

**KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİNDE DÖKÜM VE MODEL
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Necati YALÇIN

**DOKTORA TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2006
ANKARA**

Necati YALÇIN tarafından hazırlanan KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİNDE DÖKÜM VE MODEL PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

Prof. Dr. Süleyman TEKELİ
Tez Yöneticileri

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Senay TAŞÇIOĞLU_____

Üye : Prof. Dr. Burhanettin İNEM _____

Üye : Prof. Dr. Ercan CANDAN_____

Üye : Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN_____

Üye : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE _____

Tarih : / / 2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Necati YALÇIN

KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİNDE DÖKÜM VE MODEL PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Necati YALÇIN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2006

ÖZET

Genişleyebilen polistiren (GPS) tanelerinin enjeksiyonla kalıplanması ile elde edilen modeller köpük model döküm yöntemiyle metal döküm parçalarının üretimi için kullanılmaktadır. Üretilen parçada tane kaynaması köpüğün bozunması sırasında oluşan sıvı atık ve tane büzülmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca tane kaynaması köpük modelin çekme ve kırılma özelliklerini de önemli bir şekilde etkilemektedir. Polistirende tane kaynaması ön şişirme süresi, kalıplama süresi ve basıncı ve model yoğunluğu gibi birçok parametreye bağlıdır.

Bu çalışma; köpük model döküm yönteminde (KMDY) model malzemesi olarak kullanılan GPS'nin ön şişirme süresi, kalıplama süresi ve basıncı ve yoğunluğun tane kaynaması, mekanik özellikler, termal özellikler ve mikroyapı üzerine etkisini içermektedir.

Standard çekme numuneleri (ASTM-D638) değişik ön şişirme süreleri (15, 30 ve 60 s), kalıplama süreleri (20, 30 ve 40 s), kalıplama basınçları (0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm) ve model yoğunluklarında (26,20, 30,70 ve 39,07 kg/m³) ham GPS'den hazırlanmıştır.

Polistiren modelin termal bozunum karakteristiğini belirlemek için termo gravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizleri kullanılmıştır. Parçaların mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen polistiren modelin tane kaynamasını belirlemek için mikroyapı ve ağırlık kaybı analizleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre; Ham polistiren granüllerin ön şişirme süresi arttıkça tanelerin hacmi artmıştır. Polistiren tanelerin ön şişirme süresi, model yoğunluğu, kalıplama basıncı ve süresinin artmasıyla tane kaynaması, çekme dayanımı ve uzama değerlerinde artış meydana gelirken taneler arası boşluklarda azalma gözlenmiştir. Artan ön şişirme süreleri atık polistiren miktarını artırmış fakat % 50 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değerlerini değiştirmemiştir. Kalıplama süresi polistirenin atık miktarını etkilememiştir. Ancak ön şişirme ve kalıplama sürelerinin artmasıyla bozunumun entalpileri artmıştır. Ham, ön şişirilmiş ve kalıplanmış numunelerin tamamında bozunum 350-450 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir.

Bilim Kodu : 710.3.011
Anahtar Kelimeler : Köpük Model, Dolu Döküm, Polistiren,
Genişleyebilen Polistiren, Tane Kaynaması
Sayfa Adedi : 123
Tez Yöneticileri : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE
Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

**INVESTIGATION OF CASTING AND PATTERN PARAMETERS IN LOST
PATTERN CASTING PROCCESS**

(Ph.D. Thesis)

Necati YALÇIN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

July 2006

ABSTRACT

The patterns obtained by injection molding of expandable polystyrene (EPS) beads are used for the production of metal cast parts in the lost foam process. Bead fusion in the produced part has an important effect on the bead collapse and viscous residue formation during the degradation of the foam. It has also a significant effect on the tensile and fracture properties of the foam pattern. The bead fusion of polystyrene depends on several parameters such as pre-expansion time, molding time and pressure and pattern density.

This thesis comprises of a study of the effect of pre-expansion time, molding time, pressure and pattern density of expandable polystyrene used pattern material in lost foam pattern casting process on bead fusion, mechanical properties, thermal properties and microstructure.

Standard tensile samples (ASTM-D638) were prepared from raw expandable polystyrene subjected to various pre-expansion times (15, 30 and 60 s), molding times (20, 30 and 40 s), molding pressures (0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2 atm) and pattern densities (26,20, 30,70 and 39,07 kg/m³).

Thermo gravimetric (TGA) and Differential Scanning Calorimetric (DSC) analysis have been used to define thermal degradation characteristics of the polystyrene pattern. Tensile test of specimens were achieved due to mechanical properties. The weight lost and microstructures of obtained polystyrene pattern were also analyzed to define bead fusion.

According to the obtained results; the volume of the bead has increased with increasing pre-expansion time of raw granules. It was observed that the porosities between beads in polystyrene pattern decreased while values of the bead fusion, the tensile strength and elongation of polystyrene pattern increased with increasing pre-expansion time, pattern density, molding time and molding pressure of polystyrene. Although the amount of polystyrene waste has increased with increasing pre-expansion time, the temperature at which 50 % weight lost of pre-expanded polystyrene has not changed. The molding time has not affected the amount of polystyrene waste, however the degradation enthalpy increased with increasing pre-expansion and molding times. Degradation of the raw, pre-expanded and molded polystyrene specimens have been taken place at temperatures between 350 and 450 °C.

Science Code : 710.3.011
Key Words : Lost foam casting, full mould, polystyrene,
expandable polystyrene, bead fusion
Page Number : 123
Advisers : Assoc. Prof. Dr. Kadir KOCATEPE
Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez yöneticilerim Doç. Dr. Kadir KOCATEPE ve Prof. Dr. Süleyman TEKELİ'ye, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Senay TAŞCIOĞLU, Prof.Dr. Burhanettin İNEM, Prof. Dr. Ercan CANDAN ve Doç. Dr. Mehmet ERDOĞAN'a, hiçbir zaman manevi desteğini esirgemeyen eşime, deney sisteminin kurulmasında kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Makine Mühendisi Musa ÖZER'e ve Öğr. Gör. Satılmış YAMAN'a, polistiren granüllerini yurt dışından getirten Nova Kimyasal A.Ş'den Mehmet PARLAK beye, şişirme kalıplarının yapımında yardımını esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. Yunus KAYIR'a, ayrıca çekme deneylerime yardımcı olan Doç. Dr. Metin GÜRÜ'ye, TGA ve DSC deneylerimi yaptığım Roketsan AŞ'ye ve Kimya Mühendisi Faruk YILDIRIM'a, bu çalışmaya maddi destek sağlaya Gazi Üniversitesi Araştırma Fonu Saymanlığına, Metal Eğitimi Bölümünde çalışan akademik ve idari personele, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxii
1. GİRİŞ	1
2. KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİ	3
2.1. Yöntemin Uygulanması.....	4
2.2. Köpük Model Oluşturma	6
2.2.1. Köpük model	6
2.2.2. Kaplama özellikleri	12
2.2.3. Model salkımının kum içerisine yerleştirilmesi.....	14
2.2.4. Kum sistemi.....	14
2.3. KMDY'nin Avantajları	15
2.4. KMDY Değişkenleri.....	17
2.4.1. Döküm malzemesi.....	17
2.4.2. Kaplama malzemesi	18
2.4.3. Köpük model yoğunluğu	19
2.4.4. Döküm sıcaklığı	20

	Sayfa
2.4.5. Döküm kumunun özellikleri.....	21
2.4.6. Kum sıkıştırma yöntemi	22
2.4.7. Metal akış hızı	22
2.4.8. Metalin statik basıncı	23
2.4.9. Yolluk sistemi	23
2.5. Metal-Model Etkileşimi	24
2.6. Polimerlerin Mekanik Özellikleri	27
2.6.1. Genişleyebilen polistirenin yapısı ve özellikleri.....	28
3. MALZEME VE METOD	30
3.1. Malzeme	30
3.2. Ön Şişirme Ünitesi ve Buhar Kazanı.....	30
3.3. Şişirme Kalıbı.....	32
3.3.1. Kalıplama ünitesi	33
3.4. Granüllerin Ön Şişirme işlemi	34
3.5. Ön Şişirilmiş Granüllerin Kalıplanması.....	35
3.6. Çekme Deneyi	35
3.7. Termo Gravimetrik Analiz (TGA) Deneyi.....	38
3.8. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi.....	38
3.8. Ağırlık Değişim Deneyleri	39
3.9. Mikroyapı Deneyleri	40
4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	41
4.1. Ön Şişirme Süresi ile Granül Hacim Değişimi.....	41
4.2. Çekme Deneyi Sonuçları	42

	Sayfa
4.2.1. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları.....	42
4.2.2. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları.....	48
4.2.3. D-(30, 60)-(0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları.....	52
4.3. TGA ve DSC Sonuçları.....	60
4.3.1. TGA sonuçları	60
4.3.2. Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deney sonuçları	62
4.4. Ağırlık Değişim Sonuçları	65
4.5. Mikroyapı Sonuçları	73
4.5.1. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları	73
4.5.2. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları.....	84
4.5.3. D-(30, 60)-(0,8, 0,9,1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları	88
5. TARTIŞMA.....	100
5.1. Ham Polistiren Granüllere Uygulanan Ön Şişirme Süresi	100
5.2. Model Yoğunluğu etkisi	101
5.3. Model kalıplama süresi.....	103
5.4. Model kalıplama basıncı.....	107
5.5. TGA ve DSC Analizi Etkisi	110
5.6. Ağırlık Değişimi	111
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113

	Sayfa
KAYNAKLAR	116
ÖZGEÇMİŞ	122

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Değişik ham malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları	7
Çizelge 2.2. Döküm malzemelerine göre döküm sıcaklığı ve model yoğunluğu	8
Çizelge 3.1. Kullanılan GPS malzemesinin genel özellikleri.....	30
Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan numune grupları	37
Çizelge 4.1. Ön şişirme işlemine göre granüllerde meydana gelen hacimsel değişim	41
Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonuçları.....	43
Çizelge 4.3. 15 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 39,07 kg/m ³ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları.....	45
Çizelge 4.4. 15, 30 ve 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 30,7 kg/m ³ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları	49
Çizelge 4.5. 30 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 26,2 kg/m ³ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları	53
Çizelge 4.6. 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 26,2 kg/m ³ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren (GPS) malzemesinin çekme deney sonuçları	57
Çizelge 4.7. Herhangi bir işlem görmemiş ham, 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numunelerin TGA deney sonuçları.	61

Çizelge**Sayfa**

Çizelge 4.8. Herhangi bir işlem görmemiş ham, 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numunelerin DSC deney sonuçları	64
Çizelge 4.9. Genişleyebilen polistiren malzemede zamana bağlı olarak ön şişirilmiş granüllerden elde edilen numunelerin ağırlık değişimi.....	72

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yöntemin döküm aşamaları	6
Şekil 2.2. Ön şişirilmiş malzemenin kalıp içerisine doldurulması	9
Şekil 2.3. Taneler arası buhar geçişi ve kaynamasının şematik olarak gösterimi	10
Şekil 2.4. Metal akış hızına göre oluşan döküm hataları.....	19
Şekil 2.5. Kum kalıp içerisindeki modelin sıvı metal ile doldurulması	25
Şekil 2.6. Metal-model ara yüzeyindeki değişimin şematik olarak gösterimi.....	26
Şekil 2.7. Polistirenin tekrarlanan zincir yapısı.....	28
Şekil 3.1. Granüllerin buharla genişletildiği ön şişirme ünitesi	31
Şekil 3.2. Ön şişirme ve kalıplama deneylerinde kullanılan buharın elde edildiği buhar kazanı	32
Şekil 3.3. ASTM D638 standardına göre imal edilen çekme numunesi kalıbı.....	33
Şekil 3.4. Basınç ve buhar kontrollü kalıplama ünitesi	34
Şekil 3.5. ASTM D638 standardına göre çekme numunesi ölçüleri.....	36
Şekil 4.1. Ön şişirme sürelerine göre granüllerde meydana gelen hacimsel değişim.....	41
Şekil 4.2. Y-15-0,8 numunelerin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	45
Şekil 4.3. Y-15-1,0 numunelerin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	46
Şekil 4.4. Y-15-1,1 numunelerin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Y-15-1,2 numunelerin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme	47
Şekil 4.6. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1 1,2) numunelerin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişim	47
Şekil 4.7. O-15-1,1 ve 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri	50
Şekil 4.8. O-30-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri	50
Şekil 4.9. O-60-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri	51
Şekil 4.10. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerin ön şişirme işlemi ile çekme dayanımı değişimi	51
Şekil 4.11. D-30-0,8-40 numunesinin çekme eğrisi	54
Şekil 4.12. D-30-1,0 numunelerinin 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	54
Şekil 4.13. D-30-1,1 numunelerinin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	55
Şekil 4.14. D-30-1,2 numunelerinin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	55
Şekil 4.15. D-30-(1,0, 1,1, 1,2) numunelerinin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişim	56
Şekil 4.16. D-60-1,0 numunelerinin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	58
Şekil 4.17. D-60-1,1 numunelerinin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	58
Şekil 4.18. D-60-1,2 numunelerinin 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen çekme eğrileri.....	59
Şekil 4.19. D-60-(1,0, 1,1, 1,2) numunelerinin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişim	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20. Ön şişirilmemiş numunelerin % ağırlık değişimi TGA eğrisi.....	60
Şekil 4.21. 15, 30, 60 s ön şişirilmiş malzemenin % ağırlık değişimi TGA eğrisi.....	61
Şekil 4.22. 15 s ön şişirilmiş ve 20, 30, 40 s kalıplama süresine tabi tutulmuş numunelerin % ağırlık değişimi TGA eğrisi.....	62
Şekil 4.23. Ön şişirilmemiş malzemenin DSC eğrisi	63
Şekil 4.24. 15, 30, 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş malzemelere ait DSC eğrisi	64
Şekil 4.25. 20, 30 ve 40 s kalıplama süresine tabi tutulmuş malzemelere ait DSC eğrisi	65
Şekil 4.26. D-30-1,0-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	67
Şekil 4.27. D-30-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	67
Şekil 4.28. D-30-1,2-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	68
Şekil 4.29. O-(15, 30, 60)-1,1-40 numunelerinin ağırlık değişimi.....	69
Şekil 4.30. Y-15-1,0-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	70
Şekil 4.31. Y-15-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	70
Şekil 4.32. Y-15-1,2-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi.....	71
Şekil 5.1. Kalıplama ünitesinde uygulanan basınçlara karşılık gelen sıcaklık değerleri	108

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Y-15-0,8-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	74
Resim 4.2. Y-15-0,8-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	75
Resim 4.3. Y-15-0,8-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	75
Resim 4.4. Y-15-0,8-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	76
Resim 4.5. Y-15-0,8-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	76
Resim 4.6. Y-15-1,0-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	77
Resim 4.7. Y-15-1,0-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	78
Resim 4.8. Y-15-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	78
Resim 4.9. Y-15-1,0-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	79
Resim 4.10. Y-15-1,0-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	79
Resim 4.11. Y-15-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	80

Resim	Sayfa
Resim 4.12. Y-15-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	81
Resim 4.13. Y-15-1,2-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	81
Resim 4.14 Y-15-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	82
Resim 4.15. Y-15-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	82
Resim 4.16. Y-15-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	83
Resim 4.17. Y-15-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	83
Resim 4.18. O-15-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	85
Resim 4.19. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	85
Resim 4.20. O-60-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	86
Resim 4.21. O-15-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	86
Resim 4.22. O-30-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	87
Resim 4.23. O-60-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	87

Resim	Sayfa
Resim 4.24. D-30-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	88
Resim 4.25. D-30-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	89
Resim 4.26. D-30-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	89
Resim 4.27. D-30-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	90
Resim 4.28. D-30-1,2-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	91
Resim 4.29. D-30-1,2-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	91
Resim 4.30. D-30-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	92
Resim 4.31. D-30-1,2-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	92
Resim 4.32. D-30-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	93
Resim 4.33. D-30-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	93
Resim 4.34. D-60-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	94
Resim 4.35. D-60-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	95

Resim	Sayfa
Resim 4.36. D-60-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	95
Resim 4.37. D-60-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	96
Resim 4.38. D-60-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	96
Resim 4.39. D-60-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	97
Resim 4.40. D-60-1,2-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	98
Resim 4.41. D-60-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	98
Resim 4.42. D-60-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	99
Resim 5.1. D-30-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	105
Resim 5.2. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	105
Resim 5.3. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	106
Resim 5.4. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü.....	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
Kısaltmalar	Açıklama
KMDY	Köpük model döküm yöntemi
TGA	Thermo gravimetric analysis
DSC	Differential scanning calorimetric
AFS	American foundryman society
GPS	Genişleyebilen polistiren
EPS	Expandable polystyrene
ASTM	American society for testing of materials
CNC	Computer numerical control
SEM	Scanning electron microscopy

1. GİRİŞ

Bağlayıcısız kuru kum içerisine polistiren köpük model yerleştirilerek gerçekleştirilen “Köpük Model Döküm Yöntemi” (KMDY) döküm endüstrisinde önemini giderek arttırmaktadır. KMDY’nin pazarı dünyada artan bir eğilim içerisinde ve önümüzdeki yıllarda artışın daha da devam edeceği düşünülmektedir [1-4].

Geleneksel model kalıpcılık yöntemlerinden KMDY’ne geçerek üretime başlamak uzun zaman aldığı gibi pahalı ve zahmetlidir. Yöntemin en önemli harcamaları model yapımı için gerekli olan cihaz ve takımlar ile üretim aşamalarındaki optimum değişkenlerin belirlenmesidir. Gelişmekte olan KMDY’de sıvı metal sıcaklığı, döküm malzemesi, modelin kalıplamadaki yönlendirme şekli ve yolluk sistemi, metalostatik basınç, kaplama malzemesi ve geçirgenliği, model yoğunluğu, modeldeki porozite miktarı, model oluşturma işleminde ön şişirme ve kalıplama için sıcaklık, basınç, süre belirlenmesi gerekli olan değişkenlerdir.

KMDY ile üretilen parçalarda yüksek döküm kalitesini yakalamak, temel yöntem değişkenlerinin optimum değerlerinin belirlenmesiyle mümkündür. En önemli problem döküm sırasında ergimiş metalin sıcaklığından dolayı kum kalıp içerisinde yanan köpük model malzemesidir. Köpük model malzemesinin cinsi, yoğunluğu ve şişirici madde miktarı ile birlikte köpük modeli yolluk sistemine bağlamada kullanılan yapıştırıcı malzemesinin özellikleri ve modeldeki porozite miktarı döküm parçanın kalitesini ve sağlamlığını belirleyen en önemli model değişkenleridir [5, 6]. KMDY’de model malzemesinin yanma ve buharlaşma oranı, meydana getirdiği gaz ve atık malzeme miktarı ve tanelerin kaynama derecesinin model ve döküm kalitesine etkisi tam olarak bilinmemekle birlikte bu konular üzerine yeterli araştırmalar da yapılmamıştır.

Köpük model ön şişirilmiş hücresel polistiren tanelerin birbirine kaynamasından meydana gelmektedir. Köpük modelin mekanik özellikleri hücresel köpük taneleri arasındaki kaynama derecesine bağlıdır. Köpük modeldeki tane kaynaması köpüğün özellikleri üzerine önemli etkiye sahiptir. Tanelerdeki kaynama derecesi köpüğün çekme, basma, kırılma ve izolasyon gibi özelliklerini etkilemektedir. Tanelerin birbirine kaynamasını etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar pentan miktarı, kalıplama zamanı, kalıplama sıcaklığı ve basıncıdır. Özellikle camsı geçiş sıcaklığının (T_g) üzerinde pek çok faktör amorf termoplastikler arasındaki kaynamaya katkı sağlamaktadır. Bunlar yüzey teması, yüzeyin yeniden düzenlenmesi, ıslatması, kontrollü difüzyonu ve üniform olmayan dağılımı içermektedir. Yüzeylerin belirli sıcaklık ve basınç altındaki teması yüzeyde viskoelastik deformasyonu meydana getirmekte ve artan zamanla temas alanındaki büyüme arayüzeydeki potansiyel engelleri elimine ederek polimer zincirleri arasında sağlam bir temas kurulabilmektedir. Zincirler difüzyonla serbest olarak arayüzeyde hareket ederek taneler arası yük transferini oluşturmaktadır. Bundan dolayı tane arayüzeylerinde moleküllerin fiziksel düzenlenmesinde açık bir farklılık olmaktadır. Bu farklılıklar polimerlerin karakteristik bozunmasını etkileyebilmekte ve KMDY’de döküm sonrası oluşabilecek hata şeklini ve miktarını belirlemektedir [6-8].

Bu çalışmanın amacı KMDY’de köpük modelin mekanik özelliklerini, termal karakteristiklerini ve polistiren tane kaynamasını geliştirmektir. Bu amaçla köpük modelin kalıplama parametreleri olan değişik ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresi ve model yoğunluğunun modelin mekanik özelliklerine, tane kaynamasına ve termal özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır.

2. KÖPÜK MODEL DÖKÜM YÖNTEMİ

KMDY ülkemizde çok yeni kalıplama yöntemi olup yalnızca birkaç kuruluş tarafından kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin kullanımı Avrupa, Amerika ve Uzak doğuda (Japonya da Honda ve Toyota) hızla artmaktadır.

Bağlayıcısız kum kalıp olarak kullanılan köpük model döküm yöntemi (KMDY) geleneksel döküm tekniklerine ve net şekilli parça üretimine bir alternatif olarak görülmektedir. KMDY ilk defa yaş kum kalıp içerisine polistiren köpük yerleştirilerek ve model kalıptan çıkarılmadan uygulanmıştır. Bu yöntem 1958 yılında H.F. Shroyer tarafından boşluksuz döküm olarak adlandırılmış ve patentleşmiştir [9]. Polistiren köpüğün kalıp içerisinden ayrılması ergimiş metalin köpük modeli yakmasıyla gerçekleşir. Ergimiş metal köpük modelin ve modele bağlanmış olan bütün yolluk sisteminin yerini alır. Yöntemin uygulanmaya başlandığı ilk yıllarda kullanım alanı sınırlı olmuş ve sadece birkaç çeşit parçanın dökümü için kullanılmıştır. Bu sorunların nedenleri modellerin elde işlenmesi, model olarak ambalaj için üretilen polistiren malzemesinin kullanılması ve bu malzemenin çok fazla gaz ve sıvı atık oluşturması ve bu atıkların kalıp içerisinden tahliyesinde sorunların oluşturduğu gözenekli döküm parçaların elde edilmesidir [3, 10-24].

KMDY üzerine en etkili çalışma 1964 yılında T.R. Simith tarafından gerçekleştirilmiştir [25]. Bu çalışma ile bağlayıcısız kumla dökümün yolu açılmıştır. Bu çalışma sonunda KMDY döküm sektöründe alternatif bir yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Kaybolan köpük model döküm yöntemi ilk boşluksuz döküm yöntemi (Cavity-less Proses) olarak adlandırılmış ve daha sonra dolu döküm yöntemi (Full Mold Proses) olarak isimlendirilmiştir [11]. Kaybolan köpük model döküm yöntemi literatürde değişik isimlerle karşımıza çıkmaktadır. Bunlar dolu döküm (full mold), boşluksuz döküm, buharlaşan model dökümü (evaporative

pattern casting), kaybolan köpük dökümü (lost foam casting), kuru döküm yöntemi (dry cast process), vb isimler örnek olarak verilebilir [19].

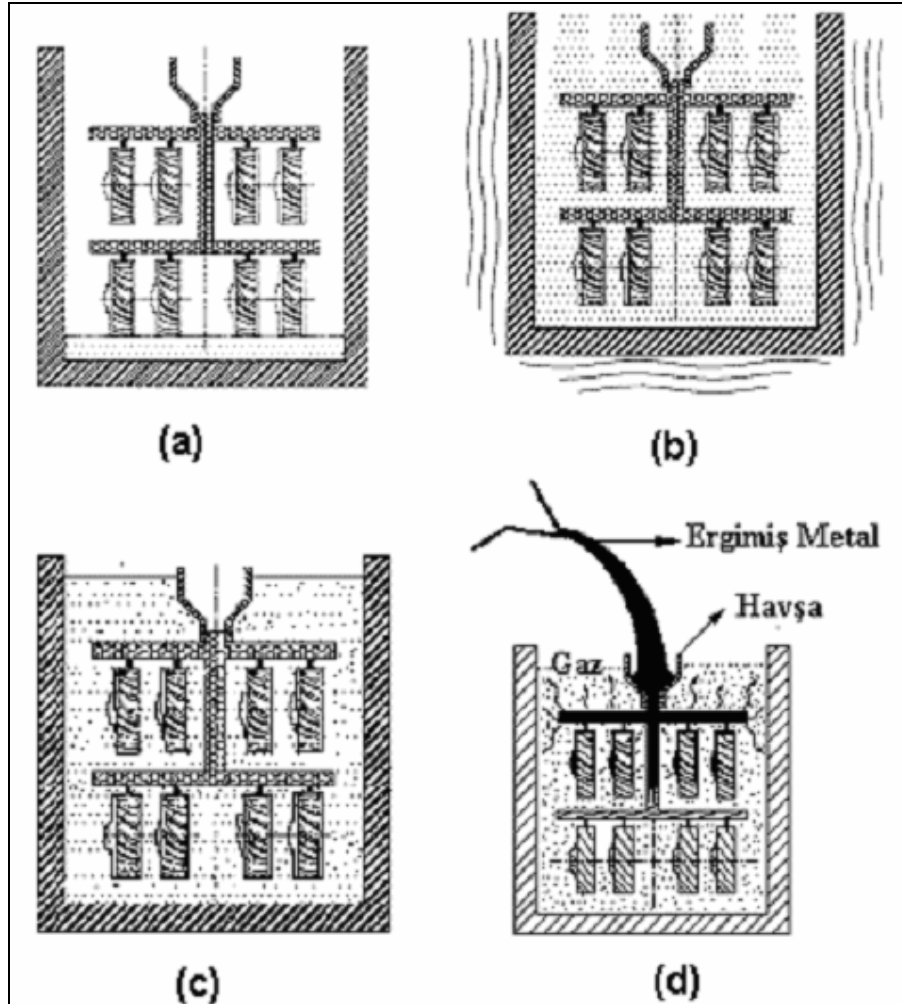
1960 ve 1970'li yıllarda KMDY otomotiv şirketlerinin araştırmalarında önemli bir yer tutmaya başlamış olup bu yıllarda KMDY ile çok az parça üretimi gerçekleştirilmiştir. 1970'li yılların sonlarına doğru otomobil endüstrisinde özellikle büyük hacimli otomobil parçalarının dökümünde yaş kum ile KMDY'nin kullanımı giderek artmaya başlamıştır [1, 12]. Bağlayıcısız kuru kumla köpük model döküm yöntemini 1980'li yıllarda bir çok şirket kullanmayı amaçlasa da, bunların çoğu uygulamada başarı sağlayamamışlardır. Fakat ısrarlı çalışmalar sonucunda bazı şirketler bağlayıcısız kumla yapılan dökümlerde ilerleme sağlayarak döküm maliyetini düşürmeyi başarmışlardır. Bununla beraber KMDY 1981 yılında Simith'in patentinin süresinin dolmasıyla ve teknolojik ilerlemelerle birlikte hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır [22]. 1989'da içlerinde Amerikan Dökümcüler Birliği (American Foundrymen Society), üretim sektörünün ve üniversitelerin bulunduğu bir konsorsiyum oluşturularak, ileri teknoloji bilimleriyle bu yöntem ilişkilendirilmiştir. American Foundrymen Society (AFS) 1990 yılında bu yöntemin harcanabilen (kaybolan) model dökümü (expendable pattern casting) adının kullanılmasına karar vermiştir [1].

2.1. Yöntemin Uygulanması

Dökümler köpük modelin tam bir temsili olduğu için KMDY'deki ilk ve en önemli basamak kaliteli köpük model üretimidir. Köpük modeller alüminyum kalıp içerisine granüllerin enjeksiyonu ve daha sonra bu granüllerin ısıtılıp birbirine kaynaması ile oluşmaktadır. Bu işlemde kullanılan cihazlar paketleme ve izolasyon malzemesi üretmek için kullanılan cihazların benzeridir [12, 22, 24].

Yüzey kalitesi, taneler arası kaynama, ölçü tamlığı ve model yoğunluğu gibi parametreler kaliteli bir modelin elde edilebilmesi için sürekli olarak kontrol altında tutulmalı ve üretimin her aşaması kontrol edilmelidir [7, 22].

Köpük modeller döküm için birleştirilmekte ve birleştirme elemanı olan yolluk sisteminin parçaları benzer tip ve yoğunluktaki polistiren köpük malzemesinden hazırlanmaktadır. Model sistemi (salkımı) geçirgen bir refrakter malzeme ile kaplama ve kurutma işlemini takiben hassas bir şekilde özel olarak hazırlanan ve tabanında 25-75mm kumla yastıklanan tek parçalı derece içerisinde yerleştirilerek sabitlenmektedir, Şekil 2.1.a [22, 24]. Model sistemi sabitlendikten sonra etrafı kuru kum ile doldurulmakta ve dolma işlemi sırasında derece vibrasyona tabi tutularak kumun model salkımı arasındaki boşluklara akması ve kumun sıkışması sağlanmaktadır, Şekil 2.1.b. Vibrasyon işleminden sonra (Şekil 2.1.c) önceden hazırlanan havşa dikey yolluğun üst kısmına yerleştirilmekte ve derece döküm işlemi için döküm alanına taşınmakta ve havşanın içinden polistiren köpük model salkımı üzerine ergimiş metal dökülmektedir. Ergimiş metal köpük modeli sıcaklığıyla parçalamakta ve modeli yakarak model yerini almaktadır. Köpük model bu yanma sırasında gaz ve sıvı polistirene dönüşür ve kaplama aracılığıyla kalıp dışına atılır, Şekil 2.1.d. Döküm parçalar geleneksel dökümde olduğu gibi benzer sürelerde soğumaya bırakılmaktadır. Soğuma işleminin tamamlanmasıyla döküm parça etrafındaki kumu boşaltmak için derece ters çevrilmekte ve parçaların yollukları kesilerek temizlenmektedir [22, 24].



Şekil 2.1. Yöntemin döküm aşamaları, a) salkımın kum üzerine sabitlenmesi, b) kumun doldurulması ve vibrasyon, c) döküme hazır derece, d) ergimiş metalin kalıba dökümü [22]

2.2. Köpük Model Oluşturma

2.2.1. Köpük model

Genişleyebilen polistiren (Expandable Polystyrene) birçok uygulama alanlarının yanında köpük model üretiminde de tercih edilmektedir. Gelişmekte olan değişik uygulamalar için farklı köpük malzemeleri mevcuttur. Çizelge 2.1'de farklı özelliklere ve kullanım alanlarına sahip "Genişleyebilen Polistiren"

(GPS) çeşitleri verilmiştir. Bunlardan “T” ve “X” GPS malzemeleri köpük model üretimi için kullanılmaktadır. Bu malzemeler köpük model kalıplarında ince kesitli parça üretimi ve iyi yüzey kalitesi elde etmek için kullanılırlar.

Çizelge 2.1. Değişik ham GPS malzemelerin özellikleri ve kullanım alanları [22]

Malz. Cinsi	Ham malzeme Boyutu (mm)	24 kg/m ³ yoğunluk için boyut (mm)	Kullanım alanı
A	0,83-2,0	2,5-5,9	Yalıtım
B	0,58-1,2	1,7-3,5	Paketleme
C	0,33-0,71	1,0-2,1	Kahve kapları
T	0,25-0,51	0,74-1,5	Kaplar ve Köpük model
X	0,20-0,33	0,61-1,0	Köpük model

Ham durumdaki genişleyebilen polistirenin yoğunluğu 640 kg/m³ 'tür. Polistiren granülleri içerisinde ön şişirme ve kalıplamada tanelerin genişleyebilmesi için şişirici madde emdirilir. Şişirici madde miktarı %6-9 arasındadır [26]. KMDY’de GPS’nin faydalı olabilmesi için model yoğunluğunun 16-27 kg/m³ arasında olması gerekir. Döküm malzemesine göre döküm sıcaklığı ve model yoğunluğu Çizelge 2.2’de verilmiştir. Bu ham malzemenin ön şişirilmesi ile elde edilebilmektedir. Ham GPS bir ısı küresi içerisinde belirli bir hızda karıştırılır ve ısı dağılımıyla küreleşir. Plastik tanelerin yumuşatılması ve içindeki gazın genişletilmesiyle taneler şişer ve yoğunlukta azalma meydana gelir [22].

Köpük model üretiminde göz önünde bulundurulması gerekli parametrelerin en önemlileri ön şişirme süresi, köpük model yoğunluğu, kalıplama zamanı, kalıplama basıncı ve sıcaklığı ve polistiren granülün özellikleridir [6-8, 27, 28]. Şişirme işlemi tamamlanmış 16 kg/m³ yoğunluğundaki bir köpüğün ilk hacmine oranı 40:1’a kadar çıkmaktadır. Ön şişirme işleminden sonra malzeme yoğunluk kontrolü için boşaltılır ve tartılır. Bir ürünün maliyetinin kontrolü açısından köpük modelin yoğunluğu önemlidir. Tutarlı döküm sonuçları için GPS yoğunluk toleransı +%2 ve %-2 arasında olmalı ve

yoğunluk kontrol altında tutulmalıdır. Bu zamanın ve sıcaklığın kontrolü ile başarılabılır [22, 29].

Çizelge 2.2. Döküm malzemelerine göre döküm sıcaklığı ve model yoğunluğu [22]

Döküm malz.	Döküm sic. ($^{\circ}\text{C}$)	Model yoğ. (kg/m^3)
Alüminyum	705-790	24-27
Bronz	1040-1260	20-21,6
Dökme demir	1370-1455	<20
Çelik	1595-1650	<17,6

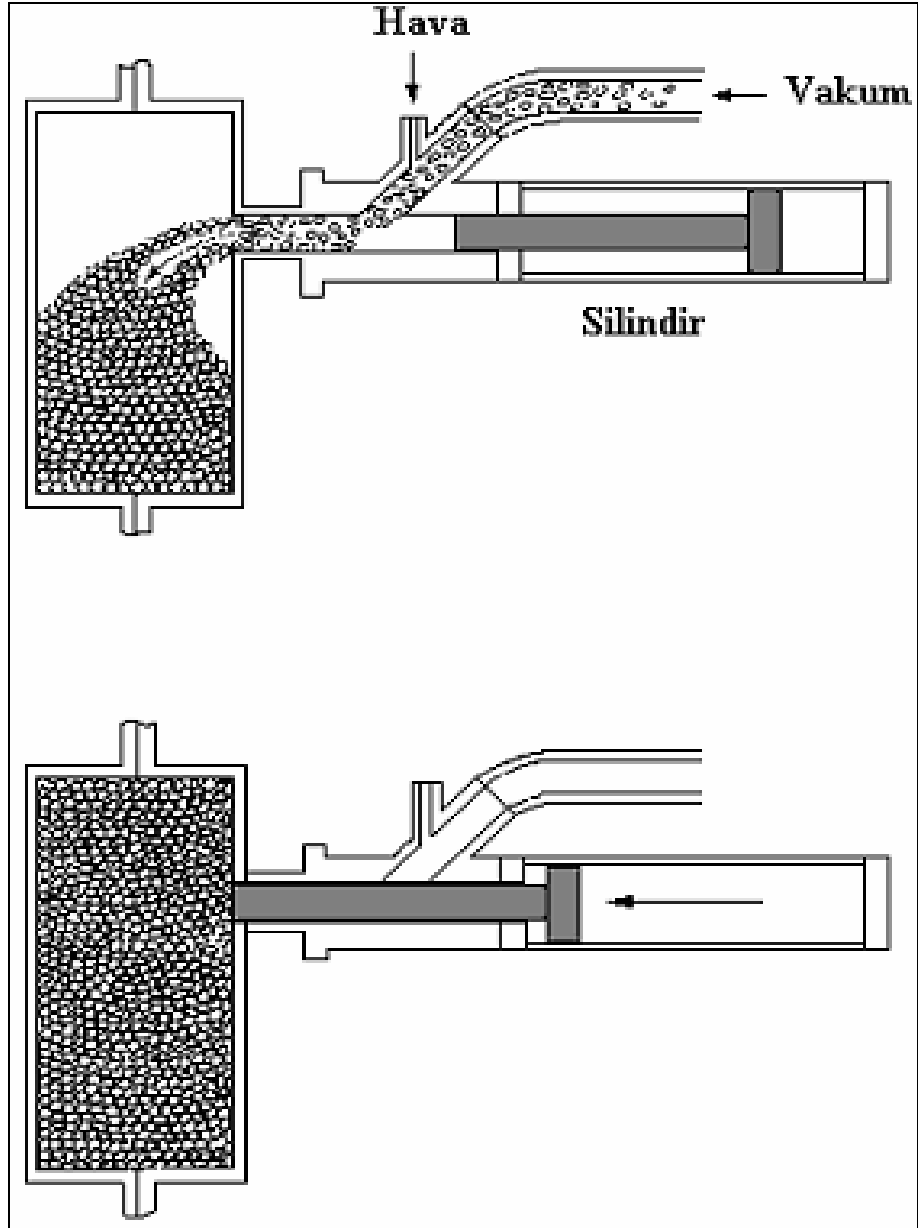
Ön şişirilmiş GPS içindeki şişiricinin belirli bir miktarını atarken soğutma işlemi için köpük taneleri durağan hale gelinceye kadar uygun bir ortamda 6-12 saat bekletilir [29]. Durağan hale geldikten sonra GPS kalıplama işlemi için metal kalıp içerisine doldurulur, Şekil 2.2.

Model kalıplama (oluşturma)

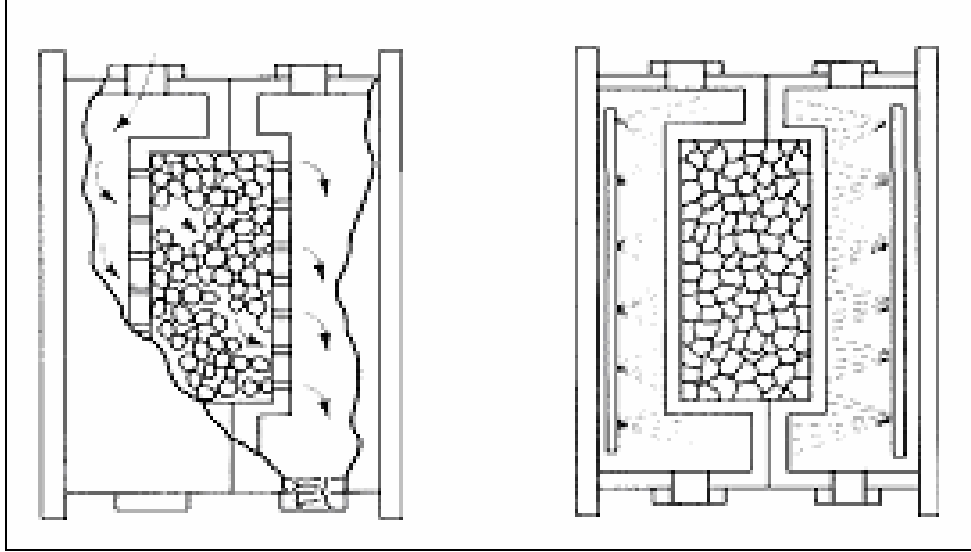
Model kalıplama kaliteli döküm parça üretmenin en önemli aşamalarından biridir ve sürekli olarak kontrol altında tutularak her işlem aşamasına özen gösterilmelidir. Köpük modeli oluşturma işlemi aşağıda açıklandığı gibi dört aşamada gerçekleştirilir [22].

