

**SİLİKON ELASTOMERLERİN SÖNÜMLEME ÖZELLİĞİNİ
KONTROL EDEN YAPISAL PARAMETRELERİN
BELİRLENMESİ**

**IDENTIFICATION OF STRUCTURAL PARAMETERS
CONTROLLING DAMPING PROPERTY OF SILICONE
ELASTOMERS**

GÖZDE BİRİNCİ

PROF. DR MURAT ŞEN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2020

Her zaman beni destekleyen canım aileme...

ÖZET

SİLİKON ELASTOMERLERİN SÖNÜMLEME ÖZELLİĞİNİ KONTROL EDEN YAPISAL PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ

Gözde BİRİNCİ

Yüksek Lisans, POLİMER BİLİMİ VE TEKNOLOJİSİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat ŞEN

Haziran 2020, 95 sayfa

Silikon kauçuklar günümüzde endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir. Diğer kauçuk türlerine göre birçok avantajı vardır. Bunlardan başlıcaları; yüksek ve düşük sıcaklıklarda özelliklerinin değişmemesi, iklim koşullarından etkilenmemesi, çok yüksek yalıtım özelliği göstermesidir. Bu ve bunun gibi birçok avantajından dolayı günümüzde elektrik-elektronik sektörü, otomotiv sektörü, gıda, tıp ve inşaat sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır.

Ses, basınç dalgaları tarafından yaratılan bir olgudur. Ancak sürekli ses makinelerde enerjinin boşa harcanmasına neden olmaktadır. Silikon elastomerler de yüksek sönümlenme kapasitesine sahip olmasından dolayı makinelerde boşa harcanan enerjinin engellemesinde oldukça önemli bir yere sahiptir.

Bu tezde silikon elastomerlerin enerji sönümlenme özelliklerini kontrol eden yapısal parametrelerin belirlenmesine çalışılmıştır. İlk olarak farklı kaynaklardan

elde edilen silikon tipleri kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır. Hareketli Kalıp Reometresi (MDR) cihazında 180 °C ve 20 dakika süresince karışımların pişme özellikleri incelenmiştir. MDR cihazındaki sonuçlardan en yüksek delta tork değeri Silplus 80 silikonunda elde edilmiştir. R752/50 ise en düşük delta tork değerine sahiptir.

Kopma uzama eğrileri incelendiğinde en fazla uzamanın R752/50 silikon elastomer örneğine ait olduğu görülmüştür. Silplus 80 ve Ravasil 70 örneklerinde en az uzama değeri elde edilmiştir.

Çapraz bağ yoğunluğu Kauçuk Proses Analizörü (RPA) cihazında frekans taraması yapılarak belirlenmiştir. En yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan örnek Silplus 80 silikon elastomerinde elde edilmiştir en düşük çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan elastomer R752/50 dir. Pişmiş ve pişmemiş örneklerde gerinim taraması yapmak için frekans 1,0 Hz'de sabit tutulurken, 50 °C'da gerinim taraması yapılmıştır. Gerinim aralıkları ise 0,007-12,942° dir. Strain (gerinim) taraması malzemedeki Payne etkisini görmek amacıyla yapılmıştır. En büyük delta G' değerleri arasındaki fark Silplus 70 örneğinde görülmüştür. En düşük G' değerleri arasındaki fark R752/50 örneğine aittir. G' değerinin küçük olması da daha düşük Payne etkisi, daha güçlü dolgu maddesi-polimer etkileşimi ve daha iyi dolgu maddesi dağılımı anlamına gelmektedir.

Termal Gravimetrik Analiz (TGA) sonuçlarına baktığımızda en yüksek bozulma sıcaklığı Ravasil 70 örneğine ait olup sıcaklık değeri de 606,0 ° C'dir. En düşük bozulma sıcaklığı R752/50 örneğimize ait olup 532,5 °C'dir.

Silikon elastomerlerin bu temel karakterizasyon çalışmalarından sonra enerji sönümlenme özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla,

Sıcak pres kullanılarak disk şeklinde örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan disklere Evrensel Test Cihazı kullanılarak tek yönlü %10,%20,%30, %40 ve %50 oranlarda 10 döngülü sıkıştırma testi yapılmıştır. Sıkıştırma testi verilerinden yararlanılarak birim hacim başına absorplanan enerji değerleri bulunmuştur. Hareketli kalıp reometresinde de en yüksek delta tork değerine sahip olan Silplus 80'in en yüksek absorplanan enerji değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların sonunda enerji sönümlenme özellikleri ile silikonun sertlik ve çapraz bağ yoğunluğu gibi yapısal parametreleri ile enerji sönümlenme özellikleri arasında bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

Çapraz bağ yoğunluğu artırılarak enerji sönümlenme özelliğinin artırılacağına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Silikon elastomer, sönümlenme, payne etkisi, çapraz bağ yoğunluğu, reoloji

ABSTRACT

Identification of Structural Parameters Controlling Damping Property of Silicone Elastomers

Gözde BİRİNCİ

Master of Science, Department of Polymer Science and Technology

Supervisor: Prof. Dr. Murat ŞEN

June 2020, 95 pages

Silicone elastomers are one of the synthetic elastomer used in many areas. Silicone elastomers have many advantages comparison to other elastomers. The main ones are that their properties do not change at high and low temperatures, not affected by climate conditions, and also they show very high insulation properties. Because of this and many such advantages, silicone elastomers often used today in the electrical-electronics sector, automotive sector, food, medicine and construction sector. Sound is a phenomenon that is created by pressure fluctuations. Continuous sound has caused waste of energy in machines. Silicone elastomers also have play a very important role in preventing wasted energy in machines due to their high damping capacity.

Aim of this thesis is to identificate of structural parameters controlling damping property of silicone elastomer. Six different silicone elastomer mixtures have

been prepared. The vulcanization properties of the mixtures were examined in the moving mold rheometer (MDR) device for 180 °C and 20 minutes. The Silplus 80 has the highest delta torque value, the R752 / 50 has the lowest delta torque according to the results of MDR device. According to the result of tensile test, the maximum elongation was found to belong to R752/50. Silplus 80 and Ravasil 70 also have minimum elongation values. Silplus 80 and Ravasil 70 are harder material and the R752 / 50 is more flexible. The crosslink density was determined by using frequency sweep in the rubber process analyzer (RPA) device. According to the result of frequency sweep, the sample with the highest cross-link density is Silplus 80 and the sample with the lowest cross-link density is R752 / 50, which is 0.0967. The strain sweep was performed to examine the Payne effect on the material. The difference between the largest delta G' values were observed in the Silplus 70 sample. The difference between the lowest G' values belong to R752/ 50. A smaller G' value also means lower Payne effect, stronger filler-polymer interaction and better filler distribution. As a results of thermal gravimetric analysis (TGA), the highest distortion temperature belongs to Ravasil 70 sample and the temperature value is 606.03 °C. The lowest distortion temperature is 532.50 °C which belongs to R752/50.

Energy damping properties of silicone elastomers were studied after these basic characterization studies. For this purpose,

To observe the compressive behavior of the mixtures, a 10-cycle compression test was applied under 10%, 20%, 30%, 40% and 50% compression ratio. Curves obtained from compression test, the absorbed energy values of the mixtures were calculated and the damping properties of the mixtures were determined. Silplus 80, which has the highest delta torque value on the moving die rheometer, has the highest absorbed energy value. To conclude, it was observed that there was a relationship between the energy damping properties and the structural parameters of silicone, such as hardness and crosslink density, and the energy damping properties. It was concluded that the energy damping property would be increased by increasing the crosslink density.

Keywords: Silicone elastomer, payne effect, crosslink density, thermal analysis ,rheology, damping.

TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmam sűresince bilgi ve tecrűbesiyle bana her zaman destek olan verimli bir yűksek lisans sűreci geçirmemi saėlayan Sayın Prof. Dr. Murat Ően'e çok teŐekkűr ederim. Tez çalıŐmam sűresince desteklerini hiç esirgemeyen Davut Aksűt'e çok teŐekkűr ederim. Yűksek lisansı bitirmemde destek olan sayın műdűrűm iėdem BaŐara'ya teŐekkűr ederim. Hacettepe Ŭniversitesi, Kimya Bűlűmű Polimer Kimyası Ana Bilim Dalındaki tűm űėretim űyelerine de desteklerinden dolayı ayrıca teŐekkűr ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan canım aileme çok teŐekkűr ederim.

Gűzde BİRİNCİ

Haziran, Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Elastomerler	3
2.2. Silikon Elastomerler	3
2.3.Silikon Elastomerlerin Endüstriyel Uygulamaları	6
2.4. Elastomer Hamurunun Hazırlanması	8
2.5. Vulkanizasyon	9
2.5.1. Kükürt Vulkanizasyonu.....	9
2.5.2. Peroksit Kürleşmesi	10
2.5.2.1. Peroksitlerin Sınıflandırılması.....	10
2.6.Hızlandırıcılar	11
2.7. Silikon Elastomerlerin Isıl Özellikleri.....	13
2.8. Histeresis	13
2.9. Elastomer ve Sönümlenme	15
2.10. Mullin Etkisi	15
3.DENEYSEL YÖNTEMLER.....	18
3.1.Kullanılan Malzemeler	18
3.2.1. Kauçuk Hamurlarının Hazırlanması	18
3.2.2. Test Plakaların ve Disklerin Hazırlanması	19
3.3.Deneysel Ölçümler	20
3.3.1. Reolojik Analizler.....	20
3.3.1.2.Mooney Vizkozimetre	22
3.3.1.3. Kauçuk Proses Analizörü (RPA)	22
3.3.2. Mekanik Analizler	24

3.3.3. Isıl Özellikler	25
3.3.4. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)	25
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
4.1. Silikon Kauçukların Karakterizasyonu	26
4.1.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi	26
4.1.2. Silikon Kauçukların Isıl Özellikleri.....	29
4.1.3. Mooney Vizkozimetri	34
4.1.4. Silikon Karışımların Pişme Davranışlarının İncelenmesi	35
4.1.5. Kauçuk Proses Analizörü (RPA) ile Çapraz Bağ Yoğunluğunun Belirlenmesi.....	40
4.2. Silikon Elastomerlerin Enerji Sönümlenme Özelliklerinin İncelenmesi	49
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	70
6. KAYNAKLAR.....	76
7. EKLER	81
EK-1	81
EK-2	82
EK-3.....	83
EK-4.....	84
EK-5.....	85
EK-6	86
EK-7	87
EK-8	88
EK-9.....	89
EK-10	90
EK-11	91
EK-12	92
EK-13.....	93
EK-14.....	94
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Silikon elastomerin genel kimyasal yapısı.	4
Şekil 2.2. Silikon elastomerin otomotiv endüstrisinde kullanım alanı.....	6
Şekil 2.3. Silikon elastomerin tıp ve sağlık endüstrisinde kullanım alanı.	6
Şekil 2.4. Silikon elastomerin elektrik endüstrisinde kullanım alanı.....	7
Şekil 2.5. Silikon elastomerin mutfak ekipmanlarında kullanım alanı.	7
Şekil 2.6. Silikon elastomerin sönümlenme (damping) olarak endüstride kullanım alanı.	7
Şekil 2.7. Kükürt vulkanizasyonun şematik gösterimi.	10
Şekil 2.8. Peroksitle vulkanizasyonun şematik gösterimi.	10
Şekil 2.9. Histeresis eğrisi.	14
Şekil 2.11. %10 ve %20 oranında 1.ve 2. döngülü sıkışma- gevşeme eğrileri. 16	
Şekil 3.1. Kullanılan hızlandırıcı Triallik izosiyanurat'ın (TAIC) kimyasal yapısı.	18
Şekil 3.2. Kullanılan çapraz bağlayıcı Peroksit 2,5- Dimetil- 2,5-di(tersiyer- bütülperoksi) hekzan'ın (DBPH) kimyasal yapısı.....	19
Şekil 3.3. Thermo HAAKE Rheomix Mikser ve Banbury Tip Mil.....	19
Şekil 3.4. Brabender Polystat200T Hidrolik Pres.....	20
Şekil 3.5. Disk hazırlanmasında kullanılan kalıp ve cure edilmiş disk numunesi.	20
Şekil 3.6. Hareketli Kalıp Reometresi (MDR).	21
Şekil 3.7. Tipik bir reometre eğrisi.	22
Şekil 3.8. Mooney vizkozimetresi test cihazı.	22
Şekil 3.9. TA Instrument- Elite marka RPA cihazı.	23
Şekil 3.10. Zwick Z010 Universal Test Cihazı ve sıkıştırma testinde kullanılan disk.....	24
Şekil 3.11. Kuvvet-Uzama testlerinde kullanılan kupon numune.....	24
Şekil 3.12. Perkin Elmer Pyris II Termal Gravimetrik Analiz cihazı(TGA).	25
Şekil 3.13. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) cihazı.	25
Şekil 4.1. R752/50 örneğinin FTIR spektrumu.....	26
Şekil 4.2. R760/70 örneğinin FTIR spektrumu.....	26
Şekil 4.3. Silplus 70 örneğinin FTIR spektrumu.....	27

Şekil 4.4. Silplus 80 örneğinin FTIR spektrumu.....	27
Şekil 4.5. Xiameter 70 örneğinin FTIR spektrumu.....	27
Şekil 4.6. Ravasil 70 örneğinin FTIR spektrumu	28
Şekil 4.7. R752/50 örneğinin TGA eğrisi.	29
Şekil 4.8. R760/ 70 örneğinin TGA eğrisi.	29
Şekil 4.9. Silplus 70 örneğinin TGA eğrisi.	30
Şekil 4.10. Silplus 80 örneğinin TGA eğrisi.	30
Şekil 4.11. Xiameter 70 örneğinin TGA eğrisi.....	31
Şekil 4.12. Ravasil 70 örneğinin TGA eğrisi.	31
Şekil 4.13. Çapraz bağlanmamış silikon kauçukların Mooney vizkozite eğrileri.	34
Şekil 4.14. Silikon karışımların MDR'de elde edilen pişme eğrileri.....	36
Şekil 4.15. Silikon kauçuk karışımların delta tork değerleri.	39
Şekil 4.16. R752/50 silikon elastomeri için elastik modülün frekans ile değişimi.	40
Şekil 4.17. R752/50 silikon elastomeri için elastik modülün frekans ile değişimi türev grafiği.	41
Şekil 4.18. Silikon elastomerlerin frekans taraması.....	42
Şekil 4.19. Silikon elastomerlerin frekans taraması türev eğrisi.	43
Şekil 4.20. Silikon elastomerlerin gerilim-uzama eğrileri.	46
Şekil 4.21. Silikon elastomerlerin gerinim taraması.....	47
Şekil 4.22. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 1. döngüdeki histeresis eğrileri.	50
Şekil 4.23. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 2. döngüdeki histeresis eğrileri.	50
Şekil 4.24. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 3. döngüdeki histeresis eğrileri.	51
Şekil 4.25. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 4. döngüdeki histeresis eğrileri.	51
Şekil 4.26. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 5. döngüdeki histeresis eğrileri.	52
Şekil 4.27. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 6. döngüdeki histeresis eğrileri.	52

Şekil 4.28. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 7. döngüdeki histeresis eğrileri.	53
Şekil 4.29. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 8. döngüdeki histeresis eğrileri.	53
Şekil 4.30. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 9. döngüdeki histeresis eğrileri.	54
Şekil 4.31. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 10. döngüdeki histeresis eğrileri.	54
Şekil 4.32. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırmada 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.	55
Şekil 4.33. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırmada 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.	56
Şekil 4.34. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırmada 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.	57
Şekil 4.35. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırmada 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.	58
Şekil 4.36. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırmada 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.	59
Şekil 4.37. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırmada 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.	60
Şekil 4.38. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.	61
Şekil 4.39. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.	62
Şekil 4.40. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.	64
Şekil 4.41. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.	65
Şekil 4.42. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.	66
Şekil 4.43. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.	67
Şekil 4.44. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.	68

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1. Farklı özelliklere sahip silikon elastomerler.	4
Tablo 2.2. Peroksitlerin avantaj ve dezavantajları.	11
Tablo 2.3. Yaygın kullanılan Tip I ve Tip II ko-ajanları.....	12
Tablo 2.4. Silikon elastomerlerin ısı bozunma aşamaları.	13
Tablo 2.5. Elastomer ve plastiklerin camsı geçiş sıcaklıkları (T _g).	15
Tablo 4.1. Silikon elastomerlerin ısı özellikleri.	33
Tablo 4.2. Ham silikon kauçukların Mooney vizkozite değerleri.	35
Tablo 4.3. Silikon elastomerlerin hazırlanmasında kullanılan reçeteler.....	36
Tablo 4.4. Silikon elastomerlerin reolojik özellikleri.	38
Tablo 4.5. Silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunlukları.	44
Tablo 4.6. Silikon elastomerlerin mekanik özellikleri.	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

g	gram
cm	santimetre
mm	milimetre
mJ	milijoule
MJ	megajoule
N	Newton
MPa	megapaskal
kPa	kilopaskal
rpm	dakikada dönüş hızı
R	Üniversal gaz sabiti
T	Sıcaklık
Tg	Camsı geçiş sıcaklığı
Å	Angstrom

Kısaltmalar

FT- IR	Fourier transform infrared spektroskopi
MDR	Hareketli Kalıp Reometresi
RPA	Kauçuk Proses Analizörü
ODR	Salınımlı Disk Reometresi
CRI	Kür Hızı İndeksi
TAIC	Triallil izosyanürat
DBHP	2,5-Dimetil-2,5-di(tersiyer-bütilperoksi)hekzan
NR	Doğal Kauçuk
SBR	Stiren Bütadien Kaçuk
MQ	Metil- polisiloksan
PMQ	Fenil-metil-polisiloksan
VMQ	Vinil-metil-polisiloksan
PVMQ	Fenil-vinil-metil-polisiloksan
FMQ	Fluro-metil-polisiloksan

ZDA	Çinko Diakrilat
ZDMA	Çinko Dimetakrilat
PBDDA	Poli Bütadien Diakrilat
TAC	Triallil Syanürat
TMA	Üçfonksiyonel Metakrilat Ester
PDM	N,N'-M-Fenilen Dimaleimid
HVPBD	Yüksek Vinil Poli Bütadiene
M _L	Minimum Tork
M _H	Maksimum Tork
ts ₂	Ön vulkanizasyon (scorch) süresi
t ₉₀	Maksimum tork değerinin %90'ına ulaştığı süre

1. GİRİŞ

Ses, bir nesnenin vibrasyonundan dolayı ortamdaki basınç dalgalanmaları tarafından yaratılır. Vibrasyon sesi oluşturduğu için istenen bir olgudur. Fakat sürekli vibrasyon makinalarda enerjinin boşa harcanmasına neden olduğu için zararlıdır. Bu yüzden de istenmeyen vibrasyon sönümlenmelidir. Günümüzde birçok malzeme sönümleme yapmak için kullanılmaktadır. Plastikler ve elastomerler sönümlemede kullanılmaktadır. Her ikisi de polimer sınıfına ait olmasına rağmen elastomerler plastiklere kıyasla daha iyi sönümleme özelliğine sahiptir. Sönümlemeyi etkileyen önemli faktörlerden birisi de camsı geçiş sıcaklığıdır. Polimer zinciri arasındaki boşluklar camsı geçiş sıcaklığında maksimuma ulaşır. Elastomerlerin camsı geçiş sıcaklığı 0 derecenin altındadır. Bu da oda sıcaklığında esnek halde olmasını sağlarken, plastiklerin camsı geçiş sıcaklıkları oda sıcaklıklarının üzerindedir. Bu yüzden de oda sıcaklığında kırılıp kırılmazlar. Plastiklerin camsı geçiş sıcaklığının oda sıcaklığının üzerinde olması da elastomerlere oranla sönümlemede daha az etkin olmasını sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2011).

Hacettepe Üniversitesi Kimya Bölümü Polimer Kimyası Ana Bilim Dalı'nda Prof.Dr. Murat ŞEN ve ekibi tarafından yapılan önceki çalışmalarda silikon elastomerin yüksek sönümleme özelliğine sahip olduğu bulunmuştur (Aksüt ve ark., 2019). R752/50 silikon elastomeriyle hazırlanan malzemenin de enerji sönümleme kapasitesinin 600 mJ/cm^3 olduğu görülmüştür. Silikon elastomerlerin enerji sönümleme kapasitelerini artırabilmek için iyonlaştırıcı radyasyonla farklı dozlarda ışınlandığında sönümleme kapasitelerinin iki katına kadar arttırılabildiği de görülmüştür.

Bu tez çalışmasında farklı üreticiler tarafından ticari olarak üretilen ve farklı Mooney vizkozitesi yani farklı molekül ağırlığına sahip silikon elastomerler kullanılarak özel amaçlı silikon elastomerler kadar yüksek enerji sönümlemesinin yakalanıp yakalanamayacağı ya da bunun hangi koşullarda elde edilebileceğinin belirlenmesine çalışılmıştır.

İlk olarak silikon kauçukların kimyasal yapısı Fourier Transform Kızılötesi(FTIR-ATR) spektrofotometresi kullanılarak incelenmiştir. Hazırlanan elastomerlerin karakterizasyonu amacıyla ısı özellikleri de incelenmiştir.

Daha sonra farklı Mooney vizkozitesine sahip bu kauçuklar kullanılarak pişirilmek üzere kauçuk karışımları (hamurları) hazırlanmıştır. Karışımlar silikonların çapraz bağlanmasında tercih edilen hızlandırıcıyla uyum gösteren bir peroksit olan 2,5-Dimetil-2,5-di(tersiyer-bütilperoksi)hekzan DBHP kullanılmıştır. Hızlandırıcı olarak triallil izosyanürat (TAIC) kullanılmıştır. Isıl kararlı kılıcı, kalıp ayırıcı tüm hamurlara aynı oranda eklenmiştir. Hareketli Kalıp Reometresi (MDR) kullanılarak karışımların vulkanizasyon özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan karışımların Kauçuk Proses Analizörü (RPA)'da frekans taraması ve gerinim taraması yapılmıştır. Frekans taramasıyla silikon elastomerlere ait çapraz bağ yoğunlukları belirlenmiştir. Gerinim taraması yapılarak da elastomerlerdeki dolgu-polimer arası etkileşim incelenmiştir. Elastomerlerin mekanik özelliklerini ve sönümlenme (damping) özelliklerini incelemek amacıyla mekanik analizler yapılmıştır. Mekanik analizin ilk kısmında ise kopma- uzama eğrilerinden yararlanılarak silikon elastomer örneklerinin kopmadaki kuvvet ve kopmadaki uzamaları belirlenmiştir. Zwick Z010 Universal Test Cihazı kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan tüm karışımlara %10, %20, %30,%40 ve %50 oranlarda sıkıştırma yapılmıştır. Her bir sıkıştırma oranında 10 döngü olarak uygulanan sıkıştırma eğrilerden histeresis eğrileri altında kalan alandan absorplanan enerji değerleri hesaplanmıştır. Tüm bu çalışmaların sonucunda silikon elastomerlerin sönümlenme kapasitesi ile pişme oranı veya çapraz bağ yoğunluğu gibi yapısal özellikleri arasında bir ilişkinin olup olmadığının belirlenmesine çalışılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Elastomerler

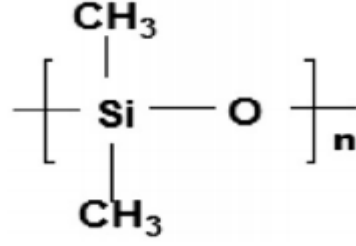
Elastomerler çapraz bağ ile birbirine bağlı olan uzun polimer zincirlerini içermektedirler. Elastomerler diğer polimerlerden iki ana karakteristik özellikleriyle ayrılırlar. Bunlar yüksek elastikiyet ve uygulanan kuvvet etkisi ortadan kaldırıldığında orijinal haline dönebilmesidir. Üstün özelliklerinin sonucu olarak, elastomerler en verimli mühendislik malzemeleri arasındadır. Elastomerler, endüstriyel makinelerdeki hidrolik ve pnömatik contalardan hassas farmasötik kalıplamalara kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

2.2. Silikon Elastomerler

Çoğu elastomer, oksijen veya azot gibi hetero atomlarla ayrılan veya birbirine C atomlarıyla bağlı olan organik polimerlerdir. Geniş kullanım alanları ve avantajlı özelliklerine rağmen, organik elastomerler düşük yumuşama ve bozunma sıcaklıkları ve yüksek seviyede nem ve çözücü girişi gibi çeşitli eksikliklere sahiptir. Bu eksikleri giderebilmek için ana zincirinde silisyum, oksijen, fosfor veya azot atomları katılmıştır. En yaygın inorganik elastomerler olan polisiloksanlar veya silikon elastomerler ana zincirinde siloksan fonksiyonel grup (Si-O-Si) içerirler.

Bağ enerjilerini karşılaştıracak olursak Si-O (~ 433 kJ mol⁻¹) ve C-C (~ 355 kJ mol⁻¹), Si-O 'nin daha yüksek bağ enerjisine sahip olması daha yüksek ısı direnci ve termal kararlılığa sahip olmasına neden olmaktadır. Ek olarak yapısal özellikleri de inceleyecek olursak Si-O, C-C 'a göre daha yüksek bağ uzunluğuna sahiptir. Si-O bağ uzunluğu 1,64 Å iken C-C bağ uzunluğu 1,53 Å dır. Daha yüksek bağ uzunluğuna sahip olması ve Si-O-Si bağ etrafındaki göreceli serbest dönmesinden dolayı daha yüksek zincir esnekliğine ve 0'ın altında (~ -125 °C) T_g camsı geçiş sıcaklığına sahiptir.

Silikon elastomerler mükemmel elastiklik ve geniş çalışma sıcaklıklarına sahiptir. Mükemmel özelliklerinden dolayı silikon elastomerler havacılık, otomotiv, elektronik, güç dağılımı, yiyecek sektörü, inşaat sektörü, sağlık ve tıp, ilaç sanayinde de kullanılmaktadır (Kashi ve ark.,2018). Silikon elastomerlerin genel kimyasal yapısı Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Silikon elastomerin genel kimyasal yapısı.

Silikon elastomerler asılı gruplardaki metil gruplarının diğer fonksiyonel gruplarla yer değiştirmesiyle farklı isim almaktadırlar (Sisanth ve ark., 2017). Farklı özelliklere sahip silikon elastomerin asılı gruplarına bağlı olarak farklılaşan elastomer tipleri de Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Farklı özelliklere sahip silikon elastomerler.

Asılı Grup	Fonksiyonel Grup	Kısaltma	Elastomer Tipi
Metil	CH ₃	MQ	Metil- polisiloksan
Fenil	C ₆ H ₅	PMQ	Fenil-metil- polisiloksan
Vinil	CH ₂ = CH	VMQ	Vinil-metil- polisiloksan
Vinil Fenil	CH ₂ = CH- C ₆ H ₅	PVMQ	Fenil-vinil-metil- polisiloksan
Trifluoropropil	CF ₃ CH ₂ CH ₂	FMQ	Fluro-metil- polisiloksan

Silikon elastomerlerin diğer elastomere göre dezavantaj ve avantajları ise aşağıda özetlenmiştir.

Silikon elastomerlerin dezavantajları:

- Yağ dirençleri vardır (alifatik yağlar hariç).
- Buhar, asitler ve alkali birleşiklerine karşı dayanımları (dirençleri) düşüktür.
- Katkı maddeleri olmadan üretildiği durumda, mekanik özellikleri düşüktür.
- Kalıp içerisinde büzölmeler, çekmeler fazladır.
- İyi mekanik özellikler elde edilebilmesi için, peroksitler ile birlikte vulkanizasyon işlemine tabi tutulması gerekmektedir.
- Fiyatları diğer elastomerler ile karşılaştırıldığında yüksek olduğu söylenebilir.

Silikon elastomerlerin avantajları:

- Yüksek ısı dayanımı (direnci), kullanım sıcaklıkları diğer elastomerlere göre oldukça geniştir.
- Kullanılan hamura bağlı olarak operasyon sıcaklıkları değişmektedir. (-100 ile +300°C arası)
- UV ışık, oksijen, ozon dayanımı (direnci) (Bu dayanımların sağlanması için, vulkanizasyon işlemi sırasında peroksitlerin kullanılması gerekmektedir.)
- Yüksek elastikiyet
- Kokusuzdur, toksit değildir ve tatsızdır.
- Kuvvet altında yayılma, kuvvet geri kaldırıldığında geri dönme özellikleri iyidir.
- Elektrik yalıtkanları iyidir.
- Yüksek sıcaklıklarda yaşlanma dayanımları (dirençleri) iyidir.
- Asitlerin, bazların ve tuzların düşük konsantrasyonlu birleşiklerine karşı dayanımları (dirençleri) iyidir (Aygün M, 2013).

2.3.Silikon Elastomerlerin Endüstriyel Uygulamaları

Silikon elastomerlerin üretimde işlenebilirliği kolaydır ve bu özelliği sayesinde de endüstride çok geniş kullanım alanına sahiptir. Silikon elastomerin geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi ile otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Silikon elastomerlerin otomotiv endüstrisinde sızdırmazlık malzemeleri, contalar, radyatörler, motor kapakları, vana kapakları, egzoz tutucularında, hava yastıklarının kaplanması vb. olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.2. Silikon elastomerin otomotiv endüstrisinde kullanım alanı.

Silikon elastomerlerin mükemmel bio uyumlu özellikleri, sterilize edilebilmeleri, yüksek ısı dayanımı, fizyolojik olarak inert olmalarından dolayı tıp ve sağlık alanlarında maskeler, tıbbi aletler, biberon uçları, solunum cihazları, tıbbi tüpler vb. uygulamalara sahiptir.



Şekil 2.3. Silikon elastomerin tıp ve sağlık endüstrisinde kullanım alanı.

Silikon elastomerlerin termal kararlılığı, yaşlanmaya karşı gösterdikleri direnç özellikleri sayesinde elektrik endüstrisinde de geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Elektrik endüstrisinde kablo, enerji iletimi için parçalar, kontrol ünitesi contaları vb. olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Silikon elastomerin elektrik endüstrisinde kullanım alanı.

Silikon elastomerlerin bir diğer kullanım alanı mutfak malzemeleridir. Silikon elastomerlerin toksik olmamaları, ısıya dayanıklılığı nedeniyle mutfak ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Silikon elastomerler fırın tepsileri ve kalıpları, tencere kapak contaları, yiyecek ve içecek kapakları vb. olarak mutfak ekipmanlarında kullanım alanı bulmuştur.



Şekil 2.5. Silikon elastomerin mutfak ekipmanlarında kullanım alanı.

