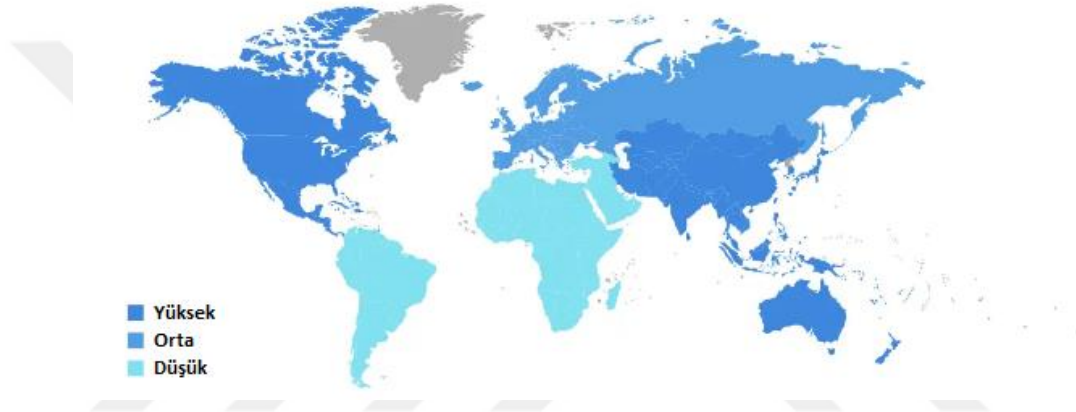
Poliüretan (PU) ilk olarak 1937 yılında Almanya’da Otto Bayer ve I.G. Farbenindustrie'deki çalışma arkadaşları tarafından keşfedilmiştir. İlk çalışmada, poliüre elde edebilmek için alifatik izosiyanatın bir diamin ile reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı özelliklere sahip yeni malzemeler üretmek için yapılan araştırmalar sonucunda bir glikolün bir alifatik izosiyanat ile reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Poliüretanların endüstriyel ölçekte üretimi ise 1940'ta başlamıştır. Poliizosiyanatın ticari olarak temin edilebilir hale geldiği 1952 yılında poliüretanların elastomerik özelliklerinde gözle görülür bir gelişme elde edilmiştir. 1952–1954 yılları arasında Bayer, farklı polyester-poliizosiyanat sistemini geliştirmiştir. 1958'de BF Goodrich'ten Schollenberger, çapraz bağlı termoplastik poliüretan elastomeri tanıtmıştır. Aynı tarihlerde, Dupont, politetrametilen glikol (PTMG), 4,4-difenilmetilen diizosiyanat (MDI) ve etilen diamine dayalı bir poliüretan olan Lycra veya Spandex ticari adları ile bilinen elyafı piyasaya sürmüştür. Formülasyonlar ve işleme teknikleri ile bir ve iki bileşenli sistemler ile geliştirmeler sürekli olarak devam etmiştir.

Poliüretanların geniş uygulama alanları, çeşitli dioller ve diizosiyanatlar seçimindeki işlevselliğinden kaynaklanmaktadır (Yıldız, 2016). Poliüretanların en büyük uygulama alanı çeşitli ev, ticari ve endüstriyel uygulamaların kullanıldığı yapı ve inşaat sektörüdür. Mükemmel mukavemet-ağırlık oranı, yalıtım özellikleri, dayanıklılığı ve çok yönlülüğü nedeniyle poliüretan, bina ve inşaat uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yapı ve inşaat sektörü, enerji verimliliği, yüksek performansı, çok yönlülüğü, termal/mekanik performansı ve çevre dostu yapısı ile rijit ve sprey poliüretan köpük için açık ara en büyük tüketicidir.

Küresel son kullanıcı endüstrisine göre 2020 yılı % PU Pazar geliri Şekil 1.3'te, ülkelere göre 2021-2026 yılları öngörülen poliüretan pazarı Şekil 1.4'te verilmiştir. (Intelligence, 2021).



Şekil 1.3. Küresel son kullanıcı endüstrisine göre 2020 % poliüretan pazar geliri (Intelligence, 2021).



Şekil 1.4. Ülkelere göre 2021-2026 yılları öngörülen poliüretan pazarı (Intelligence, 2021).

Bununla birlikte, rijit poliüretan köpüklerin yalıtım malzemesi olarak uygulamasının karşı karşıya olduğu önemli bir sorun, kabul edilemez bir yanıcılık düzeyidir. Rijit poliüretan köpükten kaynaklanan bina yangınlarının sayısı giderek artmaktadır. Bu da büyük can kayıplarına ve ekonomik risklere neden olmaktadır (Liu vd, 2017b). Bu nedenle, yanma sırasında rijit poliüretan köpük malzemesinin yanıcılığını sınırlayabilen alev geciktirici bir sistemin keşfedilmesine olan ilgi artmıştır (Liu vd, 2017a).

Bu çalışmada, rijit (sert) poliüretan köpüklere %10 ve %20 oranlarda 7 farklı alev geciktirici ajanı (tris (1-kloro-2 propil) fosfat (TCPP), tris (1,3-dikloro-2-propil) fosfat (TDCP), trietil fosfat (TEP), melamin polifosfat (MP), alüminyum trihidrat (ATH), çinko borat (ÇB) ve grafit (GRFT)) ilave edilerek köpüklerin alev geciktirici özelliklerinin iyileştirilmesi, sıvı ve polimikslerin içerisinde faz ayrımı yaratan, polimiks üretiminde zorluk yaşanan ve uygulayıcı proseslerini zorlayan toz alev geciktirici ajanlarının mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Literatüre

kazandırılması bu tezin amaçlarını oluşturmaktadır. Reaksiyon profili testi ile köpüğün oluşum süreleri, SEM analizleri ile morfolojisi ve hücre oluşumları, basma dayanımı testi ile mekanik mukavemetleri, TGA, DSC analizleri ile termal zellikleri, ISO 11925-2 küçük alev testleri, UL-94 (Dikey) testleri ile, yanmaya dayanıklılıkları karşılaştırılarak incelenmiştir.



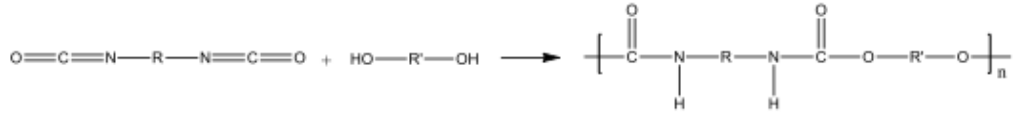
## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Poliüretan

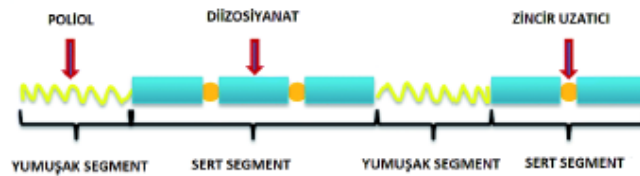
Poliüretanlar (PU) çok yönlü kullanılabilen polimerlerdendir. Uygun maliyetli ve güven veren malzemeler olan poliüretanlar, günlük hayatımızı kolaylaştırmak ve kalitesini arttırmak için birçok alanda kullanılmaktadır (Yerleşti, 2017). Sert, yarı esnek, esnek poliüretan köpükler, elastomerler, yapıştırıcılar, yapı malzemeleri, suni deri kaplama gibi birçok uygulamalarda kullanılırlar.

PU'lar polimer zincirinde üretan bağları (-NHCOO-) içerir (Yang vd, 2011). İki veya daha fazla reaktif hidroksil grubuna (dioller veya polioller) sahip alkollerin iki ya da daha fazla reaktif izosiyanat grubuna (poliizosiyanat veya diizosiyanat) sahip izosiyanatlar ile tepkimesi sonucunda oluşan polimerlerdir (Oğuz, 2018).

PU'ların yapısına bakıldığında blok kopolimer zincirleri şeklinde yumuşak ve sert segmentlerin ard arda dizildiği görülmektedir. PU'lar Şekil 2.2'de görüldüğü gibi genellikle üç yapı bloğundan oluşmaktadır. Poliester, polieter moleküllerinin diolleri, triolleri veya tetraolleri yumuşak segmenti temsil eder. Buradaki yapılar, bir diğer yapı bloğu diizosiyanatların kombinasyonu ile elde edilen sert bölümlere esneklik katar. Görülen son segment ise zincir uzatıcıdır ve büyük zincirleri birbirine bağlayarak çapraz bağlayıcı görevi görürler. PU köpükte bulunan yapı bloklarının oranları farklılaştırılarak köpüğe mekanik, kimyasal, sertlik veya yumuşaklık olarak istenilen özellikler kazandırılabilir. Poliüretanlar termal stabiliteyi yüksek polimerlerdir ve termal bozunma kopolimer yapısından dolayı heterojen süreçtir (Altıntaş, 2012; Hamidov, 2020).

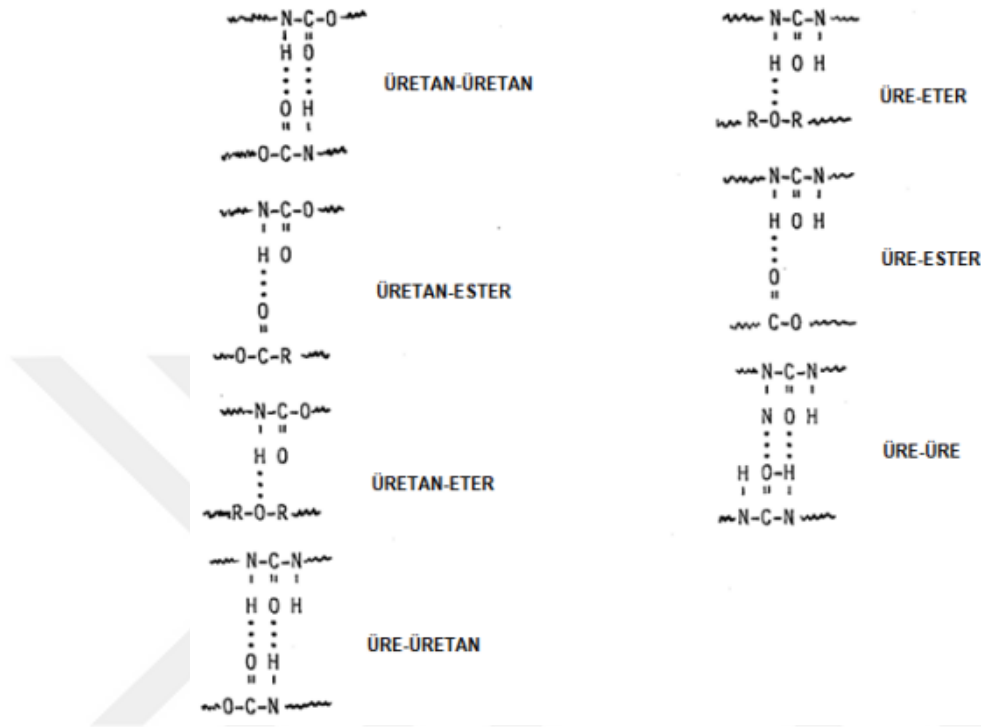


Şekil 2.1. Poliüretan oluşumu (Yivlik, 2016).



Şekil 2.2. PU yapı blokları (Altıntaş, 2012).

Poliüretanların zincir yapılarında tekrar eden üretan, üre, ester, eter, alifatik ve aromatik gruplar vardır. Bu yapılar hidrojen ve kovalent bağlar ile hetero bloklar olarak dizilmiştir ve yumuşak, sert segmentlerde etkilerini göstermektedirler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Poliüretan sistemlerinde bulunan grupların H bağı ile bağlanma yapıları (Hamidov, 2020).



Şekil 2.4. PU'larda yapı özellik ilişkisi (Sarper, 2019).

## 2.2. Polimerik Köpükler

Polimerik köpükler içerisinde hava veya gaz bulunan gözenekler, hücreler olarak tanımlanabilir (Lee vd, 2005; Oğuz, 2018; Saçak, 2005). Köpükler, en az iki faz sayesinde oluşumunu tamamlar. Birincisi katı polimerik matris, ikincisi köpük oluşumunu sağlayan gaz fazıdır (Oğuz, 2018; Yetgin ve Ünal, 2008).

Polimerik köpükteki gözenekli ve boşluklu yapı, malzemenin yoğunluğu azaltır ve buna bağlı olarak fiyatını da önemli ölçüde düşürür. Köpüklerin kullanım alanlarına göre gözeneklerin daha kapalı veya daha açık olması formüle edilebilir ve üretimleri sağlanır. Kapalı veya açık hücreli özellikleri nedeniyle ilk üretimlerinin başladığı 1940 yılından bu yana kullanım alanlarında hızlı bir artış görülmüştür.

Polimerik malzemelerin avantajları;

- Ağırlıklarının daha düşük olması,
- Isının ve sesin yalıtılabilmesi,
- Birim kütledeki dayanımları,
- Farklı yöntemlerle hazırlanabilir olmaları,
- Darbe karşısındaki dayanımları,
- Kalıplamadaki maliyet avantajıdır.

En yaygın kullanılan polimerler; poliüretan ve polistirendir. Üretim kapasitesinin %80'ini oluştururlar. Üretim prosesi, fiziksel ve mekanik özellikleri, maliyet avantajları sayesinde poliüretanlar daha fazla tercih edilmektedir (Oğuz, 2018; Saçak, 2005).

Polimerik köpük üretiminde polimer içerisinde kalan veya kaçan gaz kabarcığı, oyuntu ya da boşlukları oluşturarak gözenekli yapıyı elde etmemizi sağlar. Polimerik köpük endüstrisinde 20. yüzyılın ilk yarısında önemli gelişmeler olmuştur. Malzemelerin hem termoplastik hem de termoset üretilebilirliği polimerik köpük endüstrisine katkı sağlamıştır (Lee vd, 2007).

Termoplastik köpükler, mekanik dayanımı yüksek, aşınmalara karşı dirençli, yüksek uzama ve çekme dayanımına sahip, genellikle üretimi yapılan köpüğün erime sıcaklığında eriyen polimerlerdir. Poli (vinil klorür), polistiren, polipropililen ve polietilen termoplastik köpük üretiminde kullanılan polimerlere örnek olarak gösterilebilir.

Termoset köpükler, yoğun çapraz bağ içeren, mekanik özellikleri yüksek, ısı ile eritilemeyen ve yeniden şekillendirilemeyen polimerlerdir. Poliüretanlar başta olmak üzere, fenol formaldehit, üre formaldehit ve epoksi termoset köpük üretiminde kullanılan polimerlere örnek olarak gösterilebilir (Oğuz, 2018; Saçak, 1998).

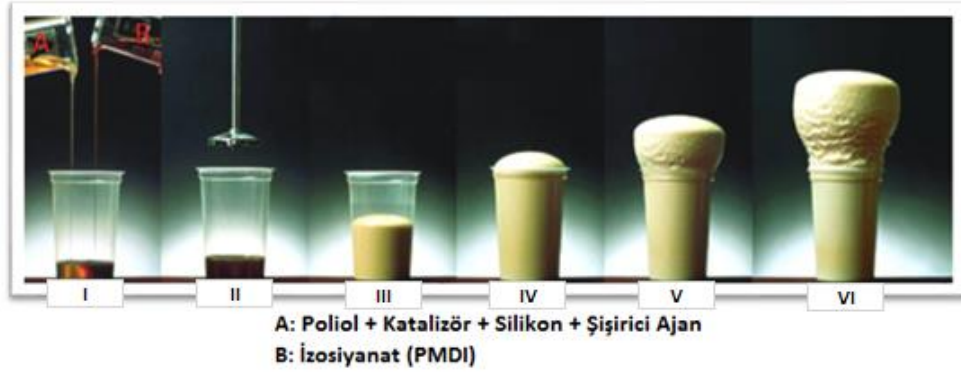
### **2.3. Poliüretan Köpükler**

PU köpükler sandviç paneller, soğuk oda panelleri, sprey uygulamaları, boru izolasyonları, tahta muadilleri, ayakkabı tabanları, terlikler, koltuklar, yataklar, yastıklar, direksiyon simitleri gibi pek çok alana hitap etmektedirler (Kong vd, 2013; Özveren, 2015; Tu vd, 2007).

PU köpüklerin oluşumu fiziksel olarak dört adımda gerçekleşmektedir. Birinci adım; poliollerin, katalizörlerin, silikonların, alev geciktirici ajanların, şişirici ajanların ve diğer katkı maddelerinin bir kaptaki karıştırılması ve polimiks sıvısının elde edilmesidir. İkinci adım; polimiks ve izosiyanatın bir karıştırıcı yardımı ile karıştırılarak tepkimeye girmesidir. Üçüncü adım; köpüğün oluşumu esnasında kremleşme, iplikleşme ve dokunma sürelerinin ölçülmesidir. Son adım ise oluşan köpüğün basılmış olduğu kalıptan çıkarılmasını ifade etmektedir. Şekil 2.5'te reaksiyon profili testinin şematik gösterimi verilmiştir. Köpüğün yüksekliğinin artmaya başladığı ilk anın süresi kremleşme (şişme) zamanı olarak kaydedilir ve II-III numaralı adım arasında gerçekleşir.

III, IV ve V numaralı adımlarda bir çubuk ile köpüğe dokunulur ve çubuk geri çekilir. Bu işlem çubuğu geri çekerken görülecek örümcek ağı görünümü elde edilene kadar devam eder ve görüntü görüldüğünde iplikleşme (jelleşme) zamanı olarak kaydedilir.

VI numaralı adımda ise köpüğe parmak ile dokunulur ve köpüğün ele yapışmadığı ilk süre dokunma zamanı olarak kaydedilir.



Şekil 2.5. Reaksiyon profili testi şematik gösterimi (Akdoğan, 2018).

PU köpüklerin oluşumu Tablo 2.1’de ifade edilen yöntemler ile gerçekleştirilir.

Tablo 2.1. PU köpüklerin oluşum yöntemleri (Hamidov, 2020).

### 1. Tek Adımlı Sistem (one-shot)

İzosiyanat	→	A Bileşeni		→	Karıştırma	→	Köpük
Poliöl		Ön Karışım	B Bileşeni				
Silikon							
Katalizör		C Bileşeni					
Yanmazlık Ajanı							
Şişirme Ajanı							

### 2. Yarı-prepolimer Sistem

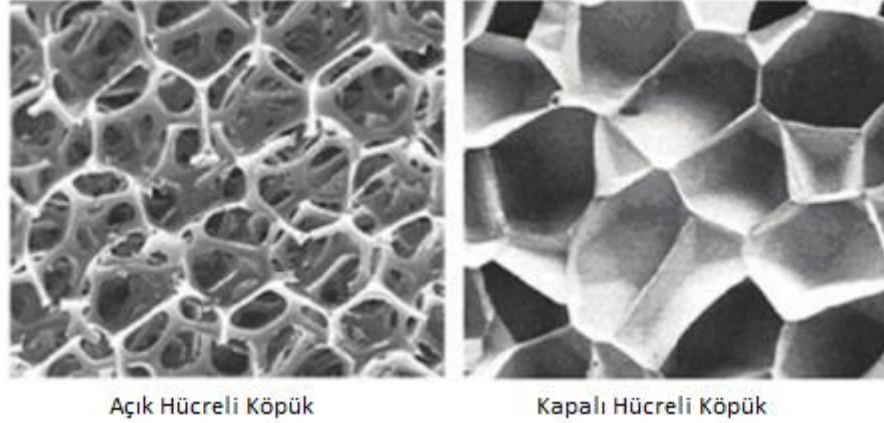
İzosiyanat	→	Yarı-prepolimer (A Bileşeni)		→	Karıştırma	→	Köpük
Poliöl							
Poliöl	→	Ön Karışım	B Bileşeni	→	Karıştırma	→	Köpük
Silikon							
Katalizör							
Yanmazlık Ajanı							
Şişirme Ajanı							

### 3. Tam-prepolimer Sistem

İzosiyanat	→	Yarı-prepolimer (A Bileşeni)		→	Karıştırma	→	Köpük
Poliöl							
Silikon	→	Ön Karışım	B Bileşeni	→	Karıştırma	→	Köpük
Katalizör							
Yanmazlık Ajanı							
Şişirme Ajanı							

#### 2.3.1. Hücre Yapılarına Göre Poliüretan Köpükler

Poliüretan köpükler, hücre yapıları göz önüne alındığında açık ve kapalı hücreli köpükler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Poliüretan köpük üretiminde kullanılacak hammaddeler ile geliştirilecek formülasyonlar sayesinde açık veya kapalı hücreli köpük yapısı elde edilebilir. Şekil 2.6’da açık ve kapalı hücreli köpük görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Açık ve kapalı hücreli köpük görüntüsü (Oğuz, 2018).

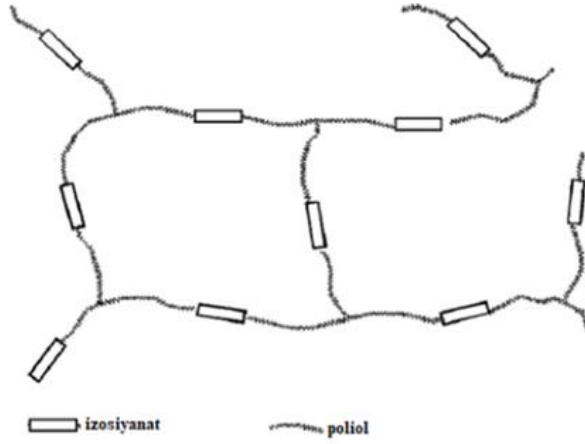
Açık ve kapalı hücreli poliüretan köpükler aynı zamanda hücre yapısı olarak sert, esnek ve yarı esnek köpükler olarak da sınıflandırılabilirler.