Kalıp doldurma

Hedeflenen yoğunluğa ön şişirilip durağan hale gelen köpük malzeme alüminyum kalıp içerisine mekanik veya otomatik olarak doldurulur [22, 29]. Bu işlem için kullanılan havalı tabanca Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Ön şişirilmiş malzemenin kalıp içerisine doldurulması [22]



Şekil 2.3. Taneler arası buhar geçişi ve kaynamasının şematik olarak gösterimi [22]

Kaynama

Kalıp boşluğu doldurulduktan sonra kalıp içerisindeki köpük malzemelerin arasından geçirilen buharla malzemeler ısıtılır. Ön şişirme işleminde olduğu gibi malzeme burada da yumuşar ve genişler, Şekil 2.3 [29]. Malzemelerin tekrar genişlemesi doldurma işleminde taneler arasındaki hava boşluklarının tanelerin birbirine kaynamasıyla birlikte kapanmasına neden olur. Sonuçta kalıp içerisinde tanelerin birbirine kaynamasıyla köpük model parça şekillendirilmiş olur.

Soğutma

Kalıplama işlemi boyunca kalıplanan taneler genişlemeden dolayı kalıp duvarına sürekli olarak basınç uygularlar. Eğer model kalıp içerisinde oluşan basınç yenilmeden kalıp dışına çıkarılacak olursa yani soğutma işlemi uygulanmazsa model kalıp dışına çıkarıldığında genişlemeye devam edecek ve şekilsiz bir parça elde edilecektir [29, 30]. Bu işlem son şişirme olarak

adlandırılmaktadır. Bu son şişirmeyi engellemek için kalıbı soğutma işlemine tabi tutarak kalıp içerisindeki köpük modelin soğuması sağlanır. Bu soğutma işlemiyle kalıp duvarına gelen basınç düşer ve daha sonra kalıptan çıkarma işlemi gerçekleştirilerek köpük modeldeki ölçü tamlığı sağlanmış olur. Soğutma işlemi genellikle kalıp yüzeyine su püskürtülerek yapılır [22].

Kalıptan çıkarma

Kalıbın soğutulmasıyla üzerindeki basıncın düşürülmesinden sonra köpük model kalıp dışına çıkarılır. Köpük modelin kalıp dışına çıkarılması pinomatik veya mekanik olarak gerçekleşir. Kalıp içerisinde köpük model üretildikten sonra model çekmesinin durağan hale gelmesi için 55°C sıcaklıktaki kurutma odalarında iki saat veya oda sıcaklığında 30 gün bekletilmesi gerekir [12, 19, 31].

Modellerin yolluk sistemine bağlanması

KMDY’de modeller bir yapıştırıcı ile yolluk sistemine bağlanır ve model salkımı oluşturulur. Birleştirme işleminde en fazla kabul gören metot sıcaklıkla ergiyen bir yapıştırıcı madde ile model veya modellerin yolluk sistemine bağlanmasıdır. KMDY’de model salkımını oluşturmak için kullanılan yapıştırıcılar özeldir. Köpük model için kullanılan yapıştırıcının ergime sıcaklığı diğer sıcaklıkla ergiyen yapıştırıcılara göre daha düşüktür. Ayrıca kullanılan yapıştırıcı köpük modelle reaksiyona girmemelidir. Sağlam birleştirme ve ölçü tamlığı için otomatik veya yarı otomatik sistemler tercih edilmelidir [22].

Prototipler ve daha az kaliteli işler için elle birleştirme metodu kullanılabilir. Model birleştirmede diğer metotlar özel uygulamalar için kullanılır. Yapıştırıcı malzeme köpük model ile uyumlu olmalı ve döküm işlemi sırasında ergimiş metal ile bir arada bulunabilmelidir [22].

Yapıştırıcının buharlaşma oranı ve kül miktarı GPS'nin özelliklerine benzer veya yakın olmalıdır. Yapıştırıcı modelin boyutsal ölçülerini etkilememelidir. Tutarlılığın oluşması ve model salkımının bütün yönlerden kontrolü için dikkat etmek gerekir. Zayıf birleştirme teknikleri ölçü kontrol problemlerine ve hatalı döküm parça oluşumuna neden olmaktadır.

2.2.2. Kaplama özellikleri

KMDY'ni model salkımının yüzeyini kaplamadan da uygulamak mümkündür. Fakat yöntemin maksimum verimliliği için köpük model salkımının yüzeyini kaplamak her yönden avantajlıdır. Bu özel kaplama işleminin iki ana amacı vardır. Birincisi kum ile model arasında bariyer sağlayarak döküm esnasında oluşabilecek kum düşmelerini ve kumdan dolayı oluşacak döküm hatalarını engellemek, ikincisi ise kontrollü geçirgenliği sağlamaktır. Buda köpük modelin döküm kalıp içerisinde yanmasından dolayı oluşan atık ürünlerin (gaz ve sıvı polistiren) kaplamadan kuma geçişi olarak açıklanabilir [22, 32-35].

Model kaplamaları çeşitli geçirgenliklerle ifade edilmektedir. Düşük geçirgenlikli kaplamalar alüminyum dökümleri ve iyi yüzey kalitesi istenilen dökümler için tercih edilirken, orta ve yüksek geçirgenlikli kaplamalar kalın kesitli alüminyum dökümleri ve demir dışı alaşımların dökümlerinde kullanılır. Demir alaşımlarının dökümünde demir dışı alaşımların dökümüne göre geçirgenliği fazla olan kaplama malzemeleri kullanılır. Silika bu tür dökümler için seçilen bir kaplama malzemesidir. Düşük maliyeti ve mükemmel ısı transfer özellikleri ile çoğu dökümler için çekiciliğe sahiptir [22, 36, 35].

KMDY'de zirkon kaplama malzemesi olarak geniş bir kullanım alanına sahipken, olivinin geniş bir kullanım alanları yoktur. Kaplamanın dağıtılacağı taşıyıcı sıvıyı seçme şansı oldukça sınırlıdır. Çünkü taşıyıcı sıvı doğrudan köpük model ile etkileşim içerisinde. Hidrokarbonlar vb. çözücüler GPS'ye

zarar vermektedir. Taşıyıcı sıvı olarak en fazla kullanılan malzeme sudur [22].

Kaplama uygulaması

Kaplamanın hazırlanması ve kontrolü kaliteli döküm parça üretimi için gereklidir. Kaplama uygun bir karıştırma işleminden sonra köpük model salkımı üzerine daldırma, fırçayla sürme, püskürtme veya yıkama ile refrakter malzemenin kaplanmasıdır [22, 35].

Fırçayla sürme, püskürtme ve yıkama ile yüzey kaplama işlemleri geniş yüzeyli modeller için kullanılır. Daldırma işlemi ise küçük ve orta boy köpük model salkımların yüzey kaplanmasında kullanılmaktadır. Kaplama çamuru ve köpük model salkımı arasındaki yoğunluk farklılığından dolayı geniş modellerin yüzeyinin daldırma ile kaplanmasında problemler mevcuttur [22].

Model yönlenmesi ve kaplama çamurunun akıcılığı modelin bütün girintili yüzeylerini kapatacak şekilde ayarlanmalıdır. Model salkımının içi ve dışı tamamen kaplanmalıdır. Ayrıca dikey yollukta kaplanmış olmalıdır. Aksi halde ergimiş metalin yolluktan dökümü sırasında sorunlar çıkacaktır [22].

Köpük model salkımı kaplama ve kurutma işlemi sırasında dikkatli bir şekilde taşınmalıdır. Model yüzeyindeki ıslak kaplamanın ağırlığından dolayı kopma ve kırılmalar meydana gelebilir. Fazla sayıda döküm parça üretiminde kaplama kalınlığının homojenliği için otomatik kaplama uygulamalarının yapılmasında fayda vardır.

Diğer bir adım ise kaplanan refrakter malzemenin kurutulmasıdır. Bu işlem oda sıcaklığında 24 saat veya 50-65 °C sıcaklığındaki fırınlarda 2-6 saat bekletilerek yapılmalıdır. Fırınlarda her saatte bir havalandırılmalıdır [12, 19, 22].

2.2.3. Model salkımının kum içerisine yerleştirilmesi

Derece içerisindeki köpük modelin etrafının kum ile doldurulmasında kuru ve bağlayıcısız kum kullanılır. Kum yağmurlama yöntemiyle derece içerisine dökülür. Salkımın zarar görmemesi için minimum yükseklikten doldurma işlemi gerçekleştirilir. Derecenin doldurulması sırasında yüksek frekanslı mekanik titreşimli sıkıştırma tezgahları derecenin altına veya kenarlarına uygulanmalıdır. Çeşitli frekans ve genlik değerleri köpük model salkımı etrafındaki kumun tamamen sıkıştırılması için gereklidir [12, 22, 38-42].

2.2.4. Kum sistemi

En çok kullanılan kum silika kumudur. Kumun geçirgenliği için tane dağılımı önemli bir rol oynamaktadır. Farklı uygulamalar için farklı boyutta ve dağılımda kum kullanılmaktadır. Genellikle demir alaşımlarının dökümünde AFS'nin tane incelik numarası 35 ve 3 elek dağılımlı, demir dışı alaşımların dökümünde de AFS tane incelik numarası 45 ve 3 elek dağılımlı kum kullanılmaktadır. Döküm kumunun doldurma işleminden önce muhakkak 50°C'nin altına soğutulmuş olması gerekir. Aksi halde köpük model zarar görebileceği gibi yapıştırıcılar çözünerek istenmeyen sonuçların oluşmasına sebep olabilir [22, 41].

KMDY'de döküm işlemi, geleneksel döküm yöntemlerinde kullanılan metodun aynısıdır. Metal beslemesi köpük modelin yanma hızı tarafından kontrol edilir. Metal sıcaklığı ve dolma zamanı diğer döküm yöntemlerine göre çok farklı olduğundan kritiktir ve muhakkak kontrol edilmesi gerekir. Döküm işleminden sonra geleneksel döküm yöntemlerinde olduğu gibi soğumaya bırakılır. Dereceler döküm parçaları kalıptan çıkarılması için kalıp bozma alanına götürülür ve döküm parçalar soğuduktan sonra dereceler ters çevrilip boşaltılarak kumun içinden alınır. Döküm parçaların yollukları kesildikten sonra yüzeydeki kaplamanın giderilmesi için temizleme işlemine tabi tutulur.

Temizleme işlemlerinde kumlama ve titreşimle temizleme metotları kullanılır. Alüminyum dökümler için yüzeydeki kaplamayı temizlemede sulu sistemler de kullanılabilir [22, 24].

2.3. KMDY'nin Avantajları

Yöntemin döküm parça üretimine sağladığı birçok faydaları vardır. Modellerin kalıp ayırma yüzeyleri ve maçaları yoktur ve kalıplamada tek parçalı dereceler kullanılır. İşlemsiz ve bağlayıcısız kum kullanımı kum sisteminde kolaylıklar sağlar. Daha az el takımlarına ihtiyaç duyulur ve ekolojik olarak kumun döngüsünde avantajlar sağlanır [22, 43].

Köpük model döküm yönteminin en önemli avantajlarından bir diğeri de kumla kalıplama esnasında kuma herhangi bir katkı malzemesinin katılmamasıdır. Bu durum işlem sayısının ve atık madde miktarının azalmasına sebep olur [5, 31].

Tek parçalı derece dizaynı, boyut standardı ve otomatik kalıplamaya imkan verir ve birçok problemin elimine edilmesini sağlar [12, 31].

Maça kullanılmasına gerek olmadığından maça makinesine, maça bağlayıcılarına, maça kumuna gerek duyulmaz ve maçadan kaynaklanan döküm hataları ortadan kalkar [5, 12, 19].

Köpük model döküm yönteminde sıvı metal kum ile temas etmeyeceğinden kum inklüzyonları oluşmaz. Bu durum döküm kalitesine etki ettiği gibi inklüzyonlardan dolayı meydana gelebilecek takım ve kesici aşınmasını da engeller [11-13, 31].

Köpük model dökümünde metal akış hızı boş kalıba dökümdeki akış hızından daha yavaş ve kontrollüdür. Kalıp dolu olduğundan içerideki hava miktarı

daha azdır ve döküm sırasında oksit ve curuftan kaynaklanabilecek döküm hatası olasılığı daha düşüktür [12, 22, 31, 44-46].

Akan sıvı metalin uç noktası polistiren köpükle temas ettiği için kalıp sonuna doğru metal sıcaklığında düşme meydana gelir ve yönlü katılaşma gerçekleşir. Böylece katılaşma çekmesinin yolluk sistemi tarafından beslenmesini sağlar [31, 47-49].

Döküm parçasının kalıptan çıkartılması geleneksel döküm kalıp bozma ve temizleme işlemlerinin elimine edilmesini sağlar. Birçok dökümcüye göre temizleme ve kalıp bozma işlemleri en önemli döküm harcamalarıdır. Temizleme işlemi sırasında döküm parçaların bir kısmı kırılarak zarar görmektedir. Köpük model döküm yönteminde temizleme işlemi geleneksel döküm yöntemindeki temizleme işleminin çok küçük bir bölümünü kapsadığından temizleme esnasında meydana gelebilecek hata oluşumunu azaltır ve temizleme maliyetini en aza indirir [5, 12, 31].

Kalıplamada tek parçalı derece kullanıldığı için döküm kazancı artar. Uсталık ve lâboratuar harcamaları diğer döküm yöntemlerine göre daha azdır. Maça ve kalıp ayırma yüzeyine ihtiyaç duyulmadığından temizleme maliyetinin düşmesinin yanında maça ve maça temizleme makinelerine gerek yoktur [22].

Çok seri kalıplama imkanı sağlayarak müşteri isteklerine daha hızlı cevap verilebilir. Yöntemin en önemli özelliği serbest parça tasarımına olanak tanır. Daha büyük hacimli işlerin dökümü diğer yöntemlere göre kolaydır [22].

Bu avantajlar köpük model döküm yönteminin tercih sebebidir. Bu yöntem geleceğin dökümcüleri için bağımsız bir şekilde tasarım yapmayı sağlayacaktır. Böylece kompleks, karmaşık ve gelişmiş döküm parçaları bu yöntemle dizayn edilebilir ve üretilebilir [12, 31, 43, 50]. Köpük model döküm

yöntemi bu avantajlarından dolayı birçok döküm yönteminin yerini alacağı düşünülmektedir [22].

2.4. KMDY Değişkenleri

Köpük model döküm yönteminde döküm kalitesini etkileyen bir çok önemli faktör vardır. Bu faktörler;

- 1-Döküm malzemesi,
- 2-Kaplama malzemesi,
- 3-Köpük model yoğunluğu,
- 4-Döküm sıcaklığı,
- 5-Döküm kumunun özellikleri,
- 6-Kum sıkıştırma yöntemi,
- 7-Metal akış hızı,
- 8-Metalin statik basıncı ve
- 9-Yolluk sistemidir.

2.4.1. Döküm malzemesi

Döküm malzemesinin yoğunluğu ve döküm sıcaklığı metalin statik basıncını etkilemektedir. Döküm malzemesinin bu özellikleri köpük model dökümünde atık ürünlerin (gaz ve sıvı polistiren) kalıp boşluğundan dışarı transferinde etkin bir rol oynamaktadır. Yüksek döküm sıcaklığı döküm esnasında köpük polistirenin daha fazla alt moleküllerine ayrışmasına neden olmaktadır. Buda oluşan gaz miktarının artmasına ve sıvı polistiren miktarının azalması şeklinde sonuçlanmaktadır [51]. Metalin statik basıncı da oluşan atık ürünlerin kaplama tabakasından dışarı çıkış hızını etkilemektedir. Burada kaplama malzemesinin geçirgenlik ve ısı iletimi özelliğinde önemli rol oynamaktadır. Bunun yanında metalin akış hızının da kontrol altında tutularak köpük modelden ayrılan sıvı polistiren ve gazların kaplama aracılığıyla döküm dışına atılması için yeterli zamanın oluşturulması gerekir.

Kalıp içinden dışarıya atılamayan sıvı polistiren ve gazlar döküm parçada gaz boşluğu hatalarına neden olmaktadır. Özellikle düşük yoğunluğa sahip metal ve alaşımların dökümlerinde gaz hataları daha fazla meydana gelmektedir. Dökme demir ve karbon içeren alaşımlarda karbonun ayrışıp yüzeyde ve mikroyapı içerisinde kiş grafit ve karbon yüzmesi hatası oluşturmaktadır.

Köpük model dökümünde döküm hatalarının oluşma sebeplerinden birisi de döküm malzemesindeki alaşım elementleridir. Alaşım elementlerinin metalin akıcılığı ve yoğunluğu üzerinde etkili olduğundan döküm kalitesi için oranları kontrol altında tutulmalıdır. Artan döküm parça yoğunluğu metalin statik basıncını arttırmakta ve atık ürünlerin kaplama tabakasından daha kolay tahliyesini sağlamaktadır. Katılaşmadan önce kalıp içerisinden atılamayan sıvı polistiren alüminyum dökümlerindeki hataların başlıca nedenidir [52, 53].

2.4.2. Kaplama malzemesi

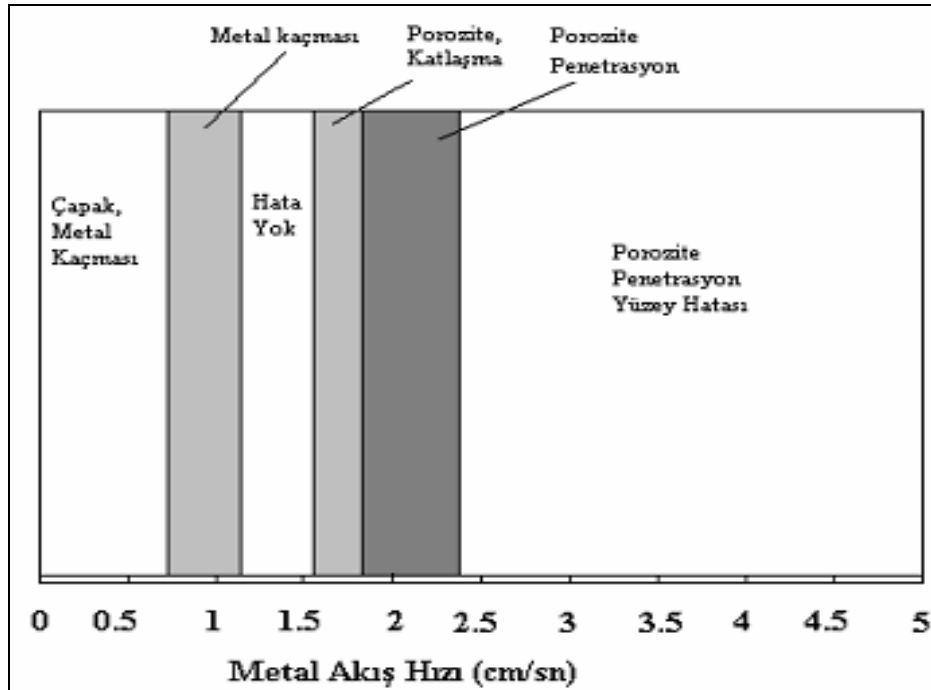
Kaplama KMDY’de en önemli adımlardan biridir. Kaplama malzemesinin en önemli özelliği gaz ve ısı geçirgenliğidir. Geçirgenlik döküm esnasında oluşan sıvı polistiren ve gazların kalıp dışına atılmasında etkili olan en önemli değişkendir [20, 47, 54-56]. Isı geçirgenliği fazla olan kaplama malzemeleri atık ürünlerin kalıp dışına atılması için gerekli olan süreyi azaltan erken katılaşmaya neden olmaktadır. Bu durumda döküm parçalarda gaz hataları meydana gelmektedir. Kaplama malzemesinin refrakterlik özelliği, tane boyutu, tane boyutu dağılımı ve yoğunluğu geçirgenlik üzerine etki eden en önemli parametreleridir [5, 18, 23, 57].

Geçirgenlik döküm esnasında kalıp içerisinde yanmadan dolayı oluşan gazın basıncından dolayı ergimiş metalin akış hızına, akış hızı da kalıbın dolma zamanına etki etmektedir [18, 33, 36]. Sıvı metalin kalıbı hızlı veya yavaş doldurması döküm hatalarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun için mümkün olan en ideal hızda dolması için gerekli tedbirlerin alınması

gerekmektedir [47]. Metal akış hızına göre oluşan döküm hataları Şekil 2.4'de görülmektedir.

2.4.3. Köpük model yoğunluğu

Köpük model yoğunluğu direkt olarak döküm esnasında oluşacak atık madde miktarını etkilemektedir. Kaybolan model döküm yönteminde küçük taneli genişleyen polistiren kullanılarak, düşük yoğunluğa sahip modellerle yüksek kalitede döküm parçaların üretimi mümkündür. Düşük yoğunluğa sahip modeller köpüğün ergimesi esnasında daha düşük miktarda gaz ve sıvı polistiren üretirler. Oluşan gaz kaplamadan kuma ve kumdan da atmosfere geçerken, sıvı polistiren kaplama içine ve kuma difüz etmektedir. Eğer oluşan gaz ve sıvı polistiren miktarı fazla ise atık ürünler dışarı çıkamayacak ve döküm parçada hatalara sebep olacaktır [57-59].



Şekil 2.4. Metal akış hızına göre oluşan döküm hataları [58]

Gaz oluşumu model yoğunluğu ve metalin döküm sıcaklığının bir fonksiyonudur. Eğer model yoğunluğu arttırılırsa, sabit bir döküm sıcaklığında daha fazla gaz oluşacaktır. Benzer şekilde model yoğunluğu sabit tutulur ve döküm sıcaklığı arttırılırsa yine daha fazla gaz oluşacaktır. Oluşan gazların tamamı model yüzeyindeki kaplamadan geçerek dışarı atılmak zorundadır. Dayanım ve model oluşturma açısından 3 ile 6mm arası kalınlığındaki modeller $0,022 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,024 \text{ gr/cm}^3$ arasındaki yoğunluğa sahip olmalıdır. Daha kalın kesitli modeller için $0,020 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluk gerekir. Genel bir kural olarak döküm sıcaklığı ve parça geometrisine bağlı olarak modellerin yoğunluğunun $0,016 \text{ gr/cm}^3$ ile $0,024 \text{ gr/cm}^3$ arasında olmalıdır [1, 10, 21, 60, 61, 62].

Alüminyum dökümlerde toplam ısı kaybının %70'den fazlası polimerin yanmasından dolayıdır. Köpük modelin yanmasının kontrolü döküm ve katılaşma süresi üzerinde oldukça etkilidir. Bunun için uygun polimer malzemesi seçimi ile modeldeki molekül ağırlığı dağılımı ve yoğunluğun kontrol altında olması gerekir. Bu değişkenler polistirenin kalitesini, üretilen tanelerin kalıplama şartlarını ve taneler arası kaynama derecesini etkilemektedir [8, 27, 28, 63].

Polistiren granülleri ham halde $0,6-0,7 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Granül boyutu göz önüne alındığında, küçük boyutlu granüller ile elde edilen modellerde daha iyi yüzey pürüzlülüğü sağlanır. İlave olarak küçük granüller ince kesitleri (6mm'den küçük) daha kolay doldurabileceklerdir. Bu yoğunluk ve boyuttaki granüller şişirilmek suretiyle yukarıda belirtilen model yoğunluğu elde edilir.

2.4.4. Döküm sıcaklığı

Polistiren köpük 420°C sıcaklıkta sıvı halden gaz haline dönüşmeye başlar. Döküm işleminin hızlı olmasından dolayı polistiren köpüğün tamamı gaz haline geçmeye yeterli zaman bulamamaktadır. Bundan dolayı polistirenin bir

kısmı gaz bir kısmı da sıvı olarak dışarı atılmaktadır. Bir diğer teorem ise sıvı metal doğrudan polistirenle temas etmediği için sıvı polistiren metalle etkileşime girmeden kalıp duvarından dışarıya çıkmaktadır. Sıvı polistirenin kalıp dışına çıkamadığı durumlarda döküm içinde ve yüzeyinde teşekkül ederek döküm kalitesini ve yoğunluğunu düşürmektedir [34].

Döküm sıcaklığının artırılması durumunda ise; 1) Polistiren alt moleküllerine ayrılarak daha fazla gaz meydana gelir. Sıvı polistiren miktarı azalır. 2) Sıvı polistirenin kaplama malzemesini ıslatabilirliği yükselir. Bu yükseliş atık malzemelerin daha kolay kalıptan atılmasını sağlar. 3) Metal akış hızı ve katılma zamanı artar. Atık ürünlerin kalıp dışına atılması için zaman kazandırır [18, 47, 54].

Sun'ın [52] alüminyum alaşımlarında döküm sıcaklığının artışı döküm parçanın katılma zamanını ve sıvı metalin akış hızını arttırdığını ve bu durumun gaz ve polistirenin kaplamadan kalıp dışına atılması için yeterli zaman oluşturduğunu belirtmiştir. Döküm parça içinde ve yüzeyinde döküm hatalarının oluşmadığını özellikle vurgulamıştır. Oluşan gazın çıkış hızı kaplama malzemesinin özelliklerine, kumun geçirgenliğine ve metalin statik basıncına bağlıdır [52, 64].

2.4.5. Döküm kumunun özellikleri

Kumun şekli ve boyutu sıkıştırılabilirlik ve kalıp içerisinde oluşan atık ürünlerin dışarı atılması açısından önemlidir. Kalıp yapımında kaba yuvarlak veya köşeli kuru kumlar kullanılmaktadır. Döküm esnasında oluşan gazların rahat bir şekilde kalıp dışına atılması için kalıp kumunun maksimum geçirgenlikte olması gerekmektedir [1, 10].

Polistiren köpük model ince bir kaplamayla kaplanıp kurutulduktan sonra kumla desteklenmeye hazır duruma gelir. Kumun doldurma ve sıkıştırma aşaması modelin bütün bölümlerini dolduracak ve model yüzeyindeki

kaplama malzemesine zarar vermeyecek şekilde sonuçlanmalıdır. Eşit olarak sıkıştırılan kum döküm ve katılaşma süresince kaplamayı desteklemeli ve kalıp şeklini muhafaza etmelidir [40, 54].

Dereceyi kum ile doldurma ve sıkıştırma işlemi için kullanılan vibrasyon iki özelliğe sahip olmalıdır. Birincisi modelin bütün boşluklarını kum ile doldurabilmeli, ikincisi kumu model yüzeyinin tamamında homojen olarak sıkıştırabilmelidir. Modelin iç boşluklarında yüksek yoğunlukta kum sıkıştırılmasını sağlamak oldukça zordur. Sıkıştırılan kum döküm esnasında oluşan gaz ve metal basıncını yenmek için yeterli yoğunluk ve dayanıma sahip olmalıdır. Sıkıştırılan kumun yoğunluğu $1,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ veya daha yüksek olmalıdır [40, 41, 54].

2.4.6. Kum sıkıştırma yöntemi

Kum sıkıştırma (vibrasyon) işleminde dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler vibrasyon süresi, yönü, frekansı ve genliğidir.

Optimum kum sıkıştırma işlemi için vibrasyon süresi ve yönü birlikte göz önünde tutulmalıdır. Vibrasyon süresi zamanla ilişkilidir ve kuma veya dereceye uygulanan saniye veya dakika ile ölçülmektedir. Derece ve kuma doğru dikey, yatay, dairesel, eksenel yatay, eksenel dikey ve eksenel dairesel olmak üzere toplam altı titreşim hareketi eşzamanlı olarak uygulanır. Çok yönlü titreşim karakterize etmek ve uygulamak açısından karmaşık olmakla birlikte modelin yırtılmasına ve homojen olmayan sıkıştırmaya neden olmaktadır. Bu sebepten modelin geometrik şekline göre uygun yönler seçilmelidir. Daha çok yatay, dikey, eksenel yatay ve eksenel dikey vibrasyon hareketi kullanılmaktadır. Vibrasyon frekansı, genliği ve süresi modelin geometrik şekline ve boyutuna göre belirlenmelidir [42, 65].

2.4.7. Metal akış hızı

KMDY'de alaşımın kalıba dökümü için gereken sıvı akışı boş kum kalıba ve metal kalıba döküm yöntemlerinden çok farklıdır. Metal ile köpük model arasında oluşan gazdan dolayı ters basınç oluşur ve metal akış hızı azalır. Metal akış hızı kalıbın dolma zamanını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Kalıbın dolma zamanı atık ürünlerin dışarı atılabilmesi için önemlidir. Metalin akış hızı gerçekte modelin yanma hızıyla ilişkilidir [18-20,45]. Ergimiş metalin döküm yüksekliği, kaplama geçirgenliği, döküm sıcaklığı ve yolluk sistemi metal akış hızını etkileyen en önemli parametrelerdir. Kapsama malzemesinin geçirgenliği arttıkça kalıp içinde oluşan gazın ters basıncı azalacağından akış hızı artar. Dökümlerde yüksek döküm sıcaklığı, düşük kaplama kalınlığı ve yüksek sıvı metal basıncı akış hızını arttırmaktadır [20, 31, 44, 47, 54, 64].

Yolluk sistemi boyutunun doldurulabilirlik ve akış hızı üzerine önemli bir etkisi yoktur. Fakat yolluk sisteminde memelerin kalıba alttan kenardan ve üstten bağlantısı sıvı metalin statik basıncından dolayı etkilidir [54].

2.4.8. Metalin statik basıncı

Metalin statik basıncı dikey yolluk yüksekliğinin ve metal yoğunluğunun artmasıyla doğru orantılıdır [21]. Statik basınç köpük model malzemesi ile kaplama arasındaki etkileşimi, ıslatmayı ve atık ürünlerin kalıp dışına çıkış hızını kontrol etmektedir [31].

2.4.9. Yolluk sistemi

Yolluk sistemi tasarımı geleneksel döküm yöntemlerindeki tasarımlardan çok farklıdır. Çünkü, yolluk sistemi döküm sırasında meydana gelen gazın ve diğer atıkların dışarı atılması, arayüzey şeklinin belirlenmesi, metal akış hızı ve sıvı metalin kalıbı doldurması üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Yolluk

sisteminde kesit alanları sıvı metalin akış hızı ve kalıbı doldurabilirlik açısından önemli bir etkiye sahip değildir. Fakat sıvı metalin statik basıncı üzerinde etkili olan dikey yolluk yüksekliği ve memelerin modele bağlanış pozisyonları oldukça önemlidir. Özellikle metal akış hızı diğer döküm yöntemlerine göre çok düşüktür. Alüminyum alaşımları dökümünde metalin statik basıncı dikey yolluk yüksekliği ile kontrol edilmektedir [21, 54, 66].

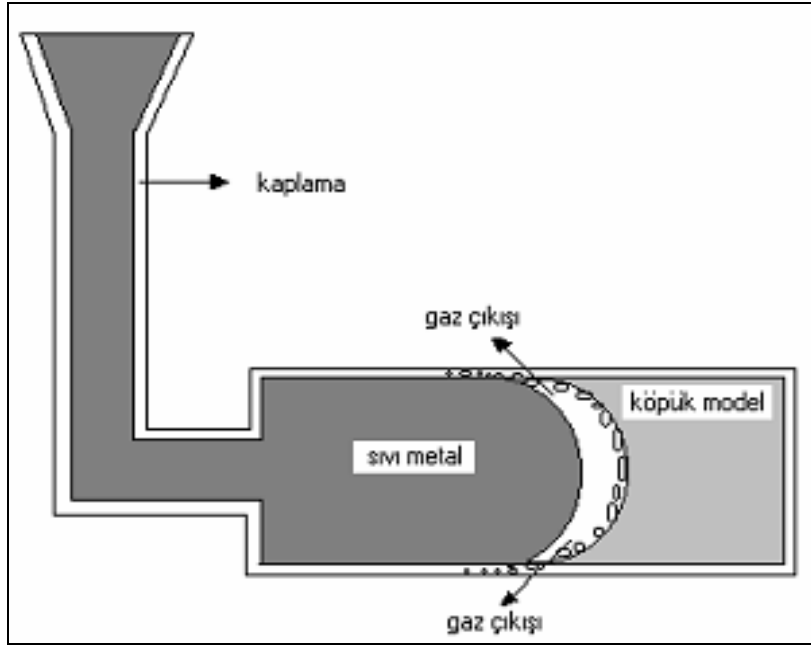
2.5. Metal-Model Etkileşimi

KMDY'de ısı ve model-metal transfer yöntemleri geleneksel döküm yöntemlerinden daha karmaşıktır. Çünkü kalıp içerisindeki polistiren köpük modelin döküm esnasında yanıp atık ürünlerin kalıptan dışarı atılması gerekir. Şekil 2.5'de ergimiş metalin köpük modelin yerini alma mekanizması görülmektedir. Bu mekanizmada köpük modelin dış yüzeyi kaplanmış ve etrafı bağlayıcı içermeyen kum ile sıkıştırılmıştır. Isı ve kütle transferinin meydana geldiği ergimiş metal ile model arasındaki bozulan bölgeye metal-model arayüzeyi denir. Metal-model arayüzeyi sıvı polimer, köpüğün yanması sebebiyle oluşan gaz ve havadan meydana gelmektedir. Bu modeldeki arayüzeyin genişliği ve gazın gerçek miktarı, metalin akış hızına ve uc noktasındaki sıcaklığına bağlıdır.

Arayüzeyde ergimiş metalden köpük modele ısı; 1-iletim, 2-taşıma, 3-ışınım yolu ile transfer olur. Alüminyum dökümlerinde (800°C 'nin altındaki sıcaklıklarda) ısı transferi iletim ve taşıma ile gerçekleşir. Isı transferi daha yüksek döküm sıcaklıklarına sahip dökme demir ve çelik alaşımlarının dökümlerinde ise iletim ve taşımanın yanı sıra ışıma yolu ile de oluşur [67].

Kalıbın ergimiş metalle doldurulması sırasında meydana gelen gaz ürünlerinin oluşum hızı sıvı metalin akış hızına, metal-model arayüzeyindeki sıvı metalin yüzey sıcaklığına ve köpük modelin yoğunluğuna bağlıdır. Oluşan gaz ürünlerinin kalıptan çıkış hızı metalin statik basıncına, kaplama ve model gözenekliliğine ve etkili kaplama alanına bağlıdır. Etkili kaplama

alanı sıvı polistiren tarafından ıslatılmayan yüzey alanıdır. Etkili kaplama alanı bölgesel metal alan oranı, model yüzey pürüzlülüğü ve sıvı polistirenin viskozitesi ve yüzey geriliminden etkilenir [62, 67].

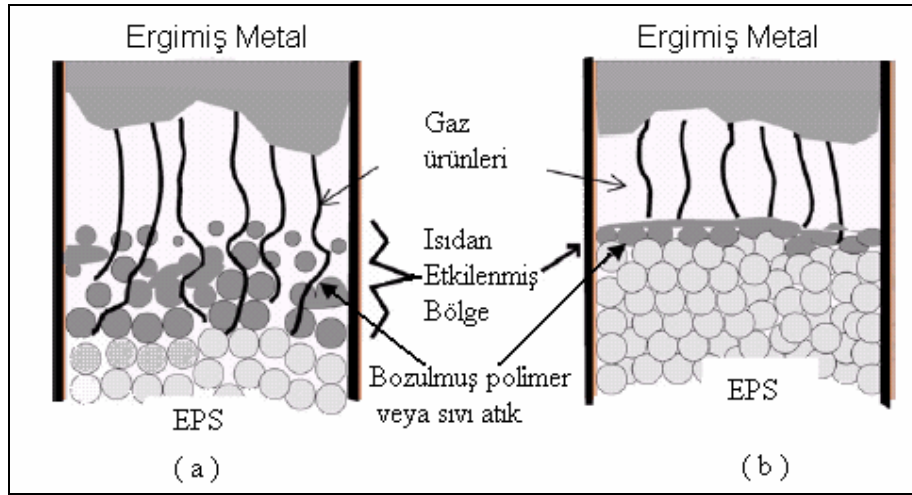


Şekil 2.5. Kum kalıp içerisindeki modelin sıvı metal ile doldurulması [3]

Metal akış hızı ise gaz oluşumu ve çıkışı arasındaki dinamik dengeden etkilenmektedir. Düşük geçirgenliğe sahip kaplamalarda ve yeterli basıncın oluşturulmadığı durumlarda yeterli gaz çıkışı gerçekleşmez ve bu dışarı atılamayan gaz metal-model arayüzeyinde sıkışarak arayüzeyi genişletir. Bunun sonucu olarak metalden köpük modele daha yavaş ısı transferi gerçekleşir ve kalıbın dolum süresi artar. Gaz çıkışının hızlı olduğu durumlarda ise metal-model arayüzeyi daralır ve ısı çıkışı artar. Sonuç olarak kalıp dolum süresi azalır [56, 67].

Köpük model dökümlerinde ergimiş metalin arayüzeydeki şekli atık ürünlerin taşınmasında önemli bir etkiye sahiptir. İçbükey ve girintili sıvı metal arayüzey şekli polistirenin ergimiş metalin içerisine girmesine ve döküm hatalarının oluşmasına sebep olmaktadır. Metal-model arayüzeyin dışbükey

olması durumunda ise gaz ve sıvı polistirenin yüzeyden daha kolay atılmasına imkan verir. Ergimiş metalin arayüzeydeki şekli modelin gözenekliliği, yoğunluğu, geometrisi ve modelin dereceye yerleştirilmesinden etkilenmektedir. Radyografi tekniği kullanılarak modeldeki boşluk ve poroziteler (tanelerin kaynama seviyesi) tespit edilebilmektedir. Sun [52] KMDY ile alüminyum alaşımları dökümünde düşük tane kaynama derecesine sahip modellerde metal-model arayüzeyinin girintili olduğunu ve kalıp dolma süresinin azaldığını, daha yüksek tane kaynama derecesine sahip modellerde ise sıvı metalin arayüzeydeki şeklinin dışbükey olduğunu ve kalıp dolma süresinin arttığını açıklamıştır.



Şekil 2.6. Metal-model arayüzeyindeki değişimin şematik olarak gösterimi (a) düşük kaynama derecesine sahip köpük modeller (b) yüksek kaynama derecesine sahip köpük modeller [6]

Kalıplama sırasında meydana gelen tane kaynaması kalıbın sıvı metal ile doldurulması sırasında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi düşük kaynama derecesine sahip modellerin dökümünde metalin arayüzeydeki şekli girintili ve arayüzey genişliğinin daha fazla olduğu görülmektedir [6].

KMDY’de katmer, metal kaçması, yüzeyde karbon birikmesi, porozite ve kum penetrasyonu gibi döküm hataları meydana gelmektedir. Metal termal enerjisini kaplamayla veya ilerleme yönündeki model ile kaybeder. Bundan dolayı metalin akıcılığı sürekli olarak düşer ve eksik döküm hatasına neden olur. Porozite ve karbon hataları ergimiş metal içerisine giren atık ürünlerden kaynaklanmaktadır. Katmer döküm hatası farklı yönden gelen sıvı metalin birbirine tam olarak birleşmemesidir. Yüzey hataları katmer hatasına benzemekte ve atık ürünlerin metal ile kaplama arasında sıkışmasından meydana gelmektedir. Porozite hataları sıvı polistirenin metal içerisinde kalmasıyla ve gazın dışarıya atılamamasından kaynaklanır. Metal penetrasyon hatası kaplamadaki çatlaklardan metalin sızması veya döküm esnasında kumun kalıbı yeterince desteklememesi sonucu oluşur. Sıkıştırılan kum metalin basıncını yenememektedir. Kum penetrasyonu metal-model arayüzeyinde oluşan metal veya gaz basıncının kaplama üzerindeki kumun basıncını yenememesinden kaynaklanmaktadır [67].

Model ve yolluk birleştirme işlemlerinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Birleştirme işleminde fazla miktarda kullanılan yapıştırıcılar metal akış hızını yavaşlatmakta ve atık ürün miktarını arttırarak döküm hatalarına neden olmaktadır. Yapıştırma yöntemiyle elde edilen köpük modellerin dökümünde metal-model arayüzeyindeki sıvı metal girintili arayüzey şekli alma eğilimindedir [38]. Girintili sıvı metal yüzeyi arayüzeyde oluşan gaz ve atık ürünleri içine alarak döküm hatası üretir. Yolluk ve model birleştirme işleminde kullanılan yapıştırıcı polistiren modeli oluşturan taneler arasına girmesi durumunda yukarıdaki döküm hatalarını oluşturmakla birlikte sıvı metalin akış hızını yavaşlatarak kalıp dolma süresini arttırmaktadır [67].

