

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELASTOMER MALZEMELERİN STATİK VE DİNAMİK
ÖZELLİKLERİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Ayhan KARATAŞ
503951048**

101374

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ocak 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Şubat 2001**

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Vedat TEMİZ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Selma AKKURT

Prof.Dr. Talat Tevrüz

Vedat Temiz
Selma Akkurt
Talat Tevrüz

ŞUBAT 2001

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

ÖNSÖZ

Lisans ve lisansüstü öğrenimim boyunca desteklerini esirgemeyen başta rahmetli babam olmak üzere tüm aileme, ilk danışmanım rahmetli Prof. Dr. Hamit Öztepe'ye, tez çalışmalarımda yol gösterici olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Vedat Temiz' e teşekkür ederim.

Çerkezköy, 2001

Ayhan KARATAŞ



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAÜÇUKLAR VE ELASTOMERLER	3
2.1. Kauçuğun kısa tarihçesi	3
2.2. Kauçuk ve elastomer kavramı	5
2.3. Kauçukların sınıflandırılması.....	6
2.3.1. Doğal kauçuk (NR)	7
2.3.2. İzopren kauçuk (İR)	9
2.3.3. Stiren-Butadien kauçuğu (SBR)	10
2.3.4. Butadien kauçuğu (BR)	11
2.3.5. Butil kauçuk (İİR)	12
2.3.6. Etilen propilen kauçukları (EPM, EPDM)	12
2.3.7. Nitril kauçuk (NBR)	13
2.3.8. Kloropren kauçuk (CR)	14
3. KAÜÇUK BİLEŞENLERİ	16
3.1. Giriş	16
3.2. Pişiriciler	17
3.2.1. Kükürtle vulkanizasyon	19
3.2.1.1. Vulkanizasyon mekanizması	21
3.2.1.2. Vulkanizasyon sisteminin bileşimi	22
3.2.2. Peroksitle vulkanizasyon	22
3.2.3. Diğer vulkanizasyon yöntemleri	24
3.3. Dolgu maddeleri	24

3.3.1. Karbon siyahı	24
3.3.2. Siyah olmayan dolgu maddeleri	27
3.3.2.1. Silis	27
3.3.2.2. Yarı kuvvetlendiriciler	28
3.3.2.3. Salt dolgu maddeleri	28
3.3.3. Diğer dolgu maddeleri	29
3.4. Yumuşatıcılar	29
3.5. Koruyucu maddeler	29
3.5.1. Yaşlanmaya sebep olan dış etkenler	30
3.5.1.1. Oksidasyon	30
3.5.1.2. Isı	31
3.5.1.3. Ozon	31
3.5.1.4. Işık ve hava şartları	32
3.5.1.5. Yorulma	32
3.5.1.6. Zehirli metaller	32
3.5.2. Koruyucu ajanlar	33
3.6. Diğer bileşenler	33
4. KAÜÇUK PROSESLERİ	35
4.1. Karıştırma	35
4.2. Ekstrüzyon	38
4.3. Kalenderleme ve sıvama	43
4.3.1. Kalenderleme	43
4.3.2. Sıvama	44
4.4. Kalıplama	45
4.4.1. İnsertlerin hazırlanması	48
4.4.2. Bitirme operasyonları	49
5. STATİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLER	50
5.1. Statik özellikler	50
5.1.1. Sertlik	50
5.1.2. Gerilme uzama	51
5.1.3. Kalıcı deformasyon	53
5.1.4. Sünme, gerilme gevşemesi	54

5.1.5. Histerisis	55
5.2. Dinamik özellikler	56
5.2.1. Viskoelastik davranış	56
5.2.2. Dinamik özelliklerin ölçümü	60
5.2.3. Karışımın dinamik özelliklere etkisi	61
5.2.4. Geçirgenlik	62
5.2.5. Yorulma	63
6. UYGULAMALAR	65
6.1. DELTALAB statik dinamik test makinesi	65
6.2. Uygulamalar.....	67
6.2.1. Uygulama 1	67
6.2.2. Uygulama 2	70
6.2.3. Uygulama 3	72
6.2.4. Uygulama 4	74
SONUÇLAR.....	76
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	78

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Kauçukların kullanım yaygınlığına göre sınıflandırılması	7
Tablo 3.1. Vulkanizasyon sisteminin bağ yapısına etkisi	22
Tablo 3.2. Elastomerlere göre kullanılan vulkanizasyon sistemleri	25
Tablo 3.3. Tane boyutu ve yapısının vulkanize olmuş kauçuğun özelliklerine etkisi	26
Tablo 3.4. Önemli karbon siyahları	28
Tablo 3.5. Plastifiyanların elastomerlere uygunluğu	30
Tablo 6.1. Numunelerin test hızları	83
Tablo 6.2. Toplu kütleli sistem modellemesi halinde sönümlü doğal frekanslar.....	85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Polimerlerin çapraz bağ yoğunluğu	5
Şekil 2.2 : Polimerlerin elastiklik modülünün sıcaklığa göre değişimi	6
Şekil 2.3 : Farklı kauçuk tiplerinin elde edilmesi	8
Şekil 3.1 : Çapraz bağ çeşitleri	17
Şekil 3.2 : Mekanik özelliklerin çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olarak değişmesi	18
Şekil 3.3 : Reometre eğrisi	19
Şekil 3.4 : Vulkanizasyon mekanizması	21
Şekil 3.5 : Karbon siyahının mekanik özelliklere etkisi	27
Şekil 4.1 : Açık karıştırıcı	35
Şekil 4.2 : Banbury tipi iç karıştırıcı	36
Şekil 4.3 : Çeşitli iç karıştırıcıların rotor tipleri	37
Şekil 4.4 : Ekstrüzyon vidaları	39
Şekil 4.5 : Ekstrüzyon başlıkları	40
Şekil 4.6 : Kesme başlığı	42
Şekil 4.7 : Kalenderlerin kullanımı	43
Şekil 4.8 : Kalenderleme tesisi	44
Şekil 4.9 : Rotocure ile vulkanizasyon	45
Şekil 4.10 : Kalıplama yöntemleri	47
Şekil 4.11 : Yatay enjeksiyon presisi	47
Şekil 4.12 : Dikey enjeksiyon presisi	48
Şekil 5.1 : Gerilme uzama eğrisi	51
Şekil 5.2a : Neoprene kauçuğun gerilme uzama eğrisinin sertlikle değişimi.	52
Şekil 5.2b : Nordel kauçuğun gerilme uzama eğrisinin sertlikle değişimi	52
Şekil 5.3 : Çekme numunesi	53
Şekil 5.4 : Baskı altında kalıcı deformasyon	54
Şekil 5.5 : Histerisis	55
Şekil 5.6 : Çevrim sayısının histerisise etkisi	56
Şekil 5.7 : Çeşitli malzemelerin şekil değiştirme zaman eğrisi	57
Şekil 5.8 : Kompleks elastiklik modülü	59
Şekil 5.9 : Maxwell voigt elemanı	59
Şekil 5.10 : Şekil değiştirme eğrisi	59
Şekil 5.11 : Sinüzoidal şekil değiştirmenin gerilme cevabının zamana göre değişimi	60
Şekil 5.12 : E* ve tgδ değerlerinin sıcaklık ve frekansa bağlı değişimi	61
Şekil 5.13 : Bileşenlerin elastisite ve tgδ özelliklerine etkisi	62
Şekil 5.14 : Geçirgenliğin faz açısı ve frekansa göre değişimi	63
Şekil 5.15 : Elastomere göre geçirgenlik özelliklerinin değişimi	63
Şekil 5.16 : De Mattia test makinesinin prensibi ve kullanılan numune	64

Şekil 6.1	: Deltalab test makinesinin kesit resmi	66
Şekil 6.2	: Deltalab test makinesi	66
Şekil 6.3	: Deltalab test makinesi	67
Şekil 6.4	: Şekil değiştirmenin yükleme hızı ile değişimi	67
Şekil 6.5	: Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrisi	68
Şekil 6.6	: Test hızına göre 2500 N'daki şekil değişimi miktarının değişimi	69
Şekil 6.7	: Farklı test hızlarında statik rijitliğin değişimi	69
Şekil 6.8	: Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrisi	71
Şekil 6.9	: Vulkanizasyon şartlarının statik özelliklere etkisi	71
Şekil 6.10	: Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet zaman grafiği	72
Şekil 6.11	: Deltalab makinesinde elde edilen şekil değiştirme zaman grafiği	73
Şekil 6.12	: Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet şekil değiştirme eğrisi	73
Şekil 6.13	: Ön yük değerlerine göre 30 Hz'deki dinamik rijitliğin değişimi .	73
Şekil 6.14	: Ön yük değerlerine göre 150 Hz'deki dinamik rijitliğin değişimi	74
Şekil 6.15	: Ön yük değerlerine göre kayıp faktörünün ($\tan \delta$) değişimi	74
Şekil 6.16	: Deltalab makinesinde elde edilen δ açısının frekansla değişimi grafiği	75



SEMBOL LİSTESİ

σ	: Gerilme
E	: Elastisite modülü
ϵ	: Şekil değiştirme oranı
τ	: Kesme gerilmesi
μ	: Dinamik viskozite
t	: zaman
E^*	: Kompleks elastisite modülü
G^*	: Kompleks kesme modülü
T	: Geçirgenlik
δ	: faz açısı
f	: frekans
F	: Kuvvet

ÖZET

ELASTOMER MALZEMELERİN STATİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

Kauçuk malzemeler 1839 yılında Goodyear'ın vulkanizasyonu bulması ile hayatımıza girmiştir. İkinci Dünya Savaşı öncesi, Almanya'nın doğal kauçuğa erişiminin zor olması, sentetik kauçukların geliştirilmesinde motor rolü oynamıştır. Günümüzde doğal ve sentetik kauçuğun büyük bir kısmı (~ %65) lastik endüstrisinde kullanılmaktadır. Taşıtlarda ve binalarda kullanılan teknik kauçuk parçalar da önemli bir oran teşkil etmektedir. Ayrıca ayakkabı, taşıyıcı bant imalatında, sağlık sektöründe, yer kaplamasında kullanılmaktadır.

Elastomerler oda sıcaklığında gerilim uygulandığında ilk boyutunun en az iki katı uzayabilen, bu gerilim kalktığında hızla ilk boyutuna dönebilen, elastisite modülleri çok düşük, seyrek çapraz bağlı polimer malzemelerdir. Elastomerler çapraz bağlanabilen kauçuk malzemelerden imal edilirler. Kauçuklardan farklı olarak, yüksek sıcaklıklarda dahi plastik şekil değişimi göstermezler. Bu çalışmada elastomer ve kauçuk kavramları eşanlamlı kullanılmıştır. En çok kullanılan kauçuklar, doğal kauçuk (NR), stiren-butadien kauçuğu (SBR), butadien kauçuğu (BR), etilen propilen dien terpolimeri (EPDM), nitril kauçuk (NBR) ve kloropren kauçuğu (CR) dur.

Plastik malzemelerden farklı olarak, elastomer malzemeler belirli işlevleri olan katkı maddeleri ile karıştırılarak kullanılır. En önemli katkı maddesi, elastomerin çapraz bağ yapısı oluşturması için kullanılan vulkanizasyon elemanıdır. En çok kükürtle ve peroksitle vulkanizasyon yapılır. Karbon karası gibi dolgu maddeleri, hem karışımın maliyetini düşürürler, hem de karışımın mekanik özelliklerini iyileştirmek için ilave edilirler. Yumuşatıcılar, karışımın viskozitesini düşürerek, proses özelliklerini

iyileştirirler. Elastomerin ozon, oksidasyon, yaşlanma gibi etkenlere karşı korunması amacıyla koruyucu maddeler ilave edilir.

Kauçuk mamullerin imalatı iki aşamada gerçekleşir. İlk önce belli bir formülasyona göre açık veya kapalı karıştırıcılarda karışım hazırlanır. İkinci aşamada mamul ekstrüzyon, kalenderleme veya kalıplama ile şekillendirilir. Ekstrüzyon ve kalenderleme işleminden sonra mamul vulkanize edilirken, kalıplamada mamul kalıp içinde vulkanize olur.

Elastomerler gerilim-şekil değiştirme davranışı bakımından Hooke Kanunu'na uyan katılarla, Newton Kanunu'na uyan sıvılar arasında yer alır, viskoelastik davranış gösterirler. Kayıp faktörü, viskoz elemanın elastik elemana oranıdır, sıcaklığa ve frekansa bağlıdır. T_g δ ile gösterilen kayıp faktörü, sönümlemenin bir ifadesidir. Elastomerlere uygulanan yük kalktığında, elastomerin viskoz elemanı, moleküller arası sürtünmeden dolayı şekil değişimini geciktirir ve enerji kaybı olur. Kayıp enerjinin çevrime oranı olan histerisis sonucunda, kauçuğun sıcaklığı artar. Elastomerlere sabit bir kuvvet uygulandığında, şekil değişimi miktarının arttığı görülür. Benzer şekilde sabit bir şekil değişimi için, gerekli kuvvet zamanla azalır. Bu iki özellikte sırasıyla sünme ve gerilme gevşemesi olarak adlandırılır.

Bu çalışmada elastomerlerin özellikleri, statik ve dinamik testlerle doğrulanmıştır. Birinci uygulamada, farklı test hızlarında aynı kuvvetteki şekil değiştirme miktarı ölçülmüştür. Artan test hızıyla, şekil değiştirme miktarı azalmaktadır. İkinci uygulamada farklı sıcaklıklarda ve pişme sürelerinde vulkanize olmuş parçaların rijitlik değerleri ölçülmüştür. Bu testler sonucu, istenen tolerans değerlerine göre en optimum vulkanizasyon şartları belirlenmiştir. Dinamik uygulamalarda, ön yük değerinin elastomerlerin özelliklerine etkisinin görülmesi amacıyla, farklı ön yük değerlerinde testler yapılmıştır. Ayrıca, T_g δ değerinin frekansla değişimi test edilmiştir.

SUMMARY

STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES OF ELASTOMERS

Rubber materials took part in our lives with the invention of vulcanisation by Goodyear in 1939. Before the World War II, the difficulty to purchase natural rubber from Asia for Germany was the propulsive factor in development of synthetic rubbers. Today large amount of natural and synthetic rubber is used in tyre industry. Technical rubber components, which are used on vehicles and buildings also, reach big ratios. Additionally, it's also used in shoe, conveyor production, health sector and rubber flooring.

Elastomer is a polymer material, which at room temperature can be stretched repeatedly to at least twice its original length and, upon immediate release of the stress, will return with force to approximately its original length. Elastomer material has very small modulus of elasticity and a structure rarely cross-linked. Elastomer is produced from rubber that can be cross-linking. The difference between rubber and elastomer, elastomer has chemical and thermal stability also at high temperatures. Rubbers and elastomers will be considered to be synonymous in this work. The most used rubbers are, natural rubber (NR), styrene-butadiene rubber (SBR), butadiene rubber (BR), ethylene propylene rubber (EPDM), chloroprene rubber (CR) and nitrile rubber (NBR).

Elastomer materials differ plastic materials with the usage of ingredients with different functions. The most important compound is cross-linking or vulcanizing agent. Sulphur is the most used agent, peroxide also, is important. Fillers, such as carbon black and silica can be used to provide reinforcement or decrease the cost of compound. Plasticizers, such as oils, waxes and fatty acids decrease the viscosity of compound and improve processability Antidegradants, such as antioxidants, antiozonants, metal-ion chelators improve ageing behaviour.

To go from raw material to products needs two phases. In the first phase, the raw materials are mixed together to form a rubber compound. Each compound is made according to a specific formulation and the mixing is carried out either in open mills or in an enclosed chamber containing rotors. The second phase is more like a kind of workshop, where the compound is formed, extruded, calendered, moulding, and finally ends up as a finished product through vulcanization. The methods vary from product to product, but all start with a compound, steel or textile when needed, and end up with curing.

Elastomer shows visco-elastic behaviour and take place between solids obeying Hooke's Law and liquids obeying Newton's Law. The value of $\tan \phi$ (phase angle), the ratio of the viscous to the elastic response, is a measurement of damping. It changes with the temperature and the frequency. When the load applied to elastomer removed, viscous element, which is caused internal friction, retards elastic deformation and energy is lost. This lost energy is dissipated in the form of heat and the consequent temperature rise in the elastomer is called the heat buildup. The percentage energy loss Per cycle of deformation is called as hysteresis. When a constant load is applied to an elastomer the deformation is not constant but increases gradually with time; this behaviour is known as strain relaxation or more generally as creep. Conversely, when an elastomer is subjected to a constant strain, a decrease of stress takes place with time, this behaviour is called stress relaxation.

In this work, the properties of elastomers are approved by static and dynamic tests. At the first step, deformation under constant load is measured at different speeds. Deformation ratio decreases with increasing test speed. At the second step, the stiffness values of cure parts, in different mould temperature and curing time, are measured. Optimum vulcanization conditons are defined as to requested tolerances on the conclusion. For dynamic applications, different pre-load values are tested to observe the effect of pre-load values to elastomer's properties. Besides phase angle changes of frequency values are tested.

1. GİRİŞ

Elastomerler, oda sıcaklığında gerilme uygulandığında ilk boyunun en az iki katı uzayabilen ve bu gerilme kalktığında hızla ilk boyutuna dönebilen, elastisite modülleri çok düşük polimer malzemelerdir. Elastomerlerin elastikliği, uzun molekül zincirlerinin kendi içlerinde ve birbirlerine göre hareket etmelerinden kaynaklanır. Elastomer molekülleri seyrek çapraz bağlı oldukları için, kuvvet uygulandığında birbirlerinden kayarak uzaklaşmazlar. Elastomerler, çapraz bağlanabilen kauçuk malzemelerden elde edilir. Bu çalışmada elastomer ve kauçuk kavramları eşanlamlı kullanılmıştır.

Elastomerler günümüzde başta lastik endüstrisi olmak üzere, taşıtlarda, binalarda, ayakkabı, taşıyıcı bant, hortum imalatında, sağlık sektöründe kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, elastomer parçaların gerek sabit yük altında ve gerekse dinamik yük altındaki davranışları ve bu davranışları etkileyen faktörler deneysel olarak incelendi.

Çalışmanın ilk bölümünde elastomer ve kauçuk kavramları açıklandı ve en önemli elastomerlerle ilgili bilgi verildi.

İkinci bölümde elastomer karışımını oluşturan bileşenler ve bu bileşenlerin elastomerin mekanik özelliklerine etkisi açıklandı.

Üçüncü bölümde elastomerlerin karışım hazırlamadan nihai ürün elde edilmesine kadar geçirdiği farklı proseslerle ilgili bilgi verildi.

Dördüncü bölümde elastomerlerin statik ve dinamik özellikleri açıklandı.

Beşinci bölümde elastomerlerin statik ve dinamik davranışları ile ilgili yapılan çeşitli testler açıklandı.



2. KAUÇUKLAR VE ELASTOMERLER

2.1. Kauçuğun Kısa Tarihçesi

Kristof Kolomb büyük bir olasılıkla kauçuğu elinde tutan ilk beyazdı. Kristof Kolomb 1493-1496 tarihleri arasında Amerika kıtasına yaptığı ikinci yolculuk sırasında Haiti adasındaki yerlilerin elastik reçineden yapılmış bir topla oynadıklarını görmüş. Maya Medeniyeti ile ilgili araştırmalar bu oyunun 11 yy.'a dayandığını gösterir. Juan de Torquemada 1615'de yayınlanan eserinde Meksika yerlilerinin Ule isimli ağacın lateksinden Ulei isimli su geçirmez bir malzeme ürettiklerini yazmaktadır.[1,2]

18. yy.ın ortalarında Fransız Bilimler Akademisi üyesi Charles de Condamine, Peru'da ilgisini çeken, yerlilerin ağlayan ağaç anlamında "caa-o-chu" dedikleri ağaçtan elde edilen koyu renkli ve reçinemsi maddeyi Avrupa'ya gönderir. Önceleri oyuncak top, hortum, ayakkabı, kurşun kalem ve mürekkep silgisi, su geçirmez kumaş üretiminde kullanılmıştır. 1819 yılında Hancock mastikasyonu, 1839 yılında Goodyear ve 1840 yılında yine Hancock vulkanizasyonu buldu. Thomson 1845'te hava yastığını ve Dunlop 1898'de hava ile şişen ilk bisiklet lastiğini yaparak kauçuğa yeni uygulama sahaları açtılar. Kauçuk talebinin artması ile, İngilizler 19. yy.ın ikinci yarısından itibaren kauçuk bitkilerini Güney Afrika'da ve Asya'da yetiştirmeyi denediler. Hevea Brasiliens bitkisinden çok olumlu sonuçlar alınmasıyla, 19. yy. sonları ve 20. yy. başlarından itibaren o bölgelere tamamen yayılarak yetiştirildi. Talebin artması diğer yandan kauçuğun sentetik olarak elde edilmesi çalışmalarına hız verilmesine yol açmıştır. [1,2]

Faraday 1826'da doğal kauçuğun ampirik formülünün C_5H_8 olduğunu açıkladı. 1860'da Liebig ve arkadaşları doğal kauçuğu distile ederek berrak, saf ve adını isopren koydukları bir malzeme elde ettiler. 1879'da Bouchardat bu malzemeyi

polimerleştirerek kauçuk gibi bir malzeme üretti. 1884'te Tilden terebentin yağından isopren, 1900'de Kondakow 2-3 dimetilbutadienin uzun süre bekletildiği zaman polimer bir madde haline geldiğini gözlemlemiştir. 1910 yılında Strange ve Matthews butadieni polimerize edip ilk patenti aldılar ve günde 1-2 kg kauçuk üretimine başladılar. [1,2]

Sentetik kauçukların esas gelişimi 1930'lu yıllarda oldu. Almanya'da butadienden Buna kauçukları üretildi. Ayrıca Almanya CK 3 adıyla ilk karbon siyahını üretti. Amerikalılar birkaç sene sonra kanal siyahını imal edebildiler. Yine Almanya'da Thiokol firması polisulfidi imal ederek yağa dayanıklı ilk malzemeyi üretti. Klorlu kauçuklar ile ilgili ilk patent 1931'de Fransa'da verildi. 1935'de I.G.Farbenindustrie ilk NBR Perbunanı üretti. 1931'de Fransa'da bulunan Neopren Dupont tarafından kırk yıl sonra 1970 başlarında piyasaya çıkarıldı. [1,2]

2. Dünya Savaşı'nda, Japonların Güney Doğu Asya'yı işgal etmeleri, doğal kauçuk temininde zorluklarla karşılaşan Amerika ve müttefiklerini sentetik kauçuk araştırmalarına zorladı.

Savaş başlarında Buna kauçuğu patentleri I.G.Farbenindustrie tarafından Standart Oil firmasına emanet edilmişti. Amerika'ya ilk bilgiler buradan sızdırıldı ve bunların geliştirilmesiyle GR-S kauçuğu imal edildi. 1947 yılında Butil kauçuk üretildi.

Sentetik kauçuk üretiminde devrim, soğuk polimerizasyonla oldu. 1948'de Butadien ve Stiren +5, -10 ve hatta daha düşük derecelerde kopolimerize edildiler. Dupont firması 1952'de Hypalon üretmeye başladı. [1,2]

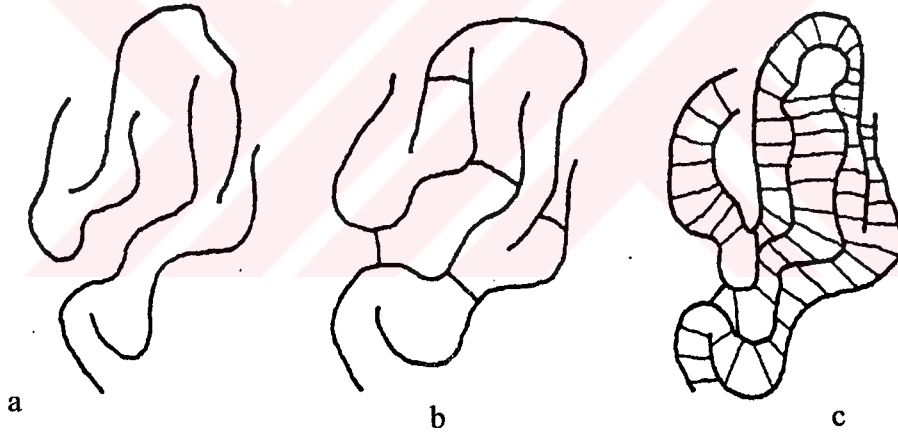
1951'de Ziegler Almanya'da yeni bir katalizör cinsi buldu. İtalya'da Natta buna ilavelerde bulundu ve her ikisinin bu buluşu sayesinde, 1962 yılında EPDM kauçuklar üretildi. Bu buluş 1963 yılında bu iki bilim adamına Nobel Ödülü getirdi. [1,2]

1970'li yıllardan sonra ise, silikon kauçuk, epiklorohidrin, poliüretanlar, florlu elastomerler kullanılmaya başlandı.

2.2. Kauçuk ve Elastomer Kavramı

Kauçuklar oda sıcaklığında amorf, ortam sıcaklığından daha düşük camsı geçiş sıcaklığı (T_g) olan ve seyrek çapraz bağlanabilerek elastomer haline dönüşebilen polimer maddelerdir. Kauçuklar sarmaşık halde duran molekül zincirlerinin uzatılabilme özellikleri nedeniyle, oda sıcaklığında önemli bir kauçuk elastikliğine sahiptirler. Ancak sıcaklık arttıkça, malzemenin akışkanlığı artar ve giderek termoplastik davranış gösterirler. [1,2]

Elastomerler kauçukların seyrek çapraz bağlanması (cross linking) sonucu elde edilirler. Elastomerler, seyrek çapraz bağlanma sonucunda molekül zincirlerinin birbirlerine göre sabit bir konumda olmaları nedeniyle, kauçuklardan farklı olarak yüksek sıcaklıklarda termoplastik davranış göstermezler. Elastomerler, çapraz bağ yoğunluğu bakımından, plastomerler ve duromerler arasında yer alır (Şekil 2.1). [1,2]



Şekil 2.1. Polimerlerin çapraz bağ yoğunluğu

a. plastomerler (termoplastikler) : çapraz bağ yok

b. elastomerler : seyrek çapraz bağlı

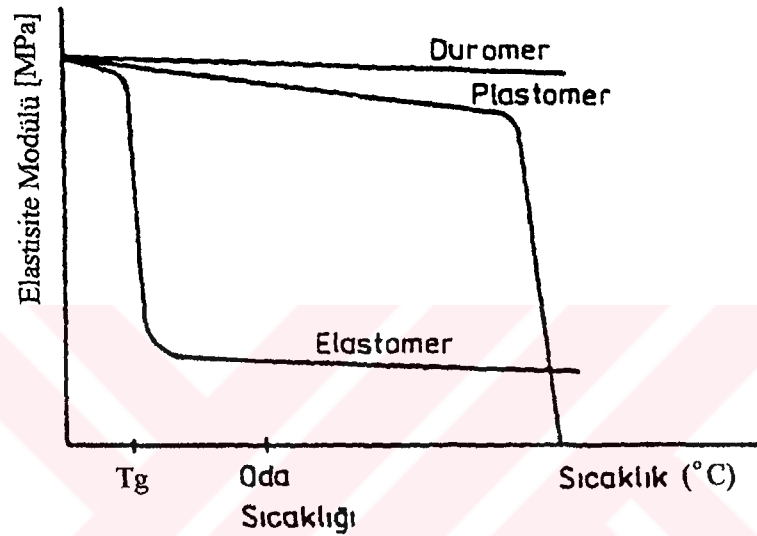
c. duromerler (sert kauçuk, termosetler) : sık çapraz bağlı

Elastomerler, gerilme uygulandığında rasgele dolanmış uzun molekül zincirlerinden oluşan yapılarından dolayı, % 500 ...1000 mertebelerinde şekil değiştirirler, gerilme kalktığında ise ilk boyutlarına dönebilirler.

Elastomer malzemeler, şekil 2.2.'de görüldüğü gibi, camsı geçiş bölgesinden sonra elastisite modülleri büyük oranda düşüş gösterir ve parçalanma sıcaklığına kadar sıcaklığa bağlı olmadan sabit kalır. Elastomerlerin elastisite modülleri, camsı geçiş

sıcaklığından düşük sıcaklıklarda 10^3 MPa civarında iken, camsı geçiş sıcaklığından büyük sıcaklıklarda 0,1-10 MPa arasında değişmektedir. Kristal yapılı katı malzemeler elastisite modülü değeri $10^3 \dots 10^6$ MPa arasındadır.