#### **2.3.1.1. Açık Hücreli Poliüretan Köpükler**

Açık hücreli poliüretan köpüklerde hücreler birbirlerine uyumlu kanallar ile bağlıdır. Belirtilen kanallar yardımıyla gözeneklerin içinde bulunan sıvı ve gazlar bir gözenekten diğer gözeneğe geçebilir ve köpük ortamında yol alabilirler. Açık hücreli PU köpükler genellikle süngerler olarak isimlendirilir. Su ile temas ettiklerinde; yapıdaki açık gözenekler su ile dolar (Saçak, 2005).

Açık hücreye sahip köpükler, kapalı hücreye sahip köpüklere göre daha yüksek emme kapasitesine ve daha yüksek ses absorblama meziyetine sahiptir. Ancak açık kanal yapısı, köpükteki ısı yalıtım özelliğini azaltmaktadır (Shen, 2006).

**Esnek poliüretan köpükler**, düşük fonksiyonlitesi, yüksek molekül kütleli poliollerin diizosiyanatlar ile reaksiyonu sonucu oluşan çapraz bağlı olmayan, esneyebilen, önceki şeklini kolayca alabilen, açık hücreli ve yumuşak yapılardır. Otomotiv sektöründe, mobilya ürünlerinde, yastıkların ve yatakların üretimlerinde esnek köpükler kullanılmaktadır (Jimenez vd, 2013). Esnek poliüretan köpüklerin hücre yapısı Şekil 2.7’de verilmiştir.

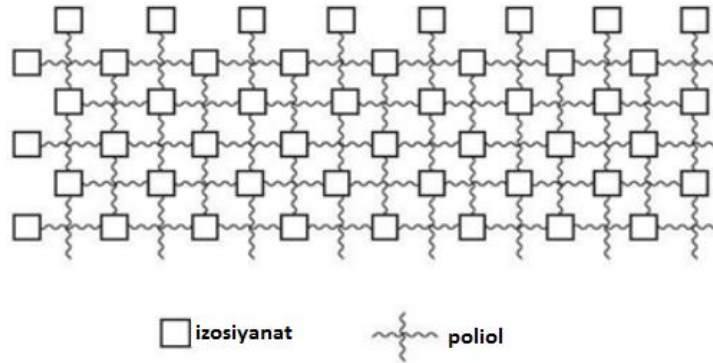


Şekil 2.7. Esnek poliüretan köpüklerin hücre yapısı (Hamidov, 2020).

### 2.3.1.2. Kapalı Hücreli Poliüretan Köpükler

Kapalı hücreli poliüretan köpüklerde polimer içinde küçük boşluklar bulunur. Bu boşluklar polimer matrisi ile sarılmıştır ve tüm hücreler komşu hücrelerden bağımsızdır. Kapalı hücredeki çeperlerden geçen gaz molekülleri yayılarak köpük içinde hareket edebilir. Gaz moleküllerinin geçemediği hücre çeperlerine sahip köpüklerde, hücreleri dolduran gaz gözenekler arasında yer değiştiremez. Bu duruma sahip köpüklerde termal yalıtkanlık daha üstündür.

**Sert poliüretan köpükler**, yüksek fonksiyonalteli, düşük molekül kütleli poliollerin diizosiyanatlar ile reaksiyonu sonucu oluşan çapraz bağlı, hücre yapısının %90-92'si kapalı, sert yapılardır. Çatılarda, soğuk oda panellerinde, sandviç panellerde, borularda yalıtım amacıyla kullanılmaktadır. Sert poliüretan köpüklerin hücre yapısı Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Sert poliüretan köpüklerin hücre yapısı (Ülker, 2019).

*Yarı esnek poliüretan köpükler*, esnek ve sert köpüklerin özelliklerini barındıran ancak farklı performans gösteren yapılardır. Genellikle ses, titreşim ve izolasyon ihtiyacı olan alanlarda kullanılırlar. Kullanım alanları direksiyon simitleri, koltuk kolçakları, ve hastane koltukları olarak gösterilebilmektedir (Hamidov, 2020).

### **2.3.2. Poliüretan Köpük Üretiminde Kullanılan Hammaddeler**

PU köpüklerin özellikleri; kimyasal yapısına ve üretiminde kullanılan bileşenlere bağlıdır. Köpüğün yapısını istenildiği gibi sentezlemek için, yapıyı moleküler düzeyde planlamak gerekmektedir. PU köpük oluşumunda kullanılan bileşenler, izosiyanatlar, polioller, katalizörler, şişirici ajanlar, silikonlar ve alev geciktirici ajanlar olarak sınıflandırılır (Sarper, 2019; Sonnenschein, 2015).

#### **2.3.2.1. İzosiyanatlar**

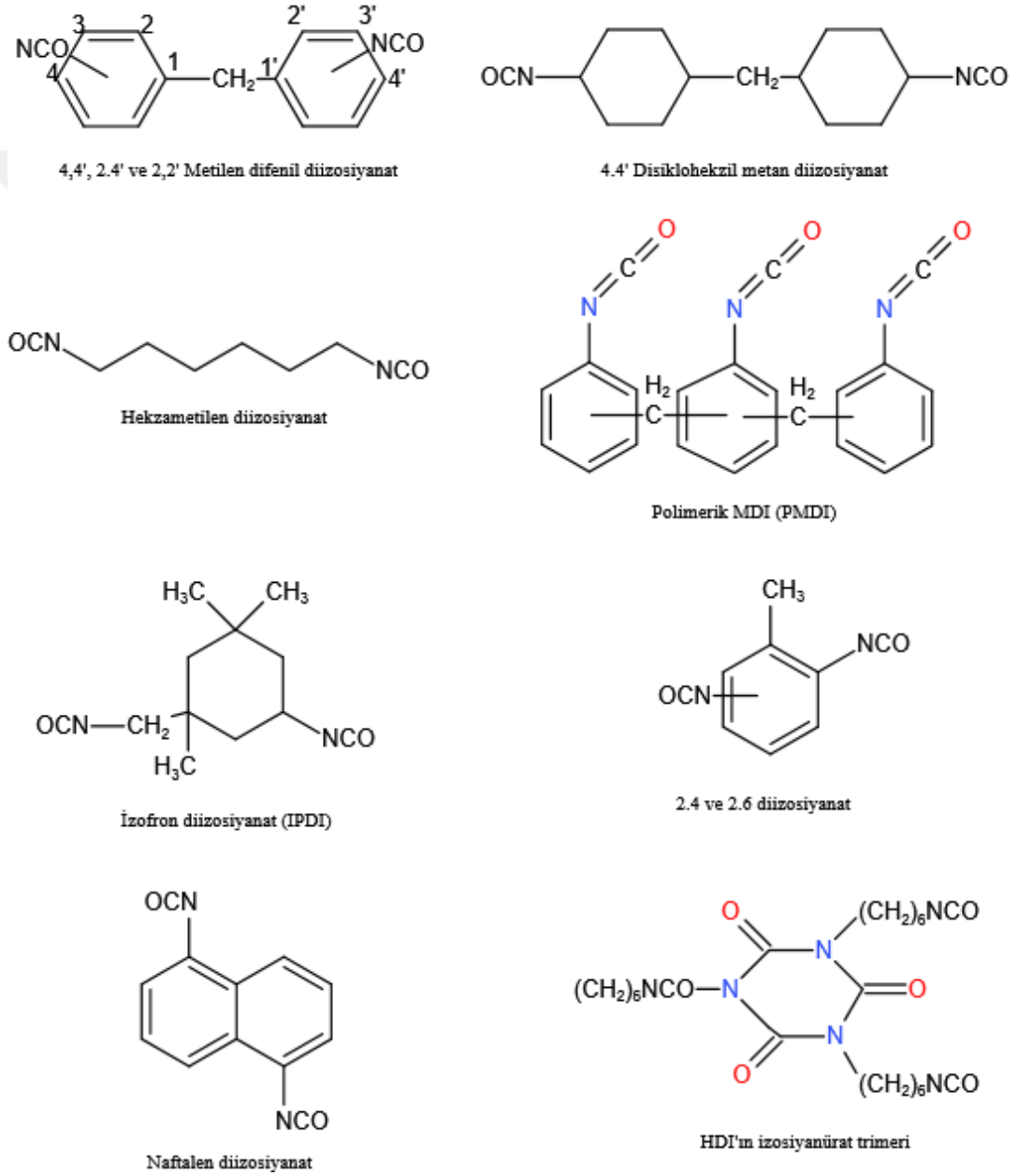
İzosiyanatlar, poliüretan köpük sentezinde anahtar monomerlerden bir tanesidir. Çoklu izosiyanat reaksiyonları, yüksek reaktivite ve yapıda bulunan çift bağların polarize olması sebebiyle mümkün olmaktadır (Petrovic vd, 2014; Ülker, 2019).

Poliüretanların sentezinde kullanılan izosiyanatlar, yapısında iki ya da daha fazla -NCO grubu barındırmaktadır ve bileşiğin ne kadar reaktif olduğunu uç gruptaki iki adet çifte bağ göstermektedir. İzosiyanat yapısındaki karbon artı yüklenebilirken, azot, oksijen ve alkil gruplarından biri de eksi yüklenebilmektedir, yani delokalizasyon olayı gerçekleşmektedir (Hamidov, 2020).

İzosiyanatları sınıflandırmanın birkaç yolu vardır. Metilen difenil diizosiyanat (MDI), polimerik metilen difenil diizosiyanat (PMDI) ve toluen diizosiyanat (TDI), dünya çapında üretilen en büyük izosiyanat hacmini oluşturmaktadır. Bu bileşiklerin iki önemli özelliği bulunur. Birincisi, aromatik yapıda olmalarıdır ve onları temel alan malzemelerin ultraviyole (UV) radyasyonu emmesine neden olur, bu da atmosferik oksijen ve su varlığında çok sayıda oksidatif yan reaksiyonu tetikler. Bu oksidasyon reaksiyonları, poliüretanların sararmasına neden olur. Poliüretanların sararması çoğu uygulamada istenmeyen bir durumdur, ancak boyutu aşırı olmadığı sürece fiziksel özellikleri etkilemez. Bazı uygulamalarda ışığa karşı bu hassasiyet çok önemlidir ve sadece renk bozulmasına değil, aynı zamanda yüzey parlaklığının kaybolmasına, çatlamasına ve diğer birçok soruna da neden olabilir. Ayrıca, UV radyasyonu malzeme kalınlığının daha büyük bir yüzdesine nüfuz edebilir ve yalnızca yüzeyi değil, malzemenin yığın özelliklerini de etkileyerek gevrekleşmeye, çatlamaya ve soyulmaya

neden olabilir. Alifatik üreanlar, aromatik formülasyonlara göre ışığa daha az duyarlıdır. Ancak, UV kaynaklı bozulmaya karşı hassastır ve kapsamlı bir şekilde test edilmelidir.

İzosiyanatların kimyasal etkilerinin bilinmesi önemlidir. Poliollerin ve izosiyanatların oranı kısmi olarak ürünün hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerini belirleyecektir. Genel bir kural olarak izosiyanatlar, polimere sertlik kazandıran bileşenlerdir (Yıldız, 2016). Farklı izosiyanat türleri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.

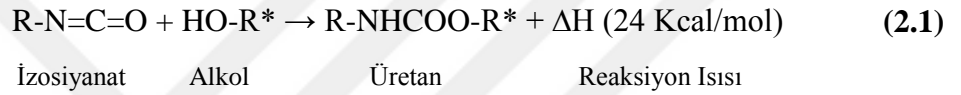


Şekil 2.9. Ticari olarak önemli izosiyanatların örnekleri (Yıldız, 2016).

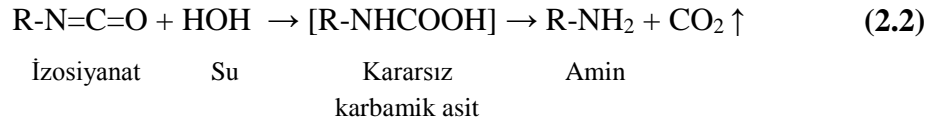
İzosiyanatlar elverişli koşullarda aktif hidrojen atomu içeren bileşiklere karşı reaktiftir. Su, amin ve alkoller gibi -OH ve -NH gruplarından oluşan bileşikler bu kategoriye girmektedir (Ülker, 2019).

Poliüretan üretimi sırasında birincil ve ikincil tepkimeler gerçekleşmektedir. Alkol, su ve aminlerin izosiyanatlar ile gerçekleştirdiği reaksiyonlar birincil reaksiyonlar, üretan, üre, dimerizasyon ve trimerizasyon reaksiyonları ise ikincil reaksiyonlar olarak adlandırılır (Hamidov, 2020).

Poliüretanların sentezindeki en önemli reaksiyon; izosiyanatların alkoller ile gerçekleştirdiği ekzotermik olan ve üretanı oluşturan reaksiyondur (Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).



İzosiyanatların su ile gerçekleştirdiği reaksiyon sonucunda CO<sub>2</sub> gazı ve üre grupları oluşmaktadır. PU köpüklerdeki hücre yapılarını oluşturabilmek için gereken şişirici ajanı sağlamak için uygun tepkimelerdir (Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).



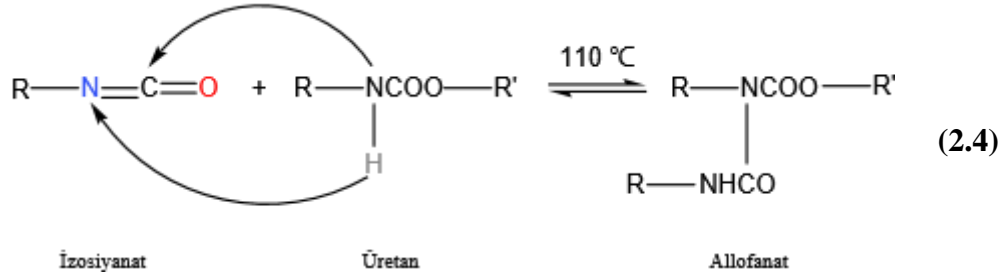
Denklem 2.3'te ise oluşmuş olan amin bileşiğinin diğer izosiyanat molekülleri ile tepkimeye girdiğini ve üre yapısını oluşturduğunu göstermektedir.



Poliüretan köpük üretiminde su, kimyasal bir şişirme ajanı olarak kabul edilir, çünkü gaz oluşumu bir kimyasal reaksiyonun bir sonucudur. İzosiyanatlar ve alkoller veya su arasındaki reaksiyon, düşük sterik engeli olan üçüncül aminler ve bazı kalay, kurşun veya cıva bileşikleri tarafından katalize edilir (Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).

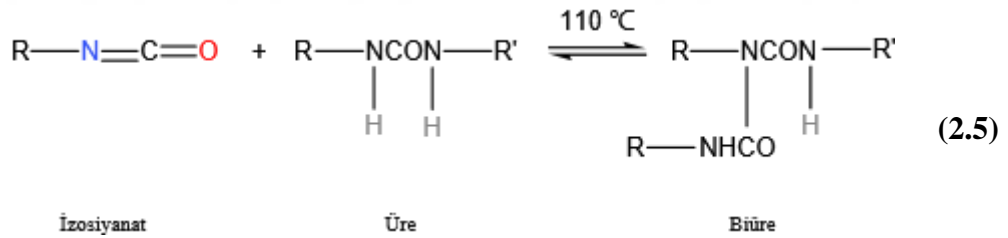
İzosiyanatların, üretan ile gerçekleştirdiği reaksiyonda, üretan grupları nitrojen atomuna bağlı hidrojen atomu nedeniyle aktif hidrojen içeren bileşikler olarak kabul

edilebilir. Bir izosiyanatın bir üretan grubu ile reaksiyonu ile allofanat oluşur (Denklem 2.4).



Üretan gruplarının reaktivitesi, karbonil grupların elektron çekici etkisiyle birlikte amin gruplarına göre daha düşüktür. Allofanat oluşumunu teşvik etmek için ise 110 °C ve üzeri bir sıcaklık gerekmektedir. Ek olarak, allofanat oluşumunun tersine çevrilebilir bir reaksiyon olduğunu belirtmek önemlidir (Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).

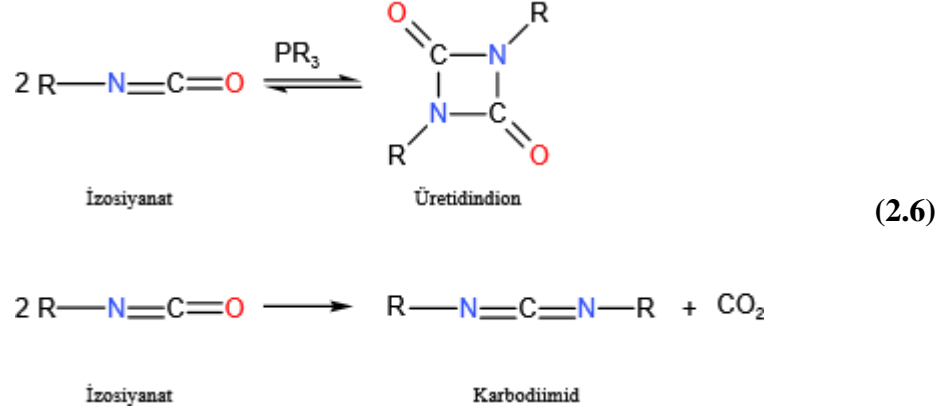
İzosiyanatların üre ile gerçekleştirdiği reaksiyonunda, allofanat oluşumuna benzer şekilde, ürenin -N-H grupları, bir biüre oluşturmak için izosiyanatlarla reaksiyona girer (Denklem 2.5).



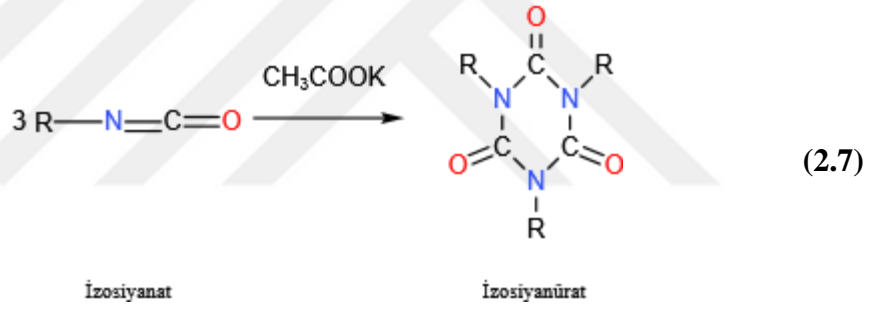
Üre ve izosiyanatlar arasındaki reaksiyon bir denge reaksiyonudur ve daha yüksek sıcaklıklara da ihtiyaç duyar (>110 °C). PU kimyasında, özellikle fazla miktarda izosiyanat kullanıldığında, allofanatların ve biüretlerin oluşumu, aslında çapraz bağlamanın tamamlayıcı bir kaynağıdır (Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).

İzosiyanatların diğer reaksiyonları ise kendi aralarında gerçekleşebilmektedir (Yaylacı, 2008).

İki tip dimerizasyon reaksiyonu verir: Üretidindion ve karbodiimid olmak üzere iki tip dimerizasyon reaksiyonu gerçekleşir (Lonescu, 2005; Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962). İki reaksiyon da Denklem 2.6'da gösterilmiştir.



İzosiyanatların trimerizasyonu, özel katalizörlerin (potasyum asetat, tris [dimetilaminometil] fenol vd) varlığında -NCO gruplarının aralarında gerçekleşen bir reaksiyondur. Reaksiyon, aşırı izosiyanatların mevcudiyetinde izosiyanürik ve üretan-izosiyanürik köpüklerin imalatı için kullanılır. Yüksek çapraz bağlı yapılar oluşur (Denklem 2.7) (Lonescu, 2005; Özenler, 2015; Saunders ve Frisch, 1962).



Ayrıca izosiyanatın trimerizasyon reaksiyonu sonucunda oluşan izosiyanürat yapı poliüretan köpüğün termal özelliklerini geliştirmekte ve yanmazlık özelliklerini iyileştirmektedir (Silva ve Bordado, 2004).

### 2.3.2.2. Polioller

Yapılarında iki ya da daha fazla hidroksil grubu bulduran bileşikler polioller olarak adlandırılır (Szycher, 1999). Polioller, esneklik, yumuşaklık, düşük sıcaklık özellikleri ve işleme özellikleri dahil olmak üzere bitmiş polimerin karakteristik özelliklerini tanımlamada önemli rol oynarlar (Akdoğan, 2018; Szycher, 1999; Yıldız, 2016).

Polioller, poliüretan köpüklerin yumuşak kısımlarını oluşturur. Poliüretan köpüklerin üretimlerinde düşük ve yüksek molekül ağırlıklı ve yapısında ester, eter, amid, akrilik, hidroksil gibi çeşitli fonksiyonel gruplar bulunan polioller

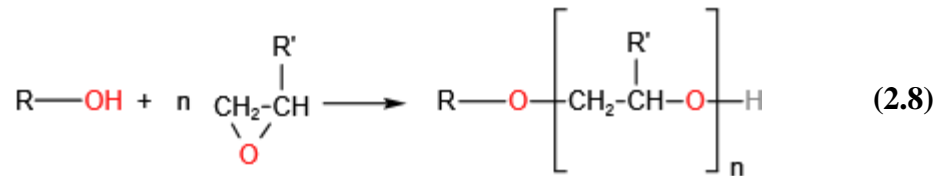
kullanılmaktadır. Polioller organik bileşikler olup, molekül ağırlıklarına, serbest OH sayılarına ve fonksiyonalliklerine göre sınıflandırılabilir. PU köpük üretiminde düşük fonksiyonalliteli ve yüksek molekül ağırlığına sahip polioller kullanıldığında malzemeye esneklik ve yumuşaklık kazandırılırken, yüksek fonksiyonalliteli ve düşük molekül ağırlığına sahip polioller kullanıldığında ise sertlik ve kırılabilirlik kazanırlar. Sentez esnasında izosiyanatların ve zincir uzatıcıların veya çapraz bağlayıcıların katılımı sertliği ve dayanıklılığı arttırmaktadır (Hamidov, 2020). Tablo 2.2’de poliollerin özellikleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.2. Poliollerin özelliklerinin karşılaştırılması (Hamidov, 2020).