2.6. Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Polimerlerin statik veya yavaş uygulanan bir kuvvete karşı direncini ölçmek için çekme deneyleri uygulanır. Endüstriyel polimerlerin hemen hemen

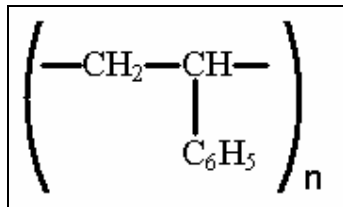
hepsinin karakteristik özelliklerinde yer alan gerilim ve uzama sonuçları kopmada erişilen gerilim ve uzamadır [68,69].

Gerilme-uzama deneyleri polimerlerin türüne ve kullanım alanına göre geniş bir sıcaklık ve çekme aralığında yapılır. Her polimer için uygun bir çekme hızı ve çekme aralığı saptanmasının yanı sıra numunelerin uygun standart ve boyutta olması gerekir [68].

Köpük yoğunluğu ve oda sıcaklığı mekanik özellikleri etkilemektedir [70, 71]. Genişleyebilen polimer ve diğer polimerlerin gerilim-uzama ilişkilerinin belirlenmesinde ASTM D638 standardı birçok ülke tarafından benimsenmiştir. Bu standartta polimerler; 1) sert ve yarı sert, ve 2) yumuşak olmak üzere iki şekilde sınıflandırılmıştır. Çekme numunesi kalınlıkları 1 ile 14 mm arasında değişmektedir. Genellikle 7 mm ve daha düşük kalınlıktaki çekme numunelerin sabit hızda çekilmesi sonucunda kopmadaki gerilim direnci ile uzama ölçülmektedir [7, 8].

2.6.1. Genişleyebilen polistirenin yapısı ve özellikleri

Polistiren kalıplanabilen termoplastik maddeler içerisinde en ucuz olan polimerdir. Katı halde saydam ve kolay işlenebilen özelliğe sahiptir. 100 °C civarında yumuşar, mekanik ve termal özellikleri iyidir. Polistiren lineer ve düzenli bir polimer olup amorf yapıya sahiptir. Şekil 2.7’de polistirenin tekrarlanan zincir yapısı görülmektedir. Alkalilere, halojenli asitlere, oksitleyici ve indirgeyici maddelere karşı dayanıklıdır.



Şekil 2.7. Polistirenin tekrarlanan zincir yapısı

Polistiren günümüzde çeşitli şekillerde kullanılmakta ve özellikleri çoğu polimerlerden belirgin bir şekilde ayrılmaktadır. Polistirenlerin içerisinde en önemlileri genişleyebilen polistirenlerdir ve genellikle yalıtım malzemesi olarak kullanılırlar. Polistiren, stirenin tane polimerizasyon tekniğiyle polimerize edilmesiyle üretilir. Düşük sıcaklıkta kaynayan ve petrol ürünü olan hidrokarbonlar şişirici madde (pentan) olarak polimerizasyon öncesi %6-9 kadar stiren emdirilir veya son polimerizasyon işleminde şişirici maddenin sıcaklık ve basınç altında polistirene difüz etmesi sağlanır [29].

3. MALZEME VE METOD

3.1. Malzeme

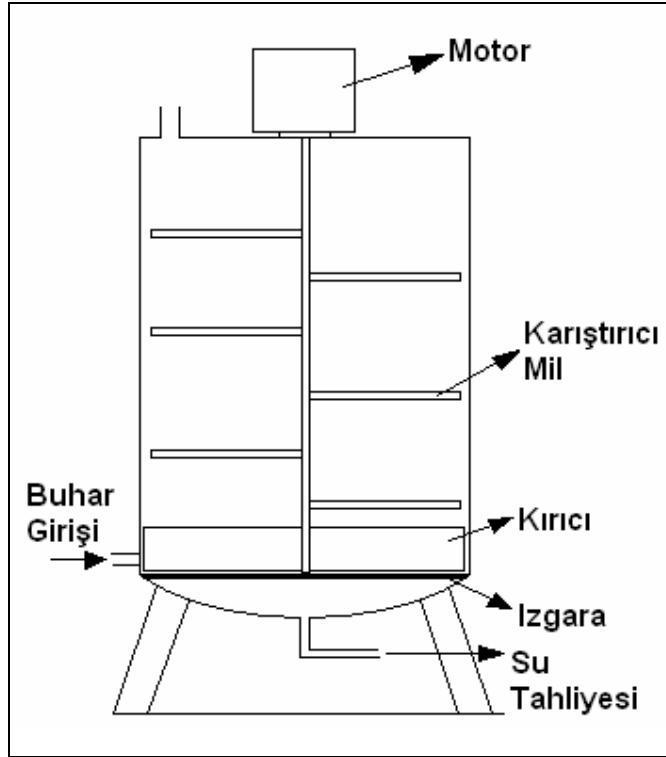
Deneylerde kullanılmak üzere Nova Kimyasal A.Ş.'nin genellikle ince kesitli polistiren parça üretimi ve köpük model döküm yöntemi için özel olarak ürettiği Gedexcel 25C genişleyebilen polistiren (GPS) granülleri ham olarak temin edildi. Kullanılan GPS granüllerinin genel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kullanılan GPS malzemesinin genel özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Ham yoğunluk	820	Kg/m ³
Tane boyutu sınıfı	0,2-0,4	mm
Tane boyut dağılımı (%95)	0,25-0,35	mm
Şişirici madde miktarı (pentan)	>=5,5	%Ağırlık
Ulaşılabilecek minimum yoğunluk	22	Kg/m ³

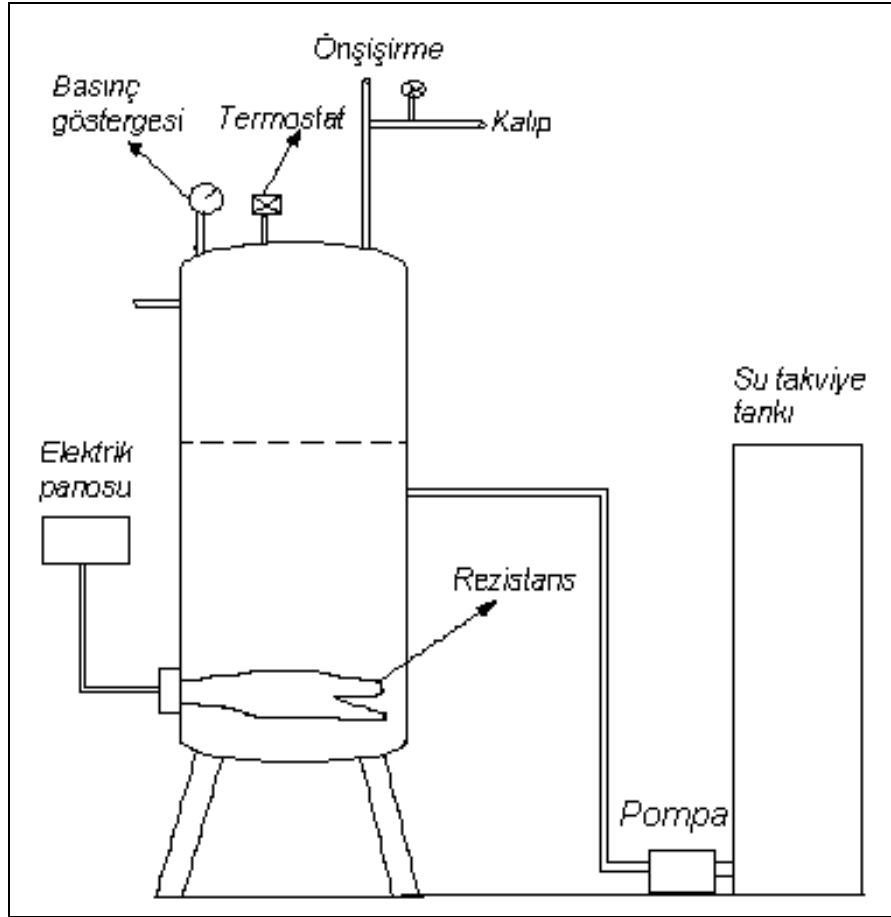
3.2. Ön Şişirme Ünitesi ve Buhar Kazanı

Köpük model döküm yönteminde GPS granüllerin ön şişirilmesi gerekir. Ham durumdaki GPS granüllerinin ön şişirilmesi için 100 lt hacminde, paslanmaz çelik gövdeli ve dışı ani sıcaklık değişimlerine karşı izole edilen ön şişirme ünitesi imal edilmiştir. Sıcaklıkla yumuşayan granüllerin birbirine yapışmasını önlemek için ön şişirme ünitesine 50 dev/dk dönme hızına sahip bir karıştırıcı konulmuştur. Ön şişirme ünitesinde yoğunlaşan buharın tahliyesi ve buharın kontrollü girişi küresel vanalar ile sağlanmıştır. Ön şişirme işleminde kullanılan cihazın şematik görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Granüllerin sıcak buhar ile genişletildiği ön şişirme ünitesi

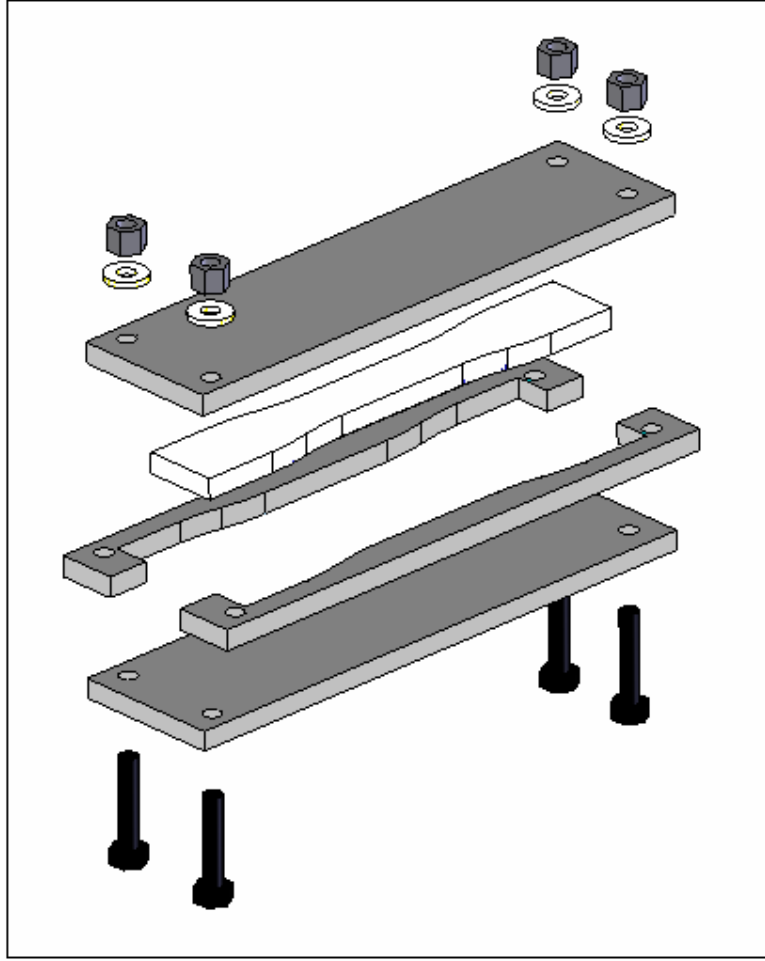
Genişleyebilen polistiren malzemeden ön şişirme ve model kalıplama işlemleri için su buharına ihtiyaç vardır. Bu çalışmada gerekli özelliklere sahip buhar elde etmek amacıyla 100 lt hacim, 50 kg/saat buhar kapasitesi ve maksimum 3 atm basınca sahip basınç ve buhar kontrolünün sağlanabildiği buhar kazanı imal edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan buharın kazandaki çalışma basıncı 2,7 atmosferdir. Bu basınç kontaktörlerle sağlanmıştır. Buhar üretimi için tasarlanan kazan Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Ön şişirme ve kalıplama deneylerinde kullanılan buharın elde edildiği buhar kazanı

3.3. Şişirme Kalıbı

Deneylerde kullanılan şişirme kalıbı ASTM D638 standardına göre hazırlanan çekme numunesi üretecek şekilde imal edilmiştir. Kalıp üretiminde alüminyum levhalar kullanıldı. Kalıp boşluğu CNC tezgahında işlenerek şekillendirildi ve dört parçadan oluşan kalıp civatalar yardımıyla birbirine bağlandı. Buhar girişi için kalıbın yüzeylerine 1 mm çapında toplam 64 kanal açılmıştır. Şekil 3.3’ de çekme numunesi şişirme kalıbı görülmektedir.

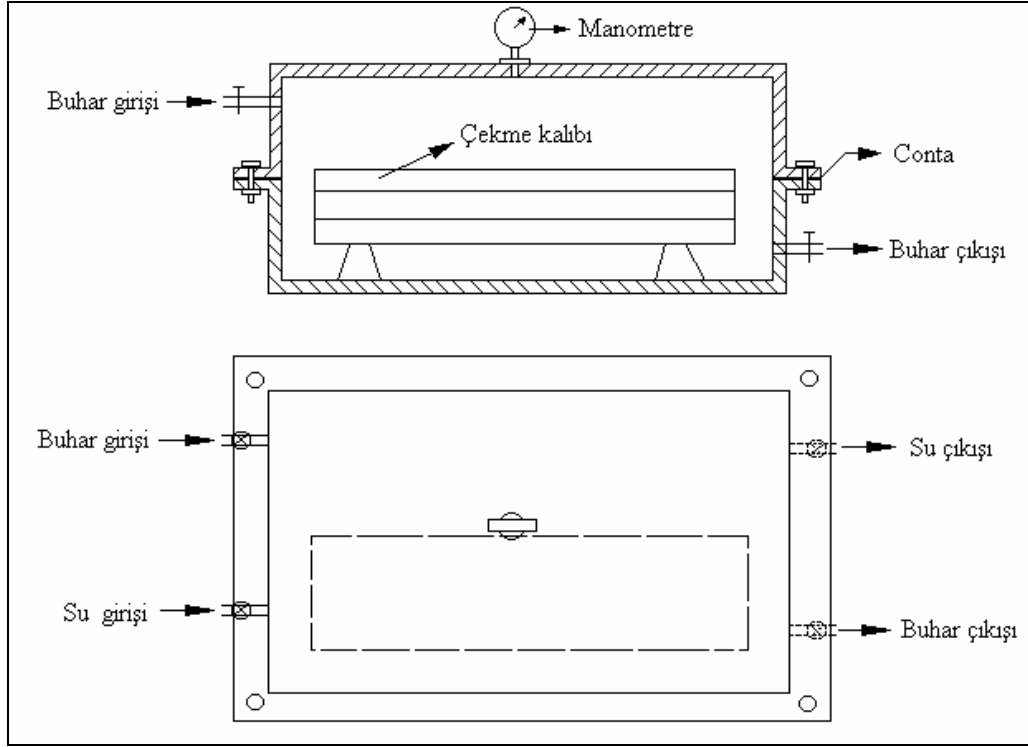


Şekil 3.3. Çekme numunesi kalıbı

3.3.1. Kalıplama ünitesi

Kalıplama işlemindeki optimum parametrelerin belirlenmesi ve kalıplamadaki değişkenlerin kontrolünü sağlamak için Şekil 3.4’de görülen deney düzeneği hazırlanmıştır. Esas amacı basıncı kontrol altında tutarak kalıplama sağlamak olan bu ünite ötektik Al-Si bileşimine sahip iki ayrı döküm gövdeden üretilmiştir. Gövdelerin birleşme yüzeyine kalıplama esnasında buhar kaçağını önlemek için sıcak buhardan etkilenmeyen plastik conta kullanıldı ve gövdeler birbirine 4 adet civata ile bağlandı. Sistem üzerine basınç kontrolü için manometre ve küresel vanalar bağlanmıştır. Buhar kazanından gelen buharın kontrolü ve soğutma suyunun sisteme girişi

küresel vanalar ile sağlanmıştır. Kalıplama ünitesindeki sıcaklığı ölçmek için mineral izoleli “K” tipi termokapl kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Basınç ve buhar kontrollü kalıplama ünitesi

3.4. Granüllerin Ön Şişirme İşlemi

Ön şişirme işleminden önce ön şişirme ünitesinin metal aksamı şişirme işlemi sırasında buhar yoğunlaşmasına sebep olmaması için 10 dk süre ile 97°C 'ye ısıtıldı. Ön şişirme işleminde 0,25-0,35 mm arasındaki tane boyutu dağılımına sahip genişleyebilen granüller 97°C sıcaklıkta 15, 30 ve 60 s süre ile atmosfer basıncında ön şişirme işlemine tabi tutuldular. Ön şişirme işlemi öncesi ve ön şişirme işlemi sırasında yoğunlaşan buhar ünite tabanında bulunan tahliye kanalları ile dışarıya atılmıştır. 97°C üzerindeki sıcaklıklar granüllerin içerisinde bulunan pentan miktarını oldukça düşürmektedir. Bu sebepten ön şişirme işlemi atmosfer basıncında uygulanmıştır. Kalıplama işlemleri için 15, 30 ve 60 s süresi ile ön şişirilmiş granüller kullanılmıştır.

Farklı süreler ile ön şişirilmiş granüller ön şişirme işlemini takiben 17 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek kararlı hale getirilmiştir. Yapılan ön şişirme işlemlerinden sonra granüllerin hacim değişimi 15, 30 ve 60 s ön şişirme süreleri için tespit edilmiştir.

3.5. Ön Şişirilmiş Granüllerin Kalıplanması

Kalıplama ünitesinde sıcaklık kontrolü basınç ile kontrol edilmiş ve uygulanan basınca karşılık gelen sıcaklık değerleri termokaptan alınmıştır. Ünite içerisinde oluşturulan her bir basınç değeri için üçer adet sıcaklık verisi alınmıştır. Böylece istenilen basınç değerinde çalışabilmek için sistemin sıcaklığa göre verdiği basınç değerleri belirlenmiştir.

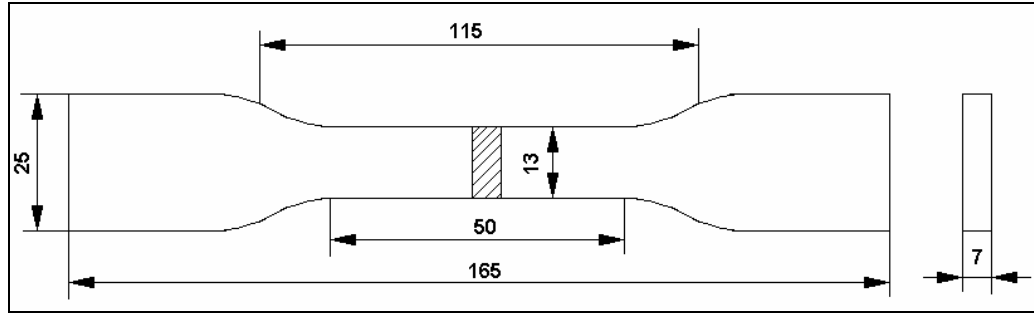
Değişik ön şişirme süreleri (15, 30 ve 60 s) ile elde edilen granüllerden 0,570, 0,665 ve 0,860 g alınarak 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemi yapılmıştır. Kalıplama işlemlerinde her bir basınç ve süre için beş adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numuneler yoğunluk-ön şişirme süresi-kalıplama basıncı-kalıplama süresi sırasına göre kodlanmıştır. Yüksek yoğunluğa sahip numuneler (Y) 39,07 kg/m³, orta yoğunluğa sahip numuneler (O) 30,70 kg/m³ ve düşük yoğunluğa sahip numuneler (D) 26,20 kg/m³ olarak kodlanarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

3.6. Çekme Deneyi

Çekme deneyi 3 grup numune üzerinde yapılmıştır. 1) 15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,860 gr granül numunesi 0,8, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,665 gr granül numuneleri 1,1 atm buhar basıncında ve 3) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,570 gr granül numuneleri 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında

20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen standart çekme deneyi numuneleri kullanılmıştır.

Değişik şartlarda elde edilen her bir çekme numunesinin çekme işlemi AG1 SHIMADZU marka 0,1-50 mm/dak çekme hızı ve 500 kg çekme kapasitesine sahip bilgisayar kontrollü çekme cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Çekme deneyinde çene ilerleme hızı 2 mm/dak olarak uygulanmıştır. Çekme deneyinde uygulanan yük kg, dayanım kg/mm^2 ve uzama % olarak alınmıştır. Şekil 3.5’de ASTM D638 standardına göre çekme numunesi ölçüleri verilmiştir. Çekme deneyinde dayanım, maksimum yük ve % uzama değerleri aynı şartlarda elde edilen beş adet çekme numunesinin ortalaması alınarak bulunmuştur.



Şekil 3.5. ASTM D638 standardına göre çekme numunesi ölçüleri

Çizelge 3.2. Deneylerde kullanılan numune grupları

Ağırlık (g)	Ön şişirme süresi (s)	Kalıplama basıncı (atm)	Kalıplama süresi (s)	Numune kodları
0,860	15	0,8	20	Y-15-0,8-20
			30	Y-15-0,8-30
			40	Y-15-0,8-40
		1,0	20	Y-15-1,0-20
			30	Y-15-1,0-30
			40	Y-15-1,0-40
		1,1	20	Y-15-1,1-20
			30	Y-15-1,1-30
			40	Y-15-1,1-40
		1,2	20	Y-15-1,2-20
			30	Y-15-1,2-30
			40	Y-15-1,2-40
0,665	15	1,1	20	O-15-1,1-20
			30	O-15-1,1-30
			40	O-15-1,1-40
	30	1,1	20	O-30-1,1-20
			30	O-30-1,1-30
			40	O-30-1,1-40
	60	1,1	20	O-60-1,1-20
			30	O-60-1,1-30
			40	O-60-1,1-40
0,570	30	0,8	20	D-30-0,8-20
			30	D-30-0,8-30
			40	D-30-0,8-40
		0,9	20	D-30-0,9-20
			30	D-30-0,9-30
			40	D-30-0,9-40
		1,0	20	D-30-1,0-20
			30	D-30-1,0-30
			40	D-30-1,0-40
		1,1	20	D-30-1,1-20
			30	D-30-1,1-30
			40	D-30-1,1-40
		1,2	20	D-30-1,2-20
			30	D-30-1,2-30
			40	D-30-1,2-40
	60	1,0	20	D-60-1,0-20
			30	D-60-1,0-30
			40	D-60-1,0-40
		1,1	20	D-60-1,1-20
			30	D-60-1,1-30
			40	D-60-1,1-40
		1,2	20	D-60-1,2-20
			30	D-60-1,2-30
			40	D-60-1,2-40

3.7. Termo Gravimetrik Analiz (TGA) Deneyi

Polimerlerin termal kararlılıklarını belirlemede “Termo Gravimetrik Analiz (TGA)” tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik polimer ağırlığının zaman ve sıcaklıkla değişimini belirler [14, 34, 72]. Polimerlerin termo gravimetrik analiz deneyinde ile termal kararlılıklar sabit bir ısıtma hızında sıcaklıkla ağırlık kaybı izleniyor ise “Dinamik TGA”, sabit sıcaklıkta ağırlık kaybı zamanın bir fonksiyonu olarak izleniyor ise “İzotermal TGA” olarak adlandırılmaktadır.

Deneysel çalışmada dinamik TGA deneyleri Roketsan A.Ş. laboratuvarlarında Rheometric Scientific marka bilgisayar kontrollü cihaz ile yapılmıştır. Cihaz 0-1000 °C sıcaklık ve 0,1-100 °C/dk aralığı ısıtma hızında çalışabilmekte ve koruyucu atmosfer olarak azot (N) gazı kullanılabilmektedir. Bu çalışmada TGA deneyleri 10 °C/dk ısıtma hızında ve 550 °C sıcaklıkta azot koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirildi.

Dinamik TGA deneyleri; 1) herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüller, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüller, ve 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numuneler üzerinde olmak üzere yapıldı.

3.8. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Deneyi

Polimerlerde sıcaklık ile dönüşüm noktaları “Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)” deneyi ile tespit edilebilmektedir. Bu deneyde polistiren malzemenin sıcaklıkla spesifik hacim, kırılma indisi ve dielektrik sabiti değişimini izlemek ve belirlemek mümkündür [72]. Polimer malzemelerde camsı geçiş sıcaklığı (T_g) ve ergime sıcaklığı (T_m) tespitinde genellikle termal analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak polimer malzemelerin ısısal geçişlerini belirlemede daha çok “Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)” deneyi tercih edilmektedir.

Deneysel çalışmada Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) deneyleri Roketsan A.Ş. laboratuvarlarında Rheometric Scientific marka bilgisayar kontrollü cihaz ile yapılmıştır. Cihaz -150 ile $+600$ $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık arasında ve $0,1$ ile 100 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında çalışabilmekte ve koruyucu atmosfer olarak azot (N) ve oksijen (O) gazları kullanılabilir. DSC deneyleri 10 $^{\circ}\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında, 550 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta ve azot koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirildi.

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) deneyleri; 1) herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüller, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüller, ve 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile $1,0$ atm buhar basıncı altında kalıplanmış numuneler üzerinde olmak üzere gerçekleştirildi. Deneylerde oda sıcaklığı ile 550 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında genişleyebilen polistirende sıcaklığa göre bozunum noktaları ve bozunum için gerekli olan enerji miktarları “J/gr” olarak tespit edilmiştir.

3.8. Ağırlık Değişim Deneyleri

Polistiren malzeme kalıplama işleminden sonra oda sıcaklığında zamana bağlı olarak ağırlık kaybına uğrar. Kalıplama sırasında buhar taneler arasına ve tane içine girerek yoğunlaşır ve oda sıcaklığında zamana bağlı olarak polistiren malzemeyi terk eder. Bu durum polistiren malzemede ağırlık kaybına neden olur.

Köpük model buhar yardımıyla granül (hücresel tane) duvarlarının yumuşaması ve tanelerin birbirine kaynaması ile alüminyum kalıp içerisinde oluşmaktadır. Hücresel tane içinde ve arayüzeyinde yoğunlaşan buharın dışarıya atılmaması durumunda dökümlerde gaz hatası meydana gelir.

Kalıplama sırasında uygulanan basınç ve kalıplama süresine bağlı olarak gerçekleşen tane kaynama derecesi hem tane içinde hem de taneler arasında buhar yoğunlaşmasını etkilemektedir. Tane kaynama derecesi

yükseldikçe tane içinde ve taneler arasında buhar yoğunlaşması azalmaktadır.

Genişleyebilen polistiren malzemede zamana bağlı olarak ağırlık değişimi; 1) 30 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,570 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,665 gr granül numuneleri 1,1 atm buhar basıncında ve 40 s, 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granülden alınan 0,860 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılmıştır. Kalıplanan her bir numunede kalıplama işleminden hemen sonra ilk 3 saat için 30 dak aralıklarla ve bu süreyi takip eden 42 saat için 1 saat aralıklarla ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Ağırlık ölçümü süresince numuneler oda sıcaklığında bekletildi. Ağırlık ölçümlerinde 0,001 gr hassasiyetinde hassas terazi kullanıldı.

3.9. Mikroyapı Deneyleri

Numunelerde mikroyapı incelemesi için çekme deneylerde kullanılan numune grupları (Çizelge 3.2) kullanılmıştır. Numunelerde mikroyapı incelemesi çekme deneyini takiben kalıp duvarlarına karşı dış yüzey ve çekme kırık yüzeylerinde yapılmıştır. Mikroyapı incelemesinde Çizelge 3.2'de belirtilen şartlarda elde edilen numunelerde ön şişirme ve kalıplama süresi, kalıplama basıncı ve numune yoğunluğunun kalıp duvarlarına karşı dış yüzey ve çekme kırık yüzeylerde polistiren hücresel tane şekli ve kaynamasına etkisi gözlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri için Jeol (JSM 6060) marka elektron tarama mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Değişik süre ve buhar basıncında elde edilen GPS numunelerinde yoğunluk, ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresinin polistirenin tane kaynaması, tane yapısı ve şekli ve kırık arayüzeylere olan etkisi mikroskobik olarak incelenmiştir.

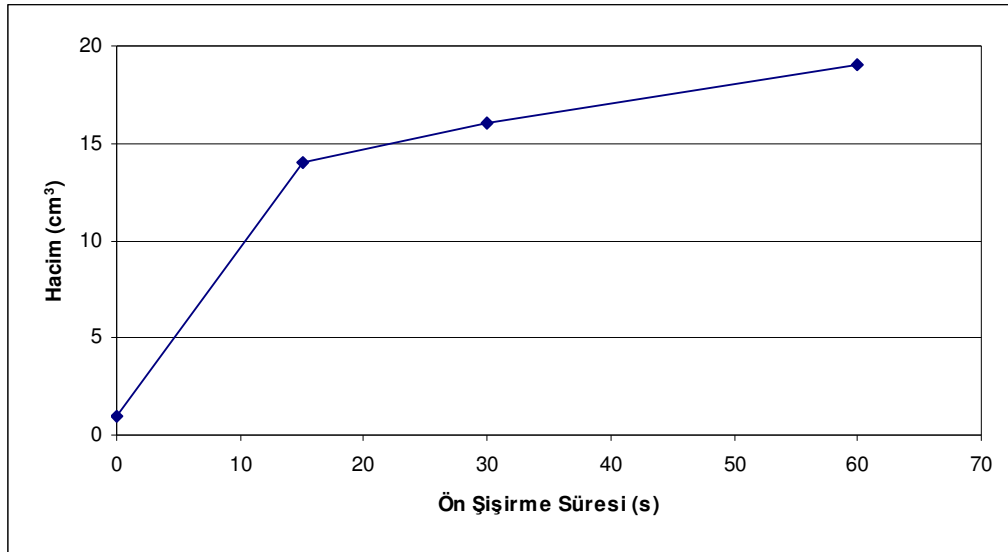
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Ön Şişirme Süresi ile Granül Hacim Değişimi

Yapılan ön şişirme işlemlerinde artan ön şişirme süresi ile granül hacimleri artmıştır. 1 cm³ hacme sahip olan ham polistiren granülleri 15, 30 ve 60 s ön şişirme işlemleri ile granül hacmi 19 kata kadar artmıştır, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1.

Çizelge 4.1. Ön şişirme işlemine göre granüllerde meydana gelen hacimsel değişim

Ön şişirme süresi (s)	0	15	30	60
Hacim (cm ³)	1	14	16	19



Şekil 4.1. Ön şişirme sürelerine göre granüllerde meydana gelen hacimsel değişim

4.2. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi 3 grup numune üzerinde yapılmıştır. Bunlar; 1) 15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,860 gr granül numunesi 0,8, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,665 gr granül numuneleri 1,1 atm buhar basıncında ve 3) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,570 gr granül numuneleri 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen standart çekme deneyi numuneleridir. Çekme deneyi eğrilerinden görüldüğü gibi (Şekil 4.2-Şekil 4.19) boyun vermenin gerçekleşmediği numunelerde çekme ve kopma gerilmeleri aynı noktada gerçekleşmiştir. Çekme deneyi sonuçları toplu olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

4.2.1. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları

15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,860 gr granül numunelerin 0,8, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 4.2- Şekil 4.6 ve Çizelge 4.3’de verilmiştir.

0,8 atm buhar basıncında 20 s kalıplama süresi ile elde edilen numunenin çekme dayanımı $0,173 \text{ N/mm}^2$ gözlemlenmiştir. Çekme dayanımı 30 s kalıplama süresinde $0,396 \text{ N/mm}^2$ ve 40 s kalıplama süresinde $0,505 \text{ N/mm}^2$ ’ye yükselmiştir, Şekil 4.2. Bu gruptaki numunelerin elastikiyet modülü ve % uzama değerleri de kalıplama süresi arttıkça artmıştır. Elastikiyet modülü 20, 30 ve 40 s kalıplama süresinde sırasıyla 7,5, 11,3 ve $11,5 \text{ N/mm}^2$ olarak elde edilmiştir. Bu numunelerde 20, 30 ve 40 s kalıplama süresinde sırasıyla 3,55, 7,08 ve 10,38 % uzama değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonuçları

Numune kodları	Elastik Modül (N/mm ²)	Akma Dayanım (N/mm ²)	Müh. Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
Y-15-0,8-20	7,5	0,144	0,173±0,02	3,55±1,75
Y-15-0,8-30	11,3	0,203	0,396±0,02	7,08±0,74
Y-15-0,8-40	11,5	0,115	0,505±0,01	10,38±1,3
Y-15-1,0-20	10,5	0,134	0,220±0,01	3,66±0,34
Y-15-1,0-30	10,9	0,135	0,549±0,03	11,11±1,04
Y-15-1,0-40	10,7	0,209	0,584±0,01	11,78±0,86
Y-15-1,1-20	10,9	0,151	0,180±0,06	2,86±1,33
Y-15-1,1-30	10,8	0,115	0,499±0,03	8,72±1,10
Y-15-1,1-40	10,7	0,220	0,569±0,03	9,78±0,71
Y-15-1,2-20	8,5	0,134	0,502±0,01	7,69±1,35
Y-15-1,2-30	11,2	0,215	0,604±0,03	9,01±1,01
Y-15-1,2-40	8,4	0,130	0,503±0,07	7,98±0,81
O-15-1,1-20	-----	-----	-----	-----
O-15-1,1-30	4,9	0,104	0,120±0,01	2,7±1,08
O-15-1,1-40	7,3	0,201	0,214±0,05	3,47±1,21
O-30-1,1-20	6,3	0,039	0,039±0,01	0,49±0,11
O-30-1,1-30	8,3	0,125	0,240±0,02	5,55±1,23
O-30-1,1-40	8,2	0,144	0,392±0,02	8,32±0,97
O-60-1,1-20	4,9	0,078	0,078±0,02	1,12±0,48
O-60-1,1-30	8,5	0,115	0,326±0,01	9,36±1,51
O-60-1,1-40	8,6	0,256	0,451±0,03	10,35±0,94
D-30-0,8-20	-----	-----	-----	-----
D-30-0,8-30	-----	-----	-----	-----
D-30-0,8-40	6,9	0,156	0,156±0,03	2,86±0,8
D-30-0,9-20	-----	-----	-----	-----
D-30-0,9-30	-----	-----	-----	-----
D-30-0,9-40	7	0,161	0,172±0,00	2,95±0,15
D-30-1,0-20	-----	-----	-----	-----
D-30-1,0-30	6,8	0,108	0,131±0,03	3,34±1,45
D-30-1,0-40	7	0,204	0,252±0,05	4,66±2,45
D-30-1,1-20	6,4	0,129	0,163±0,04	3,35±1,32
D-30-1,1-30	6,9	0,160	0,262±0,02	7,27±2,51
D-30-1,1-40	7,8	0,146	0,291±0,04	8,26±3,30
D-30-1,2-20	5,8	0,154	0,177±0,01	3,37±0,83
D-30-1,2-30	6,6	0,154	0,295±0,02	8,74±1,20
D-30-1,2-40	7,4	0,154	0,318±0,03	9,32±1,50
D-60-1,0-20	7,4	0,111	0,111±0,01	1,40±0,3
D-60-1,0-30	7,4	0,144	0,184±0,01	4,20±1,2
D-60-1,0-40	7,4	0,134	0,271±0,03	7,90±1,3
D-60-1,1-20	7,4	0,134	0,177±0,02	5,40±0,2
D-60-1,1-30	7,5	0,122	0,245±0,01	6,40±0,3
D-60-1,1-40	7,8	0,134	0,308±0,02	8,20±3,0
D-60-1,2-20	7,4	0,146	0,182±0,03	3,50±0,8
D-60-1,2-30	7,7	0,139	0,339±0,01	8,90±0,2
D-60-1,2-40	7,7	0,139	0,320±0,01	9,30±0,6

Akma dayanımı 20 s kalıplama süresinde 0,144 N/mm² iken 30 s kalıplama süresinde 0,203 N/mm²'ye yükselmiş ve 40 s kalıplama süresinde 0,115 N/mm²'ye düşmüştür.

1 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı ve akma dayanımı kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Çizelge 4.3 ve Şekil 4.3. Elastikiyet modül değerlerinde ise kalıplama süresine göre belirgin bir değişiklik olmamıştır. Ancak 20 s kalıplama süresinde 3,66 olan % uzama değeri 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde önemli bir artış göstererek sırasıyla 11,11 ve 11,78'e yükselmiştir.

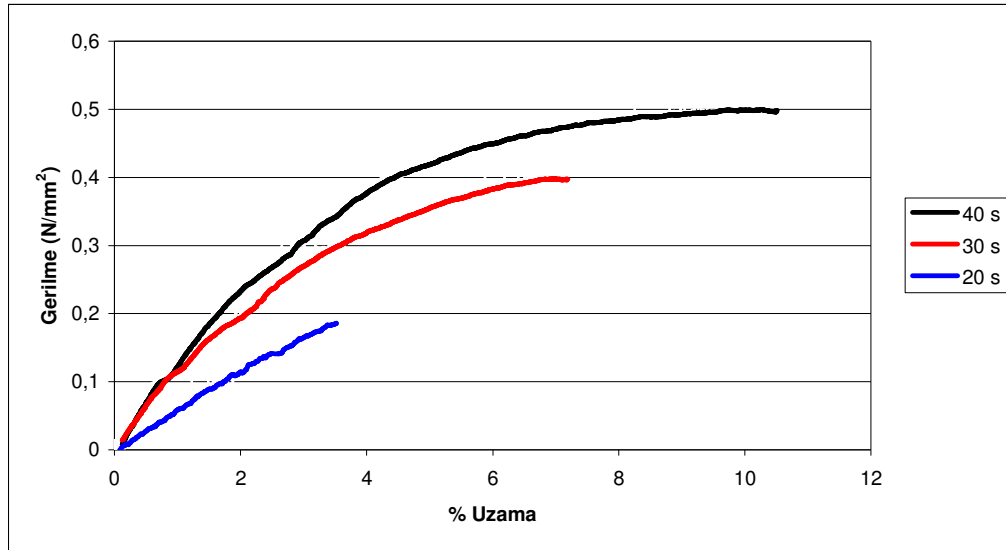
1,1 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı ve % uzama değerleri kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4. Ancak elastikiyet modülü değerleri 1 atm buhar basıncında elde edilen değerlere çok yakın çıkmıştır. 20 s kalıplama süresinde 0,151 N/mm² olan akma dayanımı 30 s kalıplama süresinde 0,115 N/mm²'ye düşmüş ve 40 s kalıplama süresinde 0,220 N/mm²'ye yükselmiştir.

1,2 atm buhar basıncında 20 ve 30 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanım, akma dayanım ve % uzama değerleri kalıplama süresi arttıkça yükselmiş fakat 40 s kalıplama süresinden düşme meydana gelmiştir, Çizelge 4.3 ve Şekil 4.5. Elastikiyet modülü değerlerinde 20 ve 40 s kalıplama sürelerinde belirgin bir değişiklik olmamıştır. 30 s kalıplama süresinde ise malzemenin elastik modülü 11,2 N/mm²'ye artmıştır.

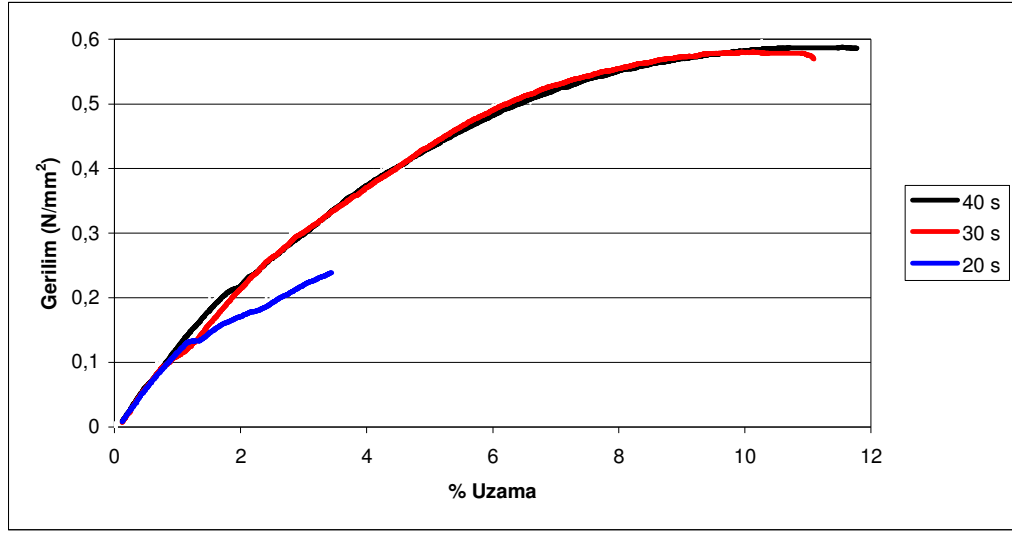
Şekil 4.6'da Y-15-(0,8, 1,0 1,1 ve 1,2) numunelerin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişimi verilmiştir. Çekme dayanımı 0,8, 1,0 ve 1,1 atm buhar basıncında kalıplama süresi arttıkça artmış fakat 1,2 atm buhar basınca 40 s kalıplama süresinde düşmüştür.

