

T. C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM ŞERİTLERİN ISIL ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Buket ERKUŞ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Metin AYDOĞDU

Yardımcı Danışman: Yrd.Doç.Dr. Vedat TAŞKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

EDİRNE-2012

T. C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM ŞERİTLERİN ISIL ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Buket ERKUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
TEZ DANIŞMANI: Doç. Dr. Metin AYDOĞDU
YARDIMCI DANIŞMAN: Yrd.Doç.Dr. Vedat TAŞKIN

2012
EDİRNE


T.C.
TRAKYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


CAM ŞERİTLERİN ISIL ŞEKİL DEĞİŞTİRMELERİNİN
TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Buket ERKUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 13.9/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından kabul edilmiştir.


Doç. Dr. Metin AYDOĞDU
Danışman


Y. Doç. Dr. Nilhan GİRKMEZ
TAŞKIN
Jüri Üyesi


Y. Doç. Dr. S. Özmen ERUSLU
Jüri Üyesi

Yüksek Lisans Tezi**Cam Şeritlerin Isıl Şekil Değişirmelerinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi****T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü****Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****ÖZET**

Bu çalışmada cam şeritlerin kendi ağırlıklarının etkisiyle şekil değişimleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik model olarak iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Tek ve iki katmanlı cam şeritlerin çökmesi incelenmiştir. Son haldeki çökme miktarları ölçülerek elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılarak çökme miktarını etkileyen sıcaklık, zaman, viskozite, sürtünme faktörleri üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak deneysel verilerin teorik modellerle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yeşil camda Fe_2O_3 'ün etkisiyle ufak farklılıklar oluşurken çift camla yapılan deneylerde çıkan sonuçların camlar arasındaki sürtünme kuvvetine bağlı olarak teorik modellerden düşük çıktığı görülmüştür.

Yıl : 2012

Sayfa Sayısı : 47

Anahtar Kelimeler : Sürtünme şekillendirilmesi, viskozite, cam şeritler, soda-kireç camları, çökme, lamine camlar.

Master's Thesis

Theoretical and Experimental Analysis of Thermal Deformation of Glass Beam

Trakya University Institute of Naturel Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, creep bending of glass sheets are studied both theoretically and experimentally. Two different creep models were used in the theoretical part. Creep bending of single and double layered glass beams considered. Experimental and theoretical results were compared. A good agreement obtained between numerical and experimental results. Higher deflections are obtained for green glasses due to Fe_2O_3 . It is obtained that experimental results are lower than theoretical result for double sheets due to friction between two sheets.

Year : 2012

Number of Pages : 47

Keywords : Creep forming, viscosity, glass sheets, soda-lime glass, bending, laminated glasses

ÖNSÖZ

Yüksek lisans hayatım boyunca yardımlarını ve anlayışını esirgemeyip yanımda olan ve hayatım boyunca da çalışma yaşamındaki başarısını, disiplinini ve insanlarla olan ilişkilerini örnek alacağım değerli hocam Doç.Dr. Metin AYDOĞDU ve tez çalışmamıza yardım eden ve yanımızda olan ikinci danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Vedat Taşkın'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasında deneylerimizin yapılmasına olanak sağlayan ve tecrübelerinden yararlandığımız Trakya Otocam Fabrikası'na ve burada görev yapmakta olan M. Serdar GEZGİN ve Ü. Erdal TAVUKÇU'ya desteklerinden ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatım boyunca güvenlerini ve desteklerini benden esirgemeyen maddi, manevi yanımda olan anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Özet	i
Abstract	ii
Önsöz	iii
Simgeler Dizini	iv
Şekil Listesi	viii
Tablo Listesi	ix

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problem ve Önemi	1
1.2. Önceki Çalışmalar	2
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2

BÖLÜM 2. CAM VE CAMIN ÜRETİM AŞAMALARI

2.1. Giriş	3
2.2. Cam ve Camın Tarihçesi	3
2.3. Camın Yapısı	4
2.4. Camın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	5
2.4.1. Optik Özellikler	5
2.4.2. Elektriksel Özellikler	5
2.4.3. Kimyasal Özellikler	5
2.4.4. Isıl Özellikler	5
2.4.5. Mekaniksel Özellikler	6
2.5. Cam Oluşumu	6
2.5.1. Cam Oluşturan Oksitler	8
2.5.2. Cam Renklendirici Oksitler	9
2.6. Cam Yapımında Kullanılan Hammaddeler	10
2.6.1. Cam Yapıcılar (SiO_2 , B_2O_3 , As_2O_3 , GeO_2)	10
2.6.2. Modifiye Ediciler (Na_2O , CaO , MgO , K_2O , Li_2O)	10
2.6.3. Ara Oksitler (Al_2O_3 , PbO)	10
2.7. Hammadde Kaynakları	11

2.8. Cam Türleri	12
2.8.1. Soda-Kireç-Silika Camı	12
2.8.2. Borosilikat Camları	12
2.8.3. Kurşunlu Camlar	13
2.9. Float Cam Üretim Yöntemi.....	14
2.10. Cam Üretim Aşamaları	14
2.11. Otomotiv Camları	20
2.11.1. Temperlenmiş Yan ve Arka Cam Üretimi	20
2.11.2. Lamine Camların Üretimi	21

BÖLÜM 3. CAM ŞERİTLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİ

3.1. Giriş.....	23
3.2. Camın Şekillendirilmesi.....	23
3.2.1. İzotropik-Viskoplastik Model.....	25
3.2.2. Solomin Gevşeme Modeli.....	26
3.3. Basit Mesnetli Şeritin Deformasyonu	27

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş.....	28
4.2. Numunenin Hazırlanması	28
4.3. Deneylerin Yapılışı	29
4.4. Cam Şeritlerdeki Plastik Çökme ve Sıcaklığın Ölçülmesi.....	30
4.5. Deneysel Sonuçlar.....	30

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ.....	35

SİMGELER DİZİNİ

t	Zaman
$\varepsilon(t)$	Toplam deformasyon
$\varepsilon_d(t)$	Deformasyonun gecikmeli elastik bileşeni
$\varepsilon_\eta(t)$	Deformasyonun viskoz bileşeni
$\varepsilon(0)$	Ani elastik deformasyon bileşeni
$\sigma(0)$	Yük altındaki gerilim
E	Elastik modül
η	Viskozite katsayısı
T	Sıcaklık
ε	Genleme oranı
A, B, C	Sabit sayılar (550-700°C aralığında)
M_ε	Çökme momenti
Z	Düşey eksen
w_{xx}	Zamana bağlı çökme
ε_x	Birim şekil değiştirme
I	Nötr eksene göre atalet momenti
H	Camın kalınlığı
t_r	Gevşeme zamanı
B	Sabit sayı (0.5)
$\varepsilon_d(\infty)$	Deformasyonun gecikmeli elastik bileşeninin sonsuz zamandaki değeri

S	Genleme modülü
w^e	Çökmenin elastik bileşeni
G	Kayma modülü
t_c	Kritik zaman
$ws(t)$	Zamana bağlı statik çökme
$wp(t)$	Viskoplastik modelde zamana bağlı plastik çökme
$wp2(t)$	Solomin modelinde zamana bağlı çökme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Kristalleşmeden Önce ve Sonra Camın Aşınma Direnci.....	6
Şekil 2.2. Genel Cam Türlerinin Sıcaklığa Bağlı Viskozite Değişim Eğrileri.....	7
Şekil 2.3. Camın Sıcaklığa Bağlı Faz Değişim Grafiği	8
Şekil 3.1. Cam Şerit Boyutları ve Geometrisi.....	23
Şekil 3.2. Yayılı q Yüğü ile Yüklenmiş Kiriş	27
Şekil 4.1. Tipik Şekil Değişirmiş ve Değişirmemiş Cam Şeritler	28
Şekil 4.2. Deneşlerin Yapıldığı Fırına Bir Örnek	29
Şekil 4.3. Beyaz Camın Maks. Çökmesinin Zamanla Değişimi (608°C)	31
Şekil 4.4. Yeşil Camın Maks. Çökmesinin Zamanla Değişimi (608°C).....	31
Şekil 4.5. İki Katmanlı Beyaz Camın Maks. Çökmesinin Zamanla Değişimi (608°C)..	32

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Cam Renklendirici Oksitler ve Oluşturdukları Renkler	10
Tablo 2.2. Camın Kimyasal Bileşimi.....	13
Tablo 2.3. Cam Çeşitlerinin Kimyasal Bileşimleri	13
Tablo 2.4. Hammaddeler ve Ergime Sıcaklıkları.....	17

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tezin bu bölümü, üç kısımdan oluşmaktadır. 1.Kısım'da tezde incelenen problem ve önemi açıklanmakta, 2.Kısım'da konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar özetlenmektedir. 3.Kısım'da çalışmanın amacı ve kapsamı üzerinde durulmaktadır.

1.1. Problem ve Önemi

Bu çalışmada cam şeritlerin kendi ağırlıkları etkisinde 600-650°C civarında sürünme şekil değiştirmeleri teorik ve deneysel olarak incelenecektir. Teorik model olarak Solomin, 1980 tarafından önerilen gevşeme modeli ile izotropik-viskoplastik model (Parsa vd., 2005) kullanılacaktır. Önerilen sürünme modelleri Euler-Bernoulli kiriş teorisi kapsamında ele alınarak şeritlerin plastik şekil değişimleri zamana bağlı olarak elde edilecektir.

Teorik modellerin geçerliliklerinin incelenmesi amacıyla deneysel olarak cam şeritlerin plastik çökmesi üzerinde çalışılmıştır.