Polioller İçeriği	Avantajları	Dezavantajları
Polieter polioller	Hidrolytik kararlılık, maliyet, viskozite, elastikiyet	Termal kararsızlık, yanıcılık
Alifatik poliester polioller	Oksidasyona kararlılık, dayanıklılık	Yüksek viskozite
Aromatik poliester polioller	Yanmaya karşı direnç	Yüksek viskozite, düşük esneklik
Polikarbonat polioller	Hidrolytik ve oksidatif kararlılık, dayanıklılık	Yüksek viskozite, maliyet
Akrilik polioller	Hidrolytik ve oksidatif kararlılık, sertlik	Yüksek viskozite, maliyet, düşük esneklik

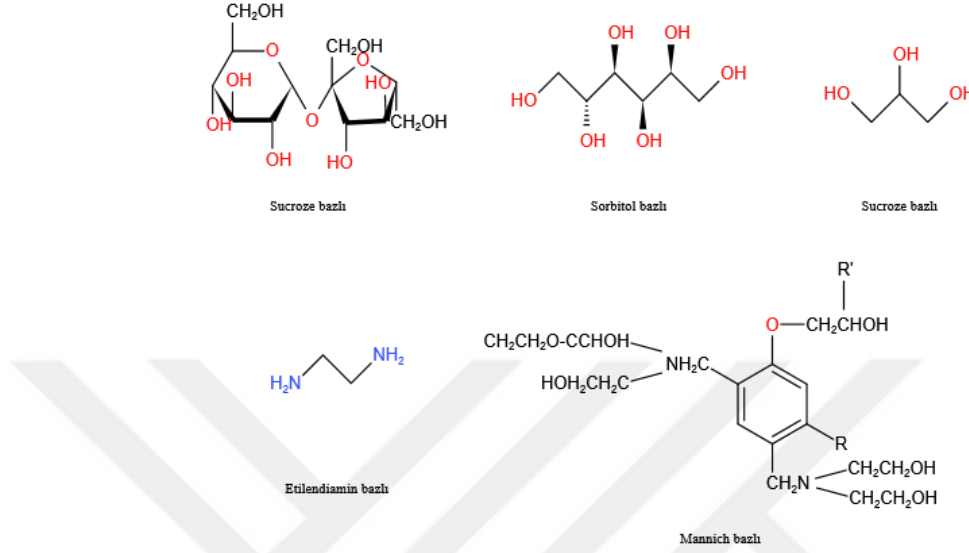
Polioller, yapıları, üretim süreçleri, fonksiyonellikleri, fiyatları açısından değişiklik gösterebilir (Sarper, 2019). Polieter, poliester, poliakrilik ve biyopolioller olarak dört ana kategoride sınıflandırılır (Hamidov, 2020).

*Polieter polioller*, epoksitlerin aktif hidrojen atomuna sahip bileşiklerle reaksiyonu ile elde edilir (Thomas vd). Molekül başına 2 ila 8 -OH grubuna sahip çok çeşitli uzun ve kısa zincirli polieter polioller, düşük moleküler ağırlıklı dioller veya çok işlevli "başlatıcı" alkoller ile epoksitler arasındaki ilave polimerizasyon reaksiyonu ile sentezlenebilir (Denklem 2.8) (Çalışkan, 2017).



Poliüretan üretiminde kullanılan diollerin çok önemli bir bölümünü oluştururlar (Yıldız, 2016). Esnek uygulamalara yönelik polioller, dipropilen glikol (f=2) veya

gliserin (f=3) gibi düşük fonksiyonlitenli başlatıcılar kullanır. Sert uygulamalar için polioller, sakkaroz (f=8), sorbitol (f=6), toluendiamin (f=4) ve mannich bazları (f=4) gibi yüksek fonksiyonlitenye (f) sahip başlatıcılar kullanır (Efstathiou, 2008). Sıkça kullanılan polieter poliöl başlangıç molekülleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

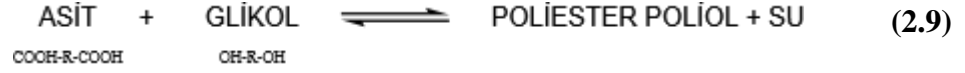


Şekil 2.10. Polieter poliöl başlangıç molekülleri (Yenen, 2020).

Polieter polioller kullanım alanlarına göre farklı hidrosil sayıları ve fonksiyonellik içerirler. Polieter glikollerden üretilen poliüretanlar, poliester bazlı poliüretanlar kadar güçlü ve dayanıklı değildir, ancak çok daha üstün hidrolitik stabiliteye sahiptirler (Kadkin vd, 2003). Polieter poliollerin ana özellikleri erime noktası, viskozite, uyumluluk ve hidrofilitiktir. Poliüretanın özellikleri, polieter zincirleri ve başlatıcı moleküllerin işlevselliği sınırlandırılarak kontrol edilebilir (Efstathiou, 2008). Sünger, direksiyon simidi, sandviç ve soğuk oda panelleri, sprey, buzdolapları, suni deri kaplamaları ve terlik-taban sektörlerinin üretimlerindeki kullanımı oldukça fazladır (Sarper, 2019). Polieter poliollerin poliester poliollere göre bazı avantajları aşağıdaki gibidir;

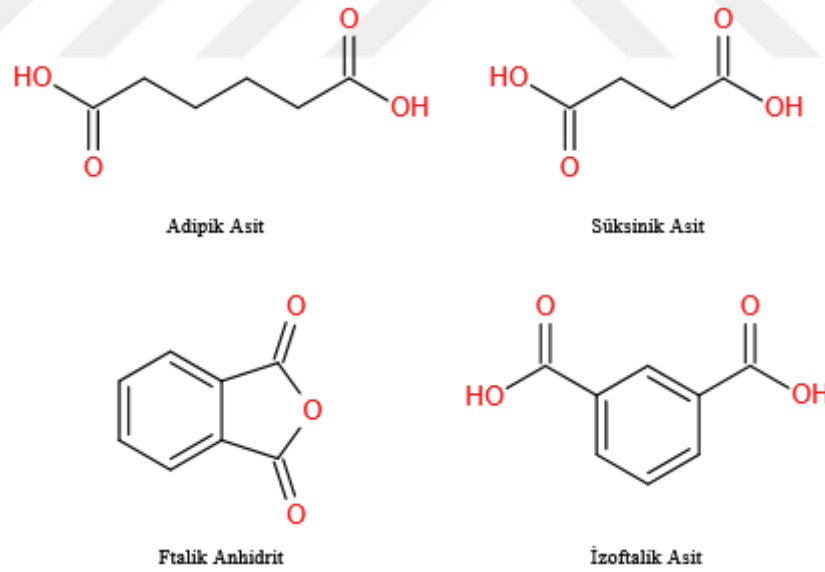
- Viskoziteleri poliester poliollere göre daha düşüktür.
- Poliollerin fonksiyonellikleri 2-8 arasında değişmektedir.
- Oluşan köpükler hidrolize dayanıklıdır.
- Eşdeğer ağırlık büyük ölçüde değiştirilebilir.
- Polieter poliolleri kullanmak, alifatik poliesterlerden daha ucuza mâl olur (Çalışkan, 2017).

*Poliester polioller*, dikarboksilik asitler ile glikollerin reaksiyonu ile sentezlenirler. Bu polikondenzasyon reaksiyonu bir denge reaksiyonu olduğu için, reaksiyon sonunda oluşan su ortamdan sürekli olarak uzaklaştırılmaya çalışılır. Bununla birlikte reaksiyon poliester poliollerin oluşumu yönünde ilerler (Thomas vd, 2018; Yenen, 2020). Poliester polioller sentez reaksiyonu Denklem 2.9’da verilmiştir.

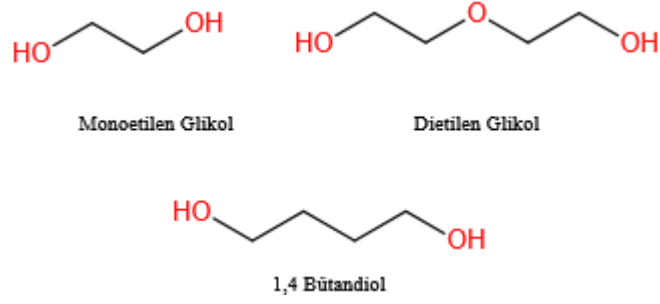


Poliester polioller sentez reaksiyonu, katalizör ilavesi yapılmadan da gerçekteşebilir ancak yüksek performans için (reaksiyon süresinin kısa olması, asit indisinin bu süre içerisinde gelebileceği en düşük noktaya ulaşması) belirlenecek miktarlarda katalizör kullanılır. Kalay bileşikleri, çinko, titanyum, magnezyum veya kurşun bileşikleri gibi özel katalizörler reaksiyon esnasında kullanılmaktadır.

Poliester poliollerden sonra poliüretan köpük üretimi için kullanılan ikinci polioller gruplarıdır. Yaygın olarak kullanılan dikarboksilik asitler ve glikoller Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Poliester polioller üretiminde yaygın olarak kullanılan dikarboksilik asitler (Yenen, 2020).

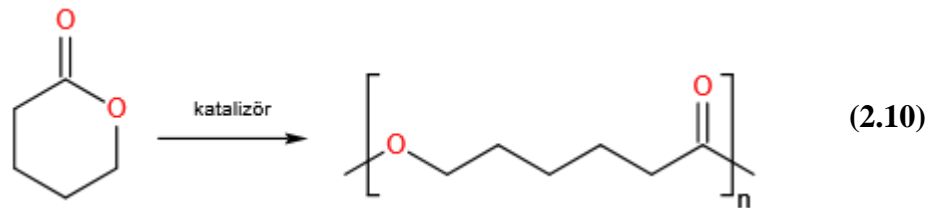


Şekil 2.12. Poliester polioller üretiminde yaygın olarak kullanılan glikoller (Yenen, 2020).

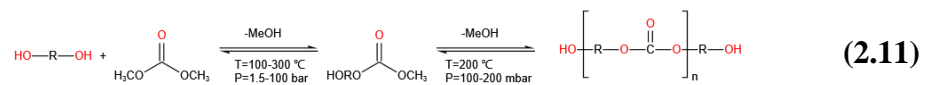
Poliester poliollerin fonksiyonallitesi, reaksiyon esnasında oluşan yan reaksiyonlar nedeniyle teorikte hesaplanan değerden düşük olabilmektedir. Ancak poliester polioller gerçek fonksiyonallitesi teorikte hesaplanan değere oldukça yakındır. Bu gerekçeyle, poliüretan köpük üretiminde poliester poliollerin kullanımı epeyce avantajlıdır (Lonescu, 2005; Yenen, 2020).

Poliester poliollerden üretilen poliüretanlar, iyi mekanik özelliklerle karakterize edilirler, ancak sadece orta derecede hidrolitik stabiliteye sahiptirler. Buna karşılık, poliester poliollere dayalı ürünler hidrolize karşı daha karardır, ancak oksidasyona karşı daha hassastır.

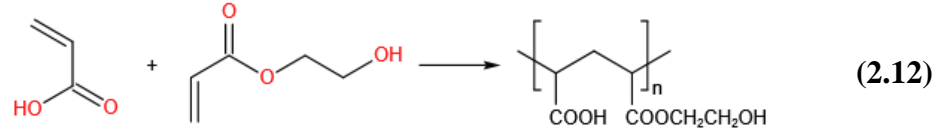
*Polikaprolakton polioller (PCL)*,  $\epsilon$ -kaprolaktonun halka açılımı polimerizasyonu ile elde edilir. Düşük viskoziteli bir poliester çeşididir (Hamidov, 2020). PCL sentez reaksiyonu Denklem 2.10'da verilmiştir.



*Polikarbonat polioller*, fosgen veya karbonat monomerlerinin bir diol veya bir diol karışımı ile polikondenzasyonu sonucu elde edilirler. Polikarbonat polioller sentez reaksiyonu Denklem 2.11'de verilmiştir.



*Poliakrilik polioller*, endüstride boya ve kaplama amacıyla kullanılmaktadır. Termal olarak başlatılan radikal polimerizasyon yolu ile organik çözücülerde elde edilirler. Poliüretanlara dayanıklılık katması amacıyla kullanılmaktadırlar (Denklem 2.12).

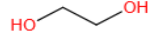
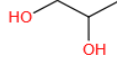

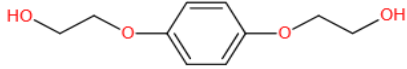
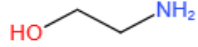
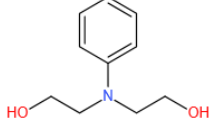


*Otokatalitik polioller*, polimer zincirinde ek olarak amin bileşiklerini içeren yapılardır. Bu amin grupları aynı zamanda katalizör görevi görmektedirler. Amin katalizörleri dahil tüm katalizörler PU'ların üretiminde çokça kullanılmaktadır ancak kanserojendirler. Otokatalitik polioller sayesinde formülasyonda kullanılacak katalizör kullanımı kısıtlanmaktadır (Hamidov, 2020).

### 2.3.2.3. Zincir Uzaticılar ve Çapraz Bağlayıcılar

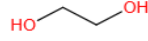
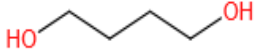
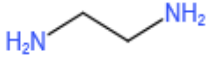
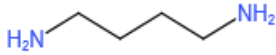
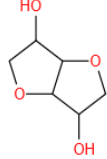
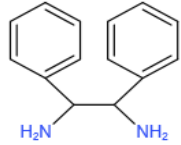
Poliüretanların sentezinde kullanılan zincir uzaticılar alifatik diol ve diamin ile aromatik diol ve diamin olmak üzere iki grupta incelenir. Genellikle iki fonksiyonallığa sahip olan zincir uzaticılar düşük molekül ağırlığına sahiptir. Diamin zincir uzaticılar diol bileşiklere göre daha reaktiftir ve malzemelerin fiziksel özelliklerini iyileştirirken çözünürlüğünü azaltırlar. Diamin ve diol zincir uzaticılar polimerik zincirde üretilen ve üretilen bağlarını oluşturarak malzemelerin yalıtım özelliklerini ve camsı geçiş sıcaklığını artırırlar. Çapraz bağlayıcılar ise çok fonksiyonallığa sahiptirler ve kürlenme ajanı olarak da kullanılırlar. Tablo 2.3'te bazı çapraz bağlayıcılar ve yapıları gösterilmiştir.

Tablo 2.3. Yaygın kullanılan bazı çapraz bağlayıcılar ve yapıları (Hamidov, 2020).

Monomer Adı	Kimyasal Yapı
Etilen glikol	
Propilen glikol	
1,4-sikloheksandimetanol	
Hidrokinon dihidroksietil eter	
Etanolamin	
N-fenildietanol amin	

Zincir uzatıcıların kullanım amaçları, PU köpüklerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve molekül ağırlıklarını arttırmaktır. Sentez esnasında farklı yapı ve fonksiyonel gruba sahip zincir uzatıcıların kullanılması poliüretan köpüklere sertlik veya esneklik kazandırılabilir (Hamidov, 2020). Tablo 2.4'te bazı zincir uzatıcılar ve yapıları gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Yaygın kullanılan bazı zincir uzatıcılar ve yapıları (Hamidov, 2020).

Monomer Adı	Kimyasal Yapı
Etilen glikol	
1,4-Bütandiol	
Etilendiamin	
Bütandiamin	
İzosorbitdiol	
Difeniletildiamin	

#### **2.3.2.4. Katalizörler**

Endüstriyel üretkenlik açısından, izosiyanat grubu katalizörlerin yokluğunda alkoller, su ve kendisi ile oldukça yavaş reaksiyona girer. Poliüretan köpüklerde kullanılan katalizörler, zincir uzamasını, büyümesini, çapraz bağlanmayı ve son ürünün özelliklerini etkilemektedir.

PU köpük üretimi için katalizör seçimi genellikle PU üretim prosesleri sırasında meydana gelebilecek çeşitli reaksiyonlar arasından uygun bir profil elde etmeye yöneliktir.

Tersiyer aminler, organometalikler (öncelikle kalay içeren bileşikler) ve karboksilik asit tuzları, izosiyanatların su ve polioller ile reaksiyonunda katalizör olarak kullanılır. Katalizör, izosiyanatın polioller ve su ile nispi reaksiyon hızları için bir kontrol maddesi olarak işlev görür.

Amin katalizörleri, izosiyanat-su reaksiyonunu izosiyanat-polioller reaksiyonundan daha iyi katalize etme eğiliminde oldukları için genellikle şişme katalizörleri olarak kabul edilir. Bununla birlikte, aminler aslında her iki reaksiyonu da katalize eder ve her reaksiyonun nispi oranları kullanılan spesifik amin katalizörüne bağlıdır.

Organometalik katalizörler, izosiyanat-su şişme reaksiyonunda kısmi rol almasına rağmen, esas olarak jelleşme katalizörleri olarak görülürler. Organotinler en yaygın kullanılan katalizördür, ancak organo civa ve organolead katalizörleri de kullanılır. Civa katalizör, elastomerler için çok iyidir, çünkü hızlı bir kürlenme ile uzun bir çalışma süresi ve jelleşmeye karşı çok iyi seçicilik sağlarlar. Kurşun katalizörleri genellikle sert sprey köpüklerde kullanılır.

Potasyum-karboksilik asit tuzları ve kuaterner amonyum-karboksilik asit tuzları trimerizasyon reaksiyonunu katalize etmek için kullanılır ve bu nedenle esas olarak izosiyanat köpüklerde tercih edilir (Randall ve Lee, 2002).

#### **2.3.2.5. Silikonlar**

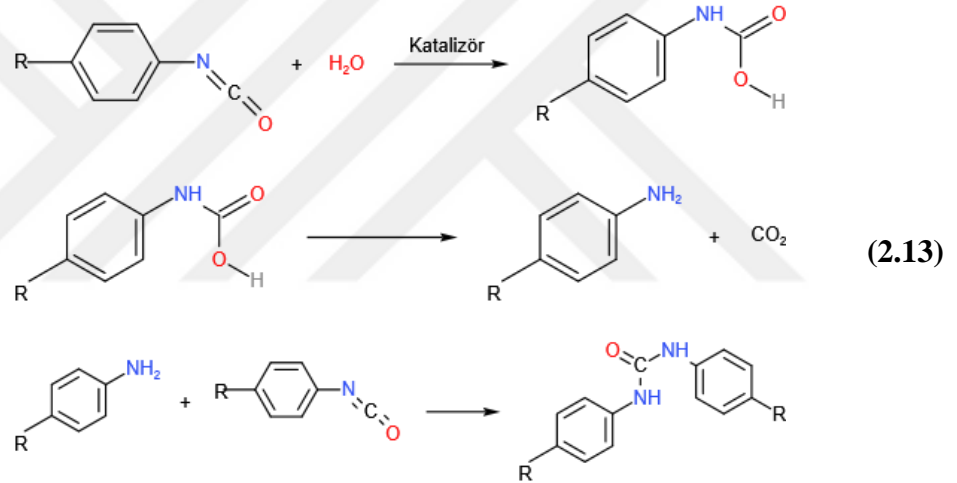
Silikonlar, gerekli hücre yapısının elde edilebilmesinde büyük rol oynar. Silikonlar kullanılmadığı takdirde köpükler çökebilir veya kaba bir hücre yapısına sahip olabilir. Ayrıca silikonlar, köpüklere emülsiyonlaştırma, stabilize etme ve hücre boyutu kontrolü gibi işlevler yüklemektedir. En yaygın olarak kullanılan silikonlar

dimetil polisiloksan ve polisiloksan bazlı kopolimerlerdir. Silikonların miktarı kullanılan ürün gruplarına göre toplam reaktanların % 0,1-2,01'i aralığında kullanılır (Szycher, 1999; Zhang vd, 1999).

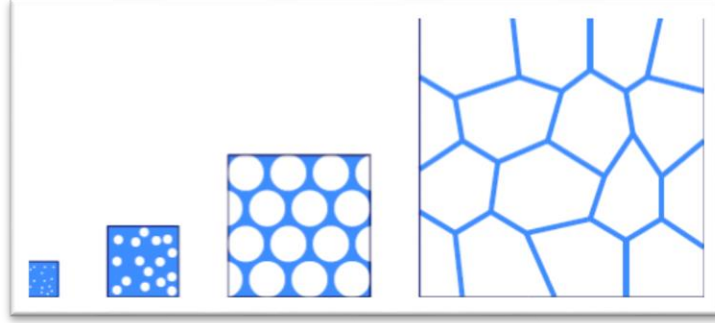
### 2.3.2.6. Şişirme Ajanları

PU köpükler gözenekleri, reaksiyon esnasında gaz kabarcıkları oluşturmak için şişirici ajanlara ihtiyaç duyarlar. Fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki çeşit şişirme işlemi mevcuttur. Bazı durumlarda iki tipteki ajan kombine şekilde de kullanılabilir (Akdoğan, 2018).