Çizelge 4.3. 15 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, $39,07 \text{ kg/m}^3$ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları

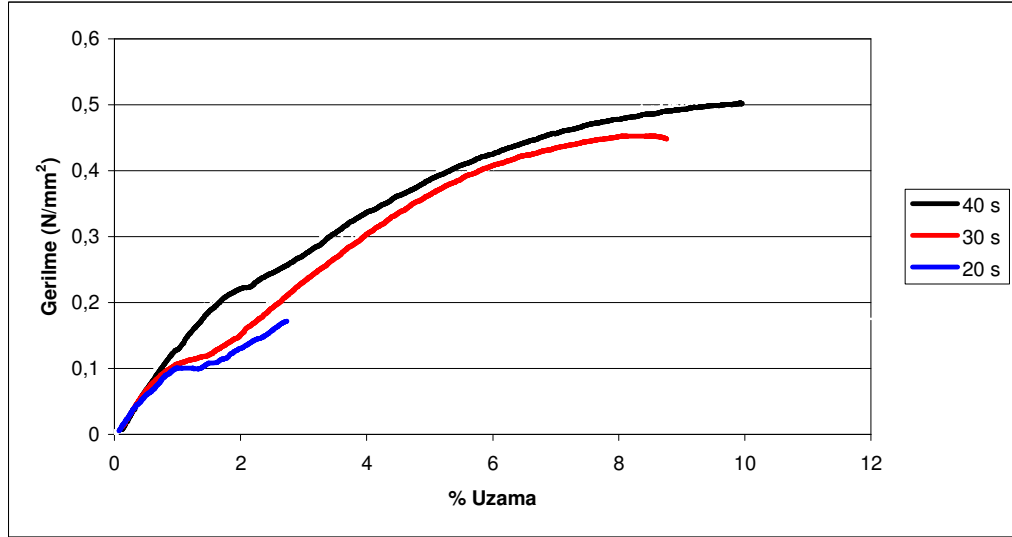
Numune kodları	Elastik Modülü (N/mm^2)	Akma Dayanım (N/mm^2)	Müh. Çekme Dayanımı (N/mm^2)	Uzama (%)
Y-15-0,8-20	6,5	0,144	$0,173 \pm 0,02$	$3,55 \pm 1,75$
Y-15-0,8-30	11,3	0,203	$0,396 \pm 0,02$	$7,08 \pm 0,74$
Y-15-0,8-40	11,5	0,115	$0,505 \pm 0,01$	$10,38 \pm 1,3$
Y-15-1,0-20	10,5	0,134	$0,220 \pm 0,01$	$3,66 \pm 0,34$
Y-15-1,0-30	10,9	0,135	$0,549 \pm 0,03$	$11,11 \pm 1,04$
Y-15-1,0-40	10,7	0,209	$0,584 \pm 0,01$	$11,78 \pm 0,86$
Y-15-1,1-20	10,9	0,151	$0,180 \pm 0,06$	$2,86 \pm 1,33$
Y-15-1,1-30	10,8	0,115	$0,499 \pm 0,03$	$8,72 \pm 1,10$
Y-15-1,1-40	10,7	0,220	$0,569 \pm 0,03$	$9,78 \pm 0,71$
Y-15-1,2-20	8,5	0,134	$0,502 \pm 0,01$	$7,69 \pm 1,35$
Y-15-1,2-30	11,2	0,215	$0,604 \pm 0,03$	$9,01 \pm 1,01$
Y-15-1,2-40	8,4	0,130	$0,503 \pm 0,07$	$7,98 \pm 0,81$



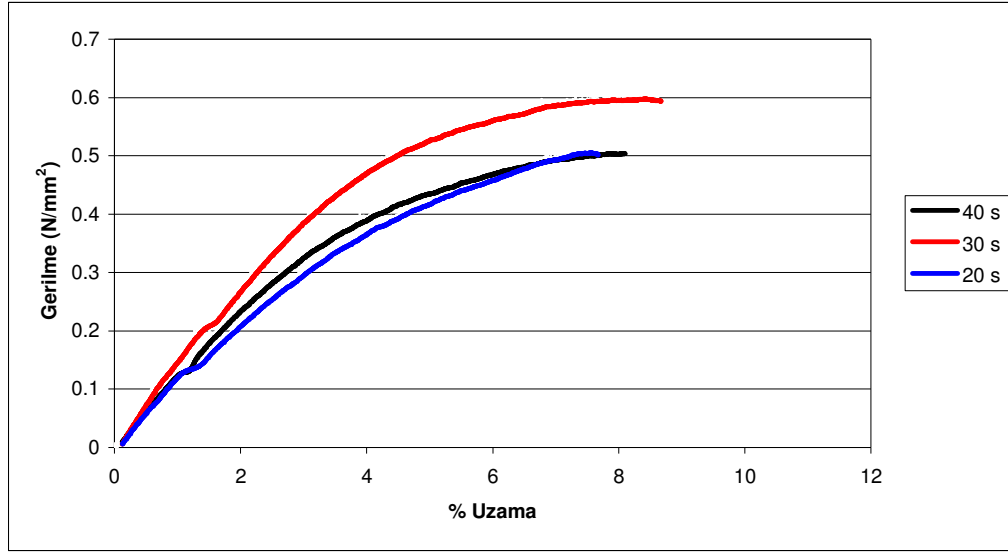
Şekil 4.2. Y-15-0,8 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin çekme eğrileri



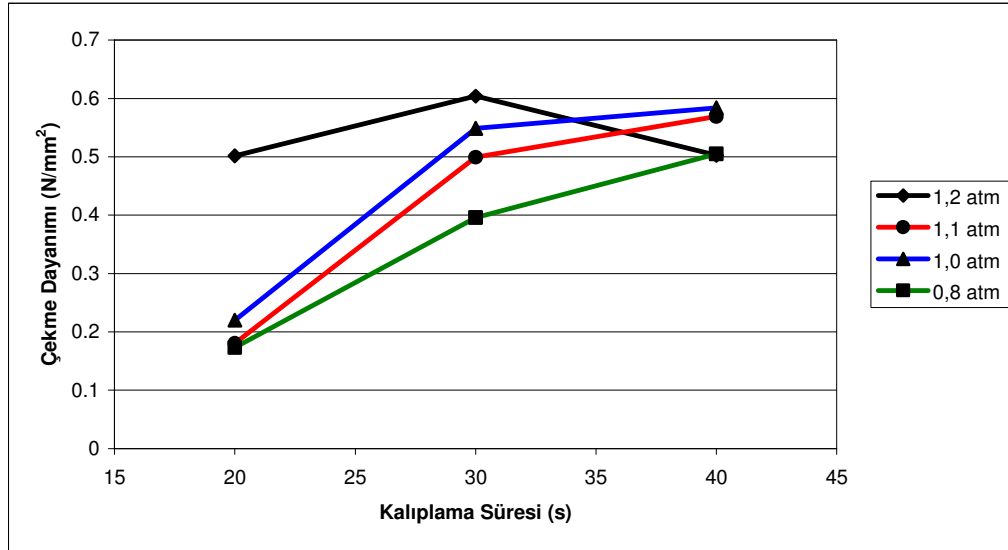
Şekil 4.3. Y-15-1,0 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin çekme eğrileri



Şekil 4.4. Y-15-1,1 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin çekme eğrileri



Şekil 4.5. Y-15-1,2 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin çekme eğrileri



Şekil 4.6. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1 1,2) numunelerin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişimi

Yapılan çalışmalarda 30 s ve 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulan numuneler hacim olarak daha fazla yer kapladıklarından $39,07 \text{ kg/m}^3$ yoğunluk değeri için aynı gram malzeme kalıba sığmamaktadır. Bundan dolayı 30 s ve 60 s ön şişirilmiş granüller $39,07 \text{ kg/m}^3$ yoğunlukta kalıplanamamıştır.

4.2.2. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları

15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,665 gr granül numunelerin 1,1 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 4.7-Şekil 4.10 ve Çizelge 4.4'de verilmiştir.

15 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş granüllerde 1,1 atm buhar basıncı ve 20 s kalıplama süresinde tane kaynaması sağlanamamıştır. 30 s kalıplama süresinde çekme dayanımı $0,120 \text{ N/mm}^2$ 'den 40 s kalıplama süresinde $0,214 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükselmiştir, Şekil 4.7. Bu gruptaki numuneler elastikiyet modülü, akma dayanımı ve % uzama değerleri açısından da benzer davranış göstermiştir. 30 s kalıplama süresinde $4,9 \text{ N/mm}^2$ olan elastikiyet modülü 40 s kalıplama süresinde % 47 artmıştır. 40 s kalıplama süresinde akma dayanımı ve % uzama değerleri de 30 s kalıplama süresine göre önemli derecede yükselmiştir.

30 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş granüllerin 1,1 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerleri kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Şekil 4.8 ve Çizelge 4.4. Elastikiyet modülü 20 s kalıplama süresinde $6,3 \text{ N/mm}^2$ iken 30 s kalıplama süresinde $8,3 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükselmiş fakat 40 s kalıplama süresinde değişmemiştir.

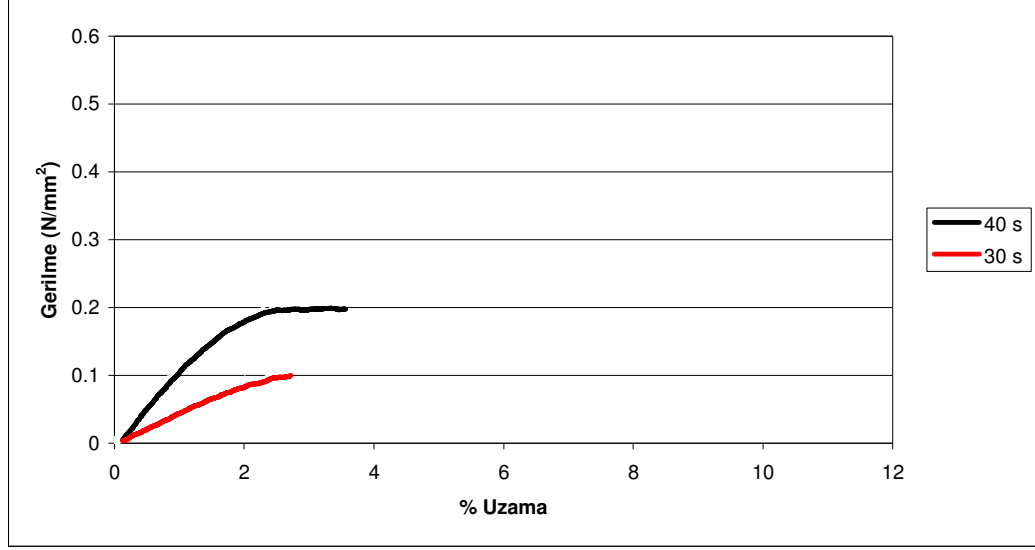
60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş granüllerden 1,1 atm kalıplama basıncında 20 s süre ile kalıplama işlemi 30 ve 40 s kalıplama sürelerine göre oldukça düşük çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerleri sergilemiştir, Şekil 4.9, Çizelge 4.4. 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerinde sırasıyla $8,5$ ve $8,6 \text{ N/mm}^2$ elastikiyet modülü değerlerini elde edilmiştir. 30 s kalıplama süresinde elde edilen $9,36 \%$ uzama, $0,326 \text{ N/mm}^2$ çekme

dayanımı ve $0,115 \text{ N/mm}^2$ akma dayanımı 40 s süre ile kalıplama işleminde sırasıyla 10,35, 0,451 N/mm^2 ve $0,256 \text{ N/mm}^2$ değerlerine yükselmiştir.

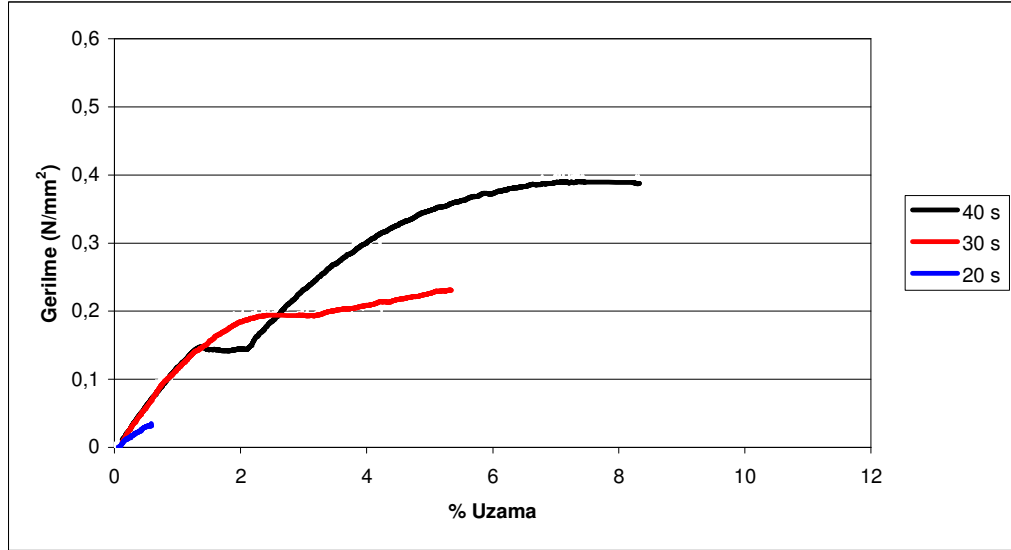
Bu gruptaki numunelerde 30 ve 40 s kalıplama süreleri için ön şişirme süreleri arttıkça çekme dayanımları artmıştır. 20 s kalıplama süresinde ise dayanımda önemli bir artış meydana gelmemiştir.

Çizelge 4.4. 15, 30 ve 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 1,1 atm kalıplama basıncında ve $30,7 \text{ kg/m}^3$ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları

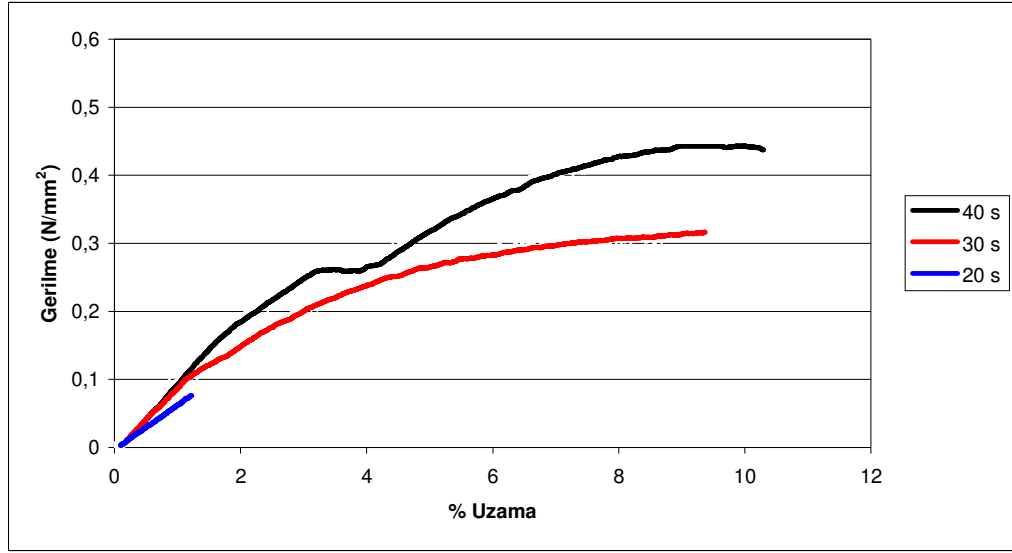
Numune Kodları	Elast. Modül (N/mm^2)	Akma Dayanım (N/mm^2)	Müh. Çekme Dayanımı (N/mm^2)	Uzama (%)
O-15-1,1-20	-----	-----	-----	-----
O-15-1,1-30	4,9	0,104	$0,120 \pm 0,01$	$2,70 \pm 1,08$
O-15-1,1-40	7,3	0,201	$0,214 \pm 0,05$	$3,47 \pm 1,21$
O-30-1,1-20	6,3	0,039	$0,039 \pm 0,01$	$0,49 \pm 0,11$
O-30-1,1-30	8,3	0,125	$0,240 \pm 0,02$	$5,55 \pm 1,23$
O-30-1,1-40	8,2	0,144	$0,392 \pm 0,02$	$8,32 \pm 0,97$
O-60-1,1-20	4,9	0,078	$0,078 \pm 0,02$	$1,12 \pm 0,48$
O-60-1,1-30	8,5	0,115	$0,326 \pm 0,01$	$9,36 \pm 1,51$
O-60-1,1-40	8,6	0,256	$0,451 \pm 0,03$	$10,35 \pm 0,94$



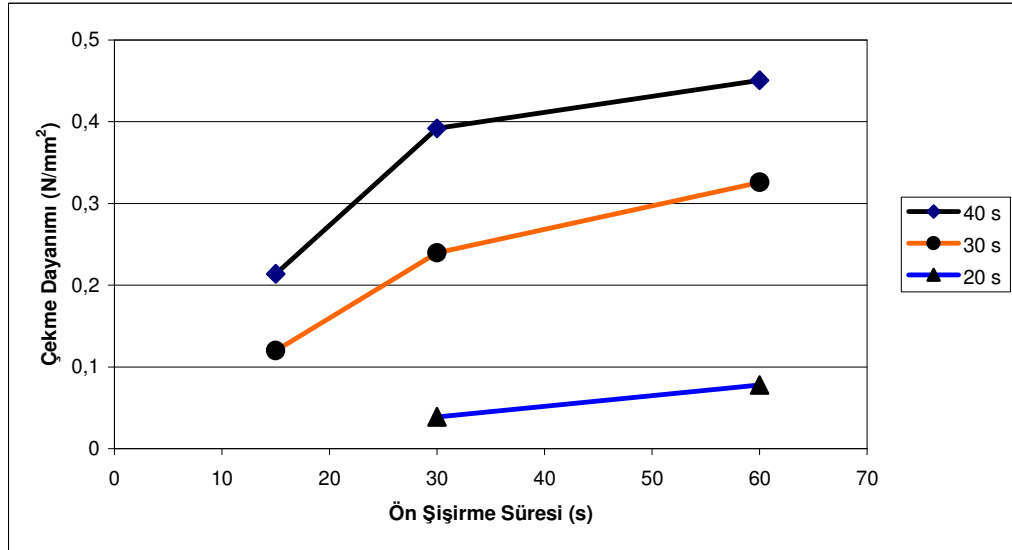
Şekil 4.7. O-15-1,1 ve 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.8. O-30-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.9. O-60-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.10. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerin ön şişirme işlemi ile çekme dayanımı değişimi

4.2.3. D-(30, 60)-(0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin çekme deney sonuçları

15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,570 gr granül numunesi 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulmuş fakat taneler arası yeterli kaynama olmadığından çekme deneyi numuneleri elde edilememiştir.

30 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,570 gr granül numunesi 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 4.11-Şekil 4.14 ve Çizelge 4.5'de verilmiştir.

0,8 ve 0,9 atm buhar basıncı altında 20 ve 30 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin çekme ve akma dayanımları, % uzama ve elastikiyet modülleri numuneler test için yeterli dayanıma sahip olmadığı için ölçülememiştir. 0,8 atm buhar basıncı altında 40 s süre ile kalıplanan numuneler $6,9 \text{ N/mm}^2$ elastikiyet modülü, 2,86 % uzama, $0,156 \text{ N/mm}^2$ çekme ve akma dayanımı değerleri vermiştir. Bu değerler 0,9 atm buhar basıncı altında 40 s süre ile kalıplama işleminde önemli ölçüde değişmemiştir.

1 atm buhar basıncında 20 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin test için yeterli dayanıma sahip olmadıkları gözlenmiştir. 30 ve 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin % uzama, çekme dayanımı ve akma dayanımı kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.12. Elastikiyet modülü değerlerinde ise kalıplama süresine göre belirgin bir değişiklik olmamıştır.

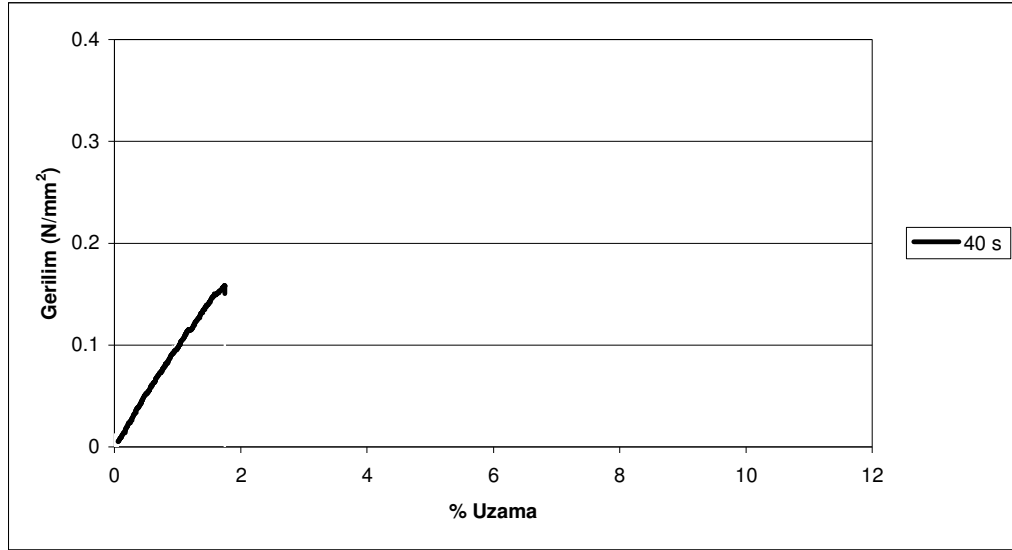
Çizelge 4.5. 30 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, $26,2 \text{ kg/m}^3$ kalıplama yoğunluğuna sahip Genişleyebilen polistiren malzemesinin çekme deney sonuçları

Numune Kodları	Elast. Modül (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Müh. Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
D-30-0,8-20	-----	-----	-----	-----
D-30-0,8-30	-----	-----	-----	-----
D-30-0,8-40	6,9	0,156	0,156±0,03	2,86±0,8
D-30-0,9-20	-----	-----	-----	-----
D-30-0,9-30	-----	-----	-----	-----
D-30-0,9-40	7	0,161	0,172±0,00	2,95±0,15
D-30-1,0-20	-----	-----	-----	-----
D-30-1,0-30	6,8	0,108	0,131±0,03	3,34±1,45
D-30-1,0-40	7	0,204	0,252±0,05	4,66±2,45
D-30-1,1-20	6,4	0,129	0,163±0,04	3,35±1,32
D-30-1,1-30	6,9	0,160	0,262±0,02	7,27±2,51
D-30-1,1-40	7,8	0,146	0,291±0,04	8,26±3,30
D-30-1,2-20	5,8	0,154	0,177±0,01	3,37±0,83
D-30-1,2-30	6,6	0,154	0,295±0,02	8,74±1,20
D-30-1,2-40	7,4	0,154	0,318±0,03	9,32±1,50

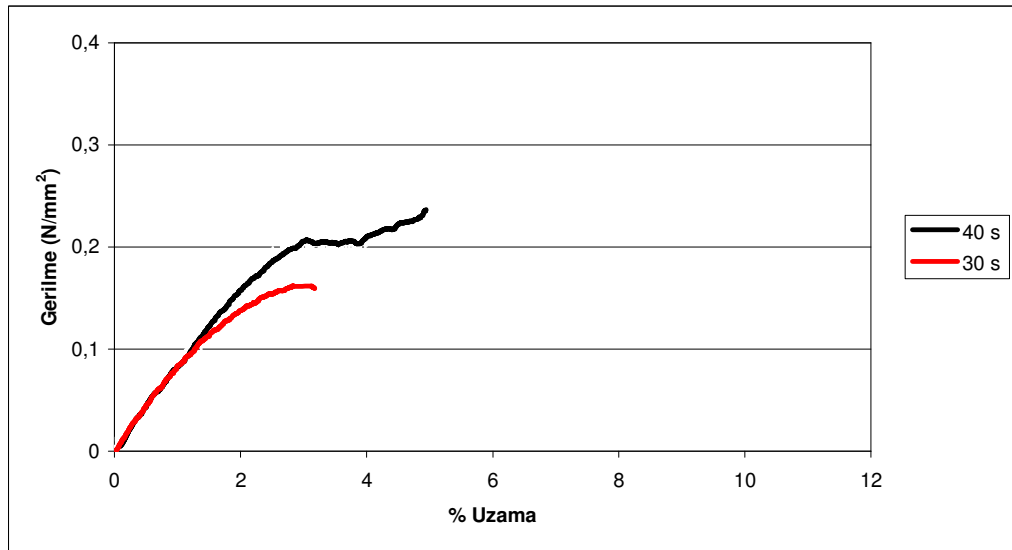
1,1 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanımı, % uzama ve elastikiyet modülü değerleri kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Çizelge 4.5 ve Şekil 4.13. Akma noktası 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde sırasıyla 0,129, 0,160 ve 0,146 N/mm² olarak gerçekleşmiştir.

1,2 atm buhar basıncında numunelerin çekme dayanımı, elastikiyet modülü ve % uzama değerleri esas olarak 20 s kalıplama süresinden 30 s kalıplama süresine geçişte artmış, 40 s kalıplama süresinde ise artışların önemli derecede olmadığı görülmüştür. Akma dayanım kalıplama süresi ile değişmemiştir.

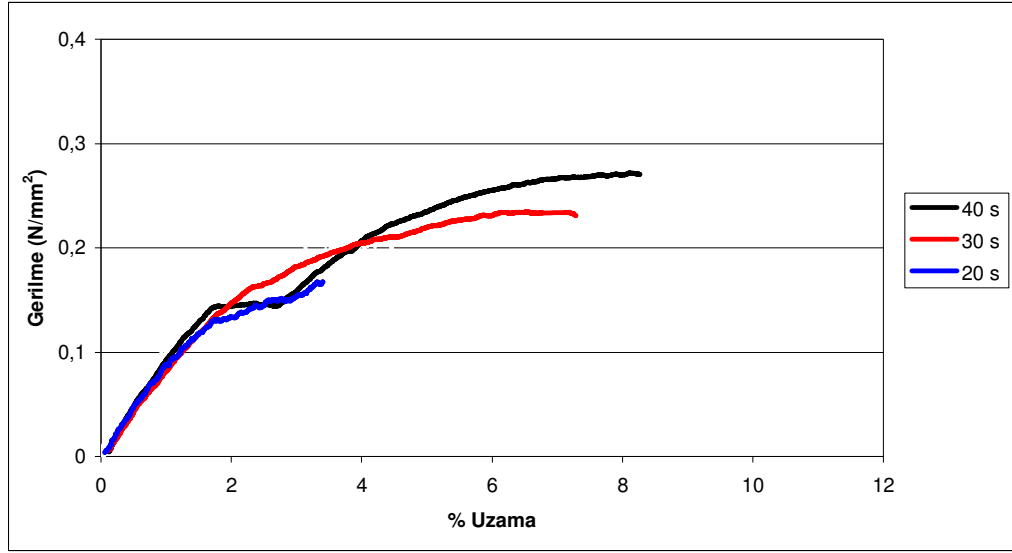
30 s ön şişirme işlemi gören grupta en yüksek çekme dayanımı $0,318 \text{ N/mm}^2$, % uzama 9,32 ve elastikiyet modülü $7,4 \text{ N/mm}^2$ 1,2 atm buhar basıncı altında 40 s kalıplama süresi ile elde edilmiştir, Şekil 4.15.



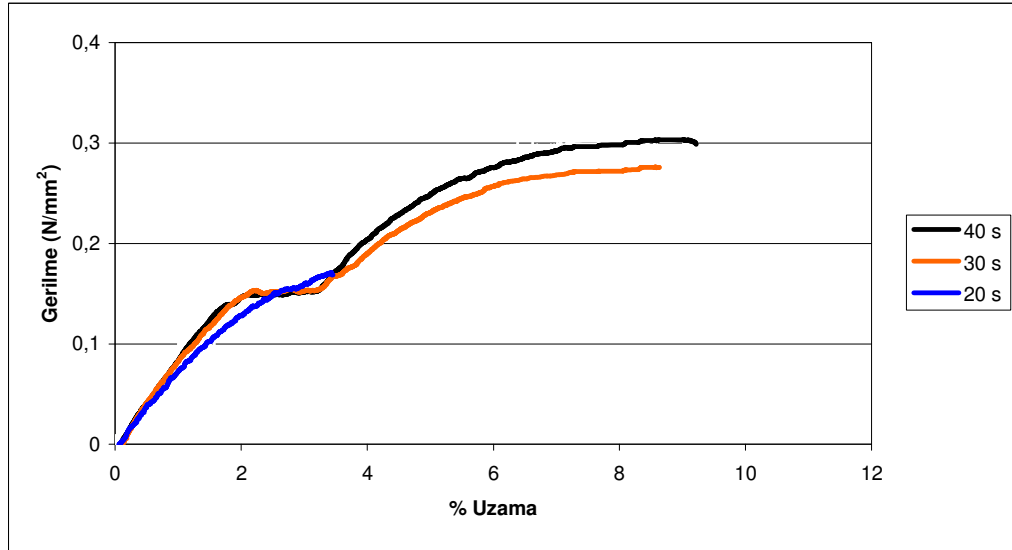
Şekil 4.11. D-30-0,8-40 numunesinin çekme eğrisi



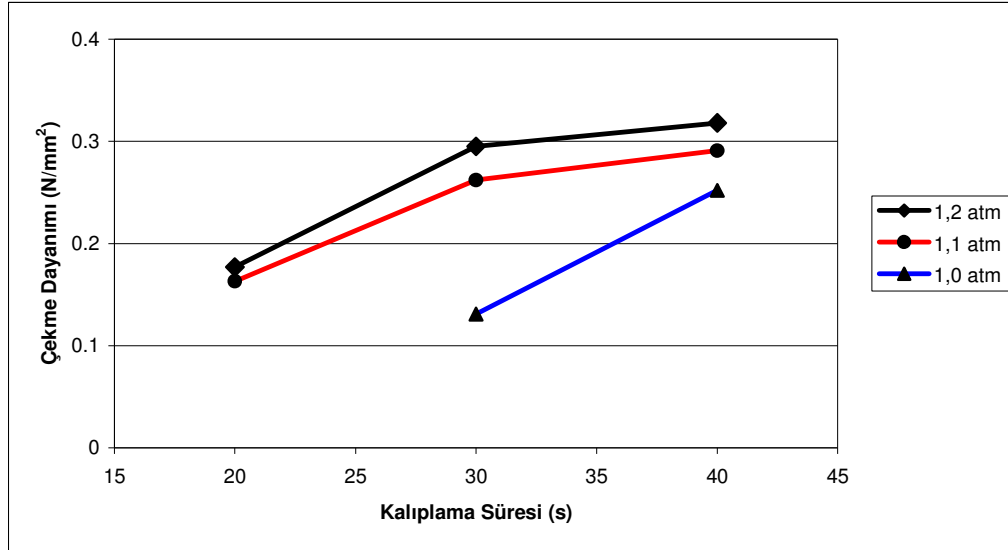
Şekil 4.12. D-30-1,0 ve 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.13. D-30-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.14. D-30-1,2 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.15. D-30-(1,0, 1,1, 1,2) numunelerinin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişim

60 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,570 gr granül numunesi 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 4.14-Şekil 4.16 ve Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi 1,0, 1,1 ve 1,2 atm kalıplama basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama süreleri birbirine yakın elastikiyet modülü değerlerini vermiştir. Çekme dayanımı ve % uzama değerleri genellikle artan basınç ve kalıplama süreleri ile artmıştır.

Çekme dayanımı ve % uzama 1,0 atm buhar basıncında artan kalıplama süresi ile artarak 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde sırasıyla 0,111, 0,184 ve 0,271 N/mm² ve 1,4, 4,2 ve 7,9 olarak gerçekleşmiştir. Akma dayanımı ise kalıplama süresi olan 20 s'de 0,111, 30 s'de 0,144 ve 40 s'de 0,134 N/mm² dir.

1,1 atm basınç ve 20 s kalıplama süresi ile elde edilen 0,177 N/mm² çekme dayanımı 30 s kalıplama süresinde % 38, 40 s kalıplama süresinde % 74 artış kaydetmiştir. 20 s kalıplama süresinde 0,177 N/mm² olarak gerçekleşen

çekme dayanımı 40 s kalıplama süresinde 0,308 N/mm²'ye yükselmiştir. % uzama değerleri 20, 30 ve 40 s kalıplama süresi ile sırasıyla 5,4, 6,4 ve 8,2 olarak elde edilmiştir. Akma dayanımı ve elastik modülü değerleri kalıplama süresine göre önemli bir değişiklik göstermemiştir.

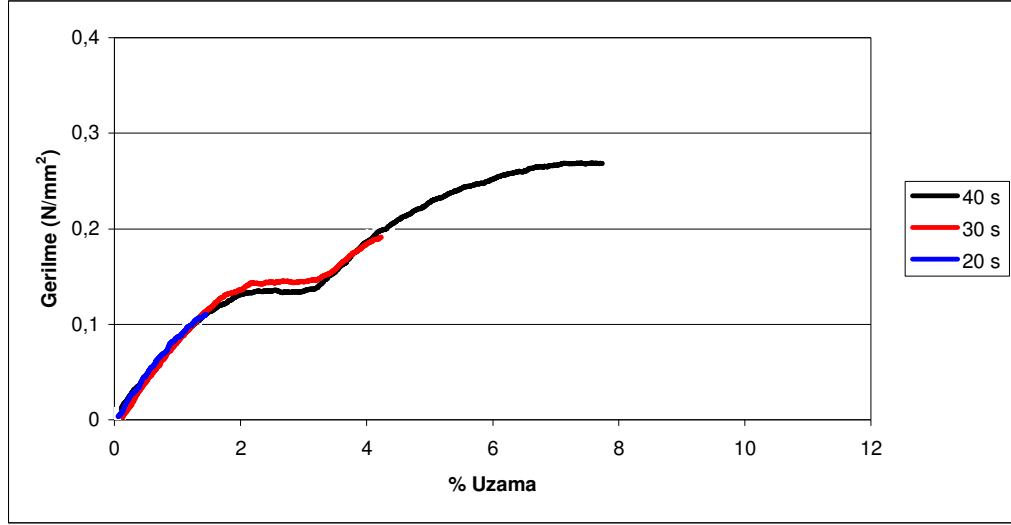
1,2 atm buhar basıncında kalıplama süresi ile elde edilen numunelerin çekme dayanım ve % uzama değerleri kalıplama süresi arttıkça yükselmiştir, Çizelge 4.6 ve Şekil 4.18. % uzama değeri ise esas olarak 20 s kalıplama süresinden 30 s kalıplama süresi geçişte % 154 artmış ve 40 s kalıplama süresinde önemli bir değişim olmamıştır. Kalıplama süresinin bu grup için akma dayanımı üzerinde etkili olmadığı gözlenmiştir.

Çizelge 4.6. 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş, 26,2 kg/m³ kalıplama yoğunluğuna sahip genişleyebilen polistiren malzemesinin (GPS) çekme deney sonuçları

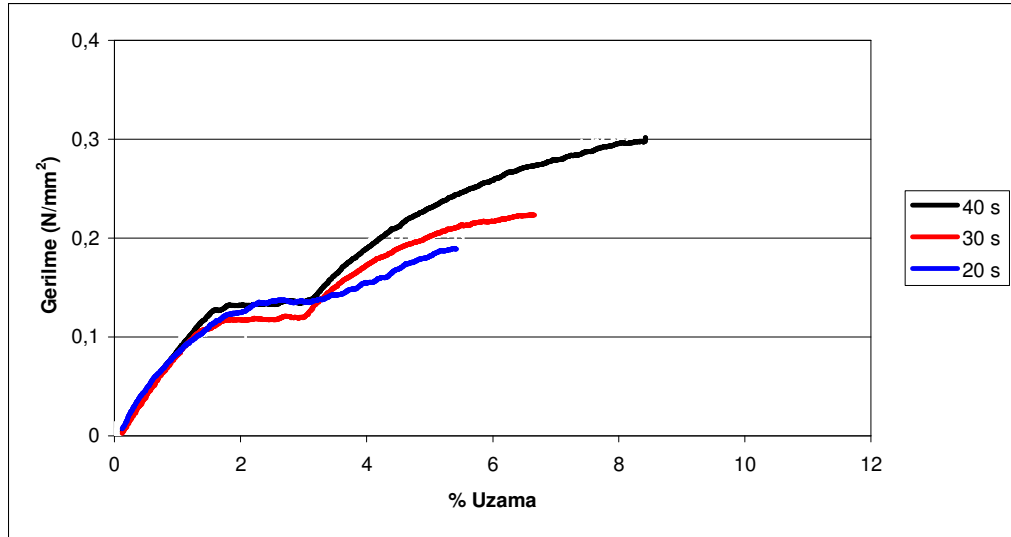
Numune Kodları	Elastik Modül (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Müh. Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
D-60-1,0-20	7,4	0,111	0,111 ± 0,01	1,4 ± 0,3
D-60-1,0-30	7,4	0,144	0,184 ± 0,01	4,2 ± 1,2
D-60-1,0-40	7,4	0,134	0,271 ± 0,03	7,9 ± 1,3
D-60-1,1-20	7,4	0,134	0,177 ± 0,02	5,4 ± 0,2
D-60-1,1-30	7,5	0,122	0,245 ± 0,01	6,4 ± 0,3
D-60-1,1-40	7,8	0,134	0,308 ± 0,02	8,2 ± 3,0
D-60-1,2-20	7,4	0,146	0,182 ± 0,03	3,5 ± 0,8
D-60-1,2-30	7,7	0,139	0,339 ± 0,01	8,9 ± 0,2
D-60-1,2-40	7,7	0,139	0,320 ± 0,01	9,3 ± 0,6

60 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,570 gr granül 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulan numune grubunda en yüksek çekme dayanım ve % uzama değerleri 1,2 atm basınç ve 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde (Şekil 4.19) elde

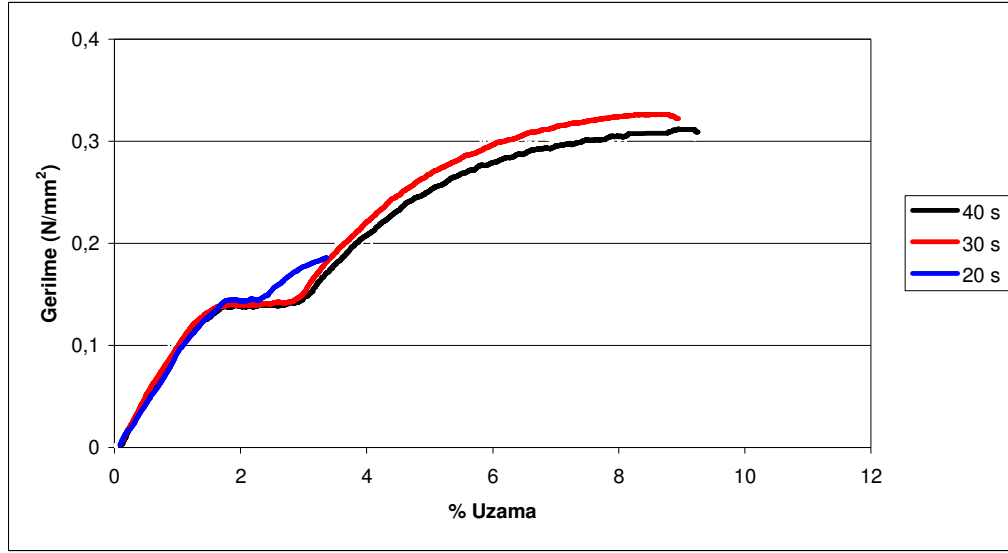
edilmiştir. Ancak, çekme dayanımı 30 s kalıplama süresini takiben düşme eğilimine girmiştir.