Camın plastik şekillendirilmesi yapı elemanı olarak kullanılmasının önemli olmasının yanı sıra otomotiv, inşaat, tıp ve ev gereçlerinde kullanılması açısından da oldukça önemlidir. Otomobillerin sürücü güvenliği açısından da en önemli unsuru sürücünün emniyeti ve görüş gücüdür ki burada da otocamları ve bunların üretim metodları için içine girerek birçok araştırmaya sebep olmuştur. Aerodinamik gereksinimler ve görüş açısını artırma ihtiyaçlarından dolayı farklı şekiller verilerek kullanıma sunulmaktadır. Örneğin araçların ön camları olası kaza durumlarında yaralanmaları en aza indirmek için katmanlı olarak üretilmektedir. Katmanlı ön camın üretimi; ön camda kullanılacak iki adet cam levhanın istenen forma getirilebilmesi için fırında kendi ağırlığıyla şekillendirilme işlemi yapıldıktan sonra iki levha arasına Polivinil Bütral (PVB) denilen malzemenin yerleştirilerek iki levhanın birleştirilmesiyle tamamlanır.

Bu sebeple cam yapı malzemelerinin ısıll şekillendirilmelerinin analizi konusunu kavramak ve detaylı bilgi sahibi olmak tasarım ve kullanım açısından büyük önem taşımaktadır.

1.2. Önceki Çalışmalar

Eksenel yüklü bir cam çubuğun plastik şekil değiştirilmesi Malinin, 1975 tarafından incelenmiştir. Shutov vd., 1997 Malinin tarafından önerilen yöntemi cam şeritlerin çökmesine uygularken Solomin vd., 1997, Solomin, 1980 tarafından önerilen viskoplastik şekil değişimini cam kirişlerin çökmesine uygulamışlardır. Shutov ve Borovskoi, 1998 IKhS modelini cam kirişlerin plastik çökmesine uygulamışlardır.

Cam levhaların sürünme ile şekillendirilmelerinin sonlu elemanlar formülasyonu Lohegnies vd., 1996 tarafından yapılmıştır. Otomobil camlarının sonlu elemanlar viskoplastik formülasyonu ticari paket program yardımıyla Parsa vd., 2005 tarafından yapılmıştır.

Yukarıda kısaca özetlenen önceki çalışmalarda kesin bir fikir birliğine varılamamıştır. Bu çalışmanın amacı önceki çalışmalarda önerilen teorik modellerin deneysel verilerle karşılaştırılıp geçerliliklerinin incelenmesidir.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı cam şeritlerin kendi ağırlıkları etkisinde ısıll şekil değişimlerinin teorik ve deneysel olarak incelenmesidir.

Bu amaçla Shutov, Parsa vd. tarafından önerilen teorik modellerle elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanıp sonuçlar tartışılacaktır.

BÖLÜM 2

CAM VE CAMIN ÜRETİM AŞAMALARI

2.1. Giriş

Bu bölümde cam ve camın üretim aşamalarıyla ilgili bilgiler verilecektir. Bu amaçla cam ve camın tarihçesi, camın fiziksel ve kimyasal özellikleri, camın oluşumu ve kullanılan hammaddeler, hammadde kaynakları, cam türleri, float cam üretim yöntemi, üretim aşamaları ve otomotiv camları ile ilgili açıklamalar sunulmuştur.

2.2. Cam ve Camın Tarihçesi

Antik çağlardan günümüze uzanan cam; inşaat, süs eşyası, iletişim ve uzay teknolojileri olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahip olup Yunan tarihçi Pliny'e göre tesadüfen tekneden kıyıya çıkan tüccarların yaktığı ateşten sonra küllerin arasında şeffaf, parlak parçalara rastlamaları ile bulunmuştur.

Yüksek sıcaklığın getirdiği teknik sorunları çözdüğümüz sürece cam ile her türlü üretimi gerçekleştirebiliriz. Dönemin seramik ustaları camı seramikte kullanarak günümüzde de kullanılan cam kaplama yöntemini (sırlama tekniğini) bulmuşlardır. Sır, malzeme olarak camdır ve tek başına kullandığımızda camsı ürün elde ederiz. Bu cam tarihinin ilk örneklerindedir ve seramikten cama geçildiğini gösterir.

Yapay olarak üretilmeden önce doğada bulunan tipik cam özelliklerine sahip, obsidyen isimli bir malzeme farklı yöntemlerle şekillendirilmekteydi. İlk camcılık örnekleri de bunların bıçak, balta ve mızrak ucu olarak kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır.

Camın, kumun bol ve seramiğin gelişmiş olduğu bölgelerde üretildiğini kabul ettiğimizde; ilk camcılık örnekleri Mezopotamya'dan Mısır'a, Doğu Akdeniz'den Anadolu'ya kadar olan yerlerde görülür. İlk örnekler M.Ö. 3000'lerden kalmaz. Sıcak biçimlendirme olmadığından cam blokların önce yapıldığı potalarda daha sonra kırılıp şekillendirildiği düşünülmektedir. İlk cam örnekleri elde edilmesi basit ve mücevhere

benzediği için de dikkat çeken camı boncuklardır. Zamanla renklendirilerek çeşitli süslemelerle zenginleştirilmişlerdir. Üretilen parçalar renk ve desen olarak göz alıcı olsalar da en fazla 10-15 cm büyüklüğündedir.

Türkiye’de cam sanatı Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde ortaya çıkmıştır. Cam endüstrisi İstanbul’un fethinden sonra burada gelişmiştir. Kaynaklar, dönemin başkentindeki Eğrikapı, Eyüp, Balat, Ayvansaray, Bakırköy, Beykoz, Paşabahçe, Çubuklu ve İncirköy mevkilerinde çeşitli cam eşya üretimi yapan atölyelerin bulunduğunu göstermektedir. 13. Yüzyılın en büyük cam ihracat merkezi olan ve bir Türk ticarethanesinin de bulunduğu Venedik başta olmak üzere çeşitli ülkelerden ithalat yapılmıştır. I. Mahmut döneminde Fransa’dan cam ustaları getirtilmiştir. III. Selim döneminde de Mehmet Dede isimindeki bir Mevlevi Dervishi cam yapım tekniklerini öğrenmek üzere İtalya’ya gönderilmiş ve gelince Beykoz, İstanbul’da bir atölye açmıştır. Çalışmaları arasında en popülerleri “çeşm-i bülbül” olmuştur. 1899’da Saul Modiano adında bir Yahudi Levanten tarafından eski Paşabahçe Cam Fabrikası’nın bulunduğu yerde 'Fabbrica Vetrami di D. Modiano, 9 Constantinople' etiketli ürünler üreten, 1902 yılı itibariyle 500 kişiye iş imkanı sağlayan bir atölye kurulmuştur. Geleneksel Türk Camcılığı 17. ve 18. yüzyıllarda üst seviyeye ulaşmıştır. Cumhuriyet’in kuruluşu ile Türk Cam Endüstrisi yepyeni bir yön kazanırken 17 Şubat 1934’te diğer cam atölyelerine de çok yakın bir yerde, Paşabahçe’de, Boğaz’ın yamaçlarında, meclis onayıyla ilk ulusal fabrika kurulmuştur. Türkiye İş Bankası tarafından "Türkiye Şişe ve Cam Fabrikaları A.Ş." adı ile kurulan bu fabrikayı çeşitli tarzlarda cam üretimi yapan birçok şirket takip etmiştir. Ülkenin her yerinden çok sayıda cam ustasını bir araya toplamış ve Türk cam tarihi için önemli bir cam yapım merkezi haline gelmiştir.

2.3. Camın Yapısı

Cam, ani soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleri ile diğer metal oksitlerin çözünmesinden oluşan akışkan bir malzeme olup ana maddesi SiO_2 ’dir. Genellikle sert, kırılğan bir malzemedir ve amorf yapısını koruyarak katılaştır. Bu da cama sağlamlık ve saydamlık özelliği kazandırır.

Sıvıların bir özelliği olan viskozitenin, camda da bulunması yönüyle davranış olarak sıvı haldeki bir maddeye benzer. Diğer bir deyişle cam akışkan bir maddedir ancak akış süresi bir insanın gözlemleyemeyeceği kadar uzun olduğu için aşırı

soğutulmuş sıvı olarak tanımlanır. Sıvı davranışı gösteren katı bir faz olarak tanımlansa da aslında camsı faz denilen özel bir durumdadır.

2.4. Camın Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

2.4.1. Optik Özellikler

Camın ışığı geçirmesi saydamlıktır ve pencere camlarında istenen temel özelliklerdendir. Cam ışığı geçirdiği halde cisimleri net göstermiyorsa yarısaydam olarak tanımlanır. Ayna ve dekoratif camlar ise ışığı tamamen yansıtırlar. Işığın sapması yani kırılma, gözlük ve otomobil camları için çok önemlidir. Işığın sapma miktarı prizma ya da mercek şeklinin değiştirilmesi veya kırılma indisinin arttırılıp azaltılmasıyla da değiştirilebilir.

2.4.2. Elektriksel Özellikler

Ampül ve florasanlarda telin sarıldığı parçalar gibi elektrik akımının iletilmesini istemediğimiz yerlerde yüksek elektrik direncine sahip cam parçalar kullanabiliriz.

2.4.3. Kimyasal Özellikler

Camın gazlar veya sıvılarla reaksiyon verme direncidir. Genellikle laboratuvar ve ilaç kaplarının kimyasal dayanıklılığının çok yüksek olması istenir.