En eski şişirme ajanı, köpüğün şişmesi için CO<sub>2</sub> oluşturmak üzere izosiyanatlarla reaksiyona giren sudur (Denklem 2.13). Kimyasal şişirme ajanı olarak en çok kullanılan kimyasaldır.



Kaynama noktası düşük olan fiziksel şişirici ajanlar, reaksiyonun ısısı nedeniyle buharlaşır ve oluşan gaz, köpüğün hücresi tarafından tutulur. Fiziksel şişirme ajanlarına pentan, siklopentan ve izopentan gibi bileşikler örnek gösterilebilir. Poliüretan reaksiyonu ekzotermiktir. Fiziksel şişirme ajanları düşük kaynama noktasına sahip olduğundan açığa çıkan ısı ile hiçbir bileşik ile reaksiyona girmez ve poliüretanın şişerek köpük formuna ulaşmasını sağlar. İnert gazlar, uçucu olmayan hidrokarbonlar, alkoller fiziksel şişirme ajanı görevini üstlenebilirler ancak bu bileşikler yanıcıdır. Yanma esnasında ortaya çıkacak gazlar ile reaksiyona girebilirler. Bu nedenle; tehlikeli ve zararlıdır (Modesti vd, 2007; Singh, 2001). PU köpük oluşum mekanizması Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Poliüretan köpüğün oluşum mekanizması (Sarper, 2019).

### 2.3.2.7. Diğer Yardımcı Maddeler

Pigmentler, dolgular, antioksidantlar, alev geciktiriciler, UV stabilizatörler vb. katkı maddeleri poliüretanların üretimlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

*Pigmentler*, boyalara renk, dayanıklılık gibi özellikler kazandıran organik ve inorganik yapılardır. Kullanılan pigmentler, izosiyanatlar ile reaksiyona girmemeli, iyi disperse olmalı, köpüklerin üretiminde ulaşılan yüksek sertleşme sıcaklıklarında kararlı olmalıdır. Karbon siyahı en yaygın kullanılan pigmenttir.

*Dolgular*, sertliğin, mekanik özelliklerin ve çalışma sıcaklıklarının artırılması, maliyetlerin düşürülmesi adına poliüretan köpük üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

*Antioksidantlar*, köpükteki rengin bozunmasını engellemek için kullanılmaktadır. Çoğu sterik olarak engellenmiş fenolün karışımları, difenilamin veya benzofuranon türevleri bileşiklerdir. En yaygın kullanılan antioksidant; bütillenmiş hidroksitoluendir (Hamidov, 2020).

Rijit poliüretan (PU) köpükler, kapalı hücre yapısına sahip, yüksek oranda çapraz bağlı polimerlerdir. Mekanik mukavemet, düşük ısı iletkenliği ve hava koşullarına karşı büyük direnç gibi olumlu özellikleri nedeniyle inşaat, mühendislik ve elektronik gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Uygun özelliklerinin yanı sıra, sert PU köpükler oldukça yanıcı malzemelerdir. Bu sebeple *alev geciktirici ajanların* yoğun bir kullanım alanı vardır (Członka vd, 2020).

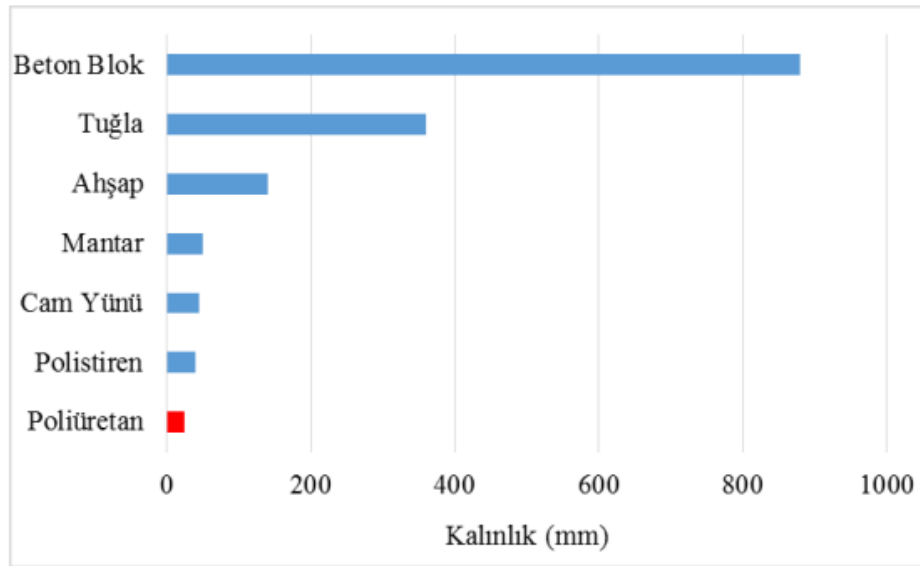
Alev geciktiriciler, yapılarına göre genel olarak 3 farklı katkı maddesi olarak sınıflandırılabilirler. Bu maddeler, gaz fazı alev geciktiriciler, endotermik alev geciktiriciler ve kömür oluşturan alev geciktiricilerdir.

### 2.3.3. Rijit (Sert) Poliüretan Köpükler

Sert poliüretan köpük üretimlerinde kullanılan polioller, dallanmış yapıya ve yüksek fonksiyonaliteye sahiptir. Bu özellikleri ile birlikte, yüksek fonksiyonaliteye sahip PMDI (Polimerik Metilen Difenilin İzosiyanat) ile reaksiyonu sonucu yoğun çapraz bağlı, sert yapılar oluştururlar (Kabakci vd, 2017; Thomson, 2005).

Rijit PU köpük üretiminde kullanılan poliollerin hidroksil sayıları, esnek poliüretan köpük üretimlerinde kullanılan poliollerin hidroksil sayılarından çok daha yüksektir. Polimer zincirindeki hidroksil sayılarının yüksekliği, yüksek yoğunluklu hidrojen bağı etkileşimlerini artırır. Bu durumda, zincirler arası etkileşim artar ve poliölün viskozitesi yükselir. Rijit köpük poliollerinin viskoziteleri, esnek köpük poliollerinin viskozitelerine göre daha yüksektir. Sertliği arttırmanın bir diğer yolu, poliöl yapısında aromatik monomer bulundurmaktır.

Rijit PU köpükler, hem fiziksel şişirme ajanları ile hem de kimyasal şişirme ajanları ile oluşturulabilir. %90 ve üzerine kapalı hücre yapısına sahip oldukları için üstün seviyede ısı yalıtım sağlar (Lim vd, 2008). Bu özellikleri ile birlikte buzdolabı, soğuk oda panelleri, dış cephe kaplamaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 2.14, PU köpüklere eşdeğer ısı yalıtım sağlayan malzeme kalınlıkları göstermektedir.



Şekil 2.14. Eşdeğer ısı yalıtım sağlayan malzeme kalınlıkları (Sarper, 2019).

Rijit PU köpükler, katalizör, silikon, şişirici ajan varlığında bir poliizosiyanatın bir poliöl ile reaksiyonu sonucu oluşur (Akdoğan, 2018).

Rijit PU köpüklerin tercih edilme sebepleri;

- Mükemmel ısı yalıtım özellikleri,
- Mekanik özellikleri,
- Çok çeşitli yoğunluklarda üretilebilirliği,
- Düşük maliyeti,
- Metal, ahşap, cam ve seramik gibi birçok malzeme türüne mükemmel yapışma,
- Uygulama kolaylığıdır (Szycher, 1999).

Rijit PU köpükler belirtilen avantajları sebebi ile mühendislik, inşaat, elektronik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak uygun özelliklerinin yanı sıra oldukça yanıcı malzemelerdir. Bu nedenle PU köpüklerin alev dayanımını arttırmak için bilimsel çalışmalar devam etmektedir (Hejna vd, 2017; Kosmela vd, 2019; Kosmela vd, 2020).

#### **2.4. Yanma**

Yanma, yanıcı ve yakıcı maddenin ısı kaynağı ile reaksiyonu sonucunda meydana gelir (Morgan ve Worku, 2015). Meydana gelen ısı ve duman yanıcı gazları besler. Bununla birlikte, alevlenme ve yanma hızı artarak durumu patlama noktasına gelebilir. İnsanları, havyanları, doğayı ve tüm canlıları kurtarabilmenin bir yolu yanmanın önlenmesi, önlenemediği noktada geciktirilmesidir. Böylelikle yangın esnasında kurtarma için zaman yaratılabilir (Küçükşenlik, 2019; Öz, 2006).

Poliüretan köpükler, yanıcı malzeme sınıfındadırlar (Laoutid vd, 2009). Bu dezavantajın ortadan kaldırılabilmesi için çeşitli tür, etki, reaksiyon ve mekanizma ile çalışan alev geciktiriciler kullanılmaktadır. Kullanım alanlarının geniş olması ve talebin giderek artması ile birlikte, aleve karşı dayanımlarının artırılması endüstriyel bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır (Küçükşenlik, 2019; Yerleşti, 2017). Ülkemizde, yangınların her yıl %15-20 arttığı bir noktada, alev geciktirici malzemelerin yaşantımıza dahil olması ile can ve mal kaybında azalma görülmüştür.

Günümüzde, PU köpüğün kullanıldığı her sektörde alev geciktiriciler kullanılmaktadır (Yerleşti, 2017). Alev geciktiricilerin kullanım miktarları, geliştirilen PU köpükte beklenen performansa ve maliyete bağlıdır (Yerleşti, 2017).

### **2.4.1. Gaz Fazı Alev Geciktiriciler**

Gaz fazı alev geciktiriciler, reaktif serbest radikalleri tutarak gaz fazında açığa çıkan ısıyı yanmadan azaltır. Halojen (F, Cl, Br, I) veya fosfor (P-O veya P) en yaygın kullanılan gaz fazı radikal süpürücü/inhibitörleridir. Düşük miktarlarda çok etkili olabilirler. Ancak karbon monoksit ve duman artışına neden olurlar.

Gaz fazı alev geciktiriciler, polimerin yanması esnasında serbest radikal proses ile kimyasal olarak etkileşime girer. Bir gaz fazı alev geciktiricinin etkinliği, alev geciktirici malzemenin polimer bozunma eğrileri ile belirlenir (Backus vd, 1991; Yıldız, 2016).

### **2.4.2. Endotermik Alev Geciktiriciler**

Bu alev geciktiricilerin bozunma reaksiyonu; endotermiktir. Endotermik alev geciktiriciler yanma esnasında yanıcı olmayan gazları ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ) serbest bırakarak gaz fazında ve yoğunlaşma fazında seyreltme işlevi görür. Düşük maliyetlidir. Ancak, yüksek miktarda kullanmak gerekir ve bu, polimerin mekanik özelliklerini bozmaktadır.

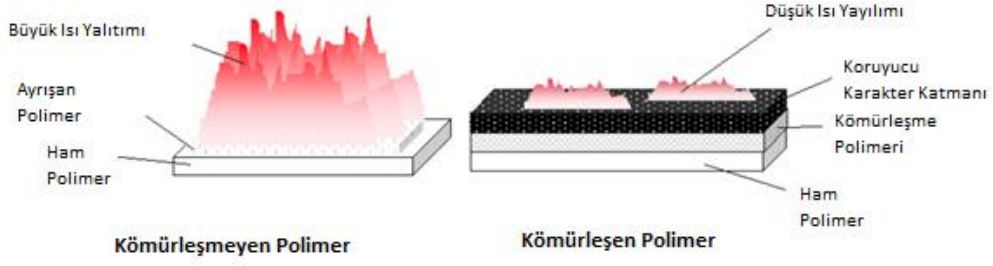
Endotermik bozunma, yoğunlaşmış fazı soğutur, bozulmayı yavaşlatır veya yanıcı bileşen salınımına yol açacak ısıyı uzaklaştırır. İyi bilinen yangın geciktiriciler  $Al(OH)_3$ ,  $Mg(OH)_2$  ve hidromanyezit gibi bazı mineral karbonatlardır.

Bir endotermik alev geciktiricinin etkinliği, alev geciktirici malzemenin polimer bozunma eğrileri ile belirlenir (Backus vd, 1991; Yıldız, 2016).

### **2.4.3. Kömür Oluşturan Alev Geciktiriciler**

Bu malzemeler, pirolize edilemeyen karbon (char) olarak alev kaynağını bloklar. Alev kaynağını önleyerek ve kömür koruyucu tabakaların oluşumu yoluyla alttaki polimer için ısı yalıtımı sağlar. Yangın güvenliğini sağlamada çok güçlü bir yöntemdir. Ancak, tüm polimer sistemleri için kabul edilebilir değildir ve pahalı olabilirler.

Yüksek kömür oluşturucu ve çapraz bağlayıcı malzemelerin kullanılmasıyla, plastiğin daha fazla depolimerizasyonu önlenir. Bununla birlikte, char oluşumunun en yüksek bozunma sıcaklığından önce harekete geçmesi gerekir, böylece koruma sağlanmış olur (Backus vd, 1991; Yıldız, 2016).



Şekil 2.15. Kömür oluşturan alev geciktiriciler (Yıldız, 2016).

#### 2.4.3.1. Halojenli Alev Geciktiriciler

Alev esnasında, halojenli organik alev geciktiriciler, alevin karakteristik zincir reaksiyonlarını bloke eder (Lyons, 1970). Böylece flor, klor veya brom içeren herhangi bir organik bileşik, alevin etkisiyle karşılık gelen asitlere (HCl veya HBr) ayrışır ve bu asitler, alevde bulunan en reaktif radikal olan hidroksil radikali HO\* ile reaksiyona girer.



Klor radikali, denklem 2.15'teki organik substrat ile reaksiyona girer.



Böylece alevdeki zincirleme reaksiyonlar sonlandırılır. Bu olaya kendi kendini söndürme denir (Backus vd, 1991; Yıldız, 2016).

#### 2.4.3.2. Fosfor Bazlı Alev Geciktiriciler

Fosfor, alev geciktiriciler için fonksiyonel bir elementtir. Amonyum polifosfat, kırmızı fosfor gibi inorganik veya fosfatlar, fosfonatlar, fosfinatlar gibi organik olabilir. Ana alev geciktirici etkisi, alt yüzeyde kömür tabakası oluşmasıdır.

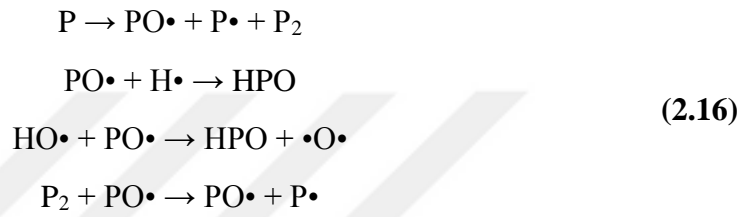
Fosfor bazlı alev geciktiriciler, farklı kimyasal yapıları kapsar ve hem gaz hem de yoğun faz alev geciktirici katkı maddeleri olabilir. Miktarlarının düşük olması durumlarında ısı yayma oranını düşürmede çok etkili olabilir.

Fosforlu alev geciktirici katkı maddeleri, tipik olarak sinerjistlere ihtiyaç duymaz, ancak halojenli alev geciktiriciler (Fosfor-halojen buhar fazı sinerjisi) ve

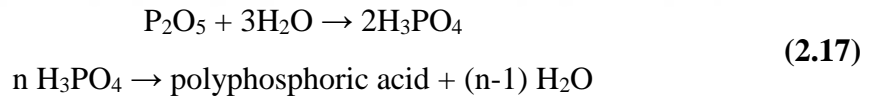
nitrojen bileşikleri (Fosfor-azot yoğunlaştırılmış faz sinerjisi) gibi diğer alev geciktiriciler veya elementlerle birleştirildiğinde bazen durumlarda daha etkilidir.

Gaz fazında yanmayı engelleyerek, yoğunlaşmış fazda karbon tabakası oluşturarak veya her iki mekanizma ile de çalışabilir (Küçükşenlik, 2019).

Gaz fazında yüksek derecede aktif alev yayılma radikallerini (HO• ve H•) sonlandıran PO•, PO<sub>2</sub>•, HOPO• ve HOPO<sub>2</sub>• radikallerinin oluşumu ile gaz fazında hareket eder. Bu radikaller, alev içinde ana bileşiğin bozunmasından sonra oluşur. Bu nedenle alev inhibisyonu, ana bileşiğin formuna bağlı değildir.



Yoğunlaştırılmış faz mekanizmasında, fosforlu alev geciktirici, polifosforik aside dehidre edilen fosforik asit vermek üzere termal olarak parçalanır (Backus vd, 1991; Yıldız, 2016).



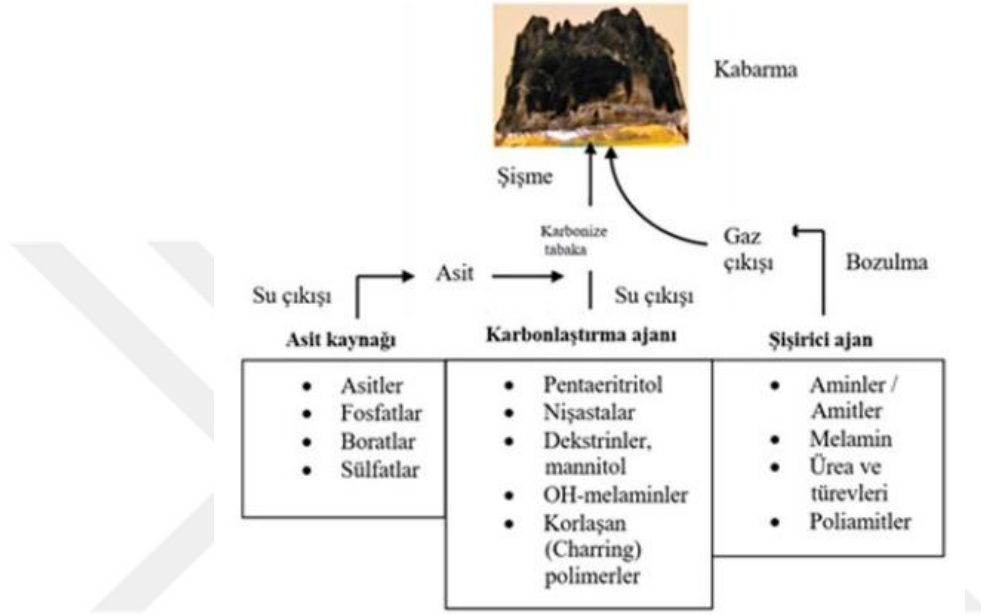
#### 2.4.3.3. Mineral Alev Geciktiriciler

Endotermik soğutma mekanizması ile alev geciktirici etkisi gösterirler. Benzersiz bir buhar / yoğun faz aktivitesine sahiptirler. Özellikle, yangın koşulları altında, mineral dolgu maddesi ısıya maruz kaldığında endotermik olarak ayrışır, yoğunlaşmış fazı soğutur, böylece polimerin termal ayrışmasını yavaşlatır. Alev geciktiriciler olarak günümüzde en çok kullanılan mineral dolgu maddeleri metal hidroksitler ve metal karbonatlardır. Mineral dolgu maddeleri genel olarak sinerjistlerle kullanılmazdır (Küçükşenlik, 2019; Yerleşti, 2017).

#### 2.4.3.4. Şişen Alev Geciktiriciler

Yangın koşulları altında koruyucu bir karbon köpük tabakası oluştururlar. Isıya tepki olarak yükselirler. Şişen sistemler karbon kömürü formunu oluşturan üç bileşenden oluşur. Birincisi karbon kaynağı, ikincisi çapraz bağlanmasına ve termal olarak kararlı bir karbon formu oluşturmaya neden olan bir asit katalizörü ve

üçüncüsü karbon kaynağının bir karbon köpüğü haline gelmesine neden olan spumific veya gaz oluşturunucudur. Grafit yaygın olarak kullanılan şişen alev geciktiricilere örnektir. Grafit, yangın koşulları altında genişlerken grafit tabakaları arasında sıkışan gazı serbest bırakır ve yüksek yüzey alanlı yapısından kaynaklanan termal koruma sağlar. Şişen alev geciktiricilerin çalışma mekanizması Şekil 2.16'da gösterilmiştir (Küçükşenlik, 2019; Yerleşti, 2017).



Şekil 2.16. Şişen alev geciktiricilerin çalışma şeklinin şematize gösterimi (Küçükşenlik, 2019).

#### 2.4.3.5. İnorganik Alev Geciktiriciler

İnorganik alev geciktiriciler, hem buhar hem de yoğunlaşmış fazlarda etki edebilir. Sinerjistik olarak kullanıldıklarında diğer alev geciktiricilerin daha iyi çalışmasına yardımcı olur. İnorganik alev geciktiricilerin yapılarında karbon yoktur ve periyodik tablodan çok çeşitli elementleri kapsar. Tek ticari inorganik alev geciktiriciler boratlar, stantanlar ve silikatlardır. Kullanılan boratlar, sistemlerin daha iyi çalışmasına yardımcı olmak için halojenli alev geciktiriciler, mineral dolgu maddeleri ve fosfor için sinerjistik olarak kullanılan çinko boratları ( $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ ) içerir. Kullanılan stannatlar arasında, halojenli alev geciktiricilerin varlığında duman oluşumunun azaltılmasına yardımcı olan çinko stannat ve çinko hidroksil stannat ( $ZnSnO_3$ ,  $ZnSnO_3 \cdot 3H_2O$ ) bulunmaktadır. Silikatlar yapı ve kullanım bakımından daha çeşitlidir ve genellikle polimerin üstünde koruyucu bir seramik bariyeri oluşturarak alttaki polimere termal koruma sağlarlar (Küçükşenlik, 2019; Yerleşti, 2017).