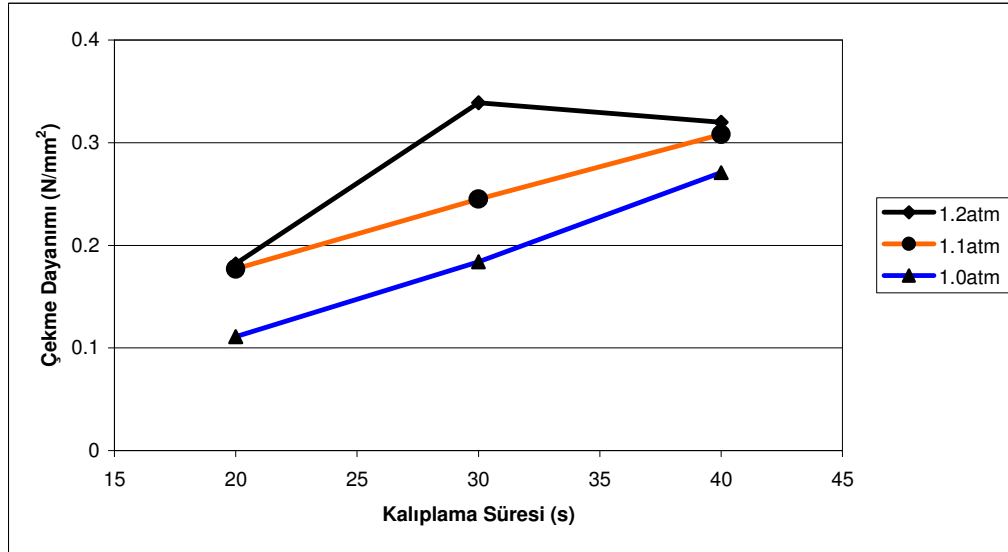
Şekil 4.16. D-60-1,0 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.17. D-60-1,1 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



Şekil 4.18. D-60-1,2 ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerinin çekme eğrileri



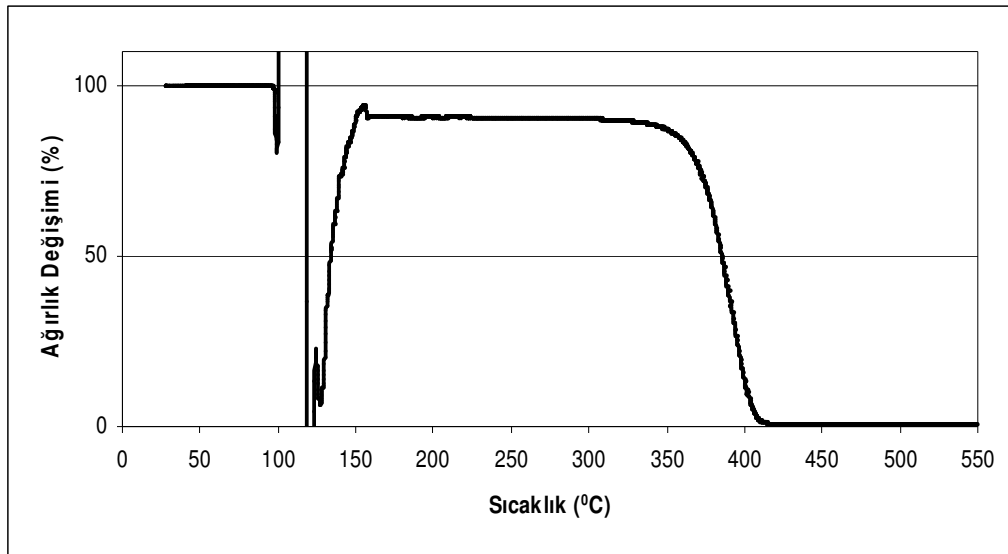
Şekil 4.19. D-60-(1,0, 1,1, 1,2) numunelerinin kalıplama süresine göre çekme dayanımındaki değişim

4.3. TGA ve DSC Sonuçları

4.3.1. TGA sonuçları

Dinamik TGA deneyleri; 1) herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüller, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüller ve 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numuneler üzerinde olmak üzere yapılmıştır.

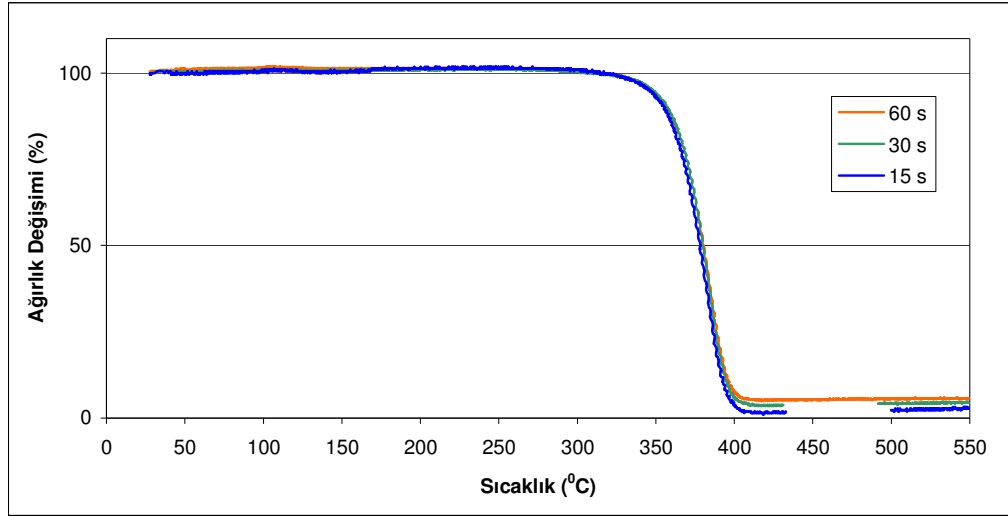
1) Herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüller için yapılan termo gravimetrik analiz sonucu Şekil 4.20’de verilmiştir. Ham polistiren granüllerde ağırlık kaybı iki aşamada meydana gelmiştir. Birinci aşama 97 °C -160 °C sıcaklık aralığında %9,26 ağırlık kaybına uğrayarak gerçekleşmiştir. İkinci aşamada ağırlık kaybı yaklaşık olarak 320 °C sıcaklıkta başlamış, 385 °C sıcaklıkta % 50,00 ve 420 °C sıcaklıkta % 99,47 olmuştur.



Şekil 4.20. Ön şişirilmemiş numunelerin % ağırlık değişimi TGA eğrisi

2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve oda sıcaklığında 30 gün süre ile yaşlandırılmış granüllerin ağırlık kaybı yaklaşık olarak 320 °C de başlamıştır.

Bu granüller 377 °C sıcaklıkta % 50 ve 420 °C sıcaklıkta 15, 30 ve 60 s ön şişirilmiş numuneler sırasıyla % 98,74, % 96,22 ve % 94,58 ağırlık kaybına uğramıştır, Şekil 4.21.

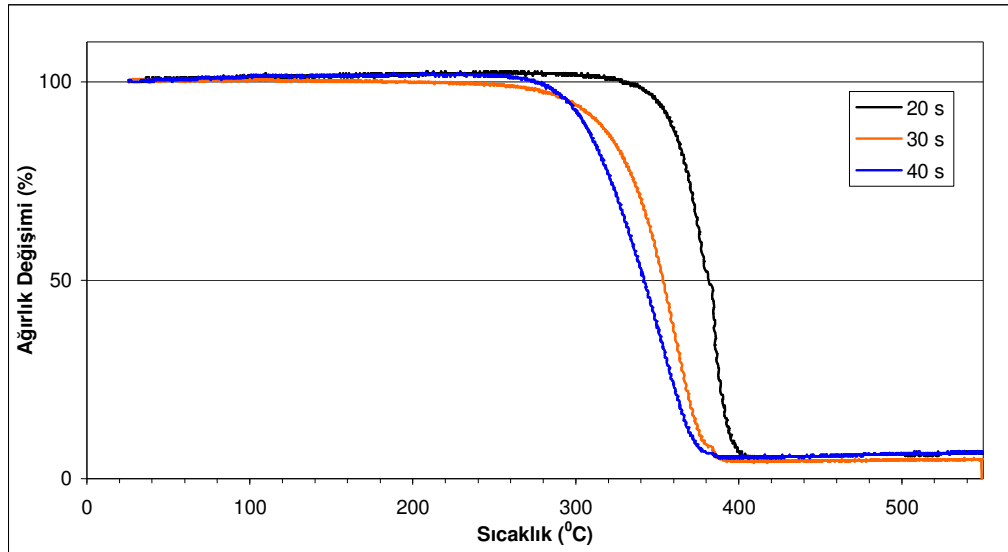


Şekil 4.21. 15, 30, 60 s ön şişirilmiş malzemenin % ağırlık değişimi TGA eğrisi

Çizelge 4.7. Herhangi bir işlem görmemiş ham, 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numunelerin TGA deney sonuçları

Ön Şişirme süresi (s)	Basınç (atm)	Kalıplama Süresi (s)	Dönüşüm Sıcaklığı (°C)		% 50 Ağırlık Kaybı Sıcaklığı (°C)	Toplam Ağırlık Kaybı (%)
			Başlama	Bitiş		
Ham		-	320	420	385	99,47
15	Açık atm	-	320	420	377	98,74
30	Açık atm	-	320	420	377	96,22
60	Açık atm	-	320	420	377	94,58
15	1,0	20	290	420	381	94,40
		30	257	420	353	94,40
		40	257	420	342	94,40

3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numunelerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bu gruptaki numunelerin TGA deneyleri sonucunda elde edilen ağırlık kayıpları Şekil 4.22'de verilmiştir. 20 s kalıplama süresi ile elde edilen numune ağırlık kaybına 290 °C'de başlarken 30 ve 40 s kalıplama süreleri ile elde edilen numunelerde bu değer 257 °C'dir. Numunelerde % 50 ağırlık kaybı 20, 30 ve 40 s kalıplama süreleri için sırasıyla 381 °C, 353 °C ve 342 °C'de meydana gelmiştir. Numunelerde ağırlık kaybı 20 s kalıplama süresi için 415 °C'de, 30 ve 40 s kalıplama süreleri için 400 °C'de tamamlanırken numunelerin tamamı ağırlıklarının yaklaşık olarak % 94,83' ünü kaybetmişlerdir.



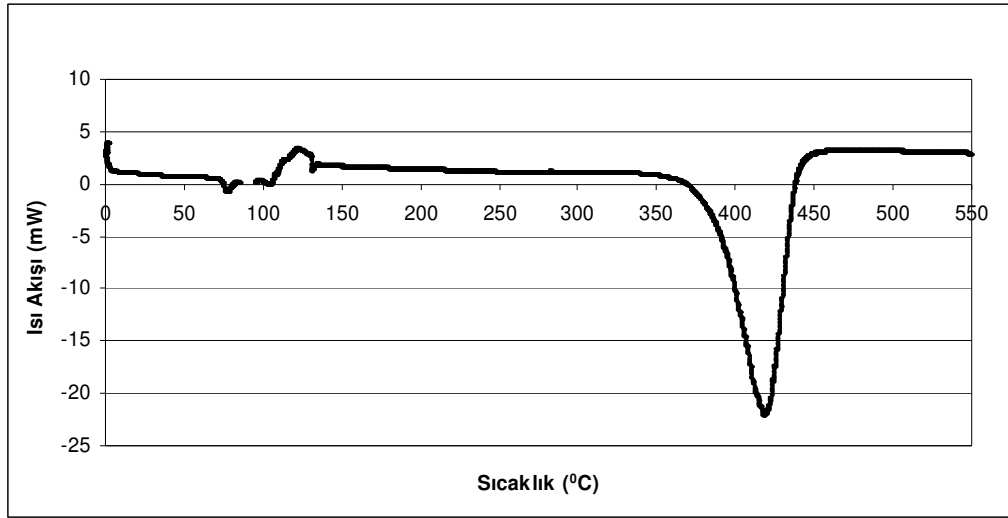
Şekil 4.22. 15 s ön şişirilmiş ve 20, 30, 40 s kalıplama süresine tabi tutulmuş numunelerin % ağırlık değişimi TGA eğrisi

4.3.2. Diferansiyel taramalı kalorimetre deney sonuçları

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre deneyleri; 1) herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüllerden elde edilen, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden elde edilen, ve 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numuneler

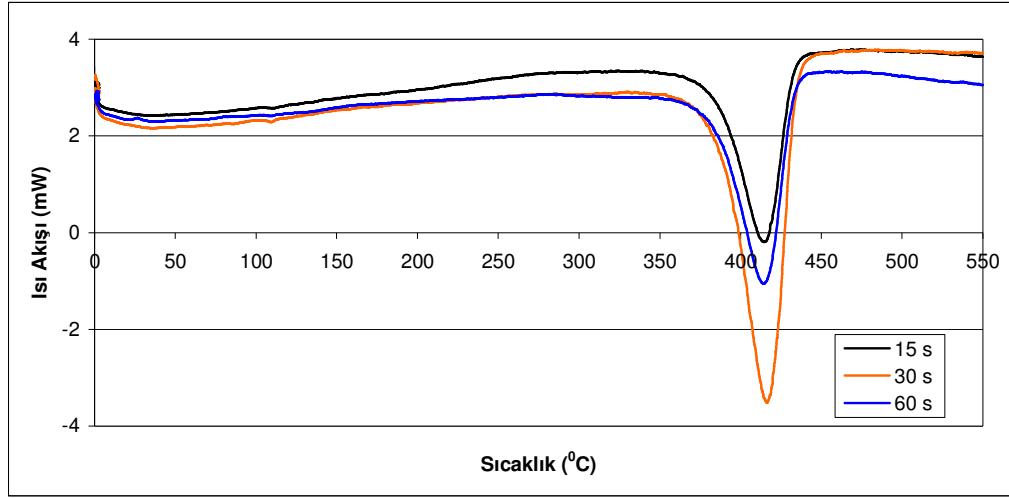
üzerinde yapılmıştır. Deneylerde oda sıcaklığı ile 550 °C sıcaklık aralığında genişleyebilen polistirende sıcaklığa göre bozunum noktaları ve bozunum için gerekli olan enerji miktarları “J/gr” olarak tespit edilmiştir.

1) Herhangi bir işlem görmemiş ham polistiren granüller; yaşlandırma ve ön şişirme işlemi görmemiş ham GPS granüllerinin DSC deney analiz sonucu Çizelge 4.8 ve Şekil 4.23’de verilmiştir. Granüllerin camısı geçiş sıcaklığı (T_g) 74,358 °C’ dir. Granüller endotermik reaksiyonun meydana geldiği 350-450 °C sıcaklık aralığında bozunmuştur. Bu bozunum için gerekli enerji miktarı 602,35 J/g’ dır. Granüllerin bozunum bölgesinde oluşan pikin sıcaklık değeri ise 417 °C’dir.



Şekil 4.23. Ön şişirilmemiş malzemenin DSC eğrisi

2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve oda sıcaklığında 30 gün süre ile yaşlandırılmış granüller; Bu grupta 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüllerde bozunum 350-450 °C sıcaklık aralığında ve bozunum bölgesinde meydana gelen pikin sıcaklık değeri ise 417 °C’ olarak gerçekleşmiştir, Çizelge 4.8 ve Şekil 4.24. Bozunum için gerekli enerji miktarları 15, 30 ve 60 s ön şişirme süreleri için sırasıyla 695,88, 719,69 ve 790,17 J/g’ dır.



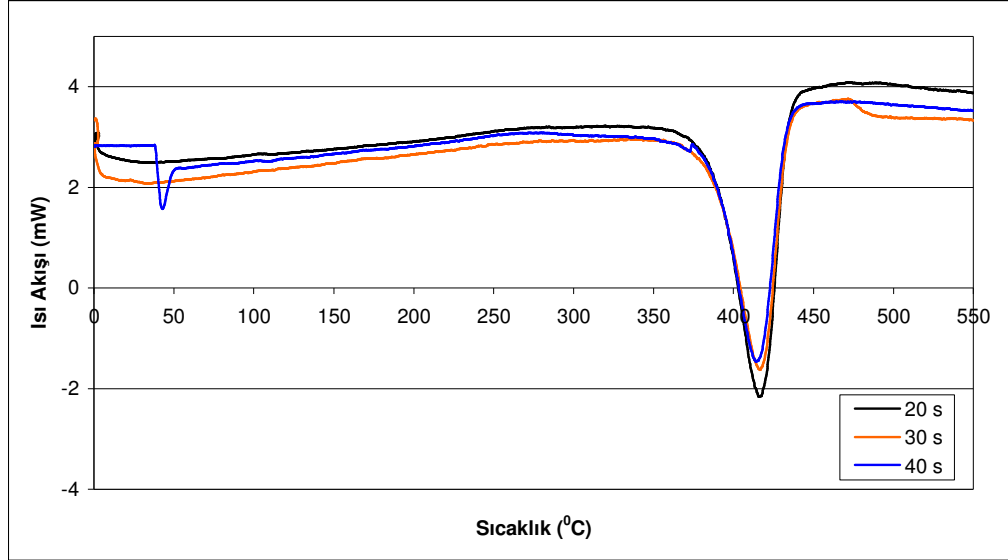
Şekil 4.24. 15, 30, 60 s ön şişirme işlemine tabi tutulmuş malzemelere ait DSC eğrisi

Çizelge 4.8. Herhangi bir işlem görmemiş ham, 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş ve 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numunelerin DSC deney sonuçları.

Ön Şişirme süresi (s)	Basınç (atm)	Kalıplama Süresi (s)	Dönüşüm Sıcaklığı (°C)		Sıcaklığı (°C)	Bozunum Enerjisi (J/g)
			Başlama	Bitiş		
Ham	Açık atm.	-	350	450	417	602,35
15	Açık atm	-				695,88
30	Açık atm	-				719,69
60	Açık atm	-				790,17
15	1,0	20	"	"	"	753,76
		30	"	"	"	786,54
		40	"	"	"	809,70

3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplanmış numuneler; 15 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden 20, 30 ve 40 s süre ile 1,0 atm buhar basıncı altında kalıplama ve takiben oda sıcaklığında otuz gün süre ile yaşlandırma işlemi görmüş numunelerin DSC analizi Şekil 4.25'de verilmiştir. Numunelerde bozunma

350-450 °C sıcaklık aralığında ve bozunum bölgesinde meydana gelen pikin sıcaklık değeri 417 °C olarak gerçekleşmiştir. Bozunum için gerekli enerji miktarları 20, 30 ve 40 s ön kalıplama süreleri için sırasıyla 753,76, 786,54 ve 809,70 J/g olarak elde edilmiştir, Çizelge 4.8.



Şekil 4.25. 20, 30 ve 40 s kalıplama süresine tabi tutulmuş malzemelere ait DSC eğrisi

4.4. Ağırlık Değişim Sonuçları

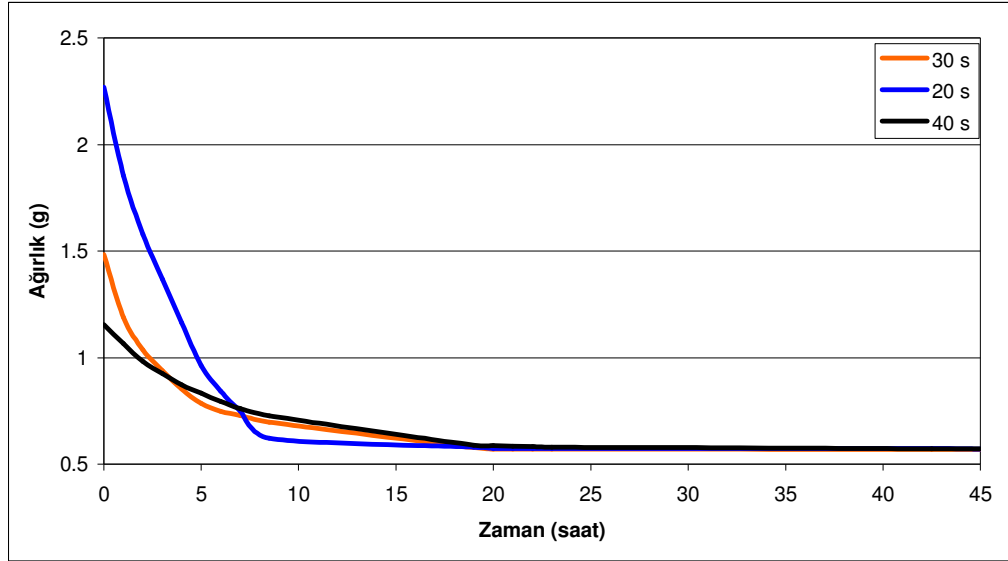
Genişleyebilen polistiren malzemede zamana bağlı olarak ağırlık değişimi; 1) 30 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,570 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,665 gr granül numuneleri 1,1 atm buhar basıncında 40 s ve 3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granülden alınan 0,860 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulan numuneler üzerinde yapılmıştır. Kalıplanan her bir numunede kalıplama işleminden hemen sonra ilk 3 saat için 30 dak aralıklarla ve bu süreyi takip eden 42 saat için 1 saat aralıklarla ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Ön şişirme süresi, kalıplama ağırlığı, kalıplama

basıncı ve sürelerinde zamana bağlı ağırlık kayıpları esas olarak üç aşamada gerçekleşmiştir. Ağırlık kayıplarının nispeten hızlı gerçekleştiği birinci aşama I. kırım bölgesi, birinci aşamaya göre daha yavaş ağırlık kaybının gerçekleştiği ikinci aşama II. kırım bölgesi ve son olarak numunelerin kararlı duruma geldiği aşama III. kırım bölgesi olarak tanımlanmıştır. Elde edilen ağırlık kayıpları Çizelge 4.9 ve Şekil 4.26- Şekil 4.32’de verilmiştir.

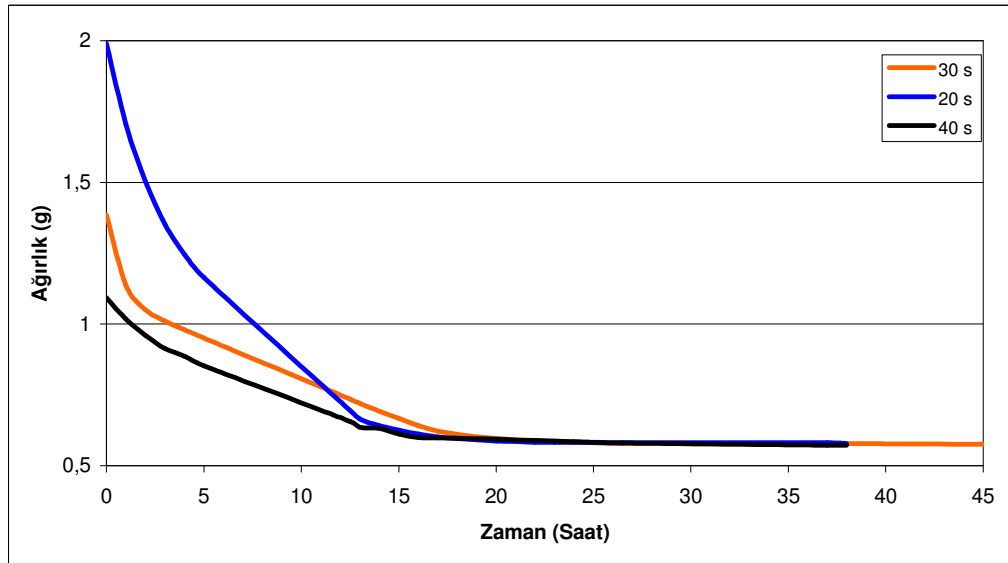
1) 30 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,570 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numuneler;

1,0 atm buhar basıncında ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerde kalıplama işlemini takiben sırasıyla % 298, 160 ve 102 ağırlık artışı meydana gelmiştir, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.26. 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerine göre sırasıyla I. kırım bölgesinin; tamamlanma süreleri 2, 2 ve 5 saat, % ağırlık kayıpları 40, 49 ve 63, ve ağırlık kayıp hızları 0,345, 0,224, 0,074 g/saat olarak gerçekleşmiştir. I. kırım bölgelerine göre daha uzun sürede gerçekleşen II. kırım bölgelerinde ağırlık kayıp hızları daha düşüktür. Numunelerin kararlı duruma geldiği III. kırım bölgesinde ağırlık kayıp hızları I. ve II. kırım bölgelerine göre çok daha yavaştır. Bu gruptaki numunelerin kararlı duruma gelme süreleri yaklaşık olarak 20 saattir.

1,1 atm buhar basıncı altında üretilen numunelerin kalıplama sürelerine göre kalıplama sonrası ağırlık artışı 1,0 atm buhar basıncına göre daha düşük % değerlerde meydana gelmiştir. I kırım bölgesi yaklaşık olarak 4 saatte tamamlanmıştır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.27’den görüleceği üzere gerek I. kırım gerekse II. kırım bölgelerinde ağırlık kayıp hızı ve %’si genel olarak artan kalıplama süresi ile düşmektedir. 1,1 atm buhar basıncında ve 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numunelerin III. kırım bölgesinde kararlı duruma gelme sürelerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir.



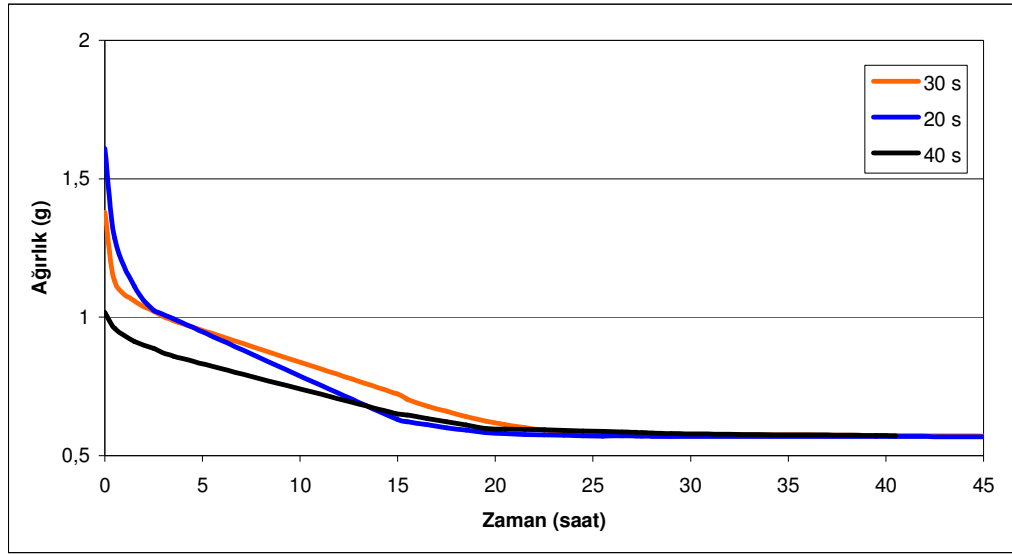
Şekil 4.26. D-30-1,0-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi



Şekil 4.27. D-30-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi

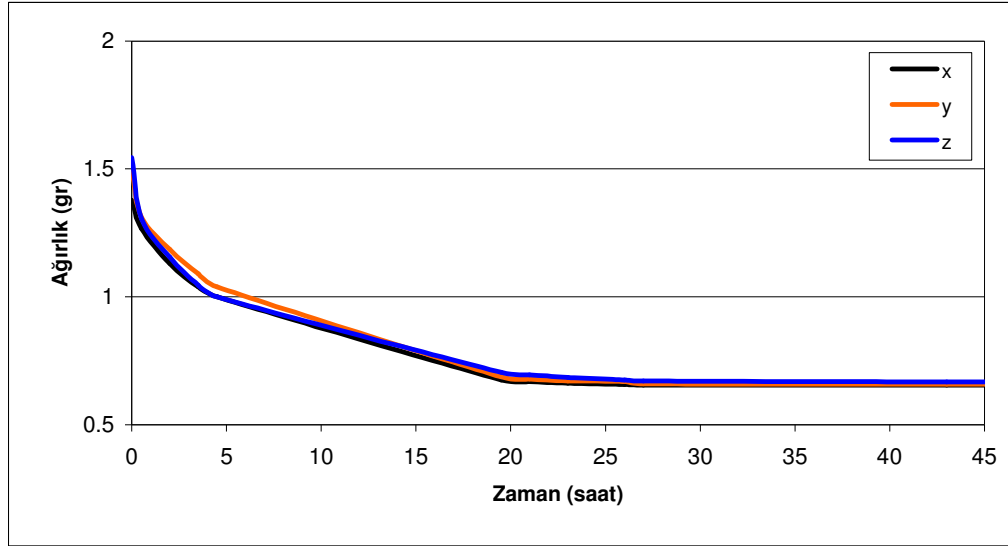
20, 30, 40 s kalıplama süreleri ile 1,2 atm buhar basıncı altında elde edilen numunelerde artan kalıplama süresi ile kalıp sonrası ağırlık artışı 1,0 ve 1,1 atm basınçta olduğu gibi düşmektedir. I kırınım bölgesinin tamamlanma süresi 20 s kalıplama süresi için 2,5 saat ve 30 ve 40 s kalıplama süreleri için ise 1,5 saat'e düşmüştür. 40 s kalıplama süreleri için I kırınım bölgesinde

ağırlık kaybı % ve hızı 1,0 atm basıncına göre sırasıyla % 63 ve % 48 daha düşüktür. II. kırım bölgesi tamamlanma süresi ve ağırlık kayıp hızları 20, 30, 40 s kalıplama süreleri için sırasıyla 15,5, 16,5 ve 17,5 saat ve 0,031, 0,025 ve 0,021 g/saat olarak tespit edilmiştir. Numuneler yaklaşık olarak 20 saatte kararlı duruma gelmişlerdir, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.28.



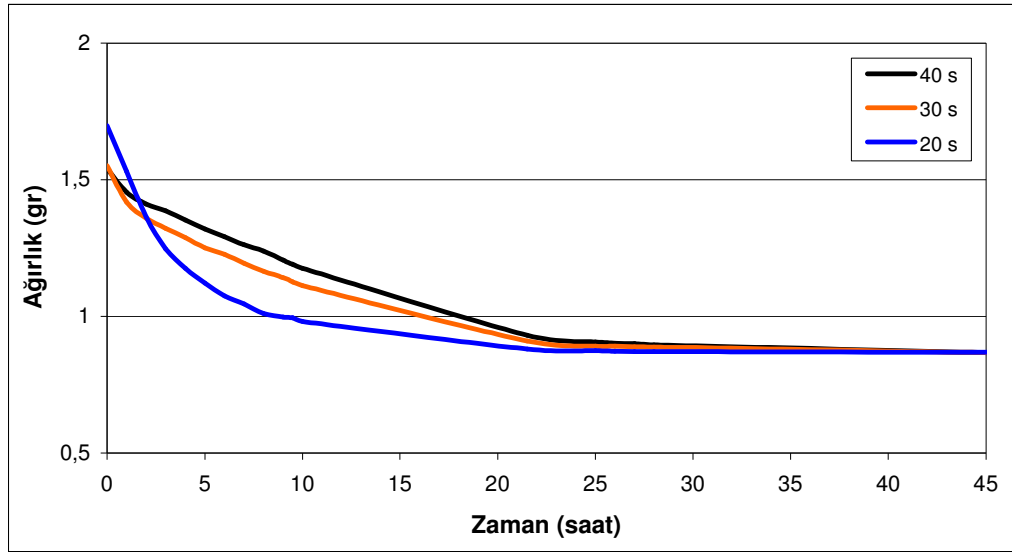
Şekil 4.28. D-30-1,2-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi

2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirilmiş granüllerden alınan 0,665 gr granül numuneleri 1,1 atm buhar basıncında ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulan numuneler: Bu grupta numunelerin 15, 30 ve 60 s olan ön şişirme sürelerinin kalıplama sonrası ağırlık artışı, I kırım ve II kırım bölgelerinde süre, ağırlık kaybı % ve hızları açısından birbirine bezer davranış göstermişlerdir, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.29.

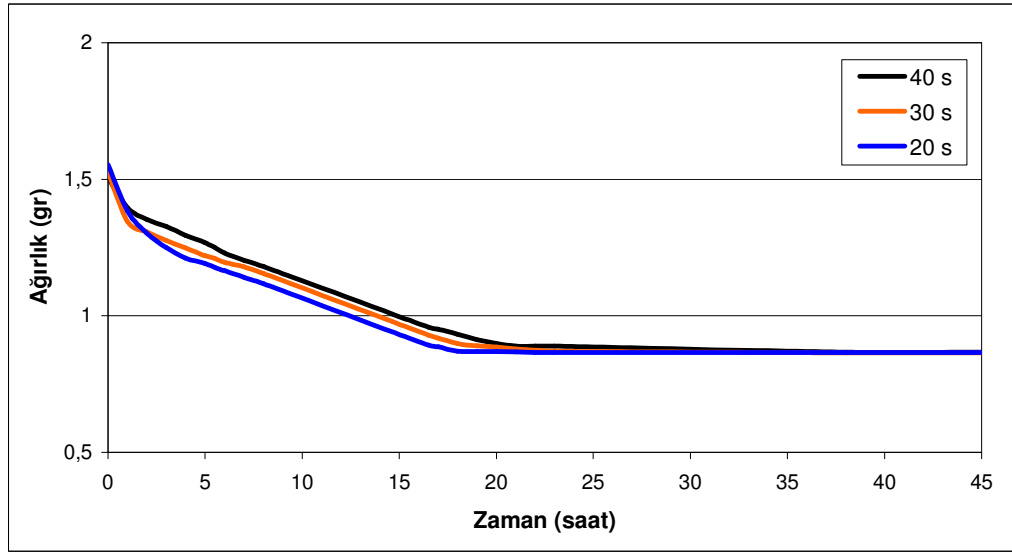


Şekil 4.29. O-(15, 30, 60)-1,1-40 numunelerinin ağırlık değişimi (x: 60 s ön şişirilmiş, y: 30 s ön şişirilmiş, z: 15 s ön şişirilmiş)

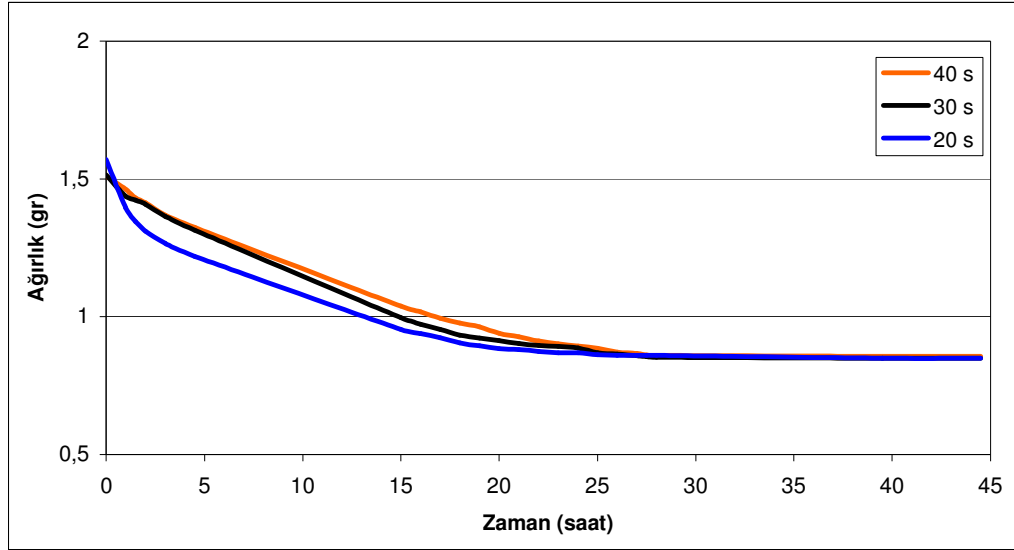
3) 15 s süre ile ön şişirilmiş granülden alınan 0,860 gr granül numuneleri 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutulan numuneler: Bu grupta numunelerin kalıplanma sonrası ağırlık artışı artan basınç ve kalıplama süresi ile düşmüştür, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.30- Şekil 4.32. I. kırınım bölgesi 1,0 ve 1,1 atm buhar basıncı ve 20 s kalıplama süreleri için 3 saat, 30 ve 40 s kalıplama süreleri için 2 saatte tamamlanmıştır. Bu süre 1,2 atm basınç ve 30 ve 40 s kalıplama süreleri için 1,5 saat'e düşmüştür. Kalıplama basınç ve süresi arttıkça I. kırınım bölgesinde ağırlık kaybı hızı düşmüştür ve 1,2 atm buhar basıncında ve 40 sn kalıplama süresinde diğer ön şişirme, basınç ve kalıplama sürelerine göre en düşük değeri almıştır. 1,0 atm basınç ve 20 s kalıplama süresinde elde edilen numunede II. kırınım bölgesi 8 saatte tamamlanırken 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde 21,5 saatte tamamlanmıştır. II. kırınımın tamamlanma süresi 20, 30 ve 40 s kalıplama süreleri için 1,1 atm ve 1,2 atm basıncında sırasıyla 16,5 ve 18 saat'tir. II. kırınım bölgesinde ağırlık kayıp hızı 1,0 atm basınç ve 20 s kalıplama süresi ile üretilen numune dışındaki numunelerde 0,24 ile 0,29 g/saat olarak gerçekleşmiştir. Bu gruptaki numuneler yaklaşık olarak 25 saatte kararlı duruma gelmiştir.