Aşırı düzeyde meydana gelen vibrasyon, makinaların bozulmasına ve enerjinin boşa harcanmasına neden olmaktadır. Bu makinalarda vibrasyon sönmülmelidir. Tüm polimerlere kıyasla elastomerler daha yüksek sönmüleme kapasitesine sahiptir ve bu özelliği de silikon elastomerleri sönmülemede yaygın kullanılmasına neden olmaktadır. Silikon elastomerlerin sönmülemede(damping) savunma sanayi başta olmak üzere, elektrik endüstrisi, otomotiv endüstrisi, vb. alanlarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. Silikon elastomerin sönmüleme (damping) olarak endüstride kullanım alanı.

2.4. Elastomer Hamurunun Hazırlanması

Elastomer karışımı veya hamuru, elastomerde istenen özelliklerin sağlanması için belirli kimyasalların bir araya getirilerek homojen olarak harmanlanmasını ifade etmektedir. En sık kullanılan yardımcı kimyasallar ise çapraz bağlayıcılar, güçlendiriciler, anti deşredantlar ve renklendiricilerdir. Çapraz bağlanma ajanları moleküler seviyede birbirine çapraz bağlanması için gereklidir. Bu sayede elastikliğini ve dayanımı geliştirmeye yardımcı olmaktadır. Vulkanizasyon veya kür edildiğinde uzun zincirli kauçuk molekülleri kimyasal olarak birbirine bağlanır, ağlar oluşturur ve malzemeyi viskoz bir sıvıdan elastik katıya dönüştürür. Vulkanizasyon veya kürleşme sırasında olan, kuvveti ve modülü yükselten ve histerezisi azaltan bu çapraz bağlanmalardır. Kükürt, vulkanizasyon ajanı olarak yaygın şekilde kullanılır. Güçlendiriciler; elastomer bileşiminin takviye edici ajanları, stres tutucu olarak işlev görür ve yüksek spesifik alana sahip olmaları gerekir. Bu, partikülün 1 µm boyutundan daha küçük olması gerektiği anlamına gelir. Tipik dolgu maddeleri karbon karası ve silikadır (Ramezani ve Ripin, 2012). Silika, silikon elastomerleri güçlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Silika malzemeye mükemmel yırtılma direnci, yüksek aşınma direnci ve düşük yuvarlanma direnci sağlar (Hewitt, 2007). Silika yüksek yüzey alanına sahip olmasından dolayı en önemli güçlendirici dolgulardan bir tanesidir. Parçacık büyüklüğünden ayrı olarak, silikanın yüzey kimyası güçlenme derecesini de etkilemektedir. Silika yüzeyinde çok miktarda silanol gruplarını içerdiğçe, silikanın daha çok polar dolgu maddesi olduğu düşünülebilir. Bu yüzden de polar olmayan doğal kauçuk (NR), stiren bütadien kauçuk (SBR) ile daha az uyumludur. Zayıf kauçuk-dolgu etkileşimi kauçuğun mekanik özelliklerinin de bozulmasına neden olmaktadır. Ek olarak, silanol grupları, güçlü dolgu-dolgu etkileşimi ile sonuçlanan, birbirleri arasında hidrojen bağı oluşturma eğilimindedir. Bu nedenle, silika, karbon karasıyla karşılaştırıldığında kauçuk matris boyunca dağıtılması ve dağılması zordur. Ayrıca silika yüksek derişimde kauçuğa eklendiğinde, bu ikincil ağ oluşturma eğilimindedir alternatif olarak adı dolgu-dolgu ağıdır. Bu işlenmede zorluğa neden olacak ve vizkozitede artışa neden olacaktır (Sae-Oui ve ark., 2004).

2.5. Vulkanizasyon

Vulkanizasyon bir diğerk ifadeyle pişme elastomer özelliklerinin temel bir belirleyicisidir. Vulkanizasyon işlemlle plastik bir malzeme esnek ve elastik bir malzemeye dönüşmektedir. Vulkanizasyon çekme dayanımını, sertliğı, aşınma direncini artırır ve kopmadaki uzama, histeresis (ısı oluşumu) ve çözünürlüğü azaltmaktadır. Genellikle belirli bir optimum çapraz bağ yoğunluğu gösteren gerilme ve yırtılma mukavemeti hariç, vulkanizasyona bağlı değışiklikler, çapraz bağların sayısı ve uzunluklarıyla orantılıdır (Coran, 2013).

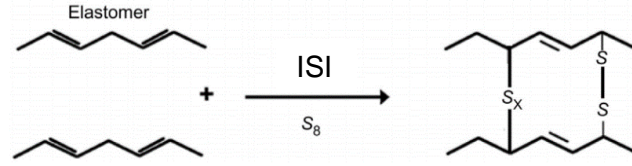
Vulkanize edilmemiş bir elastomer solvent çözücü içerisinde tamamen çözülmektedir. Vulkanize olmuş bir elastomer ise çözücü içerisinde şişmektedir. Kimyasal çapraz bağlanma tamamen çözülmeyi önlemektedir (Samsuri ve Abdullahi, 2017).

Aşırı çapraz bağlanma ise elastomeri sert ve kırılğan bir katıya dönüştürmektedir. Daha uzun (polisülfid) çapraz bağlar daha iyi gerilme ve yırtılma mukavemeti ve daha iyi yorulma sağlamaktadır. Daha kısa çapraz bağlar ise daha iyi oksidatif ve termal kararlılık sağlamaktadır.

Hangi türde kürleşme kullanılacağı oldukça önemlidir. Çünkü kürleşmede kullanılacak olan silikon elastomerlerin özelliklerini etkiler. Kürleşme peroksitle yapıldığında malzemeye daha sağlamlık kazandırırken, platinumla kürleşme daha esnek yapı kazandırmaktadır (McKeen, 2018).

2.5.1. Kükürt Vulkanizasyonu

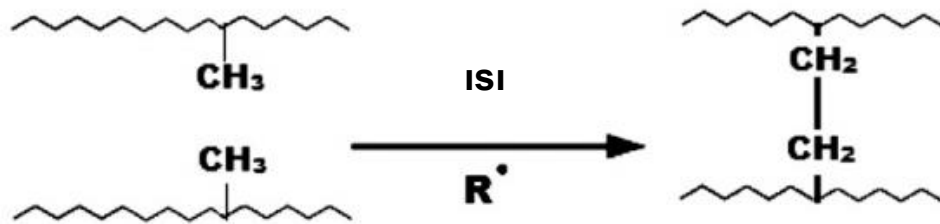
Kimyasal olarak doymamış polimer ana zincirlerinde en yaygın kullanılan kürleşme ajanı kükürttür. Özellikle yaygın diene elastomerler, doğal kauçuk, stiren bütadien, polibütadiene, nitril, polikloropren ve poliizoprendir. Diğerk kürleşme ajanları da kullanılabilir ancak kükürtün ucuz olması, toksitesinin düşük oluşu, diğerk bileşik katkı maddeleriyle uyumlu oluşu ve istenilen vulkanizasyon özelliklerini sağlamaya yardımcı olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Kükürt vulkanizasyonun şematik gösterimi Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Kükürt vulkanizasyonunun şematik gösterimi.

2.5.2. Peroksit Kürleşmesi

Kimyasal olarak doymuş polimer zincirine sahip olan elastomerler kükürtle çapraz bağlanmamaktadır ve bu durum da alternatif kürleşme ajanını gerekli kılmaktadır. Doymuş elastomerlerle en yaygın kullanılan kürleşme ajanı peroksitlerdir. Peroksitler, polimer radikalini oluşturmak için elastomerden bir hidrojen soyutlayan oksijen radikallerine ısıtılarak ayrıştırılarak kimyasallardır. Polimer radikalleri daha sonra karbon-karbon çapraz bağları oluşturmak için reaksiyona girer. Doymuş elastomerlerde bu, tercihen alilik hidrojenlerin bulunduğu bölgede meydana gelir. Çapraz bağlanma oranı, peroksitin ayrışma oranı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle kür oranları ve sertleşme sıcaklıkları, dialkil> perketal> perester veya diaril düzeninde azalan peroksitin stabilitesine bağlıdır. Bu çapraz bağlayıcıların en yaygın kullanılanı, dikümil peroksit'tir. Peroksitle vulkanizasyonun şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. C-C çapraz bağlanmalar kükürt çapraz bağlanmalarına göre termal olarak daha kararlı olmasına rağmen, onlar çekme ve yırtılma mukavemetini sağlamaktadırlar (Peter ve Ciullo,1996).

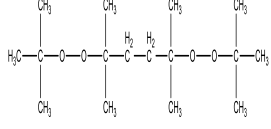
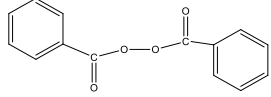
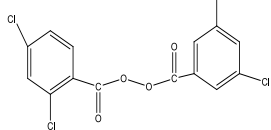
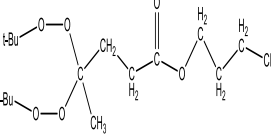


Şekil 2.8. Peroksitle vulkanizasyonunun şematik gösterimi.

2.5.2.1. Peroksitlerin Sınıflandırılması

Peroksitlerde oksijenlere bağlı organik grubun kimyasal yapısı peroksidi dialkil, diaçil, peroksiketal ve peroksiester olarak sınıflandırılmasını sağlar. Bu peroksit sınıflarında bulunan ve silikon elastomerler ile sıklıkla kullanılan bazı peroksitlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Peroksitlerin avantaj ve dezavantajları.

Sınıf	Örnek	Kimyasal Yapısı	Avantajlar	Dezavantajlar
Dialkil	DBPH		Kokusuz, şeffaf	Yüksek maliyet, düşük etkinlikte kürleşme
Dialkil	DCP		Etkin kürleşme, düşük maliyet	Kokulu
Diaçil	DCBP		Hızlı kürleşme	Karbon siyahı içeren sistemlerde düşük kürleşme
Peroksiketal	PDR		Düşük sıcaklıkta çabuk kürleşme	Yüksek maliyet, doymuş polimerde düşük kürleşme

Peroksiketaller düşük yarı ömre sahip olmaları nedeniyle daha hızlı reaksiyon verirler. Peroksiketaller dialkil peroksitlerle karşılaştırıldıklarında düşük sıcaklıklarda yüksek kürleşme reaksiyonu verirler. Ancak peroksiketaller hem zayıf hem de kuvvetli serbest radikaller içerdiklerinden dialkillere göre daha düşük verimli çapraz bağlanma gösterirler (Palys ve Callais, 2003). Diaçil peroksitler ise ayrıştıklarında yüksek etkinlikte serbest radikaller oluştururlar. Ancak yüksek kürleşme sıcaklığı gerektirdiklerinden ve yarı ömürlerinin uzun olması nedeniyle az miktarda çapraz bağlanma gerektiren proseslerde tercih edilirler (Palys ve Callais, 2003).

2.6.Hızlandırıcılar

Ko-ajan olarak da isimlendirilen hızlandırıcıların kullanımı oldukça önemlidir. Ko-ajan peroksitle birlikte kullanılan bir sistemde çapraz bağ yoğunluğu ve elastik modül değerini artırdığı görülmüştür (Brown, 2006). Hızlandırıcılar kürleşmeye olan katkılarına dayanılarak sınıflandırılırlar. Tip I ko-ajanları hem kürleşme durumunu hem de kürleşme hızını etkilemektedir. Tip I ko-ajanları polar olup katılma reaksiyonları aracılığıyla çok aktif radikaller oluşturan düşük moleküler

ağırlığına sahiptirler. Bu monomerler polimer zincirlerine aşılınmakta ya da homopolimerleşmektedirler. Tip II ko-ajanları ise daha az reaktif radikaller oluştururken sadece kürleşme durumuna katkı sağlamaktadırlar. Öncelikle hidrojen yakalanması yoluyla radikal oluştururlar. Tip I ko-ajanları çok fonksiyonlu akrilat ve metakrilat esterler ve dimaleimitler içerirler. Akrilik, metakrilit asitlerin çinko tuzları da bu sınıfa dahildir. Tip II ko-ajanları ise siyanürat, izosiyanürat, dienelerin homopolimerleri ve kopolimerleri ve vinil aromatikleridir. Yaygın kullanılan Tip I ve Tip II ko-ajanları Tablo 2.3'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Yaygın kullanılan Tip I ve Tip II ko-ajanları.

KOAJAN TANIMI	KOD	TİP
ÜÇFONKSİYONEL METAKRİLAT ESTER	TMA	I
N,N'-M-FENİLEN DİMALEİMİD	PDM	I
ÇİNKO DİAKRİLAT	ZDA	I
ÇİNKO DİMETAKRİLAT	ZDMA	I
POLİ BÜTADİEN DİAKRİLAT	PBDDA	HİBRİD
TRİALLİL SYANÜRAT	TAC	II
TRİALLİL İZOSYANÜRAT	TAIC	II
YÜKSEK VİNİL POLİ BÜTADİENE	HVPBD	II

Çoğu Tip I ko-ajanları radikal katılma reaksiyonları aracılığıyla çapraz bağlanabilir. Dimaleimid koajanları (PDM) ayrıca bir "ene" reaksiyon mekanizması vasıtasıyla zincir doymamışlığında reaksiyona girebilir. Trifonksiyonel koajanlar (TAC ve TAIC) allil grupları boyunca aşılamanın yanı sıra siklopolimerizasyon ürünleri boyunca çapraz bağlar oluşturabilir (Henning ve Costin, 2005).

2.7. Silikon Elastomerlerin Isıl Özellikleri

Silikon elastomerler çalışma aralığı oldukça geniştir. Örnek verecek olursak -60 °C'den +250 °C'ye kadardır. Camsı geçiş sıcaklığı -120 °C'dir. Diğer ısı özelliklere sahip elastomerlerle kıyaslandığında 150 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda mükemmel özelliklere sahiptir. Silikon elastomerler 750 °C'de yanma noktasına sahiptirler ve mükemmel alev geciktiricidirler. Fakat yanmada toksik veya koroziv gazlar açığa çıkarmaktadır (Fink, 2017). Silikon elastomerlerin ısı bozunma aşamaları Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Silikon elastomerlerin ısı bozunma aşamaları.

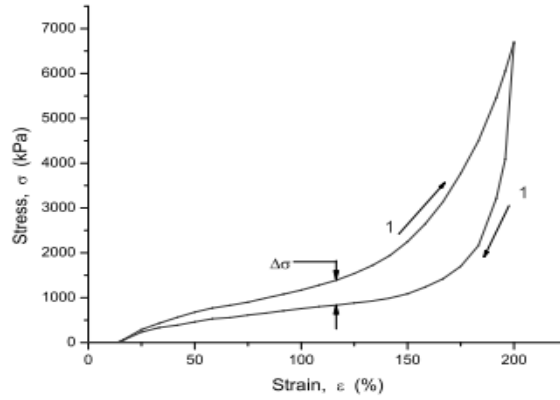
SICAKLIK ARALIĞI (° C)	MEYDANA GELEN REAKSİYON
340- 430	Si- OH BOZULMASI
430- 675	Si- C ₆ - H ₄ – Si
675- 820	CH ₄ OLUŞUMU

Silikon malzemeler kimyasal ve mekanik kararlılıklarıyla bilinirler. Si-O'nin (444 kJ/mol ve 1,64 Å) C-C ile karşılaştırıldığında (348 kJ/mol ve 1,54 Å) daha yüksek bağ gücü ve daha uzun bağ mesafesine sahiptir. Siloksan bağ iyonik bir yapıdadır ve bu özelliği Si-O arasındaki elektronegatiflik farkından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Si-O-Si arasındaki bağ açısı da 140 ° den 180 dereceye kadardır bu da yüksek derecede esneklik vermektedir. Si ve O arasındaki büyük elektronegatiflikten dolayı bu bağ iyonik bağa daha yakındır. Bu yüzden de Si-O arasındaki bağ enerjisi 106 kJ/mol iken C-C arasındaki bağ enerjisi de 84,9 kJ/mol dır. Diğer elastomerlerle karşılaştırıldığında uygun kimyasal kararlılıkla birlikte ısı direnci de oldukça iyidir (Essawy ve ark., 2018).

2.8. Histeresis

Fizik kurallarına göre iş tanımı kuvvetle mesafenin çarpımını vermektedir. Şekil 2.9 da görüldüğü gibi malzeme gerildiğinde ve serbest bırakıldığında meydana

gelen eğri altındaki alan bize yapılan işi vermektedir. İlk seferde malzeme sıkıştırıldığında ve gerildiğindeki eğri altındaki alan ne kadar büyük olursa yapılan iş de o kadar büyük olacaktır. Malzemenin orijinal haline geri dönmesi için gereken enerji de o kadar büyük olacaktır. Enerjinin korunumu yasasından da bilindiği üzere enerji yok olmaz. Burada da enerji iki eğri arasındaki alana eş değer miktarda ısıya dönüşmektedir. Bu dönüşüm elastomerlerin vizkoz sönümlenme özelliğinden dolayı histeresis olarak adlandırılmaktadır. Bu alan ne kadar büyürse malzeme o kadar fazla ısı üretecek ve kauçuk da daha az elastik olacaktır (Bauman, 2012).



Şekil 2.9. Histeresis eğrisi.

Histeresis elastomerin türüne göre de değişmektedir. Güçlendirilmemiş doğal kauçukta en az iken, çoğu elastomerlerde de fazladır. Güçlendirilme miktarı ve uygulanan sıkıştırma oranı arttıkça histeresis de artmaktadır.

2.9. Elastomer ve Sönümlenme

Bir elastomerin hareket enerjisini dönüştürme kabiliyeti, titreşimi absorplamasını sağlar. Kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren vizkoz bileşeni absorplama için oldukça kullanışlıdır. Elastik bileşeni de çok hızlı bir şekilde eski haline malzemeyi döndürmektedir. Elastomerler plastiklerle karşılaştırıldığında daha yüksek absorplama özelliğine sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığının sönümlenmede rolü de oldukça önemlidir. Elastomerlerin camsı geçiş sıcaklığı sıfır derecenin altındadır. Bu da oda sıcaklığında esnek halde olmasını sağlamaktadır. Silikon elastomerler oda sıcaklığının altında kırılırlar. Böylece, elastomerler T_g etrafında oldukça elastiktir. Bu, elastomerin sönümlenmesinin maksimum olduğu gevşeme bölgesidir (Valentini ve Lopez-Manchado, 2020).

Elastomer ve plastiklere ait camsı geçiş sıcaklıkları Tablo 2.5' de verilmiştir.

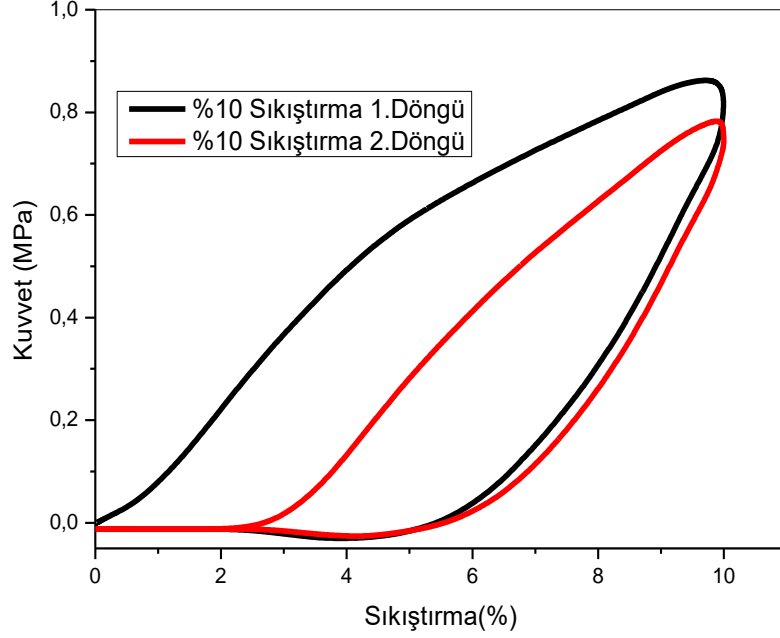
Tablo 2.5. Elastomer ve plastiklerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g).

Kauçuk veya Elastomer	T _g (° C)	Plastikler	T _g (° C)
Nitril Kauçuk	-40	Poli vinil asetat	30
Stiren Bütadien Kauçuk	-50	Polietilen tereftalat	70
Neopren	-50	Polivinil klorat	80
Etilen propilen dien kauçuk	-55	Polivinil alkol	85
Bütül kauçuk	-65	Polistiren	100
Doğal kauçuk	-73	Polimetil metakrilat	105
Bütadien kauçuk	-100	Polikarbonat	145
Silikon kauçuk	-127	Polinorbornene	215

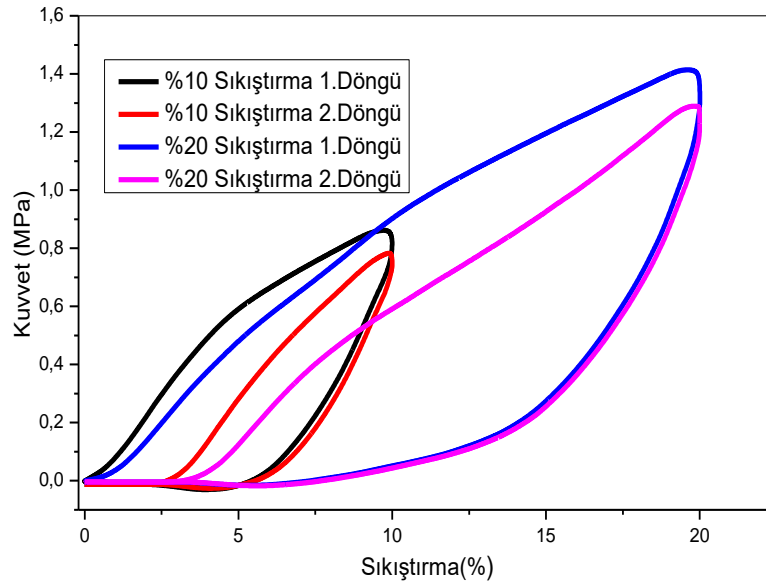
2.10. Mullin Etkisi

Mullin Etkisi döngüsel deformasyon boyunca meydana gelen en önemli etkilerden birisidir. Uygulamada da 1.döngüden itibaren malzemeye uygulanan kuvvet değerinde azalma görülecektir. Malzeme deformasyona uğrayacak ve malzemeyi orijinal haline döndürmek için gereken enerji de daha az olacaktır. Bu etki Mullin Etkisi olarak adlandırılmaktadır (Bauman, 2012). Mullin Etkisi Şekil 2.10'de verilmiştir. İlk döngü haricindeki diğer döngüler neredeyse üstüste binmiş ve ilk döngüden daha küçük alanlara sahiptirler. Bu durumun sebebi ilk döngü sonunda yapının akışkan kısmındaki bazı zincir dolaşmalarının uzaklaşması ve

böylece sonraki döngüler için gereken gerininin değerinin azalmasıdır. Bu durum gerinim yumuşaması (strain softening) olarak adlandırılır (Visakh ve ark., 2013).



Şekil 2.10. Tipik sıkıştırma- gevşeme eğrileri ve Mullin etkisi.



Şekil 2.11. %10 ve %20 oranında 1.ve 2. döngülü sıkıştırma- gevşeme eğrileri. Şekil 2.11. de görüldüğü gibi %10 sıkıştırma oranında döngü sayısı arttıkça histeresis eğrisi altında kalan alan azalmıştır. %20 sıkıştırma oranında da benzer eğriler görülmüştür. Döngü sayısı arttıkça absorplanan enerji değerinde azalma

meydana gelmektedir bunun nedeni de literatürde Mullin Etkisi olarak belirtilmektedir (Bouasse ve Carrière,1903). Kauçuk benzeri malzemeler, ilk gerilmeden sonra mekanik özelliklerinde önemli bir değişiklik görülür. Her iki sıkıştırma oranında da zamanla histeresis eğrileri altında kalan alanlar ve uygulanan kuvvet değerleri azalmıştır. Döngü sayısı arttıkça da birbirine yakın kuvvet ve eğri altındaki alanların da benzer olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeni de birkaç döngüden itibaren malzemede bir yorgunluk etkisi gözlenmesi yani vizkoz akışın tamamlanmış olmasıdır.

3.DENEYSEL YÖNTEMLER

3.1.Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan R752/50 ve R760/70 kodlu silikon kauçuk Wacker Chemie AG (Almanya) firmasından temin edilmiştir. Silplus 70 ve Silplus 80 silikon kauçuklar Momentive (Amerika) firmasından, XIAMETER RBB-2100-70 silikon kauçuk Dow Corning (Amerika) firmasından, Ravasil TS 70 silikon Ravago Petrokimya (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Ürün kodlarında 50, 70 ve 80 olarak gösterilen rakamlar bu silikondan elde edilen elastomerin sertliğini göstermektedir.

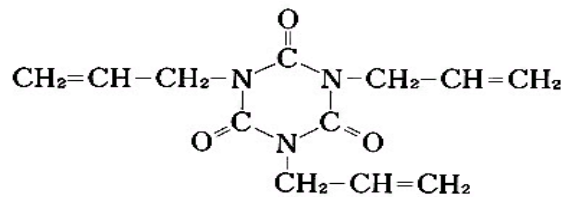
Çalışmada kullanılan hızlandırıcı ise Triallil izosiyanat (TAIC) 'dir. TAIC ise Sigma –Aldrich (Amerika) dan temin edilmiştir. TAIC 'in kimyasal yapısı Şekil 3.1. de verilmiştir. Kalıp ayırıcı ve ısı kararlı kılıcı ise SolPro(Türkiye) firmasından temin edilmiştir.

Çapraz bağlayıcı olarak 2,5-Dimetil-2,5-di(terciyer-butilperoksi) hekzan (DBPH) kullanılmıştır. DBPH 'in kimyasal yapısı Şekil 3.2 de gösterilmiştir. DBPH Sigma –Aldrich (Amerika) dan temin edilmiştir.

3.2.1. Kauçuk Hamurlarının Hazırlanması

Kauçuk hamurunun reçeteleri literatür ve kullanılan kimyasalların katalog verilerinden yararlanılarak belirlenmiştir.

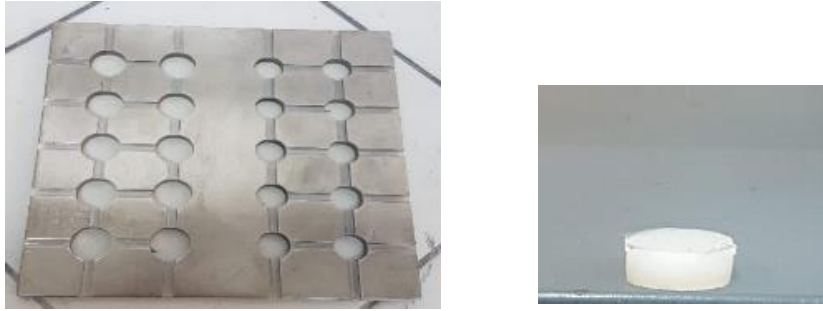
Karışımda peroksitle uyumlu olarak TAIC kullanılmıştır. TAIC hazırlanan tüm karışımlarda aynı oranda olup 0,5 phr'dır. TAIC kimyasal yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu çalışmada peroksit olarak 2,5-Dimetil-2,5-di(terciyer-butilperoksi)hekzan (DBPH) kullanılmıştır. DBPH kimyasal yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir. Her karışımda kullanılan miktar aynı olup 0,8 phr'dır.



Şekil 3.1. Kullanılan hızlandırıcı Triallik izosiyanat'ın (TAIC) kimyasal yapısı.



Şekil 3.4. Brabender Polystat200T Hidrolik Pres.



Şekil 3.5. Disk hazırlanmasında kullanılan kalıp ve cure edilmiş disk numunesi.

3.3.Deneysel Ölçümler

3.3.1. Reolojik Analizler

Reometre cihazı kauçukların vulkanizasyon özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Reometreler kauçuk hamurun akma özelliklerini ölçmeye yardımcıdır. Cihazın çalışma prensibi ise çift konik disk içeren test boşluğuna kauçuk hamuru yerleştirilir. Yüksek sıcaklık ve basınç altında kauçuk hamuruna salınım gerilimi uygulanır. Reometrede çapraz bağ yoğunluğundaki artışa bağlı olarak torktaki meydana gelen artış zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilmektedir. Doğrusal reometre, salınımlı disk reometresi (Oscillating Disc Rheometer, ODR), Hareketli Kalıp Reometresi (Moving Die Rheometer, MDR) olmak üzere üç farklı reometre türü mevcuttur.

Bu tez çalışmasında Şekil 3.6'da verilen Alpha Technologies MDR 2000B model Hareketli Kalıp Reometresi (MDR) cihazı kullanılmıştır. Deneyde 180 °C sıcaklık ve 20 dakika süresinde reolojik özellikler incelenmiştir.



Şekil 3.6. Hareketli Kalıp Reometresi (MDR).

Tipik bir Reometre Eğrisi Şekil 3.7’de verilmiştir.

AB : Akma zamanı, BC : Yanma zamanı, CD : Yetersiz vulkanizasyon
DE : Optimum vulkanizasyon, EF : Kükürt bağlarının kısalması ve esnekliğin azalması, EF ’: Karbon karbon bağlarının açıldığı durum ve fiziksel özelliklerde düşmeyi gösterir. Bir reometre eğrisinin değerlendirilmesi sonucunda aşağıdaki bilgiler elde edilir.

M_L : Minimum tork değeri

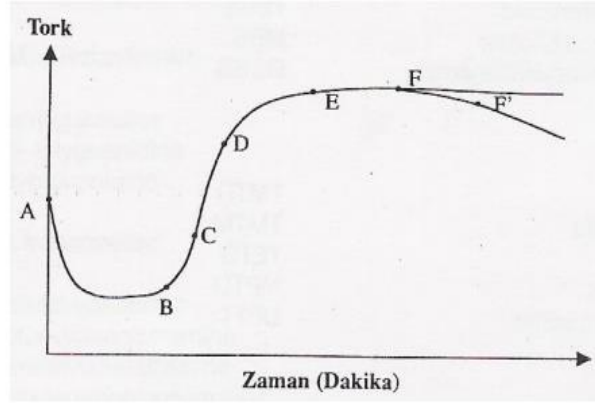
M_H : Maksimum tork değeri

t_{s2} : Ön vulkanizasyon (scorch) süresi

t_{90} : Maksimum tork değerinin %90’ına ulaşmak için geçen süreyi verir.

Δ tork: Vulkanizasyon derecesinin ifade eder.

CRI: Kür hızı indeksidir (Cure Rate Index) $CRI = \frac{100}{t_{90} - t_{s2}}$ formülü kullanılarak hesaplanır (Babapour, 2013).



Şekil 3.7. Tipik bir reometre eğrisi.