### 3. MATERYAL YÖNTEM

#### 3.1. Kullanılan Hammaddeler

Polimiks, polimerik metilen difenil diizosiyanat (PMDI), sıvı tris (1-kloro-2-propil) fosfat (TCPP), tris (1,3-dikloro-2-propil) fosfat (TDCP), trietil fosfat (TEP), toz melamin polifosfat (MP), alüminyum trihidrat (ATH), çinko borat (ÇB), grafit (GRFT) Flokser Kimya Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir.

#### 3.2. Kullanılan Cihaz Ve Ekipmanlar

Tablo 3.1. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar.

Yöntem	Marka	Açıklama
Viskozite Analizi	Brookfield DV-II+ Pro	Polimikslerin viskozitelerinin ölçülebilmesi adına ASTM D4878-15 doğrultusunda analizler yapılmıştır.
Reaksiyon Profili	Black & Decker KR1102	Mekanik karıştırıcı yardımı ile polioliol ve izosiyanatın karıştırılması sonucu kremleşme (şişme), jelleşme ve dokunma (yapışmanın son bulması) süreleri belirlenmiştir.
SEM Analizi	Jeol JSM-7001F	Köpüklerin hücre yapısı analiz edilmiştir.
Mekanik Dayanımı Testi	Instron	Köpüklerin mekanik dayanım testleri ISO 844:2021 standardı doğrultusunda yapılmıştır.
TGA Analizi	Exstar - SII TG/DTA7200	Ölçümler, azot atmosferi altında 10 °C/dk ısıtma hızı ile 30 °C ila 700 °C aralığında ve 3 ila 10 mg numune ağırlığı ile gerçekleştirilmiştir.
DSC Analizi	TA DSC Q 2000	Köpüklerin $T_g$ (Camsı geçiş sıcaklığı) belirlenmiştir.
ISO 11925-2 Küçük Alev Testi	Aykut Makine	Küçük alev testi kabini sayesinde ISO 11925-2 standardı doğrultusunda analizler yapılmıştır.
UL 94 (Dikey) Testi	Marestek	Test, ASTM D3801-20a standardına uygun yapılmıştır.

### 3.3. Deneysel Çalışmalar

#### 3.3.1. Viskozite Analizi

Viskozite, PU köpük üretim prosesini etkileyen parametrelerinden biridir. Polimiks numunesine ilave edilen katkı maddelerinin viskoziteye etkisi analiz edilmiştir. Analizler, Brookfield marka DV-II+ Pro model viskozimetre cihazı ile 21°C’de gerçekleştirilmiştir.

#### 3.3.2. Reaksiyon Profili Testi ve Poliüretan Köpüklerin Hazırlanması

Reaksiyon profili testi, beş adımda gerçekleştirilmiş ve PU köpükler elde edilmiştir. Birinci adımda, plastik bardak içerisine 100 gram polimiks ve 140 gram PMDI izosiyanatı eklenmiştir. İkinci adımda, Black&Decker marka mekanik karıştırıcı yardımıyla 3000 rpm’de 3 sn karıştırılmış ve karıştırma işlemi başladığında kronometre çalıştırılmıştır. Üçüncü adımda, köpüğün yüksekliğinin artmaya başladığı ilk anın süresi kremleşme (şişme) zamanı olarak kaydedilmiştir. Dördüncü adımda, köpüğe bir çubuk ile dokunulmuş ve sonra çubuk geri çekilmiştir. Bu işlem çubuğu geri çekerken görülecek örümcek ağı görünümü elde edilene kadar devam ettirilmiş ve beklenen örümcek ağı görünümü görüldüğünde iplikleşme (jelleşme) zamanı olarak kaydedildi. Beşinci adımda, köpüğe parmak ile dokunulmuş ve köpüğün ele yapışmadığı ilk süre dokunma zamanı olarak kaydedilmiştir. Tespit edilen kremleşme, iplikleşme ve dokunma zamanları, bitmiş köpüğün kullanılacağı alanın üretimi esnasında önemli rol oynamaktadır.



Şekil 3.1. Reaksiyon profili testinde kullanılan Black&Decker marka mekanik karıştırıcı.

### 3.3.3. Alev Geciktirici Ajanlarının Poliüretan Köpüğün Sentezinde Kullanımı

Standart polimiks numunesi ve alev geciktirici ajan, homojen oluncaya kadar karıştırılarak polimiks/alev geciktirici ajan içeren numuneler elde edilmiştir. Daha sonra 100 gram polimiks/alev geciktirici ajan içeren numune, 140 gram izosiyanat (PMDI) ile karıştırılır. Bu karışımlar, mekanik karıştırıcı yardımı ile 3000 rpm'de 3 saniye karıştırılmış ve PU köpükler elde edilmiştir. Tablo 3.2'de PU köpüklerin formülasyonu verilmiştir.

Tablo 3.2. PU köpük üretiminde kullanılan hammaddeler ve oranları.

Numune Adı	Kullanılan Alev Geciktirici	Polimiks Miktarı (g)	Alev Geciktirici Miktarı (g)	İzosiyanat (PMDI) Miktarı (g)
BYT-STD	-	100	0	140
BYT-1	TCPP	90	10	140
BYT-2	TCPP	80	20	140
BYT-3	TDCP	90	10	140
BYT-4	TDCP	80	20	140
BYT-5	TEP	90	10	140
BYT-6	TEP	80	20	140
BYT-7	MP	90	10	140
BYT-8	MP	80	20	140
BYT-9	ATH	90	10	140
BYT-10	ATH	80	20	140
BYT-11	ÇB	90	10	140
BYT-12	ÇB	80	20	140
BYT-13	GRFT	90	10	140
BYT-14	GRFT	80	20	140

DeneySEL çalışmalarında kullanılmak için hazırlanan PU köpüklerin görüntüleri Şekil 3.2'de verilmiştir. %10 ve %20 değerleri PU köpükteki alev geciktirici ajanı oranını ifade etmektedir.



Şekil 3.2. Hazırlanan PU köpükler.

### 3.3.4. SEM Analizi

PU köpüklerin hücre yapısı ve şekilleri Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan Jeol JSM-7001F model taramalı elektron mikroskobu ile 100 µm büyütme oranında analiz edilmiştir.

### 3.3.5. Mekanik Dayanım Testi

Polimikslere ilave edilen alev geçiktirici ajanların köpüğün mekanik dayanımlarını nasıl etkilediğini görebilmek adına ISO 844:2021 standardı doğrusunda Şekil 3.3'te gösterilen instron cihazında analizler yapılmıştır.

PU köpükler 8x8x5 cm boyutlarında kesilmiş, kesilen köpükler iki paralel plaka arasına yerleştirilmiş ve boyutları test girdisi olarak test cihaza tanımlanmıştır. 5 mm/dk hız ile, yüksekliğin %10'u kadar sıkışan köpüklerin basınç değerleri kaydedilmiştir. Bu analiz tüm numuneler için 3 kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.3. Instron cihazı.

### 3.3.6. Serbest Yoğunluk Analizi

Serbest yoğunluk analizinde, polimikslere ilave edilen alev geciktirici ajanların köpüklerin serbest yoğunluğuna etkisi incelenmiştir.

Köpükler 8x4x4 cm boyutlarında kesilip tartılmıştır. Daha sonra tartı üzerindeki içi su dolu olan kaba batırılmış ve hacimleri ölçülmüştür. Hacimleri belirlerken suyun yoğunluğu  $1 \text{ kg/m}^3$  olarak alınmıştır. Serbest yoğunluklar  $d = m/v$  denklemine göre hesaplanmıştır. Burada,  $d$  yoğunluğu,  $m$  kütleyi ve  $v$  hacmi ifade etmektedir. Bu analiz, tüm numuneler için 2 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır.

### 3.3.7. TGA Analizi

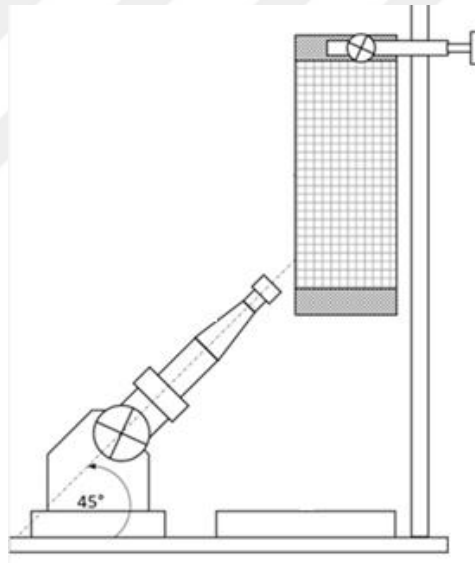
TGA analizi, belirlenen ısıtma hızında ısıtılan bir numunenin kütle kaybı incelenerek termal stabilitesinin belirlenmesini sağlar (Yıldız, 2016). Exstar marka SII TG/DTA7200 model cihaz ile 3-10 mg aralığında numune örnekleri hazırlanarak  $10 \text{ }^\circ\text{C/dk}$  ısıtma hızında,  $30\text{-}700 \text{ }^\circ\text{C}$  aralığında analizler yapılmıştır.

### 3.3.8. DSC Analizi

PU köpüklerin camısı geçiş sıcaklıkları Ondokuz Mayıs Üniversitesi Karadeniz İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan TA marka DSC Q 2000 model diferansiyel taramalı kalorimetre cihazında, -90 °C'den 200 °C'ye kadar 10 °C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir. -90 °C'de ve 200 °C'de 1 dakika bekletilmiştir. Belirtilen şekilde 2 çevrim uygulanmıştır.

### 3.3.9. ISO 11925-2 Küçük Alev Testi

25x9x2,5 cm ölçülerinde kesilen poliüretan köpükler 15 saniye boyunca 45°'lik açı ile propan gazı ile elde edilen 2 cm alev boyundaki alev maruz bırakılmıştır. Alev boyunun, alevin tutulduğu noktanın 15 cm üzerine ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Sonuçlara göre sınıflandırma yapılmıştır. Şekil 3.4'te ISO 11925-2 küçük alev testinin şematik gösterimi verilmiştir.

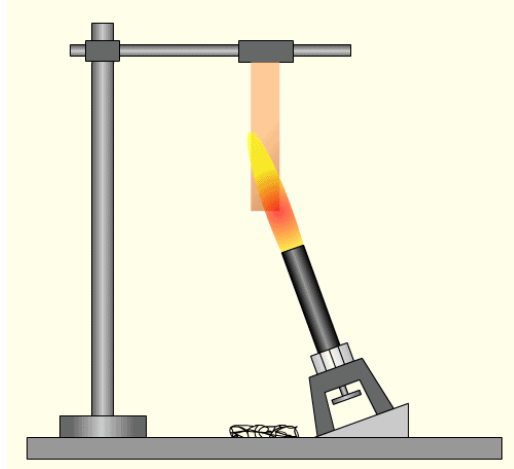


Şekil 3.4. ISO 11925-2 küçük alev testinin şematik gösterimi (Dede, 2016).

### 3.3.10. UL 94 (Dikey) Testi

UL-94 testi, polimer malzemelerin tutuşma özelliklerini değerlendirebilme için Underwrites Laboratuvarları tarafından standardize edilmiştir (Özcan, 2021; Savaş,

2019). Bu testte, dikey olarak yönlendirilmiş poliüretan köpük numunesinin kendi kendine sönme süresi ölçülmüştür.



Şekil 3.5. UL-94 (Dikey) testi şematik gösterimi (Dede, 2016).

12x2,5x2,5 cm ölçülerindeki test numunelerinin üst kısmı Şekil 3.5'te gösterildiği gibi bir stand kenetlenmiş ve brülör doğrudan numunenin altına yerleştirilmiştir. Test Marestik marka UL-94 test kabini gerçekleştirilmiştir. Alev kaynağı 10 saniye boyunca köpüğün altında tutulmuş ve sonrasında alev kaynağı uzaklaştırılarak köpüğün kendi kendine sönme süreleri kaydedilmiştir. Bu test her bir numune için 2 kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Daha sonra Tablo 3.3'te verilen sınıflandırma kriterlerine göre değerlendirilmiştir.

Tablo 3.3. UL-94 (Dikey) testi sınıflandırma kriterleri.

Kriter	V-0	V-1	V-2
Birinci alev sonrası sönme süresi (1. sonuç)	$\leq 10$	$\leq 30$	$\leq 30$
İkinci alev sonrası sönme süresi (2. sonuç)	$\leq 10$	$\leq 30$	$\leq 30$
Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	Hayır
Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	Evet

UL 94 (Dikey) testinin gerçekleřtirildiĐi kabinin görüntüsü Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. UL-94 test kabini.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Viskozite Testi

#### 4.1.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

PU köpük üretim prosesleri için viskozite sonuçları önemli bir parametredir. Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkıli rijit PU köpüklerin oluşumu öncesinde polimikslerin viskozitelerinin ölçümü yapılmıştır. Tablo 4.1’de polimiks numunelerinin 21°C viskozite sonuçları verilmiştir. Saf halde 21°C’de TCPP viskozitesi 70 cP, TDCP viskozitesi 2420 cP ve TEP viskozitesi 10 cP ölçülmüştür. Alev geciktirici ajan katkıli köpüklerde, TCPP ve TEP miktarının artmasıyla viskozite düşerken, TDCP miktarının artmasıyla viskozite artmıştır (Tablo 4.1). TCPP ve TEP sıvı alev geciktirici ajanlarının viskoziteleri TDCP’ye göre daha düşüktür ve bu sebeple daha çok tercih edilmektedir.

Tablo 4.1. Sıvı alev geciktirici ajan katkıli rijit poliüretan polimikslerin viskozite sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Viskozite (cP)
BYT-STD	-	785
BYT-1	%10 TCPP	680
BYT-2	%20 TCPP	550
BYT-3	%10 TDCP	1203
BYT-4	%20 TDCP	1250
BYT-5	%10 TEP	347
BYT-6	%20 TEP	165

#### 4.1.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkıli rijit PU köpüklerin oluşumu öncesinde polimikslerin viskozitelerinin ölçümü yapılmıştır. Tablo 4.2’de 21 °C viskozite sonuçları verilmiştir. Toz alev geciktiricilerin polimiks içerisinde disperse olması ve viskoziteyi arttırması beklenmiştir.

Sonuçlara göre, MP, ATH, ÇB ve GRFT miktarının artmasıyla viskozite artmıştır. Viskozitenin düşük veya yüksek olması, polimiks ile izosiyanatın karışım kalitesini etkiler ve uygulayıcıların kullandığı makine pompalarını zorlar. Karışım kalitesinin kötü olması veya pompanın zorlanması, polimiks ve izosiyanat oranlarının doğru olmaması köpüğün homojen oluşmamasını sağlar. Köpüğün yapısında bozunmalar, köpüğün çekmesi, köpük cildinin istenilen gibi olmaması, köpüğün

homojen olmayan kısımlarında rengin farklı olması gibi problemler gözlenir (Güney vd, 2021).

Tablo 4.2. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan polimikslerin viskozite sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Viskozite (cP)
BYT-STD	-	785
BYT-7	%10 MP	1180
BYT-8	%20 MP	1960
BYT-9	%10 ATH	932
BYT-10	%20 ATH	1175
BYT-11	%10 ÇB	1065
BYT-12	%20 ÇB	1615
BYT-13	%10 GRFT	1117
BYT-14	%20 GRFT	1475

## 4.2. Reaksiyon Profili Testi

### 4.2.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkılı rijit PU köpüklerin reaksiyon süreleri Tablo 4.3'te verilmiştir. TCPP ilavesi ile kremleşme zamanlarının hızlandığı ancak iplikleşme ve dokunma zamanlarında fark olmadığı görülürken TDCP ilavesi ile kremleşme zamanlarının hızlandığı, %20 TDCP içeren köpükteki dokunma zamanının yavaşladığı ancak iplikleşme zamanlarında fark olmadığı görülmüştür. TEP ilavesi ile kremleşme zamanlarının hızlandığı, %10 ve %20 TEP içeren köpüklerdeki iplikleşme ve dokunma zamanlarının yavaşladığı görülmüştür.

Kremleşme zamanının hızlanması ile köpük daha hızlı reaksiyona girecek ve uygulanan alanın veya kalıbın büyüklüğüne göre istenilen köpük yoğunluğu ile doğru uygulama yapılamayacaktır. Bunun sonucu olarak köpükte zamanla çekme gözlenecektir. Ek olarak, köpükteki kremleşme süresi uygulanacak yüzeye ulaşmadan önce tamamlanacak ve yapışması zorlaşacaktır (Pişkin, 2021).

Tablo 4.3. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin reaksiyon profili testi sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Kremleşme Zamanı (s)	İplikleşme Zamanı (s)	Dokunma Zamanı (s)
BYT-STD	-	7,77	17,91	23,94
BYT-1	%10 TCPP	6,00	16,30	23,40
BYT-2	%20 TCPP	5,80	17,00	24,60
BYT-3	%10 TDCP	5,50	16,90	23,80
BYT-4	%20 TDCP	5,10	18,10	27,40
BYT-5	%10 TEP	6,30	18,33	25,87
BYT-6	%20 TEP	5,86	21,73	30,83

#### 4.2.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkılı rijit PU köpüklerin reaksiyon süreleri Tablo 4.4'te verilmiştir. %10 ve %20 toz alev geciktiricilerin ilavesi ile kremleşme zamanlarında farklılık olmazken, köpüklerdeki iplikleşme ve dokunma zamanlarının yavaşladığı görülmüştür.

İplikleşme ve dokunma zamanlarının yavaşlaması ile köpükte damlama problemi yaşanacaktır. Çözümü için formülasyondaki katalizör türü ve miktarı için çalışma yapılması gerekecektir.

Tablo 4.4. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin reaksiyon profili testi sonuçları.

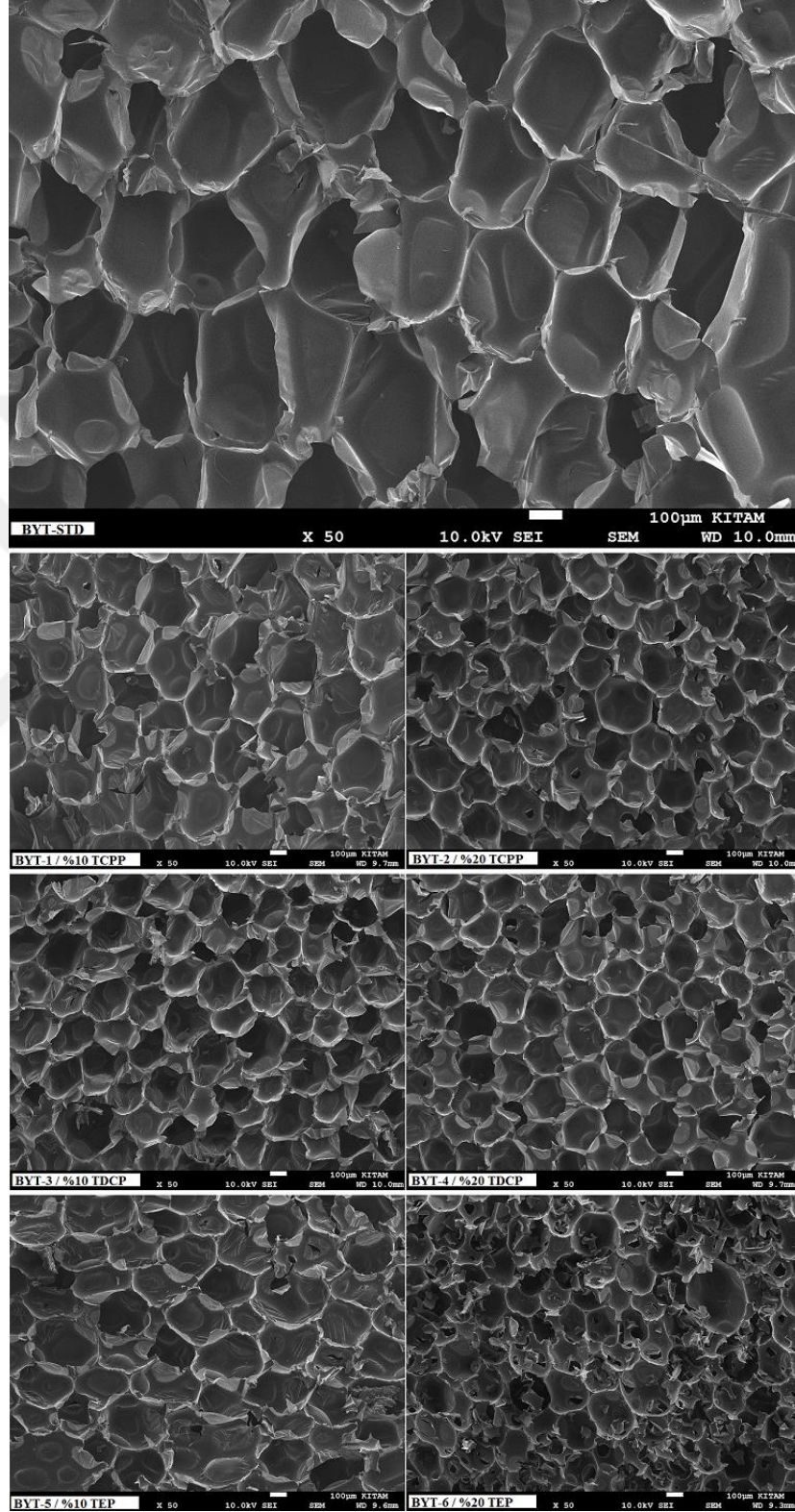
Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Kremleşme Zamanı (sn)	İplikleşme Zamanı (sn)	Dokunma Zamanı (sn)
BYT-STD	-	7,77	17,91	23,94
BYT-7	%10 MP	7,13	19,94	26,25
BYT-8	%20 MP	7,47	23,91	34,17
BYT-9	%10 ATH	7,57	18,94	27,13
BYT-10	%20 ATH	7,59	21,09	30,46
BYT-11	%10 ÇB	7,36	19,57	26,91
BYT-12	%20 ÇB	7,74	21,86	30,09
BYT-13	%10 GRFT	7,91	20,16	26,95
BYT-14	%20 GRFT	8,12	22,70	32,77