Şekil 4.30. Y-15-1,0-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi



Şekil 4.31. Y-15-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi



Şekil 4.32. Y-15-1,2-(20, 30, 40) numunelerinin ağırlık değişimi

Çizelge 4.9. Genişleyebilen polistiren malzemede zamana bağlı olarak ön şişirilmiş granüllerden elde edilen numunelerin ağırlık değişimi

Numune Kodlar	Kalıplama Sonrası Ağırlık Artışı		I. Kırınım				II. Kırınım			
	(g)	(%)	Süre (saat)	Ağırlık Kaybı			Süre (saat)	Ağırlık Kaybı		
				(g)	(%)	Hız (g/saat)		(g)	(%)	Hız (g/saat)
D-30-1,0-20	2,269	298	2	1,579	40	0,345	8,5	0,621	96	0,147
D-30-1,0-30	1,485	160	2	1,036	49	0,224	17	0,585	98	0,030
D-30-1,0-40	1,155	102	5	0,785	63	0,074	17	0,580	98	0,017
D-30-1,1-20	1,989	248	4	1,245	52	0,186	13	0,720	89	0,058
D-30-1,1-30	1,385	142	4	0,980	49	0,101	16	0,641	91	0,028
D-30-1,1-40	1,093	91	4	0,887	39	0,051	13	0,637	87	0,027
D-30-1,2-20	1,610	182	2,5	1,025	56	0,234	15,5	0,620	95	0,031
D-30-1,2-30	1,380	142	1,5	1,060	39	0,213	16,5	0,680	86	0,025
D-30-1,2-40	1,017	78	1,5	0,960	23	0,038	17,5	0,622	88	0,021
O-15-1,1-40	1,545	132	3,5	1,045	51	0,142	19,5	0,705	86	0,021
O-30-1,1-40	1,490	123	3,5	1,038	49	0,129	19,5	0,687	87	0,021
O-60-1,1-40	1,378	106	3,5	1,000	46	0,108	19,5	0,675	87	0,020
Y-15-1,0-20	1,698	97	3	1,248	39	0,150	8	1,010	60	0,047
Y-15-1,0-30	1,551	80	2	1,364	19	0,093	21,5	0,881	68	0,024
Y-15-1,0-40	1,540	79	2	1,412	13	0,64	21,5	0,910	64	0,025
Y-15-1,1-20	1,554	80	3	1,250	30	0,101	16,5	0,892	67	0,026
Y-15-1,1-30	1,525	77	2	1,307	22	0,109	16,5	0,930	62	0,026
Y-15-1,1-40	1,505	75	2	1,354	16	0,075	16,5	0,958	58	0,027
Y-15-1,2-20	1,570	82	1,5	1,346	22	0,149	18	0,905	66	0,026
Y-15-1,2-30	1,515	76	1,5	1,423	09	0,061	18	0,934	61	0,029
Y-15-1,2-40	1,510	75	1,5	1,431	03	0,052	18	0,977	56	0,027

4.5. Mikroyapı Sonuçları

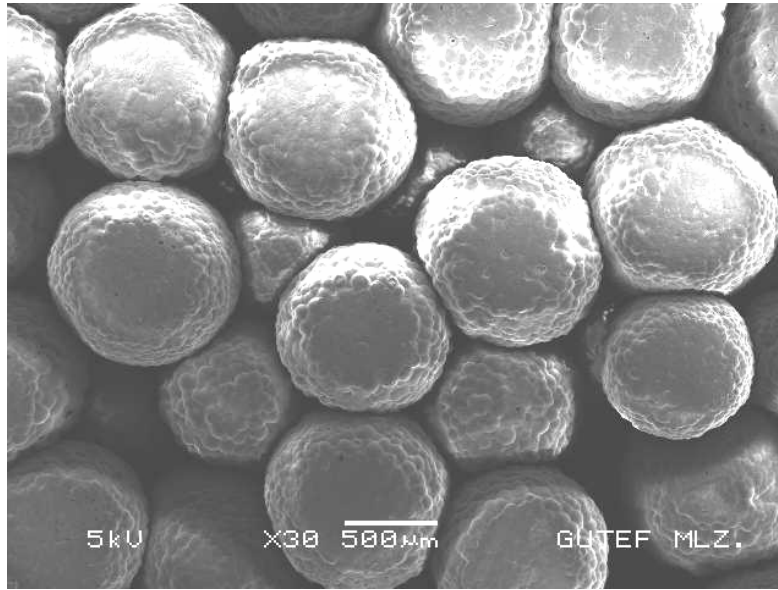
Mikroyapı incelemeleri; 1) 15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,860 gr 0,8, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında, 2) 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,665 gr 1,1 atm buhar basıncında, 3) 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,570 gr 0,8, 0,9, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numunelerin ön şişirme, kalıplama süresi, kalıplama basıncı ve yoğunluğun kalıp duvarlarına karşı dış yüzeyleri ve çekme kırık yüzeylerinde polistiren hücresel tane şekli ve kaynamasına etkisi detaylı bir şekilde gözlenmiştir.

4.5.1. Y-15-(0,8, 1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları

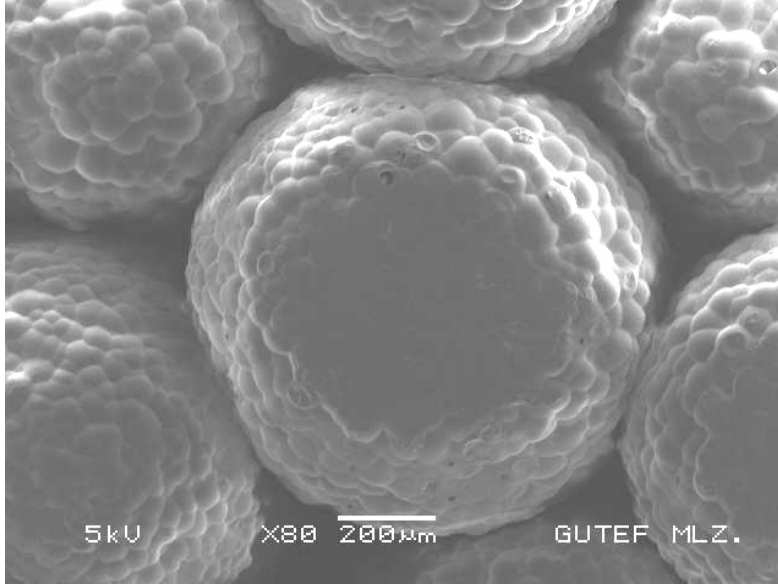
15 s süre ile ön şişirme işlemi görmüş granülden alınan 0,860 gr granül numunesi 0,8, 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20, 30 ve 40 s süre ile kalıplama işlemlerine tabi tutularak elde edilen numuneler $39,07 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahiptir. 15 s süre ile ön şişirme ve 0,8, atm buhar basıncında 20 s süre ile kalıplama işlemi görmüş numunenin kalıp duvarlarına karşı dış yüzeyinde polistiren hücresel taneler yaklaşık olarak küre şeklindedir. Resim 4.1 ve Resim 4.2'den görüleceği üzere tane arayüzeyi oldukça belirgin ve taneler arası boşluklar mevcuttur. Polistiren tane çok sayıda hücrelerden meydana gelmiştir. Bu hücreler tane yüzeyinde yumrular görünümündedir, Resim 4.2. Bazı hücre yüzeylerinde hafif çöküntüler oluşmuştur. Aynı basınç değerinde 40 s kalıplama işlemi görmüş numune yüzeyi düzlemsel olmakla birlikte üçlü kesişme noktalarındaki taneler arası boşluklar azalmıştır, Resim 4.3. Hücresel tanelerin yüzeyi petek görünümündedir.

15 s ön şişirme ve 0,8 atm buhar basıncında 20 s süre kalıplama işlemi uygulanmış numunelerin çekme kırık yüzeylerinde yapılan incelemede kopmanın tane sınırlarında meydana geldiği gözlenmiştir, Resim 4.4. Tane

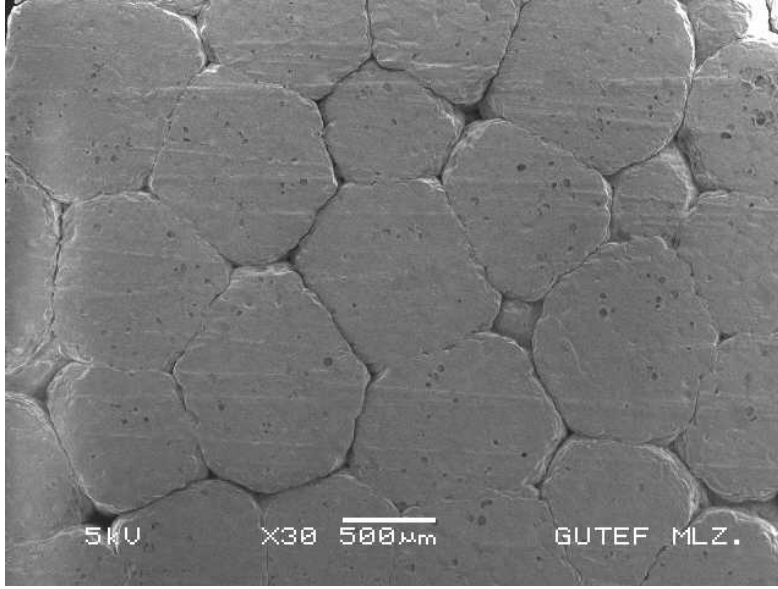
yüzeylerinde herhangi bir deformasyon gözlenmemiştir. Çekme kırık yüzeyinden de görüleceği üzere polistiren taneler yaklaşık olarak küre şeklindedir. Kalıplama süresinin artmasıyla deformasyon tane sınırlarında, tane içinde ve hücre duvarlarında meydana gelmiştir. Resim 4.5 40 s kalıplama süresinde hücre duvarları, tane sınırları ve tane içinde meydana gelen deformasyonu açık bir şekilde göstermektedir. Tanelerin yüzeylerinde görülen küçük çukurlar sünek kopmanın bir göstergesidir.



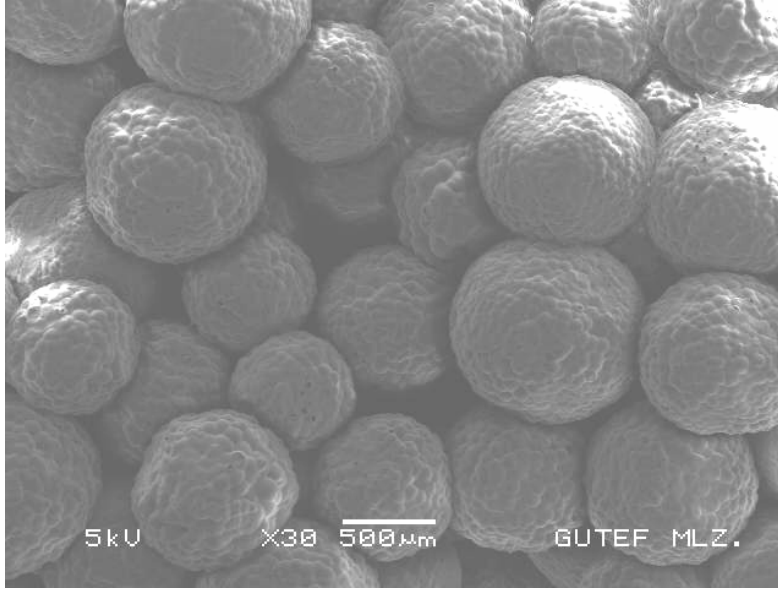
Resim 4.1. Y-15-0,8-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



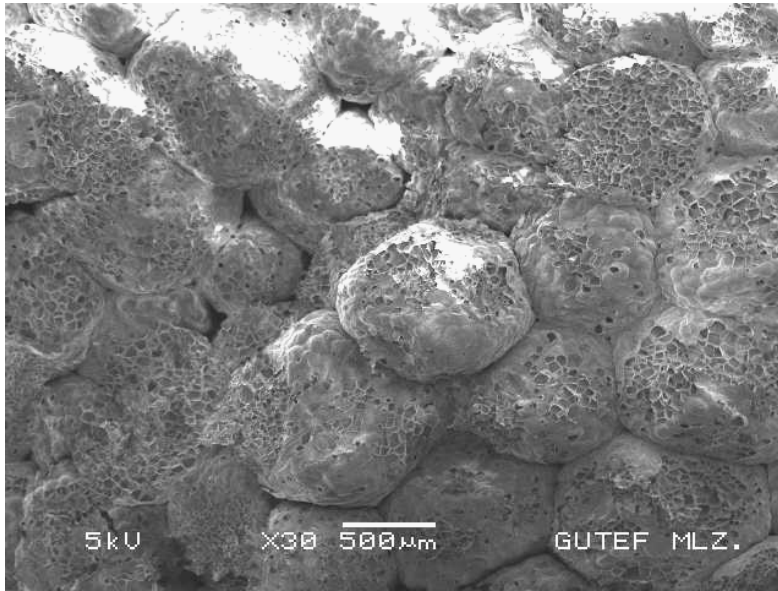
Resim 4.2. Y-15-0,8-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.3. Y-15-0,8-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.4. Y-15-0,8-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

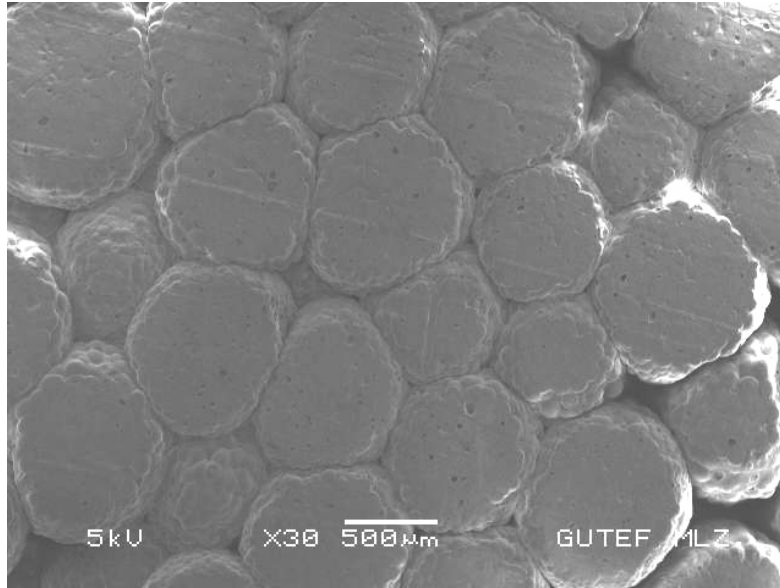


Resim 4.5. Y-15-0,8-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

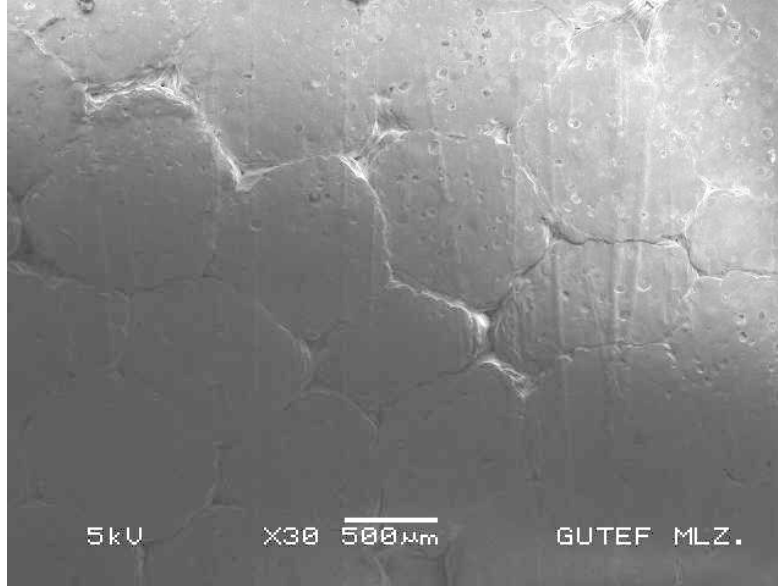
15 s süre ile ön şişirme ve 1,0 atm buhar basıncında 20 s süre ile kalıplama işlemi görmüş numunenin yüzeyinde hücresel taneler kalıplama basıncının artması ile beraber düzlemsel bir yüzey oluşturma eğilimi göstermiş ve

taneler arası temas artmıştır, Resim 4.6. Ancak hücresel tane sınırları belirginliğini korumaktadır. Kalıplama basıncının 30 ve 40 s sürelerinde numune yüzeyleri (Resim 4.7 ve Resim 4.8) düzlemsel ve tanelerin yüzeyi petek görünümündedir. Kalıplama süresinin artmasıyla tane kaynama derecesi artmış ve bazı hücresel tane sınırları belirginliği zayıflamaya başlamıştır. Taneler arası boşluklar üçlü kesişme noktalarında görülmezken sadece dörtlü kesişme noktalarında meydana gelmiştir.

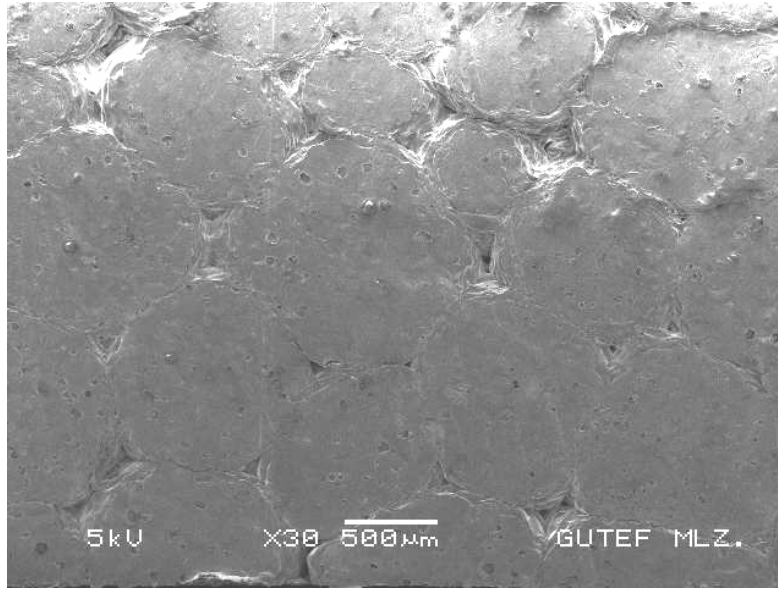
Bu gruptaki numunelerde hücresel taneler polihedral geometrik şekilindedir, (Resim 4.9- Resim 4.11). 20 s kalıplama süresi ile elde edilen numunenin çekme kırık yüzeyinden görülebileceği üzere kopma tane sınırı boyunca meydana gelmiştir. Kalıplama süresinin artması ile birlikte (30 ve 40 s) kopmalar daha çok tane içinden olmuştur. Bu durum taneler arası kaynama derecesinin arttığını da ifade etmektedir.



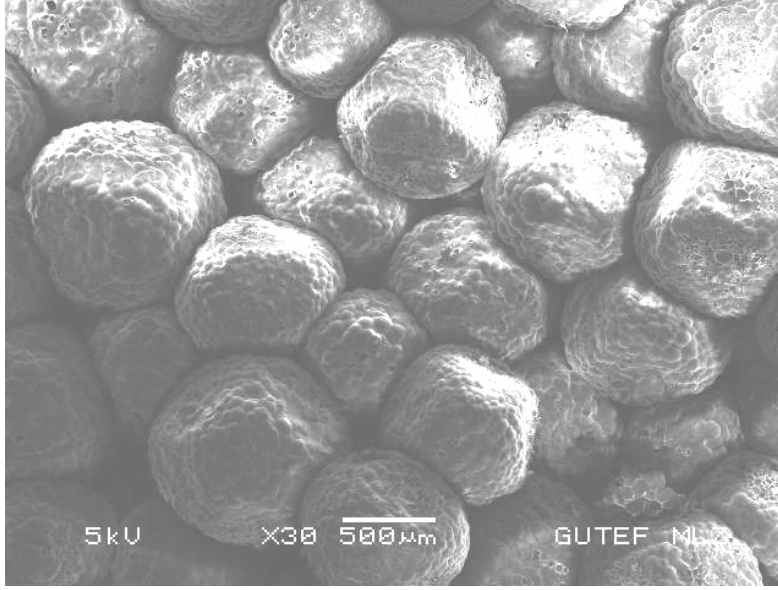
Resim 4.6. Y-15-1,0-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



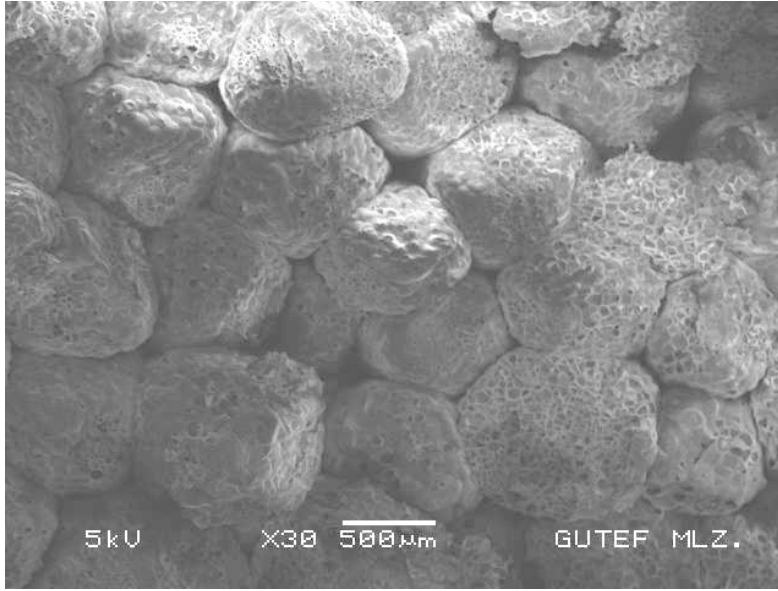
Resim 4.7. Y-15-1,0-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



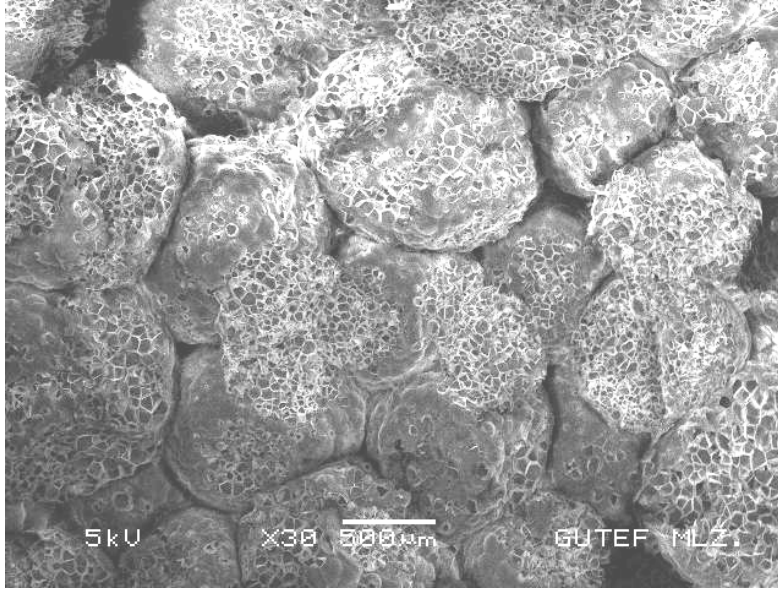
Resim 4.8. Y-15-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.9. Y-15-1,0-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



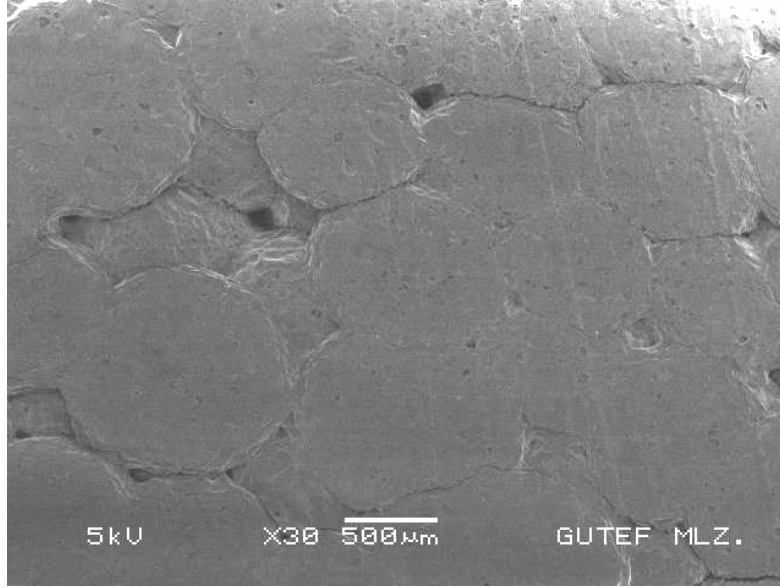
Resim 4.10. Y-15-1,0-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



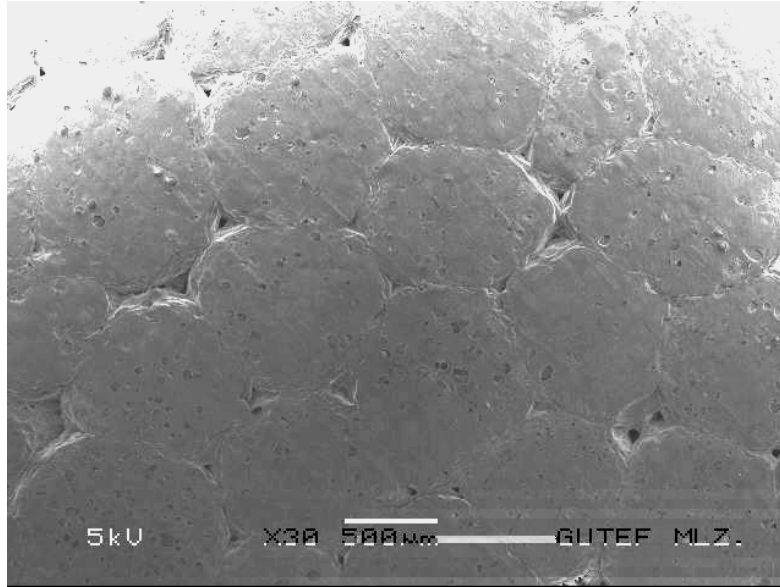
Resim 4.11. Y-15-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında elde edilen numunelerin kalıp duvarlarına karşı dış yüzeyleri düzlemsel olup basınç ve kalıplama süresinin artmasıyla taneler arası kaynama artmıştır, Resim 4.12- Resim 4.14. Taneler arası sınırlar belirginliğini kaybetmeye başlamıştır. Yüzey incelemesinde nispeten düşük basınç ve kalıplama sürelerinde üçlü ve dörtlü tane kesişme noktalarında meydana gelen boşlukların azaldığı ve bazı bölgelerde kaybolduğu gözlenmiştir.

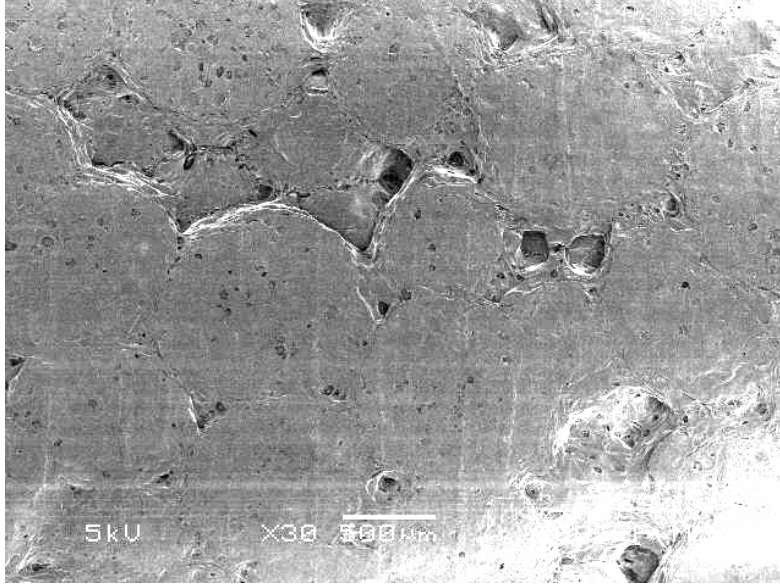
1,1 ve 1,2 atm buhar basıncında 20 s kalıplama süreleri ile üretilen numunelerde çekme kopması tane sınırı boyunca meydana gelmiştir. 30 s kalıplama sürelerinde kopmalar hem tane sınırı boyunca hem de tane içinden gerçekleşmiştir, Resim 4.15. Ancak 40 s kalıplama sürelerinde çekme kopmaları çoğunlukla tane içinde olmuştur, Resim 4.16 ve Resim 4.17.



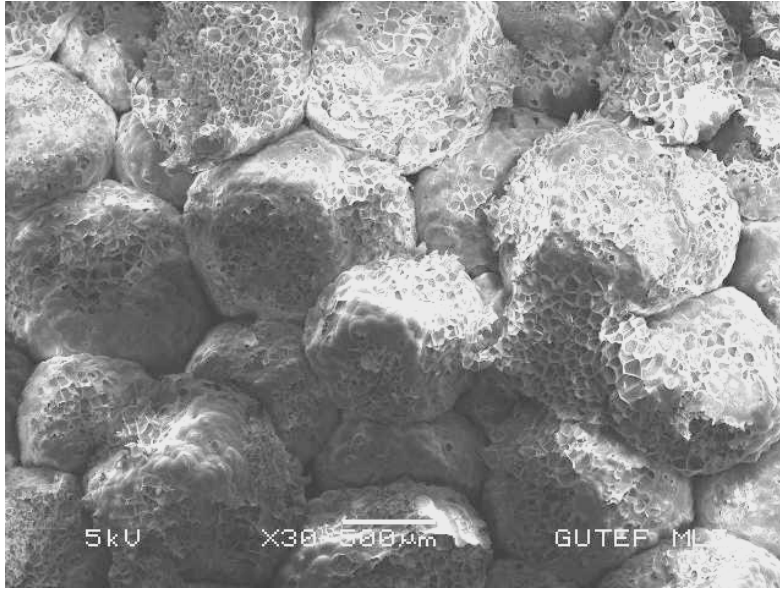
Resim 4.12. Y-15-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



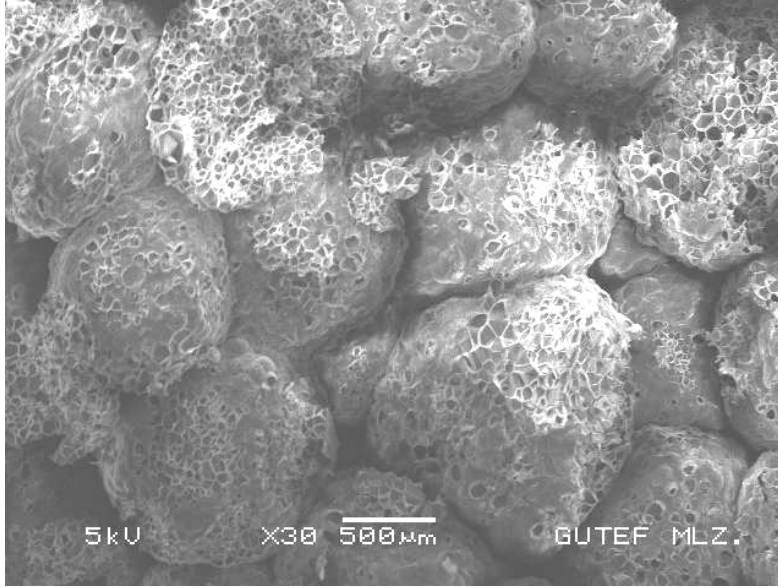
Resim 4.13. Y-15-1,2-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



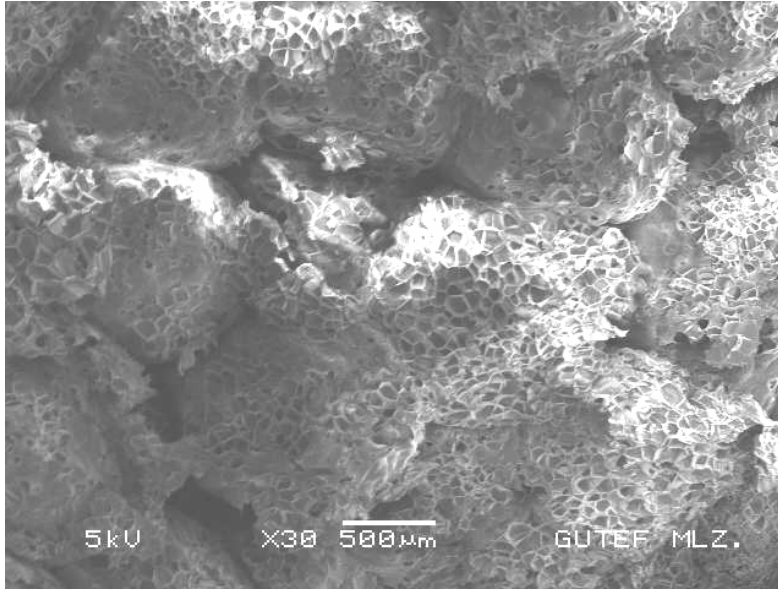
Resim 4.14. Y-15-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.15. Y-15-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.16. Y-15-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

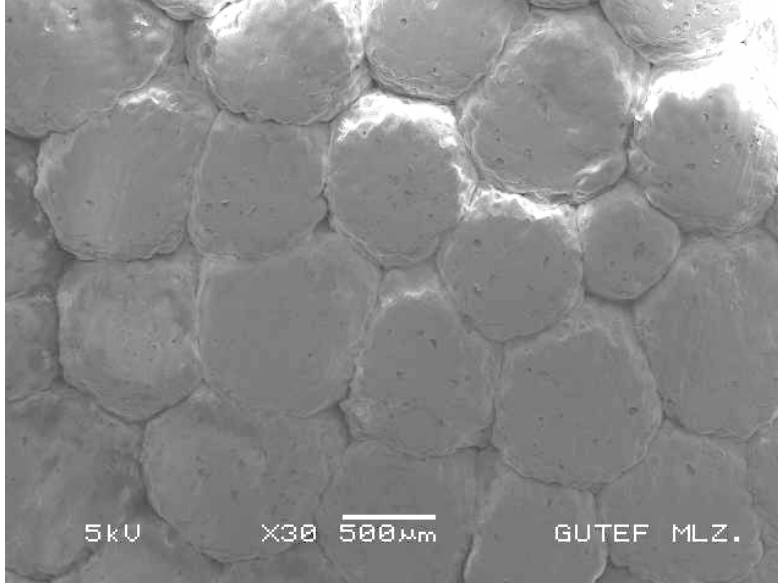


Resim 4.17. Y-15-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

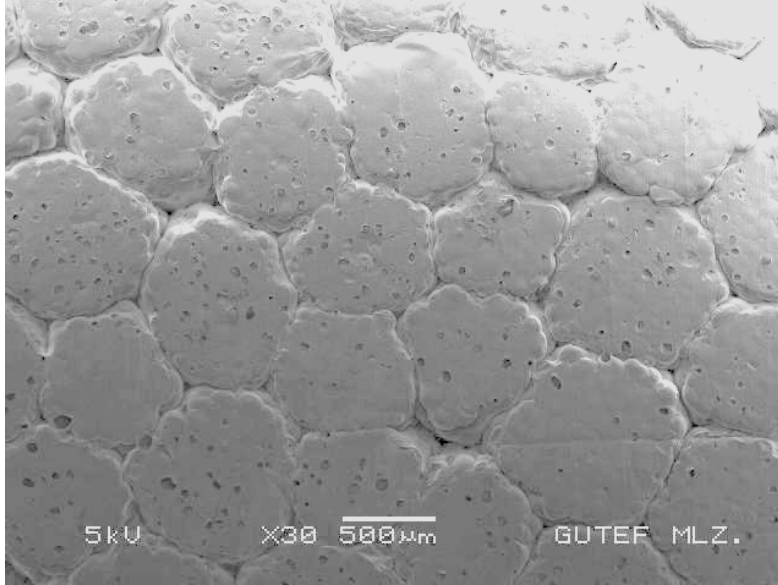
4.5.2. O-(15, 30, 60)-1,1-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları

15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme ve takiben 1,1 atm basınç altında 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde elde edilen numuneler $30,7 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahiptir. 15 s süre ile ön şişirme işlemine tabi tutulmuş numunenin yüzeyi düzlemsel olmakla beraber tane sınırlarında derin boşluklar gözlenmiştir, Resim 4.18. Bu boşluklar ön şişirme süresinin artmasıyla birlikte azalmıştır, Resim 4.19 ve Resim 4.20. 60 s ön şişirme süresine sahip numunenin yüzeyinde taneler arası arayüzeyde iyi bir kaynamanın gerçekleştiği ve komşu tanelerin birbiriyle birleştiği görülmektedir.

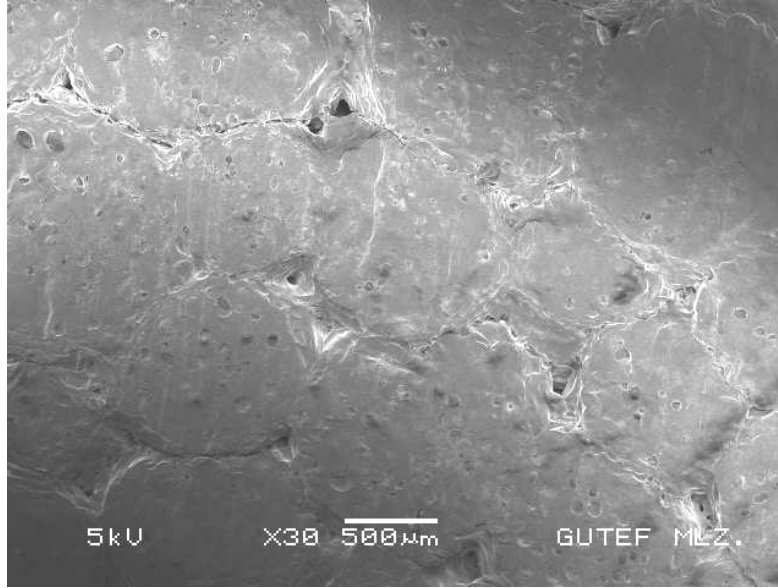
15 s ön şişirme işlemi görmüş granüllerden elde edilen numunenin kırık yüzey incelemesinde (Resim 4.21) kırılma daha çok küre şekline sahip tane sınırları boyunca meydana gelmiştir. Tanelerin polihedral şekline dönüşümü 30 s sürede ön şişirme uygulanmış numunede görülmüştür, Resim 4.22. Ancak kopma modu değişmemiştir. Tane içi kopma 60 s ön şişirme süresinde gerçekleşmiş ve tane yüzeylerinde sünek kopmanın bir göstergesi olan çukurlar oluşmuştur (Resim 4.23).