2.4.4. Isıl Özellikler

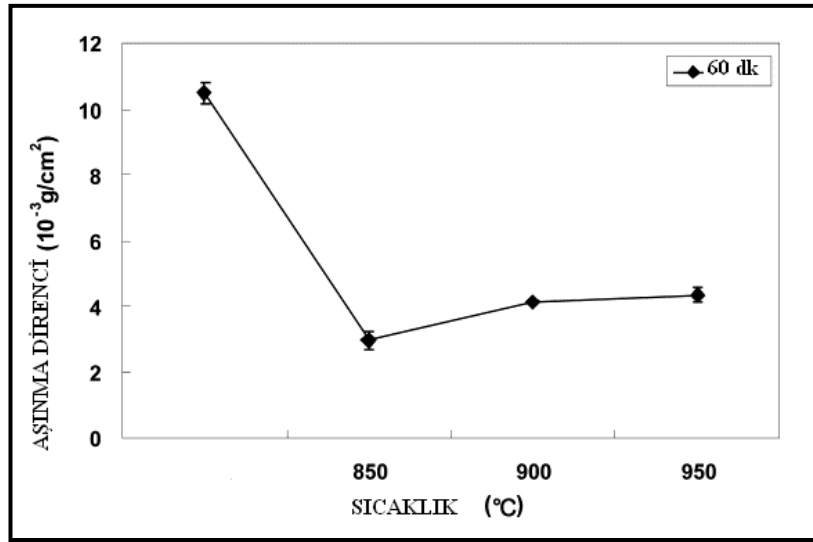
Isıl iletken olmayan cam, izolasyon malzemesi olarak; cam elyaf, izolasyon yünü ve çift kat pencere camı şeklinde kullanılır. İletkenliği sağlayan camlar arasındaki hava boşluğudur.

Malzeme ısıtıldığında boyutlarında meydana gelen büyümeye ısıl genişleme denir ve önemli bir ısıl özelliktir. Örneğin bir cam parçasının bir tarafı ısıtıldığında veya soğutulduğunda iki uç arasında bir genişleme farkı oluşur ve tek taraf daha uzun olma eğilimi gösterir böylece cam içinde gerilmeler oluşur. Gerilmelerin fazla olması durumunda cam kırılır. Isıl gerilmelere karşı koyma direnci termal şok direnci olarak

tanımlanır. Düşük ısı genleşme ya da yüksek termik şok direnci en fazla istenen özelliklerdir.

2.4.5. Mekaniksel Özellikler

Mekanik dayanıklılık, camın sabit bir basınç veya ani bir darbeye karşı gösterdiği dirençtir. Diğer önemli mekanik özellikler ise esnemeye karşı gösterdiği direnç ve aşınma direncidir. Cam yüzeyindeki bir çizik camın kolayca kırılmasına sebep olacağından aşınma direnci önemli bir mekanik özelliktir.



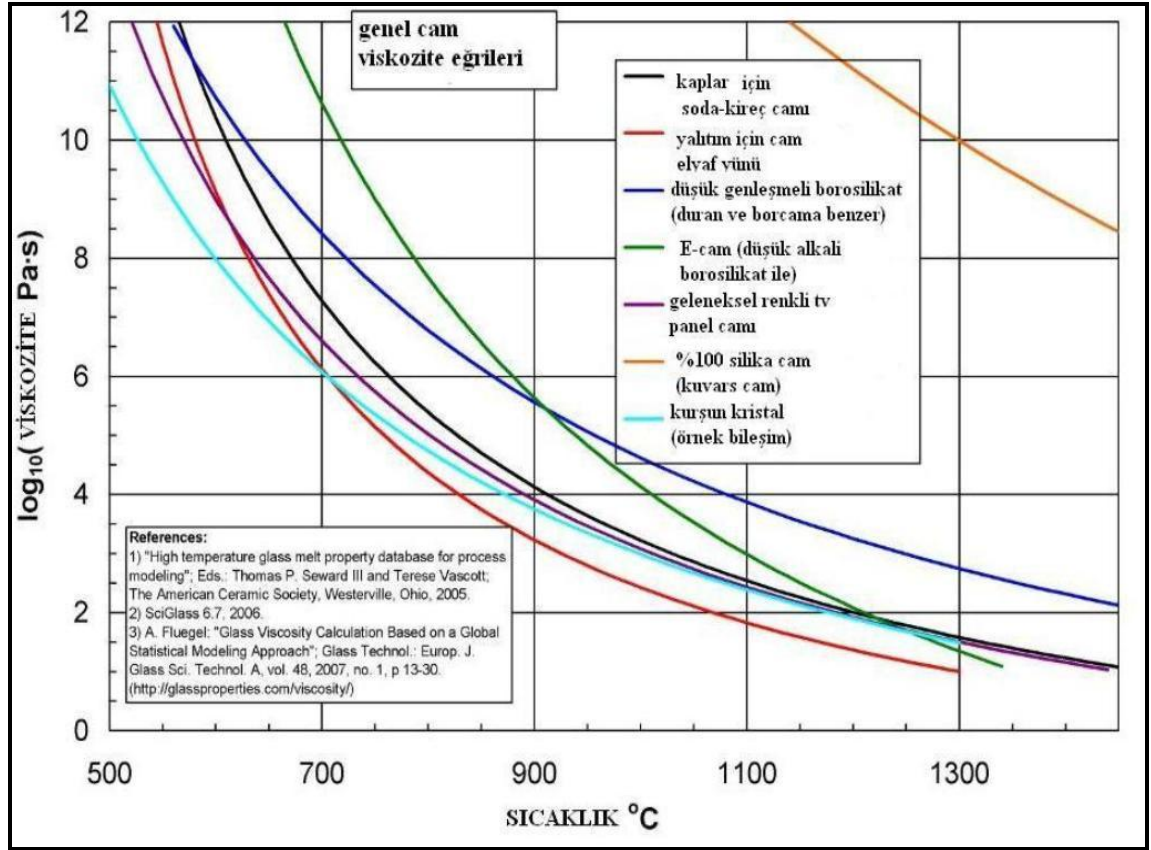
Şekil 2.1. Kristalleşmeden önce ve sonra camın aşınma direnci

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221903007131>

2.5. Cam Oluşumu

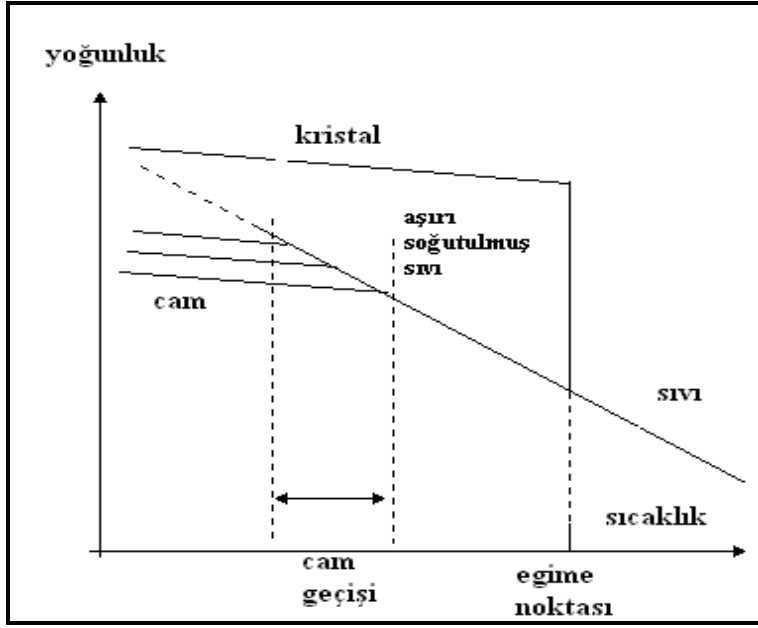
Viskozite akma karşı gösterilen dirençtir ve sıcaklıkla ters orantılıdır. Ergimiş haldeki cam yüksek bir viskoziteye sahiptir. 1000°C'de ergimiş veya sıvı haldeki camın viskozitesi en koyu yağdan bile daha fazladır. Bu durumdaki bir cam soğutulduğunda ağır moleküler yapısı ve viskozitesi sebebiyle yeni bir yapı oluşturacak zaman bulamayacağından sıvı molekülleri yapı içinde sabit hale geçer. Burada cam sıvı olarak kalmasına rağmen katı görünümündedir ve bunlardan dolayı aşırı soğutulmuş sıvı olarak tanımlanır.

Camın viskozitesinin ısıtıldığında kademeli olarak düşmesi ve soğutulduğunda kademeli olarak artması cama istenen şeklin verilmesi için geniş bir çalışma aralığı sağlar.



Şekil 2.2. Genel cam türlerinin sıcaklığa bağlı viskozite değişim eğrileri

<http://glassproperties.com/viscosity/>



Şekil 2.3. Camın sıcaklığa bağlı faz değişim grafiği

<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/Glass/glass.html>

2.5.1. Cam Oluşturan Oksitler

SiO₂: 1700°C'nin üzerinde eriyerek kimyasal dayanıklılığı artırır. Ergime derecesini düşürmek için diğer oksitlerin ilavesi camın mukavemet ve kimyasal dayanıklılığını azaltırken camın ısıl şok direncini artırır.

Na₂O: Ergime derecesini düşürmek için kullanılır. Akışkanlık kazandırma özelliği nedeniyle "flux oluşturucu" (ergitici) olarak tanımlanır. Ayrıca kimyasal dayanıklılığını azaltırken ısıl genleşme katsayısını da artırır.

K₂O: Flux oluşturucudur ve kristal cam yapımında kullanılır. Camın kırılma indisini ve sodaya göre elektriksel direncini artırır. Soda ile birlikte kullanılırsa elektriksel direnci ve kimyasal dayanıklılığı çok yüksek camlar elde edilir.

CaO: Çalışma aralığını daraltırken kimyasal dayanıklılığı (özellikle suya karşı) artırır. Ancak camın devitrifikasyon eğilimini arttırdığı için bir miktar MgO ilave edilir. MgO camın sıvılaştırma sıcaklığını düşürürken kristal büyüme hızını da yavaşlatır.

MgO: CaO'e benzer özellik gösterse de devitrifikasyon eğilimi daha azdır. Camın aşınmaya karşı mukavemetini artırır, cam viskozitesini CaO'e göre daha fazla artırır, ergime sıcaklığını düşürür ve ürüne parlaklık kazandırır.

Al₂O₃: Çoğu camda az miktarda kullanılır. Ergime sıcaklığını yükseltir, camın çalışma aralığını genişletir, kimyasal dayanıklılığı artırır, kristalleşme olayını engeller, ısıtışoklara dayanımı artırır. %0.5 ile 2 arasında ilavesi yeterlidir. %4'ten fazla kullanılırsa kristallenme de artar.