### 4.3. SEM Analizi

#### 4.3.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Çok gözenekli PU yapılar çok yanıcıdır, hızlı alev yayılımı ve yüksek ısı salınım oranına sahiplerdir (Levchik ve Weil, 2004; Küçükşenlik, 2019). Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkılı rijit PU köpüklerin SEM analizleri ile yüzey morfolojileri incelenmiştir (Şekil 4.1). TCPP ve TDCP içeren köpüklere ait gözeneklerin homojen dağıldığı, yumurta kıvamını alarak mekanik dayanımı arttırdığı görülürken, TEP

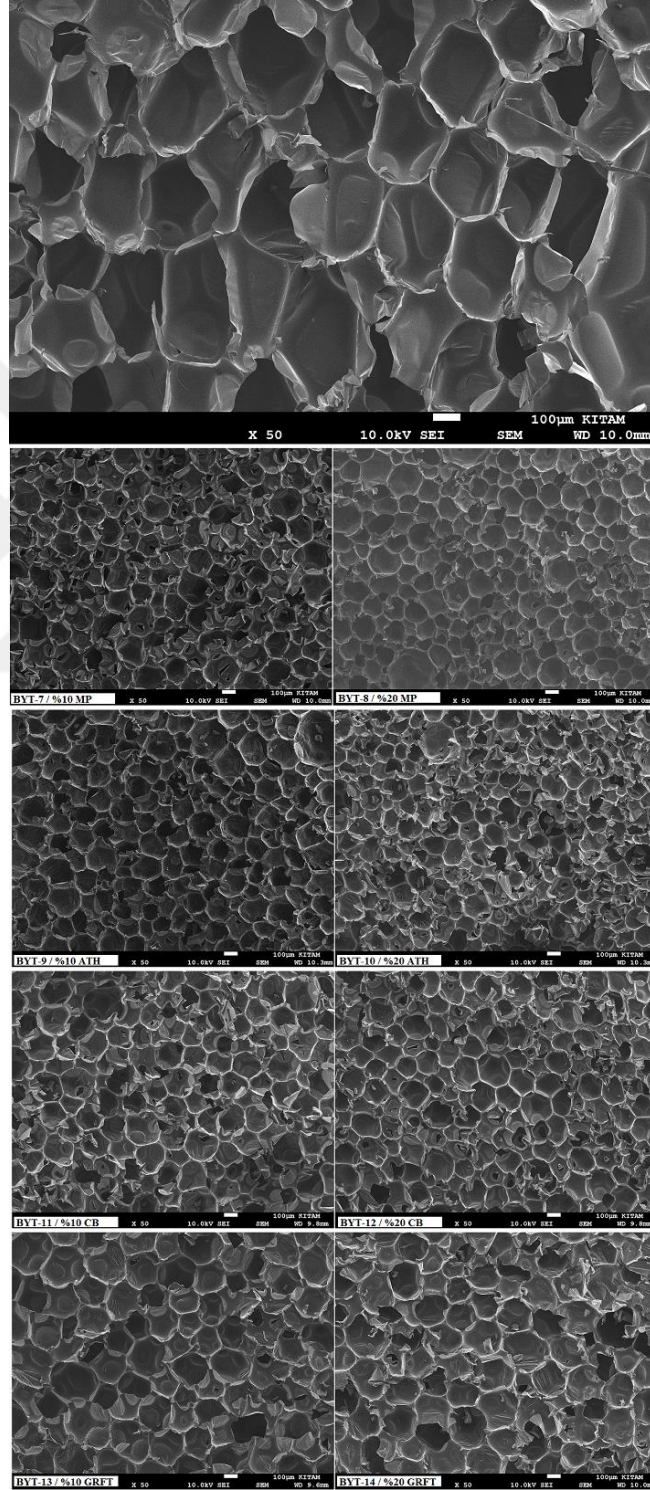
içeren köpüklerin gözeneklerinin homojen dağılmadığı, büyük/küçük gözeneklerin bir arada olduğu ve mekanik dayanımı olumsuz etkilediği görülmüştür (Küçükşenlik, 2019).



Şekil 4.1. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin SEM görüntüsü.

#### 4.3.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkıli rijit PU köpüklerin SEM analizleri ile hücre morfolojileri incelenmiştir (Şekil 4.2). Toz alev geciktirici ajanlar, gözenek yüzeylerinde gözlenmektedir. Bu durum, homojen dağılımı engellemekte ve mekanik dayanımı olumsuz etkilemektedir (Sarper, 2019).



Şekil 4.2. Toz alev geciktirici ajan katkıli rijit poliüretan köpüklerin SEM görüntüsü.

#### 4.4. Mekanik Dayanım Testi

##### 4.4.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkıli rijit PU köpüklerin toplam hacmin %10'u kadar sıkıştıktan sonraki basınç değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Sonuçlara göre, PU köpüklerde sıvı TCPP ve TDCP kullanım oranı arttığında mekanik dayanım artmaktadır. Mekanik dayanımın artması, TCPP ve TDCP katkıli rijit köpüklerin serbest yoğunluklarının artmasından kaynaklanmaktadır. %10 TEP kullanımında saf PU köpüğe oranla mekanik dayanımın azaldığı, %20 TEP kullanımında mekanik dayanımın artarak saf PU'nun değerinin üstüne çıktığı görülmüştür.

Tablo 4.5. Sıvı alev geciktirici ajan katkıli rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	%10 Sıkıştırmadaki Basınç (kPa)
BYT-STD	-	370,30
BYT-1	%10 TCPP	423,12
BYT-2	%20 TCPP	535,70
BYT-3	%10 TDCP	403,24
BYT-4	%20 TDCP	515,79
BYT-5	%10 TEP	341,25
BYT-6	%20 TEP	377,10

##### 4.4.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkıli rijit PU köpüklerin toplam hacmin %10'u kadar sıkıştıktan sonraki basınç değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Sonuçlara göre, %10 MP ve ÇB içeren rijit PU köpüklerin dışındaki tüm köpüklerin, mekanik dayanımının arttığı görülmüştür. Mekanik dayanımın artması, MP, ATH ve GRFT katkıli rijit PU köpüklerin serbest yoğunluklarının artmasından kaynaklanmaktadır. Mekanik dayanımın düşmesi, ÇB katkıli köpüklerin serbest yoğunluklarının azalmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.3).

Tablo 4.6. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	%10 Sıkıştırmadaki Basınç (kPa)
BYT-STD	-	370,30
BYT-7	%10 MP	342,54
BYT-8	%20 MP	379,27
BYT-9	%10 ATH	382,98
BYT-10	%20 ATH	404,74
BYT-11	%10 ÇB	266,20
BYT-12	%20 ÇB	288,10
BYT-13	%10 GRFT	396,14
BYT-14	%20 GRFT	440,55

Tablo 4.7. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin mekanik dayanım sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	%10 Sıkıştırmadaki Basınç (kPa)
BYT-STD	-	370,30
BYT-1	%10 TCPP	423,12
BYT-2	%20 TCPP	535,70
BYT-3	%10 TDCP	403,24
BYT-4	%20 TDCP	515,79
BYT-5	%10 TEP	341,25
BYT-6	%20 TEP	377,10
BYT-7	%10 MP	342,54
BYT-8	%20 MP	379,27
BYT-9	%10 ATH	382,98
BYT-10	%20 ATH	404,74
BYT-11	%10 ÇB	266,20
BYT-12	%20 ÇB	288,10
BYT-13	%10 GRFT	396,14
BYT-14	%20 GRFT	440,55

## 4.5. Serbest Yoğunluk Testi

### 4.5.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Serbest yoğunluk, poliüretan köpüklerin tüm özelliklerini etkilemektedir. Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkılı rijit PU köpüklerin serbest yoğunluk testi sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Sonuçlara göre; rijit PU köpükler içerisinde TCPP, TDCP ve TEP miktarı arttığında serbest yoğunluk artmıştır. Formülasyondaki su miktarının düşmesi ile serbest yoğunluk artarken, mekanik özelliklerin iyileştiği görülmüştür. Serbest yoğunluk sonuçları, mekanik dayanım sonuçlarını yorumlamada katkı sağlamıştır (Güney vd, 2021).

Tablo 4.8. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Serbest Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
BYT-STD	-	53,69
BYT-1	%10 TCPP	63,34
BYT-2	%20 TCPP	70,98
BYT-3	%10 TDCP	61,60
BYT-4	%20 TDCP	73,60
BYT-5	%10 TEP	56,40
BYT-6	%20 TEP	64,00

#### 4.5.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

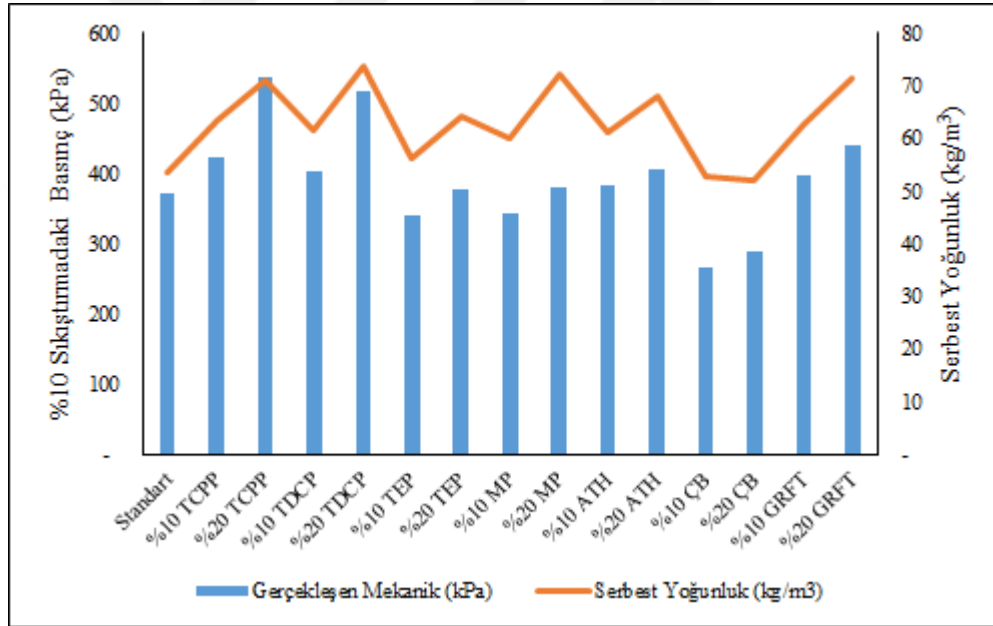
Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkılı rijit PU köpüklerin serbest yoğunluk testi sonuçları Tablo 4.9’de verilmiştir. Sonuçlara göre, rijit PU köpükler içerisinde MP, ATH, GRFT miktarı arttığında serbest yoğunluk artmıştır. ÇB miktarı arttığında serbest yoğunluk düşmüştür (Küçükşenlik, 2019; Sarper, 2019).

Tablo 4.9. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Serbest Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
BYT-STD	-	53,69
BYT-7	%10 MP	59,90
BYT-8	%20 MP	72,20
BYT-9	%10 ATH	61,30
BYT-10	%20 ATH	68,00
BYT-11	%10 ÇB	52,60
BYT-12	%20 ÇB	52,20
BYT-13	%10 GRFT	62,80
BYT-14	%20 GRFT	71,50

Tablo 4.10. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin serbest yoğunluk sonuçları.

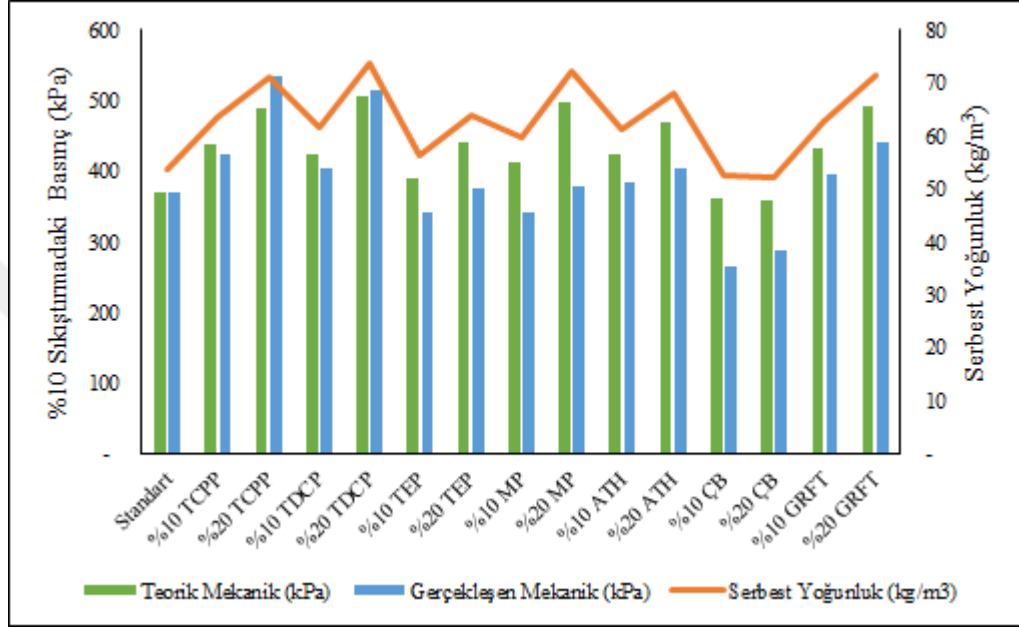
Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	Serbest Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
BYT-STD	-	53,69
BYT-1	%10 TCPP	63,34
BYT-2	%20 TCPP	70,98
BYT-3	%10 TDCP	61,59
BYT-4	%20 TDCP	73,57
BYT-5	%10 TEP	56,36
BYT-6	%20 TEP	64,00
BYT-7	%10 MP	59,90
BYT-8	%20 MP	72,22
BYT-9	%10 ATH	61,29
BYT-10	%20 ATH	68,03
BYT-11	%10 ÇB	52,57
BYT-12	%20 ÇB	52,15
BYT-13	%10 GRFT	62,78
BYT-14	%20 GRFT	71,47



Şekil 4.3. Mekanik dayanım ve serbest yoğunluk sonuçları grafiği.

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te mekanik özellikler ile serbest yoğunluk arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.3'te mekanik dayanımın artış/azalışın sebebinin serbest yoğunluktaki artış/azalış olduğu görülmektedir. Şekil 4.4'te ise tüm köpüklerin yoğunluklarının eşit olduğu ve bu durumda elde edilecek mekanik dayanım sonuçları teorik olarak hesaplanması gösterilmiştir. Mekanik dayanım ve serbest yoğunluk sonuçları paralel ilerlediğinden, alev geciktirici ajan katkılı rijit PU köpüklere ait

serbest yoğunluk değerlerinin standart PU köpüğün serbest yoğunluk değerine oranları belirlenmiştir. Standart köpüğün gerçekleşen mekanik dayanım sonucu ile belirlenen oranlar çarpılmış ve teorikte beklenen mekanik dayanım sonuçları tespit edilmiştir. Bu hesaplama ile köpüklerin aynı serbest yoğunlukta döküldükleri varsayılmıştır. Sonuç olarak, köpüklerin aynı yoğunluklarda dökülmesi ile %20 TCPP ve %20 TDCP içeren köpüklere ait mekanik dayanımların iyileştireceği öngörülmüştür.



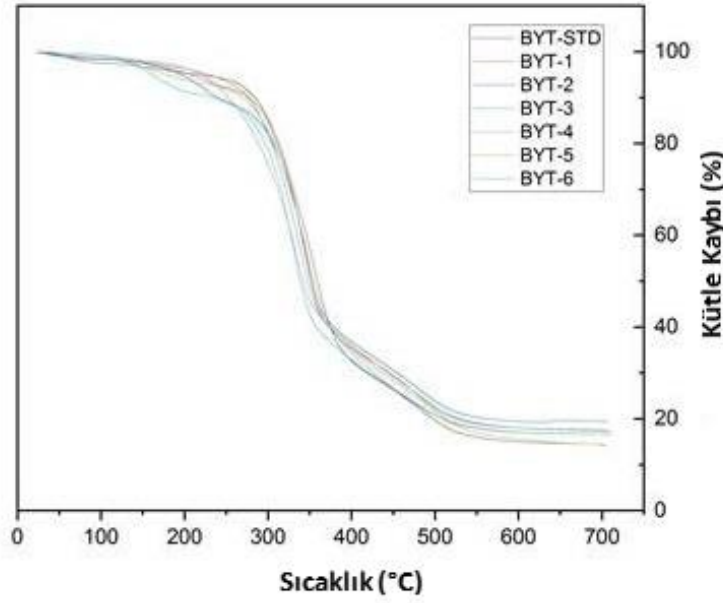
Şekil 4.4. Mekanik dayanım ve serbest yoğunluk arasındaki ilişki.

#### 4.6. TGA Analizi

##### 4.6.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Köpüklerin termal bozunma prosesleri termogravimetrik analiz ile incelenmiştir. Termogravimetrik analiz 10°C/dk ısıtma hızında, 30-700°C aralığında gerçekleştirilmiştir. Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkıli rijit PU köpüklerin TGA analizi sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Numunelerin, yaklaşık 200°C'de bozunmaya başladığı görülmüştür. TCPP miktarı arttıkça malzemenin  $T_{max}$  değerinin düştüğü, kül miktarının yükseldiği bu nedenle termal kararlılığın arttığı gözlenmiştir. Kül miktarının artması ısıl dayanımın arttığını göstermektedir (Liu vd 2017a). TDCP miktarı arttıkça malzemenin  $T_{max}$  değerinin düştüğü ve %10 katkıli köpüğün kül miktarının yükselerek termal kararlılığın arttığı gözlenmiştir. Veriler incelendiğinde %10 ve %20 TEP katkıli PU'ların termal kararlılığının saf PU'ya göre arttığı

gözlenmektedir. Bu etki katkı oranı arttıkça daha belirgin hale gelmektedir ve artan katkı oranının plastifiyan etkisi yapmasından kaynaklanmaktadır (Küçükşenlik 2019).



Şekil 4.5. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.

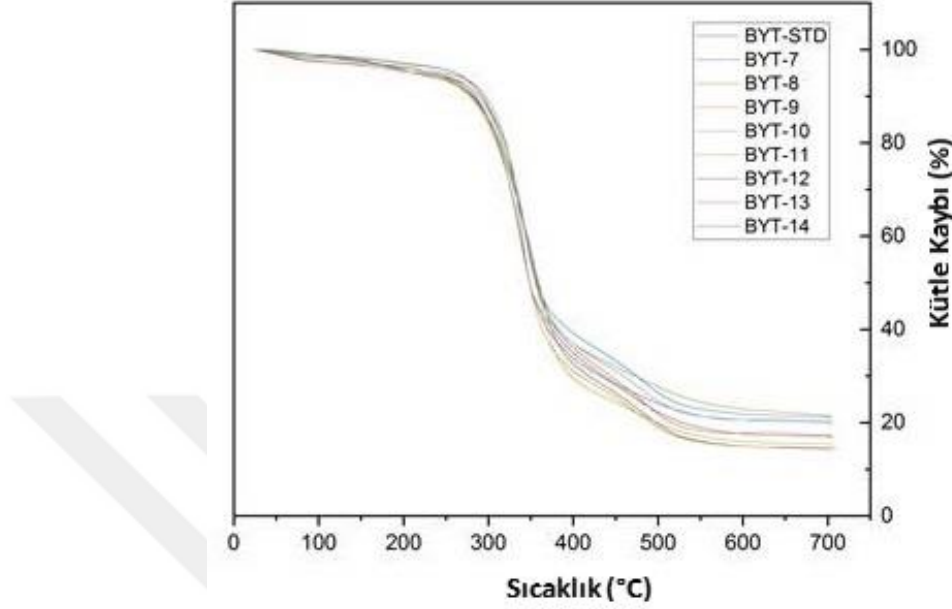
Tablo 4.11. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	T <sub>max</sub> (°C)	Kül Miktarı (%)
BYT-STD	-	356,76	14,13
BYT-1	% 10 TCPP	343,39	17,13
BYT-2	% 20 TCPP	346,58	19,24
BYT-3	% 10 TDCP	338,32	17,09
BYT-4	% 20 TDCP	335,73	16,44
BYT-5	% 10 TEP	347,69	14,07
BYT-6	% 20 TEP	330,81	16,40

#### 4.6.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkılı rijit PU köpüklerin TGA analizi sonuçları Şekil 4.6’da verilmiştir. Eğrilere göre numuneler yaklaşık 230°C’de bozunmaya başlamıştır ve MP, ATH, ÇB ve GRFT miktarı arttıkça malzemenin ısıl dayanımının arttığı gözlenmiştir. Czlonka vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada melamin katkılı köpüklerin termogravimetrik analizleri sonucunda melamin miktarının artmasıyla kül miktarının yükseldiği görülmüştür. Thirumal vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ATH katkılı PU köpüklerin termogravimetrik analizleri sonucunda ATH miktarının artmasıyla T<sub>max</sub> sıcaklıklarının düştüğü ve kül

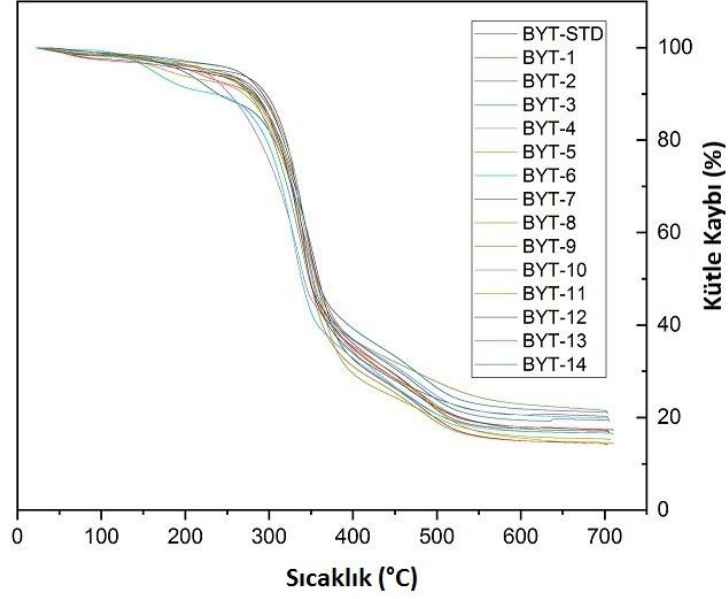
miktarının yükseldiği tespit edilmiştir. Strakowska vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada PU köpüklere ilave edilen grafitin miktarı arttığında, kül miktarının da arttığı görülmüştür.