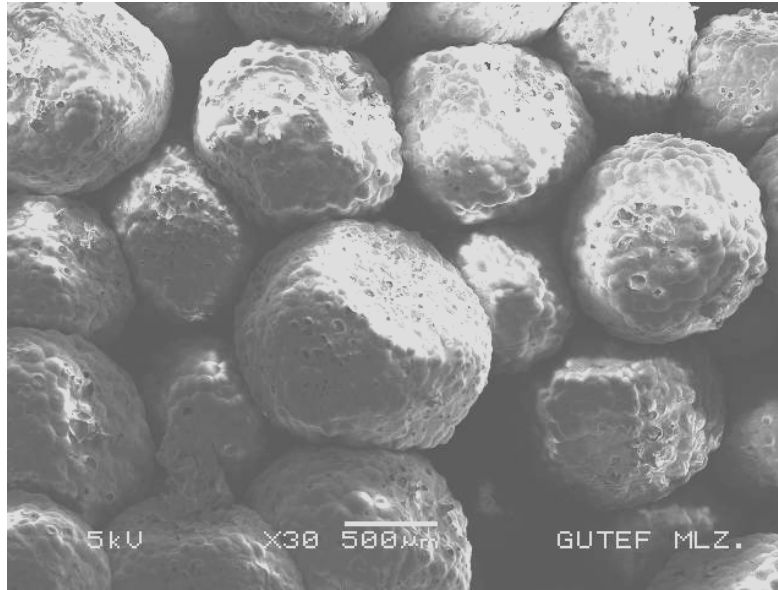
Resim 4.18. O-15-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



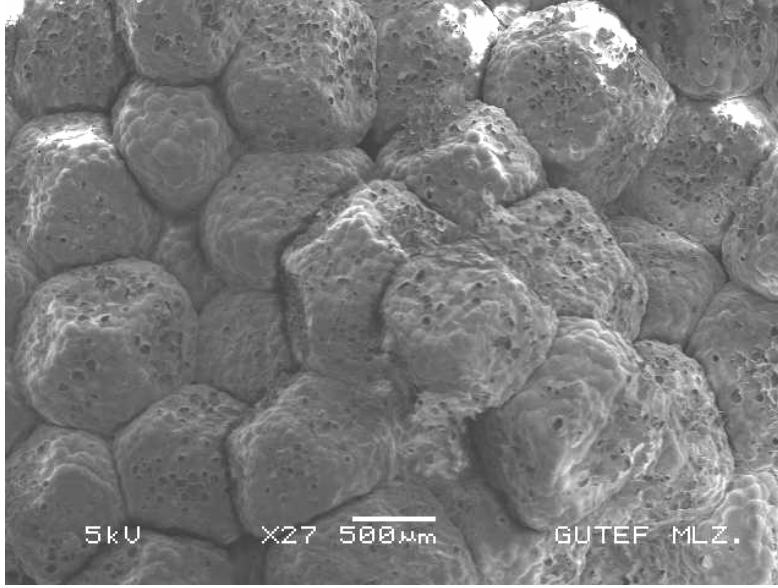
Resim 4.19. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



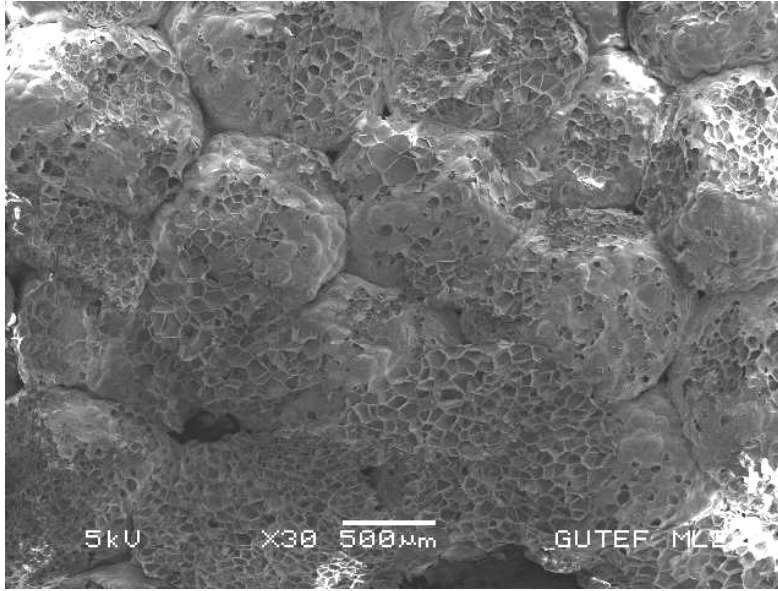
Resim 4.20. O-60-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.21. O-15-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



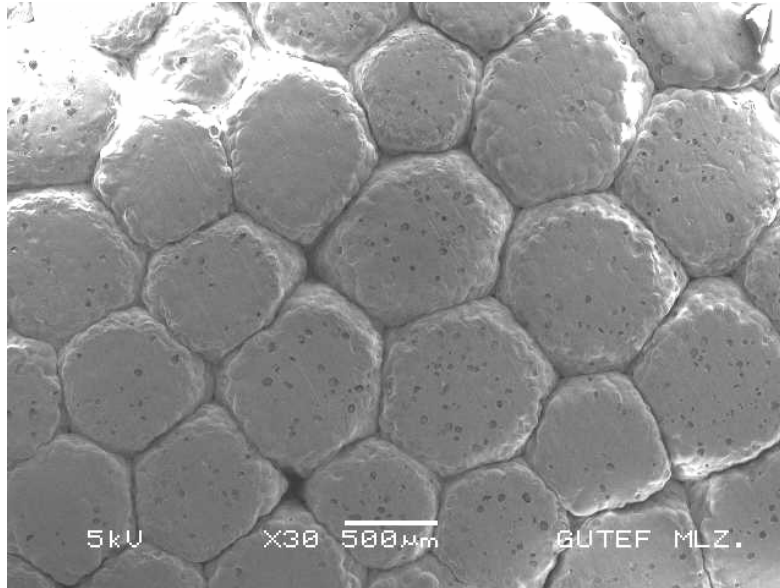
Resim 4.22. O-30-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



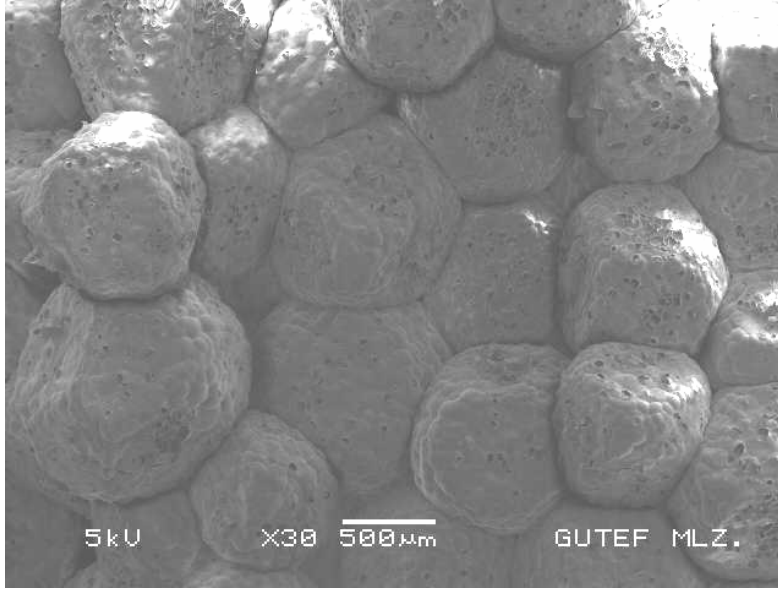
Resim 4.23. O-60-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

4.5.3. D-(30, 60)-(0,8, 0,9,1,0, 1,1, 1,2)-(20, 30, 40) numunelerinin mikroyapı sonuçları

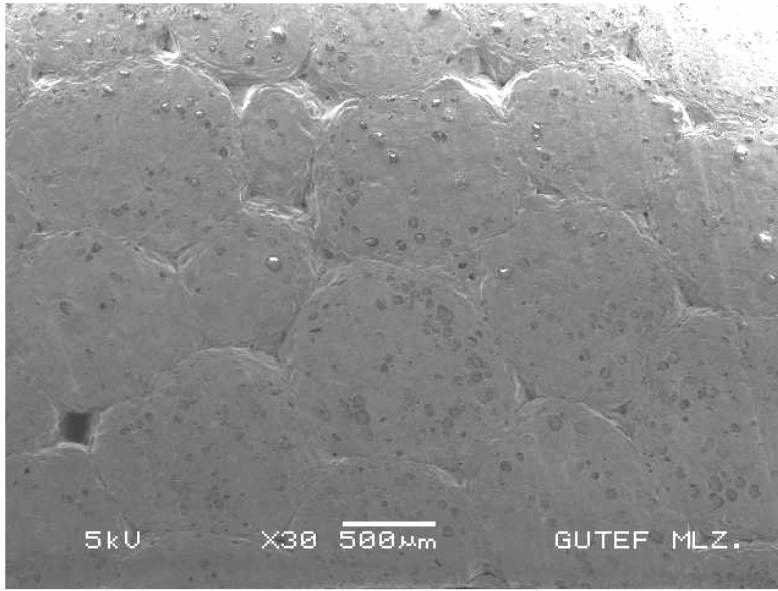
30 s süre ile ön şişirme işlemine, 1,0 atm kalıplama basıncı altında ve 40 s süre ile kalıplama işlemine tabi tutulan numunenin yoğunluğu $26,2 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Bu numunenin mikroyapı incelemelerinde hücresel tanelerin sınırları belirgin ve yüzeyin düzlemsel olduğu görülmektedir, (Resim 4.24 ve Resim 4.25). Tane yüzeyinde bulunan hücre duvarlarında yırtılmalarda görülmektedir. Bu numunede çekme kopması tane sınırları boyunca meydana gelmekte ve hücresel tanelerin polihedral şeklinde sıralandığı görülmektedir. Resim 4.26'da da artan kalıplama basıncı ile (1,1 atm) taneler arasındaki boşlukların azalmakta ve tane sınırlarında kaynama artmaktadır.



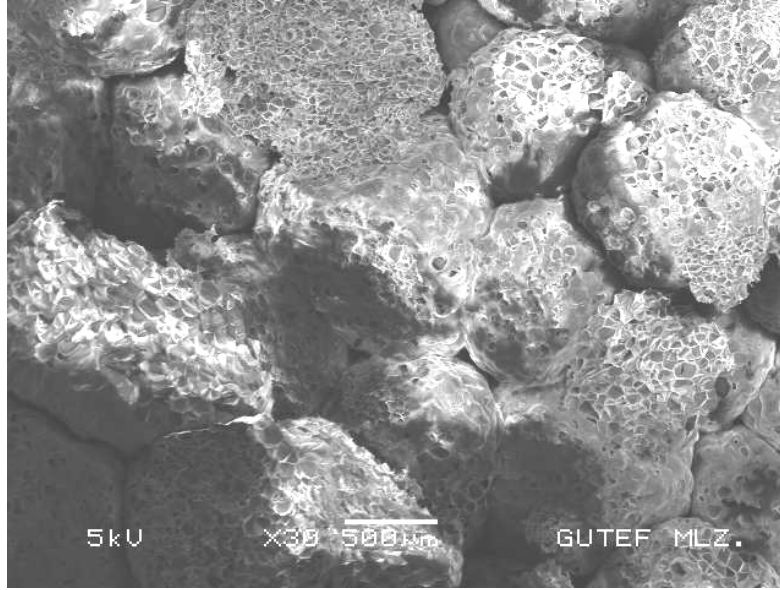
Resim 4.24. D-30-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.25. D-30-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

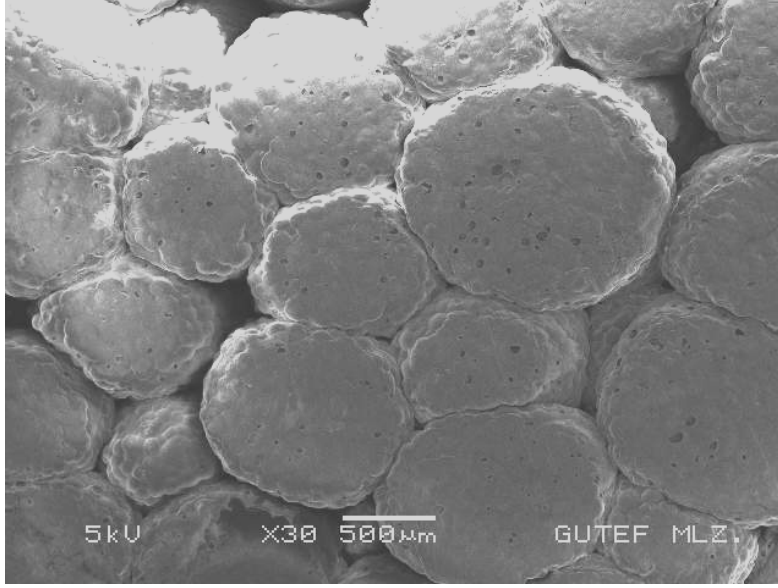


Resim 4.26. D-30-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

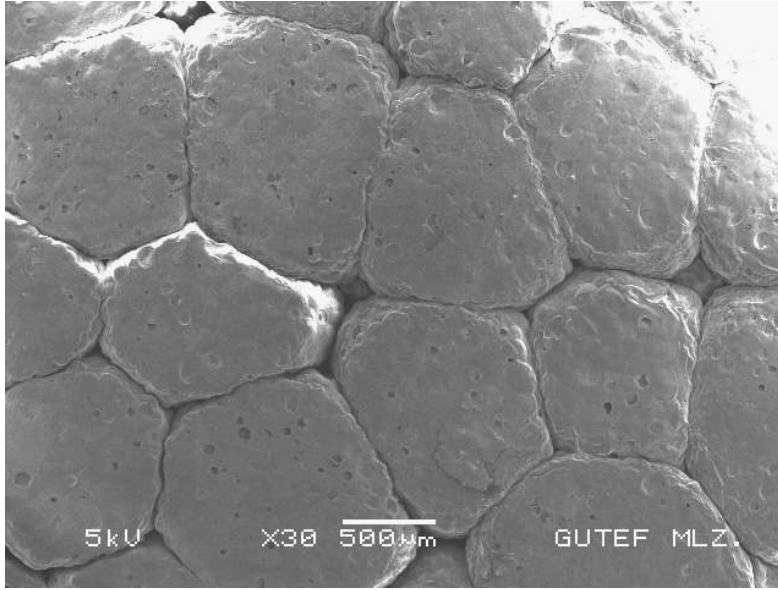


Resim 4.27. D-30-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

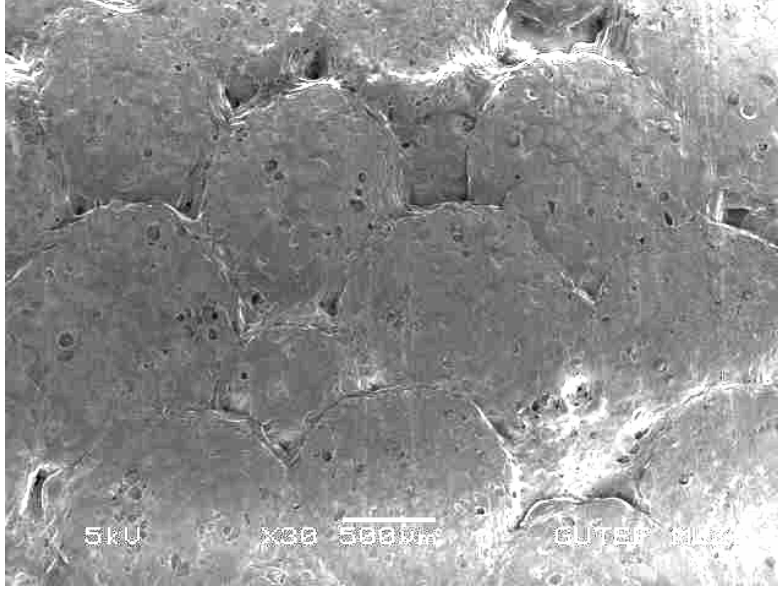
1,2 atm basınç altında kalıplanan ve 20 s kalıplama süresi uygulanan numunenin yüzey incelemesinde numune yüzeyleri düzlemsel olmakla beraber tane kenarlarında küresellikler görünmektedir, Resim 4.28. Kalıplama süresinin 30 ve 40 s'ye artması ile yüzeydeki düzlemsellik artmış ve üç tanenin kesişme noktalarda boşluklar azalmıştır. 30 s kalıplama süresinde yüzey petek görünümünde iken 40 s kalıplama süresinde bazı tane sınırlarının kaybolduğu gözlenmiştir, Resim 4.29 ve Resim 4.30. 20 s süre ile kalıplanmış numunelerin çekme kırık yüzey incelemesinde hücresel tanelerin yaklaşık küresel olduğu ve kopmanın tane sınırlarında gerçekleştiği görülmektedir, Resim 4.31. Artan kalıplama süresi ile hücresel tanelerin polihedral geometrik şeklini aldığı ve taneler arasındaki boşluğun azaldığı Resim 4.32 ve Resim 4.33'de görülmektedir. 30 s kalıplama sürelerinde kopmalar tane sınırı boyunca meydana gelirken 40 s kalıplama sürelerinde kopmalar hem tane sınırlarında hem de tane içinde meydana gelmiştir, Resim 4.33.



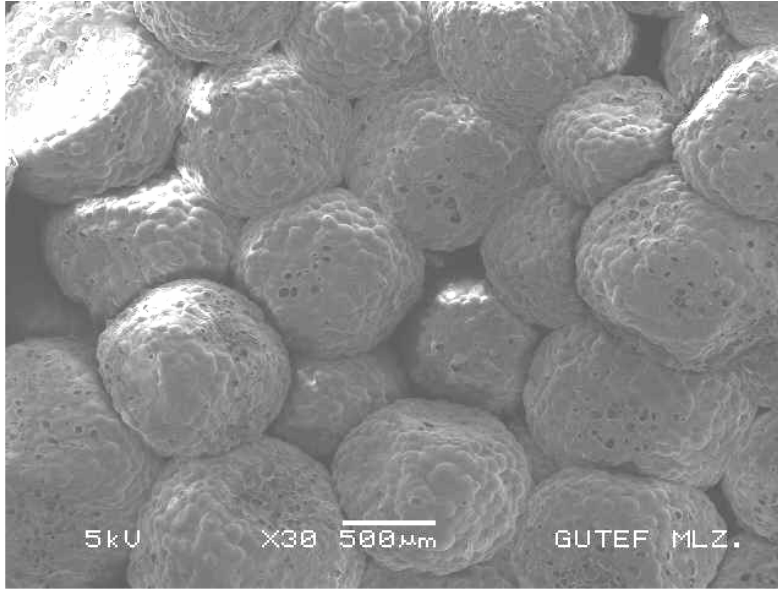
Resim 4.28. D-30-1,2-20 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



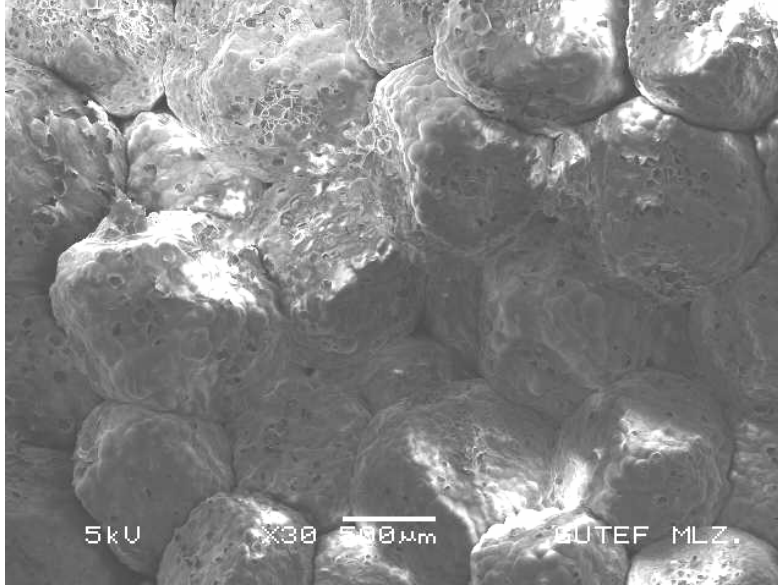
Resim 4.29. D-30-1,2-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



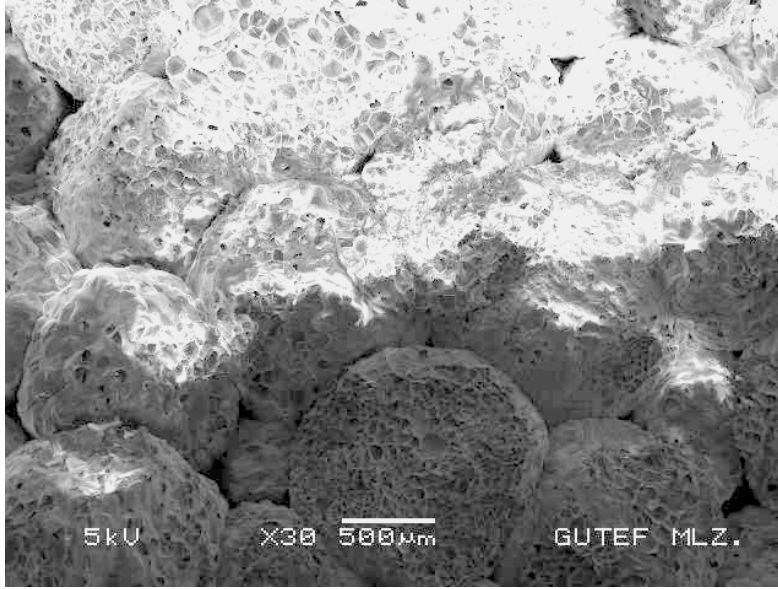
Resim 4.30. D-30-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.31. D-30-1,2-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



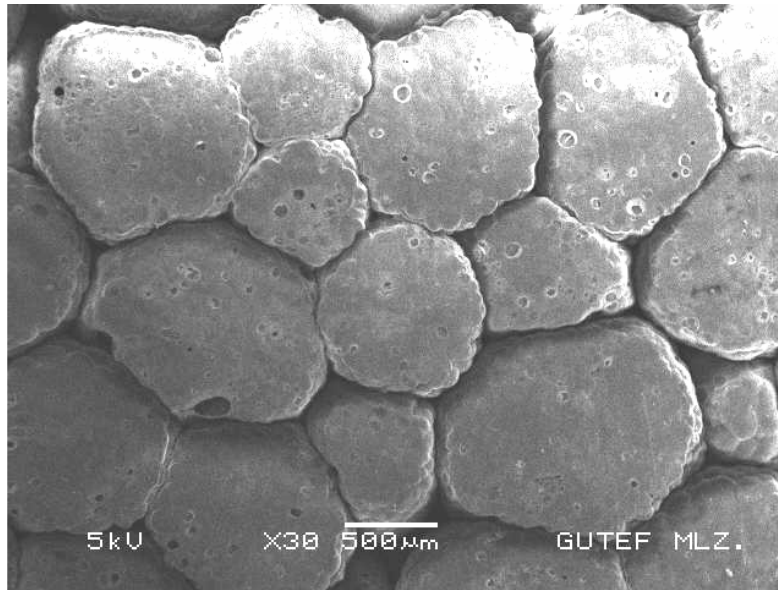
Resim 4.32. D-30-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



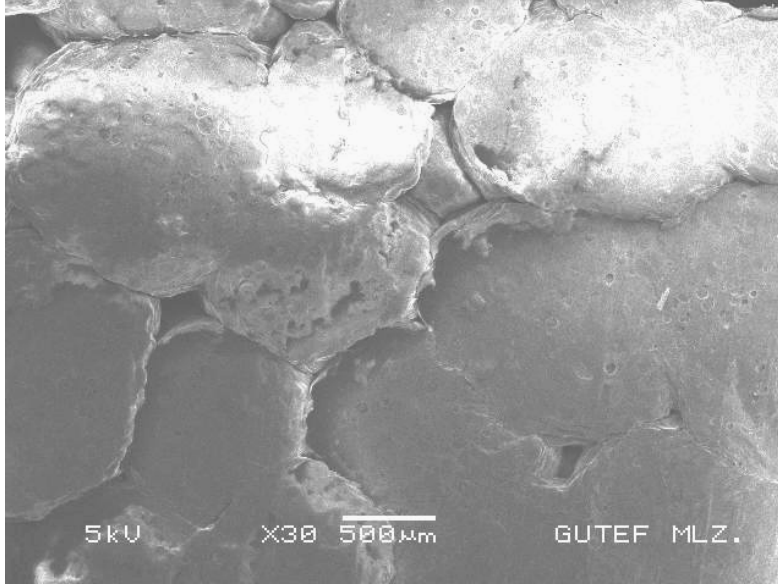
Resim 4.33. D-30-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

60 s süre ile ön şişirme işlemine tabii tutulan 0,570 gr granül numuneleri 26,2 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. 1,0 atm kalıplama basıncı ve 40 s kalıplama süresine sahip olan numune düzlemsel yüzeye sahiptir. Hücresel tane sınırları belirgin ve taneler arası kaynamanın zayıf olduğu gözlenmiştir. Arayüzeylerde, üçlü ve dörtlü tane kesişme noktalarında nispeten geniş ve derin boşluklar meydana gelmiştir, Resim 4.34. Artan kalıplama basıncı ile (1,1 atm) numune yüzeyinde taneler arası kaynama artmıştır, Resim 4.35.

1,0 atm kalıplama basıncı ve 40 s kalıplama süresine sahip numunede kopma tane sınırları boyunca meydana gelmekte ve hücresel tanelerin polihedral şeklinde sıralandığı görülmektedir, Resim 4.36. 30 s kalıplama süresinde 1,1 atm basınç uygulaması numunenin kırık yüzeyinde kopma modunu değiştirmemiştir, Resim 4.37. Aynı basınçta 40 s kalıplama süresi ile elde edilen numunede kırılma modu esas olarak değişmemiştir, fakat tane yüzeylerinde ayrılan tanelerin kalıntıları mevcuttur, Resim 4.38.



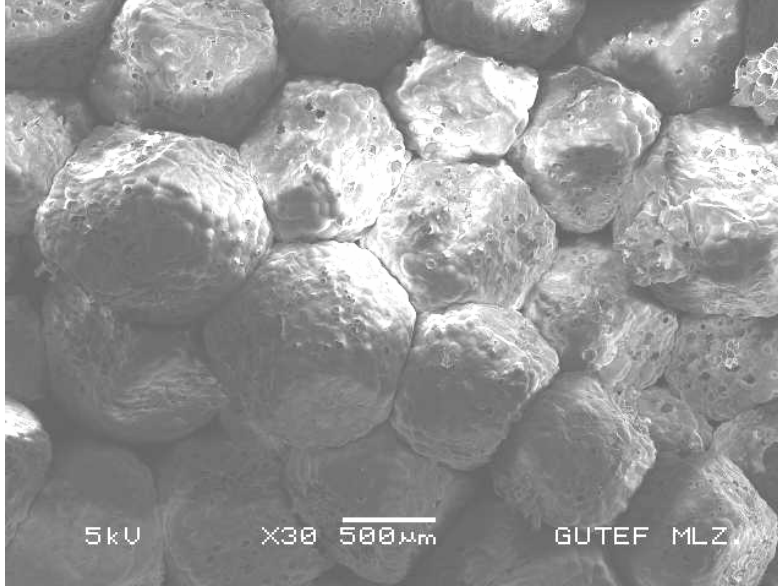
Resim 4.34. D-60-1,0-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



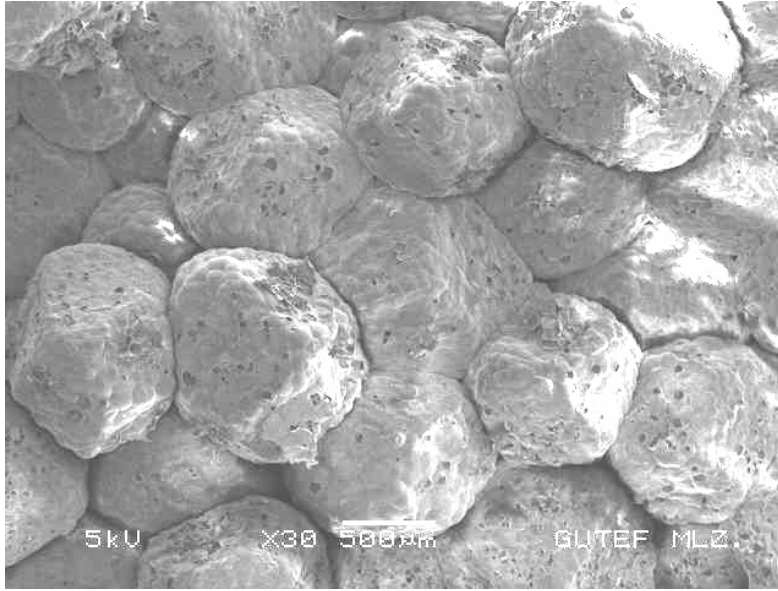
Resim 4.35. D-60-1,1-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.36. D-60-1,0-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



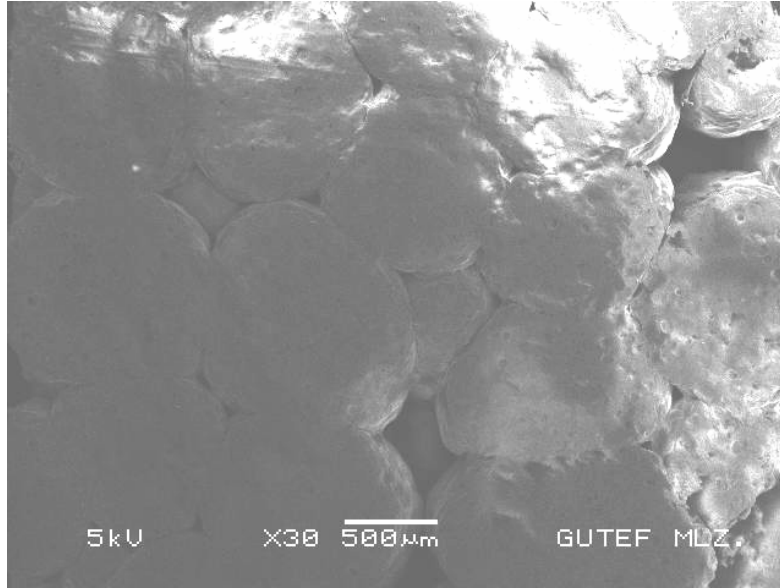
Resim 4.37. D-60-1,1-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.38. D-60-1,1-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

1,2 atm basınç altında ve 20 s süre ile kalıplanan numunelerin yüzeylerinde taneler arası boşluk oluşumu 1,1 atm basınç ve 30 s kalıplama süresine göre azalmıştır. 1,2 atm basınç altında artan kalıplama süresi ile birlikte numune yüzeyi düzlemselliği artmakta ve taneler arasında meydana gelen boşluk oluşumu azalmaktadır, Resim 4.39. 40 s kalıplama süresinde bazı tane sınırlarının kaybolduğu gözlenmiştir.

1,2 atm basınç altında 20 s kalıplama süresi ile üretilen numunelerin kırık yüzeylerinde yapılan incelemede kopmanın tane sınırı boyunca gerçekleştiği gözlenmiştir, Resim 4.40. Kalıplama basıncının 30 ve 40 s sürelerinde kopma modu daha çok tane içinden gerçekleşmiştir, Resim 4.41 ve Resim 4.42.



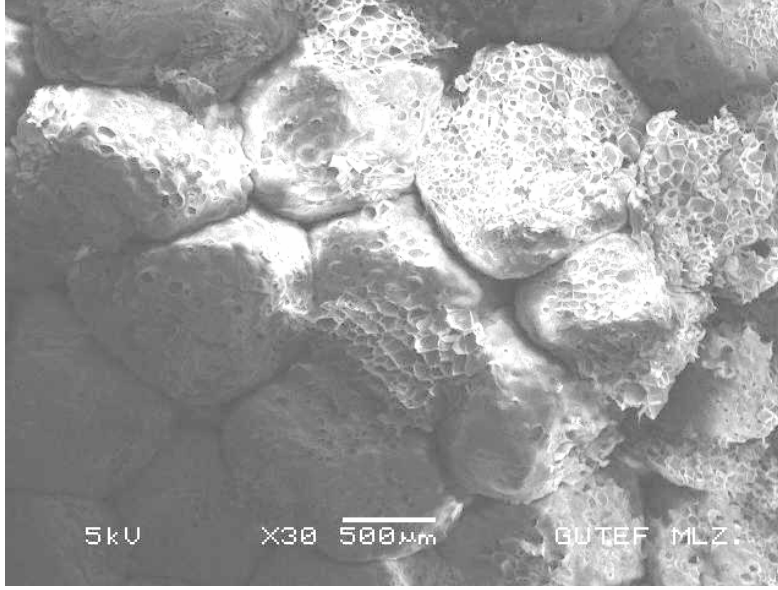
Resim 4.39. D-60-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.40. D-60-1,2-20 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.41. D-60-1,2-30 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 4.42. D-60-1,2-40 numunesinin çekme kırık yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

5. TARTIŞMA

Köpük model döküm yönteminde kullanılan polistiren modelin tanelerindeki kaynama, mekanik özellikler, termal özellikler ve mikroyapının model üretiminde kullanılan ön şişirme süresi, köpük model yoğunluğu, kalıplama süresi, kalıplama basıncı ve sıcaklık gibi parametrelerden etkilendiği deney sonuçlarından açıkça görülmektedir (Çizelge 4.3-Çizelge 4.6 ve Şekil 4.5-Şekil 4.13). Bunun yanında köpük model üretimindeki değişkenlerin birçoğu polimerlerin genel özellikleriyle ilgilidir. Bu çalışmada köpük model üretim parametrelerinin model özelliklerini nasıl etkilediği aşağıdaki bölümlerde tartışılmıştır.

5.1. Ham Polistiren Granüllere Uygulanan Ön Şişirme Süresi

Yapılan ön şişirme işlemlerinde artan ön şişirme süresi ile granül hacmi artmıştır (Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1). 1 cm³ hacme sahip olan ham polistiren granülleri 15, 30 ve 60 s süre ile ön şişirme işleminde sırasıyla 14, 16 ve 19 cm³ hacme yükselmiştir. Ön şişirme işlemi açık atmosferde su buharı kullanılarak 97 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Oda sıcaklığında kararlı haldeki polistiren granülleri camsı faza geçiş sıcaklığı ($T_g=74$ °C) üzerindeki sıcaklıklarda yumuşamış ve granüllerin içerisine emdirilen şişirici madde iç basıncı artırıp tanelerin büyümesini sağlamıştır. Hücresel tanelerdeki büyümeyi tane içindeki şişirici madde olan pentan ve ön şişirme işleminde kullanılan buhar gerçekleştirmiştir. Polistiren granülleri içerisinde bulunan pentan sıcaklığın etkisiyle 36 °C sıcaklıkta kaynamaktadır. Pentanın bu özelliği 97 °C ön şişirme sıcaklığında tane içindeki basıncı artırarak hücresel tanelerde hacimsel artışa neden olmuştur. Ayrıca ön şişirme işleminde kullanılan buharın tane içine difüzyonu ile hücresel tanelerdeki ozmik basınç tanelerin genişlemesine neden olmuştur [29].

Hücresel tane içerisine giren buhar ortamda bulunan şişirici maddenin de dışarı atılmasına sebep olur. Uzun sürelerde yapılan ön şişirme işlemlerinde

şişirici madde pentanın tamamen granüllerden atılması sonucu tanelerde bölgesel çökme ve kalıplamada yeterli kaynama olmaması gibi istenmeyen sonuçlara da sebep olmuştur. Hücresel tanelerdeki çökme ve büzülmeler tane içerisinde farklı yönlenmiş polimer zincirlerinin birbirine bağlanmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte ön şişirme sıcaklığı ve süresi kalıplamada şişirici madde miktarının belirlenmesinde etkili bir rol oynamıştır. Şişirici madde ön şişirme işlemi sonrası granüllerin kararlı bir hale gelinceye kadar tanelerin iç basıncını dengede tutması için de gereklidir.

Değişik ön şişirme süreleri uygulanarak elde edilmiş granüllerden kalıplanarak elde edilen numunelerin çekme deney sonuçları Çizelge 4.4'de görülmektedir. Bu veriler 15, 30 ve 60 s ön şişirilmiş granüllerden 0,665 g alınarak 1,1 atm basınç altında 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde kalıplanması ile üretilen numunelerden elde edilmiştir. Çizelge 4.4'deki 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde üretilen numunelerin çekme dayanımı ve % uzama değerleri artan ön şişirme süreleri ile yükselmiştir. 15, 30 ve 60 s ön şişirilme işlemi ile elde edilen granüllerin 40 s kalıplama süresindeki çekme dayanımları sırasıyla 0,214, 0,392 ve 0,451 N/mm²'ye, % uzama değerleri de 3,47, 8,32 ve 10,35 değerlerine artış göstermiştir. Bu verilerden ve mikroyapı incelemelerinden ön şişirme işlemi süresinin artması ile aynı şartlar için daha yüksek tane kaynaması gerçekleşmiştir, (Resim 4.18- Resim 4.20). Artan ön şişirme süresi ile meydana gelen tane büyümesinde kalıplama sırasında hücresel tanelerin birbirine teması daha erken gerçekleşerek taneler arası difüzyon mekanizması ile kuvvetli bir arayüzey kaynaması oluşarak çekme özelliklerde ve tane kaynamasında artış meydana gelmiştir, (Şekil 4.7-Şekil 4.10 ve Resim 4.21-Resim 4.23).

5.2. Model Yoğunluğu Etkisi

Köpük model üretiminde model yoğunluğu iki yöntemle sağlanmaktadır. Birinci yöntemde ön şişirme süresi ile elde edilen tane büyüklüğü, İkinci yöntemde ise ön şişirilmiş granüllerin ağırlık miktarı dikkate alınarak köpük

model yoğunluğu elde edilir. Birinci yöntem genellikle otomatik kalıplama makineleri için tercih edilirken ikinci yöntem elle kalıplama yönteminde tercih edilmektedir. Buharla kalıplama işleminde kalıp içindeki ön şişirilmiş granüllere kalıpta mevcut bulunan kanallardan belirli sıcaklıkta ve basınçta su buharı gönderilir. Su buharı sıcaklığı ve basıncın etkisiyle hücresel taneler yumuşar ve genişler. Yumuşama ve genişleme tanelerin birbirine kaynamasına neden olur. Sonuç olarak istenilen yoğunlukta köpük model elde edilir.

Yoğunluk tane kaynamasını etkileyen önemli bir parametredir. Model yoğunluğunun yükselmesiyle birlikte birim hacimde tane sayısı ve birbirine temas eden toplam tane yüzey alanı artar. Sisteme uygulanan sabit kalıplama basıncında küçük tanelerde meydana gelen tane içi basınç büyük tanelere göre daha yüksektir. Tane içi basınç yüzeydeki viskoelastik deformasyonu teşvik ederek her bir tane yüzeyindeki moleküler zincirlerin difüzyon mekanizmasıyla ara yüzeyde serbest olarak taşınmasına sebep olur [29]. Sonuç olarak ara yüzeydeki birim alanda taneler arası polimer zincirleri sayısında artış meydana gelerek daha kuvvetli tane bağlanmaları gerçekleşir. Bu durumun tane kaynamasında artış meydana getirdiği elde edilen yüksek yoğunluğa sahip modellerin mekanik özellik değerleri ve mikroyapılardan açık bir şekilde görülmektedir (Çizelge 4.3-Çizelge 4.6 ve Resim 4.16, Resim 4.21-Resim 4.23 ve Resim 4.37). Tane kaynamasına etki eden diğer bir önemli faktör de ön şişirme işleminden sonra her bir granül tanesi içinde kalan pentan miktarıdır. Granül tanesi içinde bulunan pentan tane içi basınç meydana getirir. Kalıplama işleminde tane içinde pentandan kaynaklanan basınç tanelerin birbirine kaynamasına yardımcı olur. Yüksek yoğunluğa sahip model elde etmek için düşük yoğunluğa sahip modele göre daha fazla sayıda granül tanesine ihtiyaç vardır. Birim alanda granül tanelerinin fazlalığı birim alanda pentan miktarını da artırır. Bu durum birim alanda tane kaynamasının için gerekli olan basıncın artmasını da sağlayabilir.

Bazı araştırmacılar [6, 7, 8] model yoğunluğunun artmasıyla taneler arası polimer zincirleri sayısında artış meydana geldiğini ve polimer zincirleri sayısının fazlalığından dolayı taneler arası bağın tam olarak kurulamadığını belirtmişlerdir.

Deneysel çalışmalarda sabit ön şişirme süresi, kalıplama süresi ve basınçta 0,570 gr, 0,665 gr ve 0,860 gr ağırlıktaki granüllerden elde edilen üç farklı yoğunluğa sahip numunelerin elastik modülü, çekme dayanımı ve %uzama değerleri yoğunluk arttıkça artmıştır (Çizelge 4.3-Çizelge 46). Düşük yoğunluğa sahip numunelerde kopma tane sınırları boyunca gerçekleşirken (Resim 4.38) yüksek yoğunluğa sahip numunelerde tane içinden gerçekleşmiştir (Resim 4.17).

Polistiren modellerde optimum mekanik özellikler ve tane kaynaması için model yoğunluğu ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresi ve sıcaklık ile birlikte kontrol edilmelidir.

5.3. Model Kalıplama Süresi

KMDY'de hücresel taneler arası arayüzeyde difüzyon mekanizması için gerekli olan değişkenler; kalıplama basıncı (sıcaklığı), hücresel tane içinde oluşan basıncın arayüzeye uyguladığı basınç ve kalıplama süresidir. Yapılan deneysel çalışmalarda kalıplama süresinin mekanik özellikler, mikroyapı, termal analiz ve ağırlık değişimi değerleri üzerine etkisi açık bir şekilde görülmüştür. Genellikle köpük model üretiminde artan kalıplama süresi mekanik özelliklerde artışa sebep olmaktadır (Çizelge 4.3-Çizelge 46). Mekanik özelliklerde bu artış kalıplama süresinin artmasıyla tane kaynama derecesindeki yükselmeden kaynaklandığı mikroyapı çalışmalarından anlaşılmaktadır (Resim 4.1-Resim 4.42). Hücresel plastiklerde kalıplama süresinin artması ile mekanik özelliklerdeki iyileşme (artış) şu temel mekanizma ile açıklanabilir. İki termoplastik camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta birbirine belirli basınç altında ve sürede temas

ederse temas eden yüzeylerde viskoelastik deformasyon meydana gelerek temas alanının daha da artmasına ve taneler arasında polimer zincirlerin etkileşimine neden olur [7]. Bu şekilde oluşan tane kaynamasının oluşması için ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve sıcaklığına bağlı olarak belirli bir süreye ihtiyaç vardır.