Elastomerler ısı genleşme katsayısının eksi olmasından dolayı, çekme uygulandığında ısı yayarlar, gevşetilince ısıyı absorbe ederler. Sabit yük altında çekilmiş elastomerin ısıtılınca boyu kısalır, soğutulunca uzar.



Şekil 2.2. Polimerlerin Elastiklik Modülünün Sıcaklığa Göre Değişimi

2.3. Kauçukların Sınıflandırılması

Kauçuklar en genel anlamda doğal ve sentetik kauçuklar olarak sınıflandırılabilir. Yaygın bir sınıflandırma da kullanım yaygınlığına göre yapılandır. Kullanım yaygınlığına göre, kauçuklar genel kullanım kauçukları, özel kullanım kauçukları olarak sınıflandırılabilir. Genel kullanım kauçukları, kauçuk tüketiminin %95'ini oluşturmaktadır. Özel kullanım kauçukları içinde en önemlileri klor kauçuğu (CR) ve nitril kauçuğudur (NBR). Diğer kauçukların tüketimlerinin toplamı %2 civarındadır. Tablo 2.1.'de kauçukların kullanım yaygınlığına göre sınıflandırılmaları ve kısaltmaları verilmiştir.

2.3.1. Doğal Kauçuk (NR)

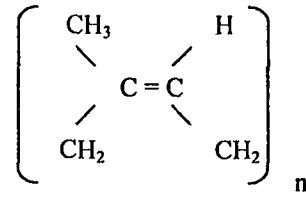
Doğal kauçuk, Hevea Brasiliensis ağacının lateksinden elde edilir. Lateks, ağaç kabuğunun özel bıçakla çizilip özel kaptan toplanması ile elde edilir. Çizilen ağaç normal şartlarda 4 saat kadar lateks akıtır. Toplanan latekse koruyucu katılarak akışkan kalması sağlanır. Üretimin % 80 kadarı bu latekstir. % 20 kadarı ise ertesi güne kadar akar ve pıhtılaşır. Çeşitli tip doğal kauçuk elde edilmesi Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Günümüzde klasik krep (Crepe Rubber), RSS (Ribbed Smoked Sheets), SMR (Standardized Malaysian Rubber), SMR CV(constant viscosity), SIR (Standardized Indonesian Rubber) gibi doğal kauçuk türleri vardır. [1,2]

Tablo 2.1. Kauçukların Kullanım Yaygınlığına Göre Sınıflandırması

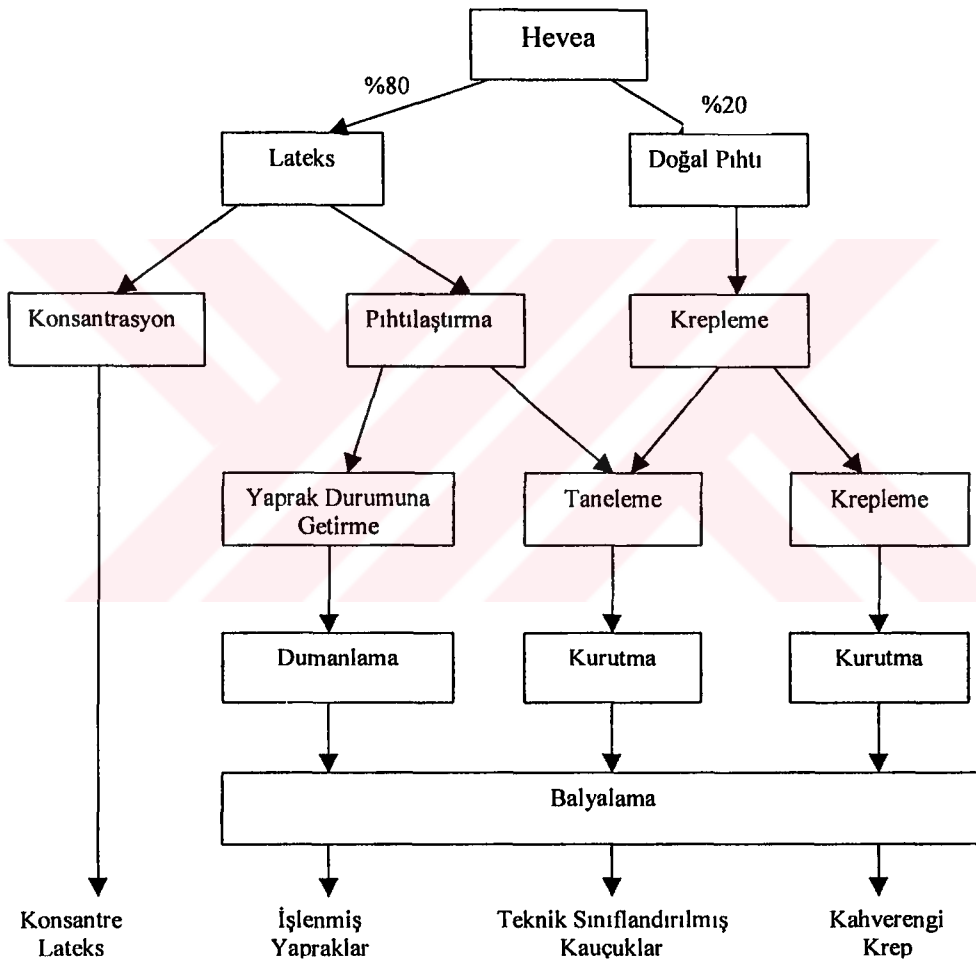
Genel Kullanım Kauçukları

NR	Doğal Kauçuk
IR	Sentetik İzopren Kauçuğu
BR	Butadien Kauçuğu
SBR	Stiren Butadien Kauçuğu
IIR	Butil (İzobuten-İzopren) Kauçuk
EPM	Etilen Propilen Kopolimeri
EPDM	Etilen-Propilen-Dien Terpolimeri
Özel Kullanım Kauçukları	
NBR	Nitril (Akrilnitril Butadien) Kauçuk
CR	Kloropren Kauçuk
ACM	Poliakrilik Kauçuk
EACM	Etilen-Akrilat Kauçuğu
CM	Klor Polietilen Kauçuk
CSM	Klorsulfonlanmış Polietilen Kauçuk
EVM	Vinilasetat Etilen Kauçuğu
CO	Epiklorhidrin Homopolimeri
ECO	Epiklorhidrin Kopolimeri
AU	Poliester Üretan Kauçuğu
EU	Polieter Üretan Kauçuğu
T	Polisülfür Kauçuğu
Q	Silikon Kauçuk
MVQ	Metil-Vinil Silikon Kauçuk
MPVQ	Metil-Fenil-Vinil Silikon Kauçuk
MFQ	Florosilikon Kauçuğu
FKM	Karbonlanmış Floro Kauçuk

Doğal kauçuğun ampirik formülü 1826'da Faraday tarafından C_5H_8 olarak açıklanmıştı. Doğal kauçuğun molekül yapısı %99 cis-1,4 poliisoprendir.



Doğal Kauçuk yapısındaki muntazamlık dolayısıyla gerilme uygulandığında veya düşük sıcaklıklarda kristalleşme eğilimi gösterir. Gerilme gevşetildiğinde ve ısıtıldığında kristalleşme kalkar.



Şekil 2.3. Farklı Kauçuk Tiplerinin Elde Edilmesi

Doğal kauçuğun camsı geçiş sıcaklığının (Tg) -75°C civarında olması , düşük sıcaklık özelliklerinin çok iyi olmasını sağlamaktadır.

Doğal kauçuğun yüksek molekül ağırlığına, dolayısı ile yüksek viskoziteye sahip olmasından dolayı, karışım hazırlamada bileşenleri koymadan önce bir yumuşatma

(plastifikasyon) işlemine ihtiyaç vardır. Plastifikasyon işlemi ile molekül ağırlığı önemli oranda düşeceğinden, bazı mekanik özelliklerinde bozulmalar meydana gelir. Bunun önüne geçmek için, plastifikasyon en kısa zamanda tamamlanmalı ve 80°C ile 100°C arasında gerçekleştirilmelidir. [1,2]

Doğal kauçuk, tablo 3.2.'de gösterildiği gibi çok çeşitli sistemlerde vulkanize edilebilirler. Vulkanizasyon sistemi elde edilmek istenen özelliklere göre seçilir. Yüksek elastiklik, yani yüksek rezilyans, düşük sıcaklıklarda esneme (flexion), istendiğinde kükürt oranı nispeten yüksek klasik vulkanizasyon sistemi kullanılır. İyi yaşlanma özelliği ve düşük kalıcı deformasyon istendiğinde, hızlandırıcı/kükürt oranı yüksek yarı etkili veya etkili (E.V.) vulkanizasyon kullanmak daha iyi sonuç verir. Fakat bu durumda rezilyansın ve yorulma dayanımının azalması gibi olumsuzluklar olmaktadır. Aynı şekilde, peroksitle vulkanizasyon da nispeten daha iyi yaşlanma özellikleri ve düşük kalıcı deformasyon değerleri sağlar. [1,2]

Doğal kauçuğun çok iyi çığ mukavemeti ve tekstile iyi yapışma özelliği vardır. Bu iki özelliği ile doğal kauçuk, lastik endüstrisinde yeri doldurulamaz bir konuma sahiptir.

Doğal kauçuğun çok iyi elastisite(rezilyans), çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve yorulma özelliği vardır. Bu özellikleri sayesinde, dinamik uygulamalarda çok sık kullanılmaktadır (motor takozları, köprü takozları, lastik karkasları gibi). Fakat doğal kauçuğun özellikle ısı ve ozon yaşlanma dayanımı ve yağlara ve solventlere dayanımı kötüdür. Yaşlanma özelliği uygun vulkanizasyon seçimi ve koruyucular ile iyileştirilebilir. Organik solventlerle kullanılmamasına karşı, polar sıvılara dayanıklıdır. [1,2]

Doğal kauçuk, doğal bir ürün olduğundan fiyatı dalgalanmalar gösterebilir.

2.3.2. İzopren Kauçuğu (IR)

İzopren kauçuğu, sentetik olarak elde edilmiş poliizoprendir. Sentetik doğal kauçuk olarak da isimlendirilir. İzopren kauçuğunun titanyum veya lityum bileşiklerinin katalizör olarak kullanılması elde edilen, Ti-IR ve Li-IR grupları vardır. Li-IR, yapısında %92 oranında cis-1,4 vardır ve dar molekül ağırlığı dağılımına sahiptir.

Ti-IR yaklaşık %98 oranında cis-1,4 yapısı ile doğal kauçuğa daha yakın özelliklere sahiptir ve geniş molekül ağırlığı dağılımı vardır. [1,2]

İzopren kauçuğunun çiğ haldeki özellikleri doğal kauçuktan kötüdür. İzopren kauçuğu gerilme uygulandığında kristalleşme göstermez ve bu yüzden çiğ mukavemeti kötüdür.

İzopren kauçuğu molekül ağırlığının düşük olmasından dolayı, doğal kauçuğa göre daha hızlı yumuşarlar. Ayrıca proseste daha kolay işlenirler. Ekstrüzyon işlemi daha hızlıdır ve ayna çıkışında şişme daha azdır. [1,2]

Doğal kauçuk için uygulanan tüm vulkanizasyon sistemleri, izopren kauçuğu için de geçerlidir.

Yüksek oranda cis-1,4'e sahip izopren kauçuğunun özellikleri doğal kauçuktan kötüdür. Yalnızca kalıcı deformasyon ve yaşlanma sonrası özellikleri çok az üstündür. İzopren kauçuğunun doğal kauçuğa göre tercih edilmesi ancak ekonomik nedenlerle mümkün olabilir. [1,2]

2.3.3. Stiren-Bütadien Kauçuğu (SBR)

Endüstriyel olarak 1942 yılından beri üretilmekte olan stiren butadien kopolimeri dünya kauçuk tüketiminin % 42'sini oluşturmaktadır. SBR kauçuklarının en çok kullanılanı +5°C'de polimerleşen soğuk SBR'dir. Sıcak SBR ve çözelti SBR ancak % 20 oranında kullanılmaktadır. [1,2]

SBR kauçuklarının camsı geçiş sıcaklığı stiren oranına göre, -54°C ile -64°C arasında değişmektedir. SBR polaritesi düşük bir dien kauçuğudur, bu nedenle polar olmayan tüm dien kauçukları ile her oranda karıştırılabilir. Özellikle tekerlek lastiğinde BR ile yapılan karışımlar önemli rol oynar, aşınma ve iç ısınma (heat build up) özelliklerini iyileştirir. [1,2]

SBR ve doğal kauçuğun vulkanizasyon sistemleri aynıdır. SBR, doğal kauçuğa göre daha yavaş vulkanize olduğundan, doğal kauçukla aynı derecede vulkanizasyon elde etmek için daha fazla hızlandırıcı ve daha az kükürt kullanmak gerekir.

SBR, tekstile yapışma özelliği doğal kauçuktan kötü olduğundan, doğal kauçukla birlikte kullanıldığında veya yapışkanlığı artırıcı reçinelerin (tackifier) ilavesi ile iyileşir.

SBR kuvvetlendirici dolgu maddeleri ile takviye edildiğinde, doğal kauçuğa yakın mekanik özelliklere ulaşır. Elastiklik (resilience) özelliği kötü olduğundan, dinamik uygulamalarda çok fazla iç ısınma olur. Bu yüzden ağır araç lastiği üretiminde kullanılmamalıdır. SBR, NR'a göre yorulma, yaşlanma ve ısıya dayanıklılık özellikleri daha iyidir, fakat her halükarda antiozonan kullanılmalıdır. Tekrarlanan esneme gerilmelerine dayanımı çok iyidir. [1,2]

Önemli miktarda lastik endüstrisinde olmak üzere, otomotiv sektöründe, konveyör bantları, V kayışları, kablo ve elektrik endüstrisinde kullanılmaktadır.

2.3.4. Butadien Kauçuğu (BR)

Butadien kauçuğu, özellikle lastik endüstrisinde başta doğal kauçuk olmak üzere SBR ile birlikte kullanılmaktadır. BR, çözelti veya emülsiyon polimerizasyonu ile elde edilirler. Camsı hale geçiş sıcaklığı en düşük kauçuktur. [1,2]

BR kauçuğunun hamur makinesinde işlenmesi zor olduğundan, hemen hemen sadece NR veya SBR ile karıştırılarak kullanılır. BR, tüm polar olmayan dien kauçukları ile karıştırılabilir. [1,2]

Vulkanizasyon sistemleri NR ve SBR ile aynıdır, fakat kullanılan kükürt miktarı daha azdır.

BR kauçuğunun çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve tekrarlanan esneme gerilmelerine dayanımı SBR ve doğal kauçuğa göre kötüdür. Diğer yandan, iç ısınma özellikleri doğal kauçuktan bile daha azdır, ayrıca düşük sıcaklık dayanımı çok iyidir. Aşınmaya dayanımı iyidir. Islak zemin üzerinde tutunma özelliği kötü olduğundan, yuvarlanma bantları imalatında SBR veya NR ile kullanıldığında önemlidir. Yaşlanma özellikleri SBR ile aynıdır. Yağlara ve solventlere dayanımı NR ve SBR ile aynıdır. [1,2]

BR büyük oranda lastik endüstrisinde olmak üzere, aşınmanın önemli olduğu konveyör bantlarda ve ayakkabı tabanlarında da kullanılmaktadır.

2.3.5. Butil Kauçuk (IIR)

Butil kauçuk izobutilenin az miktarda izoprenle kopolimerizasyonu neticesinde elde edilir. Butil kauçuğu Mooney viskozitesi ve doymamışlık oranına göre ayrılır. Camsı geçiş sıcaklığı T_g , doymamışlık oranı düşük IIR için -67°C , doymamışlık oranı yüksek IIR için -75°C 'dir. [1,2]

Doymamışlık oranı düşük olduğundan, Butil kauçuğun vulkanizasyonu yavaştır. En çok kükürtlü ve kükürt vericili vulkanizasyon sistemleri uygulanır. Çok iyi ısıl dayanımı özelliği vermek için, reçineli sistemler kullanılmalıdır.

Butil kauçuğun en önemli özelliği gaz geçirgenliğinin çok düşük olmasıdır. Butil kauçuğun ozon ve ısı direnci çok iyidir. Kükürtlü vulkanizatlar sürekli 100°C 'de, reçineli vulkanizatlar da uzun süreli 150°C ile 200°C arasında kullanılabilirler. Ayrıca asitlere, polar solventlere ve yağlara direnci de çok iyidir. [2]

Butil kauçuğun rezilyans özelliği geniş bir sıcaklık aralığında (-40°C a $+75^{\circ}\text{C}$) çok düşüktür. Bu durum çok ilginç sönümlenme özellikleri vermektedir.

IIR, iyi geçirmezlik (permeability) ve yaşlanma direnci özelliklerinden dolayı, iç lastik imalatı, çatı, tekne kaplamasında kullanılmaktadır.

2.3.6. Etilen Propilen Kauçukları (EPM/EPDM)

Etilen propilen kopolimeri (EPM) organik peroksit veya radyasyonla vulkanize olurken, EPDM ter polimeri etilen ve propilen monomerlerinin yanında dien ihtiva eden üçüncü bir monomere sahip olduğundan, peroksitle ve kükürtle vulkanize olabilir. 3. Polimer; 1-4 heksadien, disiklo pentadien veya etilendien 5-norbornen-2 olabilir. Camsı geçiş sıcaklığı T_g , propilen oranına göre -54°C ile -64°C arasında değişmektedir. Bu yüzden düşük sıcaklık özellikleri iyidir. [2]

EPDM, en çok kükürtle vulkanize edilir, yalnızca düşük kalıcı deformasyon değerleri elde etmek, çok yüksek sıcaklıklarda iyi yaşlanma direnci sağlamak ve elektrik özelliklerini iyileştirmek amacıyla peroksitle vulkanize edilir. EPDM'in ısıl dengeliği (stability) yüksek sıcaklıklarda ($>200^{\circ}\text{C}$) vulkanize edilebilmelerini sağlar. Bu durum tuz banyosunda sürekli vulkanizasyon için ilgi çekicidir. EPDM, reçineyle

ve kinon ile de vulkanize olabilir, bu sistemler iyi sonuçlar vermesine rağmen, az kullanılmaktadır. [2]

EPM ve EPDM doymuş yapıda olduğundan, ısı, oksijen, ozon ve hava şartlarına karşı direnci çok iyidir. 150°C’de sürekli kullanılabilirler. Işığa ve ultraviyole ışınlarına karşı hassas olduklarından, açık renkli karışımlarda özel bir korumaya ve TiO_2 , parafinik yağlar gibi özel bileşenlerin ilavesine ihtiyaç vardır.

EPM ve EPDM yüksek oranda dolgu maddesi ve plastifiyan kabul etmektedir. Bu özellikle düşük maliyetli ve düşük sertlik değerlerine (20÷30 ShA) sahip, ayrıca mekanik özellikleri çok iyi karışımlar elde etmek mümkün olmaktadır. [2]

Etilen propilen kauçuklarının yağlara ve hidrokarbon solventlere dayanımı iyi değildir.

EPDM’in doymamış elastomerlerle karışma özelliği kötüdür. Fakat düşük oranda (%10÷20) EPDM, mekanik özellikleri bozmadan, ozon dayanımını arttırmak için, SBR ve NR karışımlarına ilave edilebilir. Yine aynı şekilde EPDM düşük sıcaklıklarda esneme (flexion) özelliklerini iyileştirmek amacıyla, otomotivde tampon imalatında, polipropilen veya polietilen ile birlikte kullanılmaktadır. [2]

EPDM, tekstile yapışma özelliğinin kötü olmasından dolayı lastik endüstrisinde kullanılmamasına rağmen, otomotiv endüstrisinde hortum ve profiller başta olmak üzere çok geniş kullanım alanına sahiptir.

2.3.7. Nitril Kauçuk (NBR)

Nitril kauçuk butadien ve akrilonitril monomerlerinin kopolimerizasyonu ile elde edilir. Nitril grubu polar özellik verir, bundan dolayı yağlara, solventlere dayanımı çok iyidir. NBR, akrilik nitril oranına ve Mooney viskozitesine göre sınıflandırılır.[2]

Ayrıca 3. monomerin metakrilik asit veya akrilik olduğu nitril kauçuklar vardır. Özellikle aşınma dayanımı çok iyidir. Yine aynı şekilde NBR hamuruna, PVC ilavesi ile, çok iyi ozon dayanımı özellikleri elde edilebilir. [2]

NBR camsı geçiş sıcaklığı T_g , akrilik nitril oranına bağlı olarak, düşük oranlarda (%18) -40°C’den, yüksek oranlarda pozitif değerlere kadar değişebilmektedir.

Karışım hazırlarken önemli oranda ısı ortaya çıktığından, mümkün olan en düşük sıcaklıklarda çalışmak gerekir. Ayrıca kükürdün NBR içinde çözünürlüğü yavaş ve dağılımı zor olduğundan, kükürdün karışım hazırlamada ilk başta konulması tavsiye edilir. [2]

NBR, SBR ile aynı şekilde vulkanize olur. Fakat çözünürlüğünün kötü olmasından dolayı kullanılan kükürt oranı daha azdır.

NBR, SBR gibi amorf yapıda elastomer olduğundan, iyi mekanik özellikler elde etmek için takviye edilmeleri gerekir.

Akrilik nitril oranına bağlı olarak, yağa, solvente, grese dayanımını artır. Fakat diğer taraftan, nitril kauçuğun soğuğa dayanımı artan akrilik nitril oranı ile azalmaktadır. Kauçuk karışımına plastifiyan olarak ester ilave edildiğinde, soğuğa dayanım özelliklerinde önemli iyileşmeler görülmüştür. [2]

Nitril kauçuğun ısıya dayanımı iyidir: 90°C'de sürekli olarak, 120°C'de 40 gün boyunca ve 150°C'de 3 gün boyunca kullanılabilir. Ozona dayanımı kötüdür, bu yüzden PVC ilavesi yapılır.

Vulkanizasyon sistemine bağlı olarak düşük kalıcı deformasyon oranına, iyi aşınma dayanımına, orta seviyede rezilyans özelliğine, IIR'den bile daha iyi gaz geçirmezlik özelliğine sahiptir. Polar ortamlar NBR'de kuvvetli şişmeye neden olurlar. [2]

NBR, polar olmayan kauçuklara göre önemli oranda yüksek elektrik özelliği gösterir. Bu yüzden elektrik izolasyon malzemesi olarak kullanılmamalıdır.

NBR, conta, hortum, taşıyıcı bant, fren balatası imalatında, mil, silindir ve kazan kaplamalarında kullanılmaktadır.

2.3.8. Kloropren Kauçuk (CR)

2-klor butadienin polimerizasyonu ile elde edilen CR, kükürt miktarına (tiuram tipi, merkaptan tipi), kristalizasyon eğilimine, polimerizasyon derecesine ve ön bağlama durumuna göre birbirinden farklılıklar göstermektedir. [2]

CR, yanmaya meyilli bir kauçuktur. Bu yüzden karışım hazırlarken, karışım zamanı mümkün olduğunca kısa ve çalışma sıcaklıkları da düşük olmalıdır. Bu karışımların stoklanmasında özel tedbirler almak gerekir. [2]

Klor kauçuklar, klor atomu sayesinde, en yaygın olarak metal oksitlerle vulkanize olurlar. Metal oksit olarak, çinko oksit ve magnezyum oksit kombinasyonu kullanılır.

CR, kristalizasyona eğiliminden dolayı, herhangi bir bileşen katılmadan bile tatmin edici mekanik özelliklere sahiptir. Takviye edilmiş karışımlar, çok iyi kopma dayanımına, aşınma direncine, rezilyans özelliklerine ve tekrarlanan esneme (flexion) dayanımına sahiptir. Aynı şekilde hava şartlarına ve ozona direnci de çok iyidir. Soğuğa dayanımı, kristalizasyon özelliğine ve camsı geçiş sıcaklığına (-45°C) bağlıdır. İyi soğuğa dayanım özellikleri istendiğinde, düşük kristalizasyon hızına sahip CR kullanılmalı ve karışıma sebasat dioktil gibi plastifiyanlar ilave edilmelidir. [1,2]

Klor atoma sayesinde, CR alifatik karakterli yağlara dayanımı çok iyidir ve kendi kendine sönme özelliğine sahiptir.

CR, otomotiv, kimya, inşaat ve makine sanayilerinde profil, hortum, conta, taşıyıcı takoz, V-kayışı imalatında kullanılmaktadır. Kristalleşme eğilimi yüksek olanlar yapıştırıcı imalatında kullanılmaktadır.

3. KAÜÇUK BİLEŞENLERİ

3.1. Giriş

Plastik malzemelerden farklı olarak, elastomer malzemeler belirli işlevleri bulunan katkı maddeleri ile karıştırılarak kullanılır.

Kauçuk hamuru içindeki en temel katkı maddesi vulkanizasyon elemanıdır ve kauçuğu çapraz bağlamak için gereklidir.

Koruyucu maddeler, ozon, oksidasyon, yaşlanma v.b. gibi etkenlere karşı gerek proses esnasında, gerekse parçanın kullanımında hamuru korurlar.

Dolgu maddeleri, hamur maliyetini düşürürler ve hamuru takviye edici işlevleri vardır.

Yumuşatıcılar, hamurun viskozitesini düşürerek esnekliğini artırırlar.

Diğer katkı maddeleri de (şişiriciler, pigmentler, yağlayıcılar v.s.) ihtiyaç olduğunda ilave edilebilirler.

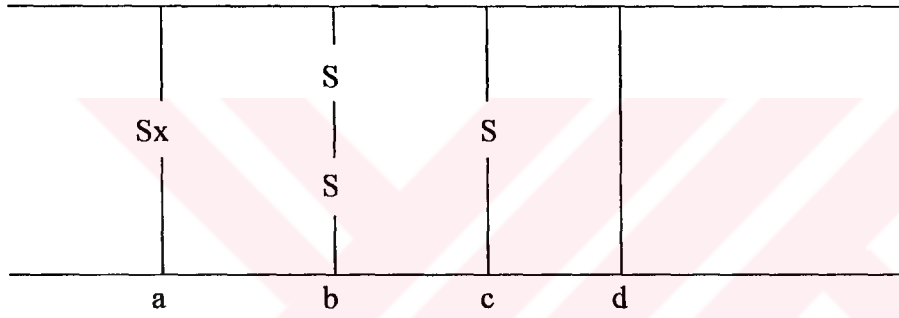
Kauçuk hamurunda kullanılan katkı maddelerinin aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması istenir: [1]

- a. İşlevlerini etkili bir şekilde yerine getirmeli,
- b. Proses şartlarında bozulmamalı,
- c. Kusma (bleeding) ve çiçek açma (blooming) yapmamalı,
- d. Başka katkı maddelerinin işlevlerine engel olmamalı,
- e. Ucuz olmalı,
- f. Zehirli olmamalı.