B₂O₃: Isıl genleşme katsayısının düşük olması istenen camlarda kullanılır. Camın ergime işlemini kolaylaştırır, kimyasal dayanıklılığı artırır, çizilmeye karşı dayanımı ve parlaklığı artırır.

PbO: Camın yoğunluğu ve kırılma indisini artırır, ergime sıcaklığını düşürür.

ZnO: Genellikle ısıya dayanıklı camlarda kullanılır. Camın suya dayanımını artırır ve camın habbelerden uzaklaştırılmasını sağlar.

Li₂O : Akışkanlaştırıcıdır. Cam elyaf üretiminde viskoziteyi düşürerek elyaf üretiminin sürekliliğini sağlar.

2.5.2. Cam Renklendirici Oksitler

Bir sıvıda çözüldüğünde kendi karakteristik rengini veren belli bir gurup metalin bileşikleridir. Renklendirici oksitlerin miktarı % 0.01-4 arasındadır. Renklendirici miktarı arttıkça renk de o derece koyulaşır. Bunları karıştırarak farklı renk ve tonlarda camlar üretilebilir.

Tablo 2.1. Cam renklendirici oksitler ve oluşturdukları renkler

KOBALT	Mavi Menekőe
DEMİR (Fe ²⁺)	Mavimsi Yeşil
DEMİR (Fe ³⁺)	Sarımsı Yeşil
BAKIR	Yeőilimsi Mavi
MANGANEZ	Mor
KROM	Yeşil
NİKEL	Dumanlı Gri

2.6. Cam Yapımında Kullanılan Hammaddeler

2.6.1. Cam Yapıcılar (SiO₂, B₂O₃, As₂O₃, GeO₂)

Temel yapıyı oluşturan cam yapıcı SiO₂'dir. SiO₂ taneleri bir kristal ađ oluşturmak için birbirine bağlanır. Eğer silis kristalleri 1730°C'ye kadar ısıtılırsa kristal ađ daha dzensiz bir yapıya geçer. Hızlı soğutmada sıcaklık dağılımının hızı, dzenini bozulan atomik yapının dzenli yapıya geğmesi için yeterli süre olmadığından SiO₂ dzensiz bir atomik yapı ile katılaşır.

2.6.2. Modifiye Ediciler (Na₂O, CaO, MgO, K₂O, Li₂O)

SiO₂'ye Na₂O ilave edilirse SiO₂ ve Na₂O karışımını SiO₂'nin ergime noktasından çok daha dőük sıcaklıkta reaksiyon verir. Gerçekte SiO₂-Na₂O karışımının sıvı faza geğtiği sıcaklık Na₂O miktarının arttırılmasıyla 1°C'nin altına dőebilir. Bu sebeple Na₂O bir ađ-yapı dzenleyicidir ve ergitici özelliğinden dolayı ergime sıcaklığını dőürür.

2.6.3. Ara Oksitler (Al₂O₃, PbO)

Bu maddeler kısmen cam yapıcı kısmen de ađ-yapı dzenleyici olarak hareket ederler. Ara oksitin görevi camın kristalleşme eğilimini azaltmak ve sağlamlığını arttırmaktır.

2.7. Hammadde Kaynakları

SiO₂: Silis Kumu, feldspat ve yüksek fırın cürufundan elde edilir. Cam yapımında kullanılacak olan kumun boyutları (- 0.5 +0.074) mm aralığında olmalıdır. 0.5 mm'nin üzerinde tane olması istenmez çünkü iri taneler fırında tam olarak ergimez ve camda taş parçası olarak görülür. Çok ince de olursa ergime prosesinde ergitme ve atık gazlar tarafından savrulur ve fırın içindeki bazı bölgelere zarar verir.

Al₂O₃: Kalsine ya da hidrate alumina, feldspat ve yüksek fırın cürufundan elde edilir. Feldspatlar alümina içeren doğal kaynaklardır. Türkiyedeki cam fabrikalarında sodyumlu feldspat kullanılır.

Burada sözü geçen yüksek fırın cürufu, cam yapımında kullanılan bir yan üründür. Cam üreticileri tarafından ergime ve afinyasyonu hızlandırıcı etkisi olduğundan kullanılır ancak yüksek oranda renklendirici oksit içerdiğinden cam renginin önemli olduğu durumlarda kullanılmaz.

Na₂O: “Na₂O, Na₂SO₄, Na₂CO₃” Üretilen ton başına cam içinde en pahalı olan hammaddedir. Na₂CO₃ tabiatta doğal olarak bulunabileceği gibi sentetik olarak solvey metoduyla üretilir.

CaO: CaCO₃, Dolomit ocaktan çıkarılan kireç taşı kırma, eleme, yıkama işlemlerinden geçirilerek kullanılabilir.

MgO: MgCO₃, magnezyum sülfat, dolomit, talk ve deniz suyundan elde edilir.

K₂O: K₂CO₃, feldspat potasyum klorür rezervlerinden elde edilir.

PbO: Pb₃O₄, PbO ve kurşun silikatlardan elde edilir.

ZnO ve Li₂O: Cam yapımında her ikisi de genellikle karbonatları halinde kullanılır.

Diğer hammaddeler: “B₂O₃, CaSO₄, KNO₃, Na₂SO₄, NaNO₃” Sülfatların bir kısmı harmandan gelen çözünmemiş karbonatları sistemden uzaklaştırır ve kabarcık oluşumunu engellerken bir kısmı da cam eriyiğinin içindeki gaz kabarcıklarının yüzey

gerilimini arttırarak yüzeye taşınmasını sağlar. Nitratlar ise hem düşük ergime sıcaklığına sahiptirler hem de arsenik ve antimuan oksitlerle birlikte kullanılarak camın saflaştırılmasını sağlarlar ve ergimeyi kolaylaştırıp hızlandırırılar.

Cam kırığı: Cam üretiminde önemli hammaddelerden biridir. Cam kırığı ilavesi ergimeye yardım eder ve ıskarta camların değerlendirilmesini sağlar. İki önemli kaynağı vardır;

- 1. Yabancı cam kırıkları:** Kompozisyonlarının farklılığı ve temiz olmamaları nedeniyle tercih edilmezler. Dışardan toplanan cam kırıkları mıknatıslı ayırma, yıkama ve emme gibi işlemlerden geçtikten sonra boyutları (-20 +0.5) mm'ye getirilerek kullanılabilir.
- 2. Fabrikanın kendi cam kırığı:** Şekillendirme yapılırken cam su banyosuna düşer ve soğurken çatlar, kırılır buna "Sıcak Cam Kırığı" denir. Paketlenme sırasında kırılan camlar 1 inç ve daha küçük boyutlara kırılarak kullanılır bunlara da "Soğuk Cam Kırığı" denir.

2.8. Cam Türleri

2.8.1. Soda-Kireç-Silika Camı

Evimizde kullandığımız sofr gereçleri, otomotiv camları, elyaf camlar ve elektrik iletkenliği istenen camlarda kullanılır. Bu camlarda SiO_2 miktarının artması ergime sıcaklığını ve sağlamlığı arttırırken ısıl genişmesini düşürür. Soda miktarının artması camın ergime sıcaklığını ve sağlamlığını düşürürken ısıl genişmesini arttırır. Kireç miktarının artması kimyasal dayanıklılığı arttırır, ergime noktasını düşürür ve daha çabuk sertleşen cam üretilir. Ayrıca CaO artarsa kristallenmeye yol açar. Al_2O_3 miktarının artması cam ergime sıcaklığını ve sağlamlığını arttırır.

2.8.2. Borosilikat Camları

Isıya dayanıklı, çözünürlüğü düşük camlarda ve laboratuvar kaplarında kullanılır. Bu camlarda SiO_2 , soda ve Al_2O_3 'ün arttırılmasının etkisi soda-kireç-silika camı için

geçerli olan etkilere benzerdir. B_2O_3 'ün artırılması kimyasal dayanıklılığı artırır ve ısı genleşmeyi düşürür.

2.8.3. Kurşunlu Camlar

Yüksek kaliteli sofraya eşyaları, optik camlar, yüksek elektriksel direnç göstermesi gereken camlar ve radyasyondan korunma parçalarında x-ışınlarını emme özelliğinden dolayı kullanılır.

Tablo 2.2. Camın kimyasal bileşimi

HAMMADDE	AĞIRLIK (KG)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O
KUM	100	100	-	-	-
HİD.ALÜMİNA	8	-	5.23	-	-
SODA	12	-	-	-	7.02
BOROKSİT	28	-	-	15.81	-
CAM KIRIĞI	40	32	1.2	4.8	2
TOPLAM	188	132	6.43	20.61	9.02

Tablo 2.3. Cam çeşitlerinin kimyasal bileşimleri

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	PbO
Düz cam	72	1,3	-	8,2	3,5	14,6	-	-	-
Cam kap	73	1,7	0,05	10,4	1,2	13,6	-	-	-
Isıya dayanıklı cam	81	2,5	-	-	-	4,5	-	12	-
Kurşunlu cam	60	-	-	-	-	2	13	24	60

2.9. Float Cam Üretim Yöntemi

Öncelikle bu bölümde geçecek olan bazı terimleri konunun daha iyi kavranması açısından açıklamak isterim;

Harman: Hammadde karışımıdır. Belli bir cam kompozisyonunu hedefleyen reçeteye göre tartımları yapılan kum, soda, dolomit, kalker, feldspat, sülfat gibi hammaddelerin homojen şekilde karıştırılmasıyla oluşturulur.

Cam ergitme fırını: Fırın harmanın katı halden sıvı hale ısı yardımıyla getirildiği refrakter yapıdır. Ergitme işlemi için doğal gaz kullanılır. Fırında sıcak noktada sıcaklık 1590°C'ye ulaşır.

Kontrollü atmosfer: Banyo atmosferi artı basınçta, azot ve azot-hidrojen karışımından oluşmaktadır.