Şekil 4.6. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.

Tablo 4.12. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	T <sub>max</sub> (°C)	Kül Miktarı (%)
BYT-STD	-	356,76	14,13
BYT-7	% 10 MP	336,39	20,05
BYT-8	%20 MP	346,90	21,19
BYT-9	% 10 ATH	341,34	14,34
BYT-10	%20 ATH	342,68	19,63
BYT-11	%10 ÇB	351,99	15,12
BYT-12	%20 ÇB	336,41	16,74
BYT-13	% 10 GRFT	345,11	17,02
BYT-14	%20 GRFT	345,14	20,91



Şekil 4.7. Standart ve alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA grafiği.

Tablo 4.13. Sıvı ve toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin TGA verileri.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	T <sub>max</sub> (°C)	Kül Miktarı (%)
BYT-STD	-	356,76	14,13
BYT-1	% 10 TCPP	343,39	17,13
BYT-2	%20 TCPP	346,58	19,24
BYT-3	% 10 TDCP	338,32	17,09
BYT-4	%20 TDCP	335,73	16,44
BYT-5	% 10 TEP	347,69	14,07
BYT-6	%20 TEP	330,81	16,40
BYT-7	% 10 MP	336,39	20,05
BYT-8	%20 MP	346,90	21,19
BYT-9	% 10 ATH	341,34	14,34
BYT-10	%20 ATH	342,68	19,63
BYT-11	%10 ÇB	351,99	15,12
BYT-12	%20 ÇB	336,41	16,74
BYT-13	% 10 GRFT	345,11	17,02
BYT-14	%20 GRFT	345,14	20,91

## 4.7. DSC Analizi

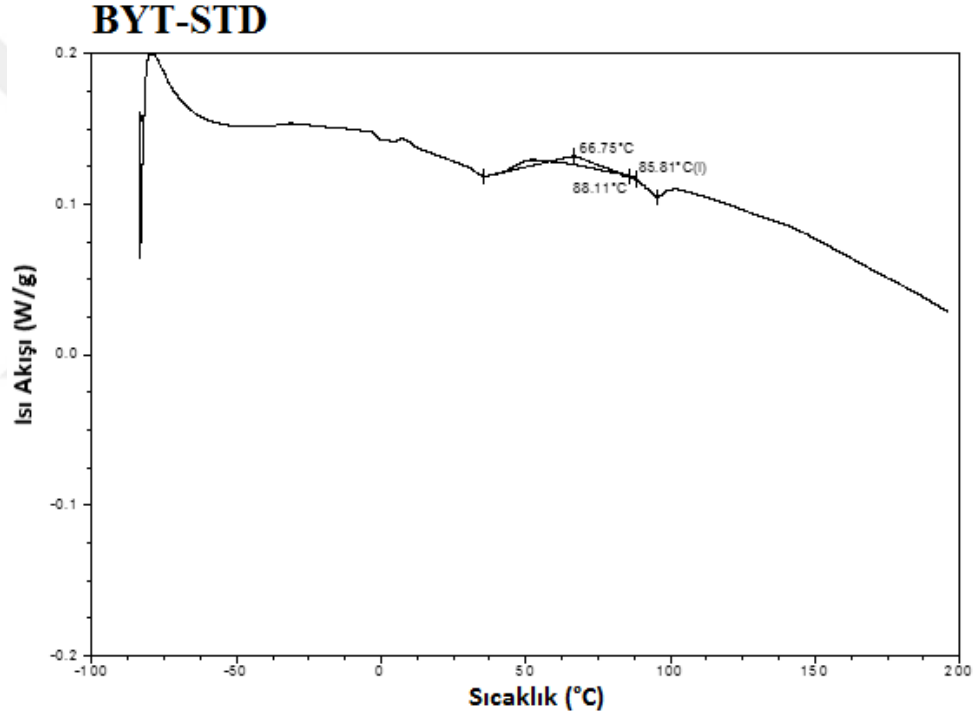
### 4.7.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkılı rijit PU köpüklerin DSC analizi sonuçları Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, camsı geçiş sıcaklığında (T<sub>g</sub>) çok büyük değişiklik olmadığını göstermektedir. Camsı geçiş

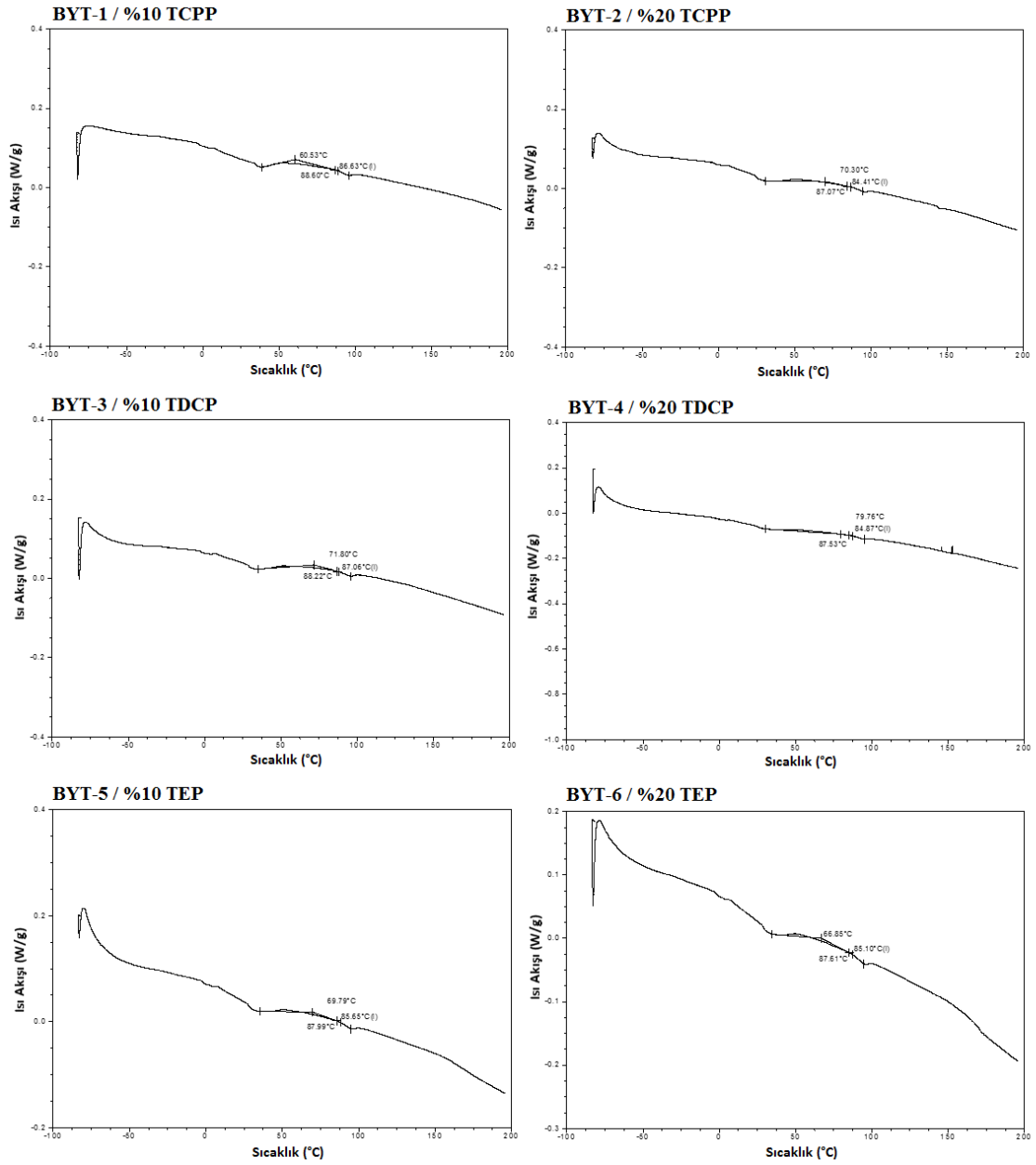
sıcaklığı ( $T_g$ ), köpüklerin yumuşamaya başladığı ve mekanik özelliklerinin düştüğü sıcaklığı ifade etmektedir. Sıvı alev geciktirici katkılı rijit PU köpüklere ait  $T_g$  değerleri Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin DSC sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	$T_g$	$T_m$
BYT-STD	-	66,75-88,11	85,81
BYT-1	% 10 TCPP	60,53-88,60	86,63
BYT-2	% 20 TCPP	70,30-87,07	84,41
BYT-3	% 10 TDCP	71,80-88,22	87,06
BYT-4	% 20 TDCP	79,76-87,53	84,87
BYT-5	% 10 TEP	69,79-87,99	85,65
BYT-6	% 20 TEP	66,85-87,61	85,10



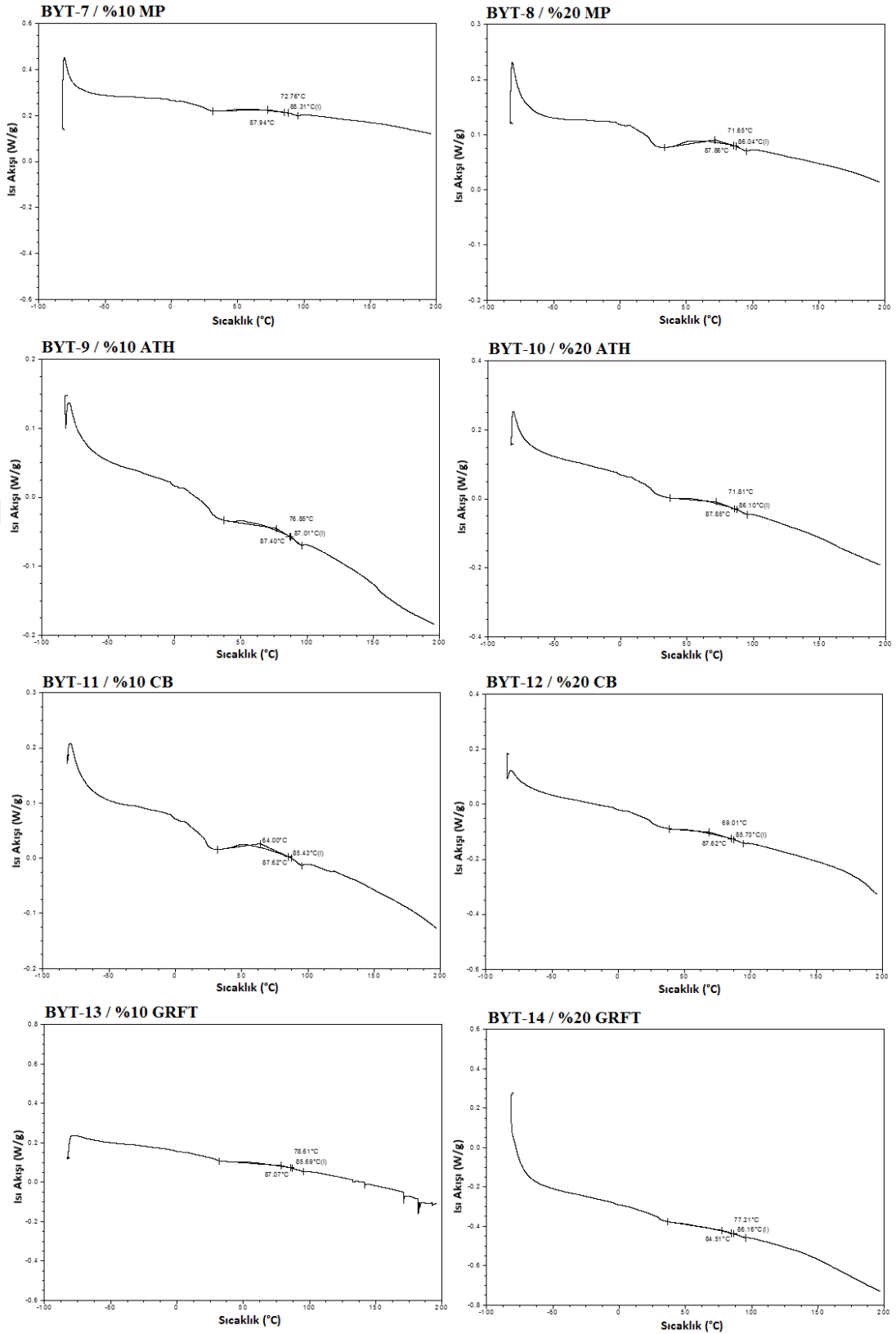
Şekil 4.8. Alev geciktirici ajan içermeyen rijit poliüretan köpüğün DSC grafiği.



Şekil 4.9. Sıvı alev geciktirici ajan içeren rijit poliüretan köpüklerin DSC grafiği.

#### 4.7.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkıli rijit PU köpüklerin DSC analizi sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Sonuçlara göre, camsı geçiş sıcaklığının ( $T_g$ ) değişmediği gözlenmiştir. Toz alev geciktirici ajanların rijit PU köpüklerin mekanik dayanımını olumsuz anlamda etkilemediğini ifade etmektedir.



Şekil 4.10. Toz alev geciktirici ajan içeren rijit poliüretan köpüklerin DSC grafiği.

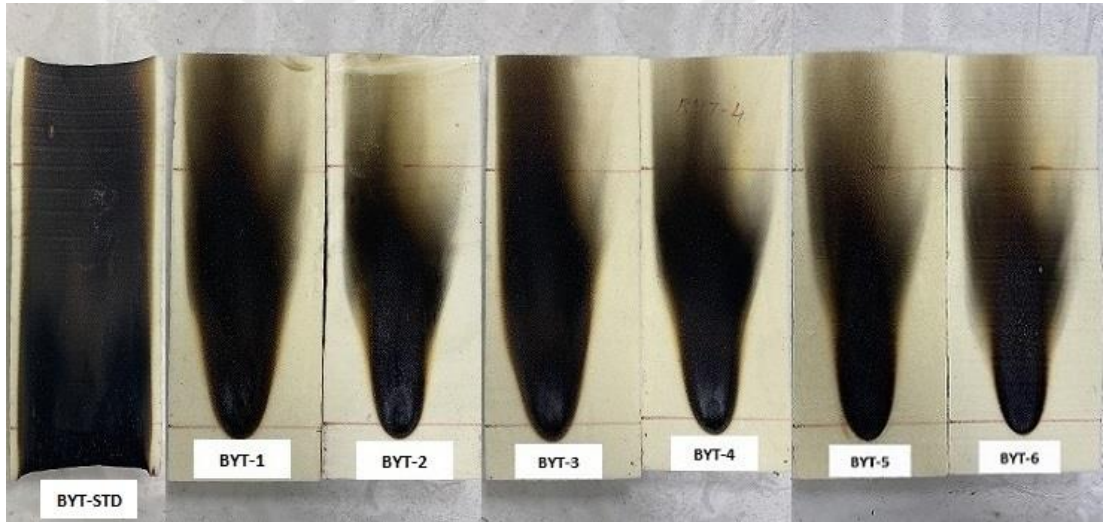
Tablo 4.15. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin DSC sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajan	T <sub>g</sub>	T <sub>m</sub>
BYT-STD	-	66,75-88,11	85,81
BYT-7	% 10 MP	72,76-87,94	85,31
BYT-8	% 20 MP	71,65-87,86	86,04
BYT-9	% 10 ATH	76,85-87,40	87,01
BYT-10	% 10 ATH	71,81-87,85	86,10
BYT-11	% 10 ÇB	64,00-87,62	85,43
BYT-12	% 20 ÇB	69,01-87,62	85,73
BYT-13	% 10 GRFT	78,61-87,07	85,69
BYT-14	% 20 GRFT	77,21-84,51	86,16

## 4.8. Küçük Alev Testi

### 4.8.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve sıvı TCPP, TDCP ve TEP katkılı rijit PU köpüklerin küçük alev testi sonucundaki görselleri Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin küçük alev testi sonuçları.

Alev geciktirici ajan içermeyen köpüğün standartta belirtilen 15 cm’lik alev boyunu geçtiği ve yandığı görülmüştür. %10 TCPP içeren PU köpük numunesinde alevin 20 cm ilerlediği, %20 TCPP içeren PU köpük numunesinde ise alevin 16 cm ilerlediği görülmüştür. Bu etkinin sebebi ise TCPP’nin klor ve fosfor içererek aleve maruz kaldığında kömür tabakası oluşturmasıdır (Küçükşenlik 2019).

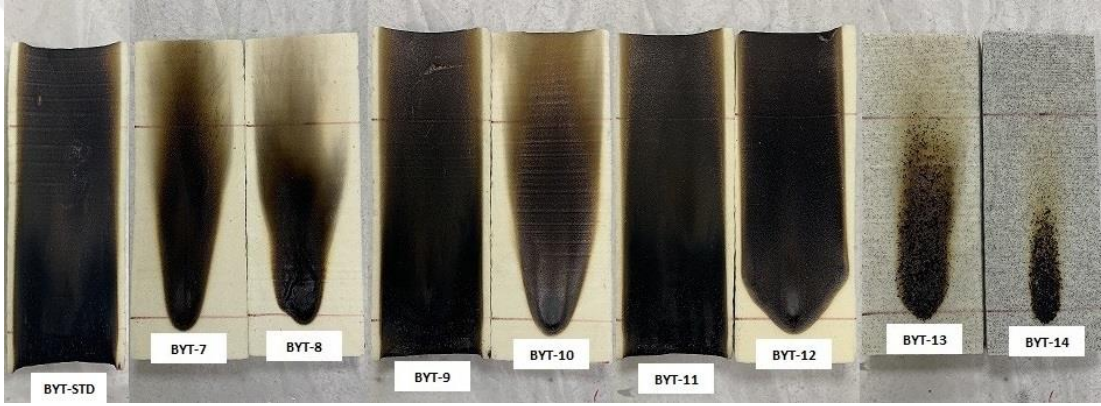
%10 TDCP içeren PU köpük numunesinde alevin 21 cm ilerlediği, %20 TDCP içeren PU köpük numunesinde ise alevin 17 cm ilerlediği görülmüştür. Bu, klor ve fosfor içeren TDCP’nin, aleve maruz kaldığında kömür tabakası oluşturmasından

kaynaklanmaktadır. TDCP rijit PU köpüklerin yanı sıra esnek poliüretan köpüklerin de alev geciktirici performansının iyileştirilmesi için kullanılan katkılardan bir tanesidir (Li vd, 2019).

%10 TEP içeren PU köpük numunesinde alevin 15 cm ilerlediği, %20 TEP içeren PU köpük numunesinde ise alevin 14 cm ilerlediği tespit edilmiştir. Bu, fosfor içeren TEP'in, aleve maruz kaldığında kömür tabakası oluşturmasından kaynaklanır (Küçükşenlik 2019).

#### 4.8.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkı rijit PU köpüklerin küçük alev testi sonucundaki görselleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin küçük alev testi sonuçları.

%10 MP içeren PU köpük numunesinde alevin 17 cm ilerlediği, %20 MP içeren PU köpük numunesinde ise alevin 12 cm ilerlediği tespit edilmiştir. MP oranının artmasıyla alev daha az ilerlemektedir. Bu etki, melamin ve fosfor içeren MP'nin aleve maruz kaldığında kömür tabakası oluşturmasından kaynaklanır (Küçükşenlik 2019; Li vd 2019; Czlonka vd 2020).

%10 ATH içeren PU köpük numunesinde köpüğün yandığı, %20 ATH içeren PU köpük numunesinde ise alevin 19 cm ilerlediği tespit edilmiştir. Alev geciktirici ajan olarak ATH'nin kullanımı, rijit PU köpüklerin termal dayanımını arttırmaktadır (Thirumal vd, 2010).