Sabit sıcaklık, basınç ve yoğunluk şartlarında ve düşük kalıplama sürelerinde nispeten küresel şekilli polistiren taneler (Resim 4.1, Resim 4.4) oluşurken yüksek kalıplama sürelerinde polihedral taneler üretmiştir (Resim 4.3, Resim 4.5). Kalıplama süresindeki artış ile model yüzey düzlemselliği artmış ve gözenekler azalarak arayüzeylerde tam tane kaynaması meydana gelmiştir (Resim 4.8, Resim 4.12, Resim 4.14, Resim 4.20, Resim 4.26 ve Resim 4.39). Bu durum döküm yüzey kalitesini doğrudan etkilediği gibi döküm sırasında sıvı metal-model arayüzey mesafesini kısaltarak düzlemsel arayüzey oluşumunu sağlar [52]. Kalıplama süresinin artmasıyla tane kaynama derecesindeki artış çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kırık yüzeylerinden de görülebilmektedir. Düşük kalıplama sürelerinde kopma tane sınırları boyunca (Resim 4.9, Resim 4.31, Resim 4.35 ve Resim 4.40), yüksek kalıplama sürelerinde ise tane içlerinden oluşmuştur (Resim 4.5, Resim 4.11, Resim 4.17, Resim 4.33, Resim 4.41 ve Resim 4. 42)

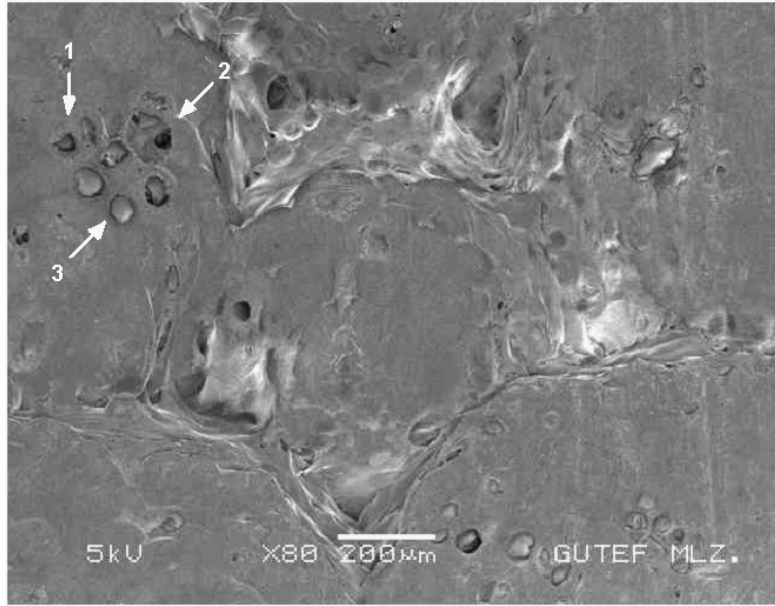
Shivkumar, Rossacci ve Sand [6-8] yaptıkları deneysel çalışmada kalıplama sürelerinin artmasıyla tane kaynama derecesinin ve mekanik özelliklerin arttığını belirtmişlerdir.

Polistiren modellerin üretiminde kalıplama ve ön şişirme süresi, yoğunluk, kalıplama basıncı ve sıcaklığı ile birlikte kontrol edilmelidir. Çünkü, yüksek basınç ve sıcaklık altında uzun kalıplama süreleri polistiren model tanelerinde bozulmalar meydana getirebilmektedir.

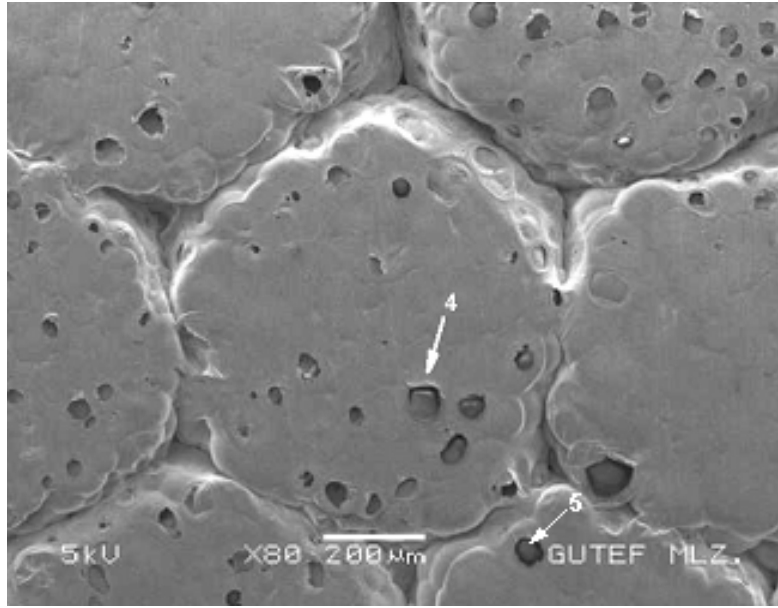
Bu çalışmada 1,1 ve 1,2 atm kalıplama basınçlarında 30 ve 40 s kalıplama süreleri hücre duvarlarında bozulmalar meydana getirmiştir. Bozulmalar

özellikle taneyi meydana getiren hücrelerde çökme, büzülme ve yırtılma şeklindedir. Resim 5.1 ve Resim 5.2'de 1, 2 ve 4 nolu bölgelerde yırtılma görülmektedir. Resim 5.3 ve 4'de komşu tanenin yırtılan tane içine ilerleyerek büyüdüğü, aynı büyümenin 3 ve 5 nolu bölgelerden de açık bir şekilde görülmektedir. Polistiren malzemelerde yüksek basınç değerlerinde artan kalıplama süresi ile meydana gelen bozunmalar mekanik özellikleri düşürmektedir, Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19.

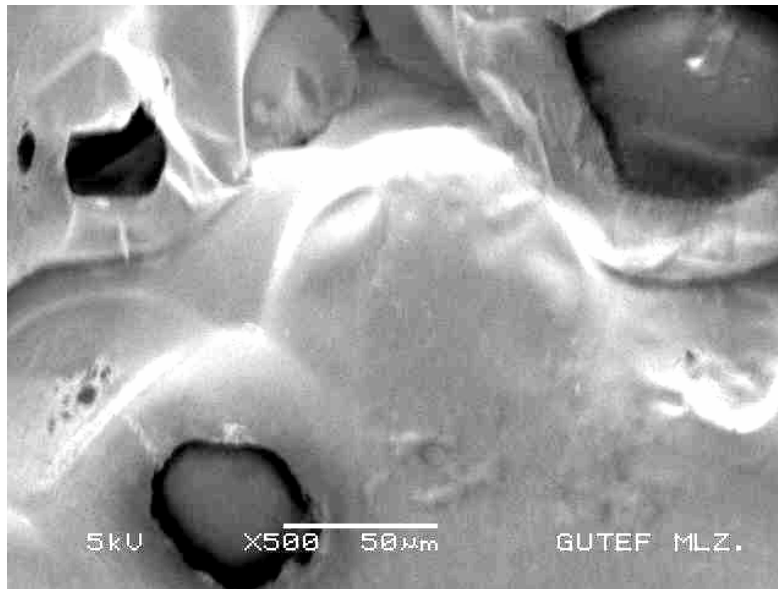
Polistiren tanelerdeki bozulmaların tane ve her bir hücre içinde pentanın tamamen uzaklaşmasıyla basıncın düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Rossacci [6] yüksek sıcaklıklarda mükemmel bir kaynama ile birlikte tanelerde çökme ve büzülme şeklinde teşekkül eden yapısal bozunmaların meydana geldiğini belirtmiştir.



Resim 5.1. D-30-1,2-40 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



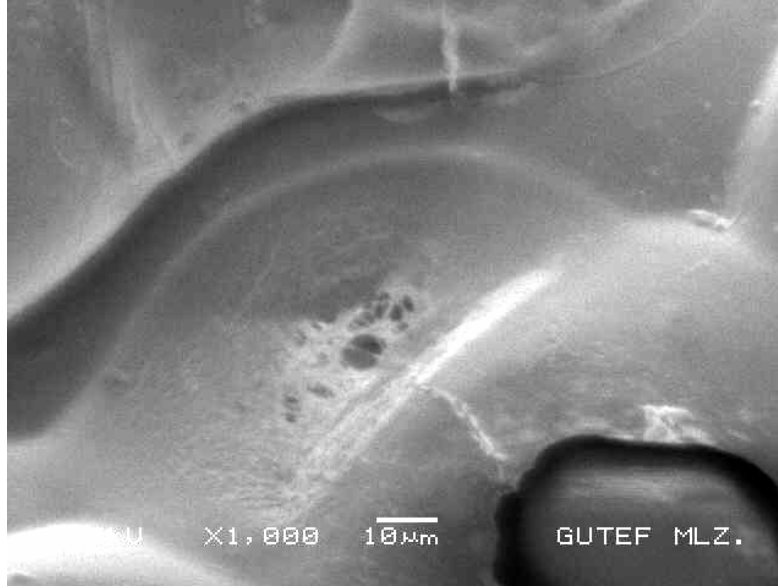
Resim 5.2. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü



Resim 5.3. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

15 s ön şişirme işlemi görmüş $39,07 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip granüllerin 1.2 atm basınç altında 20 s kalıplama süresinden 30 s kalıplama süresine geçişinde çekme dayanım artarken 30 s'den 40 s kalıplama süresine

geçişinde bu değer azalmıştır (Çizelge 4.3. ve Şekil 4.6). Benzer durum 60 s ön şişirme işlemi görmüş $26,2 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip granüllerin 1.2 atm basınç altında 20, 30 ve 40 s kalıplama sürelerinde de gözlenmiştir (Şekil 4.19).



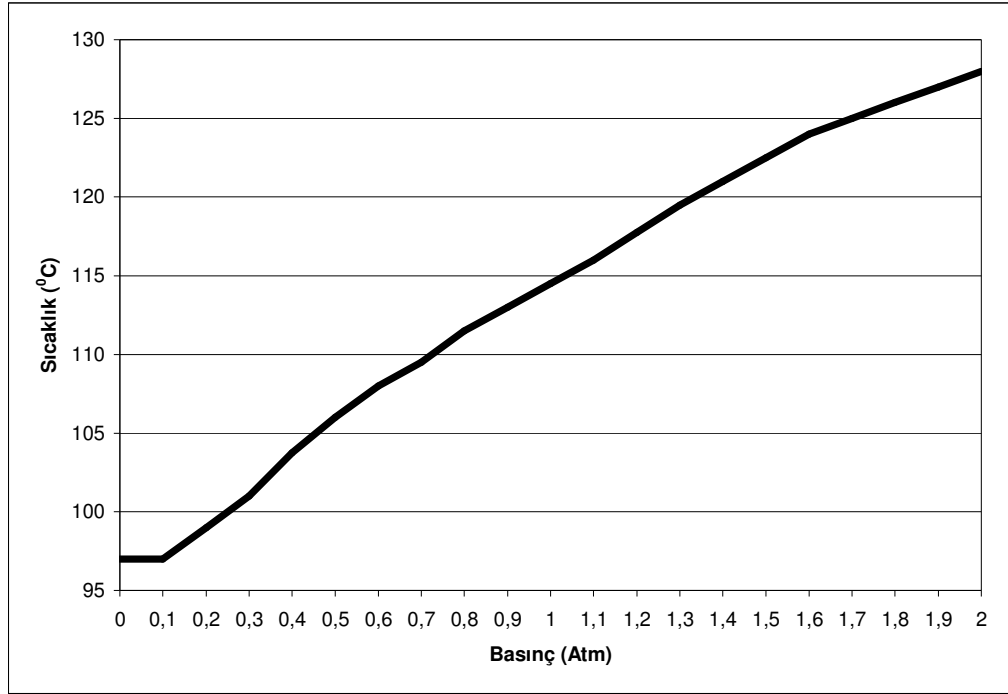
Resim 5.4. O-30-1,1-30 numunesinin kalıp duvarlarına karşı dış yüzey tarama elektron mikroskobu görüntüsü

5.4. Model Kalıplama Basıncı

Köpük model üretiminde kalıplama süresi gibi kalıplama basıncı da önemli bir parametredir. Kalıplama işleminde kullanılan su buhar basıncı kalıplama ortamının sıcaklık değerlerini de etkilemektedir, (Şekil 5.1). Yüksek sıcaklık değerleri için yüksek kalıplama basıncına ihtiyaç vardır. Genel olarak kalıplama basıncı ve sıcaklığının artması ile hücresel taneler arasındaki etkileşim artmaktadır [7]. Hücresel taneler arasındaki etkileşimin artması şu şekilde açıklanabilir. Tane içi yüksek basınç nispeten sıcaklığı artan tane yüzeyinde viskoelastik deformasyon meydana getirerek her bir tane yüzeyindeki moleküler zincirlerinin difüzyon mekanizmasıyla ara yüzeyde serbest olarak taşınmasına sebep olur [29]. Bu durum tane kaynaması ile

arayüzeylerin kaybolmasını sağlar. Bu açıklamaya ilave olarak, sabit ön şişirme ve kalıplama sürelerinde düşük kalıplama basınç değerleri yaklaşık olarak küresel tane (Resim 4.4) yüksek kalıplama basınç değerleri ise polihedral tane (Resim 4.10) üretir. Polihedral tanelerin toplam yüzey ve temas alanı küre şeklindeki tanelerden çok daha fazladır. Dolayısıyla molekül zincirlerinin difüzyon mekanizmasıyla taşınımı daha geniş tane yüzey alanında etkili olacaktır. Difüzyon sıcaklığın etkisi ile ara yüzeyde dolaşan zincirlerin sayısında artış meydana getirir [6]. Yüksek basınç ve sıcaklık hücresel tane içerisinde oluşan basıncı ve tane yüzeyindeki viskoelastik deformasyonu artırarak taneler arası molekül zincirlerin arayüzeyde daha hızlı taşınımını sağlar. Bu durum tane kaynama derecesini artırır ve daha kuvvetli bir ara yüzey bağıni oluşturur. Resim 4.38 ve Resim 4.41'de kırık yüzeyde kopmanın tane içinden gerçekleşmesi ve tane yüzeyindeki kalıntılar bu mekanizmayı desteklemektedir.

Yüksek basınç değerlerinde çalışmak kontrollü çalışmayı gerektirmektedir. Aksi halde kontrol edilemeyen değişkenler yüksek sıcaklıklarda hücresel tanelerde ve hücre duvarlarında çökme ve yırtılma gibi bozulmalara yol açmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda mükemmel bir kaynama derecesiyle beraber tanelerde yapısal bozunma meydana gelebilmektedir. Özellikle 1,1 ve 1,2 atm basınç değerlerinde artan kalıplama süreleri ile hücre duvarlarında yırtılma, çökme ve büzülmeler gözlenmiştir, Resim 4.45. Rossacci [7] de kırık yüzey gözlemlerine dayanarak yaptığı açıklamada yüksek sıcaklıkların artan kalıplama süresi ile birlikte tane içindeki hücre duvarlarında çökme ve bozunma meydana getirdiğini belirtmiştir. Hücre duvarlarındaki çökmeler deforme olmamış polistirenin camsı geçiş sıcaklığı ($T_g=74\text{ }^{\circ}\text{C}$) üzerindeki sıcaklıklarda ($105\text{ }^{\circ}\text{C}$) da gözlenmiştir. Hücre duvarlardaki çökmenin bir diğer nedeni de ön şişirme işleminden sonra tane içinde kalan şişirici pentanın artan sıcaklıkla birlikte tamamen buharlaşarak kalıptan dışarıya atılmasıdır. Tane içindeki pentanın uzaklaşması tane içi basıncın düşmesine ve bunun sonucu olarak hücre yüzeylerinde çöküntüye sebep verir, (Resim 4.2).



Şekil 5.1. Kalıplama ünitesinde uygulanan basınçlara karşılık gelen sıcaklık değerleri

Kalıplama basıncı Çizelge 4.3, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da görüldüğü gibi mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Buhar basıncı taneler arası kaynama derecesini artırarak mekanik özellikleri arttırmaktadır. Ancak yüksek değerlerdeki kalıplama basıncı aynı zamanda yukarıda açıklanan bozunmaları meydana getirerek mekanik özellikleri düşürmektedir (Çizelge 4.3, Çizelge 4.6). Bu bozunmalar kalıplanan polistiren numunelerin büzülerek şeklinin küçülmesine de sebep olmaktadır. Bu yüzden kalıplama basıncı ile kalıplama süresi birlikte kontrol edilmelidir. Üç farklı yoğunluk değeri için 20 s kalıplama süresinde artan basınçla birlikte dayanımda da artış görülmektedir. 26,2 kg/m³ yoğunluğuna sahip numunelerin 20 s kalıplama sürelerinde 1,0 atm kalıplama basıncı yeterli tane kaynaması sağlamazken 1,1 ve 1,2 atm basıncı sırasıyla 0,163 N/mm² ve 0,177 N/mm² çekme dayanımı sağlamışlardır. Aynı durum 30,7 kg/m³ ve 39,07 kg/m³ yoğunluktaki numunelerde de gözlenmiştir.

Çizelge 4.3'de $39,07 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğundaki numunelerin artan kalıplama basıncı ve süresi ile birlikte mekanik özelliklerdeki değişim görülmektedir. Elde edilen verilerde artan kalıplama basıncına göre numunelerin mekanik özelliklerinde artış gözlenmektedir. Ancak 1,2 atm basınç ve 40 s kalıplama süresi dayanım ve % uzama değerlerini düşürmüştür. Çizelge 4.3'deki % uzama değerleri incelendiğinde, maksimum % uzama değeri 1,0 atm kalıplama basıncında ve 40 s kalıplama süresinde 11,78 olarak elde edilmiştir. 1,1 ve 1,2 atm basınç için % uzama değerleri sırasıyla 9,78 ve 7,98 olarak gerçekleşmiştir. 40 s kalıplama süresi için çekme dayanımları 1,0, 1,1 ve 1,2 atm buhar basıncı için sırasıyla 0,584, 0,569 ve 0,503 N/mm^2 olmuştur. En yüksek çekme dayanımı 1,2 atm buhar basıncında 30 s kalıplama süresinde 0,604 N/mm^2 olarak bulunmuştur.

Shivkumar ve arkadaşları [6, 8, 49] artan kalıplama basıncı ile mekanik özelliklerin arttığını fakat yüksek kalıplama basınçlarının uzun kalıplama sürelerinde özellikleri düşürdüğünü açıklamışlardır.

Verilerden de görüldüğü gibi kalıplama basıncı kalıplama süresi ile birlikte mekanik özellikler üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda çalışmak kontrollü bir işlemlerle mümkün olmaktadır. Çünkü yüksek sıcaklıklarda kalıplama aralığı daralmaktadır. Yüksek basınç ve sıcaklıkta polistiren kalıplamanın sakıncalarının yanında daha kısa sürede tane kaynaması açısından avantajlı yönü de vardır. Bu avantaj seri üretim için kısa zamanda daha fazla parça üretme imkanı sağlayacaktır.

5.5. TGA ve DSC Analizi

DeneySEL sonuçlardan görüleceği üzere model üretim parametrelerine bağlı olarak bozunum için gerekli olan enerji miktarlarında ve oluşan atık miktarlarında değişimler gözlenmiştir (Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8). Ham polistirenin DSC eğrilerinden görüleceği üzere 74°C (camsı geçiş sıcaklığı) ile 130°C sıcaklık aralığında hem endotermik hem de ekzotermik reaksiyon

meydana gelmiştir. Bu sıcaklık aralığı gerçekte pentan ile çalışma aralığını göstermektedir. Şekil 4.20’de verilen TGA analiz eğrisinden pentanın 97 °C sıcaklıkta azalmaya başladığı ve 150 °C sıcaklıkta tamamen granüllerden uzaklaştığı görülmektedir. Yaşlandırılmış numunelerin tamamında bu değişimin görülmemesi pentanın numuneden dışarı atılmasından dolayıdır (Şekil 4.21 ve Şekil 4.22). Literatürde camsı geçiş sıcaklığında granüllerde herhangi bir ağırlık kaybının olmadığı vurgulanmaktadır [34]. Ham numune dışındaki numunelerde camsı geçiş sıcaklığının görülmemesi artan sıcaklıkla birlikte sert ve amorf yapıdaki granüllerin yumuşak amorf bir yapıya dönüşümünden kaynaklanmaktadır [34].

Deneysel çalışmalardan görüldüğü üzere artan ön şişirme ve kalıplama süreleriyle birlikte numunelerin ağırlık kayıpları ve bozunum enerjilerinde artış gözlenmiştir. Fakat köpük model numunelerinde kalıplama süresinin artmasıyla birlikte % 50 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değeri düşmüştür. Yani bozunum daha erken başlamıştır.

5.6. Ağırlık Değişimi

Kalıplama işlemi ile elde edilen numunelerde meydana gelen ağırlık değişimi kalıplama sırasında polistiren tanelerin içinde ve taneler arası boşluklarda yoğunlaşan buharın zamanla numuneyi terk etmesi ile gerçekleşmektedir. Hücresel tanelerde kalıplama sırasında meydana gelen genişleme sadece taneler içerisinde bulunan şişirici madde (pentan) ile meydana gelmemektedir. Genişleme tane içine difüz eden buharın hücre içi ozmotik basıncı arttırmasıyla da meydana gelmektedir [29]. Tanelerde meydana gelen bu genişleme kalıbın kapalı olmasından dolayı tane kaynaması ile sonuçlanmaktadır. Tane kaynaması taneler arası boşlukları azaltarak ağırlık artışına sebep olan yoğunlaşması ihtimali buhar alanlarını azaltmaktadır. Tane kaynamasında etkili olan değişkenler ağırlık değişiminde de etkili olmaktadır. Ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve kalıplama sürelerine bağlı olarak üretilen her bir numunede kalıplama işlemini takiben meydana

gelen ağırlık kayıpları esas olarak üç aşamada gerçekleşmiştir. Ağırlık kayıplarının nispeten hızlı gerçekleştiği birinci aşama I.kırınım bölgesi, birinci aşamaya göre daha yavaş gerçekleştiği ikinci aşama II.kırınım bölgesi ve son olarak numunelerin kararlı duruma geldiği aşama III.kırınım bölgesi olarak tanımlanmıştır. Elde edilen ağırlık kayıpları Çizelge 4.9 ve Şekil 4.26- Şekil 4.32'de verilmiştir.

Ağırlık değişimi deneyi ile elde edilen verilerden görüldüğü üzere hücrel taneler arasında meydana gelen tane kaynaması, köpük modelde meydana gelen kalıplama sonrası ağırlık değişimini etkilemektedir. Ağırlık değişimi eğrilerinde meydana gelen ağırlık kaybı hızı I.kırınım bölgesi artan kalıplama süresi ve basıncı ile azalma eğilimindedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Farklı ön şişirme süresi, köpük model yoğunluğu, kalıplama süresi ve kalıplama basıncının polistiren köpük modelin mikroyapısı, mekanik özellikleri, ağırlık kaybı ve bozunum üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Ham polistiren granüllerin ön şişirme süresi arttıkça tanelerin hacmi artmıştır.
2. Polistiren tanelerin ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresinin artmasıyla tane kaynaması artmıştır.
3. Ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresinin artmasıyla polistiren modelin çekme dayanımı ve uzama değerleri gelişmiştir.
4. Maksimum çekme değerleri 15 s ön şişirme süresi, 39,07 kg/m³ yoğunluk, 1,2 atm buhar basıncı ve 30 s kalıplama süresinde elde edilmiştir.
5. Taneler arası boşlukların model yoğunluğu, ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresinin artmasıyla azaldığı gözlenmiştir.
6. Model yoğunluğundaki artış yüzeyde daha düzgün bir tane istiflenmesi sağlamıştır.
7. Benzer kalıplama şartları için artan yoğunluk hücrel tane sayısını arttırmış taneler arası temas yüzeyleri daralmıştır.
8. Artan kalıplama süresi düzlemsel yüzey oluşturmaktadır.
9. Aynı kalıplama şartlarında çekme kırık yüzeylerindeki kopmuş hücrel tane sayısı kalıplama süresinin artmasıyla artmıştır.
10. Hücrel tanelerin üçlü kesişme noktalarında meydana gelen boşluklar artan kalıplama süresiyle kaybolmuş ve dörtlü kesişme noktalarında boşluklar daralmıştır.
11. Farklı kalıplama basınçlarında artan kalıplama süreleri için maksimum dayanım 40 s kalıplama süresinde bulunmuştur.

12. Yüksek basınç (1,2 atm) değerlerinde artan kalıplama süresi mekanik özellikleri düşürmüştür.
13. Yüksek basınç kalıplama işlemi için kullanılan çalışma aralığını daraltmıştır.
14. Artan kalıplama basıncı yüksek tane kaynaması için gerekli olan süreyi kısaltmıştır.
15. Ön şişirme süresi arttıkça polistirenin atık miktarı artmıştır.
16. Ön şişirilmiş polistirenin % 50 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değeri ön şişirme süresi ile değişmemiştir.
17. Kalıplama süresinin artmasıyla polistiren numunenin % 50 ağırlık kaybının gerçekleştiği sıcaklık değeri azalmıştır.
18. Kalıplama süresiyle polistirenin atık miktarı değişmemiştir.
19. Ön şişirme ve kalıplama sürelerinin artmasıyla bozunumun entalpileri artmıştır.
20. Camsı geçiş sıcaklığı (T_g) sadece ham polistiren granüllerde görülmüştür.
21. Ham, ön şişirilmiş ve kalıplanmış numunelerin tamamında bozunum 350-450 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir.
22. Kalıplanma sonrası ağırlık artışı artan basınç ve kalıplama süresi ile düşmüştür.
23. Numunelerde ağırlık kaybındaki kararlı hale geçme süresi artan kalıplama basıncı ve süresi ile yaklaşık olarak aynı zamanda gerçekleşmiştir.
24. Ağırlık kaybı hızı ve %'si kalıplama süresinin artmasıyla azalmıştır.
25. Ön şişirme süresinin artmasıyla % ağırlık değişiminde azalma meydana gelmiştir.

6.2. Öneriler

KMDY'de köpük model parametrelerini belirlemek için yapılacak çalışmalar yönteme katkı sağlamaya devam edecektir. Bu amaçla yöntem değişkenlerini belirlemek ve kaliteli bir köpük model oluşturmak için aşağıda önerileni dikkate almak faydalı olacaktır.

1. Ön şişirme süresi ile tanelerde meydana gelen pentan miktarındaki değişimin tespit edilmesi gerekir.
2. Ön şişirme sürelerinde tanelerde meydana gelen boyutsal değişim belirlenmelidir.
3. Yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisi belirlenmelidir.
4. Ön şişirme ve kalıplama sonrası yaşlandırma işlemi kararlı bir tane yapısı için uygulanmalıdır.
5. KMDY'de yoğunluk, ön şişirme süresi, kalıplama basıncı ve süresi birlikte kontrol edilmesi gereken parametreler olduğu dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Bates, C.E., Littleton, H.E., McMellon, B., Stroom, P.A., "Technological developments and worldwide market growth in lost foam casting production", **AFS Transaction**, 109: 1557-1572 (2001).
2. Kotzin, E.L., "From lost wax to lost foam: reflections on the past, present and future", **AFS Transactions**, 105: 981-986 (1997).
3. Molibog, T.V., Littleton, H., "Experimental simulation of pattern degradation in lost foam", **AFS Transactions**, 109: 1523-1555 (2001).
4. Horacek, M., Elbel, T., "Practical experience with introducing new materials and technologies", **Proceedings of the 65th World Foundry Congress**, Gyeongju, Korea, 1069-1080 (2002).
5. Bakhtiyarov, S.I., Overfelt, R.A., Alagarsamy, A., "Measurement of decomposed EPS gases pressure and molten metal-polymeric foam interface velocity during counter gravity lost foam casting", **AFS Transactions**, 109: 1439-1453 (2001).
6. Rossacci, J., Shivkumar, S., "Influence of EPS bead fusion on pattern degradation and casting formation in the lost foam process", **Journal of Materials Science**, 38: 2321-2330 (2003).
7. Rossacci, J., Shivkumar, S., "Bead fusion in polystyrene foam", **Journal of Materials Science**, 38: 201-206 (2003).
8. Sands, M., Shivkumar, S., "EPS molecular weight and foam density effect in the lost foam process", **Journal of Materials Science**, 38: 2233-2239 (2003).
9. Shroyer, H.F., "Cavityless casting mold and method of making same", **United state patent office**, 2,830,343 (1958).
10. Kotzin, E.L., "Metal casting and molding processes", **AFS**, USA, 148-161, (1981).
11. Sikora, E.J., "Evaporative casting using expandable polystyrene pattern and unbonded sand casting techniques", **AFS Transactions**, 86: 65-68 (1978).
12. Patz, M., "Lost foam process update", **AFS Transactions**, 93: 901-902 (1985).

13. Flemings, M.C., "Foam vaporization casting", ***AFS Transactions***, 95: 665-672 (1987).
14. Vinarcik, E.J., "Thermo gravimetric analysis of expendable pattern casting adhesives", ***AFS Transactions***, 105: 355-357 (1997).
15. Liu, J., Hu, J., Ding, W., Wang, Q., Zhu, Y., Lü, Y., Chen, W., "Effects of processing parameters on mold Filling in magnesium alloy LFC Process", ***AFS Transactions***, 109: 1425-1438 (1997).
16. Pan, E.N., Sheu, G.L., "Mold filling behavior in vertical gating lost foam aluminum alloy", ***AFS Transactions***, 109: 1503-1521 (2001).
17. Zili, L., Hu, J., Wang, Q., Ding, W., Zhu, Y., Lü, Y., Chen, "Evaluation of the effect of vacuum on mold filling in the magnesium EPC process" ***Journal Of Materials Processing Tecnology***, 120: 94-100 (2002).
18. Fu, J., Tsai, H.L., Askeland, D.R., "Mold filling in thin-section castings produced by the EPC process", ***AFS Transactions***, 103: 817-828 (1995).
19. Chen, Y.F., Chen, R.C., Hwang, W.S., "Mold filling study in the EPC process—mathematical model and flow characteristics", ***AFS Transactions***, 105: 459-464 (1997).
20. Wang, C., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Processing variable significance on filling thin plate in the LFC process—the staggered, nested factorial experiment", ***AFS Transactions***, 105: 427-434 (1997).
21. Pan, E.N., Liao, K.Y., "Study on flowability of EPC A356 Al alloy", ***AFS Transactions***, 106: 233-242 (1998).
22. ASM Handbook Comminute, "ASM handbook (processing of casting)", ***ASM***, 15: 231-237 (1992).
23. Venkataramani, R., Ravindran, C., "Effect of coating thicness and pouring temprature on response in lost foam casting", ***AFS Transactions***, 104: 281-290 (1996).
24. Campbell, J., "The concept of net shape for castings", ***Materials and Design***, 21: 373-380 (2000).
25. Smith, T.R., "Method of casting", **United state patent office**, 3,157,924 (1964).

26. Bush, S.F., Ademosu, O.K., "Low-density rotomoulded polymer foams" ***Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*** 259: 39–47 (2005).
27. Penumadu, D., Benson, R., Michaels, R., "Qualitative and quantitative description of EPS foam for lost foam casting", ***AFS Transactions***, 111: 1293-1303 (2003).
28. Hess, D.R., "Comparison of aluminum alloys and EPS foams for use in the lost foam casting process", ***AFS Transactions***, 112: 1161-1175 (2004).
29. Brydson, J.A., "Plastics materials", ***Butterworth and Heinemann***, 5th Edition, London, 406-431 (1989).
30. Teddy F.C., Her, E., Zaoui, A., "Micromechanical modelling of intracellular pressure-induced viscoelastic shrinkage of foams: application to expanded polystyrene" ***Eur. J. Mech. A/Solids***, 18: 201-218 (1999).
31. Gurdogan, O., Huang, H., Akay, H.U., Fincher, W.W., Wilson, V.E., "Mold filling analysis for ductile iron lost foam castings", ***AFS Transactions***, 104: 451-459 (1996).
32. Bambauer, R.A., Lee, T., DeLong, T., "Effect of continuous mixing on viscosity and permeability of an iron lost foam casting: A joint study", ***AFS Transactions***, 104, 329-333 (1996).
33. Kocan, G.H., "Incorporating permeability into lost foam casting control", ***AFS Transactions***, 104: 565-569 (1996).
34. Tseng, C.H.E., Askeland, D.R., "Thermal and chemical analysis of the foam, refractory coating and sand in the EPS process", ***AFS Transactions***, 100: 509-518 (1992).
35. Marchisin, W.A., "Refractory coating selection and control for the lost foam casting process", ***AFS Transactions***, 109: 1489-1494 (2001).
36. Gorla, C.A., Serramogha, G., Caironi, G., Tosi, G., "Coating permeability: critical parameter of the evaporative pattern process", ***AFS Transactions***, 94: 589-600 (1986).
37. Salah, D., Eigenfeld, K., Tilch, W., "Reactive Lost Foam Coating", ***Proceedings of the 65th World Foundry Congress***, Gyeongju, Korea, 1015-1022 (2002).

38. Ikenaga, A., Kuraoka, S., Kawamoto, M., "Performance of rotary vibration table for compaction of molding sand", ***AFS Transactions***, 106: 1-5 (1998).
39. Kuraoka, S., Bosscher, P.J., "Numerical simulation of circulation flow of granular materials during vertical vibration", ***AFS Transactions***, 104: 619-624 (1996).
40. Vatankhah, B., Sheldon, D., Littleton, H.E., "Optimization of vibratory sand compaction", ***AFS Transactions***, 106: 787-796 (1998).
41. Ravindran, C., Jue, B., Karpynczyk, J., "Study of effect of vibration on permeability of unbonded sand in EPC", ***AFS Transactions***, 102: 915-920 (1994).
42. Wegscheid, E.L., "Sand vibration for the lost foam process", ***AFS Transactions***, 98: 631-639 (1990).
43. Tschopp, M.A., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Processing variable significance on metal flow and defect formation in thick section LFCs—full factorial experiment", ***AFS Transactions***, 108: 267-274 (2000).
44. Liu, Y., Bakhtiyarov, S.I., Overfelt, R.A., "Numerical modeling and experimental verification of mold filling and evolved gas pressure and lost foam casting process", ***Journal of Materials Science***, 37: 667-673 (2002).
45. Mehta, S., Shivkumar, S., "Fluidity of Al alloys and composites in the lost foam process", ***AFS Transactions***, 103: 663-668 (1995).
46. Liu, J., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Study on mold filling control mechanisms in the EPC process", ***AFS Transactions***, 102: 903-914 (1997).
47. Hill, M.W., Lawrence, M., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., Influence of gating and other processing parameters on mold filling in the LFC Process, ***AFS Transactions***, 105: 443-450 (1997).
48. Bennett, S., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Temperature gradients during fill and solidification of Al LFCs", ***AFS Transactions*** 106: 357-363 (1998).
49. Shivkumar, S., Wang, L., Steenhoff, B., "Metalurgical quality of aluminum castings produced by the lost foam process", ***AFS Transactions***, 97: 825-836 (1989).

50. Shelton D., "A Brief Introduction to Lost Foam", ***Ceramic Engineering and Science Proceedings***; 24: 41-44 (2003).
51. Fu, J., Tsai, H.L., Askeland, D.R., "Transport of foam decomposition products into the sand in the lost foam casting process", ***AFS Transactions***, 104: 263-270 (1996).
52. Sun, Y., Tsai, H.L., Askeland, D.R., "Effects of silicon content, coating materials and gating design on casting defects in the aluminum lost foam process", ***AFS Transactions***, 104: 271-279 (1996).
53. Albonetti, R., Ravindran, C., "Effect of adhesives on microstructure of A356 alloy in LFC", ***AFS Transactions***, 105: 609-620 (1997).
54. Lawrance, M.D., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Some observation and principles for gating of lost foam casting", ***AFS Transactions***, 106: 349-356 (1998).
55. Simpson, R., Ravindran, C., "Solidification process modelling of chills in LFC of A356 alloy: preliminary study", ***AFS Transactions***, 104: 1133-1141 (1996).
56. Sands, M., Shivkumar, S., "Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process", ***Journal of Materials Science***, 38: 667-673 (2003).
57. Miyake, H., Yamamoto, Y., Manabe, T., Okado, A., "Necessity of exhaust gas treatment in evaporative pattern gating", ***AFS Transactions***, 109: 1417-1424 (2001).
58. Hill, M., Vrieze, A., Moody, T., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Effect of metal velocity on defect formation in Al LFCs", ***AFS Transactions***, 106: 365-374 (1998).
59. Shivkumar, S., "Ablation of PMMA by liquid metals", ***AFS Transactions***, 101: 519-524 (1993).
60. Liu, J., Ramsay, C.W., Askeland, D.R., "Effects of foam density and density gradients on metal fill in the LFC process", ***AFS Transactions***, 105: 435-442 (1997).
61. Guohua, W., Jirong, L., Naiyu, H., "Study on porosity of al alloy in LFC process", ***AFS Transactions***, 108: 377-381 (2000).
62. Littleton, H.E., Molibog, T., Sun, W., "The role of pattern permeability in the lost foam casting", ***AFS Transactions***, 111: 1265-1278 (2003).

63. Yao, X., Shivkumar, S., "Mold filling and solidification in the lost foam process", ***AFS Transactions***, 103: 761-765 (1995).
64. Yang, J., Huang, T., Fu, J., "Study of gas pressure in EPC (LFC) molds", ***AFS Transactions***, 106: 21-26 (1998).
65. Kocatepe, K., "Effect of low frequency vibration on microstructures of LM25 and LM6 alloys", Ph.D Thesis, ***The University of Strathclyde*** Glasgow, 48-63 (1997).
66. Shih, T.S., Chang, A.S., "Filling of A356 and gray iron in the epc process", ***AFS Transactions***, 105: 377-390 (1997).
67. Molibog, T., "Modeling of metal/pattern replacement in the lost foam casting process", PhD Thesis, ***The University of Alabama***, ALABAMA, 1-10 (2002).
68. Tinçer, T., Aras, L., "Polimerlerde mekanik özellikler ve karakterizasyonu", Temel ve Uygulamalı Polimer, Akovalı, G., ***TÜMKA***, Ankara, 306-373 (1984).
69. Askeland, R.D., "Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, Cilt 1", Erdoğan, M., ***Nobel yayın dağıtım***, 3.baskı, Ankara, 99-111 (1998).
70. Moosa, A.S.I., Mills, N.J., "Analysis of bend tests on polystyrene bead foams", ***Polymer Testing***, 17: 357-378 (1998).
71. Songa, B., Chena, W.W., Doua, S., Winfreeb, N.A., Kangb, J.H., "Strain-rate effects on elastic and early cell-collapse responses of a polystyrene foam" ***International Journal of Impact Engineering***, 31: 509-521 (2005).
72. Güven, O., "Polimerlerin bazı termal özellikleri", Temel ve Uygulamalı Polimer, Akovalı, G., ***TÜMKA***, Ankara, 374-393 (1984).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
 Soyadı, adı : YALÇIN, Necati
 Uyuşu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.03.1972 İskenderun
 Medeni hali : Evli
 Telefon : (312) 212 68 20
 Faks : 0 (312) 212 00 59
 e-mail : neyalcin@gazi.edu.tr

Eğitim	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Derece	Gazi Üniversitesi /	
Yüksek lisans	Metal Eğitimi Bölümü	1999
Lisans	Gazi Üniversitesi /	
	Metal Eğitimi Bölümü	1994
Lise	Endüstri Meslek Lisesi	1988

İş Deneyimi		
Yıl	Yer	Görev
1995-2006	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Çetinkaya, C., Yalçın, N., "Küresel grafitli dökme demirlerin ark kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin ve kaynak sonrası mekanik özelliklerinin incelenmesi", G.Ü.Fen Bil. Der., 2000.

2. Gül, F., Akar, N., Yalçın, N., "Döküm parçalarda inklizyonların giderilmesinde bilyalı filtrelerin etkisi", 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İ419-426, 2000.

3. Gül, F., Akar, N., Hasırcı, H., Yalçın, N., "Bilyalı filtrelerle yapılan metal filtrasyonu işleminin KGDD'lerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi", Politeknik Dergisi, 4, 53-57, 2002.

Hobiler

Kitap okuma, Bilgisayar teknolojileri, Voleybol