Sıvı kalay: Banyo sıvı kalay içeren bir fırındır. Kalay havanın oksijeninden kontrollü atmosfer ile korunur.

Float banyosu: 1100°C'de ergimiş cam banyoya kalay üzerinde yüzdürülerek şekillendirilmek için gelir. Kalınlığı ve genişliği ayarlanmış düz cam şeridi 600°C'de banyoyu terk eder.

2.10. Cam Üretim Aşamaları

Float tekniği ile cam üretimi kısaca; ergitilmiş camın float banyosundaki ergimiş kalayın içine dökülüp yüzdürülerek şekillendirilmesidir. Camın son halini almadan önce pek çok üretim aşamasından geçmektedir. Bu üretim aşamalarını kısaca incelersek;

Harman hazırlama: Her silonun altında bulunan kantarlar aracılığıyla gereken miktarda hammadde ölçülerek harmana beslenir. Bu işlem sırasıyla; kum, soda, dolomit, kalker, feldspat, sodyum sülfat, antrasit kantarlarının boşaltımı şeklindedir. Kumun ilk önce boşaltılmasının sebebi diğerlerine göre daha nemli olması, tozmayı engellemesi ve bant üzerinde hammaddelerin sandviç gibi durmasını sağlamasıdır.

Burdan kontrol kantarında toplam ağırlık ölçülerek reçete değeri ile karşılaştırılır. Son olarak cam kırığı da harmanın üstüne reçetedeki oranlara göre serilir.

Camın elde edilmesi: İyice karıştırılan hammaddeler fırına beslenir. Sıcaklığın da etkisiyle ergir ya da daha önceden ergimiş başka bir hammaddenin içinde çözünerek oksitlerine dönüşürler. Burada meydana gelen kimyasal reaksiyonlarda ortaya çıkan gazlar ergimiş camı, biraz da olsa karıştırır ve yüzeye doğru çıkarak terk ederler. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu olaylar sonucunda artan cam sıcaklığını camı işleyebilmek için düşürmek gerekir. Cam 4 aşamadan geçerek üretilir:

1. Harman besleme: Reçeteye göre hazırlanan harman kontrollü olarak servis silosundan fırına aktarılır. Harmanın ilerlemesini yavaşlatmak amacıyla uygun sıcaklıkla dönüş akımı oluşturabiliriz. Harman örtüsünün kalınlığı sıcak noktadan hemen önce sıfır olacak şekilde kontrol altında tutulmalıdır ki camın düzgün ilerlemesi sağlanabilsin. Harman besleme sisteminin harmanın yeniden ayrışmasına imkan sağlamayacak şekilde çalıştırılması gerekmektedir.

Harmanda kullanılacak cam boyutu ve miktarı da önemlidir. Fazla cam kırığı kullanıldığında soğuk harman veya ergimiş camdan daha yoğun olur ve aşağı çökerek sıcak cam akımlarının gelmesi engellenir. Harmanın rutubetinin artması harman örtüsünün kalınlığını artırır ki tüm bu saydıklarımız harman beslemeyi etkileyen en önemli unsurlardır.

2. Camın ergitilmesi: Hammaddelerin karıştırılması ve ısıtılmasıyla başlayan ergime prosesidir. Harmanın bozunması, reaksiyona girip ergimesi ve oksitler halinde çözünmesidir. Fırın içi sıcaklığı 1550-1600°C'dir. Refrakter ve çelik yapının yüksek sıcaklıklardan etkilenmemesi için fırının bazı bölgelerine soğutma yapılır. Ergime sırasında meydana gelen sıvı fazın, harman bileşenleri arasındaki teması artırarak ergimelerini kolaylaştıran konveksiyon akımları oluşturması için akışkan olması gerekir. Cam ergime sıcaklığının hemen altında belli bir süre tutulursa "camın devitrifikasyonu" dediğimiz durum oluşur. Bu kristal yapıyı oluşturmak için cam atomik

yapısının zamana ihtiyacı vardır. Bunu önlemek için camın kristallenme sıcaklığından hızla geçilmelidir.

Ergime sırasında oluşan reaksiyonlar hammaddedeki serbest su uzaklaşmasıyla başlar ve hammaddelerin bozunması sonucu CO_2 , SO_2 , SO_3 , H_2O gibi gazlar oluşarak ortamdan uzaklaşır. Tek tek hammaddelerin veya bunların kombinasyonunun ergimesi sonucu sıvı fazlar oluşarak ergimemiş harman taneciklerinden arınmış homojen bir sıvı elde edilecek şekilde geriye kalan katı taneciklerin sıvı faz içinde çözünmesiyle sonlanır.

Ergime hızını etkileyen faktörlerden camın kompozisyonu önemli bir etkidir ki cam kompozisyonu üzerinde oynamalar yaparak viskozite ve ergime sıcaklığını değiştirebiliriz. Viskozite ergimeyi kolaylaştıran bir etkidir. Diğer bir etken de ergime süresini etkileyen fırın sıcaklığıdır. Tane boyutunun küçük olması, harman kompozisyonun homojen olması ergime süresini azaltır. Cam kırığı ne kadar fazla olursa ergime o kadar kolay gerçekleşir. Ancak boyutları en fazla 20 mm olmalıdır. 74 μm 'nin altında kullanılması da uygun olmaz. Ergime hızını etkileyen önemli faktörlerden birisi de fırının ergitme alanının büyüklüğüdür. Alan ne kadar büyük olursa ısı transferi ve ergime o kadar kolay gerçekleşir.

Tablo 2.4. Hammaddeler ve ergime sıcaklıkları

HAMMADDELER	ERGİME SICAKLIĞI (°C)	HAMMADDELER	ERGİME SICAKLIĞI (°C)
Silis kumu	1730	PbO	888
NaCO ₃	851	Li ₂ O	723
NaSO ₄	888	ZnCO ₃	140
NaNO ₃	308	Al ₂ O ₃	2050
CaCO ₃	825	Al ₂ O ₃ 3H ₂ O	2050
CaSO ₄	1450	Fe ₂ O ₃	1565
MgCO ₃	350 (bozunur)	Na ₂ B ₄ O ₇	742
K ₂ CO ₃	891	H ₃ BO ₃	169
KNO ₃	334	Kolemanit	450
Pb ₃ O ₄	500	Dolomit	600
Feldspat	2500		

Afinasyon: Ergime prosesi sırasında ergimiş camın içinde habbe denilen gaz kabarcıkları oluşur. Bu habbelerin camdan uzaklaştırılması için camın viskozitesinin yeterince düşük olması gerekir. Ergime sırasında camın viskozitesi 10² poise'dir. Cam, şekillendirme prosesi için fırından alındığında sıcaklığı düşürülür böylece viskozitesi yükselir. Şekillendirme prosesinin başlangıç ve sonu arasındaki viskozite aralığına “çalışma aralığı” denir. Viskozite aralığının en alt ve en üstteki viskozite değerleri, şekillendirme yöntemine bağlıdır. Çalışma aralığının üst ve alt limitleri 10³ poise ile 10⁸ poise arasındadır. Cam normal olarak soğutulursa kırılabilir ya da daha sonra kırılmasına neden olacak gerilmeler oluşabilir. Bu gerilmelerin giderilmesi için üretim makinalarından çıkan ürün açık alevli ısıtma tüneline sokulup kademeli olarak soğutulur. Bu sıcaklık aralığına “tavlama aralığı” denir ve bu aralıkta soğuyan camın viskozite değerleri 10¹³-10¹⁴ poise arasındadır. Ergime sırasında camın habbelerden (gaz kabarcıklarından) temizlenerek kimyasal olarak homojen hale gelmesidir. Habbelerin uzaklaştırılması ve homojenizasyon olmak üzere iki kısımda incelenir;

- 1. Habbelerin uzaklaştırılması:** Habbe, harman tanecikleri arasındaki hava ile harman reaksiyonları ve hammadde ayrışmasından oluşmaktadır ve çeşitli reaksiyonlardan çıkan gazları içermektedir. Örneğin; Karbonatlar (CO_2), Sülfatlar (SO_3 , SO_2 , O_2), Nitratlar (NO_2 , NO , O_2) Hidroksit, Hidratlar (H_2O). Karbonatlar en çok kullanılan ve en fazla gaz oluşturan hammadde olduklarından CO_2 en yüksek seviyededir. Sıcaklığın artırılmasıyla viskozite düşer ve gaz habbelerinin cam yüzeyine çıkmaları kolaylaşır; konveksiyon akımlarını güçlendirerek ergimiş camın karışması sağlanır; içerdeki gazın genişmesiyle gaz habbelerinin büyüklüğü artarak afinasyon süresi kısalmır.

Buradaki arıtma malzemeleri; gaz giderme reaksiyonları oluştururlar ve bu gazlar geçtikleri yol üzerindeki küçük habbeleri toplayarak cam yüzeyine çıkarlar. Bazıları camdaki küçük habbelere işleyerek büyüyüp cam yüzeyine çıkmalarını çabuklaştırırken bazıları da camın içinde çözünürler. Fırın içindeki kum taneleri ve gaz kabarcıkları yüzey gerilimi sonucunda birleşip yukarıya doğru yükselirler. İçindeki kum tanecikleri cam yüzeyinde ergitici maddeler az olduğundan ergime süresi uzar ve kum taneciklerinin meydana getirdiği örtü cama olan ısı transferini engeller bu da afinasyon süresini uzatır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için ortama bir miktar sülfat eklenerek kum taneleri, ergimiş cam ve gaz habbelerinin yüzey gerilimi düşürülür. Bu da kum tanelerinin ıslanmasını, habbelerin yükselmesini ve cam içinde kalan kum taneleri ile diğer harmanın reaksiyona kolayca girmesini sağlar. Afinasyonun sonlarında gaz habbelerinin yüzeye doğru yükselip dışarı atılmaları devam ederken sıcaklık sürekli olarak düştüğünden habbelerin çıkma hızı da bu oranda azalır. Diğer yandan da habbelerin içindeki gazlar ergimiş cam tarafından çözünürler. Cam soğudukça özellikle SO_3 , SO_2 ve O_2 olmak üzere daha çok çözülmüş gazı bünyesinde tutar.