3.2. Pişiriciler

Charles Goodyear 1839 yılında, doğal kauçuğun kükürtle reaksiyona girmesi sonucu özelliklerinin değiştiğini keşfetti. Fakat bu prosesi işletemedi. Bu proses Thomas Hancock tarafından 1843 yılında Londra’da sonuçlandırıldı ve Roma Ateş Tanrısından esinlenerek, vulkanizasyon adı verildi. [1]

Vulkanizasyon, üç boyutlu ağ oluşturarak elastomer zincirleri arasında çapraz bağlar meydana getirmek ve böylece makromolekül zincirlerinin birbirleri üzerinde kaymasını engellemek amacıyla yapılır. Çapraz bağ çeşitleri Şekil 3.1.’de gösterilmiştir. [1]



Şekil 3.1. Çapraz Bağ Çeşitleri

a : Polisülfid Bağ

b: Disülfid Bağ

c: Monosülfid Bağ

d: C-C Bağı (Peroksit vulkanizasyonu)

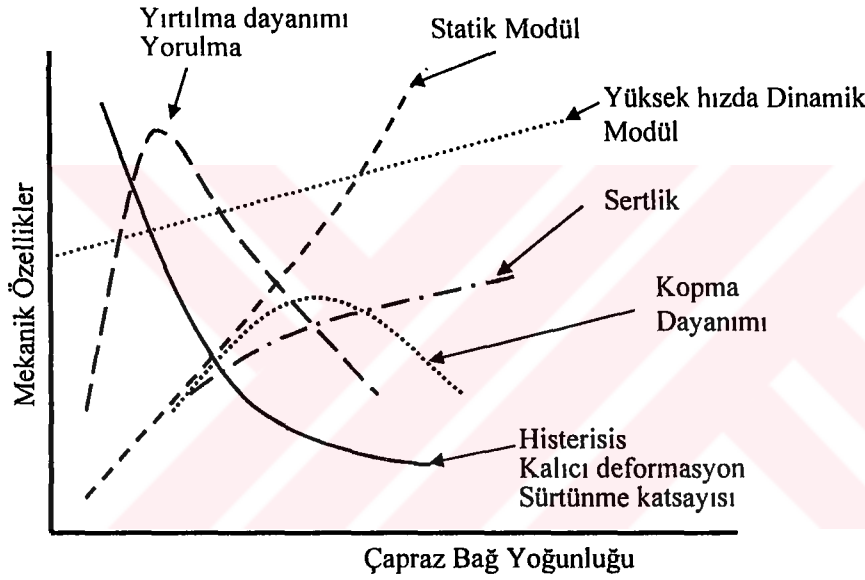
Çapraz bağ yoğunluğu, yani çapraz bağ sayısı, kauçuğun moleküler yapısına, kullanılan kimyasala ve aktivitesine, reaksiyon zamanına bağlı olarak değişir. Çapraz bağ yoğunluğunun vulkanize olmuş elastomerin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 3.2.’de gösterilmiştir.

Vulkanizasyon sonrası, kauçuğun yapışkanlığının kaybolduğu, çekme dayanımının arttığı, solventlerde çözünmenin azaldığı, elastisitenin arttığı, sıcaklık hassasiyetinde azalma olduğu görülür.

Vulkanizasyon işlemi;

- enerji : çoğunlukla ısı kaynaklı (elektrik, buhar) olmakla birlikte, yüksek frekansla, ışınlama ve hatta düşük sıcaklıklarla vulkanizasyon yapılabilir.
- Reaktif bölgelerin varlığı veya oluşturulması : Makromolekül zincirleri üzerinde çift bağlı karbon atomları, polar gruplar, kolay ayrılacak hidrojen molekülleri bulunmaktadır.
- Piştirici eleman : Kükürt aktivatör ve hızlandırıcılarla birlikte kullanılan en yaygın piştiricidir. Peroksit; metal oksit, aminler gibi özel piştiriciler de kullanılır.

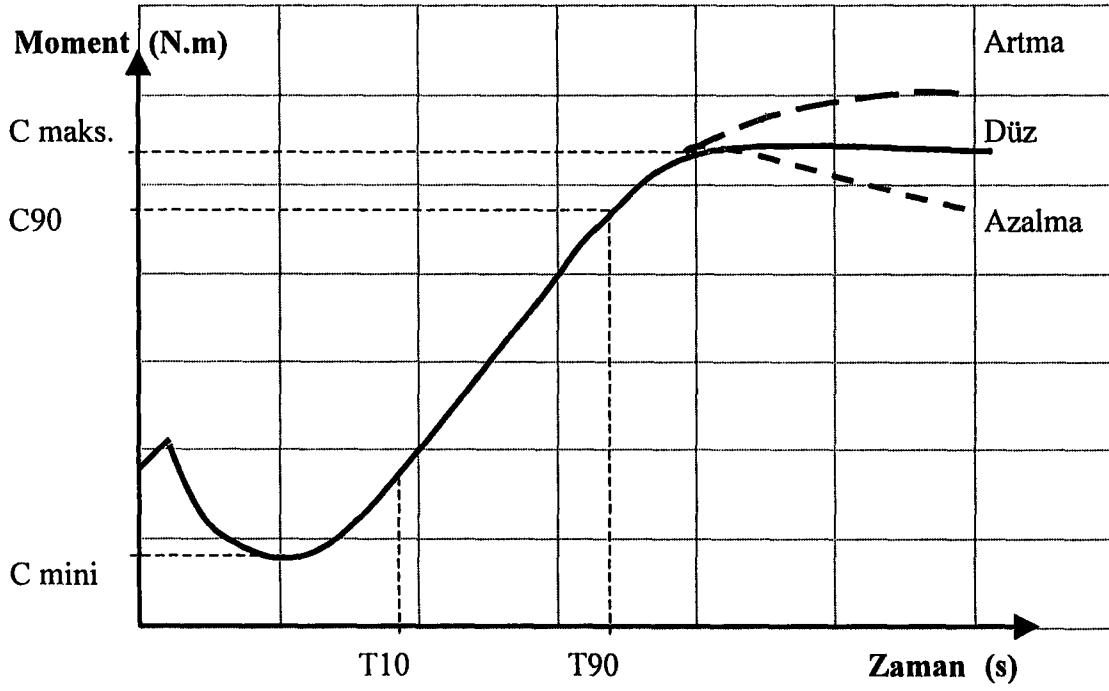
ihtiyaç duyar. [2]



Şekil 3.2. .Mekanik Özelliklerin çapraz bağ yoğunluğuna bağlı olarak değişmesi [2]

Karışımların vulkanizasyon özellikleri reometre adı verilen test cihazları ile kontrol edilir. Çiğ karışımdan alınan numune, belirli ve sabit sıcaklıktaki (genelde 180°C) haznede sıkıştırılır. Rotor tarafından numuneye küçük açılarda (1°, 3° veya 5°) titreşim uygulanır. Numunenin bu titreşimlere direncinin zamana göre değişimi ölçülür ve şekil 3.3’de görülen eğri elde edilir.

Vulkanizasyonun başlangıcında, kauçuk sıcaklığın etkisiyle yumuşar. C minimum değeri, karışım viskozitesini gösterir. Karışımın viskozitesi ne kadar düşükse, karışım kalıp gözlerini çok daha kolay dolduracaktır. Fakat diğer taraftan, çapak oluşumu, parça üzerinde hava kilitlemesi problemi oluşumu ve pişme süresinin artması gibi sakıncaları vardır.



Şekil 3.3. Reometre Eğrisi

T10, vulkanizasyon başlangıcına karşılık gelen zaman değeridir. Eğrinin eğimi vulkanizasyon hızını gösterir. Optimum vulkanizasyon, maksimum momentin (Cmaks) %90'ına karşılık gelen moment (C90) değeridir. T90, vulkanizasyonun %90'ının tamamlandığı süredir. Bu değerde vulkanize karışımın özellikleri optimumdur. T90 değerinin düşük olması, proseste daha çok üretim demektir. Fakat karışımın kalıbı tam dolduramaması, parça üzerinde yüzey dalgalanmaları, yapışmanın kötü olması gibi handikapları vardır. C maks değeri, vulkanize karışımın belli sıcaklıktaki en büyük sertlik değerinin göstergesidir. Maksimum momentten sonra, karışıma göre moment değeri zamanla artmaya devam eder (evolution), sabit kalır (plato) veya azalır (reversion). Azalma durumunda, sıcaklığın etkisiyle çapraz bağlar parçalanmaya başlar ve mekanik özelliklerde düşüşler olur.

3.2.1. Kükürtle Vulkanizasyon

Kauçukların büyük çoğunluğu molekül zincirlerinde çift bağ ihtiva ettiklerinden (doymamışlık), kükürt ile vulkanize olabilmektedirler. Kükürtle vulkanizasyon, günümüzde halen en çok kullanılan vulkanizasyon yöntemidir.

Kükürt tek başına kullanıldığında yavaştır, polisülfür bağlarının varlığından kaynaklanan çok iyi elastiklik özelliğine rağmen, diğer mekanik özellikleri ve

yaşlanmaya karşı direnci kötüdür. 1906 yılında Oenslager 'in anilinin hızlandırıcı etkisini bulması ile kükürdün tek başına kullanımı terk edilmiştir. Günümüzde kükürt aktivatör ve hızlandırıcılarla beraber kullanılmaktadır.

Aktivatörler doğal kauçuğu CaO, MgO, PbO, ZnO gibi metal oksitlerle takviye etmek veya boyamak isteğiyle, tesadüfen bulunmuştur. Aktivatörler karışım içindeki pişiricileri aktif hale getirmek için kullanılırlar. Günümüzde en çok kullanılan çinko oksittir. Metal oksitler dışında, Stearik Asit de aktivatör olarak kullanılmaktadır. [1,2,4]

Anilinden sonra, başka hızlandırıcılar kısa sürede bulunmuştur. Hızlandırıcılar pişme hızını ve verimini artırırlar. Hızlandırıcıların vulkanizasyon hızına göre sınıflandırılması aşağıdaki şekildedir : [2,4]

Yavaş hızlandırıcılar : Guanidin

Yarı-ultra hızlandırıcılar :Tiazol, Sülfenamid

Ultra hızlandırıcılar : Ditiokarbamat, Tiuram, Xantat

Guanidinler, tek başına kullanılabilirler, fakat diğer hızlandırıcılarla sinerji oluşturduklarında daha etkili olurlar. DPG(Difenilguanidin); MBT, MBTS, CBS ile sinerji oluşturarak iyi sonuç verir. TPG(Trifenilguanidin) ve DOTG(di-orto-tolilguanidin) diğer yavaş hızlandırıcılardır. [2,4]

Tiazoller; hızlı aksiyona girer, iyi yaşlanma özelliğine sahiptir. Fakat pişmeye başlama (scorch) eğilimi vardır. Bu durum özellikle fırın karbon siyahı ihtiva eden karışımlarda önemli bir sorundur ve sülfenamidlerin bulunmasını sağlamıştır. MBT (2-Merkaptobenzotiazol), MBTS (Dibenzotiazol disülfid), ZMBT (çinko Merkaptobenzotiazol) ve SMBT (MBT sodyum tuzu) tiazol sınıfı hızlandırıcılardır. [2,4]

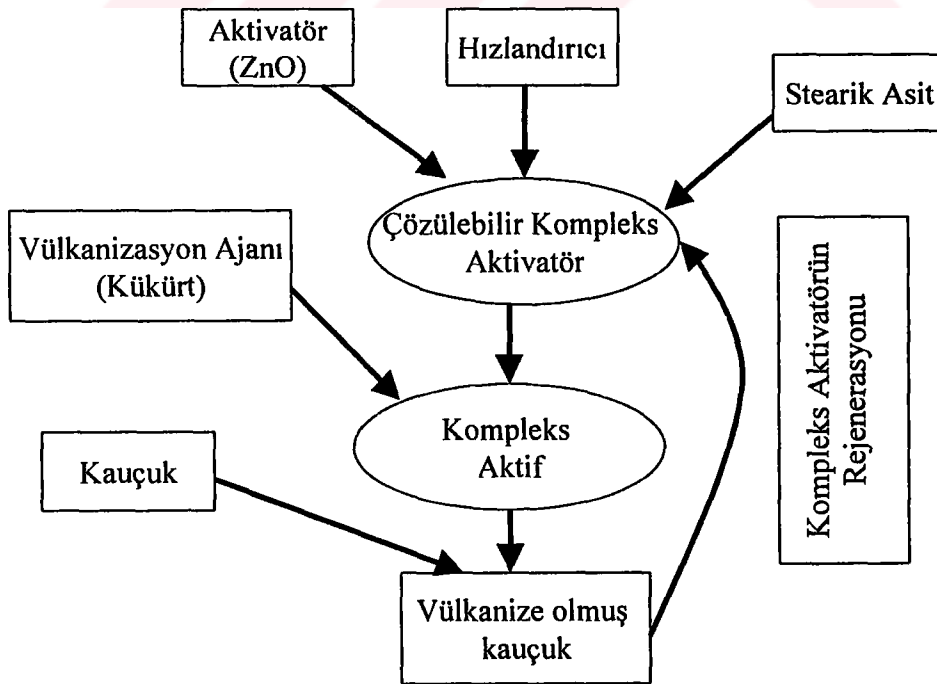
Sülfonamidler, günümüzde en çok kullanılan hızlandırıcılardır. Çabuk pişme, iyi proses güvenilirliği ve kauçukta yüksek çözünürlülük özelliği vardır. CBS(N-Siklohekzilbenzotiazol-2-sülfenamid), NOBS(N-Oksidietilbenzotiazol-2-sülfenamid) MBS(N-Morfolinotiobenzotiazol-2-sülfenamid) sülfenamid sınıfı hızlandırıcılardır. [2,4]

Tiuram, Ditiokarbamat, Xantat çok güçlü hızlandırıcılardır. Doğal kauçukta ana hızlandırıcı olarak kullanılmak için çok hızlıdır. Lateks teknolojisinde kullanılmaktadırlar ve EPDM, IIR gibi dien kauçuklarda yavaş pişiricilerle birlikte kullanılabilirler. [2,4]

Son yıllarda Salisilik Asit, Benzoik asit veya N-nitrosodifenilamin gibi geciktiriciler kauçuk hamurlarına ağırlıkça 0.5 +2.0 birim ilave edilmeye başlanmıştır. Geciktiriciler pişmeye başlama sorunlarının azaltırlar, fakat pişme hızında düşmelere sebep olurlar. Erken pişme önleyicilerin yetmişli yıllarda bulunması ile, pişmeye başlama sorunları halledilmiştir. Ayrıca bu kimyasalların pişme hızında önemli bir etkisi bulunmamaktadır. N-ftalamid en önemli erken pişme önleyicidir. [1]

3.2.1.1. Vulkanizasyon Mekanizması

Çinko oksit en çok kullanılan aktivatör olmasına rağmen, kauçukta çözünürlüğü iyi olmadığından, çözünürlüğü arttırmak için stearik asit ilave edilir. Çinko oksit ve stearik asit birleşerek kompleks aktivatörü oluşturur ve bu kompleks aktivatör hamurda çözünür. Bu ürün daha sonra kükürdü kauçuk zincirine transfer eder. Şekil 3.4.'te vulkanizasyonun genel şeması gösterilmiştir : [2]



Şekil 3.4. Vulkanizasyon Mekanizması

3.2.1.2. Vulkanizasyon Sisteminin Bileşimi

Kükürtle vulkanizasyon sisteminde ağırlıkça 100 birim kauçukta 0,5 ile 3 birim arasında kükürt kullanılmaktadır. Çinko oksit için bu oran 1 ile 5; stearik asit içinse, 1 ile 3 birimdir. Ayrıca farklı tipte hızlandırıcılar da toplamda 3 birime kadar ilave edilebilir. Öte yandan, hızlandırıcılar ile kükürdün oranı ters orantılıdır. Sentetik kauçuklarda doğal kauçuğa göre daha fazla hızlandırıcı kullanılmaktadır. [2]

Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi, hızlandırıcıların miktar ve yapısına ve ayrıca kükürt miktarına göre çapraz bağların yapısı farklılık göstermektedir.

Tablo 3.1. Vulkanizasyon Sisteminin Bağ Yapısına Etkisi

Bağ Yapısı	NR 100 Çinko Oksit 5 Stearik Asit 1			
	S 2,5 MBT 1	S 2,5 DTMT 0,5	S 2,5 CBS 0,5	S 0,4 MBT 6
Monosülfür	% 0	% 56	% 0	% 90
Disülfür	% 67	% 11	% 20	% 10
Polisülfür	% 33	% 33	% 80	% 0

Karbon-Kükürt molekülleri arasındaki bağ enerjisi 268 kJ/mol iken, bu değer kükürt-kükürt arasındaki bağ için 205 kJ/mol'dur. Fakat peroksitli vulkanizasyonda oluşan karbon-karbon bağının enerjisi 352 kJ/mol'dur. [2]

Kükürt oranı zengin ve yüksek oranda polisülfür köprüler ihtiva eden vulkanize olmuş karışımlar çok iyi elastiklik ve iyi esneme dayanımı özelliklerine sahiptir. Fakat yaşlanma dayanımları kötüdür. Diğer yandan kükürt oranı az, etkili veya yarı etkili olarak adlandırılan vulkanizasyon sistemlerinde ısı dayanımı çok iyi, özellikle sıcakta basma kuvveti altında kalıcı deformasyonu düşüktür. [2]

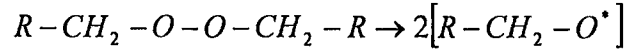
3.2.2. Peroksitle Vulkanizasyon

Peroksit, molekül zincirlerinde çift bağ bulunmayan (doymuş) elastomerlerin (EPM, CR..) vulkanizasyonunda kullanılmaktadır. Ayrıca sağlam karbon-karbon bağ yapısı ihtiva ettiğinden, dien elastomerlerde düşük kalıcı deformasyon ve iyi ısı dayanımı özellikleri sağlamak için kullanılmaktadır. Nadir olarak kullanılan anorganik ve

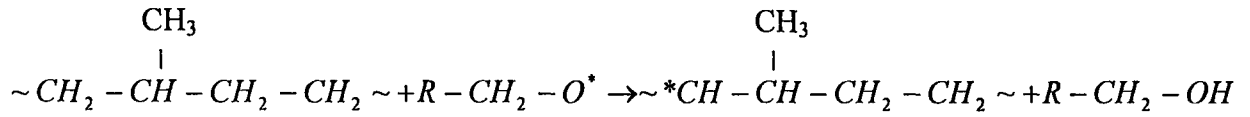
silisyum organik peroksitlerin yanı sıra, günümüzde yaygın olarak organik peroksitler (Dikünil, Benzoil, Di-tertiobutil) kullanılmaktadır. [1,2]

Peroksitle vulkanizasyon mekanizması 3 aşamadan oluşur. Aşağıda etilen-propilen kopolimeri (EPM) için vulkanizasyon etapları gösterilmiştir : [2]

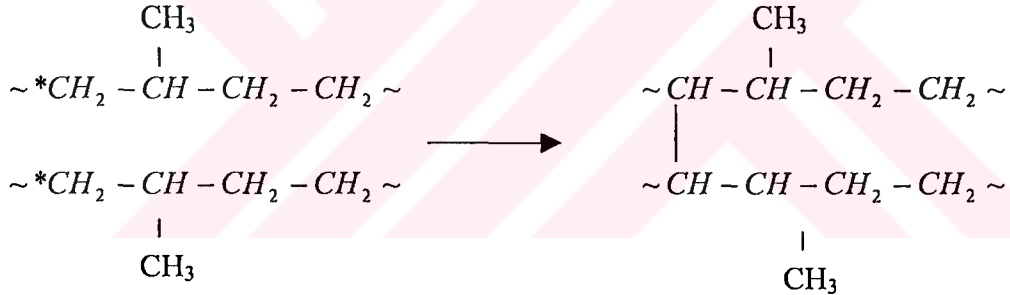
Başlangıçta peroksit radikallere ayrılır.



Polimer zincirinden hidrojen ayrılması.



Polimerin çapraz bağlanması.



Çapraz bağ yoğunluğu önemli ölçüde sıcaklığa bağlıdır. Dien tipi kauçukların kükürt ile vulkanizasyonunda olduğu gibi, hızlandırıcılarla daha hızlı ve daha yoğun bir çapraz bağlanma elde etmek mümkün değildir. Hızlı reaksiyon ancak artan sıcaklıkla mümkündür. Peroksit miktarının kauçuğun cinsine ve kullanılan peroksidin cinsine bağlı olarak belirli bir optimum orana kadar artırılmasıyla, çapraz bağ yoğunluğunu arttırmak mümkündür. Bu durumda elastomerin gerilme dayanımı, kalıcı deformasyonu artar, dinamik özellikleri olumlu etkilenir, ancak yırtılma mukavemeti kötüleşir. Çapraz bağ yoğunluğunu arttırmak için “coagent” adı verilen kimyasallar kullanılır. Trialil siyanürat, bismaleimid ve akrilik ester en çok kullanılan kimyasallardır. [1,2]

3.2.3. Diğer Vulkanizasyon Yöntemleri

Metal oksitler; özellikle polikloropren olmak üzere, polietilen klorosülfon, poliepioklorhidrin gibi halojen elastomerlerin vulkanizasyonunda kullanılır. Çinko oksit olan vulkanizasyon ajanı, elastomer zinciri üzerindeki klor atomları ile reaksiyona girer. Çinko oksitle beraber kullanılan magnezyum oksit de oluşan HCl asidini nötrleştirir ve pişmeye başlama riskini azaltır. Çoğunlukla çinko oksit ve magnezyum okside tiuram sınıfı bir hızlandırıcı da ilave edilebilir. [1,2]

Formofenolik reçinelerle ve kionin dioksinlerle vulkanizasyon; özellikle butil kauçuklara (IIR) iyi ısı dayanımı (160°C) özelliği kazandırmak amacıyla kullanılır. Fakat pişme süreleri çok uzundur. [1,2]

Amin ve metal oksit sabunları ile vulkanizasyon, ACM (Poliakrilik Kauçuk) ve EACM (Etilen Akriyat Kauçuk) elastomerlerde kullanılır. [1,2]

Tablo 3.2.'de elastomerlere ait uygun vulkanizasyon sistemleri gösterilmiştir.

3.3. Dolgu Maddeleri

Küçük taneli dolgu maddeleri kauçuk endüstrisinin ilk zamanlarından itibaren kullanılmaktadır. İlk başta maliyeti düşürmek amacıyla kullanılmışlardır. Daha sonra kil ve tebeşir tozu gibi dolgu maddelerinin prosesi kolaylaştırıcı özelliği olduğu görüldü. 20. yüzyılın başında Londra'da kauçuk karışımında karbon siyahı kullanıldı ve kauçukta modül, aşınma direnci, kesme gerilmesi gibi özellikler üzerinde kuvvetlendirici etkisi olduğu keşfedildi. [1,2]

Dolgu maddeleri kuvvetlendirici, yarı kuvvetlendirici ve salt (inert) dolgu maddeleri olarak sınıflandırılabilir. Bir diğer sınıflandırma da; siyah ve siyah olmayan dolgu maddeleri şeklindedir.

3.3.1. Karbon Siyahı

Karbon siyahı başta doğal gaz ve ham petrol olmak üzere, katran, damıtma artığı yağların tamamlanmamış yanması ile elde edilir. Karbon siyahının en önemli üretim metotları aşağıda belirtilmiştir : [1,2]

Tablo 3.2. : Elastomerlere göre kullanılan vulkanizasyon sistemleri

ELASTOMER	KÜKÜRT		PEROKSİT	METAL OKSİT	DİAMİN + KOAJAN	REÇİNE	SABUN	BİS-FENOL
	KLASİK	ETKİLİ						
NR – IR	●●●	●●	●					
SBR	●●●	●●	●					
BR	●●●	●●						
CR	●			●●●				
NBR	●●	●●●	●					
IIR	●●●					●●		
EPM			●●●					
EPDM	●●●	●●	●●			●		
CM			●●		●●●			
CSM			●	●●●				
AU – EU	●●●		●●●					
VMQ			●●●					
ACM							●●●	
CO-ECO		●●	●		●●●			
FPM			●●		●●●			●●●

●●● : En çok kullanılan sistem

●● : Kullanılan sistem

● : Mümkün ama az kullanılan sistem

Fırın siyahları,
Isı Siyahları,
Kanal Siyahları,
Asetilen Siyahları,
Lamba Siyahları.

Fırın siyahları, karbon siyahı üretiminin % 95'ini oluşturmaktadır.

Karbon siyahı ihtiva eden vulkanize olmuş kauçuğun özellikleri; karbon siyahının tane büyüklüğüne, yapısına, karbon siyahı oranına ve elastomer tipine bağlıdır.

Tane büyüklüğü küçüldükçe, yani yüzey alanı arttıkça, kopma dayanımı, aşınma ve yorulma dayanımı artar.

Karbon siyahının yapısı, karbon siyahı tanesindeki tesirsiz hacmin oranı olarak tarif edilebilir. Karbon siyahının yüksek, normal ve düşük olmak üzere 3 farklı yapısı vardır. Yüksek yapı yüksek tesirsiz hacim oranına tekabül eder. Tablo 3.3.'te tane büyüklüğünün ve yapısının vulkanize olmuş kauçuğun özelliklerine etkisi gösterilmektedir. [1,2,4]

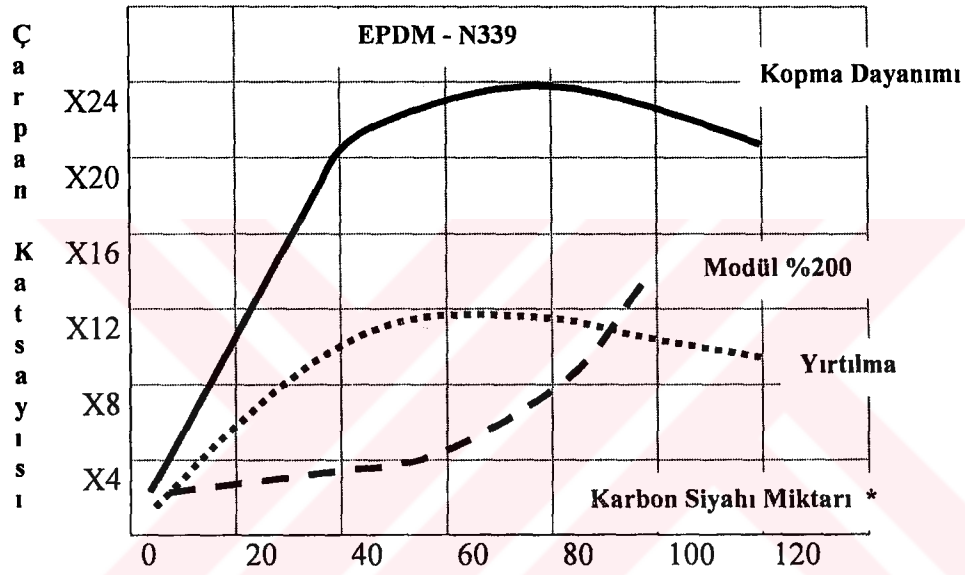
Tablo 3.3. Tane boyutu ve yapısının vulkanize olmuş kauçuğun özelliklerine etkisi

Özellik	Tane boyutu küçülünce,	Yapı büyüyünce,
Pişme oranı	Azalır	Düşük
Çekme dayanımı	Artar	Azalır
Modül	Maksimuma kadar artar, sonra azalır	Artar
Sertlik	Artar	Artar
Uzama	Minimuma kadar azalır, sonra artar	Azalır
Aşınma dayanımı	Artar	Artar
Yırtılma dayanımı	Artar	Düşük
Esneme dayanımı	Artar	Azalır
Rezilyans	Azalır	Düşük
Kalıcı Deformasyon	Düşük	Düşük
Isınma	Artar	Çok az artar
Elektrik iletkenliği	Artar	Düşük

Karbon siyahı oranının mekanik özelliklere etkisi EPDM ve N339 karbon siyahı için şekil 3.5.'te gösterilmiştir. Karbon siyahı miktarı, ağırlıkça 100 birim elastomer miktarına (pphr: pieces per hundred rubber) göre, 80 birime kadar kopma dayanımını artırır, bu değerden sonra artan karbon miktarı ile azalmaya başlar. Yırtılma

dayanımı 80 birime kadar artar, bu değerden sonra azalmaya başlar. Modül % 200 (% 200 şekil değişim oranına karşılık gelen gerilme değeri) karbon miktarının artmasıyla artar. [4]

Karbon siyahı ASTM D-1765 standardına göre tanımlanır. Kodlama 4 haneden oluşur. İlk hanede S veya N harfi bulunur. S harfi yavaş pişen asidik kanal siyahını, N harfi normal pişen nötr veya bazik siyahları gösterir. 2. hane tane büyüklüğü ile ilgilidir. Rakam büyüdükçe, partikül çapı büyür. 3. hane karbon siyahının yapısı ile ilgilidir. 4. hane aynı gruptaki karbon siyahının ikincil özelliklerini ayırt etmede kullanılır. Tablo 3.4.'te önemli karbon siyahları gösterilmiştir.



* : 100 ağırlık birimi elastomerde kullanılan karbon siyahı miktarı (pphr)

Şekil 3.5. Karbon Siyahının Mekanik Özelliklere Etkisi

3.3.2. Siyah Olmayan Dolgu Maddeleri

3.3.2.1. Silis

Hidrate silisler, asidin silikat alkalın üzerine etkimesi ile elde edilir. Projene ve anhidr silisler ise, hidrojen varlığında silisyum klorür fırınında hava ile oksidasyonu sonucu oluşur. Yalnızca silikon elastomerlerde kullanılır.

Hidrate silisler, siyah olmayan dolgu maddeleri arasında en iyisi ve özellikleri karbon siyahına en yakın olanıdır . Hidrate silisi, karbon siyahına göre uzama ve iç ısınma daha fazla, yırtılma daha iyi ve fiyatı daha fazladır. Ayrıca viskozitede artış

dolayısıyla pişme süresinde azalma görülür. Karbon siyahı ile aynı seviyede kalıcı deformasyon ve çekme dayanımı özelliklerine ulaşmak için, silis ihtiva eden karışıma daha fazla aktivatör (silan, PEG, TEA) ilave etmek gerekir. [2]

Tablo 3.4. Önemli Karbon Siyahları

ASTM Ref	Eski Kod	Tanım
N110	SAF	Süper Aşınma Fırın Siyahı
N219	ISAF-LS	Orta Aşınma Fırın Siyahı – Düşük Yapılı
N220	ISAF	Orta Aşınma Fırın Siyahı
N242	ISAF-HS	Orta Aşınma Fırın Siyahı – Yüksek Yapılı
N326	HAF-LS	Yüksek Aşınma Fırın Siyahı – Düşük Yapılı
N330	HAF	Yüksek Aşınma Fırın Siyahı
N347	HAF-HS	Yüksek Aşınma Fırın Siyahı – Yüksek Yapılı
N550	FEF	Hızlı Ekstrüzyon Fırın Siyahı
N683	APF	Çok Kullanışlı Fırın Siyahı
N660	GPF	Genel Amaçlı Fırın Siyahı
N760	SRF	Yarı Kuvvetlendirici Fırın Siyahı
N880	FT	İnce Isı Siyahı
N990	MT	Orta Isı Siyahı
S300	EPC	Kolay Proses Kanal Siyahı

3.3.2.2. Yarı Kuvvetlendiriciler

Kaolin, Sodyum silikoaminat ve kalsiyum karbonat çökeltisi yarı kuvvetlendirici siyah olmayan dolgu maddeleridir.

3.3.2.3. Salt Dolgu Maddeleri

Maliyeti düşürmek amacıyla kullanılan bu dolgu maddelerinin en önemlisi tebeşirdir. Tebeşirin hiçbir kuvvetlendirici etkisi olmadığından kuvvetlendirici ve yarı kuvvetlendirici dolgu maddeleri ile birlikte kullanılır. Baryum sülfat yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı (4.3 g/cm^3) karışımın ağırlığını arttırmak amacıyla kullanılır. Ayrıca asitlere dayanımı iyidir. Talk(magnezyum silikat) da karışımın aside dayanımını artırır ve iyi dielektrik özellikleri verir. [1,2]

3.3.3. Diğer Dolgu Maddeleri

Selüloz ve aramid gibi kısa fiberler yöne bağlı bir kuvvetlendirici etkisi vardır, özellikle ekstrüzyonda kullanılırlar. PVC, NBR elastomerlerde ozon ve yakıtı karşı dayanımını arttırmak için kullanılır.

3.4. Yumuşatıcılar (Plastifiyanlar)

Plastifiyanlar, küçük taneli molekülleri elastomerlerin makromolekülleri arasına nüfuz ederek viskoziteyi düşüren ve böylece hareketliliği arttıran sıvılardır. Karışımındaki plastifiyan oranı arttıkça; karışımın sertliği azalır, viskozite düşer, uzama oranı artar ve kopma ve yırtılma dayanımı azalır. Plastifiyanlardan ayrıca elastomerle uyuşma, düşük uçuculuk, vulkanizasyon sistemi ile karışma (interference) yapmama, düşük ayrışma, yani yağ ve yakıt dayanımını artırma, kirlilik yapmama ve zehirli olmama özellikleri istenir. [1,2,4]

Plastifiyanların sınıflandırılması :

- a. Hayvansal kökenliler : Stearik asit dışında günümüzde kullanılmamaktadır.
- b. Bitkisel kökenliler : Palmiye yağı, ayçiçeği yağı, keten yağı, kolza yağı, çam katranı .
- c. Kömür katranı türevleri : Özellikle Kumaron reçineleri ve katran.
- d. Petrol türevleri : Günümüzde en çok kullanılan plastifiyanlardır. Yapılarında parafinik, naftenik ve aromatik bileşenler vardır. Yapısında en fazla hangi bileşen varsa, örneğin aromatik, plastifiyan aromatik olarak adlandırılır.
- e. Sentetik organik bileşikler : Esterler, eterler ve eter-tio-eterler. Bu plastifiyanlar polar yapıda olduğundan, NBR, CM, CSM gibi polar elastomerlerde kullanılırlar.

Tablo 3.5.'de elastomer tipine uygun plastifiyanlar gösterilmiştir.

3.5. Koruyucu Maddeler

Elastomerlerin özelliklerinin gerek karışımın hazırlanmasından sonra, gerek mamul elde edilmesinden sonra; ısı, ışık, zehirli metaller vb. gibi dış etkenlerden dolayı zaman içerisinde değişikliğe uğramasına, kaybolmasına yaşlanma adı verilir. Bu değişiklikler çatlama, sertleşme, kırılgan hale gelme, yapışkan hale gelme, yumuşama, kabuk bağlama gibi hallerde görülebilir. Elastomer zincirlerinde

doymamışlık arttıkça, yaşlanmaya karşı hassasiyet de artar. Zira vulkanizasyon sırasında, az sayıda çift bağlar reaksiyona girmiştir. Çift bağlar, oksijen, ozon ve diğer reaktif maddelere karşı hassastırlar. Ayrıca kükürt ile reaksiyona girerek sertleşmeye neden olurlar. [1,2]

Tablo 3.5. Plastifiyanların Elastomerlere uygunluğu

ELASTOMER	PETROL KÖKENLİ YAĞLAR				ESTER
	PARAFİNİK	NAFTENİK	AROMATİK	YÜKSEK AROMATİK	
NR – IR	●	●●	●●●	●●●	●
SBR	●	●●	●●●	●●●	●
BR	●	●●	●●●	●●●	●
CR	□	●→●●	●●	●●●	●●
NBR	□	□	●	●●	●●●
IIR	●●●	●●	●	□	●●
EPM	●●●	●●	●	●	●
EPDM	●●●	●●	●→●●	●	●●
CM	□	●→●●	●●	●●	●●●
CSM	□	●→●●	●●	●●	●●●
AU – EU	□	□	●	●	●
ACM	□	□	●	●→●●	●●
CO-ECO	□	□	●	●→●●	●●
FPM	□	□	□	□	●

●●● : Çok iyi
 ●● : İyi
 ● : Mümkün
 □ : Kötü

3.5.1. Yaşlanmaya Sebep Olan Dış Etkenler

3.5.1.1. Oksidasyon

Çeşitli şekillerde oluşan oksijenin malzemeye nüfuz ederek, elastomer zincirlerini parçalaması halidir. Oksijenin tesiri ile aktif radikaller oluşur ve bu radikaller polimer molekülleri ile reaksiyona girerler. Yüksek sıcaklıkta bu işlem daha da

hızlıdır. Özellikle dien kauçuklarda çok tesirlidir, bu nedenle koruyucu maddeler bu tip elastomerlerde çok az miktarlarda dahi gayet etkili olurlar.

Yumuşama şeklinde kendini gösteren parçalanmanın yanı sıra, oksijen çapraz bağlanmaya da sebep olabilir, böylece malzeme sertleşir. Bir kısım oksijen de parçalanma veya çapraz bağlanmaya yol açmaksızın, molekül zincirine kimyasal olarak bağlanır, bu durumda yaşlanmaya etkisi olmaz.

NR, IR ve IIR zincirleri başlangıçta parçalanırlar, malzeme yumuşar, yaşlanma arttıkça, çapraz bağlanma ağırlık kazanır, malzeme sertleşir. SBR, NBR, BR, CR ve EPDM gibi elastomerlerde siklikleşme reaksiyonu görülür, malzeme sertleşir. Dien grubu ihtiva etmeyen Metilen grubu elastomerler (ACM, CSM, FKM, EPM, Q...) oksidasyondan çok az etkilenirler. [2]

3.5.1.2. Isı

Isı, oksijenin tesirini artırır, ayrıca ısının etkisi ile, oksijensiz ortamda malzemenin özelliklerini değiştiren çeşitli reaksiyonlar meydana gelebilir. Örneğin çapraz bağların termik olarak parçalanması, moleküllerin kendi aralarında çapraz bağlanması gibi. Hidrolize olabilen elastomerlerde (AU, EAM, Q) su buharı çok çabuk bir parçalanmaya neden olur. [2]

Isıdan kaynaklanan yaşlanma, özellikle kopma uzamasındaki azalma ile kendini belli eder. Doğru vulkanizasyon seçimi ve antioksidan ve IIR, EP gibi ısıya dayanıklı elastomer seçimi ile ısının tesiri azaltılabilir.

3.5.1.3. Ozon

Özellikle gerilme altındaki doymamış elastomerler ozona karşı çok hassastırlar, gerilme doğrultusuna dik yönde ozon çatlakları oluşur. Gerilme olmadığı zaman, bu çatlaklar oluşmaz. Sıcaklı ve nem ozon çatlaklarının oluşumunu hızlandırır.

Kauçuk karışımına mum ilavesi, ozona karşı uygulanan en bilinen yöntemdir. Mum yüzeye nüfuz ederek koruyucu film oluşturur. Bu film kırılgan olduğundan, statik uygulamalarda iyi sonuç verirken, dinamik uygulamalarda kolayca çatlamaktadır. [2]

3.5.1.4. Işık ve Hava Şartları

Güneş ışını, özellikle ultraviyole ışınlar, kauçuk yüzeyinde oksijenin tesirini arttırarak okside bir kauçuk filmi meydana getirir. Bu film gelişigüzel istikametlerde birbirleriyle birleşen çatlaklardan oluşur, bu durum fil derisi oluşumu olarak da isimlendirilir. Özellikle açık renkli kauçuklarda rastlanır, karbon siyahı ultra viyole ışını iyi absorbe ettiğinden bu oluşuma siyah elastomerlerde rastlanmaz.

3.5.1.5. Yorulma

Tekrarlanan gerilmelere maruz kalan elastomer parçaların mukavemeti azalır, kopma dayanımının çok altındaki gerilmelerde kırılma oluşabilir, buna neden yorulma olayıdır. Elastomer parçalar uygulanan mekanik enerjiden kaynaklanan ısınmadan dolayı, hızlı bir şekilde yaşlanmaktadır. Sıcaklık, oksijen veya ozonun varlığı, uygulanan gerilmenin genliği ve frekansı çatlak oluşumunda etkili olmaktadır.

Çatlak oluşumu, ozon çatlaklarında olduğu gibi, kuvvet yönüne dik doğrultuda ve gerilmenin maksimum olduğu bölgelerde olmaktadır. Genelde, antiozonanlar yorulma çatlamasına karşı da iyi gelmektedir.

Yorulmaya karşı ayrıca şu önlemler alınabilir :

Küçük boyutlu dolgu maddeleri kullanımı, iyi dağılım sağlanmalı,
Optimum pişme hali,

Uygun elastomer seçimi : IIR en iyisidir, onu düşük sıcaklıklarda CR ve orta sıcaklıklarda NR takip eder.

Aşırı iç ısınma (heat build up) olmamalı,

Elastomer parça düşük gerilmelere göre şekillendirilmeli,

Kalıp kusurlarının önlenmesi, örneğin yüzey çatlaklara kötü birleşmeler neden olur.

3.5.1.6. Zehirli Metaller

Bakır ve mangan, çok düşük miktarlarda dahi, çiğ veya pişmiş haldeki kauçuğun yaşlanmasını hızlandırır. Demir, özellikle SBR elastomeri için çok zararlıdır. Oksidasyona benzer bir bozulma olur, fakat proses daha hızlıdır. Kauçuk önce yumuşar, daha sonra da sertleşir. Zehirli metaller eğer kauçukta çözünmemiş durumda ise, etkileri zayıflar. [1]

3.5.2. Koruyucu Ajanlar

Yaşlanmaya karşı dayanıklı elastomeri seçmek her zaman mümkün olmadığı için, kauçuk karışımına koruyucu ajanlar ilave etmek gerekir. Bu koruyucu ajanların görevleri mümkün olduğu kadar uzun süre, kauçuğu özellikleri bozulmadan veya çok az bozulmasına müsaade edecek şekilde korumaktır. Genelde kauçuk karışımlarında 100 birim ağırlık elastomere karşılık 2 birim ağırlık kullanılırlar. [2]

Koruyucu ajanlar kimyasal yapılarına göre sınıflandırılırlar :

Amin türevleri, en önemli gruptur. Leke verme, renk bozma özelliğine sahip olmakla beraber, çeşitli yaşlanma etkenlerine karşı çok iyi sonuç verirler. 2 gruba ayrılırlar :

Parafenilen diaminler; ozon dahil farklı etkenlere karşı iyi sonuç verirler. [2]

Aminler ve amin türevleri, çok kuvvetli antioksidanlardır. Isı ve tekrarlanan gerilme etkenlerine karşı iyi sonuç vermelerine rağmen, antiozonan değildirler. [2]

Fenol türevleri, Amin türevlerine göre daha zayıf koruyuculardır. Özellikle ozona karşı hiçbir faydası yoktur. Fakat leke verme özelliği olmadığından, açık renkli elastomerlerde kullanılırlar. [2]

3.6. Diğer Bileşenler

Kauçuk formüllerinde yukarıda anlatılan bileşenler dışında, belli özellikleri iyileştirmek, bazı eksiklikleri gidermek veya fiyatı düşürmek amacıyla ikincil bileşenler kullanılır. Bu bileşenlerden en önemlileri aşağıda belirtilmiştir:

Peptizanlar, yüksek viskoziteye sahip doğal kauçuk, SBR ve bazı klor kauçukların plastifikasyon işlemini kolaylaştıran kimyasallardır. 2-merkaptobenzimidazol, çinko 2-benzamidotiofenat, tetrametiltiuram disülfür en çok kullanılan peptizanlardandır. [1,2]

Oda sıcaklığında kararlı, yüksek sıcaklıklarda gaz çıkaran kimyasallar olan şişiriciler, süngerli kauçuklar elde etmek için kullanılmaktadır. Diazoaminobenzen(DAB), azodikarbonamid(ADC), benzosulfohidrazid(BSH) önemli şişiricilerdendir. [1]

Bitkisel yağ kökenli bir kauçuk olan faktis, ekstrüzyon ve kalenderleme hızlarını artırır, profillerin yüzey kalitesini iyileştirir. Ayrıca ısıya ve ozona karşı koruyucu etkisi vardır. Yüksek oranda 50 birim civarında matbaa merdanesi, silgi gibi yumuşak mamullerde kullanılır. Kahverengi ve beyaz faktis tipleri vardır. [1,2]

Boyalar, siyahtan farklı renkte kauçuk ürün elde etmek için açık renk dolgu maddeleri ile kullanılırlar. İnorganik ve organik pigmentler olarak ikiye ayrılırlar. Demir oksitler, sarıdan kırmızı kahveye kadar çeşitli renk ve tonlarda bulunur ve çok kullanılır. Yeşil krom oksit mat, fakat kalıcıdır. Kadmiyum pigmentleri soluk sarıdan mavi kırmızıya kadar değişik tonlarda çok kullanılır. [1,2]



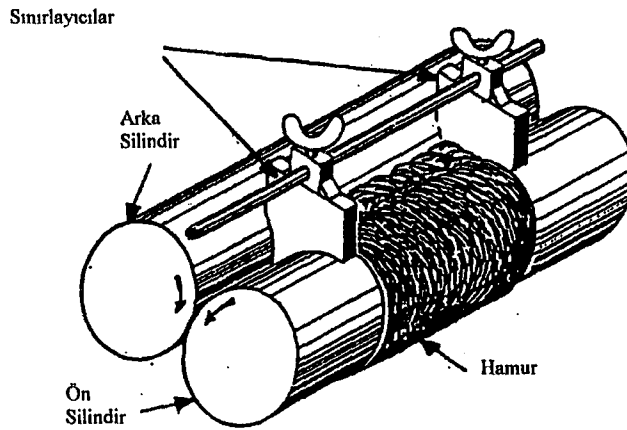
4. KAUÇUK PROSESLERİ

Kauçuk mamullerin imalatı iki aşamada gerçekleşir : İlk önce belli formülasyona göre karışım hazırlanır. İkinci aşama, karışımın ekstrüzyon, kalenderleme ve kalıplama yöntemi ile şekillendirilmesidir. İşlem vulkanizasyon ile tamamlanır. Bazı mamullerde vulkanizasyon sonrası bitirme (finisyon) işlemleri yapılır.

4.1.Karıştırma

Karıştırma, kauçuk hamuruna konulan tüm bileşenlerin belli bir düzende konularak, homojen bir kitle haline getirilmesidir. Karıştırma işlemi için, çeşitli karıştırıcılar kullanılmaktadır.

Açık karıştırıcılar, kauçuk sanayinde kullanılan en eski tip karıştırma makineleridir. Birbirlerinden çok az farklı hızlarda ters yönde dönen iki silindirden oluşur. Şekil 4.1.'de açık karıştırıcı gösterilmiştir. Silindirlerin açısal hızlarının oranı, sürtünme katsayısı olarak adlandırılır. Doğal kauçuk gibi, ön plastifikasyon işlemi gerektiren kauçuklar için 1,10÷1,25 arasında değişir. İşleme alınması zor olan bazı sentetik kauçuklarda 1'e yakın değerler kullanılır veya açık karıştırıcılar kullanılmaz. [2]

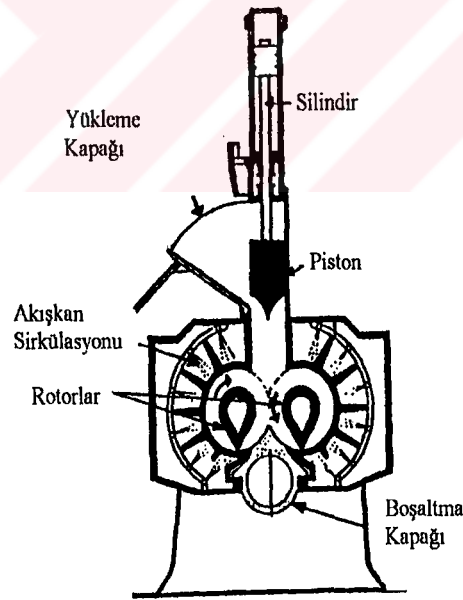


Şekil 4.1. Açık Karıştırıcı

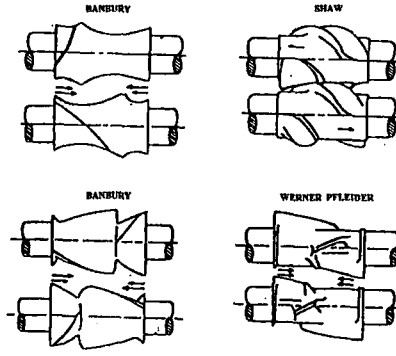
Açık karıştırıcılarda arka silindir sabitken, ön silindir silindirler arası mesafeyi ayarlayabilmek için hareketlidir. Silindirler soğutmayı ve ısıtmayı sağlamak için oyuk imal edilirler. Yanlardan malzeme kaçışını engellemek için, hamur sınırlayıcılar vardır. Açık karıştırıcılarda, gerek makine, gerekse operatör emniyeti açısından ek tedbirler alınmalıdır. [1,2]

Açık karıştırıcılar, silindirlerin boyutlarına göre tanımlanır. Örneğin, 500x1000, silindirin dış çapının 500 mm ve uzunluğunun 1000 mm olduğunu gösterir.

İç (Kapalı) karıştırıcılar, içinde iki rotor bulunan bir hazneden oluşmaktadır. Piston ile hareket eden ağırlık ile bileşenler hazneye basılır. Üstte doldurma, altta da boşaltma kapakları bulunur. Şekil 4.2’de iç karıştırıcı gösterilmiştir. Banbury ve Werner tipi iç karıştırıcılarda, rotorlar farklı hızlarda döner. Karıştırma rotorlar ile haznenin kenarları arasında yapılır. İntermix ve Shaw tipi iç karıştırıcılarda ise, rotorlar aynı hızlarda döner ve karıştırma işlemi rotorlar arasında sıkıştırma ve gevşeme ile gerçekleşir. Şekil 4.3.’te farklı rotor tipleri gösterilmiştir. İç karıştırıcıların kapasitesi, 1 lt ile 500 lt arasında değişmektedir. [2]



Şekil 4.2. Banbury Tipi İç Karıştırıcı



Şekil 4.3. Çeşitli İç Karıştırıcıların Rotor Tipleri

Vidalı karıştırıcılarda, açık ve iç karıştırıcılardan farklı olarak, karıştırma işlemi sürekli'dir. Süreklilik maliyeti düşürür. Vidalı karıştırıcılar aslında bir ekstrüzyon makinesidir. Vidalı karıştırıcılarda kullanılacak elastomerin toz halinde olması gerekmektedir. Bu durum açık karıştırıcıların gelişmesindeki ön şarttır. Günümüzde bazı doğal kauçuk çeşitleri, NBR ve CR toz haline getirilebilmektedir. Ayrıca vidalı karıştırıcılar, diğer karıştırma makineleri kadar sağlam yapıda değildir. [2]

Başta doğal kauçuk olmak üzere, SBR ve bazı klor kauçuklar bileşenlerin ilavesinden önce plastifikasyon işlemine gereksinim duyar. Plastifikasyon ile, hem viskozite düşer, hem de makromolekül zincirlerinin hareketliliği artar.

Karıştırma işlemi direkt veya ters (up side down) yöntemi ile yapılır. Direkt yöntemde, ilk önce elastomer, antioksidan madde ve çinko oksit konulur. 2. dk.'da sırasıyla kuvvetlendirici dolgu maddesi, stearik asit ilave edilir. 5. dk.'da kuvvetlendiricinin geri kalanı ve plastifiyan konulur. İşlem 7. dk'da 110°C÷150°C arasındaki sıcaklıklarda tamamlanır ve karışım boşaltılır. NR, SBR, CR ve NBR kauçukları direkt yöntemle karıştırılır. Ters yöntemde ise, ilk önce sırasıyla kuvvetlendirici dolgu maddeleri, aktivatörler, antioksidan, plastifiyan, kuvvetlendiricinin geri kalanı ve elastomer konulur. İşlem 4 ile 5 dakika sonunda tamamlanır ve karışım boşaltılır. EPDM, IIR, CM, EAM kauçukları ters yöntem ile karıştırılır. Direkt yöntem veya ters yöntem ile karıştırma işlemi, genellikle açık karıştırıcılarda pişiricilerin verilmesi ile tamamlanır. [2]

Karıştırma işleminden sonra, karışım, Batch Off adı verilen otomatik sistemlerde suyla soğutulur, yapışmayı önleyici talk veya stearat ile sıvanır, kuruduktan sonra istenen bant kalınlıklarında kesilir.

4.2. Ekstrüzyon

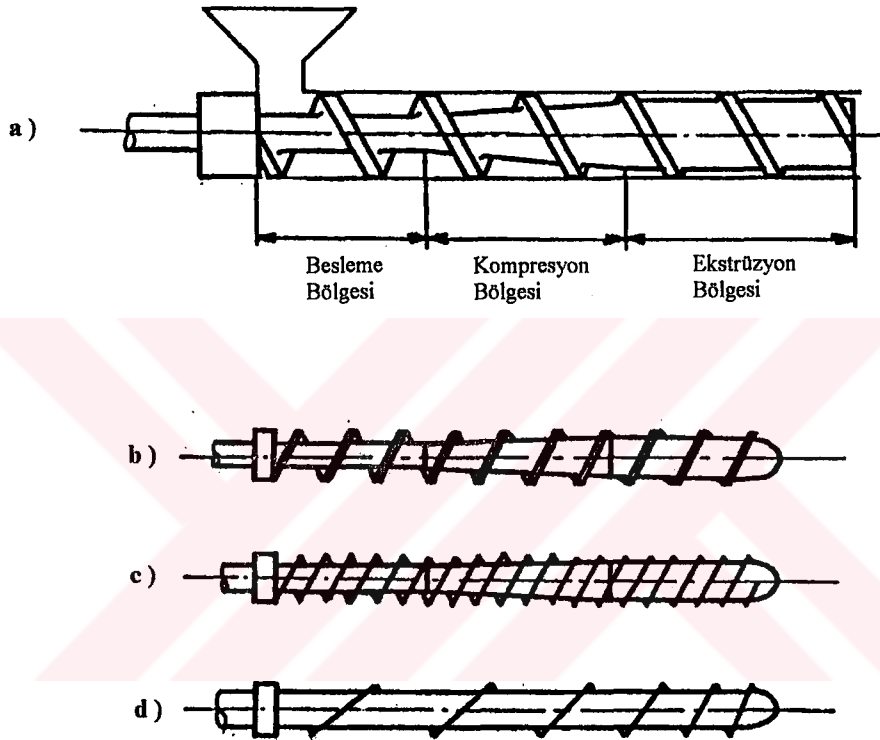
Ekstrüzyon, yarı mamul üretiminde kullanılan en yaygın yöntemdir. Ekstrüzyon ile hortum, sızdırmazlık contası, elektrik kablosu gibi mamullerin, daha sonra kalıplamada veya şekilli hortumların imalatında kullanılan eboş adı verilen yarı mamullerin imalatı yapılmaktadır. Ekstrüzyon işleminden sonra, vulkanizasyon işlemi yapılır.

Ekstrüzyon işleminde ekstruder adı verilen vidalı makineler kullanılır. Besleme ağzından sevk edilen bant şeklindeki karışım, sonsuz vidanın dişleri tarafından alınır, silindir boyunca ileri sevk edilir. Bu mekanik işlemde meydana gelen ve gövdeden aldığı ısı ile ısınan yarı erimiş haldeki karışım kalıpta son şeklini alır ve dışarı basılır.

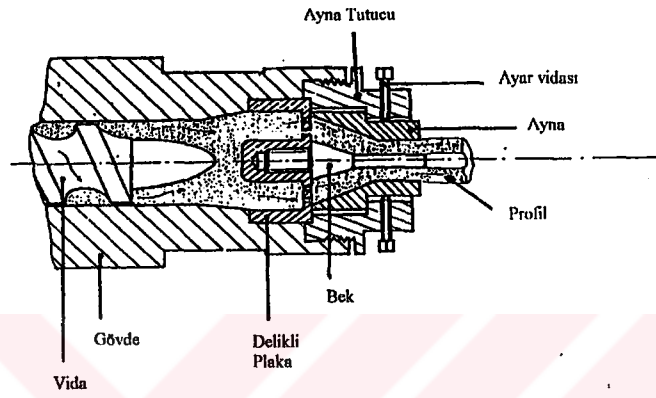
Sonsuz vida ekstruderin en önemli parçasıdır. Ekstruder, vida çapına ve uzunluğuna göre tanımlanır. 60-12D ekstruder, vida çapının 60 mm ve uzunluğunun çapın 12 katı, yani 720 mm olduğunu gösterir. Şekil 4.4.'te gösterildiği gibi vidanın besleme, sıkıştırma ve ekstrüzyon bölgesi bulunur. Vida düzenli besleme sağlamalıdır. Beslemedeki düzensizlikler basınç farklılıklarına, dolayısıyla kesit farklılıklarına neden olmaktadır. Ayrıca, karışım soğuksa, plastifikasyonu tamamlamalı ve karışımı mekanik işlemle tekrar homojen hale getirmelidir. Vida boyu uzunluğu arttıkça, besleme daha düzenli, ayna üzerindeki basınç daha fazla ve karışım üzerindeki kesme kuvvetlerinin etkisi daha yoğun olur. Günümüzde 16 D'den büyük vida uzunlukları kullanılmaktadır. Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi vidaların, tek ağızlı, çift ağızlı, azalan hatveli ve artan diş dibi çaplı konstrüksiyonları vardır. [2]

Ekstruder başlığı üzerinde, malzemeye istenilen profili vermeyi sağlayan ayna bulunur. Boşluklu profil üretiminde bek, dolu profil üretiminde düzgün bir akış sağlamak için konik parça ve vida ile ayna arasında vida tarafından verilen döner akışı durdurmak amacıyla delikli plaka konulur. [2]

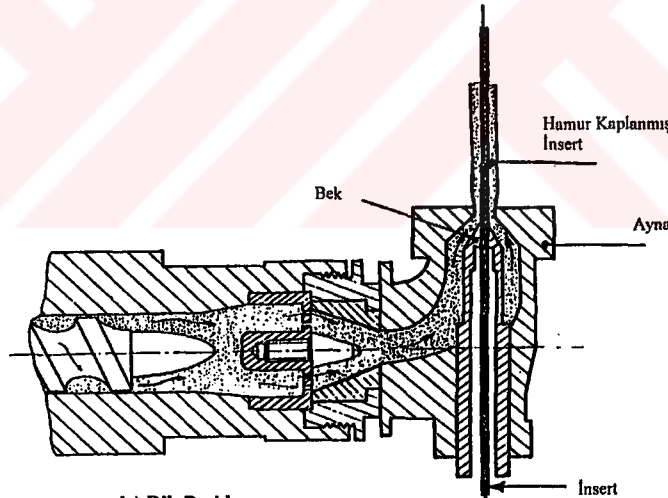
Doğru ve açılı ekstruder başlıkları vardır. Doğru başlıklar en basit tiptir. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi profil vida ile aynı ekseninde çıkar. İnsert ihtiva etmeyen her türlü şekil ve kesite sahip profilin ekstrüzyonu mümkündür. Dik başlıklar, açılı başlıkların en çok kullanılanıdır. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi profil vida eksenine dik ekseninde çıkar. Özellikle kablo endüstrisinde çok kullanılan bu tür başlıklarla, kauçuğun bir kabloyu, metal veya tekstil inserti ve bir başka kauçuk profili kaplaması sağlanır. [2]



Ekstruderden sonra, profil halen çığ halde olduğundan kolayca deforme olabilir. Bunu önlemek için aynanın çıkışından hemen sonra, profilin çıkış hızına göre ayarlanan hızlarda dönen çekme bandı konulur. Çekme bandından sonra, kesik vulkanizasyon durumunda profiller kaplara konmadan önce profillerin birbirlerine yapışmasını engellemek için içinde yapışmayı önleyici solüsyon olan soğuma havuzundan geçer. Sürekli vulkanizasyonda ise, çekme bandından sonra tuz banyosu, mikro dalga tüneli veya sıvı ortamdan geçer. [2]



a) Doğru Başlık



b) Dik Başlık

Şekil 4.5. Ekstrüzyon Başlıkları

Kesik vulkanizasyon yöntemleri sürekli olmadığı için ekonomik olarak verimli olmamasına rağmen, günümüzde küçük serilerin, şekilli parçaların vulkanizasyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ekstruderden çıkan profiller otoklav fırınlarında 180°C'lere kadar çıkabilen sıcaklıklarda su buharı basıncı ile, sıcak hava fırınlarında ise, basınç olmadan vulkanize olurlar. [2]

Büyük serilerde ekonomik olarak daha verimli olduğu için sürekli vulkanizasyon yöntemleri kullanılır.

Buhar borusunda vulkanizasyon, kablo endüstrisinde halen kullanılmaktadır. Kablolar 150-200m uzunluktaki boru şeklindeki otoklav fırınlarından 180°C civarında 15 bar altında geçirilerek pişirilir. Kabloda kullanılan metal insertin çekme kuvvetlerine dayanması gerekir. [2]

Tuz banyosunda vulkanizasyonda, ekstruderden çıkan profiller elektrikle ısıtılan ve ötektik tuz karışımı (%53 NO₃K, %40 NO₂Na ve %7 NO₃Na) ihtiva eden havuzdan geçer. Bu karışım 141°C'de eridiğinden, tuz banyosu vulkanizasyon sıcaklıklarında (200-250°C) akışkan haldedir ve profil aralıklarına çok iyi nüfuz eder. Doğrudan ısıtma ile, vulkanizasyon sağlanır. Isı geçişi hava fırınlarından 50 kat fazladır. Profilin yoğunluğu (1,1-1,3) tuzun yoğunluğundan (1,93) düşük olduğu için, yüzeyde kalma eğilimindedir. Bu yüzden profiller metal bir bant ile tutulur ve dalma derinliği ayarlanabilir. Tuz banyosundan sonra, profil tuzu temizlemek için iki fırça arasından geçer. [2]

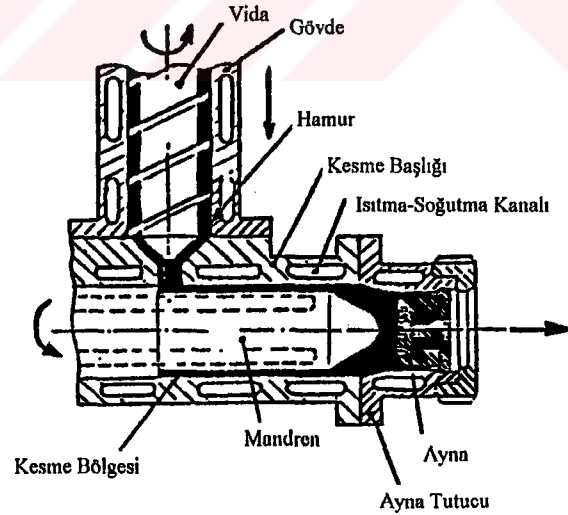
Tuz banyosunun en büyük dezavantajı, 20-25 mm çaptaki profillere uygulanabilmesidir. Ayrıca tuz banyosunun ısınması uzun sürdüğü için, günde 20 saatin üzerinde kullanılması durumunda verimlidir. Tuz tüketimi ve tuzun teçhizatı sebep olduğu bakım masrafları da önemlidir.

Sıvı ortamda vulkanizasyonda, havuzun tabanında bulunan gözenekli seramik boyunca, rezistanslarla ısıtılmış sıcak hava üflenir. Böylece cam bilyeler akışkanlaşır ve sürekli hareket ederler. Bu yöntemde, tuz banyosuna göre daha komplike profillerin vulkanizasyonu mümkündür. Cam bilyeler fırçalama ile geri kazanılırlar. Taşıyıcı bant olmadığından profili çekmek gerekir, bu yüzden düşük viskoziteye sahip karışımlarda kopma ve uzama riski vardır. Cam bilyelerin ısı taşımasını düşüktüğü için, 190°C-200°C üzerinde vulkanizasyon sıcaklıklarına çıkmak çok zordur. Bu durum tuz banyosuna göre hızları %50 oranında azaltır. [2]

UHF ile vulkanizasyonda, UHF tüneline sayıları 6 ile 12 arasında değişen 2÷5 kW güce sahip manyetonlar boşlukta yüksek frekansta elektromanyetik bir alan oluşturur. Profiller bunun içinde hareket ederler. Bu yöntemde profillerin aşırı vulkanizasyon riski vardır. Bunu önlemek için profillerin boşlukta geçişi hızlı yapılır

ve takibinde sıcak hava veya enfraruj ile ısıtılan tünelden geçirilir. Bu yöntem özellikle kalın kesitli profiller için uygulanır. Isıtıcı ile profil arasında temas olmadığı için temiz bir yöntemdir. Ayrıca istenildiğinde çalıştırmak ve durdurmak mümkün olduğundan, küçük serilerde de ekonomik bir yöntemdir. Fakat profiller karışımının UHF ortama dayanımı iyi olması gerekmektedir. Bu yüzden polar elastomerler ve açık dolgu maddelerine tercihen karbon siyahı ihtiva eden karışımlarda kullanılması tavsiye edilmektedir. [2]

Kesme ile vulkanizasyonda, vulkanizasyon için gerekli ısı enerjisi şekil 4.6 'da görülen özel ekstruder başlığında kesme etkisi ile elde edilmektedir. Aynadan hemen önce bulunan torpil şeklindeki mandren değişken hızla dönen bir motora bağlıdır. Ekstrüzyon vidası ile yumuşayan karışım, sabit gövde ile mandren arasına gelir. Karışım, yoğun kesme etkisi ile 150°C ile 190°C arasında bir sıcaklığa erişir. Bu sıcaklık pişmeyi başlatır. Karışıma göre değişen pişme başlama sıcaklığına erişilince, mandrenin dönme hızı hafifçe düşürülür. Aynadan çıkan profilin vulkanizasyonu sıcak hava tüneline tamamlanır. Bu yöntemde kirlilik yoktur ve başlık doğrudan ekstrudere monte edildiği için yerden tasarruf edilir ve her türlü karışımın vulkanizasyonu mümkündür. [2]



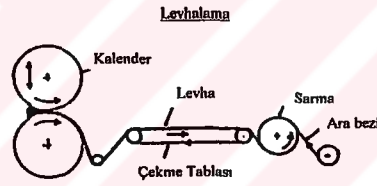
4.3.Kalenderleme ve Sıvama

4.3.1. Kalenderleme

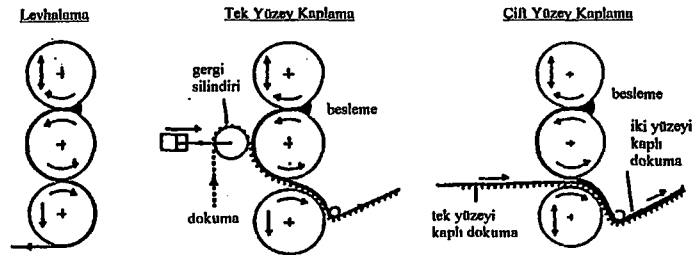
Kalenderleme, kauçuk hamurundan ince levha elde etmek ve özellikle dokuma veya metal telleri kauçuk ile kaplamak amacıyla uygulanan bir işlemdir. Kauçuk ile kaplanmış yarı mamuller başta lastik imalatında olmak üzere, konveyör bant, spor ve giyim eşyaları imalatında kullanılmaktadır. Kalenderler silindir adedine (2'li, 3'lü, 4'lü) ve yerleştirilme şekline (I, L, ters L, Z) göre adlandırılır. [2]

İki silindirli kalenderler, şekil 4.7.'de görüldüğü gibi levha imalatında kullanılırlar. Kalenderden çıkan ürün beze sarılır. Üç silindirli kalenderler düz ve parlak levha imalatında ve metal veya dokumanın tek bir yüzeyinin kauçukla kaplanmasında kullanılır. Dört silindirli kalenderlerle her iki yüzeyi kauçukla kaplamak mümkündür. Şekil 4.7.'de kalenderlerin kullanımı gösterilmiştir. [2]

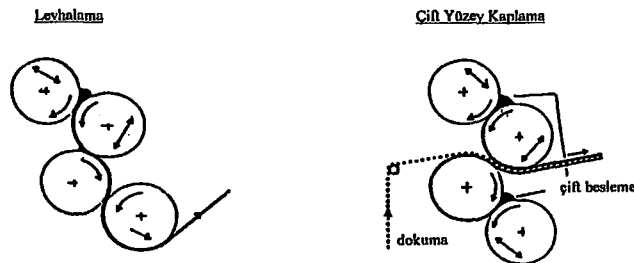
a) 2 Silindirli Kalender



b) 3 Silindirli Kalender

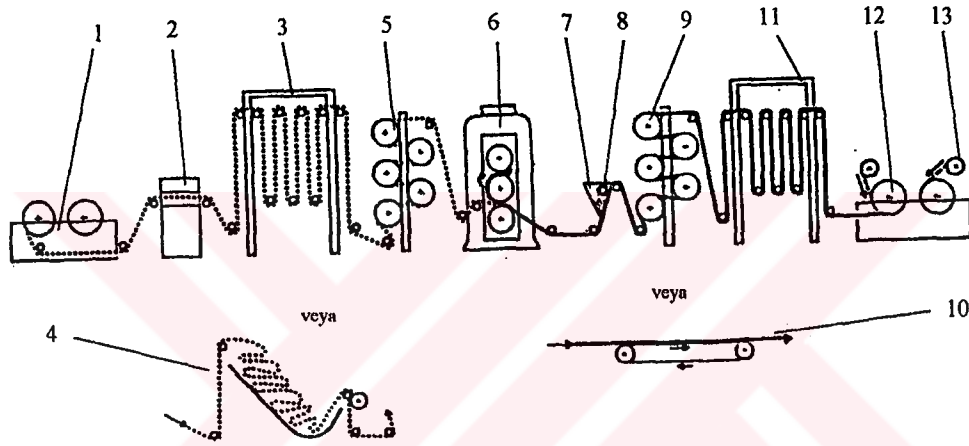


c) 4 Silindirli Kalender



Şekil 4.7. Kalenderlerin Kullanımı

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi kalender tesisleri çok büyüktür. Kalender silindirlerinin önünde kauçuk ve dokuma besleme üniteleri vardır. Kauçuk beslemesi, üzerinde bant kesme düzeneği ve konveyör bulunan ısıtıcı ile gerçekleşir. Dokumanın beslemesi ile ilgili olarak, dokumayı çözme sistemi, dikiş makinesi gibi artarda iki dokuma bezini birleştirme düzeneği, birleştirme esnasında hattın durmasını önlemek amacıyla toplama sistemi ve düzenli bir besleme sağlamak için gerilme regülatörü bulunur. Ayrıca kalenderleme tesisinde yapıştırma (adherizasyon) ünitesi de konulabilir. Bu ünite; dokumayı ön ısıtma fırınından, yapıştırma banyosundan ve kurutma fırınından oluşur. [2]



Şekil 4.8. Kalenderleme Tesis

- 1.çözme 2. Birleştirme (dikiş makinesi) 3. Dokuma toplayıcı 4. "J box" toplayıcı
5.ısıtıcı tamburlar 6. 3'lü I kalender 7. Talk kutusu 8. Fırça 9. Soğutucu tamburlar
10. çekici tabla 11. Dokuma toplayıcı 12. Sarma 13. Ara bezi

Kalender silindirlerinden çıkan kauçuk kaplı dokuma, ara bezine yapışmasını engellemek için içinde talk veya çinko stearat bulunan tekmeden geçer. Levhaların sarılma esnasında deforme olmalarını engellemek amacıyla soğutma tamburlarından geçer. Toplayıcı sistem, diğer toplayıcılar gibi hattın durmasını engeller. En son olarak, kauçuk kaplı dokuma bezi ara bezi ile sarılarak rulo haline getirilir. [2]

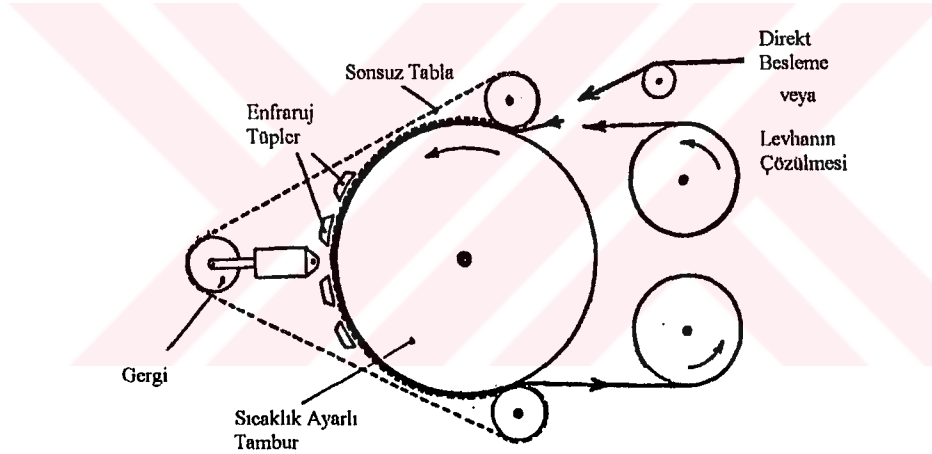
4.3.2. Sıvama

Milimetrenin yüzde biri kalınlıklarda kauçuk kaplı dokuma elde etmek amacıyla, kalenderlemeye benzeyen sıvama tekniği kullanılır. Sıvama, eriyik haldeki kauçuğun dokuma üzerine sıvayarak veya daldırılarak yaydırılmasıdır. Eriyik karışımlar,

dokuma yüzeyine daha iyi nüfuz eder, bundan dolayı sıvama kalenderlemeye göre daha iyi bir yapışma sağlar. [2]

Sıvama hattı, kalenderleme hattına çok benzer. Farklı olarak kalender yerine tek yüzeyi sıvamak için sıvama tezgahı, her iki yüzeyi sıvamak için daldırma makinesi bulunur.

Kalenderleme ve sıvama ile elde edilen yarı mamullerin vulkanizasyonu, otoklav fırınlarında ve sürekli pişmeyi sağlayan Rotocure adı verilen makinelerde yapılır. Şekil 4.9.'da görülen Rotocure makinesinde kauçuk kaplı dokuma baskı bandı ile büyük çaplı tambur arasından geçer. Tambur buhar ile 130°C ile 160°C sıcaklıklara kadar ısıtılır. Ayrıca enfraruj ısıtıcılar da tambur ile temas etmeyen yüzeyin ısıtılmasını sağlar. Tamburun dönme hızı karışımın vulkanizasyon özelliklerine ve kaplamanın kalınlığına bağlıdır. [2]



Şekil 4.9. Rotocure ile vulkanizasyon

4.4. Kalıplama

Kalıplamanın kompresyon, transfer ve enjeksiyon çeşitleri vardır. Her üç yöntemde de parça kalıp içinde sıcaklık ve basınç altında vulkanize olur. Vulkanizasyon süresi karışımın formülasyonuna, kalıp sıcaklıklarına bağlıdır. Kalıp sıcaklıkları 150-220°C arasında değişmektedir.

Kompresyon kalıplaması, prosesin basitliğinden ve kalıpların nispeten ucuz olmasından dolayı, büyük parçaların ve küçük serilerin kalıplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.10.a). Çiğ haldeki eboşlar (ekstrüzyondan çıkmış

yarı mamul) önceden ısıtılmış kalıp gözlerine yerleştirilir ve kalıp kapatılınca malzeme kalıp gözünün her noktasına yayılır. Birkaç saniye sonra vulkanizasyon için gerekli basınç (5-10 MPa) uygulanmadan önce, kalıp aralanır ve hapsedilen havanın kaçmasına izin vermek için birkaç kez kapatılır. Vulkanizasyon sonrası kalıp açılır, parçalar manuel veya otomatik olarak çıkarılır.

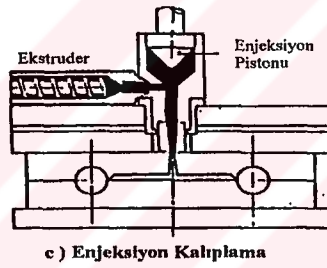
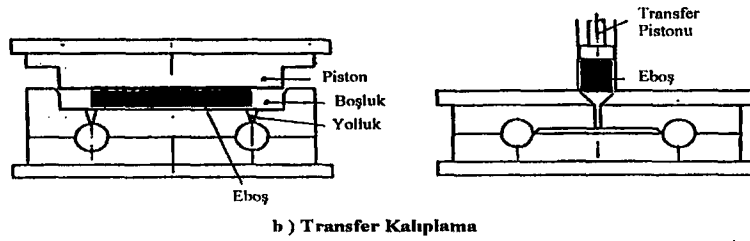
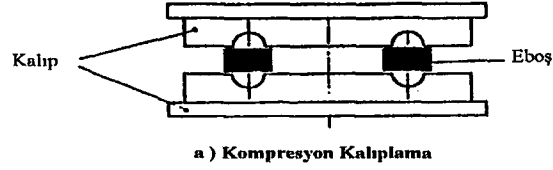
Transfer kalıplaması, küçük parçaların seri üretiminde kullanılır. Kompresyon yönteminden farklı olarak, eboşlar tüm kalıp gözleri yerine kalıp üzerindeki boşluğa konulur. Kalıp kapandıktan sonra, eboş yolluklar vasıtası ile kalıp gözlerine transfer edilir (Şekil 4.10.b). Transfer kalıplamasında kompresyon presi veya transfer presi kullanılır. Transfer presinde kalıbı kapatmak ve malzeme transferi için iki ayrı piston vardır . Transfer işlemi kalıp kapandıktan sonra gerçekleştiği için çapak oluşumu, dolayısıyla malzeme kayıpları daha azdır. [2]

Enjeksiyon kalıplamasında, sonsuz vidada yumuşayan ve ısıtılan karışım, kapalı olan kalıba sonsuz vida ile veya ayrı bir piston ile basılır (Şekil 4.10.c). Yüksek sıcaklıklarda çok kısa vulkanizasyon süresi, otomatik çalışma imkanı sağlaması ve çapak miktarını önemli oranda azaltması yönlerinde tercih edilir. Kalıp ve enjeksiyon preslerinin pahalılığı, ekonomik olması için fazla sayıda basması gerekliliği dezavantajlarıdır.

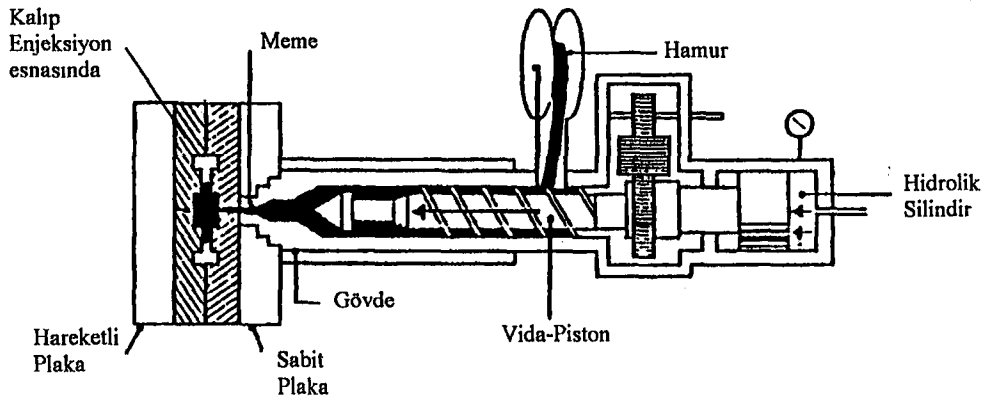
Enjeksiyon preslerinin dik ve yatay tipleri vardır. Şekil 4.11.de görüldüğü gibi yatay preslerde genelde sonsuz vida aynı zamanda piston görevini de yapmaktadır. Kalıp kapanır ve memeyle kontak haline geldiğinde vida dönmez ve bir piston gibi karışımı kalıba basar. Yatay preslerde insert ihtiva eden parçaların üretimi tahditlidir.

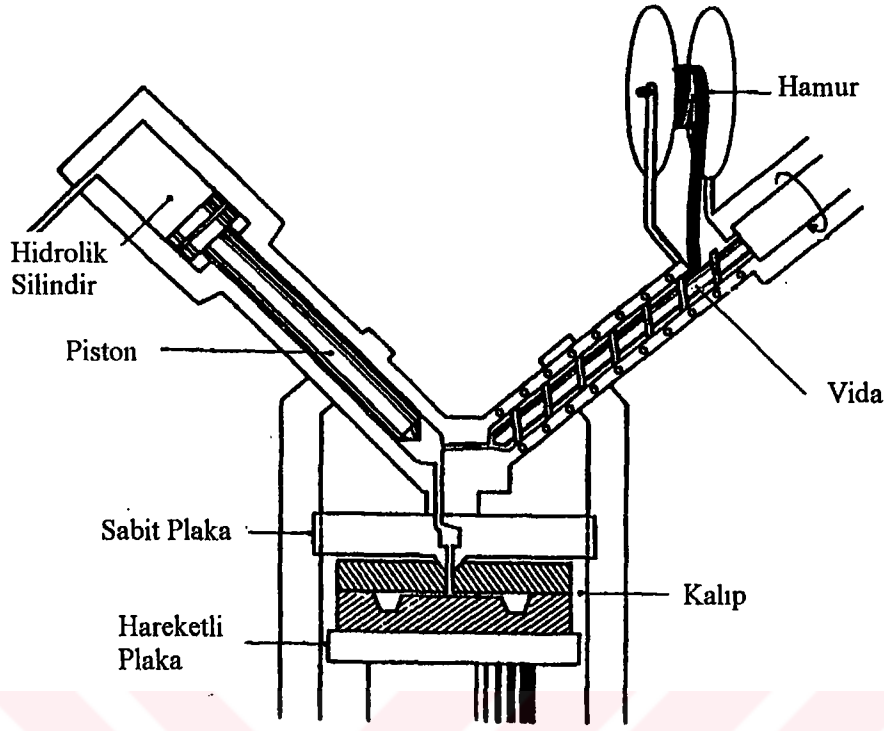
Dikey presler günümüzde en çok kullanılan preslerdir. Parça çıkarıcı grubunun pres dışında olması, çift maçalı kalıplar kullanılarak imalat hızlarını artmasını sağlaması, açısından yatay preslere üstündür. Enjeksiyon grubu vidalı, vida ve pistonlu olabilir. Şekil 4.12 'de gösterilen vida ve pistonlu preslerde, vida tarafından yumuşatılan ve ısıtılan karışım, pistonun bulunduğu 60-70°C sıcaklıktaki gövdeye doldurulur. Bu işlem vulkanizasyon süresi bitene kadar tamamlanmalıdır. Kalıp açıldığında parçalar elle veya parça itici grubu yardımı ile alınır. Kalıp kapandıktan sonra bu karışım piston ile kalıba basılır. Enjeksiyonun tamamlanmasından sonra vulkanizasyon başlar. Çevrim bu şekilde devam eder. Vidalı preslerde de aynı proses geçerlidir.

Ayrıca vidalı preslerde malzeme akışı FIFO (first in first out) prensibine uygun olmaktadır.



Şekil 4.10. Kalıplama yöntemleri





Şekil 4.12. Dikey Enjeksiyon Presi

4.4.1. İnsertlerin Hazırlanması

Motor takozu, hortumlar gibi kauçuk parçaların bir çoğunda belli bir rijitlik vermek ve bu parçaların bir gövdeye bağlanmalarını sağlamak için insert bulunur. En çok çelik, alüminyum ve plastik insertler kullanılır. İnsertler vulkanizasyon esnasında kauçuğa iyi yapışması için, önceden bir yapışma (adherizasyon) işlemine tabi tutulur. İyi bir yapışma sağlayabilmek için insertin iyi bir şekilde hazırlanması gerekir. Hazırlama yöntemleri mekanik ve kimyasal olarak ikiye ayrılır. Daha yaygın olarak kullanılan mekanik yöntemde, yüzeyi yağdan arındırılmış inserte kumlama işlemi uygulanır. Kumlama için önerilen süreler çelik alaşımlı insertler için 4 dk, alüminyum insertler için 2 dk, plastik insertler için 1 dk'dır. Kumlama işlemi sonrası, inserte daldırma, fırçayla veya ruloyla uygulama, dökme veya püskürtme yöntemi ile yapıştırma işlemi uygulanır. Büyük serilerde hava tabancası ile püskürtme yapan yapıştırma makineleri kullanılır. Yapıştırmanın etkinliğini arttırmak için insertler ön ısıtma tüneline geçirilir. Yapıştırma işlemi özel aparatına konulan inserte sırayla birinci kat yapıştırıcının uygulanması, 70°C sıcaklıktaki tünelden geçirilmesi, ikinci kat yapıştırıcının uygulanması ve tekrar 70°C

sıcaklıktaki tünelden geçirilmesi operasyonlarından oluşur. Yapıştırıcılar yanıcı ve patlayıcı özellikte olduğu için makine başında ek emniyet tedbirleri almak gereklidir.

4.4.2. Bitirme Operasyonları

Enjeksiyon sonrası kauçuk parça üzerinde çapakların alınması, insert montajı ve kaplanması gibi bitirme operasyonlarından geçer. Parçadan artan ve dışarı çıkan kauçuk çapağına sahip kauçuk parçasının hatalı bir görünümü vardır ve bunların yok edilmesi gerekir. Çapaklar taşlama yolu ile veya yırtarak koparma ile, kesme ile, parçanın dondurulması ile ortadan kaldırılması gerekir. Yırtarak koparma işleminde, çapak toplama bölgesi parçaya yakın bir yerde yapılır ve çapağın ana kısmı bu noktadan yırtılarak kopartılır. Dondurma ile çapak alma işlemi kriyojeni adı verilen makinelerde yapılır. Çapakları alınacak parçalar bir tambur içine yerleştirilir. Tambur dönmeye başladığında parça yüzeyine karbon veya azot gazı püskürtülerek, parçanın donması sağlanır. Donmayla, ince çapaklar kırılmaya başlar. Tamburdan çıkan parçalar elek sisteminden geçirilerek çapaklarından temizlenir. Dondurucu gaz ile birlikte cam bilye kullanılması çapakların kırılmasını kolaylaştırır. Bu işlem elle temizlenmesi zor küçük parçaların büyük serilerinde kullanılmaktadır, fakat parçanın geometrisi çok önemlidir. Zira çapakla birlikte parçada da kırılmalar olabilir.