3.3.1.2. Mooney Vizkozimetre

Mooney vizkozimetre evrensel olarak kabul edilmiş ve uzun yıllar boyunca kalite kontrol amaçlı kullanılmakta olan testlerden birisidir. Çalışma prensibi ise kapalı bir disk içinde sabit hızda dönen rotor sistemi vardır. Rotor sistemi döndükçe monitörde transduserde tork değeri kaydedilir. Silikonların Mooney vizkozite değerleri Gotech MV3000 model Mooney vizkozimetre kullanılarak elde edilmiştir. Gotech MV3000 model Mooney vizkozimetre cihazı Şekil 3.8'de verilmiştir. Mooney vizkozimetrede test için önce 80 g saf silikon tartılmıştır. Daha sonra Mooney test cihazında 100 °C da 1 dakika ön ısıtma ve 4 dakika test süresince Mooney Vizkozitesi ölçülmüştür.



Şekil 3.8. Mooney vizkozimetresi test cihazı.

3.3.1.3. Kauçuk Proses Analizörü (RPA)

Kauçuk proses analizörü (RPA), hareketli kalıp reometresi (MDR) gibi hareketli kalıp reometresidir. Hareketli kalıp reometresi (MDR) 'de sabit frekans ve açı

değerinde çalışılırken, kauçuk proses analizörü (RPA) farklı frekans ve farklı açılarda çalıştırılarak, farklı açılarda çalıştırılarak çalıştırılmaktadır. Hareketli kalıp reometresinde (MDR) sadece vulkanize olmamış hamurun reolojik özellikleri incelenmektedir. Kauçuk proses analizöründe (RPA) hem vulkanize olmamış hamurun reolojik özellikleri incelenirken, hem de vulkanize olmuş hamurun reolojik özellikleri incelenmektedir. Frekans ve gerilim taraması yapmak ve reolojik özellikleri incelemek amacıyla TA Instrument- Elite marka RPA cihazı kullanılmıştır. TA Instrument- Elite marka RPA cihazı Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. TA Instrument- Elite marka RPA cihazı.

RPA cihazında frekans taraması sonucu elde edilen verilerle Eşitlik 1'e göre çapraz bağ yoğunluğu hesaplanmıştır.

$$X_{kimyasal} = \frac{[G'_{pişmiş} (@ 30 \text{ Hz}) - G'_{pişmemiş} (@ 30 \text{ Hz})]}{2RT} \quad (1)$$

$X_{kimyasal}$: Kür sırasında oluşan çapraz bağların konsantrasyonu

$G'_{pişmiş} (30 \text{ Hz})$: Pişmiş karışımın 30 Hz' deki elastik modülüs değeri

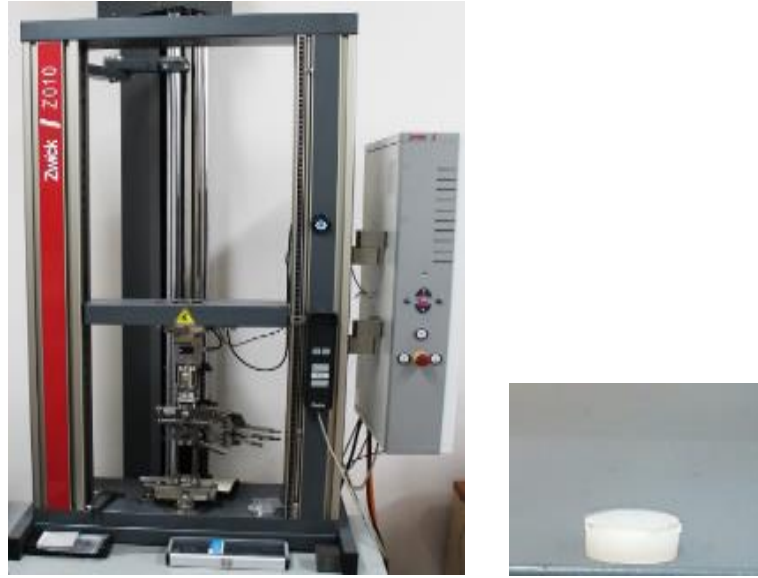
$G'_{pişmemiş} (30 \text{ Hz})$: Pişmemiş karışımın 30 Hz' deki elastik modülüs değeri

R: Gaz sabiti

T : Sıcaklık

3.3.2. Mekanik Analizler

Hazırlanan karışımların mekanik özellikleri Zwick Z010 Evrensel Test Cihazı kullanılarak yapılmıştır. Mekanik analizlerin ilk kısmında hazırlanan tüm karışımlara sıkıştırma testi uygulanmıştır. Sıkıştırma testinde kullanılan sıkışma oranları %10, %20, %30,%40 ve %50'dir. Her bir sıkıştırma oranında 10 döngü olarak uygulanan sıkıştırma-gevşeme çalışmaları sonucunda dögüsel eğriler oluşturulmuş ve absorplanan enerji değerleri de histeresis eğrileri altında kalan alandan faydalanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.10. Zwick Z010 Universal Test Cihazı ve sıkıştırma testinde kullanılan disk.

İkinci kısımda ise kalıplarda hazırlanan 2 mm kalınlığında test plakalarından ISO 37 Lastikler ve Termoplastikleri Çekme Gerilmesi Uzama Özelliklerinin Tayini standartlarına uygun olarak ISO standartında belirtilen ve Tip 2 kalıbına göre kemik (dog-bone) şeklinde Cutting Press ZCP020, Zwick kullanılarak kupon numuneler hazırlanmıştır. Zwick Z010 Universal test cihazında çekme testi yapılarak silikon elastomerlerin kopmadaki uzama, kopmada kuvvet ve elastik modül değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Kuvvet-Uzama testlerinde kullanılan kupon numune.

3.3.3. Isıl Özellikler

Farklı silikon elastomer örneklerinin ısı özelliklerinin belirlenmesinde Perkin Elmer Pyris II, Termogravimetrik Analiz (TGA) cihazı kullanılmıştır. Termo Gravimetrik Analiz Cihazı (TGA) Şekil 3.12' de verilmiştir. Termogramlar 650°C'ye kadar N₂ ortamında , 650°C'den sonra O₂ ortamına geçilerek alınmıştır.



Şekil 3.12. Perkin Elmer Pyris II Termal Gravimetrik Analiz cihazı(TGA).

3.3.4. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

Tez çalışmasında kullanılan silikonların kimyasal yapı analizleri Şekil 3.13'de verilen Perkin Elmer, Spectra II Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) ve elmas kristalli ATR ünitesi kullanılarak incelenmiştir.



Şekil 3.13. Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) cihazı.

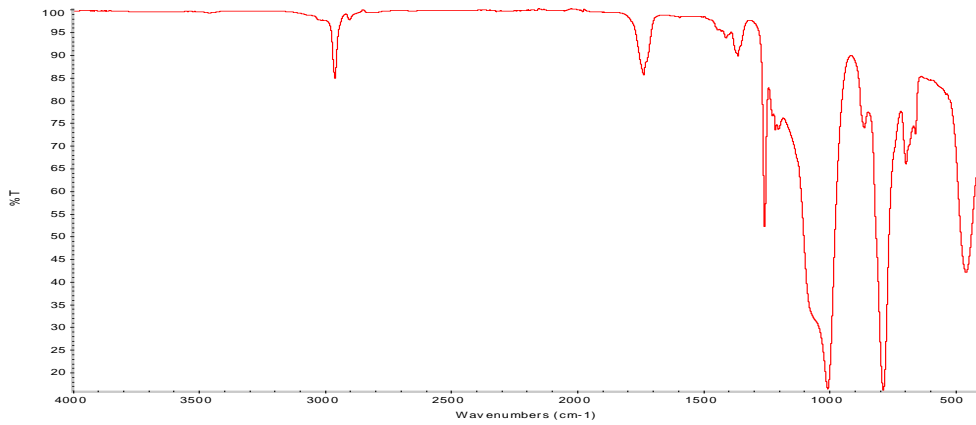
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Silikon Kauçukların Karakterizasyonu

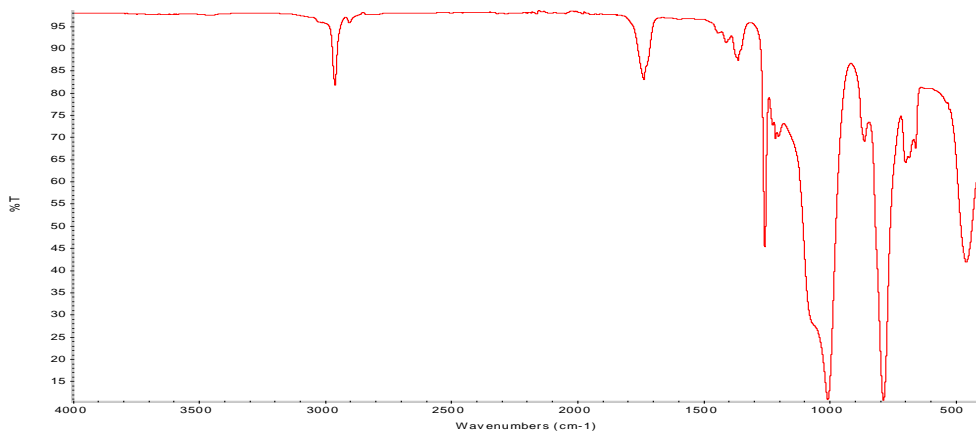
Çalışmada kullanılan ve farklı üretici firmalarından temin edilen silikon kauçukların önce spektroskopik, reolojik ve ısıl yöntemlerle kimyasal, fiziksel ve ısıl özellikleri karakterize edilmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) Analizi

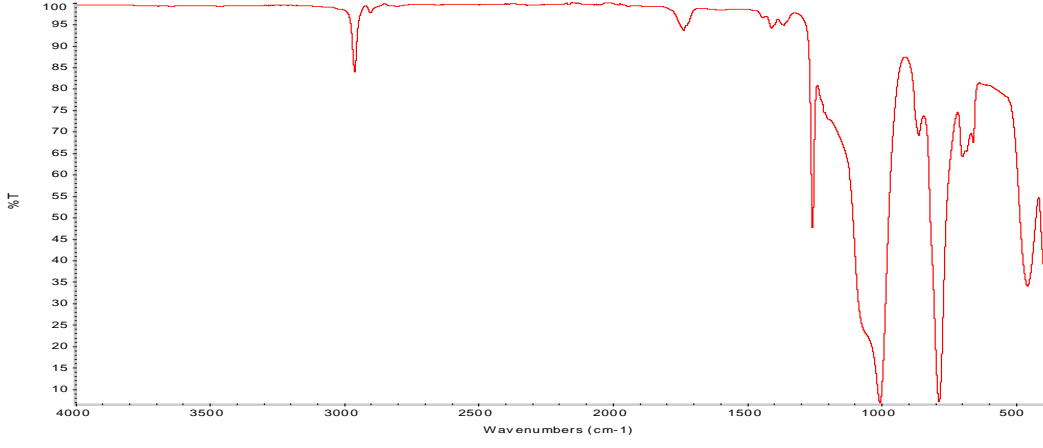
Farklı özelliklere sahip silikon elastomerlerin yapısını incelemek amacıyla FTIR 'dan yararlanılmıştır. Silikon elastomerlerin FTIR spektrumları Şekil 4.1-4.6'da verilmiştir.



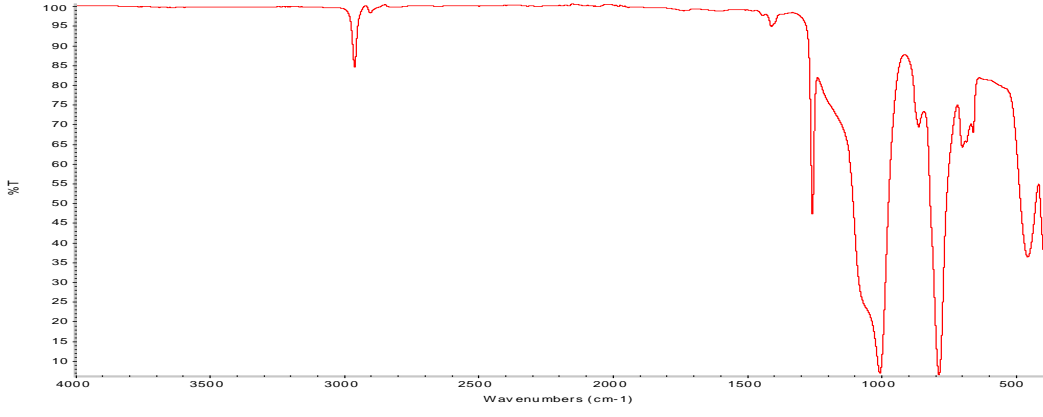
Şekil 4.1. R752/50 örneğinin FTIR spektrumu.



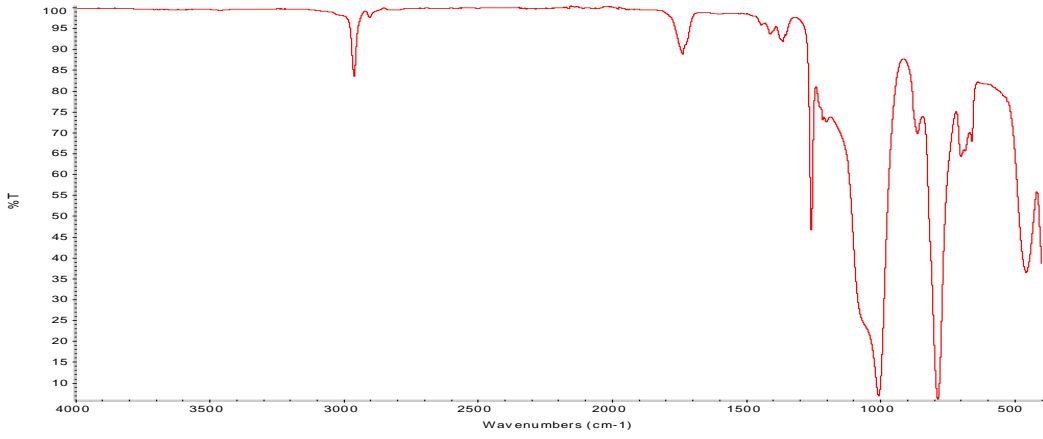
Şekil 4.2. R760/70 örneğinin FTIR spektrumu.



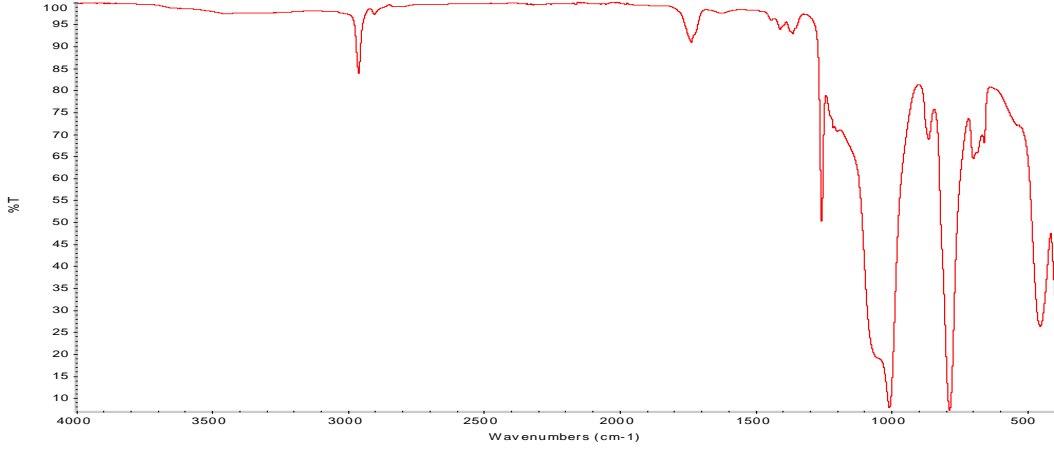
Şekil 4.3. Silplus 70 örneğinin FTIR spektrumu.



Şekil 4.4. Silplus 80 örneğinin FTIR spektrumu.



Şekil 4.5. Xiameter 70 örneğinin FTIR spektrumu.



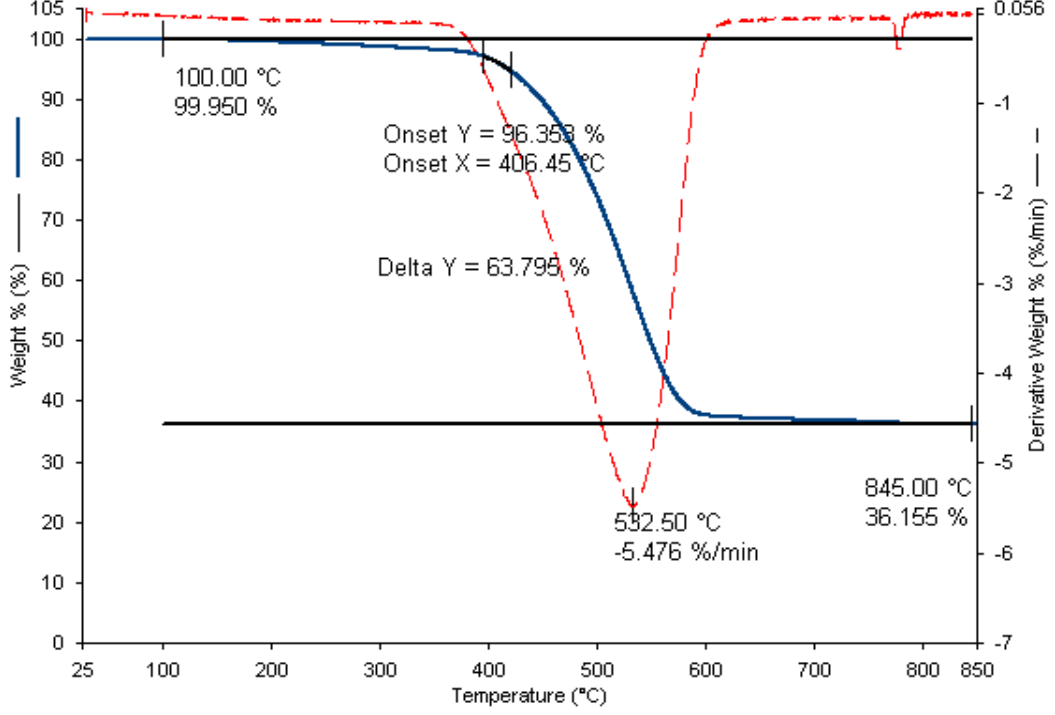
Şekil 4.6. Ravasil 70 örneğinin FTIR spektrumu.

Spektrumlarda $\text{Si}(\text{CH}_3)_2$ gruplarının titreşimlerine ait pik 800 cm^{-1} de görülmüştür. Si-O-Si pikinin titreşim bandı 1000 cm^{-1} dir. Si-CH₃'e ait olan pik 1250 cm^{-1} dir. 1400 cm^{-1} de görülen titreşim hareketi ise CH₃ ve CH₂'den gelen deformasyon vibrasyonudur (Oliveira ve ark., 2016). 1600 cm^{-1} de gözlenen zayıf pik ise vinil grubuna aittir. 794 cm^{-1} deki bant Si-C gerilmesinden kaynaklanmaktadır. CH₃ e ait olan C-H piki de 2964 cm^{-1} görülmüştür. 1730 cm^{-1} deki band da C=O gerilme titreşimine aittir ve hammadde safsızlığından karbonil gruplarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

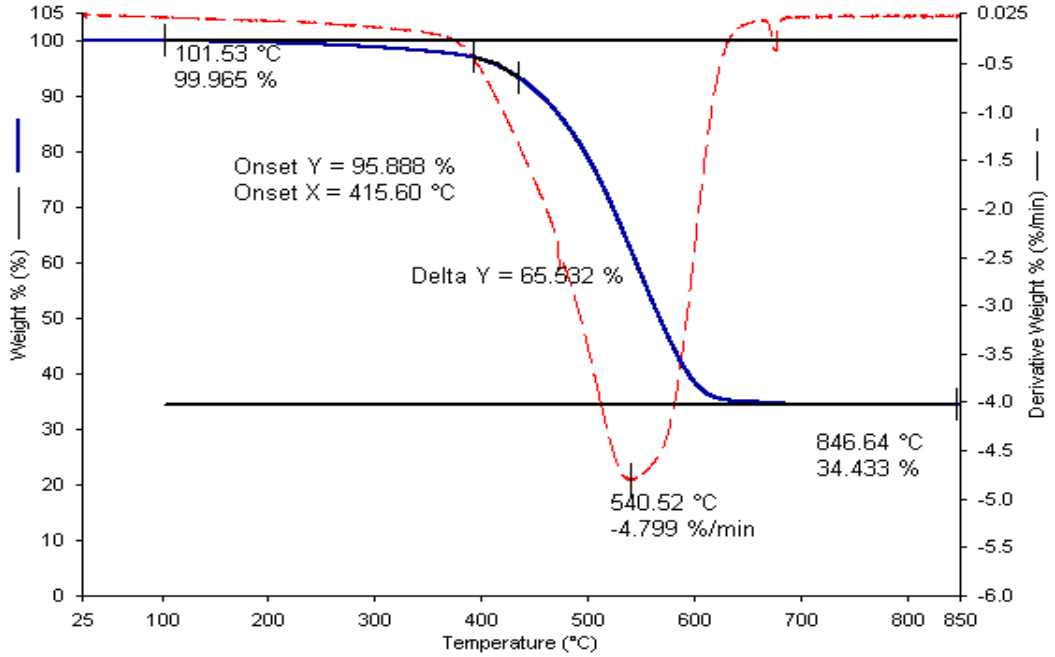
Silikon elastomerlerin FTIR eğrilerini incelendiğinde spektrumların birbirine çok benzediği görülmüştür. Spektrumlar tüm silikon kauçukların vinil metil silikon (VMQ) esaslı olduğunu kanıtlamaktadır.

4.1.2. Silikon Kauçukların Isıl Özellikleri

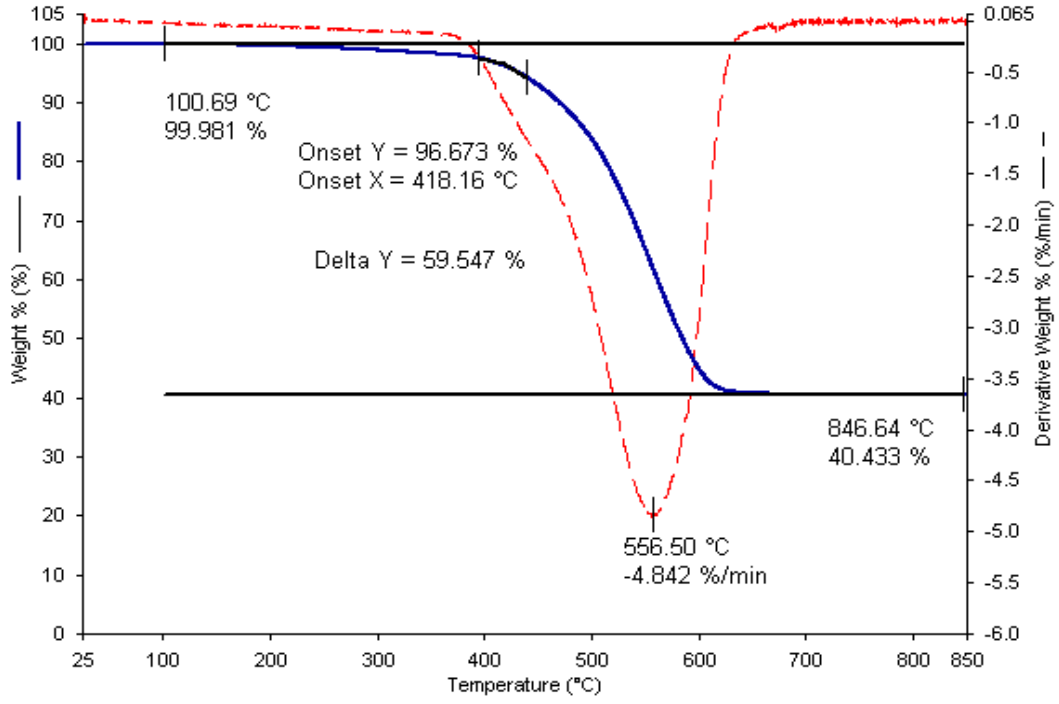
Bu çalışmada kullanılan silikon elastomerlerin ısıl özelliklerini ve saflığını dolgu olarak silika kullanılıp kullanılmadığını belirlemek amacıyla termal analiz çalışmaları yapılmıştır. Silikon kauçukların saf hallerinin TGA eğrileri Şekil 4.7-4.12 de verilmiştir.



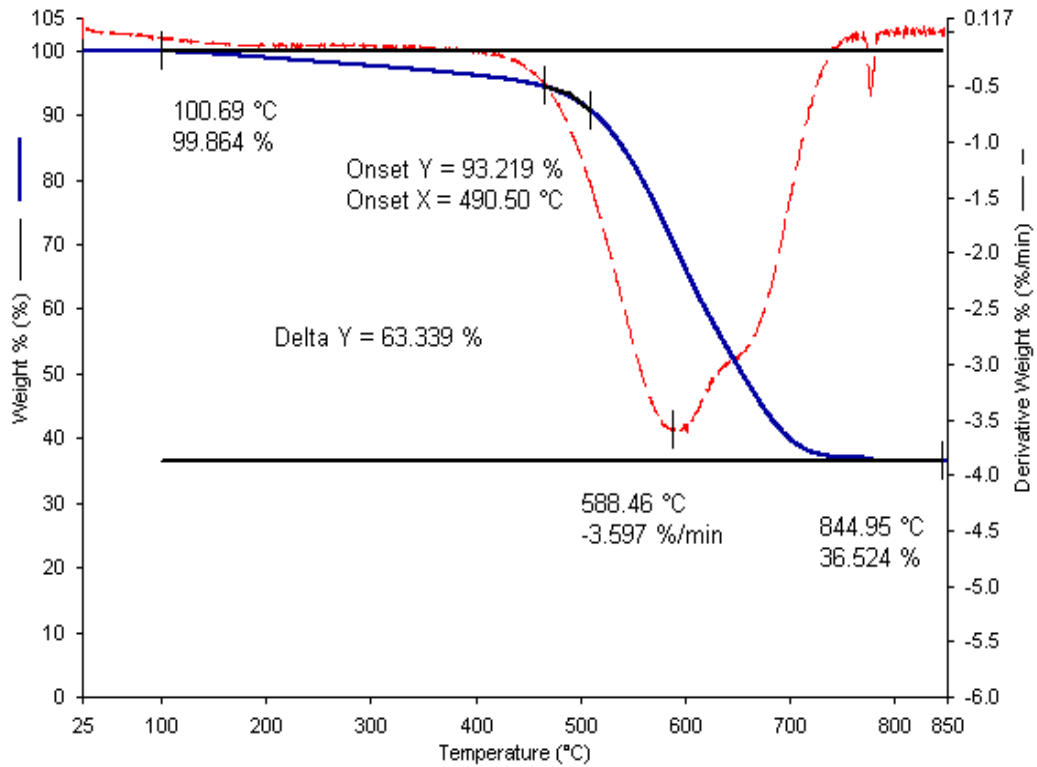
Şekil 4.7. R752/50 örneğinin TGA eğrisi.



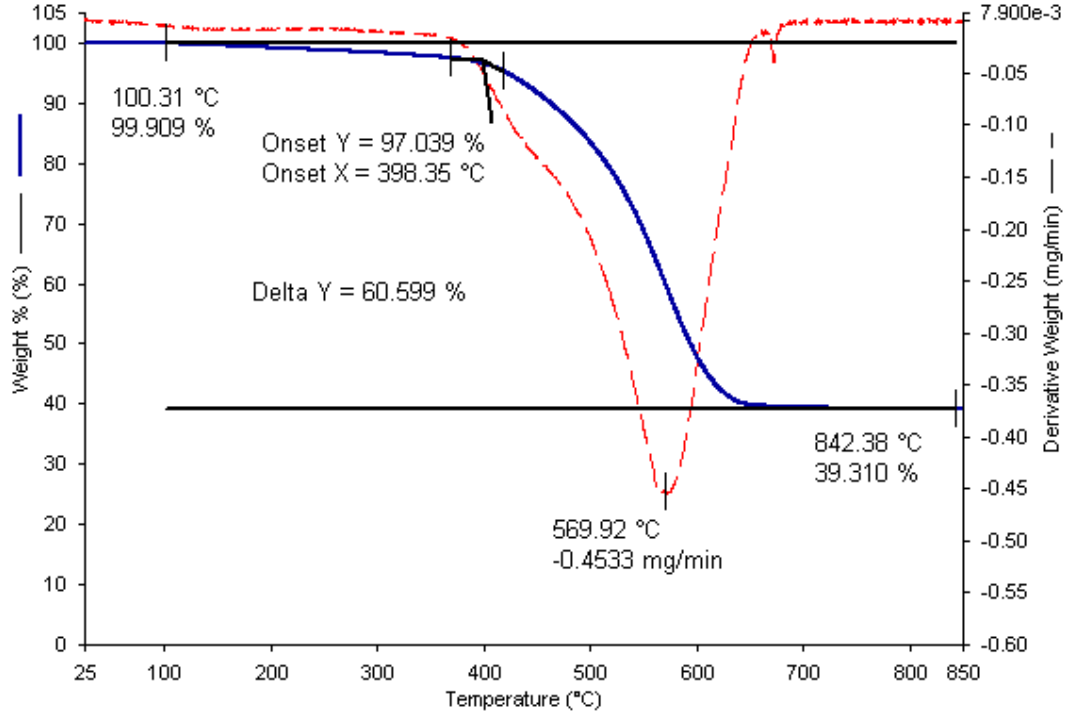
Şekil 4.8. R760/70 örneğinin TGA eğrisi.