- 2. Homojenizasyon:** Yüksek sıcaklıkta viskozitenin düşmesiyle habbeler ergimiş camdan hızla uzaklaşır ve habbelerin içindeki gazlar da genişlediği için hızla yüzeye çıkarken camı karıştırıp hareketlendirilirler. Bunlar fırın tabanına yakın yerlerde viskoziteyi düşürerek gaz habbelerinin genişmesini ve hızla yükselmesini sağlayarak homojenizasyona yardım ederler.

Şartlandırma: Camın şekillendirilebilmesi için uygun sıcaklığa kadar soğutulması işlemidir. Düz cam fırınlarında şartlandırma; ergitme bölgesi ve afinasyon bölgesi olarak ayrılır. Bu bölgeler düz cam fırınlarda birleştirilmiş ve daha uzundur bu da afinasyon aşamasında ergimiş camdan gazların uzaklaştırılmasına daha fazla zaman tanıyarak istenen kalite standartlarına getirilmesini sağlar.

Kalay banyosu: Banyo, dış atmosfere kapalı 57-108 mm derinliğinde kalay bulunan ergimiş camın şekillendirildiği bir havuzdur. Banyo tabanı ve tuğla aralarında da kalay bulunmaktadır. Banyoda saflığı %99.9 olan yaklaşık 190 ton kalay bulunur.

Soğutma: Cam kalay banyosuna girmeden önce dinlendirme içerisine soğutma havası üflenerek 1050-1100°C'ye kadar soğutulur. Cam banyoya 1070°C'de girip 620°C'de terk eder. Soğutma tüneli iki bölgeden oluşur. İlki; kapalı bölgedir; cam yüzeyine direk soğutma havası üflenmez (kontrollü soğutma) İkincisi; açık bölgede camın yüzeyine direk soğutma havası üflenerek cam soğutulur.

Islah (Tavlama): Camın banyoya çıkış sıcaklığından 475°C dönüşüm sıcaklığına soğutulularak getirilme işlemidir.

Camın Şekillendirilmesi:

Döküm prosesi: Ergimiş camın metal bir kalıba dökülerek kabın şeklini alması sonucu gerçekleşen şekillendirme işlemidir.

Presleme yöntemi: Geniş bir aralıkta ürün elde edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Kalıp içine konulan ergimiş cam, metal bir iç kalıp ile aşağıya itilir. Daha sonra burada bulunan metal şekillendiriciye kadar itilerek işlem tamamlanır.

Üfleme yöntemi: Şişe gibi boyun kısmı dar olan ürünlerin üretiminde kullanılan yöntemdir. Ergimiş cam, üfleme çubuğunun (pipo) bir ucuyla alınırken diğer ucuna da üfleme ağızını koyarak cam içine hava üflenmek suretiyle gerçekleştirilen şekillendirme yöntemidir.

Float şekillendirme yöntemi (yüzdürme): Çalışmamızda şimdiye kadar anlattığımız düz cam şekillendirme yöntemidir. Ergimiş camın kalay banyosundan yüzdürülerek çekilmesi işlemidir.

Merdane ile şekillendirme: Su soğutmalı merdaneler arasından ergimiş camın geçirilmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

Cam çekme yöntemi: Ergimiş cama batırılan demir çubuğun çekilmesi sonucunda cam çubuk ile demir arasında iplik oluşur ki bu hemen soğutulursa kopma veya incelme olmaz.

2.11. Otomotiv Camları

Float cam, üretim hattından çıktıktan sonra temel özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla ihtiyaca uygun olarak, ısı ve ses yalıtımı, güneş kontrolü sağlayan, darbelere dayanıklı, güvenli ve dekoratif bir malzemeye dönüştürülerek otomotivde kullanılırlar.

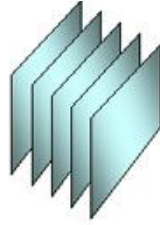
Oto camları bir otomobilin en büyük parçaları arasında yer alan emniyet ve görünüm açısından özel camlardır. Üretim açısından da oto camlarının en önemli özelliği her zaman kısa süreli bir presleme veya serbest ortamda çöktürme ile üretilmeleridir. Otomotive verilecek float cam; optik kalitesi, kalınlık toleransları ve ergitme hataları açısından yüksek beklentiyi karşılar durumda olmalıdır.

2.11.1. Temperlenmiş Yan ve Arka Cam Üretimi

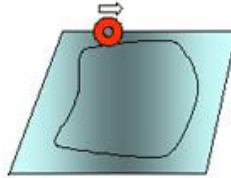
Temperleme denilen özel bir ısıl işlem ile mekanik mukavemet artırılır ve kırılma davranışı modifiye edilerek olası bir kaza sırasında yaralanma riski en aza indirilir. Temperli yan ve arka camlar istenilen kalınlıktaki float cam plakalarından CNC kesim tezgahlarında kesilerek elde edilir. Kesilen camların kenarları rodajlanır ve baskıları yapıldıktan sonra baskısı kurutulan camlar temperleme fırınlarında yaklaşık 650°C'ye kadar ısıtılır ve uygun kalıplarda şekillendirilerek basınçlı hava ile aniden soğutulup yüzey kompresyonu kazandırılırlar. Elde edilen cam optik kalite, mukavemet ve görsel hatalar açısından kontrol edilir.

2.11.2. Lamine Camların Üretimi

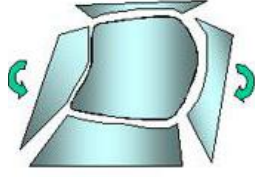
Olası bir kazada kafa çarpması sonucunda ortaya çıkabilecek yaralanmaları en aza indirecek yüksek kalite standartlarında üretilmelidirler. Üretim istenilen kalınlıktaki float camın CNC tezgahında kesilmesiyle başlar. Kenarları rodajlanan camlar tozlama ve baskı olmak üzere ikiye ayrılır. Otomobil içinde şoför tarafında kalacak olan kısım baskıya, dış tarafta kalacak kısım ise tozlamaya gönderilir. Baskıya giren camlar seramik boyayla ipek çerçeve üzerinde baskı işlemleri gerçekleştirilir ve kurutulan camlar yıkanarak birleştirmeye hazır hale getirilir. Ön camı oluşturacak olan iki ince plaka cam, birlikte bükme fırınına konur. Bükme 640°C’de özel bir ısıl işleme gerçekleşir ve sonrasında cam plakaları müşterinin isteklerine uygun şekli alır. Birleştirme, 80°C’de temiz oda koşullarında iki cam plaka arasına 0.76 mm kalınlıkta darbe sonucu parçalanmayı önleyen, otomotiv standartlarına uygun, yüksek saflıkta bir polimer olan PVB (Polivinil Bütiral) tabakasının yerleştirilmesi ile yapılır. Otoklavda 1400°C sıcaklık, 14 bar basınçta cam ve ara tabakanın bütünleşmesi sağlanır. Üç tabakalı laminat yüksek sıcaklık ve basınç altında devam eden otoklavlama prosesi sonucunda lamine ön cam haline gelir. Lamine cam üretimini aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:



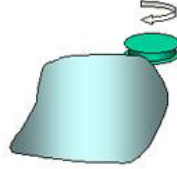
1-Cam plakalar düz cam fırınlarından gelir



2- İstenilen ölçülere göre kesilir



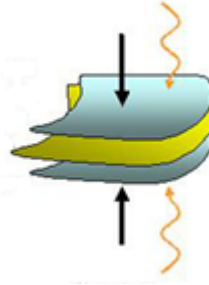
3-Kesilen plakadan fazlalık parçalar koparılır



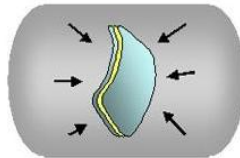
4- Kenarları rodajlanır



5- 640°C'de bükülür



6- 80°C'de iki cam arasına PVB yerleştirilir



7- Otoklavda 140°C sıcaklık ve 14 bar basınçta birleştirilir

BÖLÜM 3

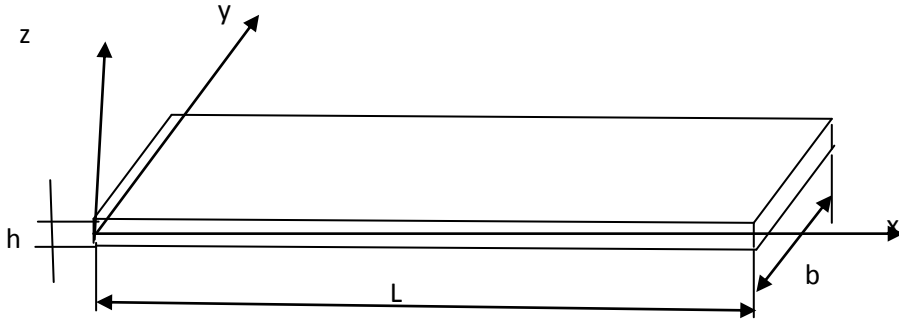
CAM ŞERİTLERİN ŞEKİL DEĞİŞTİRMESİ

3.1. Giriş

Bu bölümde camın şekillendirilmesi teorik olarak incelenecektir. Camın sürünme şekil değişiminde kullanılan modellerden ikisi açıklanmıştır.

3.2. Camın Şekillendirilmesi

Boyutları $L \times b \times h$ olan cam bir şerit gözönüne alınmıştır (Şekil 3.1.). Cam levha ısıtıldığında kendi ağırlığı ile bükülür. Bükülme miktarı sıcaklığa, zamana, cam levhanın içeriğine ve kalınlığına bağlıdır. Isıtma koşulları, kalıbın şekli ve eğimi; camın son şeklini, kaliteyi ve üretim süresini doğrudan etkiler.