Kauçuk parçadaki metal insertlerin ortam şartlarına dayanımını arttırmak için enjeksiyon sonrası, fosfat, çinko kaplama işlemleri uygulanabilir. Burada önemli olan, kaplama prosesinin kauçuğun özelliklerine zarar vermemesidir.

5. STATİK VE DİNAMİK ÖZELLİKLER

5.1. Statik Özellikler

5.1.1. Sertlik

Kauçuk endüstrisinde en çok kullanılan özelliklerden biri olan sertlik, rijit bir bilyenin belli bir kuvvetle kauçuk yüzeyine batırılması ile oluşan derinliğin ölçülmesidir. Sertlik birimleri, Shore ve IRHD (DIDC), (International Rubber Hardness Degree) dir. Shore sertliği 3 farklı harfle ifade edilir. Shore A, nispeten yumuşak kauçuk parçalarda, Shore C ve D, çok sert kauçuk parçalarda ve plastiklerde kullanılır. Sertliği ölçülen numune en az 6 mm kalınlığında, 30 mm çapında olmalıdır. Ölçüm, ucun belli bir süre (15 s, 30s...) batmasından sonra yapılır.

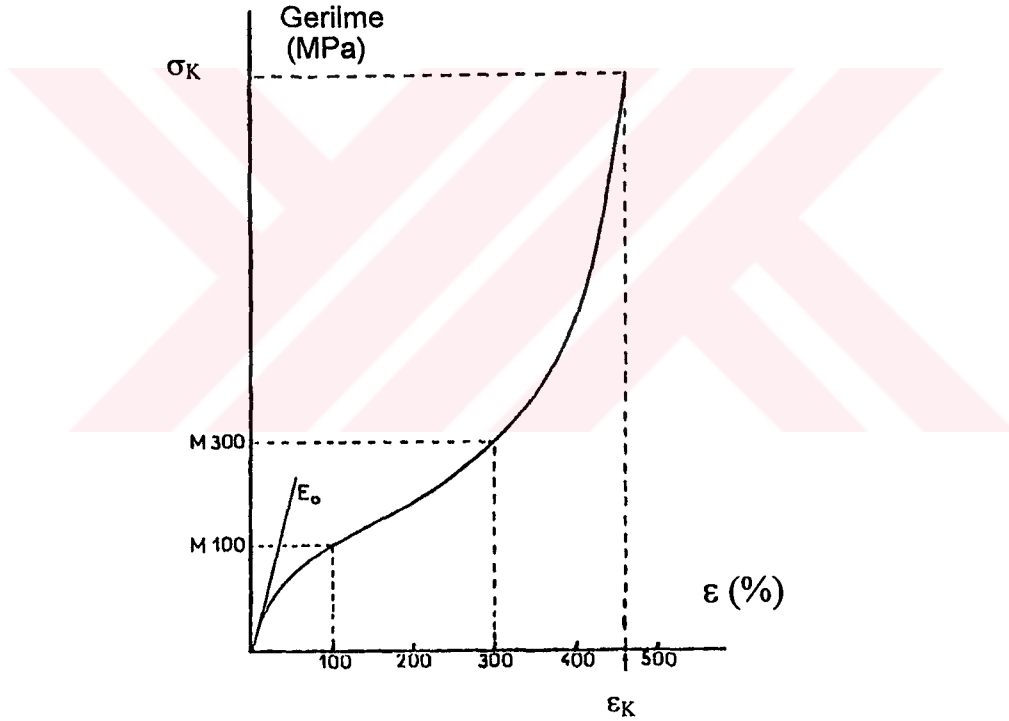
Sertlik, Shore durometresi veya Shoremetre adı verilen aletlerle ölçülür. Bu aletlerle yapılan ölçümler, gerek aletin mekanik sınırlarından dolayı, gerekse operatör hatalarından dolayı güvenilir değildir. Bu yüzden, sertlik değerleri ± 5 'den fazla bir hassaslıkla gösterilmemelidir. [2,3,5]

Yüzeyin batırılmaya direnci olan sertlik, pratikte parçanın davranışı ile ilgili fazla bilgi vermez. Sertlik, rijitlik (stifness) olarak değerlendirilmemelidir. Aslında sertlik ve rijitlik kuvvet-şekil değiştirme bağlantısının bir fonksiyonudur. Sertlik değeri yüzeydeki küçük şekil değiştirmelerden oluşmaktadır, malzemenin Young modülü arasında rölatif bir bağlantı vardır ve şekil faktöründen bağımsızdır. Rijitlik ise, tüm parçanın maruz kaldığı şekil değiştirmelerden meydana gelmektedir. [5]

5.1.2. Gerilme Uzama

Kauçuk, bir yük uygulandığında hacim değişmesinden daha çok, şekli değişen sıkıştırılmaz bir maddedir. Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi metallere farklı olarak, Gerilme-uzama eğrisi Hooke Kanunu'na uymamaktadır. Yaklaşık %15 oranındaki uzamalar için lineer olan kısımdan Young modülünü hesaplamak mümkündür. Fakat pratikte kauçuk parçalar çok daha büyük şekil değiştirme oranına maruz kaldığından, Young modülü karakteristik bir büyüklük olarak kullanılmaz. [2,5]

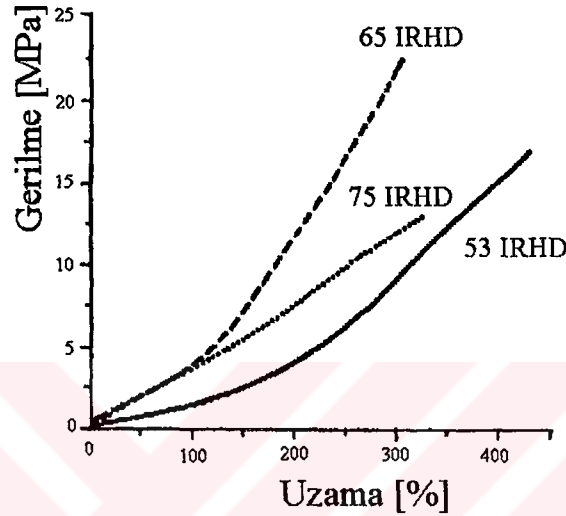
Gerilme uzama deneyleri extensiometre adı verilen test makinelerinde, halter şeklindeki numunelerle yapılır. Şekil 5.1.'deki gerilme uzama eğrisi üzerinde, kopma dayanımı, kopma uzaması ve Modül 100, Modül 300 değerleri gösterilmiştir. Modül 300, %300 şekil değiştirme oranındaki gerilme değerini verir.



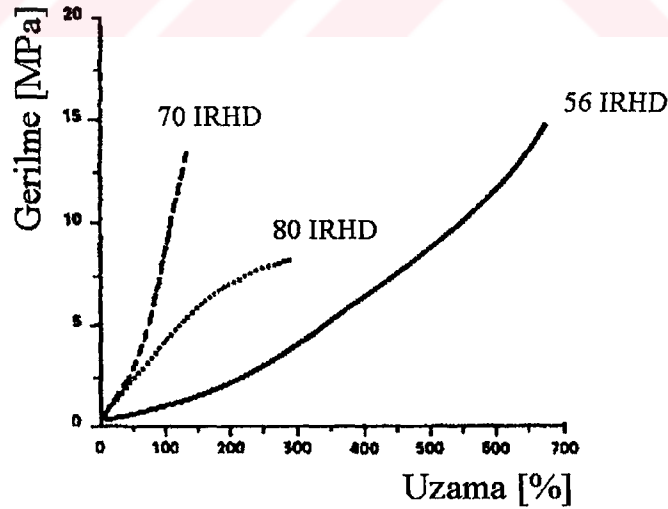
Şekil 5.1. Gerilme Uzama Eğrisi

Gerilme uzama testleri, başta vulkanizasyon hızı ve durumunda etkili olan bileşenler olmak üzere, bileşenlerin hamur üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla uygulanmaktadır. Şekil 5.2.a.'da Neoprene (EPDM) kauçuğun, 5.2.b.'de Nordel (EPDM) kauçuğun sertliğinin gerilme uzama özelliklerine etkisi gösterilmiştir. Gerilme uzama testleri imalat şartlarındaki değişikliklere duyarlıdır ve vulkanizasyon hatalarını, kötü dağılımı ve karışımındaki yabancı maddeleri ortaya çıkarabilir. Yine aynı şekilde gerilme uzama testleri, sıcaklık, yağ ve kimyasal ürünlerin etkisini tespit

etmek amacıyla uygulanmaktadır. Az oranda bir bozulma bile, gerilme uzama özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Burada değişimin değeri daha önemlidir. Örneğin, bir numunenin kopma dayanımı yağ ile belli bir süre temastan sonra, 24 MPa'dan 14 MPa'a düşerken, ikinci bir numunenin dayanımı aynı şartlarda 12 MPa'dan 11 MPa'a düşsün. Doğal olarak ikinci numunenin karışımından yapılan parçalar pratikte yağla temas ettiklerinde daha iyi sonuç verecektir. [5]



Şekil 5.2.a. Neoprene(CR) kauçuğun gerilme uzama eğrisinin sertlikle değişimi [5]



IRHD : Uluslararası Kauçuk Sertlik Derecesi

Şekil 5.2.b. Nordel (EPDM) kauçuğun gerilme uzama eğrisinin sertlikle değişimi [5]

$$\%Deformasyon = \frac{t_i - t_r}{t_i - t_s} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 5.2.})$$

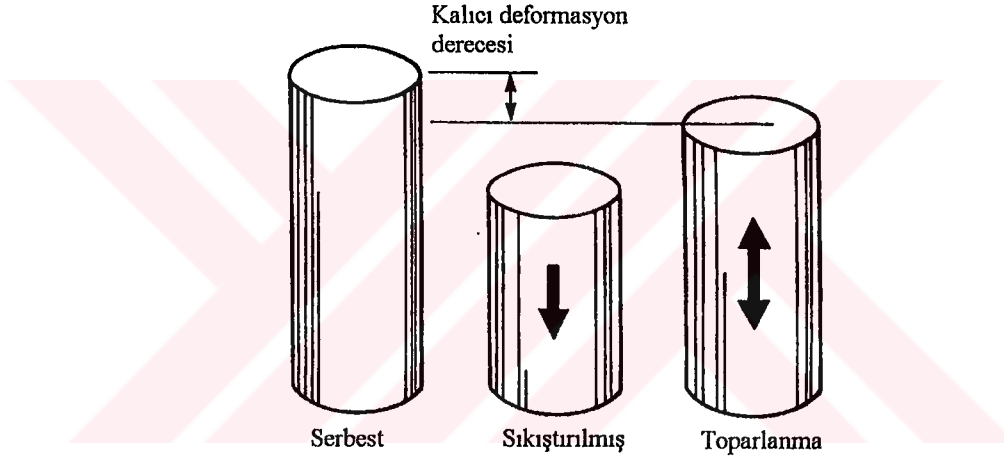
Burada;

t_i : numunenin ilk kalınlığı

t_r : toparlanma sonrası kalınlık

t_s : takoz kalınlığı

Kalıcı deformasyon testleri imalat kontrolü için faydalı olabilir, çünkü vulkanizasyon derecesi hakkında bilgi verir. Şekil 3.2.'de çapraz bağ yoğunluğunun kalıcı deformasyona etkisi gösterilmişti. Kalıcı deformasyon ölçeğinin üzerinde ise, karışımın uygun olmadığını gösterir.



Şekil 5.4. Baskı Altında Kalıcı Deformasyon

5.1.4. Sünme, Gerilme Gevşemesi

Kauçuğa sabit bir gerilme uygulandığında, şekil değiştirme zamanla artar. Bu davranış, sünme olarak isimlendirilir. Diğer taraftan, kauçuk sabit bir şekil değiştirmeye maruz kaldığında, gerilme zamanla azalır. Bu davranış da gerilme gevşemesi (relaxation) olarak adlandırılır. Sünme aşağıdaki formül ile belirlenir : [5]

$$Sünme(\%) = \frac{D_t - D_1}{D_1} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 5.3.})$$

Burada;

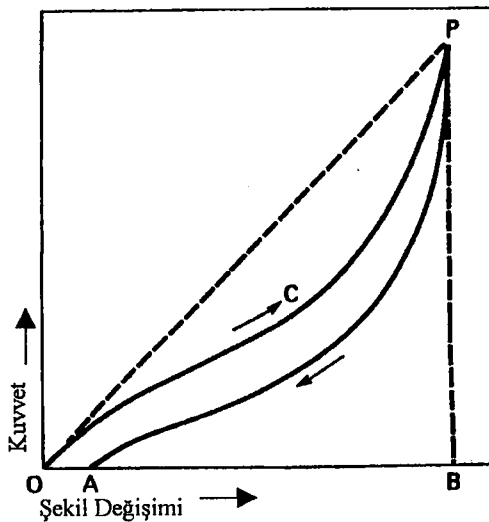
D_1 : 1 da sonundaki şekil değiştirme miktarı (mm)

D_t : t da sonundaki şekil değıştirme miktarı (mm)

Kalıcı deformasyon, sünme ve gerilme gevşemesi kauçukta fiziksel ve kimyasal değışiklikler sonucunda oluşmaktadır. Fiziksel değışiklikler kauçuğun viskoelastik yapısından kaynaklanır. Kimyasal değışiklikler; yaşılanma, oksidasyon v.b. gibi prosesler sonucunda molekül yapısındaki değışikliklerden kaynaklanır. Genel olarak, fiziksel etkiler normal veya düşük sıcaklıklarda ve/veya kısa sürelerde daha yoğunken, kimyasal etkiler de yüksek sıcaklıklarda ve/veya uzun sürelerde etkindir. Sünme, elastomerin tipine ve bileşimine bağılıdır. Ayrıca ilk şekil değışimi ne kadar fazla ise, sünmede o kadar fazla olur. Sünme sıcaklıkla, oksidasyonla ve nemli ortamlarda artar. Sünme deformasyon tipine bağılıdır. Sünme hızı çekmede, kesmeye göre daha fazla iken, kesme de basmaya göre daha fazladır. Aynı şekilde dinamik yüklerde statik yüklere göre sünme daha fazladır. Karışımında dolgu miktarının artması, sünmeyi de artırır. [3,5]

5.1.5. Histerisis

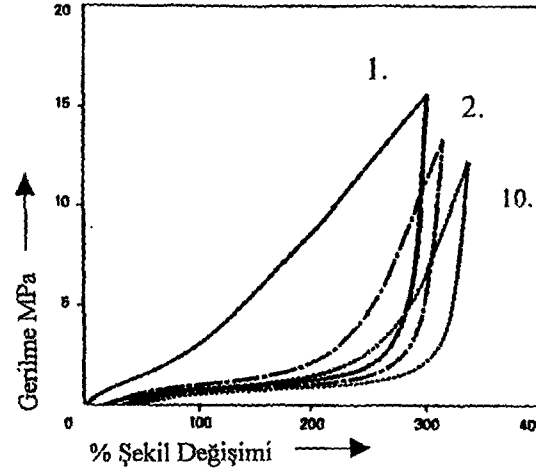
Kauçuk viskoelastik bir malzeme olduğundan, dinamik yük altında, hem elastik, hem de viskoz elemanlar önemlidir. İdeal elastik malzemelerde şekil değışimi için uygulanan kuvvet kalktığında enerji kaybı olmamaktadır. Fakat viskoz eleman, moleküler sürtünmeden dolayı şekil değışimini geciktirir ve enerji kaybı olur. Bu kayıp enerji ısı şeklinde yayılır ve kauçuğun sıcaklığı artar (heat build-up). Bu kayıp enerjinin çevrime oranı histerisis adını alır. Benzer şekilde elastisite de şekil değıştirme sonrası geri dönen enerjinin verilen enerjiye oranıdır. [2,3,5]



OCPB = Verilen Enerji
APB = Geri Döner Enerji
Histerisis = Kayıp Enerji
≈ OCPB – APB
Elastisite ≈ APB

Şekil 5.5. Histerisis

Tek bir çevrimlik yük uygulandığında elde edilen yük şekil değiştirme eğrisi şekil 5.5.'te gösterilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça, histerisisin azaldığı görülmektedir. Bu özellik, kauçuk parça üzerinde ölçüm yapılırken dikkate alınmalıdır. Şekil 5.6.'da 1., 2., 10. çevrimden sonra çizilmiş histerisis eğrileri görülmektedir.



Şekil 5.6. Çevrim Sayısının Histerisize Etkisi

5.2. Dinamik Özellikler

5.2.1. Viskoelastik Davranış

Viskoelastik davranış, ne ideal katı, ne de ideal sıvı olan, ancak her ikisinin de karakterine sahip malzemelerde görülür. Klasik elastisite teorisi, ideal katı malzemelerin davranışını Hooke Kanunu ile açıklar. Hooke Kanunu'na göre, aşağıda belirtilen eşitlikte görüldüğü gibi, gerilme şekil değiştirme ile, şekil değiştirme hızından bağımsız olarak orantılıdır. Şekil 5.7.b'de İdeal katının zamana bağlı şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (\text{Eşitlik 5.4.})$$

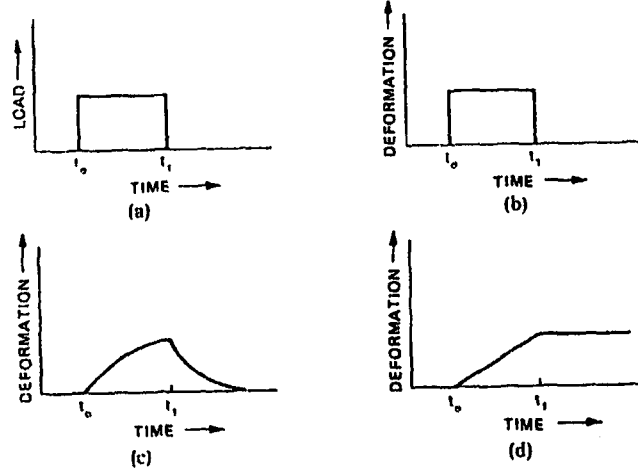
Burada;

σ : Gerilme (MPa)

E : Elastisite Modülü (MPa)

ε : Şekil Değiştirme oranı(= $\Delta L/L$) (%)

Diğer taraftan ideal viskoz akışkanların mekanik özellikleri Newton Kanunu ile açıklanır. Eşitlik 5.5.'de görüldüğü gibi, Newton Kanunu'na göre, gerilmeler şekil değiştirme hızıyla şekil değiştirmenin kendisinden bağımsız olarak orantılıdır. Şekil 5.7.d'de ideal viskoz akışkanın zamana bağlı şekil değiştirme eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Çeşitli Malzemelerin Şekil Değiştirme- Zaman Eğrileri

a. Yük- Zaman Eğrisi b. İdeal katı malzeme c. İdeal kauçuk d. İdeal akışkan

$$\tau = \mu \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{Eşitlik 5.5.})$$

Burada ;

τ : Kesme gerilmesi (MPa)

μ : Dinamik viskozite (Pa.s)

$d\varepsilon/dt$: Şekil değiştirme hızı (1/s)

İki önemli sapma vardır : Birincisi, şekil değiştirme veya şekil değiştirme hızı doğrudan gerilme ile orantılı olmayabilir, ancak daha komplike bir anlamda gerilmeye bağlı olabilir. Bu duruma katılarda elastiklik sınırının aşılmasında tanık olunabilir. İkinci olarak gerilme hem şekil değiştirmeye, hem de şekil değiştirme hızına ve hatta şekil değiştirmenin yüksek mertebeden türevlerine bağlı olabilir. Birinci durumda, gerilme şekil değiştirme oranı gerilmenin mertebesine bağlıdır. İkinci durumda ise, bu oran zamana bağlıdır ki, bu lineer viskoelastik davranış olarak adlandırılır. Lineer viskoelastik bir malzemenin mekanik davranışı, Hooke

Kanunu'na uyan yay elemanları ve Newton Kanunu'na uyan sönüm elemanlarını içeren mekanik modellerle temsil edilir. [1,3,5]

Gerilme ve şekil değişimi arasındaki bağıntı lineer viskoelastik bir malzeme için şu şekilde yazılabilir (Genelleştirilmiş Hooke Kanunu):

$$\sigma \left[a_0 + a_1 \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + a_2 \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) + \dots + a_n \left(\frac{\partial^n}{\partial t^n} \right) \right] = \varepsilon \left[b_0 + b_1 \left(\frac{\partial}{\partial t} \right) + b_2 \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) + \dots + b_n \left(\frac{\partial^n}{\partial t^n} \right) \right] \quad (\text{Eşitlik 5.6.})$$

Burada a_i, b_i sabitler ($i=1,2,\dots,n$) ve t zamandır.

Eğer gerilme ve şekil değişimi zamanla sinüzoidal olarak değişirse, $\sigma = \sigma_0 e^{i\omega t}$ ve $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$ yazılabilir. Bu durumda 5.6 eşitliği 5.7 haline gelir.

$$\sigma [a_0 + (i\omega)a_1 + (i\omega)^2 a_2 + \dots] = \varepsilon [b_0 + (i\omega)b_1 + (i\omega)^2 b_2 + \dots] \quad (\text{Eşitlik 5.7.})$$

Buradan sonuçta

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = K' + iK'' = K^* \quad (\text{Eşitlik 5.8.})$$

şeklinde bir ifade elde edilir.

Burada K^* kompleks modül olarak adlandırılır. Kompleks modülün reel bileşeni (K') şekil değişimi ile aynı fazda, imajiner bileşeni (K'') ise buna dik doğrultudadır. K^* , şekil değiştirme frekansına bağlıdır.

Basma veya kesme çekme gerilmesi durumunda 5.8 eşitliği ,

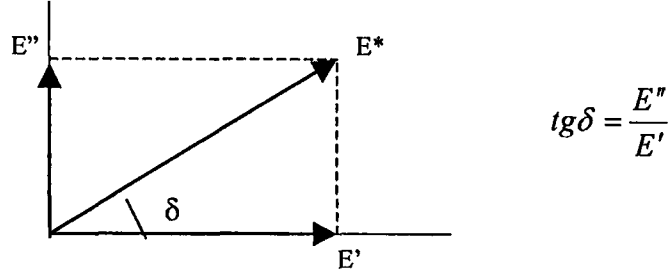
$$E^* = E' + iE'' \quad \text{Kompleks Elastiklik Modülü} \quad (\text{Eşitlik 5.9.a})$$

$$G^* = G' + iG'' \quad \text{Kompleks Kesme Modülü} \quad (\text{Eşitlik 5.9.b})$$

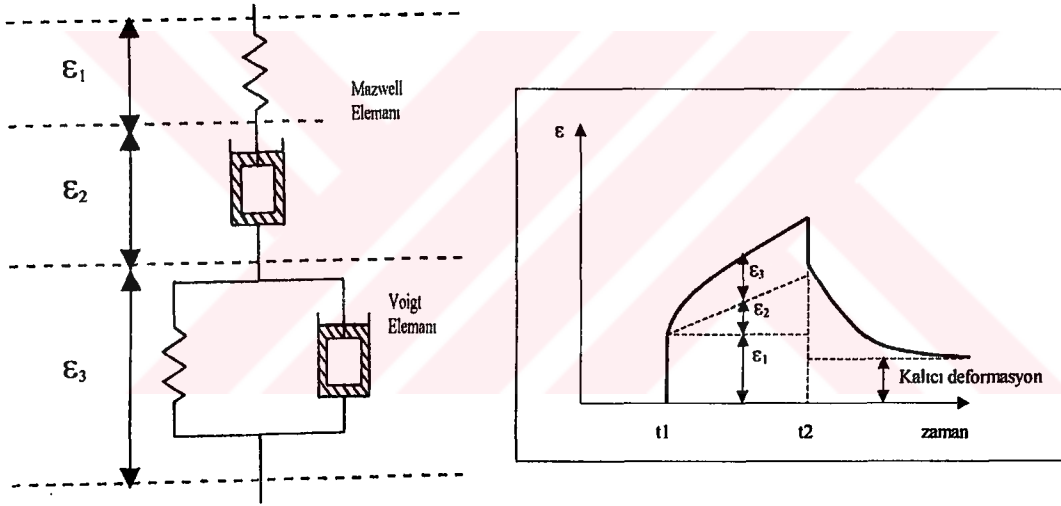
olur.

E' ve G' sırasıyla elastiklik ve kesme modülü, E'' ve G'' ise kayıp modülleri veya viskoz modül olarak adlandırılır. Viskoz modülün elastik modüle oranı kayıp faktörü olarak isimlendirilir ve $\tan \delta$ ile gösterilir. Şekil 5.8.'de karakteristik büyüklükler şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 5.9.'da Maxwell ve Voigt cisimlerinden oluşmuş bir model ve şekil 5.10.'da da bu modelin şekil değiştirme zaman eğrisi gösterilmektedir. Maxwell cismi, sıvı karakterli olup, gerilme etkisinde viskoz akış oluşur. Voigt cismi ise, katı karakterlidir ve gecikmiş elastik davranışı açık bir şekilde tanımlamaya yardım eder. [3]



Şekil 5.8. Kompleks Elastiklik Modülü



Şekil 5.9. Maxwell Voigt Elemanı

Şekil 5.10. Şekil Değiştirme Eğrisi

Elastomere bir gerilme uygulandığında; toplam şekil değişimi üç bileşenden oluşur; Basit elastik tesir (ϵ_1),

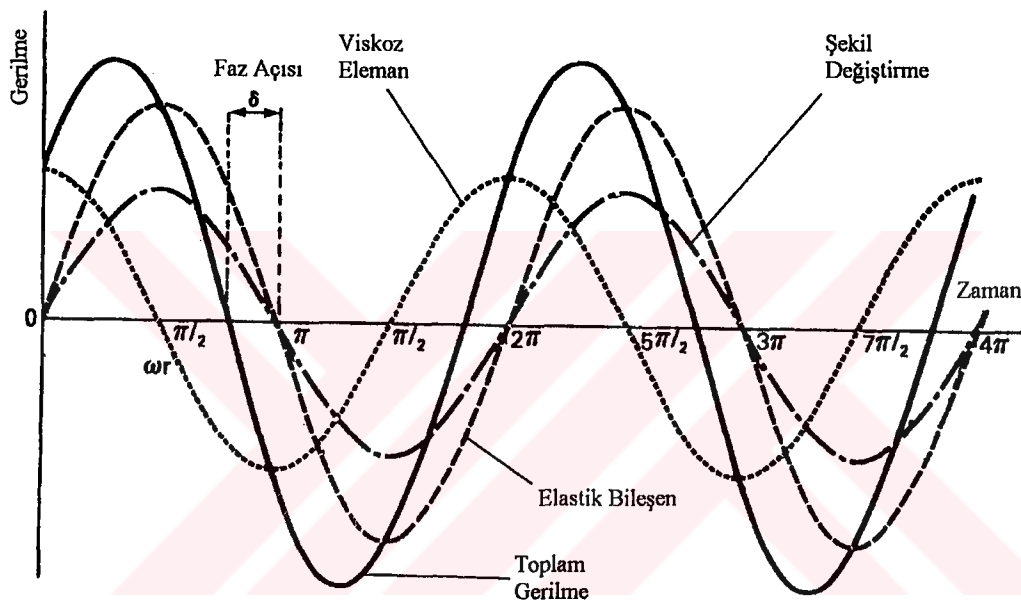
Molekül zincirlerinin uçları arasındaki mesafenin değişmesinden dolayı yüksek elastik şekil değişikliği (ϵ_3),

Zincirlerin kayması sonucu, kalıcı (viskoz) şekil değişimi (ϵ_2).

$$\epsilon_{\text{toplam}} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (\text{Eşitlik 5.10})$$

5.2.2. Dinamik Özelliklerin Ölçümü

Elastomerin dinamik özellikleri, elastomer numunenin sinüzoidal şekil değişimine verdiği cevabın ölçülmesi ile belirlenir. Şekil 5.11’de sinüzoidal şekil değişiminin gerilme cevabının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil değişimi, elastomerin elastik bileşeni ile aynı fazdayken, viskoz bileşen ile aralarında 90° faz farkı vardır. Histerisis kayıplarından dolayı, şekil değişimi, gerilmeler toplamının belli bir farkla ardından ilerler. Aradaki bu fark, kayıp açısı ve faz açısı δ olarak adlandırılır. Malzeme ne kadar viskoz olursa, kayıp açısı o kadar büyük olur. [2,3,5]



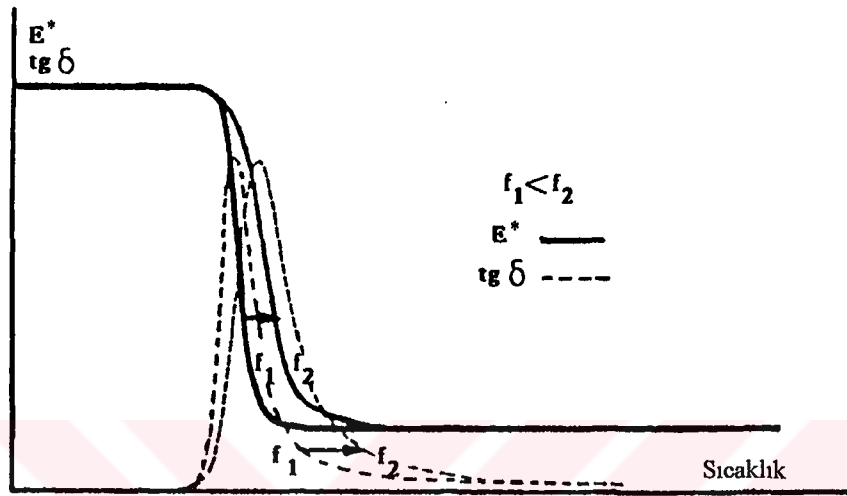
Şekil 5.11. Sinüzoidal Şekil Değişiminin Gerilme Cevabının Zamana Göre Değişimi

Dinamik testlerin sonuçları, numunenin şartlarına, gerilmenin şekline, şekil değiştirme moduna (örneğin sinüzoidal olması) ve genliğine, frekansa ve sıcaklığa bağlıdır. Dinamik testlerin kesme kuvveti uygulanarak yapılması istenir. Zira kesmede kuvvet şekil değiştirme, yüksek şekil değiştirme oranına kadar lineerdir.