%10 ve %20 ÇB içeren PU köpük numunelerinde köpüklerin yandığı ancak %20 ÇB içeren PU köpük numunesinde alev daha az yayılmaktadır. ÇB oranı arttıkça

alevin daha az yayılması; ÇB'nin mineral alev geciktirici sınıfında olmasından kaynaklanmaktadır (Yıldız, 2006).

%10 GRFT içeren PU köpük numunesinde alev 12 cm ilerlerken, %20 GRFT içeren PU köpük numunesinde ise alevin 8 cm ilerlemektedir. Bu sonuç, GRFT'nin şişen alev geciktirici sınıfında olması ve aleve maruz kaldığında kömür tabakası oluşturmasından kaynaklanmaktadır (Strakowska vd, 2020).

#### **4.9. UL-94 (Dikey) Testi**

##### **4.9.1. Sıvı Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler**

UL 94 standardında köpük malzemeler için uygulanabilen dikey yanma testi sonuçları tutuşma, yanma, yanmanın ilerlemesi ve sönmesi ile ilgili bilgiler vermektedir (Aydoğan ve Usta, 2015).

TCP, TDCP ve TEP'in %10 ve %20 oranlarında rijit poliüretan köpük malzemeye ilave edilme durumunda, elde edilen köpük malzemelerin UL 94 dikey yanma testleri verileri, Tablo 4.16'da verilmiştir.

Poliüretan köpükler 2 çevrim ile yakılmıştır. Birinci çevrimde, köpük 10 saniye yakılmış ve sonrasında sönme süresi kaydedilmiştir. İkinci adımda da köpük 10 saniye yakılmış ve sonrasında sönme süresi kaydedilmiştir. Köpüklerin alevlerinin sönme sürelerine göre standardın belirttiği kategoriler belirlenmiştir. Sonuçlara göre TCP, TDCP, TEP miktarı arttığında alev geciktirici seviyesinin iyileştiği görülmüştür.

Tablo 4.16. Sıvı alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin UL-94 (Dikey) testi sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajanı	Kriter	1. Numune	2. Numune	Kategori
BYT-STD	-	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-1	%10 TCPP	1. Alev Sonucu	27	23	V-1
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	19	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-2	%20 TCPP	1. Alev Sonucu	9	7	V-0
		2. Alev Sonucu	8	6	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-3	%10 TDCP	1. Alev Sonucu	25	26	V-1
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-4	%20 TDCP	1. Alev Sonucu	10	5	V-0
		2. Alev Sonucu	10	0	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-5	%10 TEP	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-6	%20 TEP	1. Alev Sonucu	15	12	V-1
		2. Alev Sonucu	2	2	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	

#### 4.9.2. Toz Alev Geciktirici Ajan Katkılı Rijit Poliüretan Köpükler

Standart ve toz MP, ATH, ÇB ve GRFT katkılı rijit PU köpüklerin UL-94 (Dikey) testi sonuçları Tablo 4.17’de gösterilmiştir. Köpüklerin alevlerinin sönmeye sürelerine göre standardın belirttiği kategoriler belirlenmiştir. Sonuçlara göre MP, ATH, ÇB ve GRFT ve miktarı arttığında alev geciktirici seviyesinin iyileştiği görülmüştür.

Standart, %10 ve %20 alev geciktirici ajanı katkılı köpükler karşılaştırıldığında, alev geciktirici ajanı miktarı arttığında PU köpüklerinin alev geciktirici seviyelerinde iyileşme görülmüştür.

Tablo 4.17. Toz alev geciktirici ajan katkılı rijit poliüretan köpüklerin UL-94 (Dikey) testi sonuçları.

Numune Adı	Alev Geciktirici Ajanı	Kriter	1. Numune	2. Numune	Kategori
BYT-STD	-	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-7	%10 MP	1. Alev Sonucu	17	19	V-1
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-8	%20 MP	1. Alev Sonucu	5	5	V-0
		2. Alev Sonucu	3	3	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-9	%10 ATH	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-10	%20 ATH	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-11	%10 ÇB	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-12	%20 ÇB	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Evet	Evet	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-13	%10 GRFT	1. Alev Sonucu	>30	>30	Kategori Dışı
		2. Alev Sonucu	Yanmadı	Yanmadı	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	
BYT-14	%20 GRFT	1. Alev Sonucu	1	1	V-0
		2. Alev Sonucu	0	0	
		Alev numunenin en üst noktasına ulaştı mı?	Hayır	Hayır	
		Alev damlaları ile pamukta tutuşma oldu mu?	Hayır	Hayır	

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında kapsamında, PU köpüklere sıvı formda tris (1-kloro-2 propil) fosfat (TCPP), tris (1,3-dikloro-2-propil) fosfat (TDCP), trietil fosfat (TEP), toz formda melamin polifosfat (MP), alüminyum trihidrat (ATH), çinko borat (ÇB), grafit (GRFT) alev geciktirici ilavesinin morfolojik, mekanik, termal ve alev geciktiricilik özelliklerdeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca katkı etkisinin tespit edilmesi amacıyla saf poliüretan da sentezlenerek özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen PU köpüklerin özellikleri çeşitli analiz yöntemleri ile incelenmiştir.

- Reaksiyon profili ve viskozite testleri sonuçlarına göre, kullanılan alev geciktiricilerin PU köpüklerdeki reaksiyon sürelerini ve viskozitelerini değiştirdiği gözlenmiştir. Toz alev geciktirici ajanların, sıvı alev geciktirici ajanlara göre rijit PU köpük reaksiyon sürelerini daha uzattığı görülmüştür. Toz alev geciktirici ajanların reaksiyon sürelerini daha da uzatması maliyetin bir miktar daha artacağı anlamına gelecektir.

- SEM görüntüleri incelendiğinde sıvı alev geciktirici ajan içeren rijit PU köpüklerde gözeneklerin homojen olduğu ve bu sayede mekanik dayanımı olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Toz alev geciktirici ajan içeren rijit PU köpüklerde, büyük/küçük gözeneklerin oluşumunun mekanik dayanımı düşürdüğü saptanmıştır.

- PU köpüklerin mekanik özellikleri ISO 844:2021 standardı doğrultusunda Instron cihazı ile analiz edilmiştir. PU köpüklerdeki alev geciktirici ajan miktarının artmasıyla %10 TEP içeren BYT-5, %10 MP içeren BYT-7, %10 ve %20 ÇB içeren BYT-11 ve BYT-12 haricindeki köpüklerde mekanik dayanımın arttığı görülmüştür. Ayrıca sıvı ve toz yanmazlık ajanlarının miktarının artmasıyla serbest yoğunlukların arttığı ve bu doğrultuda mekanik özelliklerin iyileştiği gözlenmiştir. Serbest yoğunluk sonuçları ile mekanik dayanım sonuçları paralel olarak ilerlemiştir. Mekanik özelliklerin iyileşmesi PU köpüklerin tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır.

- Termal özellikler, TGA ve DSC analizleri ile belirlenmiştir. TGA analizlerine göre, köpüklerdeki kütle kayıpları alev geciktirici ajan katkı miktarının artmasıyla düşmüştür. Kalan kütle oranının %20'yi geçtiği üç köpüğün %10 MP içeren BYT-7, %20 MP içeren BYT-8 ve %20 GRFT içeren BYT-14 olduğu görülürken, en az kütle kaybının ise %20 GRFT içeren BYT-14 köpüğünde olduğu görülmüştür.

- Alev geciktirici ajanların, PU köpüğün performansına etkisi, ISO 11925-2 küçük alev testleri, UL-94 (Dikey) testleri ile incelenmiştir. ISO 11925-2 küçük alev testi sonuçlarına göre, %10 ATH içeren BYT-9, %10 ÇB içeren BYT-11 ve %20 ÇB içeren BYT-12 köpüklerinin yandığı, diğer köpüklerde ise alev geciktirici ajan katkısının miktarı arttığında alevin daha az ilerlediği görülmüştür. %10 ve %20 ÇB içeren ve yanan BYT-11 ve BYT-12 köpükleri daha detaylı incelendiğinde ise %20 ÇB içeren köpükte yayılmanın daha az olduğu tespit edilmiştir. En iyi performansın ise toz olan %20 GRFT içeren BYT-14'te olduğu gözlenmiştir.

- UL-94 testi sonuçlarına göre, BYT-STD, %10 TEP içeren BYT-5, %10 ATH içeren BYT-9, %20 ATH içeren BYT-10, %10 ÇB içeren BYT-11, %20 ÇB içeren BYT-12 ve %10 GRFT içeren BYT-13 köpüklerinin standartta verilen kategoriye girmediği, ancak diğer köpüklerin alev geciktirici ajan katkı miktarının artmasıyla performansının iyileştiği görülmüştür. %20 TCPP içeren BYT-2,%20 TDCP içeren BYT-4 ve %20 MP içeren BYT-8, %20 GRFT içeren BYT-14 numuneleri V-0 kategorisinde çıkarak en iyi performansı gösteren köpükler olmuşlardır.

Polimerik malzemelerin yanması sırasında açığa çıkan zehirli ve toksik gazlar, insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Alev geciktirici katkı malzemeleri ile bu tip felaketleri önlemek mümkündür. Yaygın olarak bu amaja yönelik halojenli katkı malzemeleri kullanılmaktadır ancak bu malzemeler yanma sırasında çevreye zararlı yanıcı gazlar açığa çıkmasına neden olur. Bu nedenle, halojenli alev geciktiricilerin kullanımının kısıtlandığı ve yasaklandığı günümüzde, alev geciktirici malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. %20 GRFT içeren BYT-14 köpüğünün en iyi termal özellikleri sağladığı görülmüştür. Bu doğrultuda tez çalışmasının, yeni yapılacak katma değerli çalışmalara yol gösterici ve yönlendirici olması, toz yanmazlık ajanlarının kullanım miktarlarının artırılması için Ar-Ge çalışmalarına yönelmesi öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akdoğan, E. 2018. Effects of some additives on the properties of rigid polyurethane foams: flame retardancy, thermal conductivity and compressive strength. MSc. Thesis, Anadolu University Chemistry Department, Eskişehir.
- Altıntaş, Z. 2012. Termoplastik poliüretan sentezi ve kompozit hazırlama uygulamaları. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Aydoğan, B., Usta, N. 2015. Nanokil ve kabaran alev geciktirici ilavesinin rijit poliüretan köpük malzemelerin isil bozunma ve yanma davranışlarına etkilerinin incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 30(1), 9-18.
- Backus, J. K., Klempner, D. and Frisch, K. C. 1991. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. Hanser Publishers, Munich.
- Członka, S., Strąkowska, A., Strzelec, K., Kairyte, A. and Kremensas, A. 2020. Melamine, silica, and ionic liquid as a novel flame retardant for rigid polyurethane foams with enhanced flame retardancy and mechanical properties. *Polymer Testing*, 87, 106511.
- Çalışkan, E. 2017. Synthesis and characterization of rigid polyurethane foam containing phosphorus based flame retardant. M.Sc. Thesis, Istanbul Technical University Department of Polymer Science and Technology, İstanbul.
- Dede, M. 2016. DOPO içeren monomerlerin sentezi, sarakterizasyonu ve poliester, poliüretan formülasyonunda kullanılarak alev geciktirici özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Efstathiou, K. 2008. *Synthesis and characterization of a polyurethane prepolymer for the development of a novel acrylate-based polymer foam*. Budapest University of Technology and Economics (BME) Budapest.
- Güler, T. 2017. Mechanical, thermal and flammability properties of huntite hydromagnesite reinforced polyurethane elastomer. Master Of Science Thesis, Middle East Technical University Polymer Science And Technology, Ankara.
- Güney, S. Y., Ünlü, K. C. and Hüten, T. 2021. Eva equivalent polyurethane slipper and sneaker systems *Putech & Composites*:2667-4548, 48-51.
- Hamidov, M. 2020. Fosfor içeren yanma geciktirici poliüretan köpüklerin geliştirilmesi. Marmara Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Hejna, A., Kirpluks, M., Kosmela, P., Cabulis, U., Haponiuk, J. and Piszczyk, Ł. 2017. The influence of crude glycerol and castor oil-based polyol on the structure and performance of rigid polyurethane-polyisocyanurate foams. *Industrial Crops and Products*, 95, 113-125.
- Intelligence, M. 2021. *Polyurethane market - growth, trends, covid-19 impact, and forecasts (2021 - 2026)*. Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyurethane-market>
- Jimenez, J., Shutov, P. L., Felsted, W. N. I., Rose, M. M. and Micheletti, D. 2013. US Patent No. International Publication.
- Kabakci, E., Sayer, G., Suvaci, E., Uysal, O., Güler, İ. and Kaya, M. 2017. Processing-structure-property relationship in rigid polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 134:21.
- Kadkin, O., Osajda, K., Kaszynski, P. and Barber, T. A. 2003. Polyester polyols: Synthesis and characterization of diethylene glycol terephthalate oligomers. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 41:8, 1114-1123.

- Kong, X., Liu, G., Qi, H. and Curtis, J. M. 2013. Preparation and characterization of high-solid polyurethane coating systems based on vegetable oil derived polyols. *Progress in Organic Coatings*, 76:9, 1151-1160.
- Kosmela, P., Gosz, K., Kazimierski, P., Hejna, A., Haponiuk, J. T. and Piszczyk, Ł. 2019. Chemical structures, rheological and physical properties of biopolyols prepared via solvothermal liquefaction of *Enteromorpha* and *Zostera marina* biomass. *Cellulose*, 26:10, 5893-5912.
- Kosmela, P., Hejna, A., Suchorzewski, J., Piszczyk, L. and Haponiuk, J. T. 2020. Study on the structure-property dependences of rigid PUR-PIR foams obtained from marine biomass-based biopolyol. *Materials (Basel)*, 13:5.
- Küçükşenlik, N. Z. 2019. Alev geciktirici katkıların poliüretan köpüğün termal ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Kocaeli.
- Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M. and Dubois, P. 2009. New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63:3, 100-125.
- Lee, L. J., Zeng, C., Cao, X., Han, X., Shen, J. and Xu, G. 2005. Polymer nanocomposite foams. *Composites sciences and technology*:65, 2344-2363.
- Lee, S.-T., Park, C. B. and Ramesh, N. S. 2007. *Polymeric foams: science and technology*. Taylor and Francis Group, Oxfordshire.
- Levchik S. V., & Weil E. D. 2004. Thermal decomposition, combustion and fire-retardancy of polyurethanes—a review of the recent literature. *Polymer International*, 53(11), 1585-1610.
- Lim, H., Kim, S. H. and Kim, B. K. 2008. Effects of silicon surfactant in rigid polyurethane foams. *eXPRESS Polymer Letters*, 2(3), 194-200.
- Liu, W., Zhang, Z. and Ge, X. 2017a. Study on fire performance and pyrolysis of polyurethane foam material containing DMMP/TCPP. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 23:1, 38-44.
- Liu, X., Salmeia, K. A., Rentsch, D., Hao, J. and Gaan, S. 2017b. Thermal decomposition and flammability of rigid PU foams containing some DOPO derivatives and other phosphorus compounds. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 219-229.
- Lonescu, M. 2005. *Chemistry and technology of polyols for polyurethanes*. Rapra Technology Limited, Shawbury.
- Lyons, J. W. 1970. *The chemistry and uses of fire retardants*. Wiley-Interscience, Hoboken.
- Modesti, M., Lorenzetti, A. and Besco, S. 2007. Influence of nanofillers on thermal insulating properties of polyurethane nanocomposites foams. *Polymer Engineering & Science*, 47:9, 1351-1358.
- Morgan, A. B. and Worku, A. Z. 2015. *Kirk-othmer encyclopedia of chemical technology*. John Wiley & Sons, New York.
- Oğuz, N. 2018. Farklı hammaddelerden poliüretan köpüklerin hazırlanması ve karakterizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Öz, M. K. 2006. Yanmaya karşı dirençli (FR) ve katyonik boyalarla boyanabilen (CD) polyester üretimi ve bu polyesterin elyaf prosesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Adana.

- Özcan, T. 2021. Alev geciktirici katkı içeren polipropilen kompozitlerin karakterizasyonu ve yanma özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Özenler, S. 2015. Sert poliüretan köpük üretiminde kullanılmak üzere polieter poliöl sentezi ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Özveren, N. 2015. The production of bio-based polyurethane foams from biodiesel residues. Master Thesis, İzmir Kâtip Çelebi University Material Science And Engineering Department, İzmir.
- Petrovic, Z. S., Ionescu, M. and Javni, I. 2014. US Patent No. US 2014/0221696A1. US Patent Application.
- Pişkin, A. E. 2021. Flokser kimya çatı ve cephe panel sistemleri. *Putech & Composites*:59, 32-34.
- Kimpur Poliüretan, 2020. *Sürdürülebilirlik raporu*. Retrieved from <https://kimpur.com/wp-content/uploads/2021/12/Kimpur-2020-u%CC%88rdu%CC%88ru%CC%88lebilirlik-Raporu-1.pdf>
- Randall, D. and Lee, S. 2002. *The polyurethanes book*. Huntsman Polyurethanes, Everberg.
- Saçak, M. 1998. *Polimer kimyasına giriş*. A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara.
- Saçak, M. 2005. *Polimer teknolojisi*. Gazi Kitabevi, Ankara.
- Sarper, K. 2019. Kil katkıların sert poliüretan köpüklerin ısı iletkenlik ve basma dayanımı özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Saunders, J. H. and Frisch, K. C. 1962. *Polyurethanes: Chemistry and technology*. Interscience Publishers, New York.
- Savaş, L. A. 2019. Metal hipofosfitler ile katkılandırılmış heteroatom içeren polimerlerin güç tutuşurluk özelliklerinin incelenmesi ve çinko borat ile sinerjik etkileşiminin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.
- Shen, J. 2006. Application of nanoparticles in polymeric foams. Ph.D. Thesis, The Ohio State University Adviser Graduate Program in Chemical Engineering, Columbus.
- Silva, A. L. and Bordado, J. C. 2004. Recent Developments in Polyurethane Catalysis: Catalytic Mechanisms Review. *Catalysis Reviews*, 46:1, 31-51.
- Singh, J. and Dubey, R. C. 2009. *Organic polymer chemistry*. Global Media, India.
- Singh, S. N. 2001. *Blowing Agents for polyurethane foams*. iSmithers Rapra Publishing, Shrewsbury.
- Sonnenschein, M. F. 2015. *Polyurethanes science, technology, markets, and trends*. John Wiley & Sons, Inc., Wiley, Canada.
- Strąkowska, A., Członka, S., Konca, P. and Strzelec, K. 2020. New flame retardant systems based on expanded graphite for rigid polyurethane foams. *Applied Sciences*, 10:17.
- Szycher, M. 1999. *Szycher's handbooks of polyurethanes second edition*. Boca Raton, CRC Press.
- Thirumal, M., Singha, N. K., Khastgir, D., Manjunath, B. S. and Naik, Y. P. 2010. Halogen-free flame-retardant rigid polyurethane foams: Effect of alumina trihydrate and triphenylphosphate on the properties of polyurethane foams. *Journal of Applied Polymer Science*, NA-NA.

- Thomas, S., Rane, A. V., Kanny, K., V.K., A. and Thomas, M. G. 2018. *Recycling of polyurethane foams*. Elsevier, Norwich.
- Thomson, T. 2005. *Polyurethanes as specialty chemicals*. CRC Press, Boca Raton.
- Tu, Y. C., Kiatsimkul, P., Suppes, G. and Hsieh, F. H. 2007. Physical properties of waterblown rigid polyurethane foams from vegetable oil-based polyols. *Journal of Applied Polymer Science*:105, 453-459.
- Ülker, Ü. 2019. Serbest izosiyanat içermeyen, silan sonlu tek bileşenli poliüretan köpük hazırlanması. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Rize.
- Yang, L.-T., Zhao, C.-S., Dai, C.-L., Fu, L.-Y. and Lin, S.-Q. 2011. Thermal and Mechanical Properties of Polyurethane Rigid Foam Based on Epoxidized Soybean Oil. *Journal of Polymers and the Environment*, 20:1, 230-236.
- Yaylacı, A. 2008. Piridin aldoksimlerin bazik ortamda alifatik aromatik izosiyanatlarla alkilasyon reaksiyonlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı
- Yenen, E. 2020. Sert poliüretan köpük uygulamalarında kullanılmak üzere asit indisi düşük poliester poliollerin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yerleşti, D. 2017. Fosfor grupları içeren epokside soya yağı esaslı poliollerin sentezi ve alev geciktirici özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yetgin, S. H. and Ünal, H. 2008. Polimer Esaslı Köpük Malzemeler. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*:17, 117-128.
- Yıldız, B. 2006. Çinko borat katkılı poliüretan filmlerin hazırlanması ve karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Yıldız, B. 2016. New functional polyols for polyurethanes. Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University Department of Polymer Science and Technology, İstanbul.
- Yivlik, L. Y. 2016. Modifiye ketonik reçinelerin poliüretan üretiminde kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zhang, X. D., Macosko, C. W., Davis, H. T., Nikolov, A. D. and Wasan, D. T. 1999. Role of silicone surfactant in flexible polyurethane foam. *Journal of Colloidal and Interface Science*, 215 (2), 270-279.

## ÖZ GEÇMİŞ

Berk YAMAN, Hadımköy Toki Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden 2017 yılında mezun oldu. 2019 yılında OMÜ LEE Kimya Mühendisliği Yüksek Lisans programını girdi. Mezuniyetinden bu yana Kalite ve Müşteri İlişkileri Uzmanı olarak görev yapan Berk YAMAN, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

### İletişim Bilgileri

Öğrenci no : 18211260

ORCID ID : 0000-0001-9497-1438