Şekil 3.1. Cam şerit boyutları ve geometrisi

Camın deformasyonunun zaman bağılı ifadesi genel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Rehson ve Ginzburg, 1976):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \varepsilon_d t + \varepsilon_\eta(t) \quad (3.1)$$

Burada t zaman, $\varepsilon_d t$ deformasyonun gecikmeli elastik bileşeni $\varepsilon_\eta(t)$ deformasyonun viskoz bileşeni ve ε_0 ani elastik deformasyon bileşenini göstermektedir. Deformasyonun elastik bileşeni mukavemetten iyi bilinmekte olup aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Beer, F.P. and Johnston R., 2004)

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma(0)}{E} \quad (3.2)$$

$\sigma(0)$: yük altındaki gerilme, E: elastik modülü

Deformasyonun gecikmeli elastik bileşeni aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\varepsilon_d t = \varepsilon_d \infty (1 - M_\varepsilon t) \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'e göre deformasyonun sürünme bileşenleri bu ifadeden bulunabilir;

$$M_\varepsilon t = \exp \left(-\frac{t}{t_r} \right)^b \quad (3.4)$$

(t_r : gevşeme zamanı, b: sabit (0.5))

Toplam deformasyon için elde edilen $\varepsilon_d t$ ifadesi kullanılarak; deformasyon, cam numunenin davranışı, deformasyon dinlenmesi ve deformasyonun en önemli aralığı tahmin edilebilir. Denklem 3.3'e göre $\varepsilon_d t$ t'nin artmasıyla $\varepsilon_d \infty$ değerine yaklaşmaktadır. Geciken elastik bileşenin belirli bir değere yaklaşmasından sonra toplam deformasyon sadece viskoz bileşene bağlı olmaktadır. Yani $\varepsilon_d t$ 'nin toplam deformasyona katkısı belirli bir t_c değerinden sonra sabittir. t_c değerinin sıcaklık ile değişimi deneysel olarak elde edilmiştir. (Shutov ve Borokovskoi, 1998).

Camın viskoz deformasyonu ile ilgili literatürde iki teorik yaklaşım mevcuttur:

3.2.1. İzotropik-Viskoplastik Model

Deformasyon davranışı izotropik-viskoplastik model kullanılarak simüle edilebilir. Burada cam sıkıştırılmaz Newtonian kabul edilmektedir (Lochegnies vd., 1996).

$$\sigma = 3\eta(T)\varepsilon \quad (3.5)$$

Burada ; σ : gerilim, η : viskozite katsayısı, ε : genleme oranı, T: sıcaklığı göstermektedir.

Viskozite katsayısının sıcaklıkla değişimi Vogel-Fulcher-Tamman (VFT) denklemi ile aşağıdaki gibi açıklanmıştır;

$$\log_{\eta}(T) = A + \frac{B}{T-C} \quad (3.6)$$

Burada A, B ve C sabit sayılar olup camın içeriği ile değişmektedir. İnternetteki <http://glassproperties.com/viscosity/> adresindeki “viscosity calculator” isimli program kullanılarak belirli cam içeriklerinde sıcaklığa bağlı viskozite hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan iki farklı cam kompozisyonu için elde edilen katsayılar aşağıda verilmiştir.

Beyaz cam \longrightarrow A= -2.7459, B= 4541.98, C= 238.171

Yeşil cam \longrightarrow A= -2.43, B= 4169.1, C= 257.1

Denklem 3.5 z ile çarpılıp kesit alanı üzerinden integre edilirse;

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma z dA \quad (3.7)$$

Denklem 3.7 elde edilir. Euler-Bernoulli teorisi kapsamında birim şekil değiştirme aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_x = -zW_{xx} \quad (3.8)$$

Denklem 3.5 ve 3.8 Denklem 3.7'de yerine yazılırsa;

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} -3\eta(T)w_{xx}z^2 dA \quad (3.9)$$

Denklem 3.9 elde edilir. Burada $\int_{-h/2}^{h/2} z^2 dA$ atalet momentidir. Bu tanım denklem 3.9'da yerine yazılırsa;

$$w_{xx} = \frac{-M(x)}{3\eta T I} \quad (3.10)$$

Denklem 3.10 elde edilir. Verilen bir yükleme durumu ve sınır şartları için denklem 3.10'nun integrasyonu ile zamana bağlı çökme değeri bulunur.

3.2.2. Solomin Gevşeme Modeli

Solomin'in geliştirdiği modele göre, rastgele bir zamanda gerilim ve deformasyon değişiminin geçmişini belirlemek için denklem 3.1'i kullanabiliriz. Deformasyonun viskoz bileşeni de aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$w^c T = w^e S \quad (3.11)$$

(w^e : çökmenin elastik bileşeni, S : genleme modülü)

$$S = \frac{G(t)}{\eta(T)} \quad (3.12)$$

(G: kayma modülü)

3.3. Basit Mesnetli Şeritin Deformasyonu

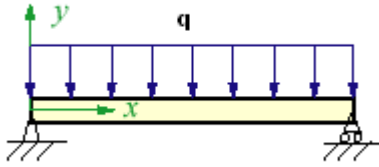
Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi basit destekli, q yayılı yüklü kiriş kullanılmıştır. Burada q yayılı yükü seçmemizin nedeni camın fırın içinde tek bir noktadan değil her noktadan ısıtılarak kendi ağırlığı etkisinde çökmesidir. Bu kiriş durumu için Denklem 3.10’nun integre edilmesinden elde edilen çökme ifadeleri aşağıdaki gibidir.

Viskoplastik model;

$$w_{p t} = w_{s t} + \frac{1000L^4 t + 3.7 5q}{384I\eta^3} \quad (3.13)$$

Solomin modeli;

$$w_{p2 t} = w_{s t} + \frac{1000L^4 G t + 3.7 5q}{384EI\eta} \quad (3.14)$$



Şekil 3.2. Yayılı q yükü ile yüklenmiş kiriş

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Üçüncü bölümde verilen teorik modellerin geçerliliğinin araştırılması amacıyla cam şeritlerin sıcaklık etkisinde kendi ağırlıklarından dolayı şekil değiştirmeleri deneysel olarak incelenmiştir.

4.2. Numunenin Hazırlanması

250x40xk mm ebatlarındaki numuneler ticari olarak araba ön camı üretiminde kullanılan numunelerden elde edilmiştir. Deneylerde k kalınlığı k=1.6 mm ve 2.1 mm olarak seçilmiştir. (Şekil 4.1.)



Şekil 4.1. Tipik şekil değiştirmiş ve değiştirmemiş cam şeritler

Tablo 4.1. Deney numunelerinin özellikleri

CAM EBATI	RENK	CAM KALINLIĞI	TEK CAM	ÇİFT CAM
40×250 mm	Yeşil+Yeşil	1,6+1,6		✓
40×250 mm	Beyaz+Beyaz	1,6+1,6		✓
40×250 mm	Beyaz	1,6	✓	
40×250 mm	Yeşil	1,6	✓	

4.3. Deneylerin Yapılışı

Numune cam şeritler Şekil 4.2.'de gösterilen fırına benzer, araba ön camlarının şekillendirildiği ticari fırınlarda şekil değiştirmiştir. Bunun için cam şeritler basit destekli sınır şartlarına sahip olacak şekilde mesnetlenmiştir. Ardından yine ticari cam için kullanılan ısıtma safhalarından geçirilerek şekillendirilmeleri sağlanmıştır. Cam, fırın içinde prebending 1,2,3 ve bending 1,2,3 olmak üzere altı aşamada ısınarak ilerler. Camın esas şekillendiği yani çökmenin gerçekleştiği kısım bending 3'tür. Cam kademeli olarak artan sıcaklık etkisiyle ısınarak ilerlerken dönüşte de aynı şekilde soğuyarak geri döner ve fırını terk eder.



Şekil 4.2. Deneylerin yapıldığı fırına bir örnek

<http://www.ventmaster.com/p-glass-bending-furnace-1096225.html>

<http://xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-Supplies-Consumables/autoglass-production.html>

4.4. Cam Şeritlerdeki Plastik Çökme ve Sıcaklığın Ölçülmesi

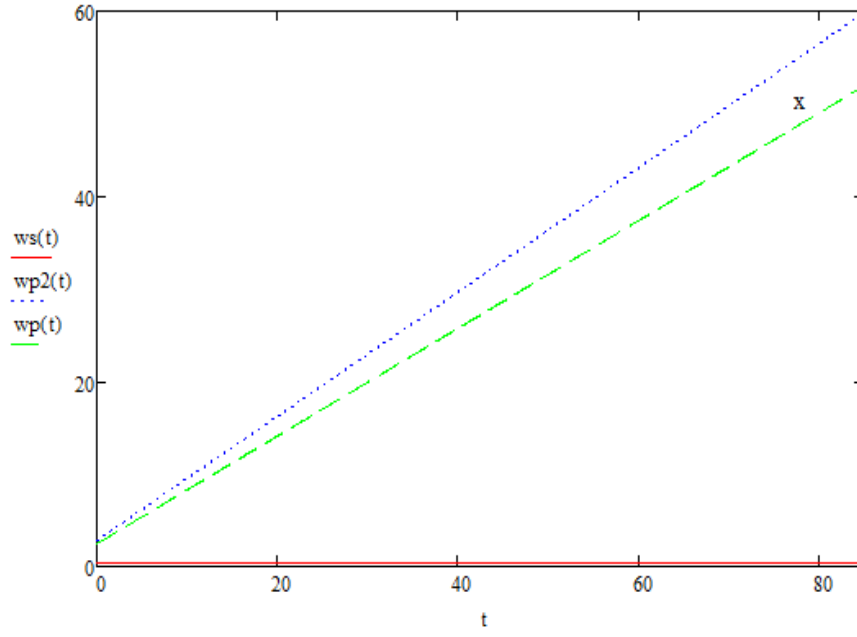
Cam şeritlerdeki şekil değişimi dijital pirometre yardımıyla ölçülürken fırın içersindeki ortam sıcaklığı ise termokupl tarafından ölçülmüştür. Fırın içersinde son 4 zonda termokupl'un okuduğu sıcaklık değerleri: 569°C, 600°C, 680°C ve 690°C'dir. Bükmenin gerçekleştiği sırada termokupl'un okuduğu değer 626.5°C'dir. bu sıcaklıklar fırın içi sıcaklıklarıdır. Birebir cam sıcaklığını ölçme imkanımız yoktur. fırına koyduğumuz camlar toplam olarak 41 dk'da alınmıştır. Bu sürenin yarısı camın ısıtılması yarısı da soğutulması için harcanmıştır. Bükme süresi ortalama olarak 78 sn'dir.