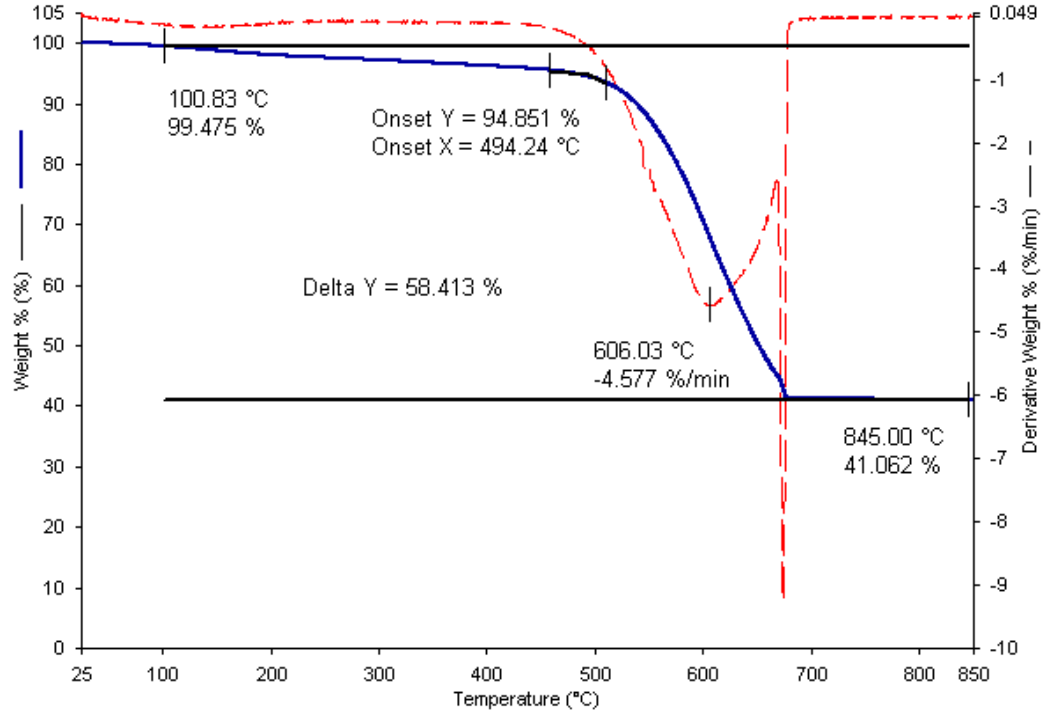
Şekil 4.9. Silplus 70 örneğinin TGA eğrisi.



Şekil 4.10. Silplus 80 örneğinin TGA eğrisi.



Şekil 4.11. Xiameter 70 örneğinin TGA eğrisi.



Şekil 4.12. Ravasil 70 örneğinin TGA eğrisi.

Termogramların değerlendirilmesi sonucunda elde edilen parametreler Tablo 4.1 de verilmiştir. Silikonların ısıl kararlılığının farklı olduğu maksimum bozunma sıcaklığının 532 °C ile 606 °C aralığında değişim gösterdiği görülmüştür. Kullanılan silikonların vinil metil silikon olduğu bilinmektedir. Vinil gruplarının oranını üretici firmalar tarafından belirtilmemekle birlikte ≤ 5 'in altındadır. Bu nedenle ana zincirde tekrar birimin dimetil siloksan olduğu kabul edilebilir. Bu bilgilere göre teorik olarak dimetilsiloksan'ın bozunması sonucunda geriye kalan artık SiO₂ miktarı aşağıdaki eşitlikten teorik olarak hesaplanabilir. Ancak silikon elastomerlerde artık madde miktarından gidilerek yapıdaki dolgu miktarının hesaplanması oldukça karmaşık ve zordur. Silikon elastomerlerde dolgu olarak SiO₂ kullanıldığı bilinmesine rağmen silikonun ana yapısında Si elementinden oluşması ve yanma için gerekli olan oksijenin bir kısmının ana yapıdan değil yakıcı gazlardan gelmesi kül miktarının doğrudan dolgu ve SiO₂ olarak kabul edilmesi doğru değildir. Ana yapının dimetil siloksan olması ve hiç dolgu kullanılmamış olması durumunda silikon elastomerin yanması sonucunda geriye kalan SiO₂ miktarının aşağıdaki hesaba göre %81,1 olması gerekir.

$$\text{Teorik \% SiO}_2 = \frac{\text{SiO}_2 \text{ molekül kütlesi}}{\text{CH}_3\text{-Si-O-CH}_3 \text{ molekül kütlesi}} = \frac{60,0855}{74,0555} \times 100 = \% 81,0$$

Tablo 4.1'den görüldüğü gibi bu çalışmada kullanılan kauçukların 900 °C'de bozunma sonucunda geriye kalan ağırlık yüzdesinin %34,40 -41,10 oranında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar aslında silikon elastomerlerde ana zincir yapısına dallanmış durumda daha fazla yan zincir olduğunu ve karbon içeriğinin daha fazla olduğunu göstermektedir. TGA analizleri ile dolgu miktarı mutlak olarak hesaplanamamış olmasına rağmen Silplus 70 ve Ravasil 70 örneklerinin diğer silikonlara oranla %2-3 oranında daha fazla silisyum içerdiği sonucuna varılmıştır. Daha yüksek bozulma sıcaklığı aynı zamanda bileşimde termal olarak kararlı dolgular varlığında meydana gelmektedir. (Indulekha ve ark., 2018). En yüksek kararlılık Ravasil 70'de görülmüştür.

Tablo 4.1. Silikon elastomerlerin ısı özellikleri.

Numune	Bozulmanın Başladığı Sıcaklık (°C)	Bozulmanın Başladığı Sıcaklıktaki Ağırlık (%)	Onset X (%)	Onset X (°C)	Delta Y (%)	Bozulma Sıcaklığı (°C)	Bozulmanın Bittiği Sıcaklık(°C)	Bozulmanın Bittiği Sıcaklıktaki Ağırlık (%)
R752/50	100	99,95	96,36	406,45	63,79	532,50	845,00	36,15
R760/70	101,5	99,96	95,89	415,60	65,53	540,52	846,64	34,43
Silplus 70	100,7	99,98	96,67	418,16	59,55	556,50	846,64	40,43
Silplus 80	100,7	99,86	93,22	490,50	63,34	588,46	844,95	36,52
Xiameter 70	100,3	99,91	97,04	398,35	60,60	569,92	842,38	39,31
Ravasil 70	100,8	99,47	94,85	494,24	58,41	606,03	845,00	41,06

Tablo 4.1.'i inceleyecek olursak 300 °C'nin altında önemli bir ağırlık değişimi olmamıştır. Bunun anlamı, tüm silikon elastomer örneklerinin 300 °C sıcaklığa kadar benzer termal kararlılığı sağlamasıdır.

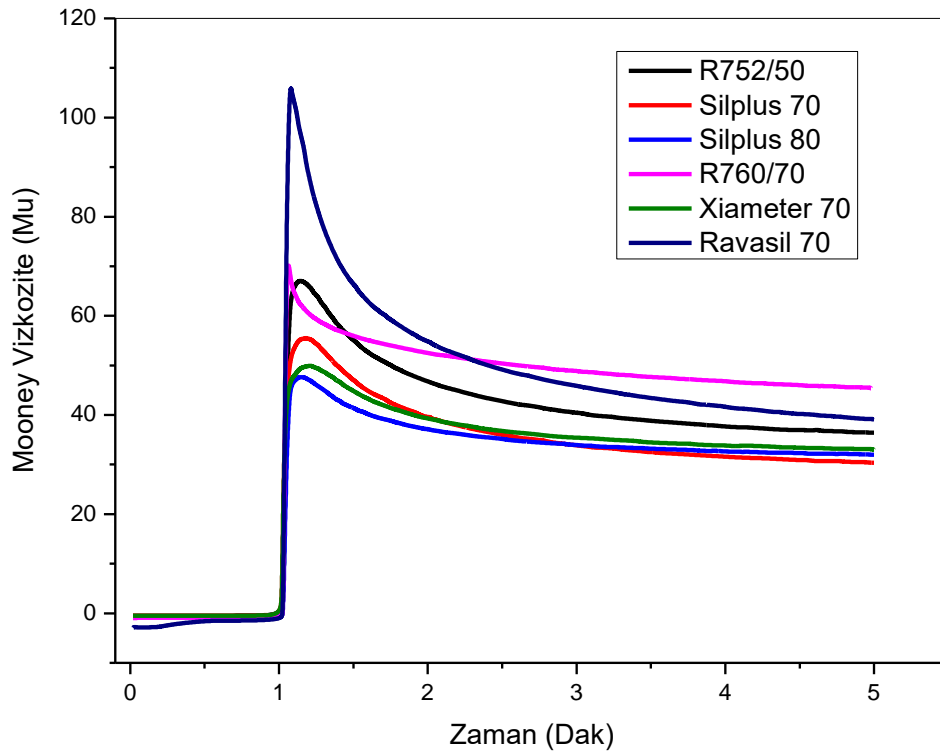
Bozunma sıcaklıklarına baktığımızda en yüksek bozunma sıcaklığı Ravasil 70 silikonuna ait olup sıcaklık değeri de 606,03 °C'dir. En düşük bozunma sıcaklığı R752/50 silikonuna ait olup 532,50 °C'dir. Ravasil 70 diğer silikon elastomerler arasındaki termal kararlılığı en iyi olurken, R752/50 ise en düşük termal kararlılığa sahiptir. Delta Y değeri bize malzemenin bozunmaya başladığı ve bozulmanın bittiği sıcaklık değerlerindeki yüzde ağırlık kaybını vermektedir. En yüksek ağırlık kaybına sahip olan malzeme R760/70'dir. En düşük ağırlık kaybına sahip olan malzeme ise Ravasil 70 örneğidir. Daha az kauçuk oranına muhtemelen daha

fazla dolgulanmış silikanın olması daha iyi termal kararlılığına sahip olduğu söylenebilir. Silika miktarı arttıkça termal kararlılık da artmaktadır (Marković ve ark., 2013). En yüksek bozunma sıcaklığına sahip olup aynı zamanda en düşük ağırlık kaybına sahip olması da Ravasil 70 örneğinin en yüksek termal kararlılığa sahip olduğunun önemli bir göstergesidir.

4.1.3. Mooney Vizkozimetri

Silikon elastomer örneklerinin vizkozitelerini incelemek amacıyla Mooney Vizkozimetre cihazı kullanılmış, ML (1+4) (MU) değerleri bulunmuştur. İlk olarak 80 g lık silikon örnekleri cihaza yerleştirilmiştir. ML(1 + 4) de 1 dakikalık ilk ön ısıtma süresini ve dört dakikalık test süresini gösterir. Pişme öncesi 1 dakika olurken, 4 dakika sistem üzerindeki kürleşmeye etki için eğriler elde edilmiştir. Bu işlemler de 100 °C sıcaklıkta gerçekleşmiştir.

Mooney Vizkozimetre saf kürleşmemiş kauçuk hamurundan yapılmasından dolayı da bize saf silikon örneğinin kürleşme özellikleriyle ilgili önemli bilgiler vermektedir (Chandrasekaran, 2017).



Şekil 4.13. Çapraz bağlanmamış silikon kauçukların Mooney vizkozite eğrileri.

Şekil 4.13'ten de görüldüğü gibi Ravasil 70 en yüksek Mooney vizkozite değerine sahiptir. Bu sonuç Ravasil 70 örneğinin daha yüksek molekül ağırlığına sahip olduğunun ve/veya bu kauçuktaki polimer dolgu etkileşiminin de oldukça iyi olduğunun bir göstergesidir. TGA verilerinde de Ravasilin en yüksek termal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2. Ham silikon kauçukların Mooney vizkozite değerleri.

Silikon Kodu	1 dk sonrasında (MU)	ML(1+4) (MU)
R752/50	67	36,4
R760/70	71,7	45,5
Silplus 70	55,5	30,4
Silplus 80	47,6	32,0
Xiameter 70	49,9	33,1
Ravasil 70	105,9	39,2

Tüm silikon elastomerlerde başlangıçta Mooney vizkozite değerleri önce bir maksimuma ulaşmaktadır, 4 dakikalık zaman sonrasında ise Mooney vizkozite değerleri azalmaya başlar. Bu azalma moleküler durulmadan kaynaklanmaktadır (Bestul, Decker ve White, 1951).

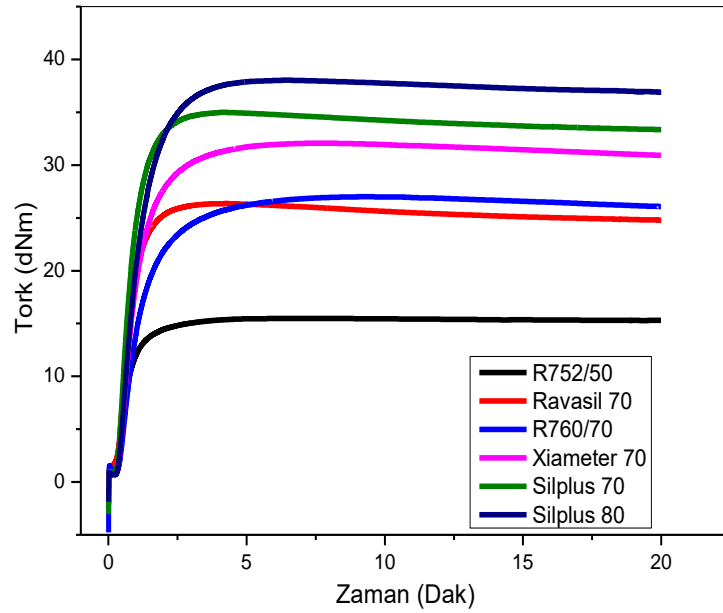
Tablo 4.2'de görüldüğü gibi Silplus 80 en düşük Mooney vizkozite değerine sahiptir. Kauçuk- dolgu etkileşiminin düşük olması veya molekül ağırlığının en düşük değere sahip olmasından dolayı en düşük Mooney vizkozite değerinin Silplus 80 de gözlenmiştir.

4.1.4. Silikon Karışımların Pişme Davranışlarının İncelenmesi

Farklı kaynaklardan elde edilen silikonlardan hazırlanan kauçuk hamurlarının reçeteleri Tablo 4.3'de verilmiştir. Pişirici, hızlandırıcı ve diğer katkıların oranı tüm sistemlerde aynıdır sadece kullanılan silikon kauçuk farklıdır.

Tablo 4.3. Silikon elastomerlerin hazırlanmasında kullanılan reçeteler.

Silikon Tipi	Silikon Miktarı (phr)	Kalıp Ayırıcı Miktarı (phr)	Peroksit Miktarı (phr)	Çapraz Bağlayıcı (Taic) (phr)	Isı Kararlı Kılıcı (phr)
R752/50	100	1,25	0,8	0,5	1
R760/70	100	1,25	0,8	0,5	1
Silplus 70	100	1,25	0,8	0,5	1
Silplus 80	100	1,25	0,8	0,5	1
Xiameter 70	100	1,25	0,8	0,5	1
Ravasil 70	100	1,25	0,8	0,5	1



Şekil 4.14. Silikon karışımların MDR'de elde edilen pişme eğrileri.

Kauçukların çapraz bağlaması sonucunda mekanik özellikleri yüksek malzemelerin hazırlandığı bilinmektedir. Peroksitler çapraz bağlanma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır. Bu tez çalışmasında

çapraz bağlayıcı peroksit olarak 2,5-Dimetil-2,5-di(terciyer-bütilperoksi)hekzan (DBPH) kullanılmıştır. Peroksitlerle birlikte kullanılan ko-ajanlar kür hızını ve/veya çapraz bağ oranını arttırmaktadır. Bu sayede daha üstün mekanik özelliğe sahip malzemeler hazırlanabilmektedir. Çalışmada DBPH peroksitle uyumlu bir ko-ajan olan triil izosiyanür (TAIC) hızlandırıcı olarak kullanılmıştır (Henning ve Costin, 2005).

Bir reometre eğrisinde Delta tork değeri kürleşme ve çapraz bağ yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir. Delta tork değeri daha yüksek olursa elastomerin çapraz bağ yoğunluğunun o kadar yüksek olduğu anlaşılır (Sae-oui ve ark., 2007).

Triil izosiyanür (TAIC) içeren silikon elastomerlerin içermeyen silikonlardan daha yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip olmasının ana nedeni de TAIC moleküllerinin molekül başına üç vinil fonksiyonel gruba sahip olmasıdır (Henning ve Costin, 2006). Elde edilen delta tork değerleri açısından bir sıralama yapıldığında elastomerler için aşağıdaki sıraya göre bir artış olduğu görülmüştür.

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Xiameter 70 < Silplus 70 < Silplus 80

En yüksek delta tork değeri Silplus 80 silikonunda elde edilmiştir. Bu sonuç Silplus 80 silikonunun daha yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklanabilir. Daha yüksek maksimum tork değerine sahip elastomer hamurunun daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu gözlenmiştir (Güngör, Akbay ve Özdemir, 2019).

ML, minimum tork, sert parçacıkların neden olduğu viskozite artışı nedeniyle artar. En yüksek ML değerinin görüldüğü Ravasil 70 en yüksek vizkoz özelliكتedir. Bununla birlikte, çapraz bağlanma yoğunluğu azalması nedeniyle maksimum tork azalır (Harandi ve ark., 2017).

MH değeri malzemenin sertliği (stiffness) ile ilişkilidir. Farklı özelliklere sahip silikon karışımların kür eğrileri incelendiğinde Silplus 80'in reometre eğrisinde en yüksek MH değerine sahip sistemdir. R752/50 en düşük MH değerine sahiptir. Silplus 80 diğerleriyle kıyaslandığında en serttir. Shore A değeri arttıkça malzemenin sertliği artmakta ve bunun sonucunda daha yüksek tork değeri elde edilmektedir. 70 shore değerine sahip silikon elastomerler kendi aralarında karşılaştırıldığında Silplus 70 en yüksek tork değerine sahipken onu Xiameter 70 ve R760/70 takip etmiştir. 70 shore özelliğine sahip silikon elastomer arasındaki en düşük tork değeri gösteren de Ravasil 70 olmuştur. Daha sonra verilecek olan absorplanan enerji değerlerine de bakıldığında delta tork değerindeki benzer

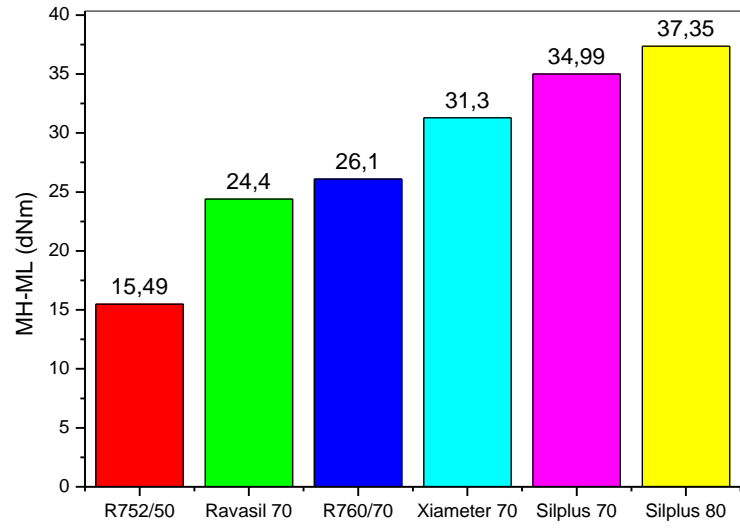
sonuçların olduğu görülmüştür. Silplus 80 en yüksek delta tork değerine sahiptir ve aynı zamanda birim hacim başına absorplanan enerji değeri de diğer silikon elastomerler arasında en yüksek değerdedir. Delta tork değeri en düşük olan R752/50'dir. En düşük birim hacim başına absorplanan enerji değerleri de R752/50 'de gözlenmiştir.

T90 süresi azaldıkça kürleşmenin daha hızlı gerçekleştiğini söyleyebiliriz (Dluzneski, 2001).

Kürleşme hız oranı (CRI) ise bize malzemedeki pişme bir diğer ifadeyle vulkanizasyon süresi hakkında bilgi vermektedir. Kürleşme hız oranının daha fazla olması elastomer örneğin çapraz bağlanmasının daha erken sürede aktive olduğunu söyleyebiliriz. Daha yüksek kür hız oranı indeksine(CRI) sahip olan Ravasil 70 örneği en düşük t90 değerine sahipken, en düşük kür hız oranı indeksine(CRI) sahip olan R760/70 örneği ise en yüksek t90 değerine sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 4.4. Silikon elastomerlerin reolojik özellikleri.

Karışımlar	ML (dNm)	MH (dNm)	Δ tork	ts2 (dak)	t5 (dak)	t30 (dak)	t60 (dak)	t90 (dak)	Kür Hız Oranı(CRI)
R760/70	0,9	27,0	26,1	0,46	0,42	0,70	1,20	3,01	39,2
Xiameter 70	0,8	32,1	31,3	0,42	0,41	0,65	1,05	2,38	51,0
Ravasil 70	2,0	26,4	24,4	0,39	0,36	0,56	0,83	1,53	87,7
R752/50	1,26	15,49	14,23	0,41	0,34	0,51	0,75	1,64	81,30
Silplus 70	0,83	34,99	34,16	0,37	0,36	0,56	0,86	1,65	78,125
Silplus 80	0,68	38,03	37,35	0,42	0,41	0,69	1,14	2,34	52,08

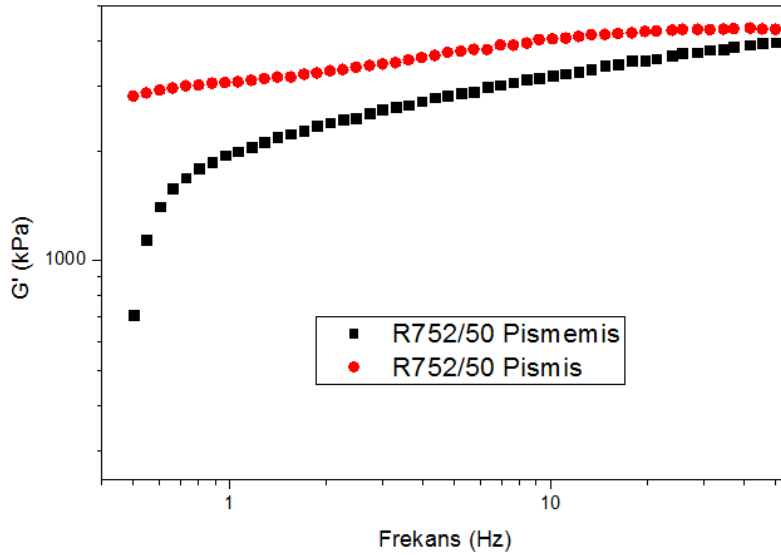


Şekil 4.15. Silikon kauçuk karışımların delta tork değerleri.

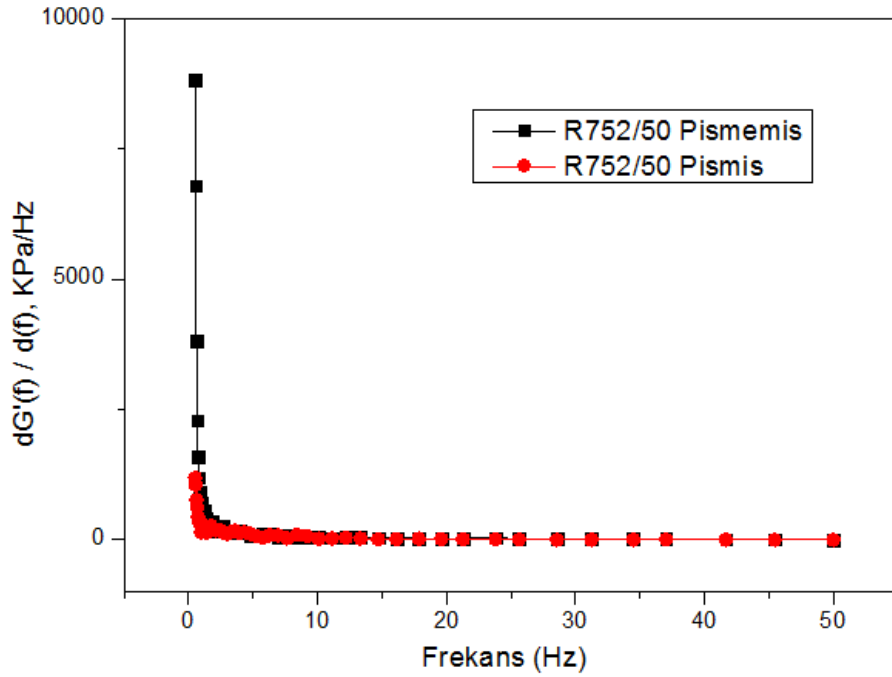
4.1.5. Kauçuk Proses Analizörü (RPA) ile Çapraz Bağ Yoğunluğunun Belirlenmesi

Kauçuk Proses Analizörü elastomerik sistemlerin reolojik özelliklerinin yanı sıra çapraz bağ yoğunluklarının da bulunmasında kullanılan bir tekniktir. Hazırlanan elastomerlerin çapraz bağ yoğunluğunun bulunması amacıyla RPA'da 50 °C de 0,010° gerilim değerinde pişmiş ve pişmemiş örneklerin 0,5 – 50 Hz aralığında frekans taraması yapılmıştır. Elastomerlerin çaprazbağ yoğunluklarının hesaplanması için Lee-Pawlowsky-Coran(1994) (LPC) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre polimerlerin zincir takılması kaynaklı çapraz bağlanması XLDfzk, kimyasal reaksiyon sonucu oluşan çapraz bağlanma XLDkim, ve toplam çapraz bağlanma XLDtop olarak ifade edilmiştir. XLDfzk kauçuk hamuru pişirilmeden yapılan frekans taraması sonucunda elde edilir. XLDtop hamur pişirildikten sonra yapılan frekans taramasından elde edilir. XLDkim ise toplam çapraz bağ yoğunluğu ile fiziksel çapraz bağ yoğunluğunun farkından elde edilir (Lee, Pawlowsky ve Coran, 1994).

Örnek bir frekans tarama eğrisi Şekil 4.16 da verilmiştir.



Şekil 4.16. R752/50 silikon elastomeri için elastik modülün frekans ile değişimi.



Şekil 4.17. R752/50 silikon elastomeri için elastik modülün frekans ile değişimi türev grafiği.

Şekil 4.17'de Şekil 4.16'daki eğrilerin türev eğrisi verilmiştir. Türev grafiğini incelemenin amacı depolama modülünün hangi frekanstan sonra sabit kaldığını tespit etmektir. Çapraz bağ yoğunluğu depolama modülünün frekansa bağlı olarak değişmediği noktadan tayin edilir. Bu türev grafiği diğer elastomerler için de incelenmiştir. Bu grafikler göz önüne alınarak pişmiş ve pişmemiş örnekler için belirlenen frekans değeri 20 Hz'dir.

R752/50 için LPC yöntemi ile çaprazbağ yoğunluğunun hesabı aşağıda verilmiştir (Eşitlik 2-4). Bu hesaplamalar tüm elastomerler için yapılmıştır. 2 no'lu eşitlikteki g_n ağ yapısının tipine bağlı olarak değişen bir sabittir ve 1 olarak kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} XLD_{fzk} &= G'_{\text{pişmemiş}}(20.0 \text{ Hz}) / g_n \cdot 2 \cdot RT \\ &= 2595.5478 \text{ kPa} / (1 \times 2 \times 8.3145 \text{ J/Kmol} \times 323.15 \text{ K}) \\ &= 0.483 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3 \end{aligned} \quad \text{Eşitlik 2}$$

$$\begin{aligned} XLD_{kim} &= [G'_{\text{pişmiş}}(20.0 \text{ Hz}) - G'_{\text{pişmemiş}}(20.0 \text{ Hz})] / 2RT \\ &= 3465.2847 - 2595.5478 / 2 \times 2 \times 8.3145 \text{ J/Kmol} \times 323.15 \text{ K} \\ &= 0.162 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3 \end{aligned} \quad \text{Eşitlik 3}$$

$$\begin{aligned}
XLD_{top} &= XLD_{kim} + XLD_{fzk} \\
&= (0.483 + 0.162) \times 10^{-3} \\
&= 0.645 \times 10^{-3} \text{ mol/cm}^3
\end{aligned}$$

Eşitlik 4

Kimyasal çapraz bağ yoğunluğu Eşitlik 5 kullanılarak yapılmıştır. (Lee, Pawlowski ve Coran, 1994).

$$X_{kimyasal} = \frac{[G'_{pişmiş} (@ 20 \text{ Hz}) - G'_{pişmemiş} (@ 20 \text{ Hz})]}{2RT} \quad \text{Eşitlik 5}$$

$X_{kimyasal}$: Vulkanizasyon sırasında oluşan çapraz bağların yoğunluğu

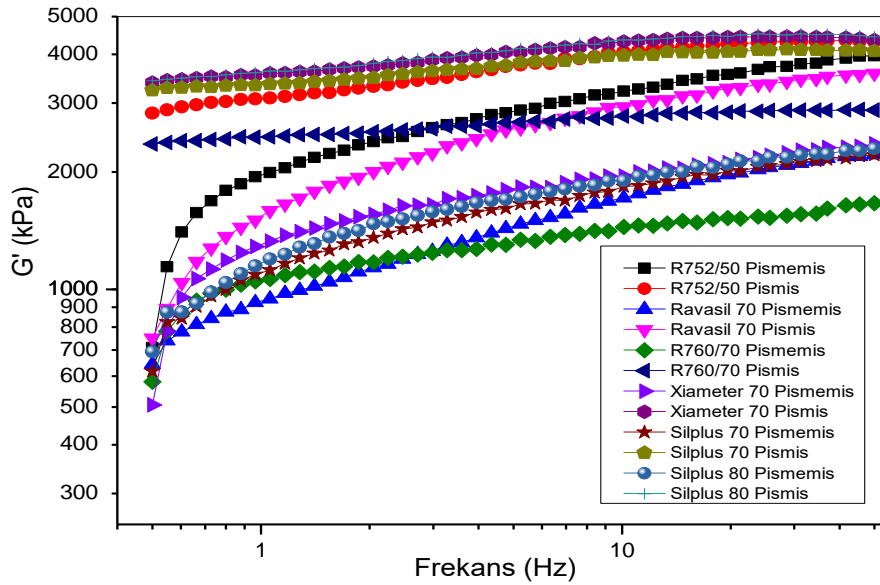
$G'_{pişmiş} (20 \text{ Hz})$: Pişmiş karışımın 20 Hz' deki elastik modül değeri

$G'_{pişmemiş} (20 \text{ Hz})$: Pişmemiş karışımın 20 Hz' deki elastik modül değeri

R: Universal gaz sabiti

T : Sıcaklık

Hazırlanan tüm karışımların pişmemiş ve pişmiş hallerinin RPA da elde edilen frekans eğrileri Şekil 4.18'de verilmiştir.

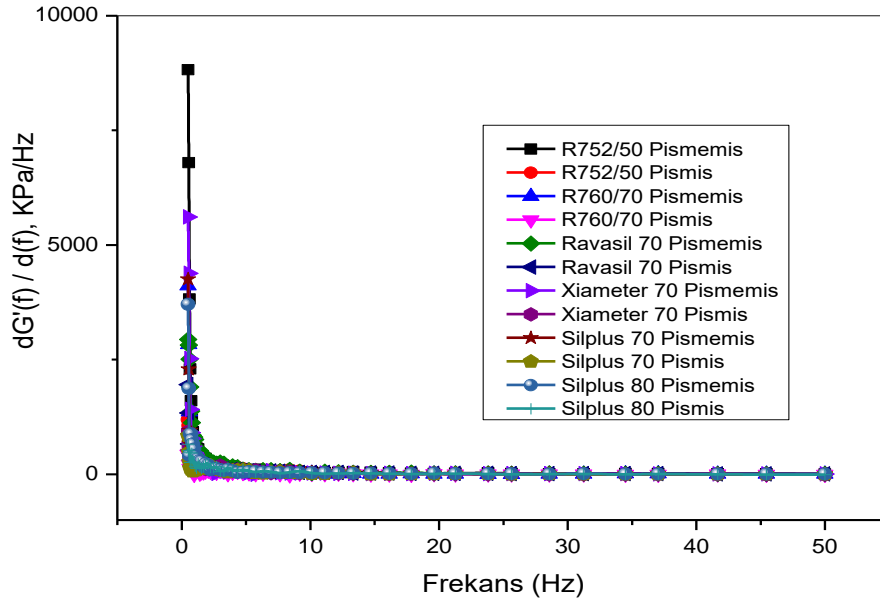


Şekil 4.18. Silikon elastomerlerin frekans taraması.

Şekil 4.18'de de görüldüğü gibi düşük frekans değerlerinde G' değerleri sıvı benzeri davranış gösteren frekansa bağlıdır, yüksek frekans değerlerinde ise G' değerleri frekanstan bağımsız elastik davranış gösterir (Sun ve ark., 2020).

Şekil 4.18. de görüldüğü gibi frekans taramasında kayma kalınlaşmasından dolayı G' değerlerinde bir artış görülmektedir. Pişmiş örnekler ve pişmemiş örnekleri karşılaştıracak olursak pişmiş örneklerin G' değeri pişmemiş örneklere göre daha yüksektir. Bu da vulkanizasyonun sonucunda kauçuk zincirleri arasındaki çapraz bağlanmadan kaynaklanmaktadır (Sahoo, Naskar ve Tripathy, 2014). Kimyasal çapraz bağlanma vulkanizasyon işlemi sonucunda ortaya çıkarken, fiziksel çapraz bağlanma zincir dolaşmasının bir sonucudur ve kısıtlamalar veya diğer birçok etkiler kimyasal değişikliklerle ilgili olmamaktadır (Linhares ve ark., 2018).

Kürlenmiş silikon elastomerlerin depolama modülünün artışı dolgu maddesinin deforme edilemeyen katı bir faz olması nedeniyle silika dolgusunun hidrodinamik etkisine atfedilebilir (Bazli ve ark., 2017). Tüm elastomerlerin türev eğrileri Şekil 4.19'da verilmiştir. Elastomerlerin yukarıda belirtilen LPC yöntemine göre hesaplanan çapraz bağ yoğunlukları Tablo 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Silikon elastomerlerin frekans taraması türev eğrisi.

Şekil 4.18. de görüldüğü gibi yüksek frekans bölgesinde daha yüksek G' değerleri görülmektedir bunun en önemli nedenlerinden biri de dolaşmış polimer zincir

takılmalarının ayrışması için yeterli zamanın olmamasındandır. Silikon elastomerler Şekil 4.19'da görüldüğü gibi 20 Hz den itibaren sabit bir eğilim göstermiştir.

Tablo 4.5. Silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunlukları.

Parametre/ Örnek	R752/50	Ravasil 70	R760/70	Xiamater 70	Silplus 70	Silplus 80
G' (kPa)@20 Hz pişmemiş	2595	1252	1242	1646	1488	1581
G' (kPa)@20 Hz pişmiş	3465	2236	2579	3874	3628	3939
XLD _{fiz} x10 ⁻³ (mol/cm ³)	0,483	0,233	0,231	0,306	0,277	0,294
XLD _{kim} x10 ⁻³ (mol/cm ³)	0,162	0,183	0,249	0,415	0,398	0,439
XLD _{top} x10 ⁻³ (mol/cm ³)	0,645	0,416	0,480	0,721	0,675	0,733

Fiziksel çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olması fiziksel takılmaların yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu olgu iyi bir kauçuk- dolgu etkileşimini sağlayan bir parametredir. R752/50 diğer silikon elastomerlerle karşılaştırıldığında daha iyi kauçuk-dolgu etkileşimine sahiptir.

Elastomer hamurları için fiziksel çapraz bağ yoğunluğu

R760/70 < Ravasil 70 < Silplus 70 < Silplus 80 < Xiameter 70 < R752/50 şeklinde ve elastomerler için kimyasal çapraz bağ yoğunluğu

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80 şeklinde arttığı bulunmuştur.

Toplam XLD değeri ise aşağıdaki sıralamaya göre artmıştır.

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80

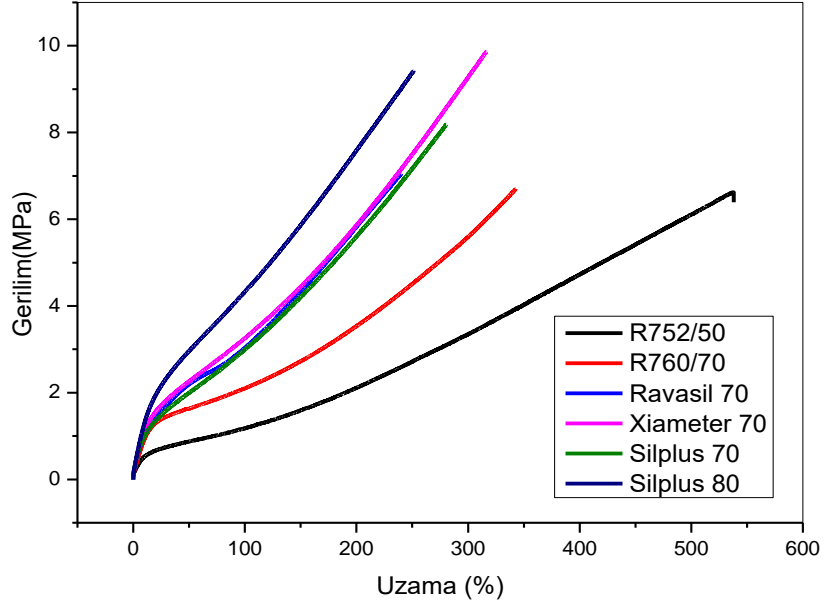
Kimyasal çapraz bağ yoğunluğu kür etkinliğini ve çapraz bağlanma miktarını göstermektedir. Kimyasal XLD değeri için elde edilen artışın reometre analizleri sonucunda delta tork değerleri için elde edilen sıralamayla aynı olması reometre eğrilerinde delta tork değerlerinin çapraz bağlanmadan dolayı gözlemlendiğini

kanıtlamıştır. Hazırlanan sistemler için en yüksek kimyasal çapraz bağlanma Silplus 80 karışımında, en düşük kimyasal çapraz bağlanma R752/50 karışımında gözlenmiştir. Tablo 4.4. de en yüksek delta tork Silplus 80'de, en düşük delta tork değeri de R752/50 dir. Literatüre dayanarak kauçuk bileşimlerinde delta tork ile kimyasal çapraz bağ yoğunluğu arasında dolaylı bir ilişki olduğu görülmüştür (Linhares ve ark., 2018). Literatürde benzer bir çalışmada da frekansla değişmeyen davranışların fiziksel bağlayıcılardan kaynaklanmadığı vizkoelastik özelliklerin kimyasal çapraz bağlanmayla ayarlanabileceği kanıtlanmıştır (Wang ve Chen, 2016).

Silikon elastomerlerin RPA ile çapraz bağ yoğunluğu bulunduktan sonra mekanik özelliklerine nasıl yansıdığını görmek amacıyla mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikler Tablo 4.6'da ve Şekil 4.20.'de verilmiştir.

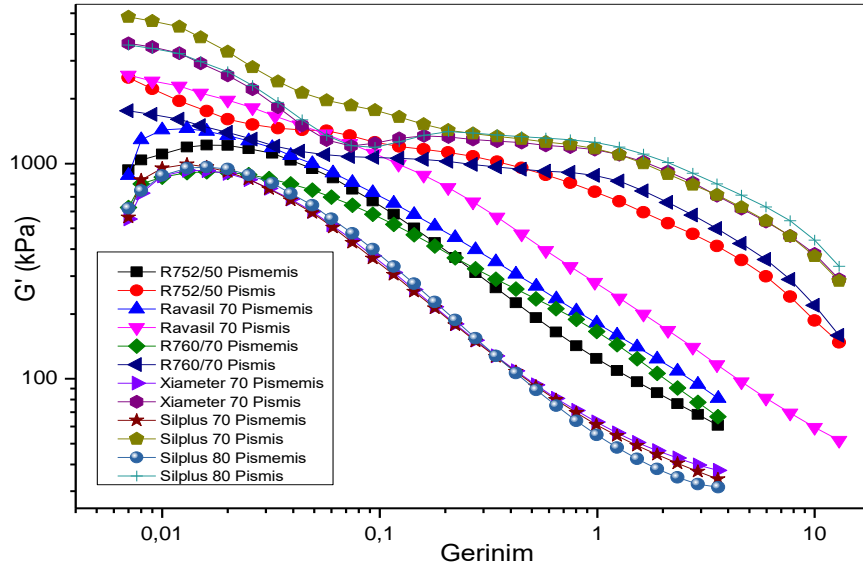
Tablo 4.6. Silikon elastomerlerin mekanik özellikleri.

Silikon Elastomer	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopmadaki Uzama (%)	Elastik Modül(MPa)
R752/50	6,4	538	7
Silplus 70	8,2	280	14
Silplus 80	9,2	245	15
Xiameter 70	9,9	316	13
Ravasil 70	6,9	238	13,7
R760/70	6,7	343	8,4



Şekil 4.20. Silikon elastomerlerin gerilim-uzama eğrileri.

Şekil 4.20'deki eğride görüldüğü gibi kopma anında en az uzama değerlerinden biri de Silplus 80 örneğinde görülmektedir. Bu sonuç delta tork değerinin ve çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olmasıyla da paralellik göstermektedir. Silplus 80 daha sert bir malzemedir ve daha az % uzama değeri göstermiştir. En fazla uzama R752/50 örneğine aittir. R752/50 silikon elastomerine ait çapraz bağ yoğunluğu da en düşüktür. Elastik modülüs değerlerine de bakıldığında Silplus 80 en yüksek değerdedir. Nedeni de çapraz bağlanmanın yüksek olmasındandır. Silikon elastomerlerin gerilim taraması eğrisi Şekil 4.21. de verilmiştir.



Şekil 4.21. Silikon elastomerlerin gerinim taraması.

Şekil 4.21’de de görüldüğü gibi hem pişmiş hem de pişmemiş elastomerlerde belirli bir noktadan itibaren G' değerinin devre dışı kaldığı yani deformasyon ile azaldığı görülmüştür. Bunun en önemli nedeni dolgu ağının bozunmasındandır (He ve ark., 2016).

Dolgulu olmayan elastomerlerde depolama modülüs (G') değerlerinde doğrusal bir eğri görülmektedir. Ancak Şekil 4.21’de verilen gerinim taraması eğrilerine bakılacak olursa gerinimde G' değerinin hızla azalması hazırlanan elastomerlerin dolgulu bir elastomer olduğunu kanıtlamaktadır (Gauthier ve ark., 2004).

Hazırlanan elastomerler düşük gerinim (strain) değerlerinde G' depolama modül değerleri vizkoelastik bölge içinde kaldığı için önemli bir değişim göstermemiştir. Ancak yüksek frekanslarda hızla azalmaya başlamıştır. Bunun sebebi Payne Etkisi olarak bilinmektedir. Elastomer gerinime uğradığında dolgu –dolgu etkileşimiyle belirli bir ağ oluşmaktadır. G' değeri belirgin bir miktar artabilir. Gerginlik belirli bir seviyeye geldiğinde ağın bozunması oluşmasından daha baskın olacağından G' değerinde hızlı bir azalma görülecektir (Du ve ark., 2019). Payne Etkisi silika içeriği fazla olduğunda daha büyük olduğu görülürken, silika içeriği azaldıkça Payne Etkisi de azalır.

Şekil 4.21’de de görüldüğü gibi pişmemiş örnekler ile pişmiş örnekler arasında belirgin bir fark görülmektedir. Pişmemiş örnekler belirli bir gerinime maruz

kaldıklarında önce artıp sonra azalırken, pişmiş örneklerde hızla bir azalma görülmektedir. Bu dolgulu örneklerde pişme ile meydana gelen çapraz bağlanmanın sonucudur (Sripornsawat ve ark., 2018).

Pişmiş ve pişmemiş örneklerde gerinim taraması yapmak için frekans 1,000 Hz de sabit tutulurken, sıcaklık da 50 ° C olarak gerinim taraması yapılmıştır. Gerinim aralıkları ise 0,007 -12,942 ° dir.

Literatürde birçok araştırmacı tarafından, polimerin herhangi bir dolgu maddesiyle güçlendirilmesinde dolgu maddesi-matris etkileşiminin önemli bir parametre olduğu kanıtlanmıştır ve bu etkileşimlerin genellikle reolojik özellikleri de güçlü bir şekilde etkilediği belirtilmiştir.

Payne etkisi genellikle yüksek miktarda karbon siyahı dolgulu veya silika dolgulu elastomerlerde görülmektedir. Payne etkisi dinamik depolama modülüsündeki azalmanın etkisindedir. Nedeni de dinamik gerinim (strain) değerinin artmasına bağlı olarak dolgu ağ yapısındaki bozunmadan kaynaklanmaktadır (Shibulal ve Naskar, 2013).

Bir diğer ifadeyle de Payne Etkisi, camsı geçiş sıcaklığı (Tg) 'nin üzerinde amorf durumdaki dolgulu elastomerlerin dinamik vizkoelastik özelliklerinin gerinime olan etkisini ifade etmek amacıyla incelenmektedir (Cassagnau, 2003).

Silika, silikon elastomerlerde yaygın kullanılan dolgu maddesidir. Bir dolgu maddesi olarak silikanın hidrojen bağı oluşturma kabiliyeti, polar yapısı ve hidrokarbon elastomere zayıf uyumu nedeniyle çok güçlü bir dolgu ağı oluşturduğu bilinmektedir.

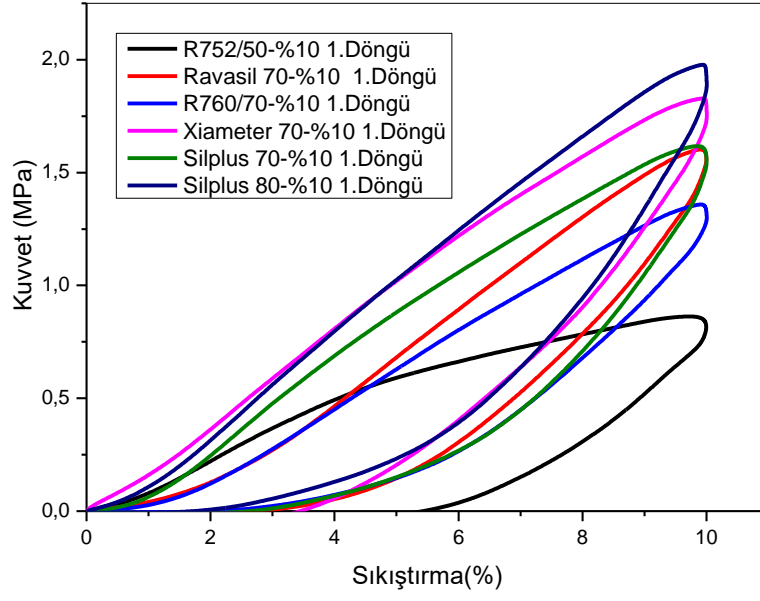
Payne etkisi depolama modülü ile gerinim arasındaki doğrusal olmayan bir ilişkiyi ifade etmektedir. Depolama modülündeki daha büyük azalma gerinim ile birlikte daha büyük enerji salınımına karşılık gelmektedir (Raut ve ark., 2018). En büyük delta G' değerleri arasındaki fark Silplus 70 örneğinde görülmüştür. G' değerinin daha büyük olması Payne etkisinin daha büyük olması ile birlikte daha güçlü dolgu ağı ve daha kötü dolgu-mikro dağılımı ifade etmektedir (Ye ve ark.,2012). En düşük G' değerleri arasındaki fark R760/ 70 örneğine aittir. G' değerinin küçük olması da daha düşük Payne etkisi, daha güçlü dolgu maddesi-polimer etkileşimi ve daha iyi dolgu maddesi dağılımı anlamına gelir (Liu ve ark., 2014). G' değerleri arasında farkın daha küçük olması aynı zamanda içeriğindeki silika miktarının az olduğu anlamına da gelmektedir. Diğer elastomer örnekleriyle de karşılaştırıldığında TGA'da en düşük artık madde miktarının R760/70 silikon

elastomerine elde edilmiş olması bu sonucu kanıtlar niteliktedir. Polimerle silika arasındaki etkileşiminin iyi olması depo modül (G') değerinin daha büyük olmasını gerektirir. Bu bilgiler ışığında da Silplus 70 en iyidir. R760/ 70 için ise polimer – silika etkileşimi en düşüktür. Şekil 4.18'deki frekans taramasından da görüldüğü gibi frekansın artması elastik modülüs ve rijitliğin de artmasına neden olmaktadır (Wang, Cheng ve Zhao, 2011). Silplus 80 en yüksek elastik modülüs ve G' değerine sahiptir. Tablo 4.5. de belirtilen kimyasal çapraz bağ yoğunluğu ve Tablo 4.6'daki elastik modülüs değeri de bunu kanıtlamaktadır.

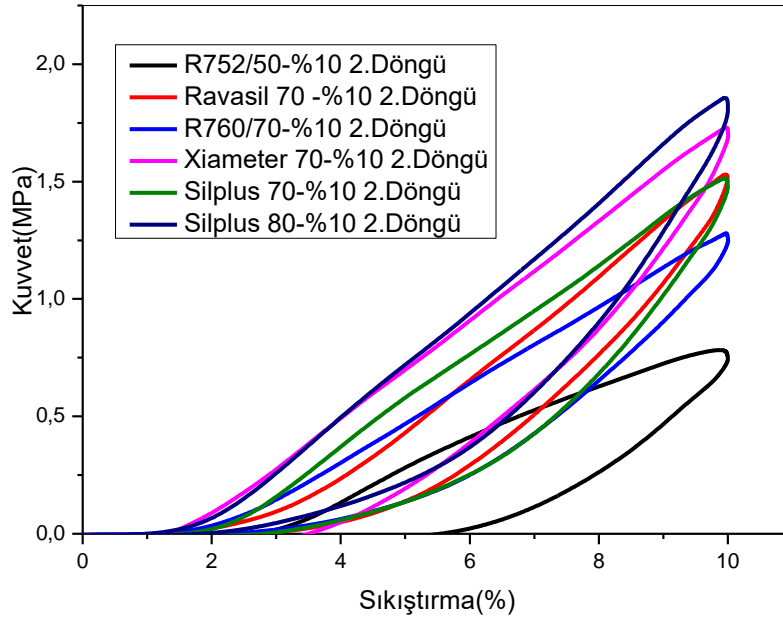
Yapılan bir çalışmada da histeresisteki kayıplar artan frekans ve gerinim değerlerinde artmaktadır. Histeresiz kaybını gerilme genliği ve kayıp modülü ile ilişkilendiren bir viskoelastik model, tam bir deformasyon döngüsünde harcanan enerjiyi hesaplamak için kullanılır (Luo ve ark., 2010). Şekil 4.18'de de görüldüğü gibi depo modül artan frekansla birlikte tüm silikon elastomerlerde artmıştır. Düşük frekans değerlerinde molekülleri hareket etmesi için yeterli zaman vardır ve depo modülü düşüktür. Daha büyük frekansta deforme olduğunda, zincirlerin gevşemesi (entanglement) için yeterli zaman olmayacağından depo modül değeri artmıştır (Mishra, Hwang ve Ha, 2005).

4.2. Silikon Elastomerlerin Enerji Sönümlenme Özelliklerinin İncelenmesi

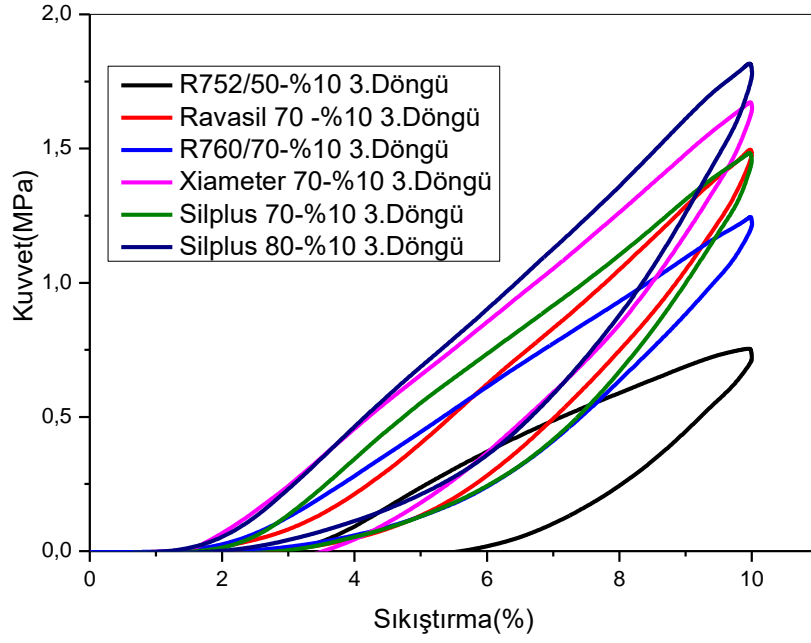
Silikon elastomerin sönümlenme özelliklerinin incelenmesi amacıyla Zwick Z10 marka evrensel test cihazı kullanılmıştır. Silikon elastomerler silindir şeklinde hazırlanmıştır. Hazırlanan silikon elastomerler %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında ve her oranda da 10 kez döngüsel olarak sıkıştırılmıştır. Daha sonraki aşamada ise silindir şeklinde hazırlanan silikon elastomerlerin hacim değerleri hesaplanmıştır. Silikon elastomerlerin %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında ve her oranda da 10 kez döngüsel olarak histeresiz eğrileri arasında kalandan absorplanan enerji değerleri hesaplanmıştır. Her bir sistem için birim hacim başına absorplanan enerji değerleri Ek 1-14 de verilmiştir. Bu eğrilerin değerlendirilmesiyle elde edilen bar grafikleri de ilerleyen bölümde verilmiştir. Absorplanan enerji değeri Kuvvet (MPa) – sıkıştırma (%) eğrisi altında kalan alanın malzemenin hacmine bölünmesi ile bulunmuştur. Örneklerin %10 sıkıştırma için 1-10 döngüdeki histeresiz eğrileri Şekil 4.22- 4.30 da verilmiştir.



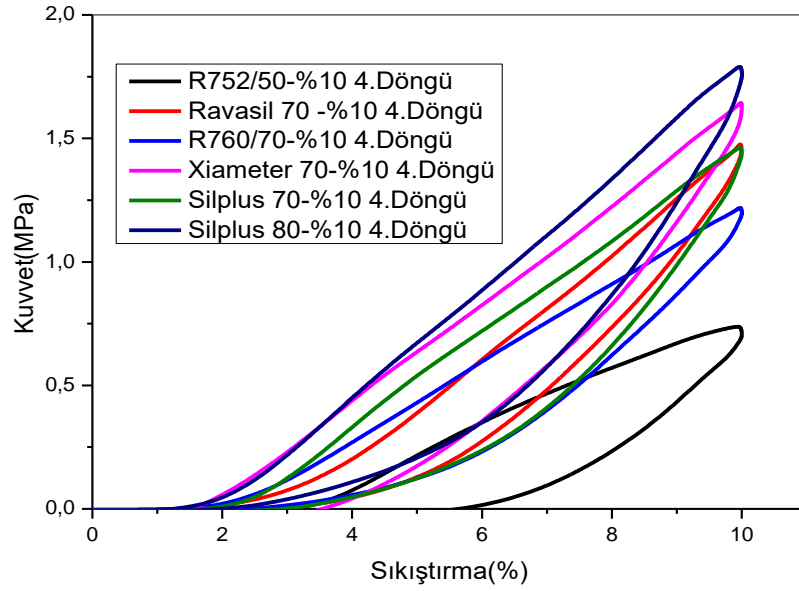
Şekil 4.22. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 1. döngüdeki histeresis eğrileri.



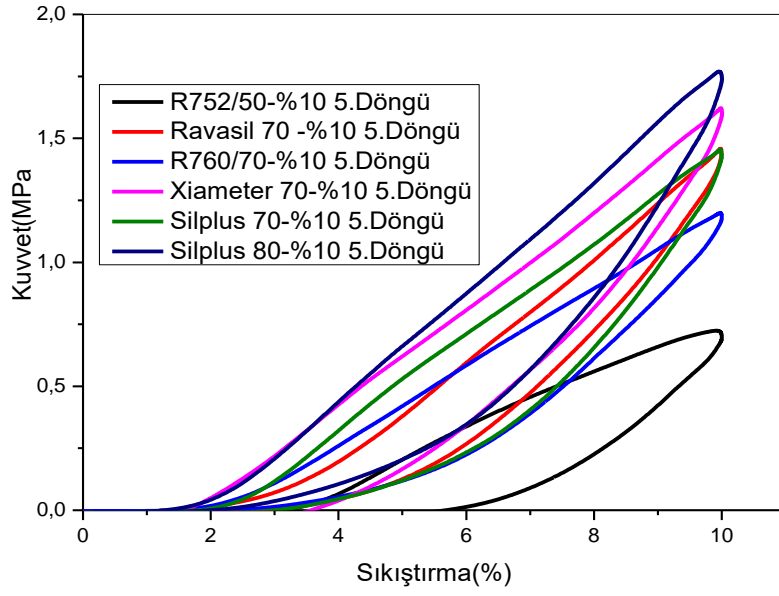
Şekil 4.23. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 2. döngüdeki histeresis eğrileri.



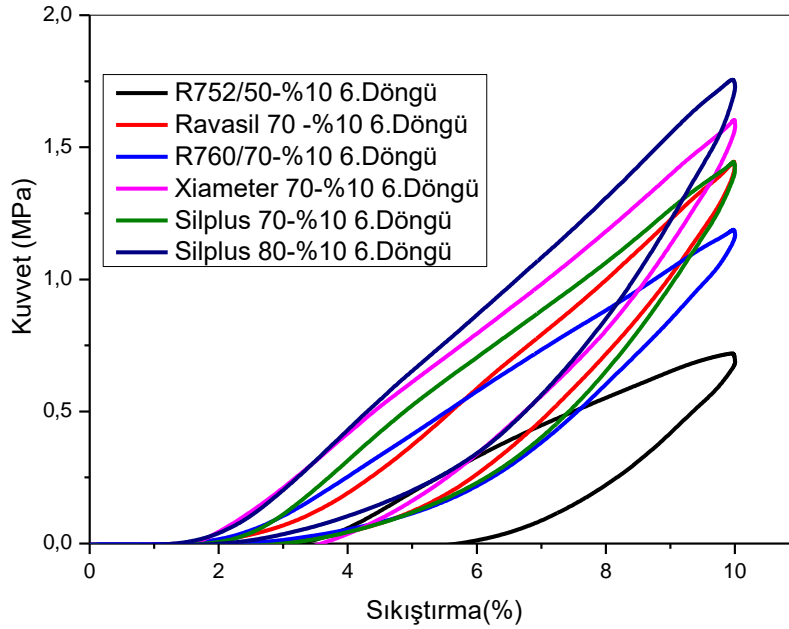
Şekil 4.24. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 3. döngüdeki histeresis eğrileri.



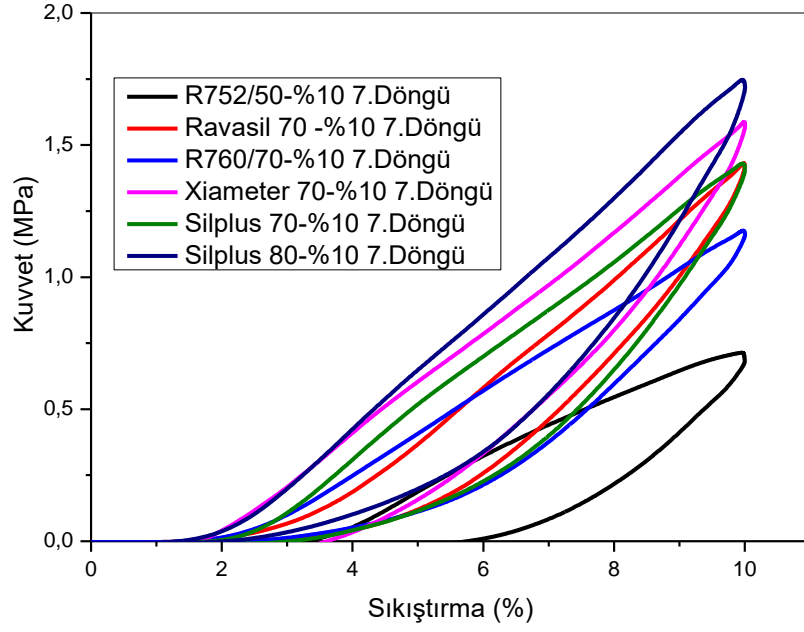
Şekil 4.25. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 4. döngüdeki histeresis eğrileri.



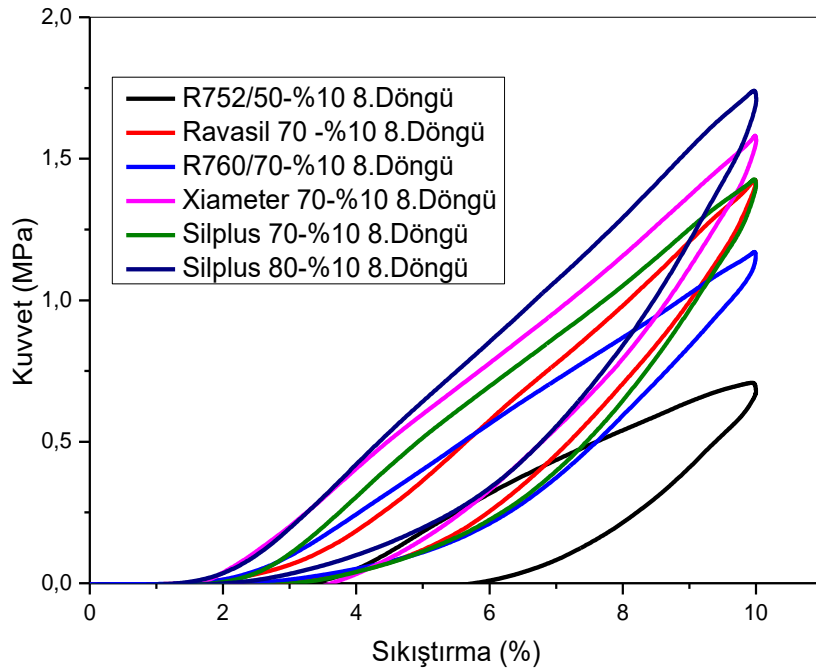
Şekil 4.26. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 5. döngüdeki histeresis eğrileri.



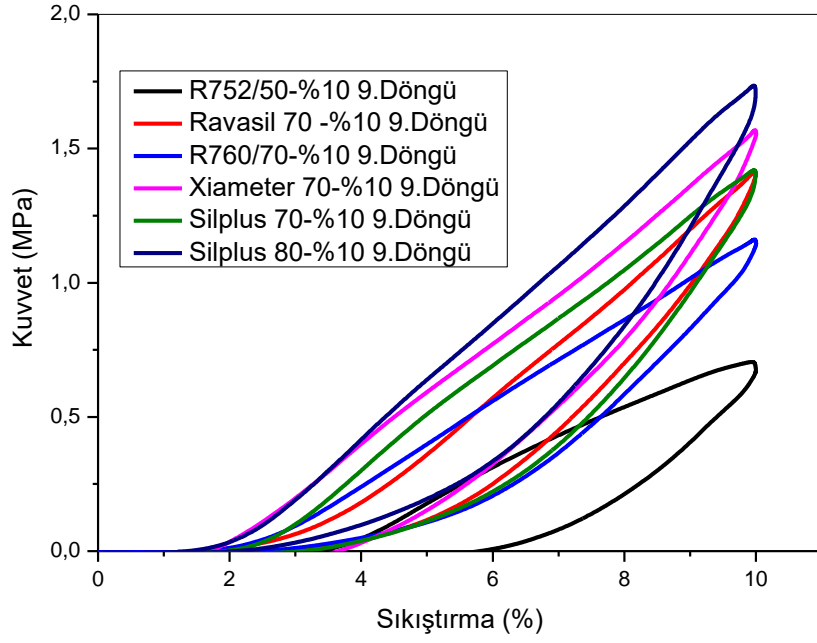
Şekil 4.27. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 6. döngüdeki histeresis eğrileri.



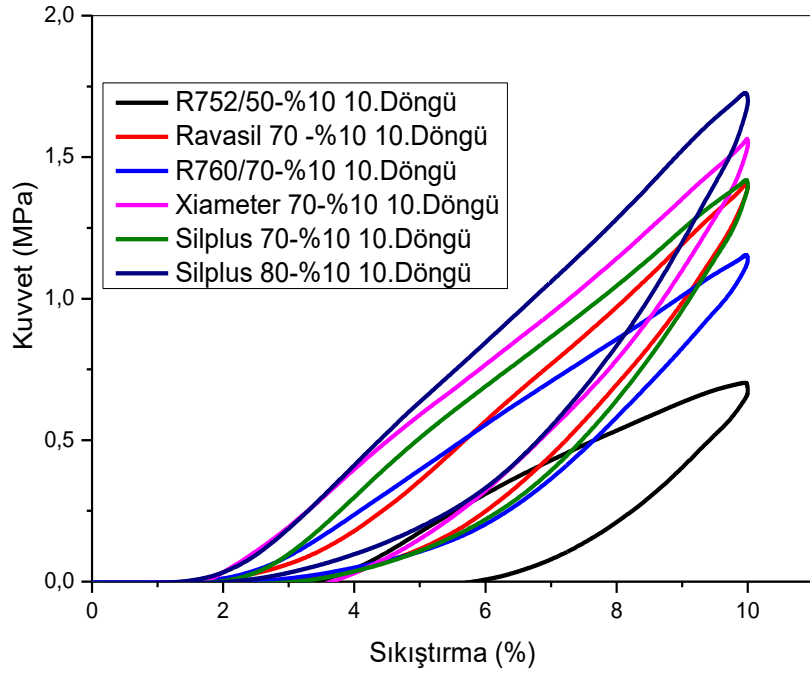
Şekil 4.28. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 7. döngüdeki histeresis eğrileri.



Şekil 4.29. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 8. döngüdeki histeresis eğrileri.

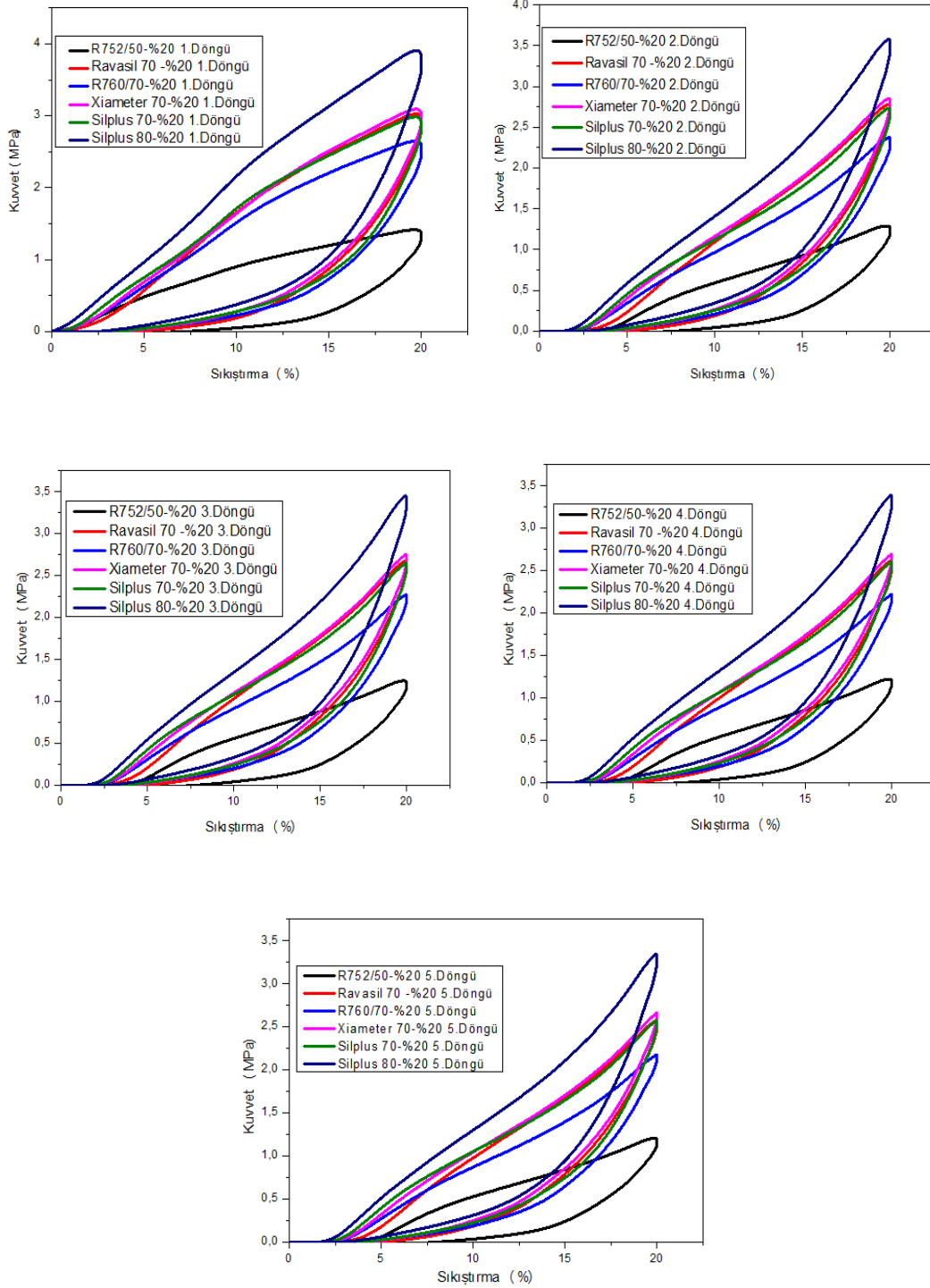


Şekil 4.30. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 9. döngüdeki histeresis eğrileri.

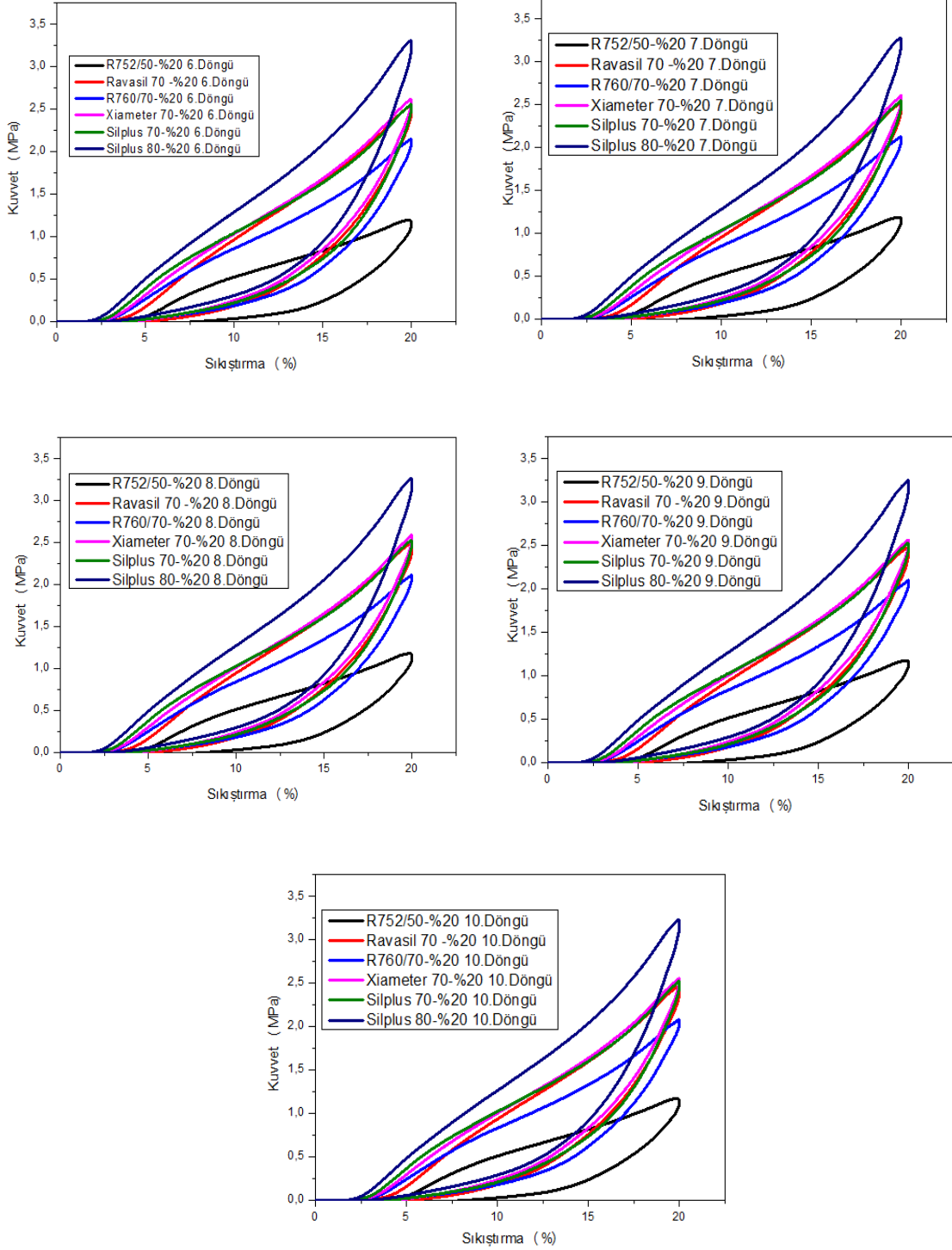


Şekil 4.31. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki 10. döngüdeki histeresis eğrileri.

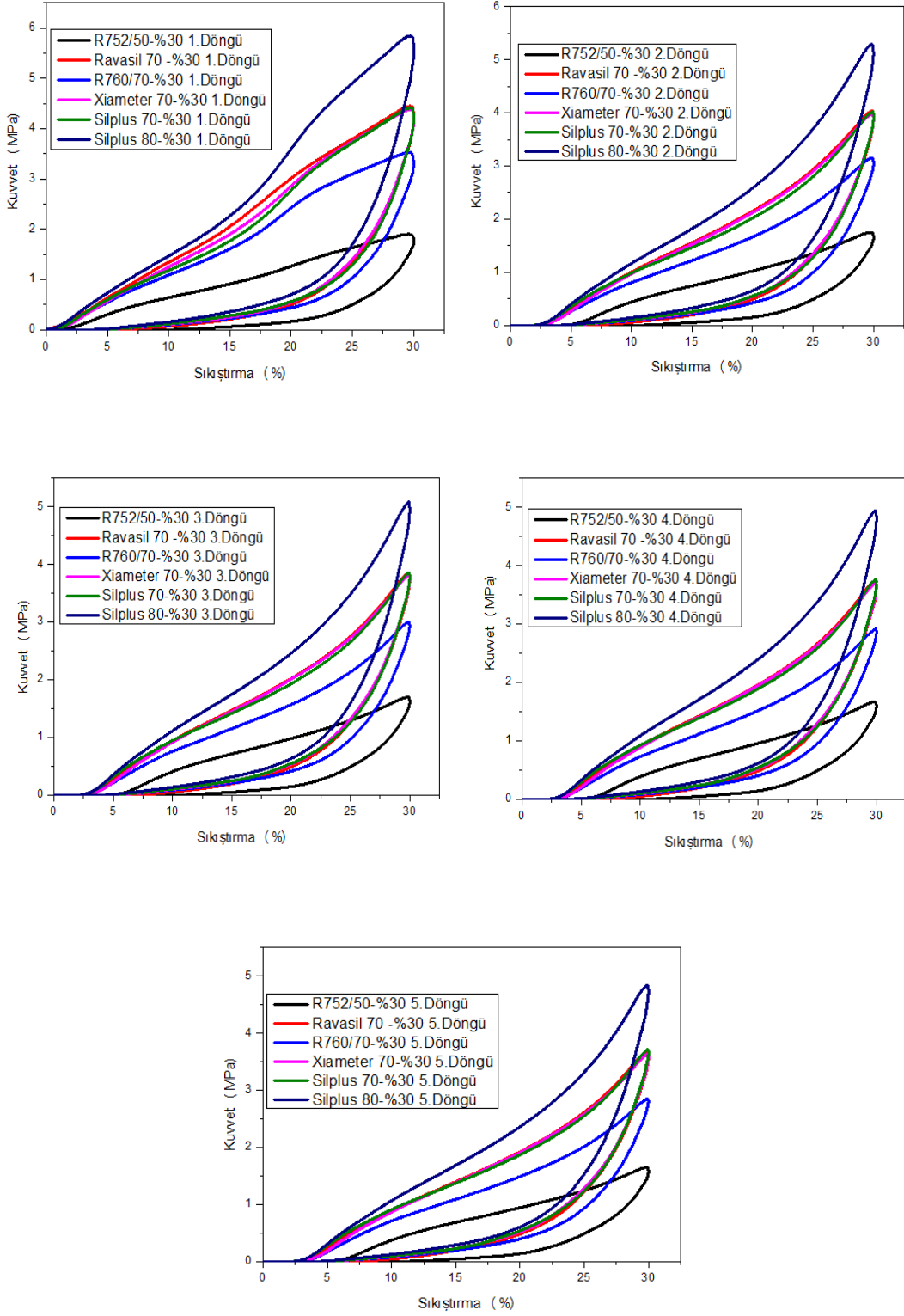
Hazırlanan elastomerlerin %20 sıkışma için 1.-5. döngülerdeki histeresis eğrileri Şekil 4.32.de 6-10 döngülerdeki histeresis eğrileri Şekil 4.33.'de verilmiştir. Benzer şekilde 30,40 ve 50 sıkışma oranı için 1-5 ve 6-10. Döngülerdeki histeresis eğrileri ise Şekil 4.34-4.39'da verilmiştir.



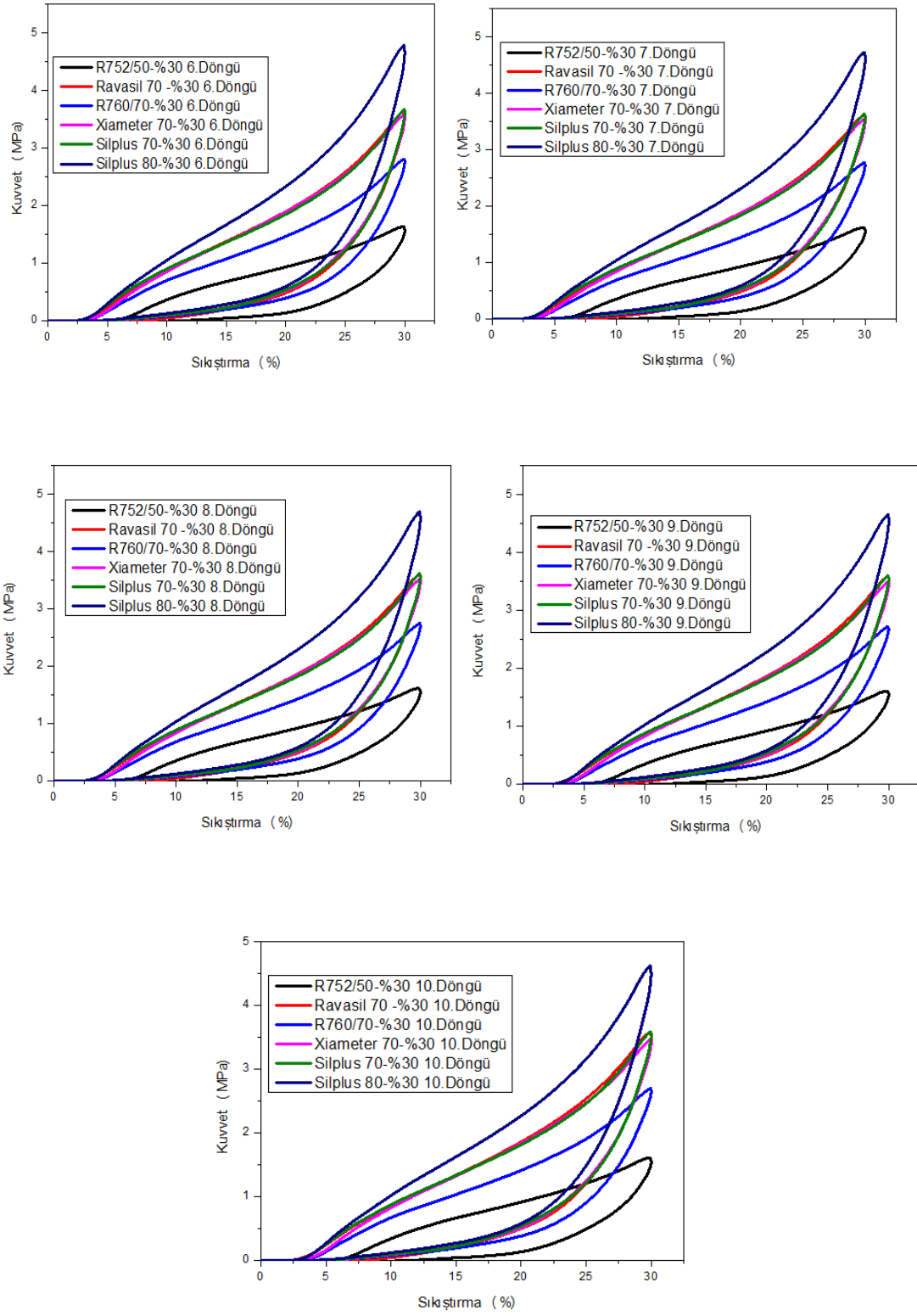
Şekil 4.32. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırmada 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.



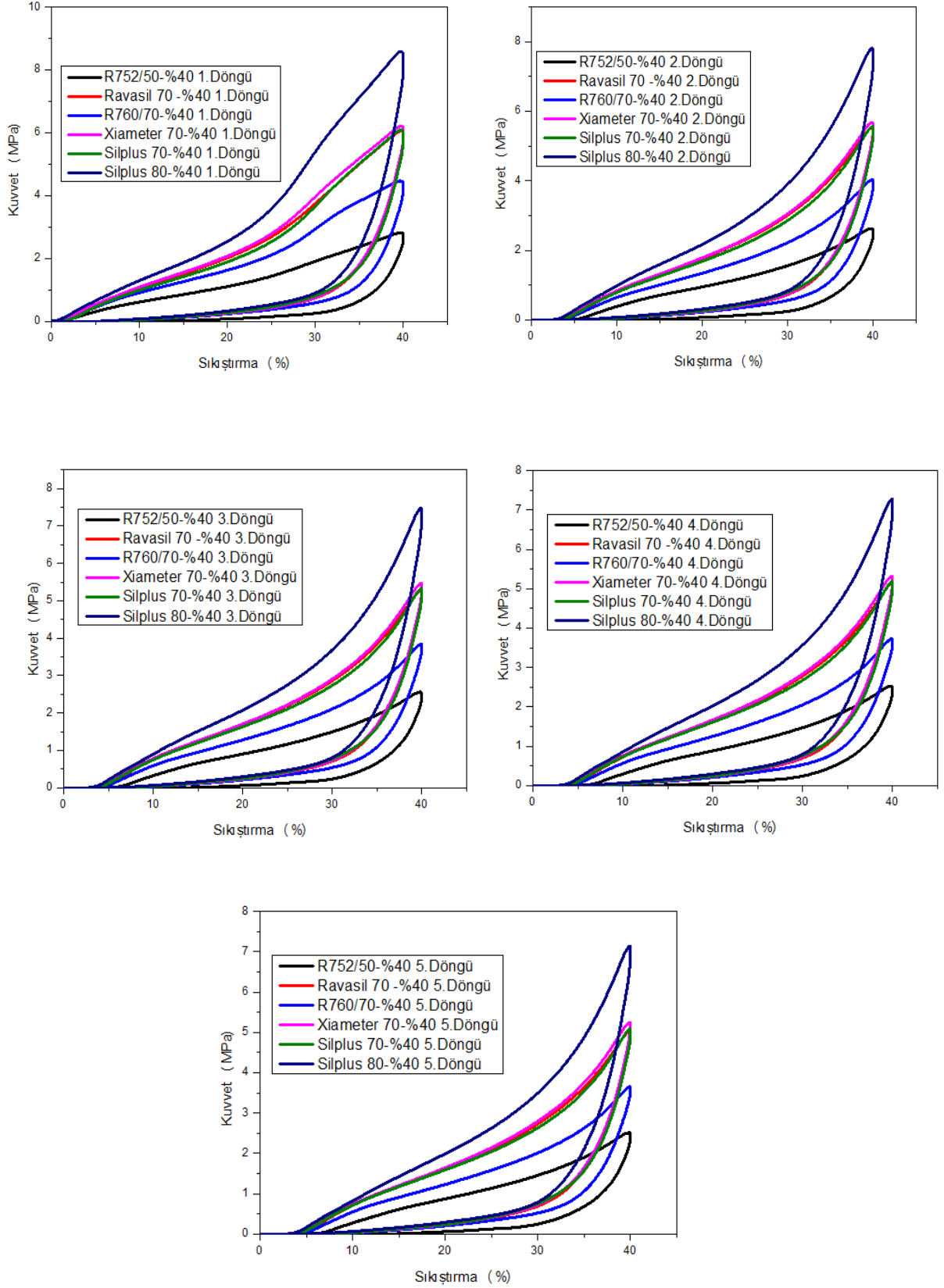
Şekil 4.33. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırma 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.



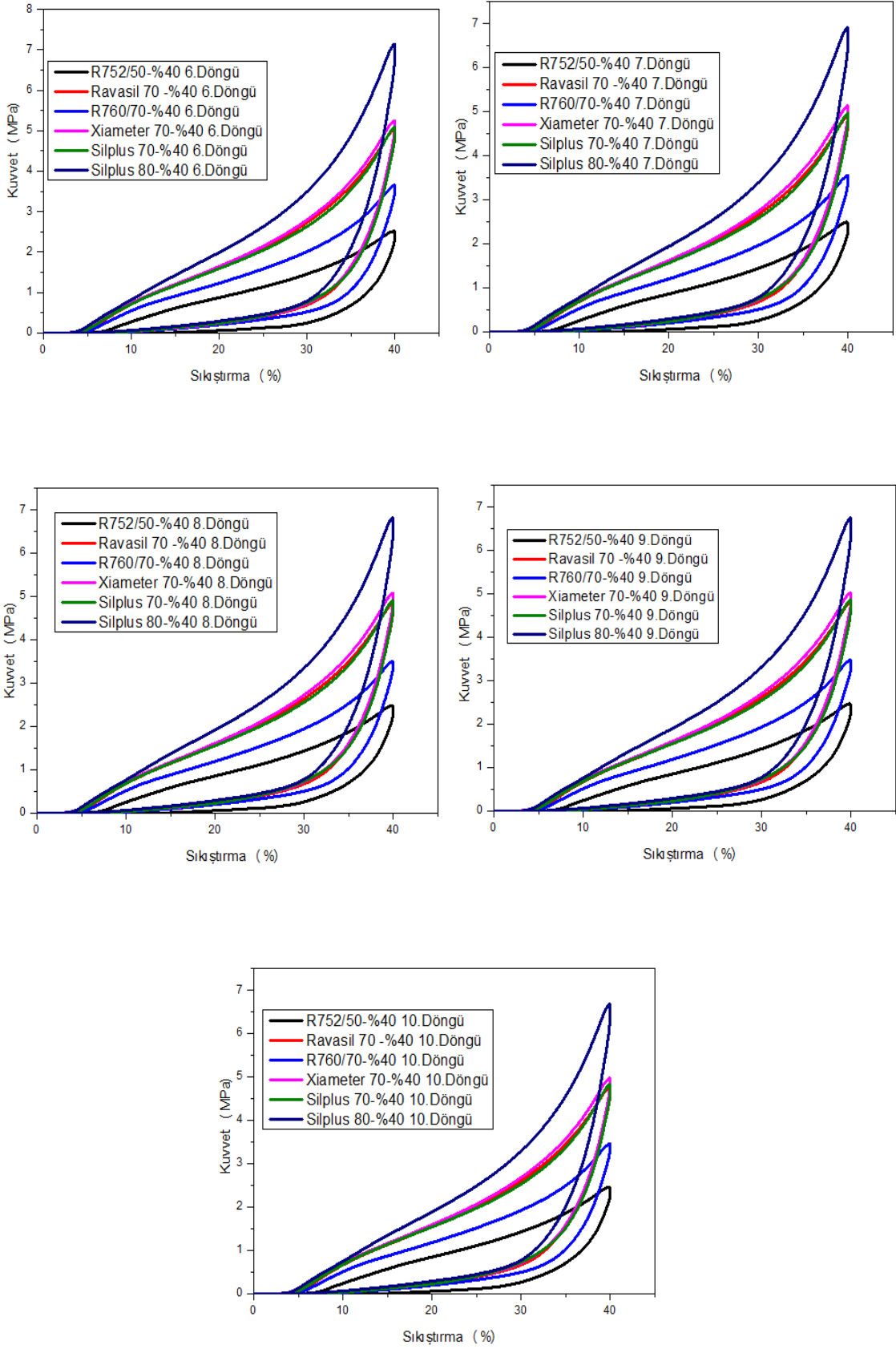
Şekil 4.34. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırmada 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.



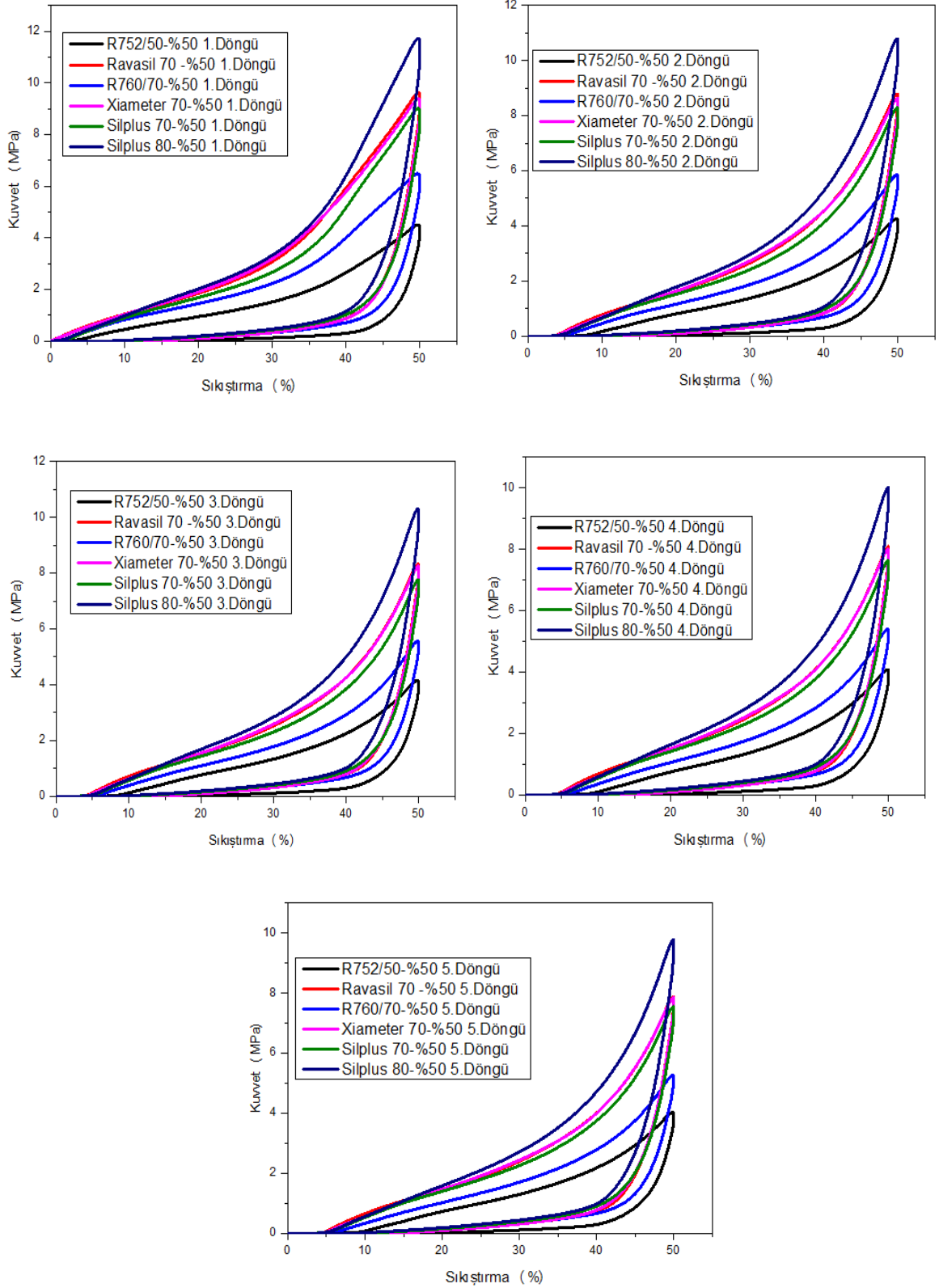
Şekil 4.35. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırılmada 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.



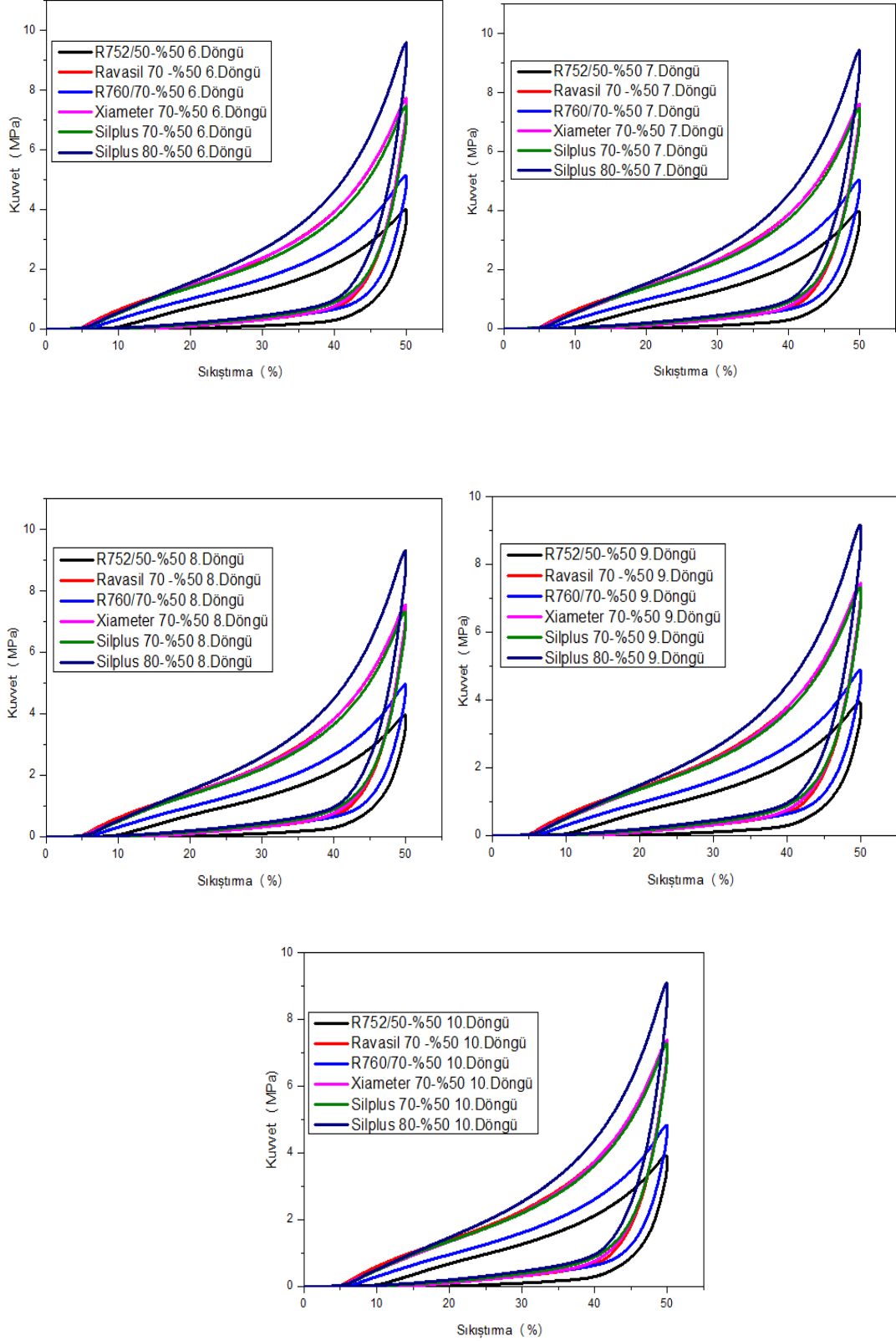
Şekil 4.36. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırımda 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.



Şekil 4.37. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırılmada 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.



Şekil 4.38. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki 1,2,3,4 ve 5. döngüdeki histeresis eğrileri.

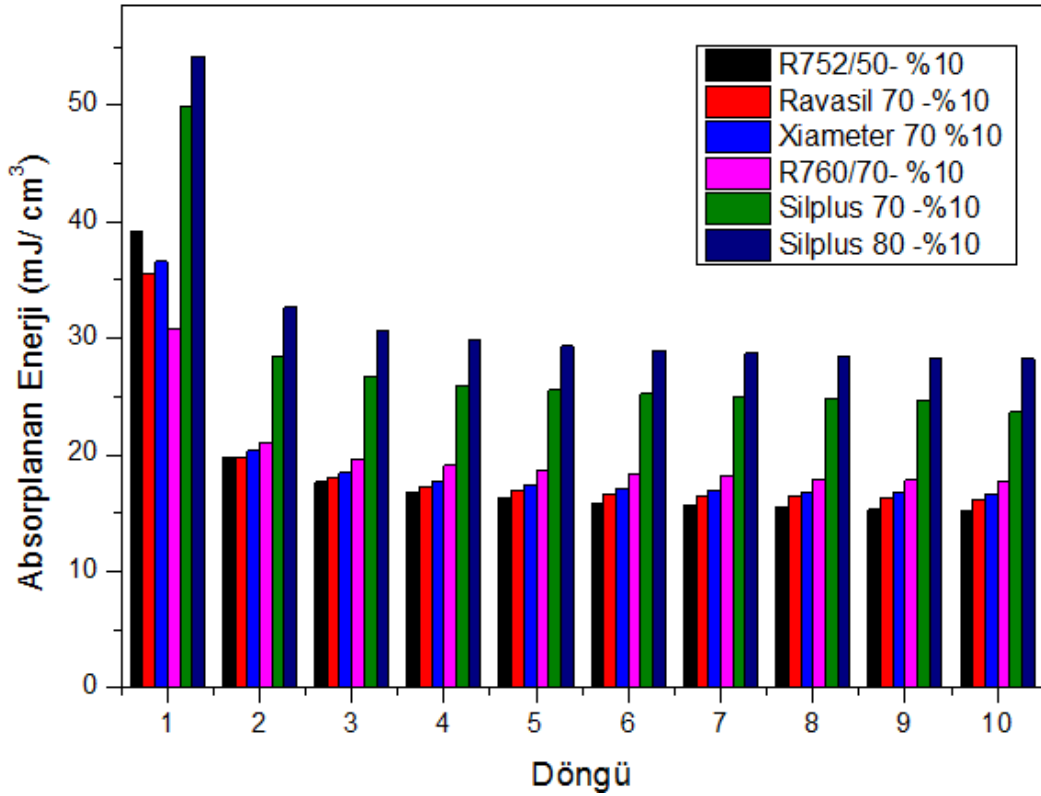


Şekil 4.39. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki 6,7,8,9 ve 10. döngüdeki histeresis eğrileri.

Farklı özelliklere sahip olan silikon elastomerlerdeki aynı sıkıştırma oranlarındaki döngülere baktığımızda ilk döngüdeki histeresis eğrilerinin diğer döngülerden daha büyük olduğu görülmüştür. Histeresis eğrilerindeki birinci ve ikinci döngü arasındaki farkın nedeni de silikon elastomerlerdeki sönümlenme (damping) özelliğinden kaynaklanmaktadır. Silikon elastomerler vizkoelastik özelliktedirler yani hem vizkoz hem de elastik özelliğe sahiptirler. İlk sıkıştırma sırasında vizkoz kısmı akmaktadır ve zincir konfigürasyonu değişmektedir. Yapı ilk döngüde aktıktan sonra diğer döngülerde elastomerin eski haline dönmesi için uygulanması gereken kuvvet daha azdır. Elastomer döngü esnasında gerinim altında enerjiyi absorplayarak ısı enerjisine çevirmektedir. Birinci ve ikinci döngüler arasındaki bu enerji farkı aynı zamanda malzemenin akışkan kısmının hapsettiği enerji hakkında bilgi vermektedir. Birinci ve ikinci döngü arasındaki Mullin etkisi gösteren malzemeye özgü olarak gerilim gevşemesi (stress softening) görülmektedir. Dolgulu olmayan silikon elastomerlerde gerilim gevşemesi (stress softening) görülmezken, dolgulu silikon elastomerlerde görülmektedir.

Sıkışma eğrilerinden görüldüğü gibi sıkıştırma oranı arttıkça uygulanan kuvvet değeri de artmıştır. Dolgulu silikon elastomerlerde uygulanan sıkıştırma oranı arttıkça doğal olarak absorplanan enerji miktarı da artmaktadır (Rey ve ark., 2013).

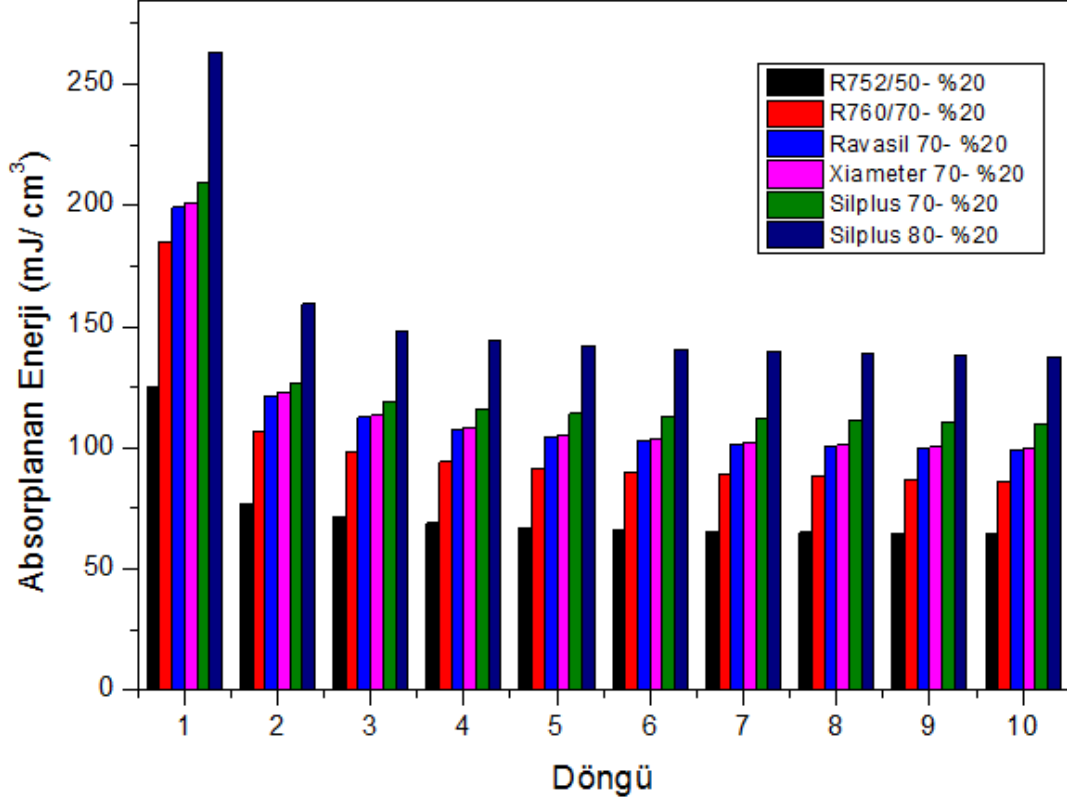
1. döngüden 2. döngüye geçerken tüm karışımlarda absorplanan enerji değerlerinde de belirgin bir fark görülmüştür. İlk döngüden sonraki döngüler daha küçük alana sahiptirler. Bunun nedeni de yapının akışkan kısmındaki bazı zincir dolanmalarının uzaklaşması sonraki döngü için gerekli olan gerinim değerinin de azalmasıdır. Literatürde de bu gerilim yumuşaması (stress softening) olarak isimlendirilmiştir (Visakh ve ark., 2013).



Şekil 4.40. Silikon elastomerlerin %10 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.

Şekilde 4.40. da sabit %10 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında en yüksek enerji absorplama değerine Silplus 80 silikon elastomer sahipken en düşük absorplama enerji değerine de R752/50 silikon elastomer sahiptir. 70 Shore değerine sahip olanları kendi içinde karşılaştıracak olursak en düşük absorplanan enerji değerine sahip olan Ravasil 70 iken en yüksek değere sahip olan da Silplus 70'tir. Bu değerlerin Tablo 4.1 deki silikon karışımların Hareketli Kalıp Reometresi(MDR) deki delta tork değerleriyle de benzer eğilim gösterdiği görülmüştür. Maksimum tork ve delta tork kauçuk bileşiminin çapraz bağlanmasını ve sertliği artıracak olduğunu göstermektedir. Daha yüksek sertlik, sağlamlığın kauçuk zincirindeki hareketi engelleyecektir. Çapraz bağlanmanın daha yüksek olması aynı zamanda malzemedeki sertliği artırır (Suntako, 2017). Silplus 80 örneği daha sert ve işlemesi daha zor bir malzeme iken, R752/50 örneği ise daha elastik ve işlenilebilirliği de daha kolay bir malzemedir. R752/50 örneğinin çapraz bağ yoğunluğunun düşük ve vizkoz karakterin daha fazla olması onun daha fazla enerji sönümleyeceği anlamına

gelmediğini göstermiştir. En yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip Silplus 80 de en yüksek sönümlenme (damping) elde edilmiştir.

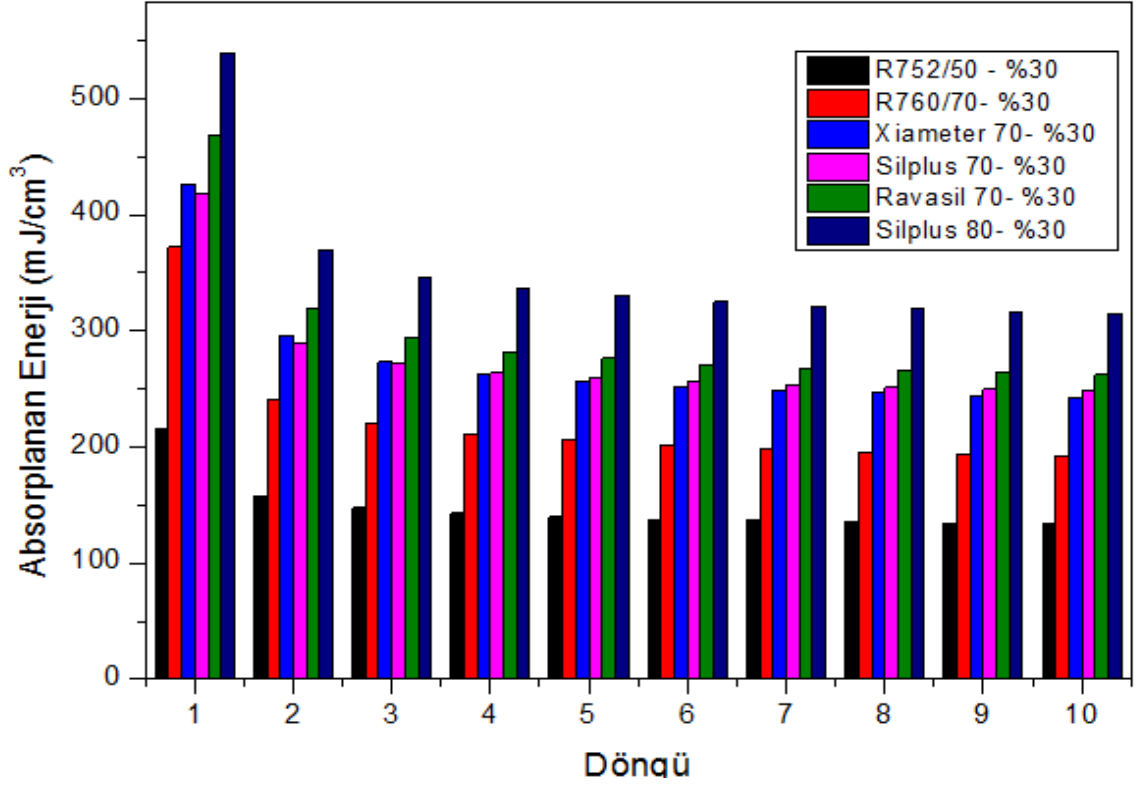


Şekil 4.41. Silikon elastomerlerin %20 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.

Şekil 4.40. daki %10 sıkıştırma oranındaki absorplanan enerji ile %20 sıkıştırma oranındaki absorplanan enerji değerlerini karşılaştıracak olursak %20 sıkıştırma oranındaki absorplanan enerji değerlerinin daha fazla olduğu görülecektir.

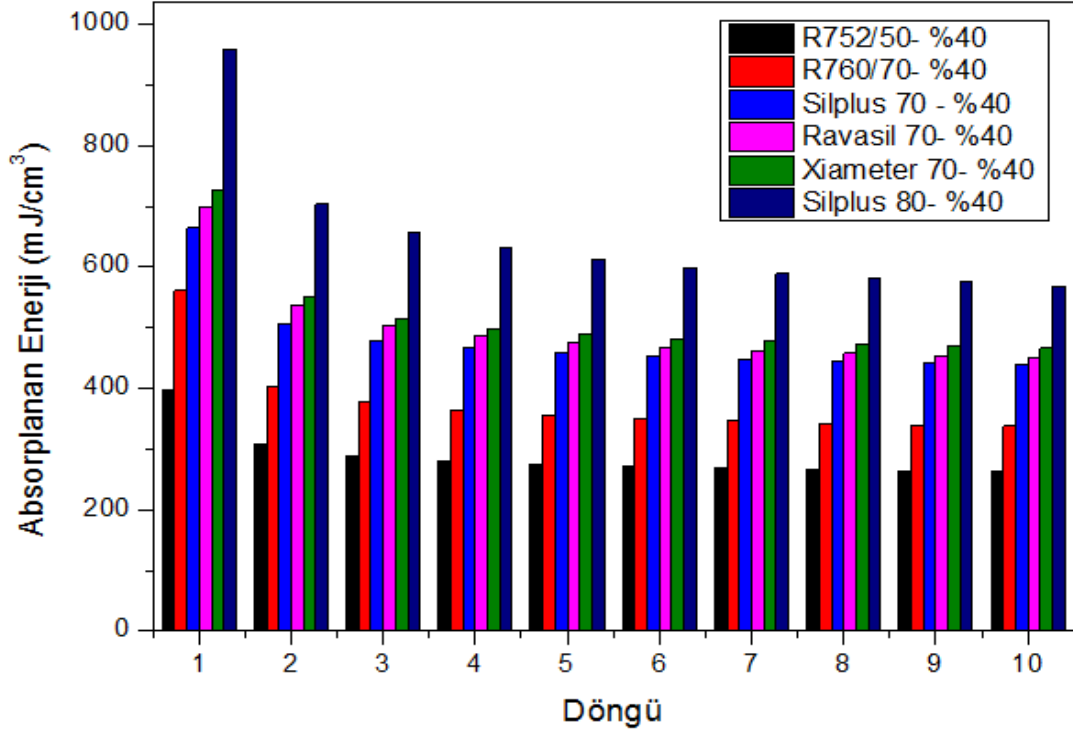
En büyük histeresis ya da enerji absorplama ilk döngüde görülmektedir. 2. döngüden itibaren döngü sayısındaki artışla absorplanan enerji değerinde azalan bir eğim görülmüştür. 1. ve 2. döngü arasındaki büyük oranda görülen bu farklılık Mullin Etkisi olarak bilinmektedir. Bu durum da elastomerik malzemenin vizkoelastik özelliğinin bir sonucudur (Mullins, 1948).

En yüksek absorplama enerjisine Silplus 80 örneğimiz sahipken, en düşük absorplama enerjisine R752/50 örneği sahiptir. 70 shore özelliğindeki silikonları kendi içinde karşılaştıracak olursak en düşük absorplama enerjisi değerine sahip olan R760/70 en yüksek değere sahip olan da Silplus70 olmuştur.



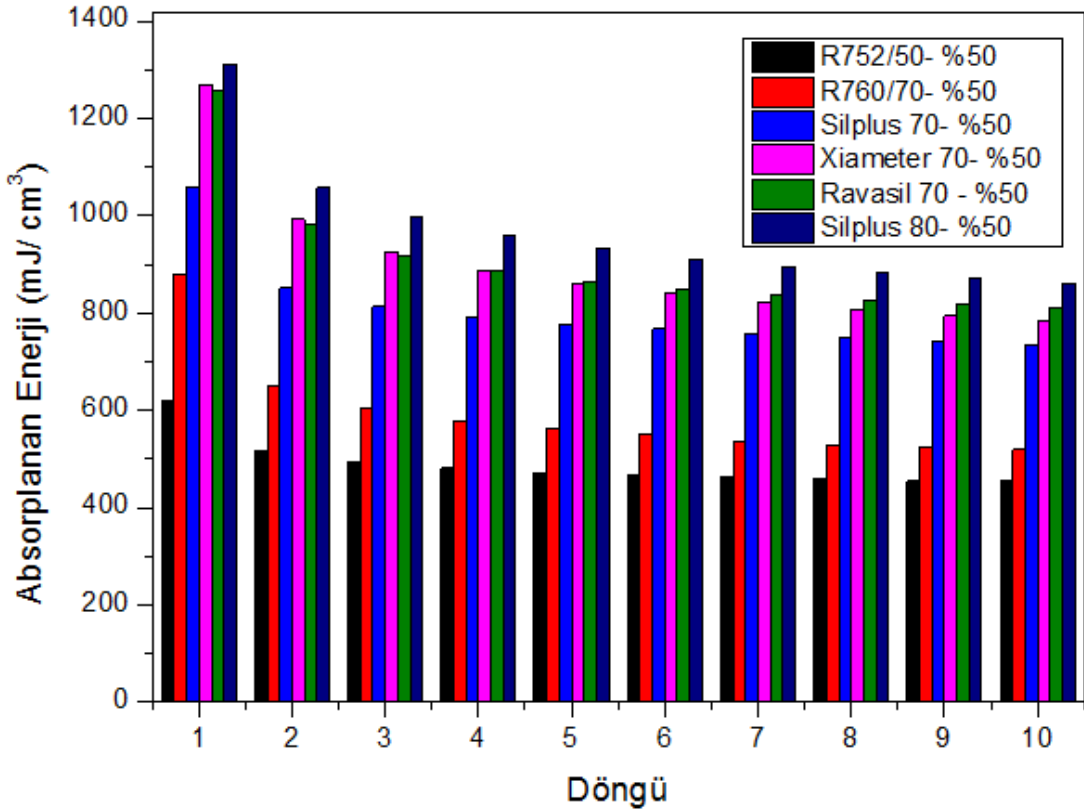
Şekil 4.42. Silikon elastomerlerin %30 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.

Şekil 4.42. de %30 sıkıştırma oranında ve her bir döngüdeki absorplanan enerji değerlerini inceleyecek olursak her bir döngüde en yüksek absorplama enerjisine sahip olan yine Silplus 80 örneğidir. Her bir döngüdeki en düşük absorplama enerjisi değeri ise R752/50 örneğinde elde edilmiştir.



Şekil 4.43. Silikon elastomerlerin %40 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.

%40 sıkıştırma oranındaki absorplama enerji değerleri %30 sıkıştırma oranındaki absorplama enerjisinden daha büyüktür Şekil 4.43. %50 sıkıştırmadaki değerler ise %40 dan daha büyüktür Şekil 4.44. Bu sıkıştırma oranları içinde en yüksek absorplama enerjisi yine Silplus 80 örneğindedir. En düşük absorplanan enerji ise R752/50 elde edilmiştir.



Şekil 4.44. Silikon elastomerlerin %50 sıkıştırma oranındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri.

%10, %20, %30 ,%40 ve %50 sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri incelendiğinde en yüksek absorplanan enerji değerinin Silplus 80 örneği %50 sıkıştırma oranında ve 1. döngüdeyken gerçekleştiği görülmüştür. En düşük absorplanan enerji değerine R752/50 örneği 10. döngüde elde edilmiştir. %50 sıkıştırma oranında her bir silikon elastomerin en fazla absorplanan enerji değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca her silikon elastomer için 1.döngüden itibaren absorplanan enerji değerlerinde azalma olmuştur. Bunun en önemli nedenlerinden birisi de malzemedeki meydana gelen deformasyondur. 1. döngüde malzeme belirli bir deformasyona uğramakta ve aynı sıkıştırma oranında 2. döngüde malzeme deformasyona uğradığı için orijinal haline gelmesi için daha az bir enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu aradaki enerji farkı ise enerji korunumu kanunundan hatırlanacak olursa kaybolmayacaktır. Bu enerji farkı ısı enerjisine dönüşecektir. Bu dönüşüm de histeresisten kaynaklanmaktadır.

Yukarıda ayrıntılarıyla verilen bu çalışmaların sonunda silikon elastomerlerinin enerji sönümlenme özelliklerinin elastomerin çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olarak kontrol edileceğini göstermiştir. Çapraz bağ yoğunluğunun ise elastomerin hazırlanmasında kullanılan silikon kauçuğunun Mooney viskozitesine ya da molekül kütlesi ile de değiştirilebileceği kanıtlanmıştır. Daha önce Hacettepe Üniversitesi Polimer Kimyası Ana Bilim Dalı, Polimer Araştırma Laboratuvarlarında Prof. Dr. Murat Şen tarafından yürütülen çalışmaların sonunda savunma sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda silikon üretici firmalar tarafından özel üretim olarak isimlendirilen silikon elastomerler kullanılarak cm^3 başına 600 mJ enerji absorplayabilecek elastomerlerin hazırlanabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar daha önce elde edilen sönümlenme kapasitelerinin çok daha üzerine daha harcısalem silikonlarla çıkılabileceğini ve kullanılan silikon kauçuğunun tipi değiştirilerek sönümlenme özelliğinin değiştirilebileceğini göstermiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması silikon elastomerlerin sönümlenme özelliklerini kontrol eden yapısal parametrelerini belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Elastomerlerin yapısal analizleri için önce FTIR analizleri yapılmıştır. Kür edilmemiş silikon elastomerlerin FTIR eğrileri incelendiğinde, tüm silikon elastomerlerde Si-O-Si varlığından dolayı 1000 cm^{-1} de Si-CH₃ varlığından dolayı 1250 cm^{-1} de CH₃ e ait olan zayıf pik C-H titreşiminden dolayı 2964 cm^{-1} de, Si-CH=CH₂ vinil gruplarından dolayı 1400 cm^{-1} absorpsiyon bandı görülmüştür. Pikler incelendiğinde tüm silikon elastomerlerin vinil metil silikon elastomer olduğu sonucuna varılmıştır. R760/70, Silplus 70, Xiameter 70, Ravasil 70 ve R752/50 de 1700 cm^{-1} de karbonil grubuna ait olan pik görülmüştür. Bu pikin görülme nedenlerinden birinin de safsızlık olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada kullanılan silikon elastomerlerin ısı özelliklerini ve saflığını dolgu olarak silika kullanılıp kullanılmadığını belirlemek amacıyla termal analiz çalışmaları yapılmıştır. TGA çalışmaları sonucunda yapının dimetil siloksan ağırlıklı olmadığı yan gruplar üzerinde hidrokarbon içeriğinin daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır. En yüksek bozunma sıcaklığı Ravasil 70 silikon elastomerine ait olup maksimum bozunmadaki sıcaklık değeri de $606,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. En düşük bozunma sıcaklığı R752/50 silikon elastomerine ait olup $532,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Ravasil 70 termal kararlılığı en yüksek silikon iken, R752/50 termal kararlılığı en düşük silikondur. En yüksek ağırlık kaybına sahip olan malzeme R760/70 'dir. En düşük ağırlık kaybına sahip olan malzeme ise Ravasil 70 örneğidir. En yüksek bozunma sıcaklığına sahip olup aynı zamanda en düşük ağırlık kaybına sahip olması da Ravasil 70 örneğinin en yüksek termal kararlılığa sahip olduğunun önemli bir göstergesidir.

Vulkanize olmamış silikon elastomerlerin akış özelliklerini incelemek amacıyla Mooney vizkozimetri cihazından yararlanılmıştır.

Vizkozite akmaya karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür. Elastomerin akışa karşı gösterdiği direncin düşük olması rotora verdiği direncin de düşük olmasına neden olacaktır. Silplus 80 en düşük Mooney vizkozite değerine sahiptir. Ravasil 70 en yüksek Mooney vizkozite değerine sahiptir. Kauçuk- dolgu etkileşiminin düşük olması da Mooney vizkozite değerinde azalmaya neden olmuştur. Vizkozitedeki artış tork değerinde de azalmaya neden olmaktadır. Inıt (MU) değerleri

malzemenin 1 dk sonrasında ne kadar sert özellikte olduğunu göstermektedir. Ravasil 70 vizkozitesi yüksek olmaktadır.

Farklı özelliklere sahip silikon elastomerler kullanılarak silikon hamurları hazırlanmıştır. Pişirici, hızlandırıcı ve diğer katkıların oranı tüm sistemlerde aynıdır sadece kullanılan silikon kauçuk değiştirilmiştir.

Hazırlanan karışımların reolojik özellikleri incelenmesi amacıyla Hareketli Kalıp Reometresi kullanılmıştır. 180 °C ve 20 dakika süresince karışımların vulkanizasyon özellikleri incelenmiştir.

Silplus 80 en büyük delta tork değerine sahiptir. En az değere sahip olan R752/50 silikon karışımıdır. Minimum tork değeri daha çok işlenebilirliği gösterir. R752/50 en az tork değerine sahiptir bu da işlenebilirliğin daha kolay olduğunu gösterir. Tork değerindeki artış da işlenebilirliği azaltır (Ramarad ve ark., 2015).

Bir reometre eğrisinde Delta Tork değeri kürleşme ve çapraz bağ yoğunluğuyla doğrudan ilişkilidir. Delta tork değeri daha yüksek olursa elastomerin çapraz bağ yoğunluğunun o kadar yüksek olduğu anlaşılır (Sae-oui ve ark., 2007).

Elde edilen delta tork değerleri açısından bir sıralama yapıldığında elastomerler için aşağıdaki sıraya göre bir artış olduğu görülmüştür.

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Xiameter 70 < Silplus 70 < Silplus 80

Kür hız oranı(CRI) en fazla R752/50 örneğine aittir. Bu da bize malzemenin pişme süresi hakkında da önemli bilgi vermektedir. En fazla kür hız oranına sahip R752/50 en düşük t90 değerine sahiptir. Bu da malzemenin diğerlerine göre daha hızlı piştiğini bize göstermektedir. En düşük kür hız oranı(CRI) e sahip olan silikon elastomer örneğimiz R760/70'dur. Kür hız oranının daha fazla olması elastomer örneğin çapraz bağlanmayı daha erken sürede aktive olduğunu söyleyebiliriz. En yüksek t90 da R760/70 örneğine aittir. Diğer silikon elastomerlere göre kürleşme süresi daha yavaştır.

Kauçuk Proses Analizör (RPA) cihazı kullanılarak frekans ve strain (gerinim) taraması yapılmıştır. Frekans taramasında strain (gerinim) değerleri sabit tutularak değişen frekans aralığındaki malzemedeki hem pişmemiş hem de pişmiş elastomere ait depo modülü değerleri belirlenmiştir. Bunu belirlerken frekansa karşı depo modülü değerlerinin türevi alınmış ve frekans değerinin lineer olduğu bölgede depo modül değerlerinden çaprazbağ yoğunluklarının hesaplanması için Lee-Pawlowsky-Coran (LPC) yöntemi ile kimyasal çapraz bağ yoğunluğu, fiziksel çapraz bağ yoğunluğu ve toplam bağ yoğunluğu değerleri

belirlenmiştir. En yüksek kimyasal çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan örnek Silplus 80 elastomeri iken, en düşük çapraz bağ yoğunluğuna sahip olan elastomer ise R752/50 'dir.

Fiziksel çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olması fiziksel takımların yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bu olgu iyi bir kauçuk- dolgu etkileşimini sağlayan bir parametredir. R752/50 diğer silikon elastomerlerle karşılaştırıldığında daha iyi kauçuk-dolgu etkileşimine sahiptir. Kimyasal çapraz bağ yoğunluğu vulkanizasyon etkinliğini ve çapraz bağlanma miktarını göstermektedir. Kimyasal XLD değeri için elde edilen artışın reometre analizleri sonucunda delta tork değerleri için elde edilen sıralamayla aynı olması reometre eğrilerinde delta tork değerlerinin çapraz bağlanmadan dolayı gözlemlendiğini kanıtlamıştır. Hazırlanan sistemler için en yüksek kimyasal çapraz bağlanma Silplus 80 karışımında, en düşük kimyasal çapraz bağlanma R752/50 karışımında gözlemlenmiştir.

Elastomer hamurları için fiziksel çapraz bağ yoğunluğu

R760/70 < Ravasil 70 < Silplus 70 < Silplus 80 < Xiameter 70 < R752/50 şeklinde ve elastomer hamurları için kimyasal çapraz bağ yoğunluğu

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80 şeklinde arttığı bulunmuştur.

Toplam XLD değeri ise aşağıdaki sıralamaya göre artmıştır.

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80

Pişmiş ve pişmemiş örneklerde gerinim taraması yapmak için frekans 1,000 Hz de sabit tutulmuş, 50 °C olarak gerinim taraması yapılmıştır. Gerinim aralıkları ise 0,007 -12,942 dir. Strain (gerinim) taraması malzemedeki Payne etkisini görmek amacıyla yapılmıştır. En büyük delta G' değerleri arasındaki fark Silplus 70 örneğinde görülür. G' değerinin daha büyük olması payne etkisinin daha büyük olması ile birlikte daha güçlü dolgu ağı ve daha kötü dolgu-mikro dağılımı ifade etmektedir (Ye ve ark.,2012). En düşük G' değerleri arasındaki fark R760/ 70 örneğine aittir. G' değerinin küçük olması da daha düşük Payne etkisi, daha iyi dolgu maddesi dağılımı anlamına gelir (Liu ve ark., 2014). G' değerleri arasında farkın daha küçük olması aynı zamanda içeriğindeki silika miktarının az olduğu anlamına da gelmektedir. Diğer elastomer örnekleriyle de karşılaştırıldığında TGA'da en az artık silika miktarının R760/70 silikon elastomerine ait olması da bu sonucu kanıtlar niteliktedir.

Vulkanize olan karışımların mekanik özellikleri Universal Test Cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Basma testi kapsamında %10,%20,%30,%40 ve %50 oranda sıkıştırma uygulanmış ve her bir sıkıştırma oranında da 10 döngü boyunca standart kuvvete karşı uzama grafikleri çizilmiştir. Her bir döngüde absorplanan enerji değerinin sıkıştırma oranı ve döngü sayısı ile değişimi incelenmiştir. Absorplanan enerji histeresis eğrilerinden yararlanılarak bulunmuştur. Histeresis, kauçuk bir malzeme gerildiğinde ve sıkıştırıldığında absorplanan enerji farkını verir. Kauçuklar büyük histeresis eğrileri gösterirken, metallerde bu eğriler görülmez. Plastikler de kauçuklara kıyasla daha az histeresis değerlerine sahiptirler. Bu nedenle sönümlemede kauçuklar yaygın olarak kullanılmaktadır. Birim hacim başına absorplanan enerji değerleri incelendiğinde Silplus 80 en büyük enerji absorplama kapasitesine sahipken, R752/50 en az absorplama enerji kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

1.döngüden 2. döngüye geçerken tüm karışımlarda absorplanan enerji değerlerinde de belirgin bir fark görülmüştür. İlk döngüden sonraki döngüler daha küçük alana sahiptirler. Bunun nedeni de malzemenin deformasyona uğramasından dolayı orijinal haline döndürmek için daha az enerji harcaması gerektirdiğinden kaynaklanmaktadır. Bu etki de Mullin etkisi olarak nitelendirilir. Tüm sıkıştırma oranlarında ilk döngüye ait olan histeresis eğrileri altında kalan alan diğer döngülerden daha büyüktür. Diğer döngülerin histeresis eğrileri altında kalan alan da birbirine oldukça yakındır. Bunun nedeni de malzemenin sönümleme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Elastomer malzemeleri hem vizkoz hem de elastik özellik gösterdiklerinden vizkoelastik özelliğe sahiptirler. Yapının vizkoz kısmı ilk döngüde akar ve molekül konfigürasyonu da buna bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle 2. döngüden sonra daha az kuvvete ihtiyaç duyulur. Histeresis eğrilerinin değerlendirilmesi sonucunda 1. döngü ile 2. döngü arasındaki fark kullanılan elastomer çeşidiyle değişmektedir.

Sıkıştırma oranını artırdığımızda malzemedeki absorplanan enerji değerlerinde de artış görülmüştür.

Kopma uzama davranışları incelendiğinde en fazla uzama değerleri R752/50 elastomerinde elde edilmiştir. Silplus 80 ve Ravasil 70 örnekleri de en az uzama değerlerine sahiptir. Böylece Silplus 80 ve Ravasil 70 nin daha sert bir malzeme olduğunu söyleyebiliriz.

Genel toplu sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

FTIR eğrileri incelendiğinde tüm silikon elastomerler vinil metil silikon dur.

TGA analizinde en yüksek termal kararlılığa sahip Ravasil 70 tir.

Silplus 80 en düşük Mooney vizkozite değerine sahiptir. Ravasil 70 en yüksek Mooney vizkozite değerine sahiptir.

Delta tork değerleri arasında sıralama yapıldığında

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Xiameter 70 < Silplus 70 < Silplus 80
şeklinde arttığı görülmüştür.

Elastomer hamurları için fiziksel çapraz bağ yoğunluğu

R760/70 < Ravasil 70 < Silplus 70 < Silplus 80 < Xiameter 70 < R752/50
şeklinde ve elastomerler için

kimyasal çapraz bağ yoğunluğu

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80
şeklinde arttığı bulunmuştur.

Toplam XLD değeri ise aşağıdaki sıralamaya göre artmıştır.

R752/50 < Ravasil 70 < R760/70 < Silplus 70 < Xiameter 70 < Silplus 80

Birim hacim başına absorplanan enerji değerleri incelendiğinde Silplus 80 en büyük enerji absorplama kapasitesine sahipken, R752/50 en az absorplama enerji kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.

% 10 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında;

R752/50< Ravasil 70< Xiameter 70< R760/70< Silplus 70< Silplus 80

% 20 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında;

R752/50< R760/70 < Ravasil 70 < Xiameter 70< Silplus 70< Silplus 80

% 30 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında;

R752/50< R760/70 < Xiameter 70< Silplus 70< Ravasil 70 < Silplus 80

% 40 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında;

R752/50< R760/70 < Silplus 70< Ravasil 70< Xiameter 70 < Silplus 80

% 50 sıkıştırmada her bir döngüde absorplanan enerji değerlerine bakıldığında;

R752/50< R760/70 < Silplus 70< Xiameter 70< Ravasil 70 < Silplus 80

Tüm bu sonuçlar silikon elastomerlerin çapraz bağ yoğunluğu ile enerji sönümlenme özellikleri arasında yakın bir ilişki olduğunu çapraz bağ yoğunluğunun artmasıyla enerji sönümlenme özelliğinin artırılabilceğini göstermiştir. Bu sonuçlar ayrıca enerji sönümlenmesinde yapının vizkoz ve elastik karakterinin sönümlenme özelliklerini belirleyen önemli parametreler olduğu, elastik karakteri yüksek olmasına rağmen sistemin aynı zamanda sönümlenme gösterebileceği kanıtlanmıştır. En yüksek sönümlenme özelliğine sahip olan Silplus 80 de kimyasal çapraz bağlanmaların fiziksel çapraz bağlanmalarından yaklaşık 1,5 kat daha fazladır. Bu sonuçlar bir malzemenin sönümlenme özelliğinin sadece toplam çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olmadığını fiziksel ve kimyasal çapraz bağlanmaların oranına ve mutlak değerine bağlı olarak değiştiğini kanıtlamıştır.

Tüm bu çalışmaların sonucunda sönümlenme kapasitesi 600 mJ/cm^3 ile 1200 mJ/cm^3 aralığında farklı silikon elastomerlerin silikonun tipi ve sahip olduğu fiziksel ve fizikomekanik özellikler değiştirilerek hazırlanabileceği kanıtlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Aksüt, D., Demeter, M., Vancea, C., & Şen, M. Effect of radiation on vinyl-methyl-polysiloxane and phenyl-vinyl-methyl-polysiloxane elastomers cured with different co-agents: Comparative study of mechanical and relaxation properties. *Radiation Physics and Chemistry*, 158, 87-93, **2019**.
- Aksüt, D. Farklı Ko-Ajanlar Varlığında Kürleştirilmiş Silikon Elastomerlerin Özelliklerine İyonlaştırıcı Radyasyonun Etkisi. Doktor Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2020**.
- Aygün, M. Hızlandırılmış Yaşlandırma ile Elastomer Malzemelerin Test Sürelerinin Kısaltılması Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, **2013**.
- Babapour, A. Doğal Kauçuk Bütadiene Kauçuk Esaslı Silecek Malzemelerinin Hazırlanması ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2013**.
- Bauman, J. T. Fatigue, stress, and strain of rubber components: guide for design engineers. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. **2012**.
- Bazli, L., Khavandi, A., Boutorabi, M. A., & Karrabi, M. Correlation between viscoelastic behavior and morphology of nanocomposites based on SR/EPDM blends compatibilized by maleic anhydride. *Polymer*, 113, 156-166, **2017**.
- Bestul, A. B., Decker, E., & White, H. S. Comparison of Viscosities of Rubbers from the McKee Worker-Consistometer and from the Mooney Viscometer. *JOURNAL OF RESEARCH OF THE NATIONAL BUREAU OF STANDARDS*, 46(4), 283-287., **1951**.
- Bin Samsuri, A., & Abdullahi, A. A. Degradation of Natural Rubber and Synthetic Elastomers. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, **2017**.
- Bouasse, H., & Carrière, Z. Sur les courbes de traction du caoutchouc vulcanisé. In *Annales de la Faculté des sciences de Toulouse: Mathématiques* (Vol. 5, No. 3, pp. 257-283), **1903**.
- Brown, R. Physical testing of rubber. Springer Science & Business Media, **2006**.
- Cassagnau, P. Payne effect and shear elasticity of silica-filled polymers in concentrated solutions and in molten state. *Polymer*, 44(8), 2455-2462, **2003**.
- Chandrasekaran, C. Manufacturing Rubber Sheets and Application Procedures. Anticorrosive Rubber Lining, 129–142, **2017**.
- Coran, A. Y. Vulcanization. The Science and Technology of Rubber, 337–381, **2013**.
- Dluzneski, P. R. Peroxide vulcanization of elastomers. Rubber chemistry and technology, 74(3), 451-492, **2001**.
- Du, X., Zhang, Y., Pan, X., Meng, F., You, J., & Wang, Z. Preparation and properties of modified porous starch/carbon black/natural rubber composites. *Composites Part B: Engineering*, 156, 1-7, **2019**.

Essawy, H. A., El-Sabbagh, S. H., Hussein, A. I., & Tawfik, M. E. Novel poly (vinyl chloride) based thermoplastic elastomers incorporating vinyl-functionalized silicone rubber. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 55(7), 507-512, **2018**.

Fink, J. K. *Silicones. Reactive Polymers Fundamentals and Applications*, 217–233, **2013**.

Fink, J. K. *Reactive Polymers: fundamentals and applications: a concise guide to industrial polymers*. William Andrew, (**2017**).

Fourer Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR)

<http://web.deu.edu.tr/metalurjimalzeme/pdf/MMZ3015Malzemekarakterizasyonull/ftir.pdf>

(Erişim Tarihi: **6 Mayıs 2019**)

Gauthier, C., Reynaud, E., Vassoille, R., & Ladouce-Stelandre, L. Analysis of the non-linear viscoelastic behaviour of silica filled styrene butadiene rubber. *Polymer*, 45(8), 2761-2771, **2004**.

Güngör, A., Akbay, I. K., & Özdemir, T. Waste walnut shell as an alternative bio-based filler for the EPDM: mechanical, thermal, and kinetic studies. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(1), 145-155, **2019**.

Harandi, M. H., Alimoradi, F., Rowshan, G., Faghihi, M., Keivani, M., & Abadyan, M. Morphological and mechanical properties of styrene butadiene rubber/nano copper nanocomposites. *Results in physics*, 7, 338-344, **2017**.

He, X., Shi, X., Hoch, M., & Gögelein, C. Mechanical properties of carbon black filled hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber for packer compounds. *Polymer Testing*, 53, 257-266., **2016**.

Henning, S. K., & Costin, R. Fundamentals of Curing Elastomers with Peroxides and Coagents I: Coagent Structure-Property Relationships. In 167th Technical Meeting of the Rubber Division, American Chemical Society (pp. 16-18), **2005**.

Henning, S. K., & Costin, R. Fundamentals of curina elastomers. *Rubber World*, 233(5), 28-35, **2006**.

Hewitt, N. Silica as a reinforcing filler. *Compounding Precipitated Silica in Elastomers*. William Andrew Publishing, Norwich, NY, **2007**.

Indulekha, K., Thomas, D., Rajeev, R. S., Ninan, K. N., & Gouri, C. Growth of SiOC/SiC nanostructures from cured polysiloxane-silica composite. *Ceramics International*, 44(3), 3231-3239, **2018**.

Kashi, S., Varley, R., De Souza, M., Al-Assafi, S., Di Pietro, A., De Lavigne, C., & Fox, B. Mechanical, thermal, and morphological behavior of silicone rubber during accelerated aging. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(16), 1687-1696, **2018**.

Lee, S., Pawlowski, H., & Coran, A. Y. Method for estimating the chemical crosslink densities of cured natural rubber and styrene-butadiene rubber. *Rubber chemistry and technology*, 67(5), 854-864, **1994**.

Liu, X., Zhao, S., Zhang, X., Li, X., & Bai, Y. Preparation, structure, and properties of solution-polymerized styrene-butadiene rubber with functionalized end-groups and its silica-filled composites. *Polymer*, 55(8), 1964-1976, **2014**.

Linhares, F. N., Gabriel, C. F., de Sousa, A. M. F., & Nunes, R. C. R. Mechanical and rheological properties of nitrile rubber/fluoromica composites. *Applied Clay Science*, 162, 165-174, **2018**.

Luo, W., Hu, X., Wang, C., & Li, Q. Frequency-and strain-amplitude-dependent dynamical mechanical properties and hysteresis loss of CB-filled vulcanized natural rubber. *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(2), 168-174, **2010**.

Marković, G., Marinović-Cincović, M., Jovanović, V., Samaržija-Jovanović, S., & Budinski-Simendić, J. NR/CSM/biogenic silica rubber blend composites. *Composites Part B: Engineering*, 55, 368-373., **2013**

McKeen, L. W. The effect of sterilization on plastics and elastomers, **2018**.

Mishra, J. K., Hwang, K. J., & Ha, C. S. Preparation, mechanical and rheological properties of a thermoplastic polyolefin (TPO)/organoclay nanocomposite with reference to the effect of maleic anhydride modified polypropylene as a compatibilizer. *Polymer*, 46(6), 1995-2002, **2005**.

Mullins, L. Effect of stretching on the properties of rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 21(2), 281-300., **1948**.

Oliveira, P. F., Machado, R. A. F., Barth, D., & Acosta, E. D. Dispersion polymerization of methyl methacrylate in supercritical carbon dioxide using vinyl terminated poly(dimethylsiloxane). *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 103, 46-52, **2016**.

Palys, L. H. ve Callais, P. A. Understanding Organic Peroxides to Obtain Optimal Crosslinking Performance. *Rubber World*, 229:11, 35, **2003**.

Peter, A., & Ciullo, R. T. Industrial Minerals and their uses A Handbook & Formulary. Noyes Publication, United States, **1996**.

Ramarad, S., Khalid, M., Ratnam, C. T., Chuah, A. L., & Rashmi, W. Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future. *Progress in Materials Science*, 72, 100-140, **2015**.

Ramezani, M., & Ripin, Z. M. Characteristics of elastomer materials. *Rubber-Pad Forming Processes*, 43–64, **2012**.

Raut, P., Swanson, N., Kulkarni, A., Pugh, C., & Jana, S. C. Exploiting arene-perfluoroarene interactions for dispersion of carbon black in rubber compounds. *Polymer*, 148, 247-258, **2018**.

Rey, T., Chagnon, G., Le Cam, J. B., & Favier, D. Influence of the temperature on the mechanical behaviour of filled and unfilled silicone rubbers. *Polymer Testing*, 32(3), 492-501, **2013**.

Sae-Oui, P., Thepsuwan, U., & Hatthapanit, K. Effect of curing system on reinforcing efficiency of silane coupling agent. *Polymer Testing*, 23(4), 397-403, **2004**.

Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U., & Hatthapanit, K. Dependence of mechanical and aging properties of chloroprene rubber on silica and ethylene thiourea loadings. *European Polymer Journal*, 43(1), 185-193., **2007**.

Sahoo, B. P., Naskar, K., & Tripathy, D. K. Correlation between rheological and dielectric percolation of conductive carbon black-filled ethylene acrylic elastomer. *Journal of Elastomers & Plastics*, 46(8), 675-694, **2014**.

Samsuri, A. B., & Abdullahi, A. A. Degradation of natural rubber and synthetic elastomers., **2017**.

Shibulal, G. S., & Naskar, K. Scrutinizing the influence of strain-induced fiber orientation on the melt rheological behavior of short aramid fiber/thermoplastic elastomer composite using rubber process analyzer. *Journal of Applied Polymer Science*, 128(6), 4151-4163, **2013**.

Sisanth, K. S., Thomas, M. G., Abraham, J., & Thomas, S. General introduction to rubber compounding. In *Progress in rubber nanocomposites* (pp. 1-39). Woodhead Publishing., **2017**.

Silikon Elastomerlerin Kullanım Alanları

<https://www.industrialrubbergoods.com/anti-vibration-mountings.html>

(Erişim Tarihi: 1 Mayıs 2020)

<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/silicone-rubber-elastomer>

(Erişim Tarihi: 1 Mayıs 2020)

<https://www.elesa.com/en/elesab2bstoreoc/Vibration-damping-elements--Rubber-buffers--DVF7-SST#listtype=search&term=silicone%20rubber>

(Erişim Tarihi: 6 Mayıs 2020)

Sripornsawat, B., Saiwari, S., & Nakason, C. Thermoplastic vulcanizates based on waste truck tire rubber and copolyester blends reinforced with carbon black. *Waste Management*, 79, 638-646, **2018**.

Sun, H., Liu, X., Liu, S., Yu, B., Ning, N., Tian, M., & Zhang, L. Silicone dielectric elastomer with improved actuated strain at low electric field and high self-healing efficiency by constructing supramolecular network. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123242, **2020**.

Suntako, R. The rubber damper reinforced by modified silica fume (mSF) as an alternative reinforcing filler in rubber industry. *Journal of Polymer Research*, 24(8), 131, **2017**.

Termal Gravimetrik Analiz (TGA) Çalışma Prensibi

<http://merlab.metu.edu.tr/tr/termogravimetrik-analiz-cihazı> (Erişim Tarihi: **6 Mayıs 2019**)

- Valentini, L., & Lopez-Manchado, M. A. Classification of rubbers and components for harsh environmental systems. *High-Performance Elastomeric Materials Reinforced by Nano-Carbons*, 1–14, **2020**.
- Visakh, P. M., Thomas, S., Chandra, A. K., & Mathew, A. P. (Eds.). *Advances in elastomers I: blends and interpenetrating networks*. Springer Science & Business Media, **2013**.
- Wang, Z., Cheng, X., & Zhao, J. Dynamically vulcanized blends of polyethylene–octene elastomer and ethylene–propylene–diene terpolymer. *Materials Chemistry and Physics*, 126(1-2), 272-277, **2011**.
- Wang, C., & Chen, S. Viscoelastic properties of randomly entangled carbon nanotube networks under cyclic tension loading. *Computational Materials Science*, 119, 46-51, **2016**.
- Wang, C. C., Zhang, Y. F., Liu, Q. Q., & Wang, Z. B. Mullins Effect under Compression Mode and its Reversibility of Thermoplastic Vulcanizate Based on Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer/Styrene-Butadiene Rubber Blend. *International Polymer Processing*, 32(1), 11-19, **2017**.
- Yeh, C. J., Dowland, M., Schmidt, R. G., & Shull, K. R. Fracture and thermal aging of resin-filled silicone elastomers. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 54(2), 263-273, **2016**.
- Zhang, C., Pal, K., Byeon, J. U., Han, S. M., & Kim, J. K. A study on mechanical and thermal properties of silicone rubber/EPDM damping materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(5), 2737-2741, **2011**.

7.EKLER

EK-1

R760/70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	32,6	185,1	372,3	558,9	867,7
2	21,7	106,95	241,0	401,6	642,9
3	20,20	98,31	221,0	374,8	595,7
4	19,60	94,14	210,9	361,9	570,5
5	19,10	91,66	105,9	353,6	554,7
6	18,90	90,27	201,7	348,1	543,7
7	18,70	88,78	198,4	344,1	530,0
8	18,40	87,98	195,7	340,3	522,5
9	18,30	87,19	193,8	337,4	516,4
10	18,20	86,40	192,0	335,8	512,1

EK-2

R760/70 örneğinin farklı sıkıştırma oranındaki hacim değerleri

Silikon Elastomer	Sıkıştırma Oranı(%)	Hacim (cm ³)
R760/70	10	1,027
R760/70	20	1,007
R760/70	30	1
R760/70	40	0,995
R760/70	50	0,986

EK-3

R760/70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm ³) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	30,88	186,4	372,3	561,701	880,02
2	21,1	107,7	241,0	403,62	652,03
3	19,67	99,0	221,0	376,68	604,16
4	19,08	94,80	210,9	363,72	578,6
5	18,60	92,30	205,90	355,38	562,58
6	18,40	90,90	201,7	349,85	551,42
7	18,21	89,40	198,4	345,83	537,53
8	17,92	88,60	195,7	342,01	529,92
9	17,82	87,80	193,8	339,1	523,73
10	17,68	87,00	192,0	337,49	519,37

EK-4.

R752/50 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	40,05	130,01	219,94	419,05	680,10
2	20,15	80,27	160,07	324,47	567,56
3	18,02	74,37	150,31	305,64	543,37
4	17,13	71,85	145,44	296,03	528,64
5	16,67	70,03	142,62	290,17	519,06
6	16,24	69,18	140,49	286,25	513,04
7	16,03	68,51	139,14	283,37	507,47
8	15,79	67,92	138,04	281,59	503,88
9	15,64	67,62	136,92	279,32	499,89
10	15,54	67,37	136,20	276,95	498,24

EK-5

Silplus70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	51,68	214,55	427,33	678,94	1076
2	29,49	129,46	296,54	517,42	864,78
3	27,73	121,75	278	489,46	826,04
4	26,95	118,60	269,62	477,30	804,18
5	26,49	116,95	264,92	467,95	789,18
6	26,15	115,87	261,66	462,55	778,99
7	25,92	114,88	259,35	458,16	770,78
8	25,79	114,03	256,90	453,84	761,51
9	25,54	113,43	255,09	451,18	754,16
10	25,55	112,71	253,76	447,71	747,65

EK-6

Silplus 80 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	56,70	273,11	555,93	1019,42	1364,81
2	34,16	165,17	381,23	747,88	1100,36
3	32,10	153,87	356,61	696,59	1035,96
4	31,30	149,63	346,18	669,82	999,09
5	30,67	147,34	340,02	651,54	970,41
6	30,27	145,84	334,67	636,97	948,19
7	30,04	144,86	331,25	626,2	930,98
8	29,81	143,92	328,00	617,89	919,71
9	29,55	143,34	325,75	611,45	905,76
10	29,52	142,86	324,14	604,52	894,21

EK-7

R752/50, Silplus 70 ve Silplus 80 örneklerinin hacim değerleri

Silikon Elastomer	Sıkıştırma Oranı(%)	Hacim(cm ³)
R752/50	10	1,021
R752/50	20	1,042
R752/50	30	1,018
R752/50	40	1,055
R752/50	50	1,098
Silplus70	10	1,037
Silplus70	20	1,024
Silplus70	30	1,023
Silplus70	40	1,022
Silplus70	50	1,016
Silplus 80	10	1,046
Silplus 80	20	1,037
Silplus 80	30	1,030
Silplus 80	40	1,062
Silplus 80	50	1,040

EK-8

R752/50 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm ³) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	39,23	124,77	216,05	397,20	619,40
2	19,74	77,03	157,24	307,55	516,90
3	17,65	71,37	147,65	289,71	494,87
4	16,78	68,95	142,87	280,60	481,46
5	16,33	67,02	140,10	275,04	472,73
6	15,88	66,39	138,01	271,33	467,25
7	15,70	65,75	136,68	268,60	462,18
8	15,47	65,18	135,60	266,91	458,91
9	15,32	64,89	134,50	264,76	455,27
10	15,22	64,65	133,79	262,51	453,77

EK-9

Silplus 70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm ³) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	49,84	209,52	417,72	664,32	1059,06
2	28,44	126,43	289,87	506,28	851,16
3	26,74	118,90	271,75	478,92	813,03
4	25,99	115,82	263,56	467,03	791,52
5	25,54	114,21	258,96	457,88	776,75
6	25,22	113,15	255,78	452,59	766,72
7	25,00	112,19	253,52	448,30	758,64
8	24,87	111,36	251,12	444,07	749,52
9	24,63	110,77	249,35	441,47	742,28
10	23,67	110,07	248,05	438,07	735,88

EK-10

Silplus 80 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm ³) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	54,21	263,37	539,74	959,91	1312,32
2	32,66	159,28	370,13	704,22	1058,04
3	30,69	148,38	346,22	655,92	996,12
4	29,92	144,29	336,10	630,72	960,66
5	29,32	142,08	330,12	613,50	933,09
6	28,94	140,64	324,92	599,78	911,72
7	28,72	139,69	321,60	589,64	895,17
8	28,50	138,78	318,45	581,82	884,34
9	28,25	138,23	316,26	575,75	870,92
10	28,22	137,76	314,70	569,23	859,82

EK-11

Xiameter 70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	60,20	205,60	441,99	747,68	1288,40
2	35,34	129,80	306,64	565,07	1007,32
3	32,33	118,75	283,55	529,49	938,03
4	30,86	113,76	272,79	511,99	899,40
5	30,13	110,73	266,26	502,97	871,69
6	29,48	108,81	261,29	496,05	851,30
7	29,10	107,40	258,47	490,76	834,06
8	28,73	106,52	256,14	487,28	817,95
9	28,49	105,46	253,73	482,54	804,51
10	28,34	105,05	3251,69	479,08	793,10

EK-12

Xiameter 70 ve Ravasil 70 örneklerinin hacim değerleri

Silikon Elastomer	Sıkıştırma Oranı(%)	Hacim(cm ³)
Xiameter 70	10	1.039
Xiameter 70	20	1.034
Xiameter 70	30	1.037
Xiameter 70	40	1.028
Xiameter 70	50	1.014
Ravasil 70	10	1.027
Ravasil 70	20	1.008
Ravasil 70	30	1.010
Ravasil 70	40	0.997
Ravasil 70	50	1.009

EK-13

Xiameter 70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm ³) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	57,94	198,84	426,22	727,32	1270,61
2	34,01	125,53	295,70	549,68	993,41
3	31,12	114,85	273,43	515,07	925,08
4	29,70	110,02	263,06	498,04	886,98
5	29,00	107,09	256,76	489,27	859,65
6	28,37	105,23	251,97	482,54	839,55
7	28,01	103,87	249,25	477,39	822,54
8	27,65	103,02	247,00	474,01	806,66
9	27,42	101,99	244,68	469,40	793,40
10	27,28	101,60	242,71	466,03	782,15

EK-14

Ravasil 70 örneğinin farklı sıkıştırma oranlarındaki birim hacim başına absorplanan enerji değerleri

Enerji(mJ/cm) Döngü	%10 Sıkıştırma	%20 Sıkıştırma	%30 Sıkıştırma	%40 Sıkıştırma	%50 Sıkıştırma
1	35,60	199,19	468,24	699,80	1257,55
2	19,79	121,65	318,55	537,64	984,06
3	18,00	112,57	293,45	504,20	919,15
4	17,26	107,71	282,09	487,02	886,74
5	16,90	104,50	276,23	476,04	864,45
6	16,68	102,91	270,80	468,18	849,20
7	16,52	101,39	268,22	462,06	837,08
8	16,39	100,31	265,32	457,65	826,60
9	16,26	99,69	264,06	453,66	818,35
10	16,18	98,80	262,47	449,87	811,08