Şekil 5.12.’de kompleks elastiklik modülünün E^* ve faz açısının δ sıcaklık ve frekansa bağlı değişimi gösterilmiştir. Faz açısı maksimum değerine camsı geçiş sıcaklığı T_g civarında ulaşmaktadır. Frekansın artması eğriyi sağa doğru ötelemiştir.

Elastomerin elastisitesi, (resilience) numunenin üzerine dengelenmemiş terazi kolunun serbest düşüş ile bırakılması ve kolun tekrar hangi yüksekliğe kadar

yükseldiğinin ölçülmesi ile hesaplanır. Elastisite, çarpma sonrası enerjinin çarpma öncesi enerjiye oranıdır. Çarpma sonrası enerji kayıplarının az olması, elastisite değerini arttıracaktır. Elastisite (resilience), yaklaşık olarak $\tan \delta$ 'ye bağlıdır. [2,3,5]



Şekil 5.12. E^* ve $\tan \delta$ Değerlerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı Değişimi

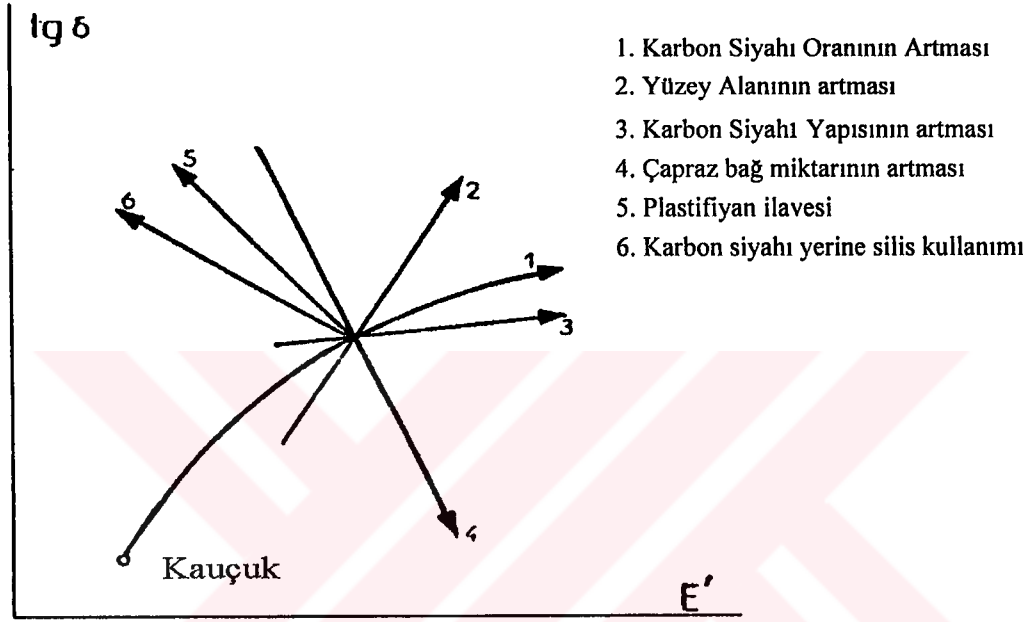
5.2.3. Karışımın Dinamik Özelliklere Etkisi

Elastomerlerin dinamik özellikleri camı geçiş sıcaklığı T_g ile belirlenir. Düşük T_g 'ye sahip elastomerlerin, amortisman ($\tan \delta$) değerleri düşük, elastisite değerleri yüksek olur. Doğal kauçuğun camı geçiş sıcaklığı -60°C olduğu için düşük $\tan \delta$ değerine sahiptir. Doğal kauçuk bu özelliğinin yanı sıra, üstün mekanik özellikleri, yük altında düşük sünme özelliğinden dolayı dinamik uygulamalarda çok kullanılmaktadır. [2,3,4]

Karbon siyahının dinamik özelliklere etkisi büyüktür. Karbon siyahı oranının artması rijitlik ve $\tan \delta$ değerlerini artırır. Benzer şekilde yapının artması ve tanecik çapının küçülmesi aynı etkilere sahiptir. Diğer bileşenlerin etkileri Bileşenler bölümünde açıklanmıştır. Bileşenlerin $\tan \delta$ ve elastisite modülüne etkisi özet olarak şekil 5.13'te verilmiştir. [2,4]

5.2.4. Geçirgenlik

Titreşimleri sönümleme özelliği, geçirgenlik (transmissibility) ile ölçülür. Geçirgenlik, geçirilen kuvvetin uygulanan kuvvete oranı olarak ifade edilebilir, yüzde veya desibel (dB) ile gösterilir. Şekil 5.14.'te değişik faz açısı değerlerinde geçirgenliğin frekansa oranına (n/n_0 ; n sistemin frekansı, n_0 doğal frekans) göre değişimi gösterilmektedir. Bu grafikten;



Şekil 5.13. Bileşenlerin Elastisite ve tg δ Özelliklerine Etkisi

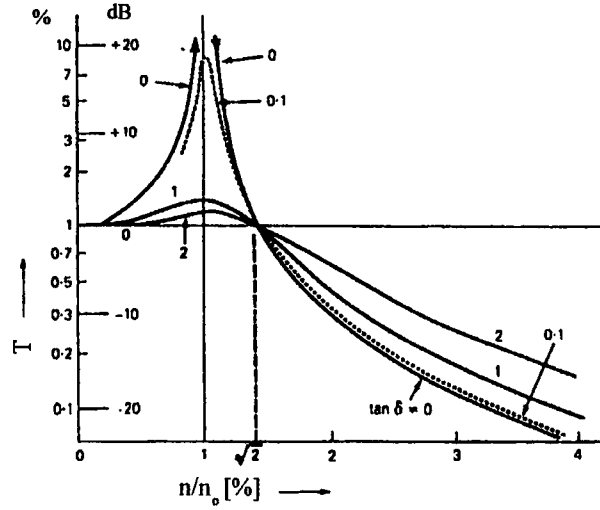
Geçirgenlik T değeri $n/n_0=1$ oranı çok düşük $\sqrt{2}$ veya olduğunda, 1'e eşit olduğu,

Sönümleme olmadığında, rezonans ($n/n_0=1$) sivri noktasında T değeri çok yüksektir, fakat tg δ arttıkça, T azalır.

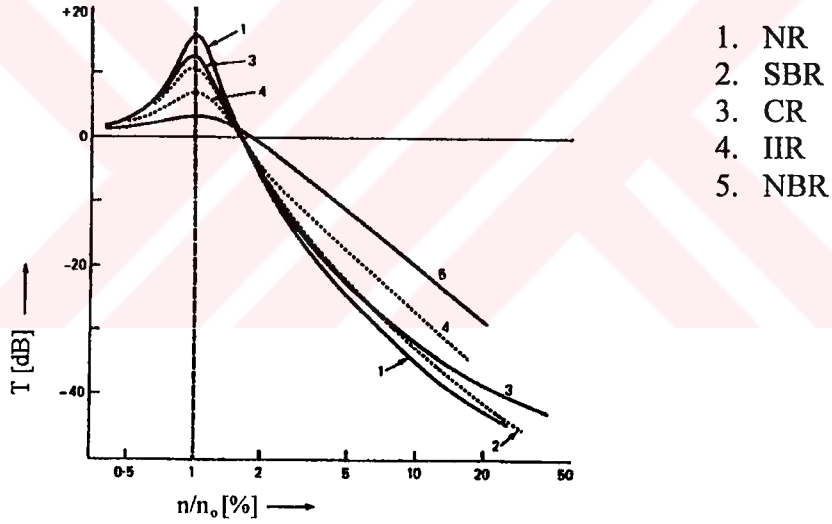
n/n_0 değeri arttıkça, T hızla düşer. $n/n_0 > \sqrt{2}$ için, tg δ azaldıkça, T değeri de azalır. [5]

Elastomer tipine göre geçirgenliğin değişimi şekil 5.15.'te gösterilmiştir. NR, EPDM, CR, ve SBR düşük camsı geçiş sıcaklığına (T_g) ve bundan dolayı düşük sönümleme özelliklerine sahiptir. Sonuç olarak, rezonans frekansında yüksek geçirgenlik özelliğine, yüksek frekanslarda düşük geçirgenlik özelliğine sahiptir.

Yüksek sönümleme özelliğine sahip IIR ve NBR'de diğer elastomerlere göre ters etkiler görülür. [4,5]



Şekil 5.14. Geçirgenliğin faz açısı ve frekansa göre değişimi



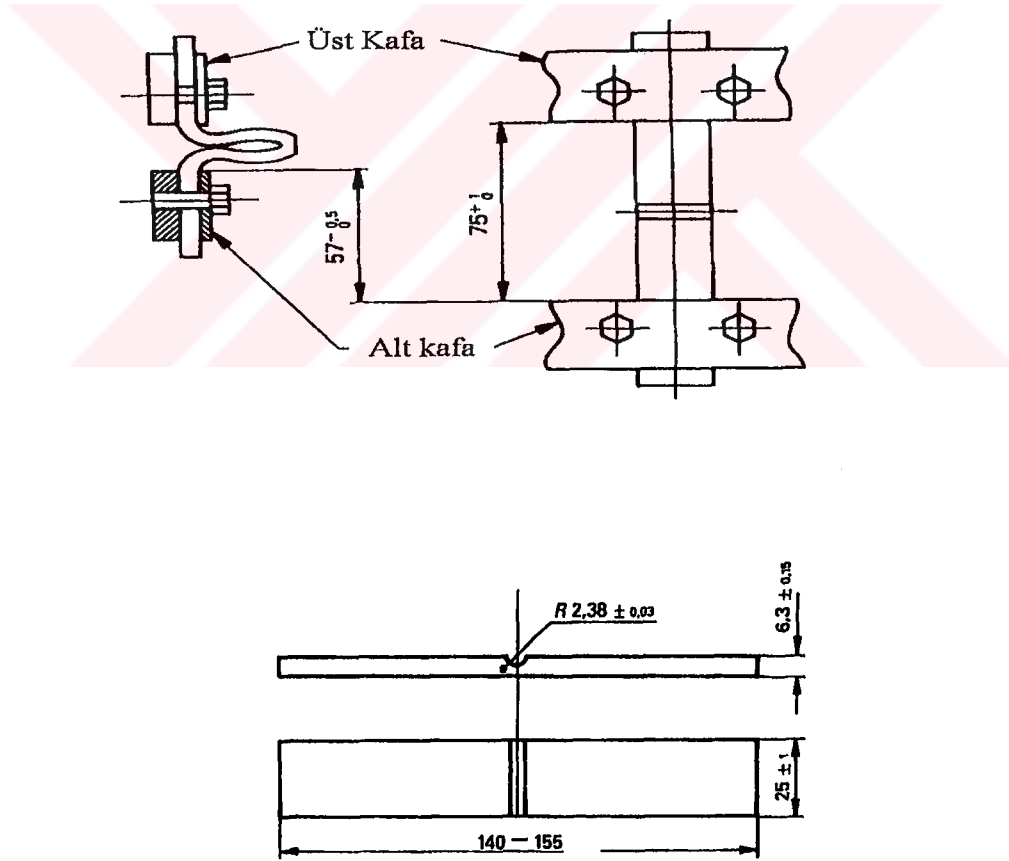
Şekil 5.15. Elastomere göre geçirgenlik özelliklerinin değişimi

5.2.5. Yorulma

Kauçuk parçaların tekrarlı gerilmeler sonucunda dayanımı azalır, kopma dayanımının çok altındaki gerilmeler kopmalar oluşturabilir, buna neden yorulma olayıdır. Dinamik uygulamalarda tekrarlı gerilmeler yüzeyde çatlaklar meydana gelmesine ve bu çatlakların hızla büyümesine neden olur. Ayrıca tekrarlanan gerilmelerde, histerisis kayıplarından dolayı, parçanın iç ısınması artar (heat build up) ve nihayetinde parçalanır. [3,5]

Yorulma çatlaması, elastomer tipine, çapraz bağlanma şekline ve miktarına, dolgu maddelerine, koruyucu bileşenlerin varlığına bağlıdır. Sıcaklık, nem, ozon ve oksijen varlığı gibi çevresel etkenlerin yanı sıra, parçanın geometrisi, şekil değiştirmenin genliği ve yapısı, çevrimin frekansı yorulma çatlamasını etkiler. Yorulma çatlaması parça üzerinde gerilme yoğunluğunun yüksek olduğu alanda başlar.

De Mattia test makinesi yorulma çatlamasının başlangıcını ve büyümesini ölçmek için yaygın olarak kullanılır. Şekil 5.16.'da görüldüğü gibi, üst kısım sabitken, eksantrik bir malle tahrik edilen alt kısım 5 Hz frekansta 57 mm'lik strokta hareket eder. En az 6 numune birlikte test edilmelidir. İlk çatlak oluşumunun meydana geldiği çevrim kaydedilir. Daha sonra belli bir çevrim sonrası çatlağın büyümesi ölçülür. [2,5]



Şekil 5.16. De Mattia Test Makinesinin Prensibi ve Kullanılan Numune

Dinamik yorulma hem çatlak oluşumundan, hem de iç ısınma sonucunda oluştuğundan, yorulma testlerinin pratikte kullanılan parçalar üzerinde yapılması daha doğru sonuçlar verir.

6. UYGULAMALAR

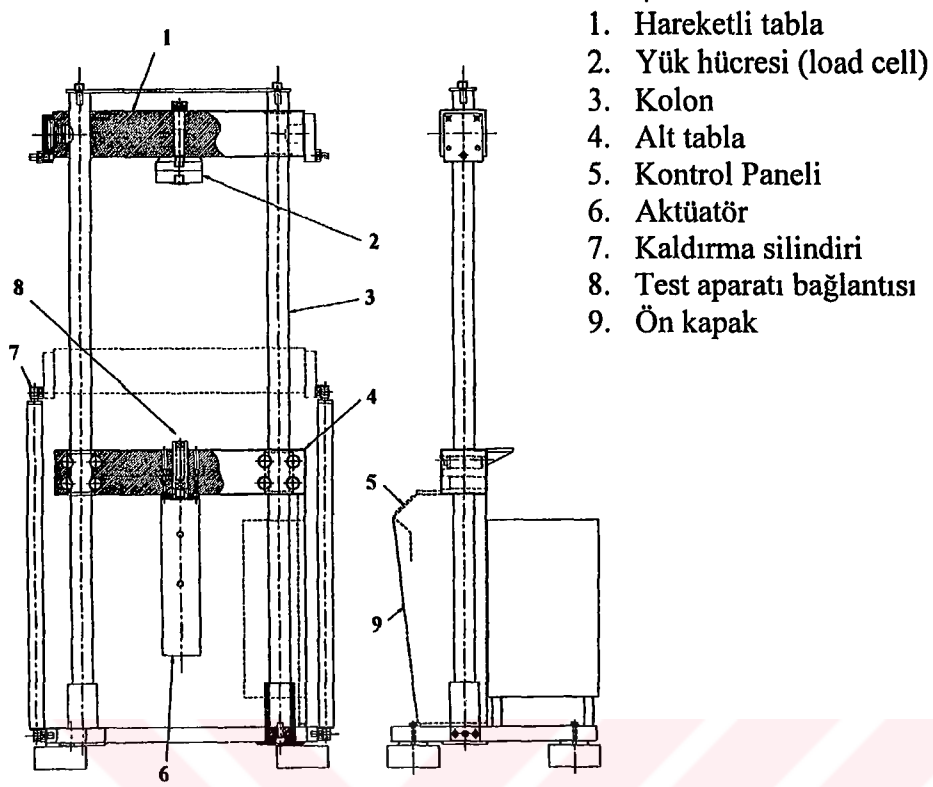
6.1. DELTALAB Statik-Dinamik Test Makinesi

DeltaLab servo-hidrolik test makineleri tamamıyla bilgisayar kontrollü olup, dinamik ve statik yüklerde manuel, yarı otomatik ve tam otomatik olarak geniş yelpazede malzemeleri test etmek için dizayn edilmiştir.

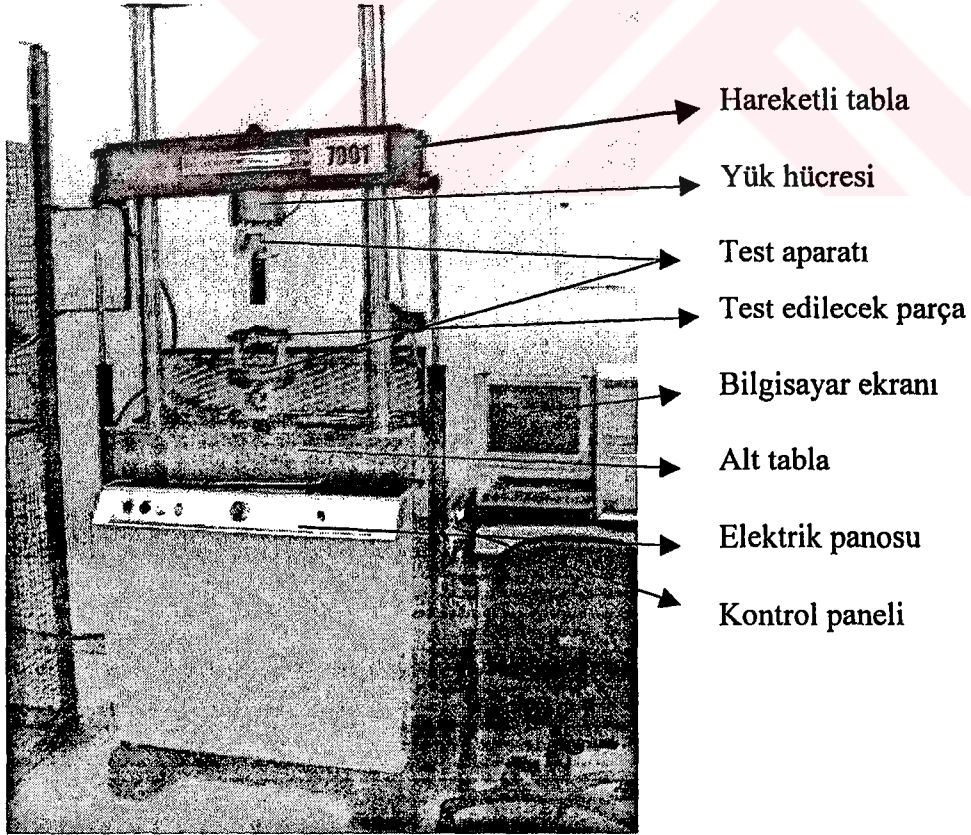
Sistem 3 ana bileşenden oluşur: Test makinesi temel olarak iki kolonlu, alt kısımda servo-hidrolik aktuatör, yer değiştirme transduseri, servo valf, selenoid izolasyon valfi, filtre ve akümülatörden oluşur. Üst kısımda bir kuvvet birimi (load cell) vardır. 24 v'luk güç üreten ve sinyal üretebilen modüllü bir elektrik panosu makinenin yanına bağlıdır. Hidrolik sistem, hidrolik pompa, bağlantı vanaları ve hortumlardan oluşur. Şekil 6.1.'de Deltalab test makinesinin kesit resmi, şekil 6.2. ve şekil 6.3.'de Deltalab test makinesinin önemli parçaları gösterilmiştir.

Hidrolik pompa ile arttırılan yağ basıncı ve akışı, hidrolik servo valf arasından geçerek çift etkili silindire (aktuatör) gelir. Aktuatör test parçasına gerekli olan yükü uygular. Yük, uygulanan yüke orantılı bir voltaj üreten bir yük hücresi (load cell) yardımı ile ölçülür. Bu voltaj sinyal ayarlayıcı ünite yardımı ile güçlendirilir. Daha sonra bilinen durum sinyali haline getirilir. Sinyal ayarlayıcının çıkışı kontrol edilen değişkenlerin ölçülen değerleridir. Bu değerler bilgisayar ekranından görülür.

Deltalab Test makinesinde maksimum 20000 N'luk kuvvet uygulanabilir. 300 Hz frekansa kadar titreşimler uygulanabilir. Test hızı 1500 mm/dk'ya kadar çıkabilir. Aktuatörün strok boyu 100 mm'dir. Statik testlerde çekme veya basma şeklinde uygulanan kuvvet sonrası, kuvvet-şekil değişimi eğrisi elde edilir. Test sonuçları 3. çevrimde elde edilir. Bilgisayar üzerinde belli bir şekil değişimi arasındaki rijitlik, histerisis sonucu oluşan enerji hesaplanabilir. Dinamik testlerde, kuvvet veya şekil değiştirme genliklerinde titreşim uygulanır. Bu titreşimler sonucu, belli frekanstaki

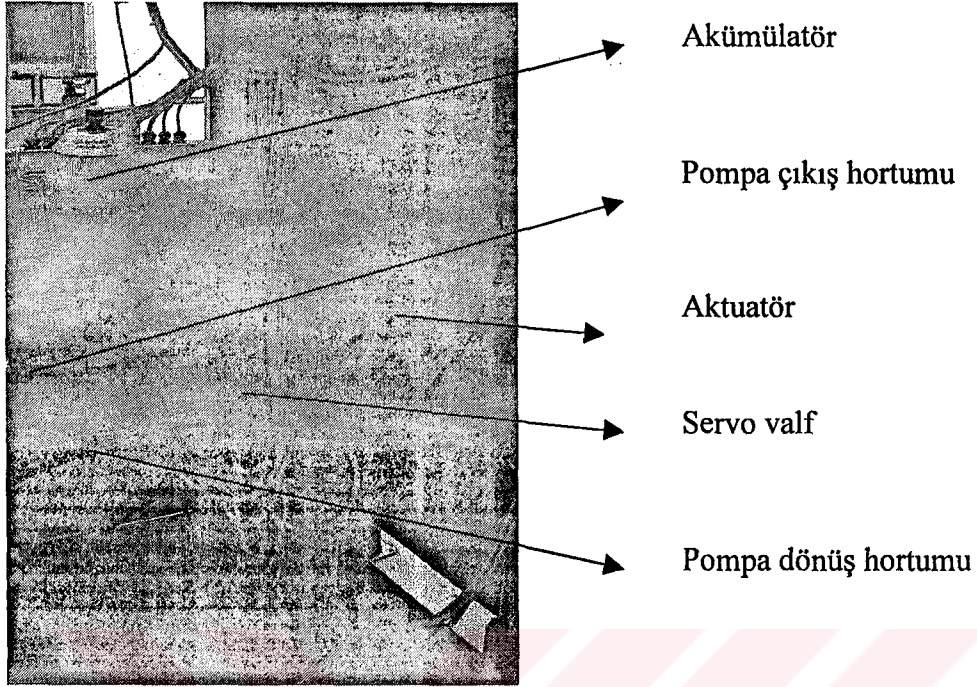


Şekil 6.1. Deltalab Test Makinesinin Kesit Resmi



Şekil 6.2. Deltalab Test Makinesi

dinamik rijitlik, faz açısı hesaplanabilir. Test programlarını yazmak için, Deltalab'ın kendi basit bir programlama dili vardır.

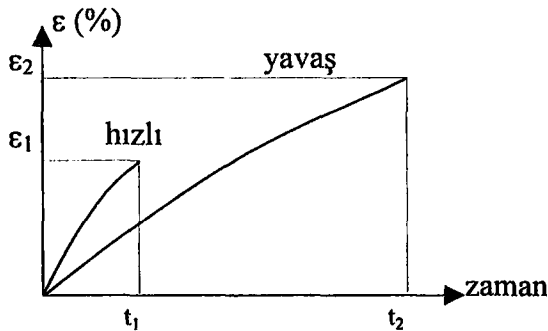


Şekil 6.3. Deltalab Test Makinesi

6.2.Uygulamalar

6.2.1. Uygulama 1

Bu uygulamada amaç, elastomer malzemelerde yükleme hızı ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi göstermektir. Teorik olarak şekil 6.4.'te gösterildiği gibi, yavaş yükleme sonunda oluşan şekil değiştirme , hızlı yüklemeden daha büyük olacaktır.



Şekil 6.4. Şekil değiştirmenin yükleme hızı ile değişimi

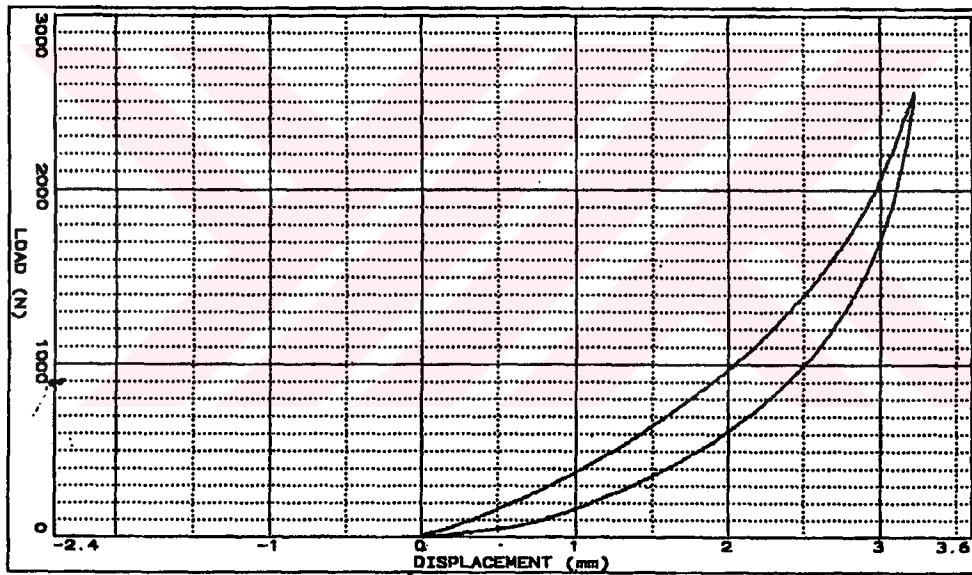
EPDM esaslı numuneler, 55 s. pişme süresinde ve 180°C kalıp sıcaklığında elde edilmiştir. Numuneler ortam sıcaklığında 3 saat soğutulduktan sonra, ortam

sıcaklığında (20°C +3) test edildi. Numuneler tablo 6.1.'de belirtilen hızlarda test edildi.

Tablo 6.1. Numunelerin test hızları

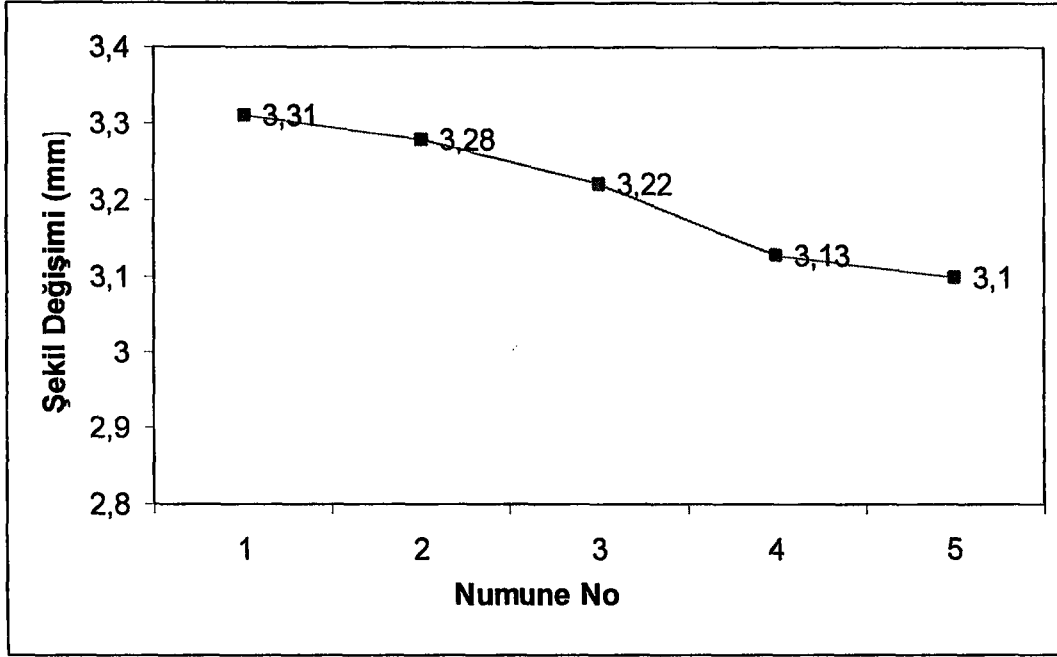
Numune No	1	2	3	4
Test hızı (mm/dk)	15	60	120	150

Bilgisayar ekranında, numune üzerindeki kuvvet sıfıra ayarlandıktan sonra test başlatıldı. İlk iki çevrimde, numune üzerine 2500 N'a kadar basma kuvveti uygulandı ve kuvvet kaldırıldı. Üçüncü çevrimde bilgisayar hesaplanması istenen 2500 N'daki şekil değişimini ve statik rijitlik (stiffness) değerlerini hesapladı. Test sonucunda şekil 6.5.'te gösterilen eğri elde edilmiştir.

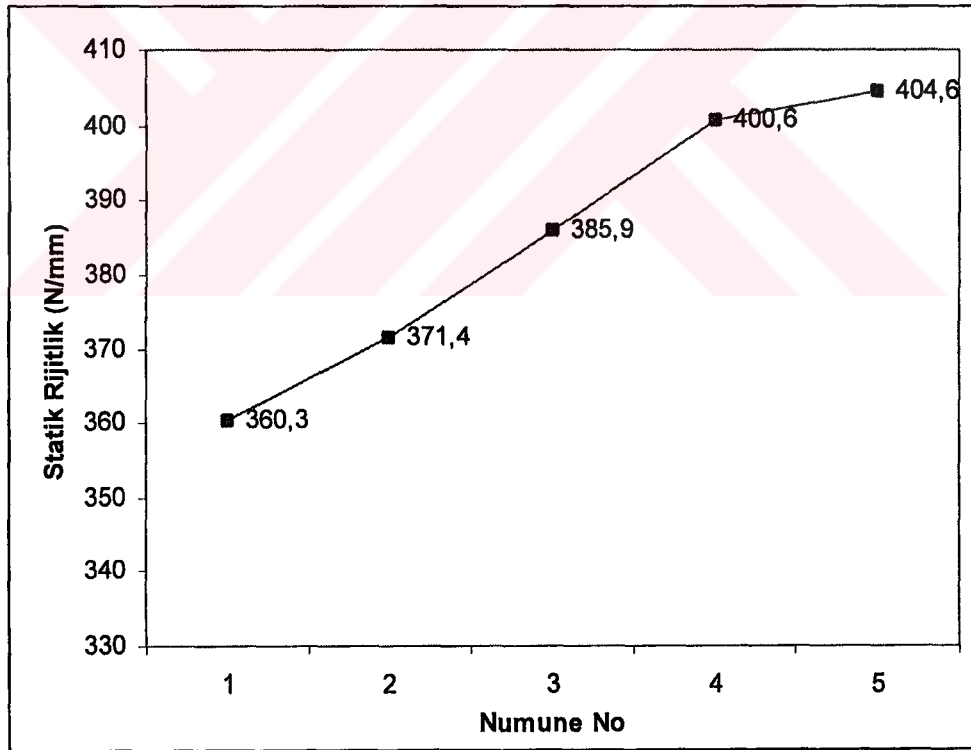


Şekil 6.5. Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet-şekil değiştirme eğrisi

Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi artan şekil test hızı ile şekil değişimi miktarı azalmaktadır. Yine bu testlerin sonucunda, statik rijitlik değeri artan test hızlarında arttığı görüldü (şekil 6.7). Rijitlik değeri 0,2 mm ile 0,9 mm şekil değiştirme miktarı arasındaki kuvvet farkının, şekil değiştirme farkına bölünmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 6.6. Test Hızına Göre 2500 N'daki Şekil Değişimi Miktarının Değişimi



Şekil 6.7. Farklı Test Hızlarında Statik Rijitliğin Değişimi

6.2.2. Uygulama 2

Bu uygulama, vulkanizasyon parametrelerinin parçanın mekanik özelliklerine etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak artan vulkanizasyon derecesi ile statik rijitlik değeri de artacaktır. Enjeksiyon prosesinde vulkanizasyon derecesini etkileyen parametreler vulkanizasyon süresi ve kalıp sıcaklıklarıdır.

NR esaslı numuneler farklı pişme süresi ve kalıp sıcaklıklarında elde edilmiştir (Tablo 6.2.). Tüm numuneler aynı test hızında (30 mm/dk) test edilmiştir. 2 nolu numune hariç, diğer tüm numuneler kalıp üzerinde aynı kalıp gözünden alınmıştır.

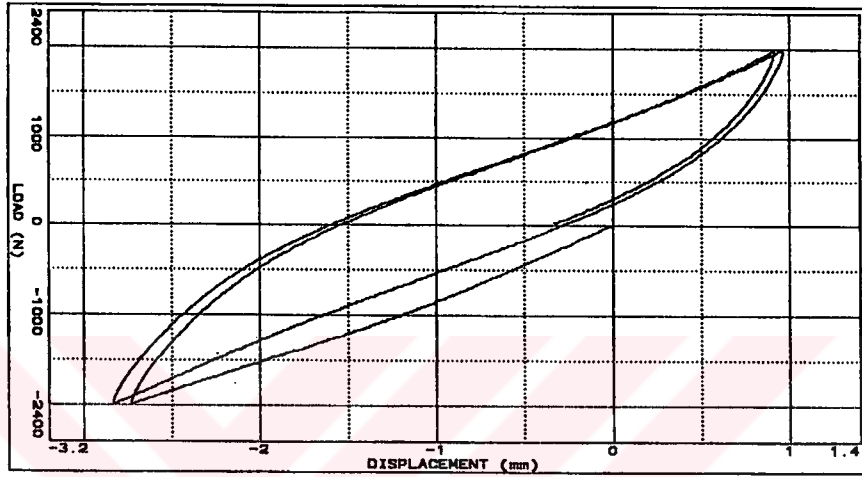
Tablo 6.2. Numunelerin proses parametreleri

Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8
Vulkanizasyon Süresi (s)	80	80	85	95	70	90	110	110
Kalıp Sıcaklığı (°C)	185	185	185	185	190	190	190	195

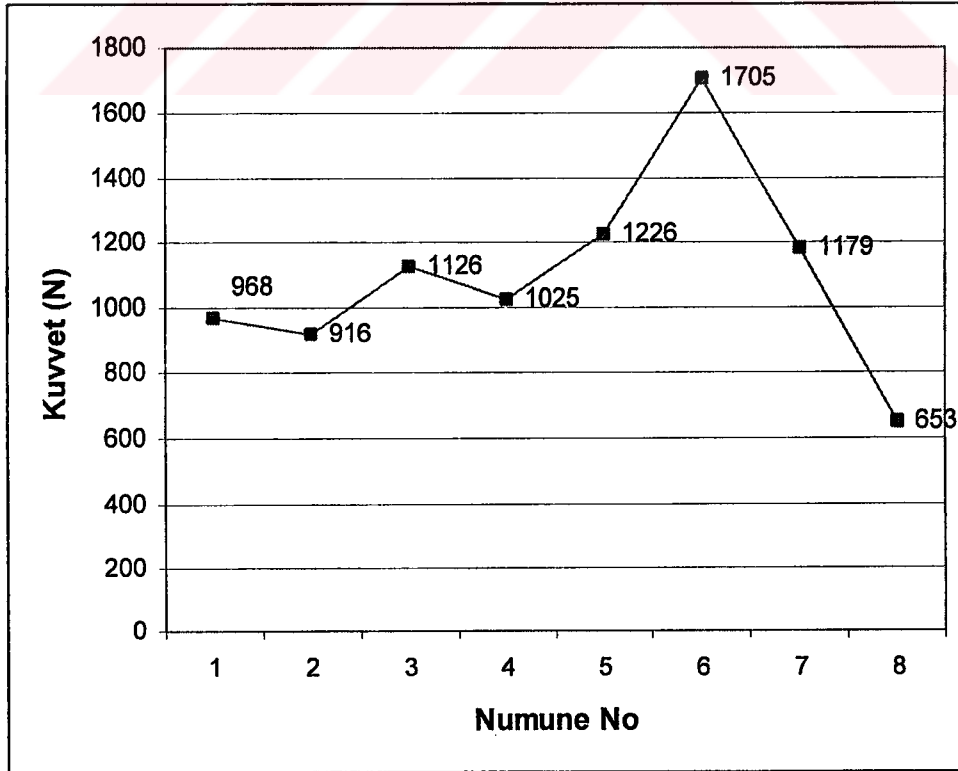
Numuneler basma yönünde 2000 N'a kadar yüklendikten sonra, çekme yönünde 2000 N'a erişinceye kadar yük uygulanmıştır. Bu çevrim iki kez tekrarlandıktan sonra, üçüncü çevrimde 0,5 mm şekil değiştirme miktarı için gerekli kuvvet ölçülmüştür. Bu test sonucu elde edilen eğri şekil 6.8.'de gösterilmiştir.

Şekil 6.9.'da görüldüğü gibi, kalıp sıcaklığının ve vulkanizasyon süresinin artması, 0.5 mm şekil değişimindeki kuvvet değerini, yani statik rijitlik değerini de arttırmıştır. Fakat 7 nolu numunede pişme süresinin artmasına rağmen, 6 nolu numuneye göre daha düşük bir kuvvet değeri okunmaktadır. Bu numunenin aşırı vulkanizasyon sonucu mekanik özelliklerinde düşüş göstermesidir. Numunenin kauçuğu doğal kauçuktur (NR). 2. bölümde anlatıldığı gibi, NR azalma (reversion) eğilimi göstermektedir. Bir diğer husus da, 1 ve 2 nolu numunelerin vulkanizasyon şartları aynı olmasına rağmen, kuvvet değerlerinin farklı olmasıdır. Bu fark, her iki numunenin kalıbın farklı gözlerinden alınmasından kaynaklanmaktadır. Enjeksiyon makinesi üzerinde okunan kalıp sıcaklıkları değerleri aynı olmasına rağmen, pratikte kalıp yüzeyindeki sıcaklıklar farklı olmaktadır. Kalıbın orta kısımlarındaki gözlerin sıcaklıkları, kenarlara yakın gözlerden farklı olabilmektedir. Bu yüzden, özellikle

proses sırasında yapılan kontrollerde numuneler, en az iki adet olmak üzere kalıp üzerinde farklı konumdaki gözlerden alınmalıdır. Vulkanizasyon süresi parçanın çevrim zamanını doğrudan etkilediğinden, proses parametreleri belirlenirken parçanın teknik şartnamesindeki toleranslar içinde kalmak şartıyla, minimum vulkanizasyon süresine sahip parametre alınmalıdır. Örneğin, elde edilen test sonuçlarına göre 5 nolu numunenin vulkanizasyon parametreleri 4 nolu numunenin parametrelerine tercih edilmelidir.



Şekil 6.8. Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet-şekil değiştirme eğrisi

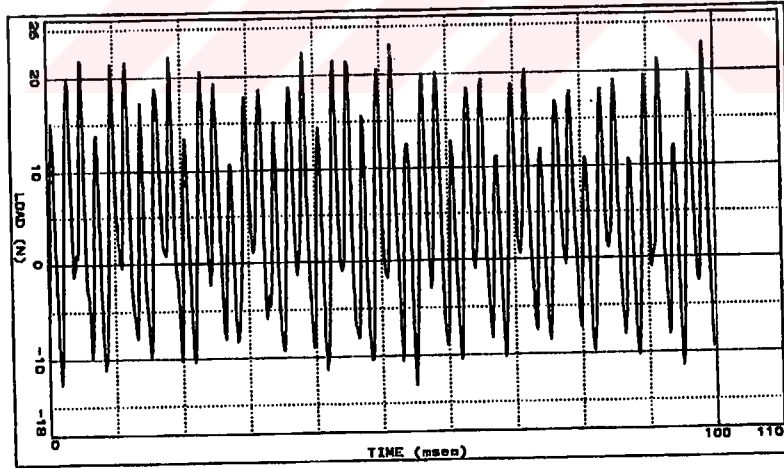


Şekil 6.9. Vulkanizasyon şartlarının statik özelliklere etkisi

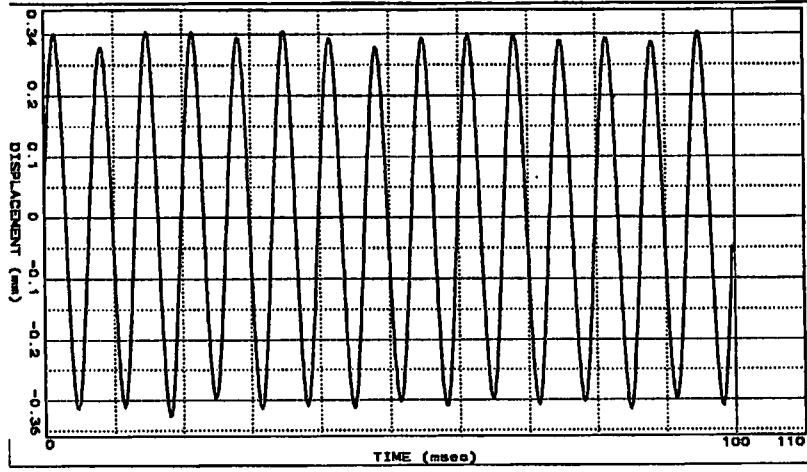
6.2.3. Uygulama 3

Bu uygulama, farklı ön yük değerlerinde dinamik özelliklerinin değişimini incelemek amacıyla yapıldı. EPDM esaslı numuneler, 110 s. pişme süresinde ve 190°C kalıp sıcaklığında elde edilmiştir. Bu uygulamada kullanılan numune, 1 nolu uygulamada kullanılan numune gibi EPDM esaslı olmasına rağmen, formülasyonu tamamen farklıdır.

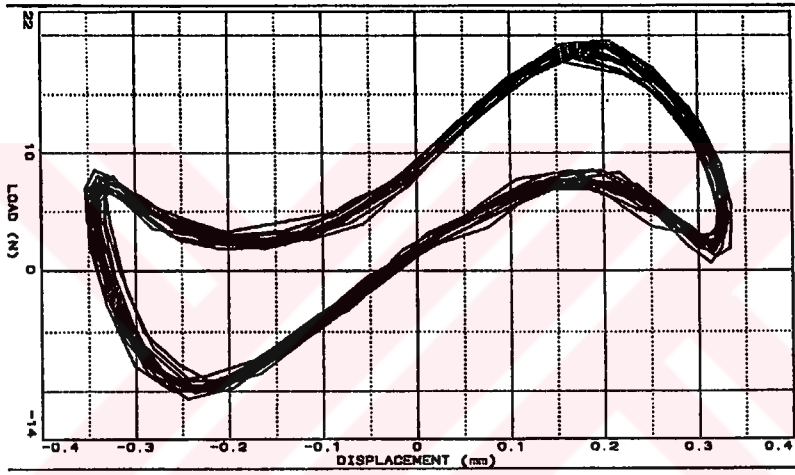
Numuneye belli bir ön yük değerine geldikten sonra, 0.3 mm genlikte önce 30 Hz’de ve daha sonra 150 Hz’de titreşim uygulandı. Kuvvetin zaman göre değişimi şekil 6.10.’da, şekil değiştirmenin zamana göre değişimi şekil 6.11.’de ve kuvvet şekil değiştirme eğrisi 6.12.’de gösterilmiştir. Bu testte 30 Hz’deki dinamik sertlik, 150 Hz’deki dinamik sertlik ve kayıp açısı değeri hesaplandı. Testlerin sonucunda elde edilen değerler şekil 6.13, 6.14 ve 6.15’te gösterilmiştir. Test sonuçlarından görüldüğü gibi artan ön yük değerleri farklı frekanslardaki dinamik rijitlik değerlerini de arttırmıştır. Ön yük değerlerinden bağımsız olarak artan frekans değerlerinde, numunenin dinamik rijitlik değeri azalmaktadır. Diğer yandan artan ön yük değerlerinde $tg\delta$ değerinin çok az değiştiği görülmüştür.



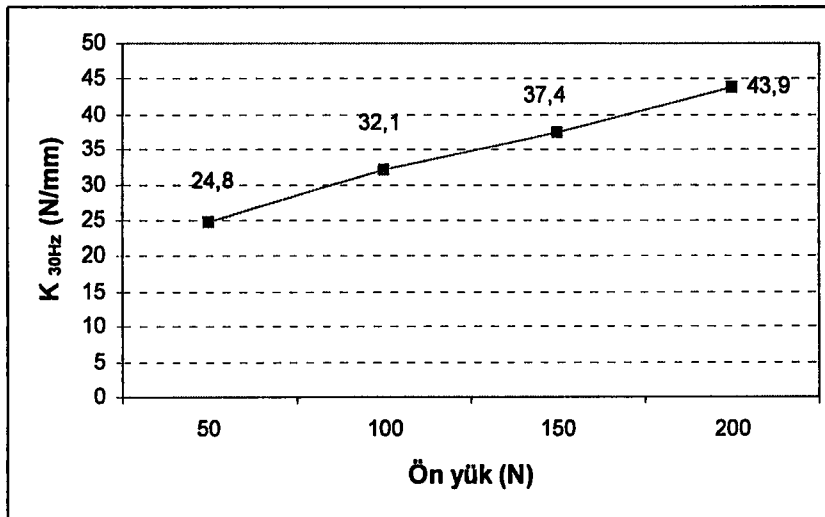
Şekil 6.10. Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet-zaman grafiği



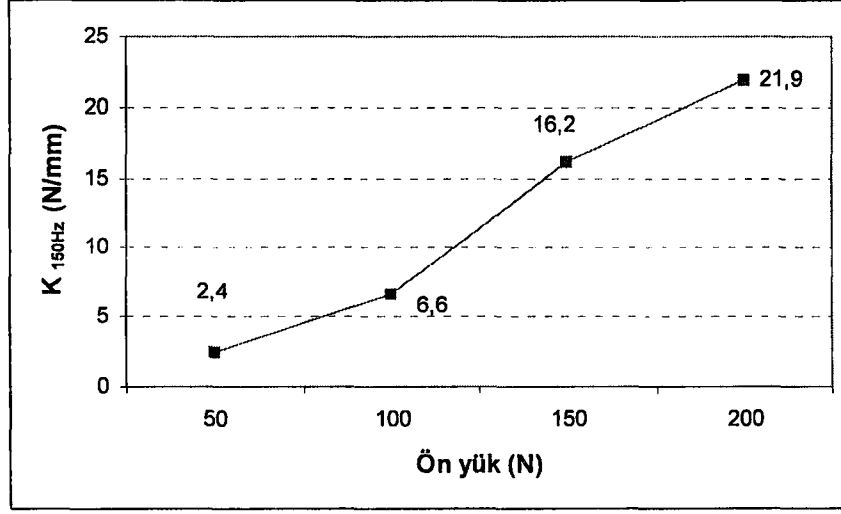
Şekil 6.11. Deltalab makinesinde elde edilen şekil değiştirme-zaman grafiği



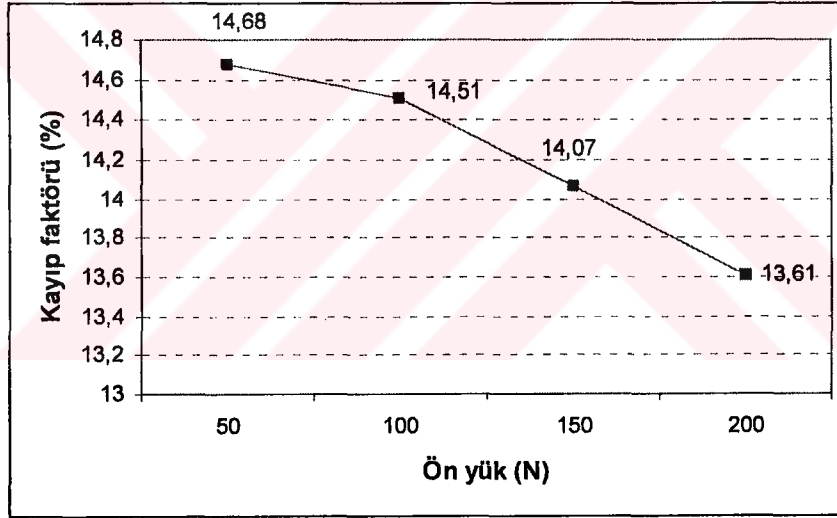
Şekil 6.12. Deltalab makinesinde elde edilen kuvvet-şekil değiştirme grafiği



Şekil 6.13. Ön yük değerlerine göre 30 hz'deki dinamik rijitliğin ($K_{30\text{Hz}}$) değişimi



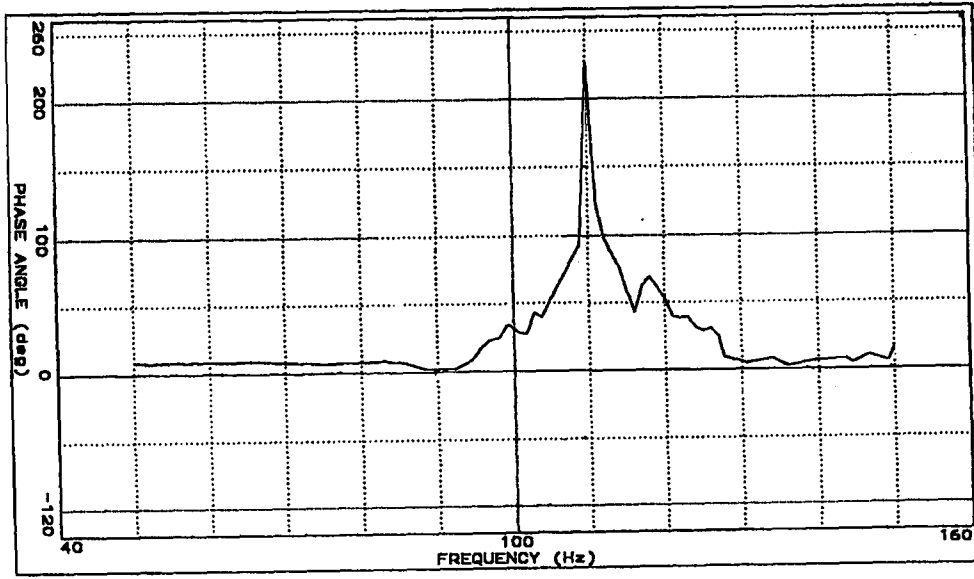
Şekil 6.14. Ön yük değerlerine göre 150 hz'deki dinamik rijitliğin ($K_{150\text{Hz}}$) değişimi



Şekil 6.15. Ön yük değerlerine göre kayıp faktörünün ($\text{tg } \delta$) değişimi

6.2.3. Uygulama 4

Bu uygulama, kayıp faktörünün frekansa ile değişiminin teorikte belirtildiği gibi bir maksimumdan geçtiğini gözlemek amacıyla yapıldı. Bu uygulamada uygulama 3'te kullanılan numuneler kullanılmıştır. Numuneye uygulanan frekans 50 Hz'den 150 Hz'e kadar 2 Hz dilimlerle arttırıldı ve test sonucunda şekil 6.16.'da gösterilen eğri elde edilmiştir. Pratikte, δ açısı 110 Hz'de maksimum değerine ulaşmıştır. Tg δ değeri ne kadar büyük olursa, sönümleme o kadar fazla olur.



Şekil 6.16. Deltalab makinesinde elde edilen δ açısının frekansla değişimi grafiği

SONUÇLAR

Elastomer malzemelerin statik ve dinamik özelliklerine en büyük etken, elastomerin tipi ve karışımın formülasyonudur. Günümüzde doğal kauçuk (NR), çok iyi elastisite, çekme dayanımı, yırtılma dayanımı ve yorulma özellikleri sayesinde dinamik uygulamalarda en çok kullanılan elastomer tipidir. Aynı şekilde, dolgu maddelerin tipi, büyüklüğü gibi parametreler statik ve dinamik özellikleri etkilemektedir.

Çapraz bağ yoğunluğu ile elastomerlerin kopma dayanımı, histerisis, rijitlik, yırtılma dayanımı gibi mekanik özellikleri değişmektedir. Bu, elastomerin vulkanizasyon parametrelerini değiştirerek farklı özelliklerde parçalar elde edilebileceğini göstermektedir. Zira 2 nolu uygulamada, kalıp sıcaklıkları ve vulkanizasyon süreleri değiştirilerek alınan numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde, statik rijitlik değerinin artan sıcaklık ve pişme süresi ile arttığı gözlemlendi. Burada yine elastomer tipinin önemli bir etken olduğu görüldü. Zira bu parçanın elastomer bazı doğal kauçuktan (NR) ve doğal kauçuğun reometre eğrisi maksimum moment değerinden sonra azalma eğilimi göstermektedir. Reversion olarak da adlandırılan bu durum, parçanın mekanik özelliklerinin bozulması anlamına gelmektedir.

Test şartları da statik ve dinamik özellikleri etkilediği deneysel olarak doğrulandı. Genel bir kaide olarak, statik ve dinamik testlerde, sonuçlar üçüncü çevrim sonunda hesaplanmaktadır. Zira, artan çevrim sayısı ile bir çevrim sonunda ısı şeklinde yayılan kayıp enerji olan histerisis azalmaktadır. 1 nolu uygulamada test hızının artması ile malzemenin rijitliğinin arttığı, yani belli bir kuvvette malzemenin şekil değiştirme miktarının azaldığı görüldü. 3 nolu uygulamada ön yük değerinin artması ile dinamik rijitlik değerlerinin de arttığı görüldü. Ayrıca ön yükten bağımsız olarak, frekansın artması ile malzemenin dinamik rijitlik değeri azalmaktadır. Sönümlenmenin ifadesi olan $tg \delta$ (kayıp faktörü), artan ön yük değerlerinde, düşüş göstermektedir. Test şartlarının etkisinden dolayı, kauçuk parçaların şartnamelerinde statik ve dinamik özellikleri belli test hızlarına, ön yük değerlerine göre istenmektedir.