4.5. Deneysel Sonuçlar

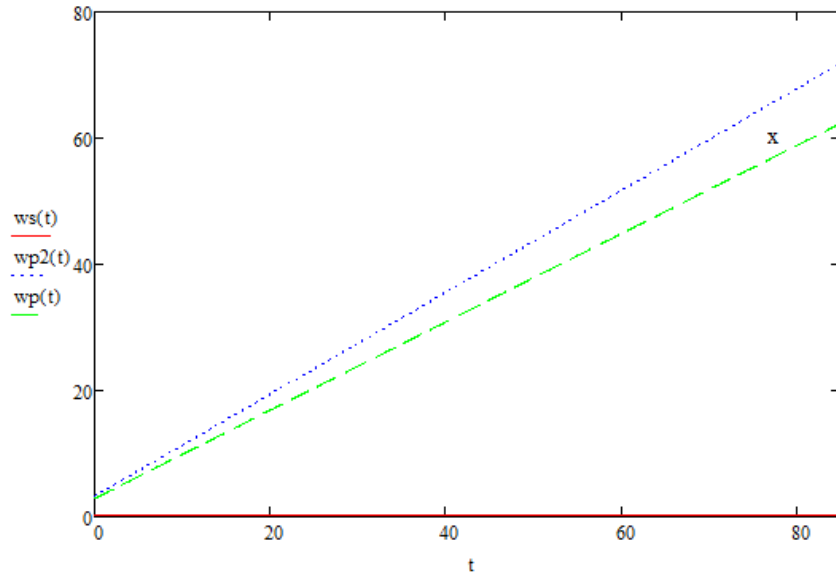
Beyaz cam için teorik modellerle ve deneysel olarak elde edilen çökme sonuçları Şekil 4.3.'de gösterilmiştir. Solomin tarafından önerilen modelin viskoplastik (Parsa vd.,2005) modelden daha yüksek değerler verdiği farkın zamanla arttığı gözlenmektedir. Deneysel sonuç teorik değerler arasında olup viskoplastik modele daha yakındır.

Şekil 4.4.'ün Şekil 4.3.'den farkı beyaz cam yerine yeşil cam için olmasıdır. Yeşil cam içindeki demir oranının fazla olmasından dolayı viskozitesi daha düşüktür ve daha çok çökmektedir. Beyaz cam ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

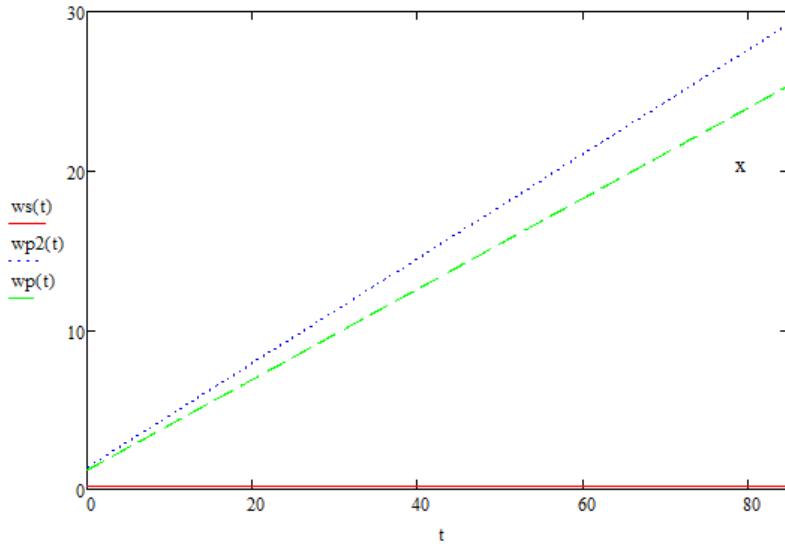
İki katmanlı beyaz camın çökmesine ait teorik ve deneysel sonuçlar Şekil 4.5'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde teorik modellerin davranışları Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'dekilere benzemekle birlikte deneysel sonucun teorik değerlerin arasında olmayıp her ikisinden de daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi deneylerde iki cam şeritin yüzeylerinin etkileşmesiyle açıklanabilir. Yüzeyler arası oluşacak sürtünme kuvveti şeritlerde çekmeye sebep olacak böylelikle cam şeritlerin çökme değerleri bir miktar küçük olacaktır.



Şekil 4.3. Beyaz camın maks. çökmesinin zamanla değişimi (608°C)



Şekil 4.4. Yeşil camın maks. çökmesinin zamanla değişimi (608°C)



Şekil 4.5. İki katmanlı beyaz camın maks. çökmesinin zamanla değişimi (608°C)

(x: deneysel sonuçlar, $w_s(t)$: zamana bağlı statik çökme, $w_p(t)$: viskoplastik modelde zamana bağlı çökme ve $w_{p2}(t)$: Solomin modelinde zamana bağlı plastik çökmeyi göstermektedir)

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada cam şeritlerin yüksek sıcaklıkta kendi ağırlıkları etkisinde sürünme şekil değiştirmeleri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Teorik ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak tartışılmıştır. Sonuç olarak; beyaz cam için incelediğimizde teorik modeller ve deneysel olarak elde edilen çökme sonuçlarına göre Solomin tarafından önerilen modelin viskoplastik modelden (Parsa vd., 2005) daha yüksek değerler verdiği farkın zamanla arttığı görülmüştür. Deneysel sonuçlarımız teorik değerler arasında yer almıştır ve viskoplastik modele daha yakındır. Deneylelerimizde kullandığımız yeşil camda çıkan sonuçlar beyaz cama benzer olmakla birlikte daha fazla çökme olduğunu göstermektedir. Bu da yeşil camın içinde Fe_2O_3 'ün fazla olmasının viskoziteyi düşürücü etki yaratmasından kaynaklanmaktadır. İki katmanlı beyaz camın çökmesine baktığımızda teorik modellerin sonuçları tek katmanlı yaptığımız örneklerle benzerlik göstermesine karşın deneysel sonuç teorik değerlerin arasında olmayıp her ikisinden de daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebi deneylerde iki cam şeritin yüzeylerinin etkileşmesiyle açıklanabilir. Yüzeyler arası oluşacak sürtünme kuvveti şeritlerde çekme zorlamasına sebep olacak böylelikle cam şeritlerin çökme değerleri bir miktar küçük olacaktır.

Eldeki imkanların kısıtlı olması sebebiyle deneysel sonuç sayısı planlananın çok altında gerçekleşmiştir. Daha kapsamlı bir çalışma için farklı sıcaklıklarda farklı sürelerde sonuçlar alınarak değerlendirme yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Shutov, A.I. and Borovskoi, A.E., 1998, "Prediction of Sheet Glass Behavior on Bending", Glass and Ceramics, 55, 5-6, 138-140.

Shutov, A.I. and Borovskoi, A.E., 1998, "Calculation of Deformation in Glass Plate in Bending by Gravity", Glass and Ceramics, 55, 5-9, 276-277.

Shutov, A.I., Borovskoi, A.E., and Frank, A.N., 1999, "Choice of a Model of Sheet Glass Deformation in Production of Bent Articles", Glass and Ceramics, 56, 1-2, 11-13.

Parsa, M.H., Rad, M.R., Shahhosseini, M.R., and Shahhosseini, M.H., 2005, "Simulation of Windscreen Bending Using Viscoplastic Formulation", Journal of Materials Processing Technology, 170, 298-303.

Shutov, A.I. Todorova V.L. and Borovskoi, A.E., 1997, "Relationship Between The Strain Constant and Viscosity of Glasses Above The Glass Transition Temperature", Glass and Ceramics, 54, 9-10, 276-277.

Shutov, A.I., Belousov, Yu.L. and Todorov, V.L., 1997, "An Engineering Procedure to Calculate Strain in Glass Above The Glass Transition Temperature", Glass and Ceramics, 54, 3-4, 77-78.

Rekhson, S.M. and Ginzburg, V.A., 1976, "Relaxation of Stress and Deformation In Stabilized Silicate Glass", Fiz.Khim Stekla, 5(2), 431-438.

Lochegnies, D., Moreau, P. and Oudin, J., 1996, "Finite Element Strategy for Glass Sheet Manufactured by Creep Forming", Communications in Numerical Methods in Engineering, 12, 331-341.

Beer, F.P. and Johnston, R., 2004, "Mechanics of Materials", McGraw Hill.

Milli Eğitim Bakanlığı, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, 2008, "Seramik Ve Cam Teknolojisi-Camın Kimyasal Yapısı"

Şişecam Eğitim Müdürlüğü Cam Teknolojisine Giriş Notları

http://www.trakyacam.com.tr/Otomotiv_Camlar/tr/otomotiv_camlari_hakkinda.htm

<http://www.ventmaster.com/p-glass-bending-furnace-1096225.html>

http://xinology.com:888/Glass-Processing-Equipments-SuppliesConsumables/autoglass_production.html

<http://glassproperties.com/viscosity/>

<http://www.hindawi.com/journals/acmp/2008/817829/fig4/>

<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/Glass/glass.html>

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221903007131>

ÖZGEÇMİŞ

Buket ERKUŞ, 1987 yılında Kırklareli’de doğdu. Orta öğrenimini Kırklareli Atatürk Süper Lisesi’nde tamamladı. 2009 yılında Dumlupınar Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2009 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinin Makine Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı.