

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN POLİPROPİLEN ESASLI İÇ TRİM
PARÇALARININ KİMYASAL KÖPÜK YAPICI KATKI KULLANILARAK ENJEKSİYON
KALIPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedef ÇAKIR

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Akın AKINCI

Haziran 2021

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN POLİPROPİLEN ESASLI İÇ TRİM
PARÇALARININ KİMYASAL KÖPÜK YAPICI KATKI KULLANILARAK ENJEKSİYON
KALIPLAMA YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sedef ÇAKIR

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 08/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Sedef ÇAKIR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam, Sn. Prof. Dr. Akın AKINCI' ya teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımda fikirleri ile yol gösteren Sn. Doç. Dr. Murat ÖZSOY ve Sn. Dr. Öğr. Üyesi Neslihan ÖZSOY hocalarıma ve yüksek lisans eğitimim boyunca katkılarından dolayı Sn. Prof. Dr. Sefer Cem OKUMUŞ hocama teşekkür ederim. Çalışmalarımda malzeme üretimi için kapılarını açan Toyota Boshoku Türkiye A.Ş. adına Sn. İmalat Müh. Mert USTA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Sakarya Üniversitesi ve Toyota Boshoku Türkiye A.Ş. iş birliği çerçevesinde desteklenen “Termoplastik İç Trim Parçalarında Köpüklendirici Katkı Malzemeleri Kullanılarak Yeni Formül Geliştirilmesi, Parça Ağırlığı ile Enjeksiyon Çevrim Süresinin Azaltılması ve Parça Yüzeyi İyileştirilmesi” başlıklı 5190030 numaralı TÜBİTAK-TEYDEB 1505 projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda ilgili tüm kurumlara teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
POLİPROPİLEN POLİMERİ VE KÖPÜK KATKILAR.....	7
2.1. Polipropilen (PP).....	7
2.2. Köpük Katkıları.....	9
2.2.1. Fiziksel köpük katkısı (FKK).....	9
2.2.2. Kimyasal köpük katkısı (KKK).....	11
2.2.3. Sentaktik köpük katkısı (SKK)	11
BÖLÜM 3.	
POLİMER KÖPÜK OLUŞUMU.....	13
3.1. Polimer Köpük Oluşum Mekanizmaları	13
3.2. Enjeksiyon Kalıplama ile Köpük Üretimi	15
3.2.1. Polimer köpük üretiminde etkili parametreler	16
3.2.1.1. Köpük katkı miktarı.....	16
3.2.1.2. Ergiyik sıcaklığı.....	17
3.2.1.3. Kalıp sıcaklığı.....	18

3.2.1.4. Enjeksiyon hızı	18
3.2.1.5. Enjeksiyon geri basıncı	20
3.2.1.6. Ütölleme basıncı	20

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	21
4.1. Kullanılan Malzemeler	21
4.2. Numune Üretimi	21
4.3. Yoğunluk Deneyi	23
4.4. Mikroyapı Analizleri	25
4.4.1. Köpük hücre boyutu ölçümü	25
4.4.2. Hücre yoğunluğu ölçümü	26
4.4.3. Kabuk tabaka kalınlığı ölçümü	26
4.5. Mekanik Deneyler	26
4.5.1. Darbe deneyi	26
4.5.2. Çekme deneyi	27
4.5.3. Eğme deneyi	28
4.5.4. Sertlik deneyi	30
4.6. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi	30
4.7. FESEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi	31

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLAR	32
5.1. Yoğunluk Deney Sonuçları	32
5.2. Mikroyapı Analiz Sonuçları	33
5.3. Mekanik Deney Sonuçları	37
5.3.1. Darbe deney sonuçları	37
5.3.2. Çekme deney sonuçları	39
5.3.3. Eğme deney sonuçları	41
5.3.4. Sertlik deney sonuçları	43
5.4. DSC Analiz Sonuçları	44
5.5. FESEM Analiz Sonuçları	46

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİ.....	49
6.1. Sonuç.....	49
6.2. Öneri.....	50
 KAYNAKLAR.....	 51
ÖZGEÇMİŞ	57



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
A_0	: Numunenin kesit alanı, mm ²
b	: Numune genişliği, mm
CO ₂	: Karbondioksit
d	: Yoğunluk, g/cm ³
d_s	: Sıvının yoğunluğu, g/cm ³
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
E	: Elastik modül, MPa
$e_{üst}$	: Üst kabuk tabaka kalınlığı, µm
e_{alt}	: Alt kabuk tabaka kalınlığı, µm
$e_{çek}$	: Çekirdek bölge
FESEM	: Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu (Field Emission Scanning Electron Microscopy)
FKK	: Fiziksel köpük katkısı
h	: Numune kalınlığı, mm
L	: Mesnetler arası mesafe, mm
KKK	: Kimyasal köpük katkısı
l_0	: Numunenin ilk boyu, mm
l_s	: Numunenin son boyu, mm
m_A	: Numunenin havadaki ağırlığı, g
m_s	: Numunenin sıvıdaki ağırlığı, g
N ₂	: Nitrojen
PA	: Poliamid
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen tereftalat

PC	: Polikarbonat
PLA	: Polilaktik asit
PP	: Polipropilen
PS	: Polistiren
PTFE	: Politetrafloraetilen
PUR	: Poliüretan
PVC	: Polivinil Klorür
P_{ζ}	: Maksimum çekme yükü, N
P_{max}	: Maksimum eğme yükü, N
SiO ₂	: Silisyum dioksit
SKK	: Sentaktik köpük katkısı
skN ₂	: Süper kritik nitrojen
T _e	: Ergime sıcaklığı, °C
T _g	: Camsı geçiş sıcaklığı, °C
ε_i	: Birim uzama miktarı, mm/mm
σ	: Eğme mukavemeti, MPa
σ_{ζ}	: Çekme mukavemeti, MPa
σ_i	: Elastik sınır içerisindeki herhangi bir gerilme, N/mm ²
Δ_l	: Uzama miktarı, mm

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Otomobilde kullanılan malzemeler.....	1
Şekil 1.2. Otomobilde kullanılan polimer malzemeler	2
Şekil 2.1. Propilenin polimerizasyonu	7
Şekil 2.2. İzotaktik, sindiotaktik ve ataktik PP molekül yapısı.....	8
Şekil 2.3. Fiziksel köpük katkılı polimer köpük üretimi.....	10
Şekil 2.4. Cam kürelerin matris içerisinde dağılımı.....	12
Şekil 3.1. Polimer köpük oluşum mekanizmaları	14
Şekil 3.2. Enjeksiyon makinesinin şematik görünümü	15
Şekil 3.3. KKK içeriğine bağlı olarak ortalama hücre boyutu ve hücre yoğunluğundaki değişim	17
Şekil 3.4. Farklı ergiyik sıcaklıklarındaki hücre morfolojileri a) 160°C ve b)180°C	18
Şekil 3.5. Farklı hızlarda üretilen PP köpüklerin optik mikroskop görüntüsü a) 110 mm/s, b) 125 mm/s ve c) 140 mm/s.....	19
Şekil 3.6. Farklı enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklıklarında köpük yoğunluğundaki değişim	19
Şekil 4.1. Plastik enjeksiyon cihazı.....	22
Şekil 4.2. CH-R model aracın ön kapı paneli.....	22
Şekil 4.3. Yoğunluk ölçümü için kullanılan dijital terazi	24
Şekil 4.4. 3D optik mikroskop	25
Şekil 4.5. Çentikli Izod darbe deney numunesi	27
Şekil 4.6. Çekme deney numunesi	27
Şekil 4.7. Eğme deney numunesi	29
Şekil 4.8. Shore D sertlik ölçüm cihazı.....	30
Şekil 4.9. Diferansiyel taramalı kalorimetre uygulaması.....	31

Şekil 5.1. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yoğunluk sonuçları.....	32
Şekil 5.2. (A) %1 KKK, (B) %1,5 KKK ve (C) %2 KKK'lı PP köpük numunelerin köpük hücre dağılımı	33
Şekil 5.3. (A) %1 KKK, (B) %1,5 KKK ve (C) %2 KKK'lı PP köpük numunelerin kabuk tabaka kalınlığı dağılımı.....	35
Şekil 5.4. Ağırlıkça değişen KKK oranlarında ortalama köpük hücre boyutları ...	36
Şekil 5.5. Ağırlıkça değişen KKK oranlarında birim hacimdeki hücre yoğunluğu	37
Şekil 5.6. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çentikli Izod darbe deney sonuçları.....	38
Şekil 5.7. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin gerilme-birim uzama eğrileri ...	39
Şekil 5.8. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çekme mukavemet ve elastik modül değerleri	40
Şekil 5.9. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yük-deplasman eğrileri.....	41
Şekil 5.10. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin eğme mukavemeti ve eğme modülü değerleri	42
Şekil 5.11. Köpüksüz PP ve ağırlıkça değişen KKK içeriğine bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim.....	43
Şekil 5.12. Saf PP ve köpüksüz PP'nin endotermik termogram eğrileri	45
Şekil 5.13. Ağırlıkça değişen oranlarda KKK'lı numunelerin endotermik termogram eğrileri.....	45
Şekil 5.14. Köpüksüz PP'nin mikroyapı görüntüleri (100X ve 500X).....	46
Şekil 5.15. KKK'lı numunelerin mikroyapı görüntüleri A) %1 (100X-500X), B) %1,5 (100X-500X) ve C) %2 (100X-500X).....	47

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Homopolimer PP ve kopolimer PP karşılaştırması.....	9
Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan PP'nin teknik özellikleri	21
Tablo 4.2. Enjeksiyon kalıplama parametreleri	23
Tablo 5.1. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yoğunluk sonuçları.....	32
Tablo 5.2. KKK oranının köpük morfolojisi üzerindeki etkisi	36
Tablo 5.3. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çentikli Izod darbe test sonuçları	38
Tablo 5.4. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çekme deney sonuçları.....	40
Tablo 5.5. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin eğme test sonuçları.....	42
Tablo 5.6. Shore D sertlik deney sonuçları	44
Tablo 5.7. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin ergime sıcaklık değerleri.....	46

ÖZET

Anahtar kelimeler: Hücre morfolojisi, köpük katkı, polimer köpük, enjeksiyon kalıplama

Bu çalışmada, Toyota CH-R model aracın kapı panellerinin üretiminde kullanılan polipropilen (PP) malzemenin kimyasal köpük katkı kullanılarak hafifletilmesi amaçlanmış ve köpük yapıcı katkının fiziksel, termal ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. PP malzemeye ağırlıkça değişen oranlarda (%1, %1,5 ve %2) KKK ilavesi ile kesitinde köpük içeren PP malzeme elde edilmiştir. Ağırlıkça değişen köpük katkı ilavesi ile üretilen numunelerin köpük hücre boyutları, birim hacimdeki hücre yoğunluğu, kabuk tabaka kalınlığı gibi morfolojik özellikleri incelenmiştir. Köpük katkı oranına bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişim çekme, eğme, darbe ve sertlik testleri ile belirlenmiştir. Termal özelliklerini incelemek amacı ile diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda kapalı hücelere sahip PP köpük üretilmiştir. Köpük katkı miktarının artması ile parça yoğunluğunda düşme sağlanmıştır. Köpük hücre boyutları ve birim hacimdeki hücre yoğunluğu artış gösterirken kabuk tabaka kalınlığı azalmıştır. Köpük katkı miktarının mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde genel olarak köpük katkı miktarı arttıkça darbe mukavemeti, çekme mukavemeti ve eğme mukavemeti değerlerinde çok fazla değişim görülmemektedir.

PRODUCTION OF POLYPROPYLENE BASED INTERIOR TRIM PARTS USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY BY USING CHEMICAL FOAMING ADDITIVE WITH INJECTION MOLDING METHOD AND DETERMINING THE FEATURES

SUMMARY

Keywords: Cell morphology, foaming additive, polymer foam, injection molding

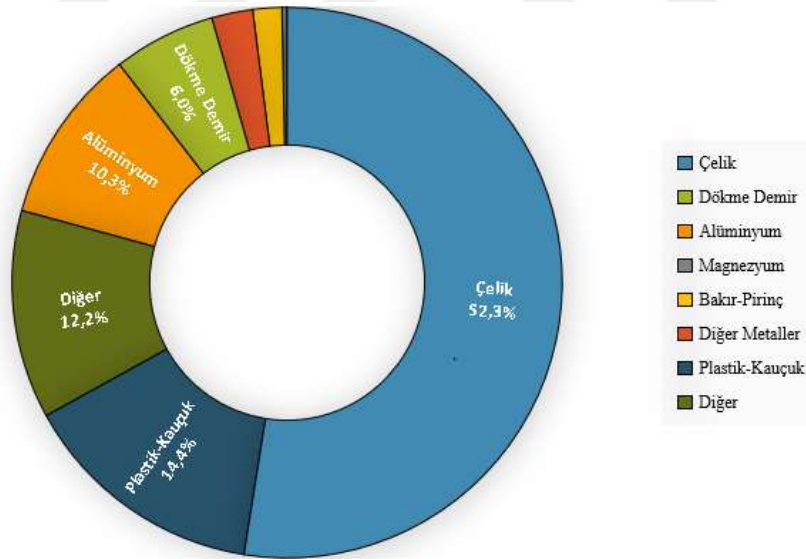
This study aimed to lighten the polypropylene material used in the production of door panels of Toyota CH-R model vehicle using chemical foaming additive (CFA), and the effect of foaming additive on physical, thermal, and mechanical properties was investigated. By adding CFA in varying ratios (1%, 1.5%, and 2%) to PP material, PP material containing foam in its cross-section was obtained. Morphological properties such as foam cell sizes, cell density per unit volume, and skin layer thickness of the samples produced with foaming additive varying in weight were investigated. Depending on the foaming additive ratio, the change in mechanical properties was determined by tensile, flexural, impact, and hardness tests. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis was carried out to examine its thermal properties.

As a result of the studies, PP foam with closed cells was produced. With the increase in the amount of foam additive, a decrease in the particle density was achieved. While foam cell sizes and cell density per unit volume increased, the skin layer thickness decreased. When the effect of foam additive amount on mechanical properties is examined, generally, as the amount of foam additive increases, there is not much change in impact strength, tensile strength, and flexural strength values.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi demir-çelik, metal, plastik, cam, petro-kimya, elektronik gibi sektörlerden ürün alıcısı konumunda iken tarım, turizm, ulaştırma, altyapı, savunma, inşaat gibi sektörlerin ihtiyaç duyduğu motorlu araçları tedarik etmektedir. Ekonomiye katkısı ve diğer sektörler arasında öncü olması sebebiyle de önemli bir yere sahiptir. Böylece otomotiv sektöründeki değişimler ekonomiyi yakından ilgilendirmektedir [1, 2].

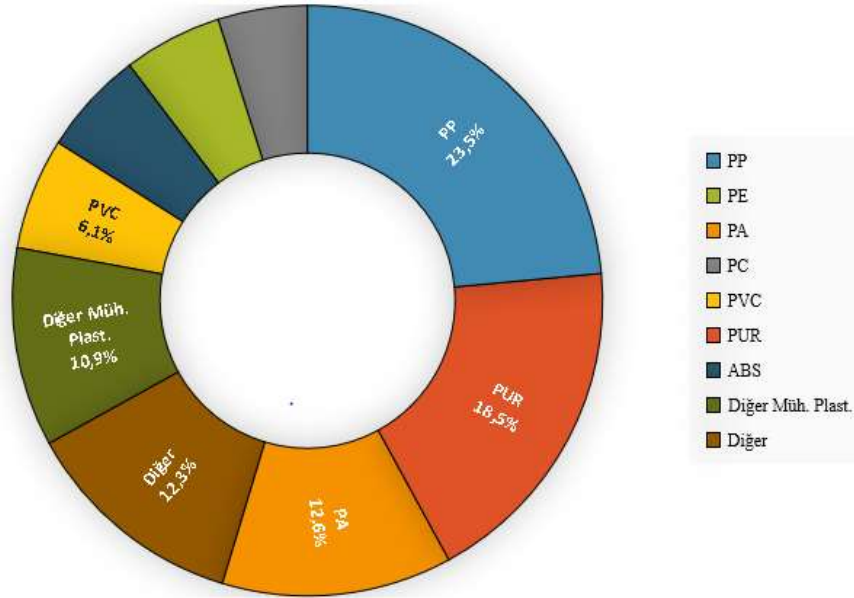
Şekil 1.1.'de 2019 yılında Kuzey Amerika'da yapılan bir çalışmaya göre otomobilde kullanılan başlıca malzeme grupları ve dağılımları verilmiştir [3].



Şekil 1.1. Otomobilde kullanılan malzemeler [3]

Bir otomobilde %52,3 ile en fazla çelik malzemeler yer alırken plastik-kauçuk malzemeler %14,4'lük bir oranla ikinci sırada yer almaktadır. Alüminyum ise üçüncü sırada yer alarak çelik ve plastikleri takip etmektedir.

Çelik ve alüminyumdan daha düşük yoğunluğa sahip olan polimerler ayrıca mukavemet/ağırlık oranlarının da daha yüksek olması, şekillendirmelerinin daha kolay olması gibi çok yönlü olmaları sebebiyle otomotiv sektöründe kullanım alanları artmaktadır [4]. Bir otomobilde PP, PE (polietilen), PA (poliamid) , ABS (akrilonitril – bütadien - stiren), PVC (polivinil klorür), PUR (poliüretan) ve PC (polikarbonat) en fazla kullanılan polimerlerdir. Bunlar; iç-dış süslemelerde, kontrol panelinde, koltuklarda, tamponlarda, yakıt sistemlerinde, elektrikli parçalarda ve ışıklandırma sistemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 1.2.'de Kuzey Amerika'da yapılan çalışmada 2019 yılı verilerine göre bir otomobilde kullanılan polimer hammadde oranları yer almaktadır. Grafik incelendiğinde %23,5 ile PP en fazla kullanılan polimerdir. PP'yi %18,5 ile PUR takip etmektedir [3].



Şekil 1.2. Otomobilde kullanılan polimer malzemeler [3]

Doğal hammadde kaynaklarının tüketilmesi sonucu hammadde maliyetlerindeki artış ve çevre bilincinin oluşmasına ek olarak rekabet üstünlüğü sağlama arzusu ile teknolojik özellikler sergileyen araçlar otomotiv sanayiinde talep oluşturmaktadır. Ancak gelişen teknoloji ile özel tasarımların yapılması ve ihtiyaçlar doğrultusunda yeni üretilen araçlara eklenmesi sonrasında otomobillerin ağırlığında artış

yaşanmaktadır. Aracın ağırlığının artması hem yakıt tüketiminin artmasına hem de CO₂ salınımının daha fazla artmasına neden olmaktadır ve bu durum beklentiler noktasında bir tezatlık oluşturmaktadır [1].

Hafifletme, enerji tasarrufu ve emisyon azaltımında önemli bir yere sahiptir. Bir aracın ağırlığının %10 azaltılması yakıt tüketiminin %5-7 oranında azalmasını sağlamaktadır. Böylece otomobillerin hafifletilmesine yönelik çalışmalara yer verilerek alternatif malzeme ve üretim teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Yüksek performans gösteren plastik malzemeler otomotiv sanayisinde önemli bir role sahiptir. Polimerik malzemelerin son yıllarda metal malzemelere göre araçlarda kullanımının artmasının nedeni düşük yoğunluğa sahip olması, daha ekonomik olması, işlevselliği ve yakıt tüketiminin azaltılmasını sağlıyor olmasıdır [5, 6].

Son yıllarda otomobil parçalarında hali hazırda kullanılan katkılı, katkısız polimerler ve polimer nanokompozitler yerine daha düşük yoğunluğa sahip katı bir polimerik matris ve köpük katkı ile üretilen gazlı faz olarak en az iki faz içeren hücresel veya genişlemiş plastikler olarak tanımlanan polimer köpükler kullanılmaktadır [7]. Düşük yoğunluk, üstün mukavemet/ağırlık oranı, enerji absorbe etme performansı, yalıtım kabiliyeti, üstün darbe mukavemeti gibi önemli özelliklerinden dolayı polimer köpüklere olan ilgi artarak kullanımı yaygınlaşmaktadır. Kullanılan polimer matris, polimer köpükler için ana bileşendir ve nihai malzemenin temel özelliklerini belirler. Polimerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, polimer köpüklerin işleme ve uygulama özelliklerini etkilemektedir [8].

Kimyasal köpük katkı (KKK) veya fiziksel köpük katkı (FKK) kullanılarak ticari olarak önem arz eden PP, PE, PVC, PS, PC, ABS ve PA gibi polimerler ile hemen hemen bütün termoplastiklere köpüklenme teknolojileri uygulanarak plastik köpük elde edilebilir [9]. İyi işlenebilirliği, iyi mekanik özellikleri, kolay geri dönüşüm, düşük yoğunluk ve düşük maliyeti gibi özellikleri sayesinde PP, yapısal, otomotiv ve ambalajlama uygulamalarında en yaygın kullanılan termoplastiklerden biridir. Ayrıca polistiren ve polietilen gibi yaygın olarak kullanılan diğer polimerlere kıyasla daha

yüksek bir servis sıcaklığı sağlar [10]. Böylece PP ürünlerin hafifliği ve mekanik özellikleri maliyeti azaltmak için önem arz etmektedir.

Batch prosesi, enjeksiyon, ekstrüzyon ve sıkıştırma kalıplama gibi imalat yöntemleri kullanılarak plastik köpük üretimine yönelik yapılan çalışmalarda proses şartlarının yanı sıra kullanılan matris malzemesi, köpük katkı türü, miktarı ve ilave katkıların nihai ürün üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda yer almaktadır.

Chang ve ark. [11] PP köpüğün mekanik ve yüzey özellikleri üzerinde, KKK içeriğinin ve köpük enjeksiyon kalıplama parametrelerinin etkisini bulmak için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ağırlıkça %1, %3 %5, %7 ve %9 oranında KKK kullanılmış, kalıp sıcaklığı 30°C, soğutma süresi 30 s olarak ayarlanmıştır.

Unal ve Yetgin [12] ağırlıkça %1 ve %2 oranında KKK'yı PP'ye ilave ederek köpük katkı miktarının PP köpük malzemede köpük tabaka kalınlığına, hücre sayısına, hücreler arası mesafeye, ortalama hücre boyutuna ve köpük yoğunluğuna etkisini incelemişlerdir. Enjeksiyon işleminde kovan sıcaklığı 190-200°C arasında kademeli olarak artırılmıştır. Kalıp sıcaklığı 30-35°C, enjeksiyon hızı 25 mm/s ve enjeksiyon basıncı 90 bar'dır.

Wu ve ark. [5] KKK (azodikarbonamit) kullanarak çekirdek çekmeli (core back) yöntemle üretilen PP köpüklerin mekanik özelliklerini ve yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Kullanılan KKK ağırlıkça %7 oranındadır. Kalıp sıcaklığı 50°C, enjeksiyon hızı 105 mm/s ve enjeksiyon basıncı 90 MPa'dır.

Wang ve ark. [10] ağırlıkça %8 mikro talk ve ağırlıkça %3 nano talk takviyeli PP matrise ağırlıkça %0,3 FKK (N₂) ilave ederek PP/talk kompozit köpükleri elde etmişlerdir. Kullanılan mikro talk 6,5 µm boyutunda ve nano talk ise 350 nm'dir. Karıştırma işlemi gerçekleşmeden önce bütün malzemeler 140°C'de 4 saat kurutulmuştur. PP/talk kompozitleri oluşturmak amacıyla çift vidalı ekstrüderde mikro ve nano talk takviyeli PP kompozitleri karıştırılmış ve ardından kesme işlemi

sonrasında pelet forma getirilmiştir. Ergiyik sıcaklığı 180°C, kalıp sıcaklığı 170°C ve 50 cm³/s enjeksiyon hızında enjeksiyon kalıplama yapılarak PP/talk kompozit köpükleri oluşturulmuştur. Elde edilen kompozit köpükler ve PP köpük mukavemet, sertlik ve tokluk özellikleri açısından karşılaştırılmıştır.

Zhao ve ark. [13] PP köpüklerin mekanik özelliklerini artırmak amacı ile PP matrise ağırlıkça % 1 %3 ve %5 nano PTFE takviyeli PP/PTFE kompozit köpükler ile PP köpükler karşılaştırmışlardır. İlk olarak nano PTFE ve PP 4 saat 120°C’de kurutulmuş ve ardından çift vidalı ekstrüderde değişen PTFE oranlarında karıştırılmış ve kesme cihazında pelet haline getirilmiştir. Hazırlanan PP/PTFE kompozitleri KKK ile enjeksiyon makinesine beslenmiştir. Ağırlıkça %8 KKK kullanılmıştır. Kalıp sıcaklığı 50°C, ergiyik sıcaklığı 230°C, enjeksiyon hızı 40 cm³/s ve soğutma süresi 45 s olarak ayarlanmıştır.

Wang ve Chen [7] süper kritik nitrojen (skN₂) köpük katkı kullanarak enjeksiyon parametrelerinin PP köpük ve dokuma fiber takviyeli PP köpük kompozitleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Enjeksiyon sıcaklığının etkisini belirlemek için sabit 50 mm/s enjeksiyon hızında ve 200, 220, 240, 260°C sıcaklıklarda; enjeksiyon hızının etkisini görmek amacıyla sabit 220°C sıcaklıkta ve 40, 50, 70 ve 90 mm/s hızlarda deneyler gerçekleştirilmiştir.

Ameli ve ark. [14] %5 talk ve %5 kil takviyeli PLA kompozit köpüklerin kristalleşme ve köpüklenme davranışlarını incelemişlerdir. FKK olarak nitrojen (N₂) kullanılmıştır. Enjeksiyonla kalıplama öncesinde PLA 6 saat 65°C’de kurutulmuş ve sonrasında %5 talk/PLA ve %5 kil/PLA kompozitleri ekstrüderde oluşturulmuştur. Daha sonra ağırlıkça %0,6 oranında N₂ kullanılarak 170°C ergiyik sıcaklığında, 30°C kalıp sıcaklığında ve 400 rpm vida hızında enjeksiyon kalıplama ile kompozit köpükler elde edilmiştir.

Wang ve ark. [15] zayıf köpürme yeteneğine sahip PLA polimerine PET takviye ederek yüksek basınçlı mikro hücreli enjeksiyon kalıplama ile köpürme kabiliyetini, mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %10 PET kullanılmıştır. İlk aşamada

PLA 75°C’de 6 saat ve PET 135°C’de 8 saat kurutulmuş ve ardından 60-180°C arası artan ekstrüder sıcaklıklarında PLA/PET kompoziti elde edilmiştir. PLA/PET kompozit köpükleri hazırlamak için mikro hücreli enjeksiyon kalıplama ve yüksek basınçlı mikro hücreli enjeksiyon kalıplama kullanılmıştır. FKK olarak CO₂ ağırlıkça %6 oranında kullanılmıştır. Saf PLA da aynı enjeksiyon parametrelerinde üretilmiştir. Kullanılan enjeksiyon parametreleri; ergiyik sıcaklığı 190°C, kalıp sıcaklığı 45°C ve enjeksiyon hızı 60 cm³/s’dir.

Bu tez çalışmasında, otomotiv sanayisinde yaygın olarak kullanılan PP polimeri enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılarak endotermik bir KKK ile köpüklendirilmiştir. Çalışmada Toyota CH-R model aracın kapı paneli üretilerek gerekli testler gerçekleştirilmiştir. KKK, PP matrise ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 oranlarında ilave edilmiştir. Ayrıca nihai ürünü renklendirmek amacı ile hem köpüksüz parça üretiminde hem de PP köpük parça üretiminde matrise ağırlıkça %2 oranında renklendirici katkı da ilave edilmiştir. KKK’lı numuneler ile köpüksüz numuneler farklı enjeksiyon parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Silindir sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon geri basıncı, ütüleme basıncı ve ütüleme süresi olarak seçilen enjeksiyon proses parametreleri Bölüm 4’ de detaylı olarak açıklanmaktadır.

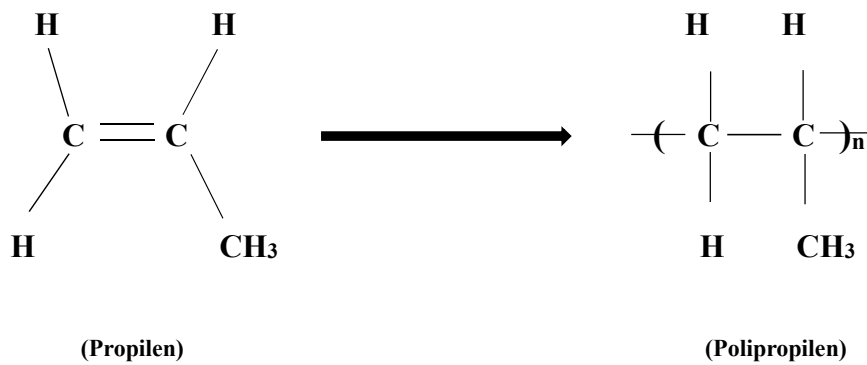
Optik mikroskop ile numunelerin kırık yüzeyleri incelenerek köpük hücrelerinin boyutları, toplam kabuk tabaka kalınlığı, birim hacimdeki hücre yoğunluğu Image J programı ile belirlenmiştir. Arşimet prensibine göre yoğunluk testleri gerçekleştirilmiştir. Darbe, çekme, eğme ve sertlik testleri ile mekanik özellikler incelenmiştir. DSC analizi ile ergime sıcaklıkları belirlenmiştir.

BÖLÜM 2. POLİPROPİLEN POLİMERİ VE KÖPÜK KATKILAR

2.1. Polipropilen (PP)

PP, iyi mekanik özellikleri, düşük ısı genleşme katsayısı, düşük özgül ağırlığı, daha iyi kimyasal direnci ve kolay işlenebilirliği nedeniyle otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan plastiklerden biridir [16].

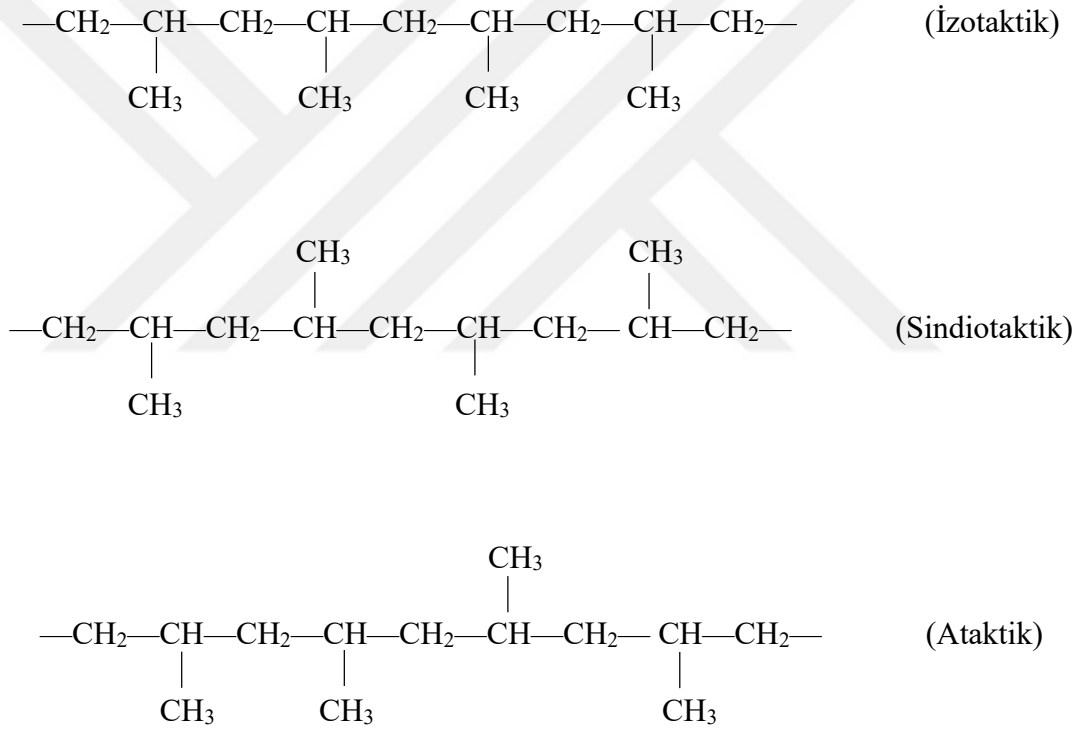
Ticari bir termoplastik olan ortalama 0,90-0,91 g/cm³ yoğunluğa sahip PP (CH₂=CH-CH₃), 1950'li yıllarda Karl Ziegler ve Giulio Natta tarafından propilenin (C₃H₇) polimerizasyonu ile elde edilmiştir. Ayrıca PP yarı kristalin yapıya sahip termoplastik bir malzemedir. Polimerizasyon bu iki araştırmacının adıyla anılan Ziegler-Natta katalizörleriyle gerçekleştirilmiştir. TiCl₃ katalizörünün etkisiyle aradaki çift bağ ayrılır ve uçlara —CH₃ ve —H radikalleri bağlanarak Şekil 2.1.'deki gibi PP oluşur [17].



Şekil 2.1. Propilenin polimerizasyonu [18]

Polimerler, polimer zincirindeki karbon atomlarının uzaysal konumlarının dağılımını gösteren stereo düzenlerine göre üçe ayrılmaktadır. Polimerlerin zincir yapıları,

polimerin kristalinitesini ve T_g 'yi (camsı geçiş sıcaklığı) etkilemektedir. PP zincirindeki metil gruplarının aynı yönde dizilmesiyle “izotaktik PP”, simetrik olarak dizildiklerinde “sindiotaktik PP” ve rastgele dizildiklerinde de “ataktik PP” olarak isimlendirilmektedir [19, 20]. Şekil 2.2.’de izotaktik, sindiotaktik ve ataktik PP yapısı yer almaktadır. İzotaktik PP’deki gibi metil gruplarının düzenli oluşu kristaliniteyi artırır ve böylece sindiotaktik ve ataktik yapıya göre daha iyi mekanik özellikler görülür. İzotaktik ve sindiotaktik PP yarı kristalin, ataktik PP amorf özellik göstermektedir [17].



Şekil 2.2. İzotaktik, sindiotaktik ve ataktik PP molekül yapısı [21]

Polimerler, kimyasal yapı dikkate alındığında homopolimer ve kopolimer olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır. Aynı monomer biriminin tekrarlanmasıyla oluşan polimere homopolimer denilmektedir. Homopolimer PP (PP-H) yüksek camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahiptir ve daha rijittir, düşük sıcaklıklarda ise düşük darbe mukavemeti sergiler. İki farklı monomerin birleşmesinden oluşan polimere ise

kopolimer denilmektedir. PP'ye çeşitli özellikler kazandırmak amacıyla kopolimerize yapılır [22, 23]. Tablo 2.1.'de GRANTA-CES Selector 2016 yazılım programı kullanılarak homopolimer PP ve kopolimer PP'nin özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.1. Homopolimer PP ve kopolimer PP karşılaştırması

	Homopolimer	Kopolimer
Ergime Sıcaklığı (°C)	160-170	140-150
Elastik Modül (GPa)	1,37-1,58	0,824-1,02
Çekme Mukavemeti (MPa)	22,5-33,5	16,8-21,3
Eğme Modülü (GPa)	1,33-1,61	0,824-1,02
Eğme Mukavemeti (MPa)	34,4-51,4	31,6-37,5
Sertlik (Shore D)	64,4-69,3	59,1-65,8
Yoğunluk (kg/m ³)	898-908	895-909

2.2. Köpük Katkıları

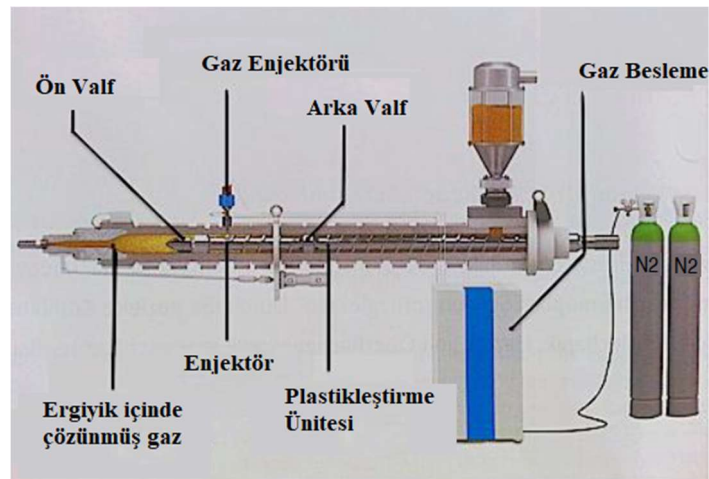
Polimer köpüklerde köpük yapısını oluşturmak amacıyla kullanılan organik veya inorganik malzemeler köpük katkı olarak tanımlanmaktadır. Nihai polimer köpük malzemede kullanılan köpük katkının kalitesi, doğası ve miktarı istenen özelliklere sahip köpüklü yapının elde edilmesi için önem arz etmektedir [24]. Köpük katkı kullanmakla malzeme tasarrufu ve ağırlıkta azalmanın yanında üstün dielektrik özellikler, daha iyi termal ve akustik yalıtımı da gerçekleşmektedir [10]. Polimer köpük üretiminde fiziksel, kimyasal ve sentaktik olmak üzere üç tip köpük katkı kullanılmaktadır.

2.2.1. Fiziksel köpük katkısı (FKK)

FKK'lar, işlem koşullarında buharlaşan düşük kaynama noktalı sıvılar ve inert gazlar olarak sınıflandırılmaktadır [25]. Ergiyik polimer içerisinde uçucu gaza dönüşebilme özelliğine sahip düşük kaynama noktalı sıvılar, oda sıcaklığında ve standart atmosfer basıncında gaz halindedir ve 110°C'nin altında kaynama sıcaklığına sahiptir. Ergiyik polimerde ısı ve basınçta meydana gelen azalma ile gaza dönüştükten sonra

buharlaşarak köpük yapı oluşur. Klor-flor-karbonlar (CFCs), hidro-klor-flor-karbonlar (HCFCs), hidro-flor-karbonlar (HFCs) gaza dönüşebilen sıvılardır [8, 26].

Köpükleme işleminde kullanılan inert gazlar ise zayıf kimyasal aktiviteye sahip karbondioksit (CO_2), nitrojen (N_2) vb. gazlardır. Karbondioksit, diğer atmosferik gazlardan çok daha yüksek çözünürlüğe sahip olması, ucuz olması ve çevreye zararı olmaması nedeniyle yaygın kullanılan bir gazdır. Azot, FKK olarak kullanılan ikinci en popüler atmosferik gazdır. Hava, hidrojen, oksijen, helyum ve argon gibi diğer inert gazlar tercih edilmemektedir. Hidrojen patlayıcılık özelliği sebebiyle tehlikeli iken hava ise oksijen sebebiyle tercih edilmez çünkü polimerlere ergiyik sıcaklığında zararlı etki yapmaktadır [25, 26]. Klor ve flor esaslı FKK'lar zararlı çevresel etkilerinden dolayı kullanımı kısıtlı ve yasaklanmıştır. Maliyet, ozon hasarı ve yanıcılık gibi olumsuz etkilerin bulunmaması sebebiyle CO_2 ve N_2 daha çok tercih edilmektedir. Ancak FKK kullanımıyla polimerik köpükler üretmek için ek aksesuarlar gerekmektedir ve bu durum maliyet artışına neden olmaktadır [27]. Ayrıca nihai ürün yüzeyinde görülen gaz izleri yüzey kalitesini bozması sebebiyle yüzey görünümünün önemli olduğu alanlarda kullanımını kısıtlayarak bir diğer dezavantajı ortaya çıkarmaktadır [15]. Şekil 2.3.'te FKK kullanımı ile polimer köpük üretiminin şematik görünümü yer almaktadır [27].



Şekil 2.3. Fiziksel köpük katkı polimer köpük üretimi [27]

2.2.2. Kimyasal köpük katkısı (KKK)

Termal ayrışma reaksiyonları ile yapıdaki gazın serbest halde kalması sonrasında karbondioksit ve azot gibi gazların açığa çıktığı toz ya da granül formunda bulunan organik ve inorganik katı maddelere KKK denilmektedir [28]. Termal ayrışma sıcaklığın artması ile gerçekleşmektedir. Gerekli olan sıcaklık da enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama proseslerindeki ısıtıcılar ile elde edilmektedir [29].

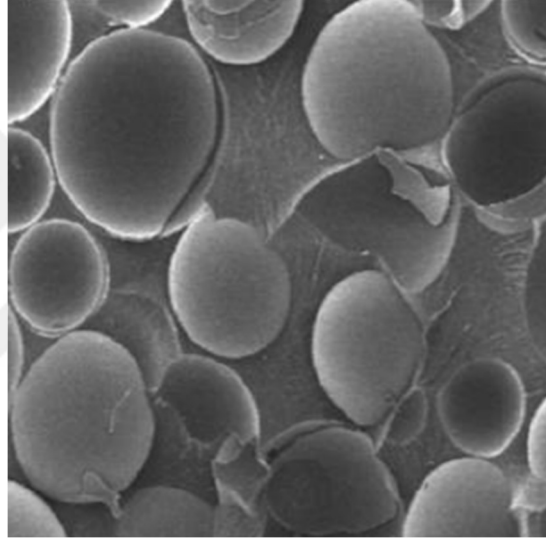
KKK'lar reaksiyon entalpilerine göre endotermik, ekzotermik ve bu ikisinin kombinasyonundan oluşan köpük yapıcılar olarak gruplandırılmaktadır [30]. Endo/ekzo KKK yüksek gaz miktarı ve küçük hücre boyutu elde edilmesi gibi avantajları sebebiyle kullanımları yaygınlaşmaktadır. Endotermik kısım çevrim süresini azaltırken, ekzotermik kısmı ise elastomer gibi yüksek uzama kapasitesine sahip malzemelerin köpüklendirilmesi için önem arz etmektedir. Azodikarbonamit ($\text{H}_2\text{N-OC-N=N-CO-N}_2\text{H}$) en yaygın kullanılan KKK'lardan biridir [26].

Çok pahalı olması KKK'lar için bir dezavantaj oluştursa da kullanılacak makinede ek aksesuar ve özel bir depolama ekipmanı gerekli olmadığından KKK'ların kullanımı FKK'lara göre üretim maliyetlerini azaltmaktadır [28].

2.2.3. Sentaktik köpük katkısı (SKK)

Sentaktik köpükler, polimer matris içerisinde dağılmış polimer, seramik ve metalik içi boş mikro kürelerden veya mikro balonlardan oluşan düşük yoğunluklu malzemelerdir. Cam, alümina, magnezyum oksit gibi içi boş küre katıların polimer matris ile mekanik olarak karıştırılması sonucunda plastik köpük üretimi gerçekleştirilmektedir [31]. Bu tip plastik köpüklere düşük yoğunlukları, yüksek mekanik mukavemetleri ve mükemmel performansları nedeniyle büyük ilgi görülmektedir. İçi boş mikro küreler, matrise kıyasla daha düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca yoğunluk ayarlayıcı görevi görmektedir. İçi boş dolgu parçacıklarının miktarını değiştirerek, farklı yoğunluklarda köpük mikro yapıları oluşturulabilmektedir [32].

Saf halde bulunan kristalleşmiş silisyum dioksit (SiO_2) çeşitlerine cam küre denilmektedir. Cam küreler; maliyeti düşürmek ve kalıpta çekmeyi azaltmanın yanı sıra termoplastik malzemelerde çekme ve basma mukavemetini, elastikiyeti ve kimyasal direnci artırmak için de kullanılmaktadır [33]. Cam mikro balonların çapı 1-350 μm arasında yer almaktadır. Seramik mikro balonlar, cam mikro balonlara göre daha yüksek sıcaklıklara dayanırken, polimerik mikro balonlar ise cam veya seramiklere göre daha düşük yoğunluk ve daha düşük mekanik özellikler göstermektedir [34]. Şekil 2.4.'te cam kürelerin matris içerisinde dağılımı görülmektedir [33].



Şekil 2.4. Cam kürelerin matris içerisinde dağılımı [33]

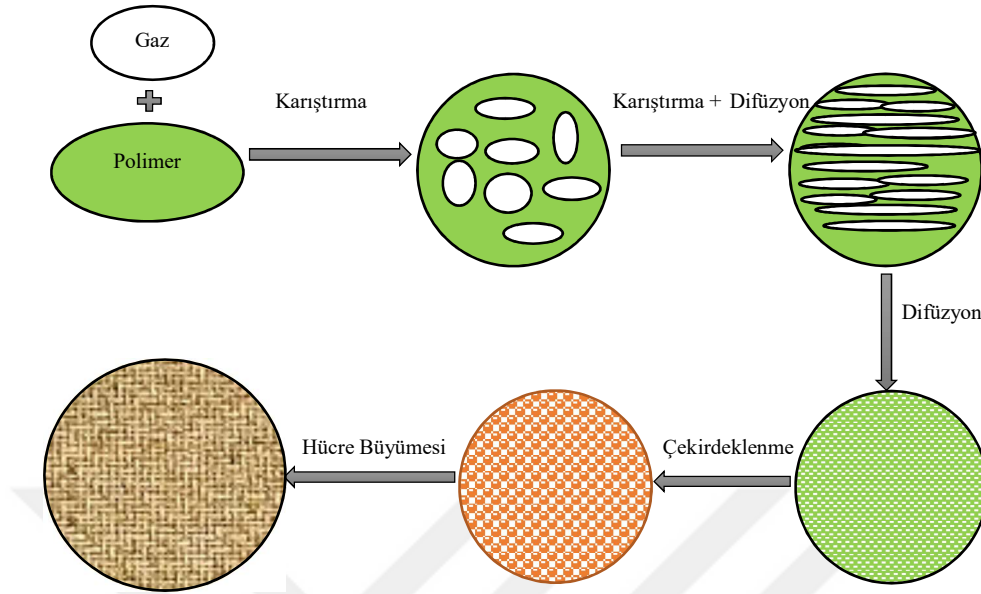
BÖLÜM 3. POLİMER KÖPÜK OLUŞUMU

3.1. Polimer Köpük Oluşum Mekanizmaları

Bir polimerik köpük, polimer matrisi, hücresel yapı ve gaz bileşimi tarafından yönetilen benzersiz fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahiptir. Gaz halindeki bir faz polimerik bir matris içinde küresel bir formda dağıldığında, bir kompozit yapı oluşmakta ve bu kompozitin özellikleri, bileşenleri ve bunların dağılımları tarafından belirlenmektedir [24].

Köpürme yapısı ve özellikleri, hücre tipleri (açık hücre veya kapalı hücre), hücre boyutları, hücre boyutlarının dağılımı, hücre yoğunluğu, köpürme işlemi parametreleri, polimerlerin moleküler yapısı ve malzeme bileşimleri ile belirlenmektedir. Temel bir köpürme işlemi dört aşamadır. (i) polimer matris malzemesinin ve köpük katkının karıştırılması, (ii) sonrasında hücrelerin çekirdeklenmesi, (iii) hücrelerin büyümesi ve (iv) hücre kararlılığıdır [24, 35].

FKK veya KKK düşük sıcaklık ve basınçta polimer matris ile karıştırılarak yüksek sıcaklık ve basınç altında polimer zincirinin ve köpük katkı moleküllerinin hareketi artmaktadır. Köpük katkı konsantrasyonunun artmasıyla polimer zincirlere köpük katkının difüzyon hızı artmaktadır ve homojen polimer/gaz çözeltisi elde edilmektedir. Çözelti aşırı doygun hale geldiğinde değişen sıcaklık, basınç ve gaz içeriği ile çekirdeklenme ve hücre büyümesi meydana gelmektedir [29]. Polimer köpük oluşum mekanizması Şekil 3.1.'de yer almaktadır.

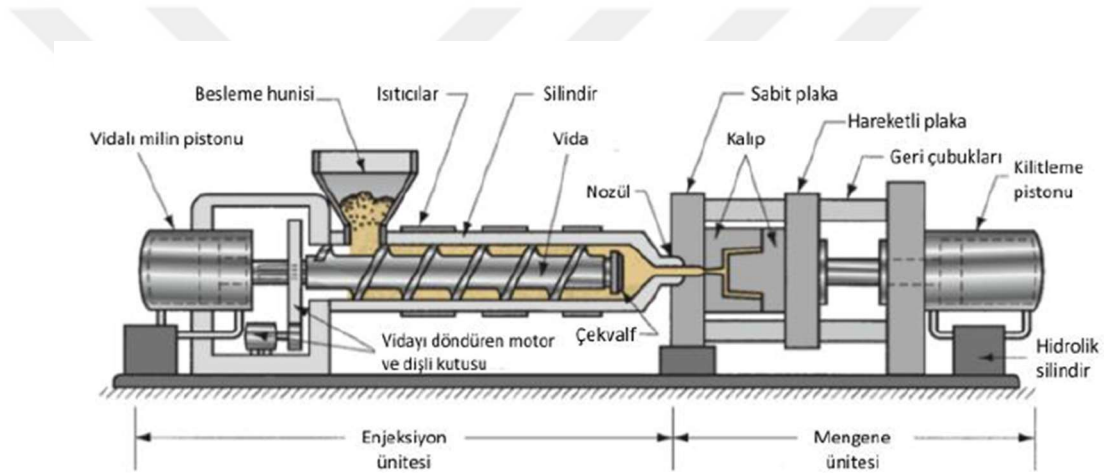


Şekil 3.1. Polimer köpük oluşum mekanizmaları [29]

Köpük hücrelerinin yoğunluğu, dağılımı ve boyutu nihai ürünün kalitesini belirlemektedir. Bu sebeple homojen köpük yapısının oluşumu, köpük katkının üniform dağılımı ve hücrelerin küçük olması önemlidir. Köpük hücreleri, gaz kabarcıklarının genişlemesi ve birleşmesiyle büyümektedir. Gaz kabarcıklarının genişlemesi için gerekli olan itici güç, iç gaz basıncıdır. Basınç, gaz kabarcığının çapı ile ters orantılıdır; çap ne kadar küçükse basınç da o derece yüksektir. Ergiyik polimerin viskozitesi ve yüzey gerilimi ne kadar yüksekse kabarcıkların genişlemesi de engellenmektedir. Yüksek ergiyik viskozitesinde, ilk kabarcık genişleme hızı o kadar düşük ve gaz kabarcık boyutu da o kadar küçük olmaktadır. Difüzyon katsayısının artması sonrasında köpük hücrelerinin genişlemesi hızlanmakta ve ergiyik polimerde çekirdeklenmiş hücrelere gaz difüzyonunun devam etmesi ile yapıdaki gaz çözünürlüğü azalana kadar hücre büyümesi devam etmektedir. Çözünen gaz tükendiğinde veya matris daha fazla büyümeye izin vermediğinde hücre büyümesi tamamlanmaktadır [8, 29].

3.2. Enjeksiyon Kalıplama ile Köpük Üretimi

Enjeksiyon yönteminde granül halindeki polimer hammadde besleme hunisi vasıtasıyla enjeksiyon vidası ile silindire geçmektedir. Burada rezistanslar aracılığıyla ısıtılıp yumuşama başlamakta ve sonrasında granüller ergiyik forma geçmektedir. Daha sonra ergiyik fazdaki polimer yüksek basınçta kalıp boşluğuna enjekte edilmesi ile katılaşp kalıbın şeklini alarak ürün elde edilmektedir [36]. Enjeksiyon kalıplamanın seri üretime uygun olması, karmaşık geometri parçaların üretiminin kolaylığı, parça maliyetinin düşük olması gibi avantajları bulunmaktadır [37]. Şekil 3.2.'de enjeksiyon makinesinin şematik görünümü yer almaktadır [38].



Şekil 3.2. Enjeksiyon makinesinin şematik görünümü [38]

Köpük enjeksiyon kalıplama işleminde homojen ergiyik/gaz karışımı kalıp boşluğuna enjekte edilerek polimerin genişmesiyle şekillendirme sonrası köpük yapı oluşur ve hafif polimer köpükler elde edilmektedir [39]. Enjeksiyonla köpük kalıplama ile parçalarda hafiflik, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, hızlı çevrim süresi ile kısa üretim döngüsü ve boyutsal kararlılık gibi avantajlar sağlayarak istenilen geometrik ölçülerde parçalar üretmek mümkündür [5, 40, 41].

Köpük enjeksiyon kalıplama prosesinde kullanılan köpük katkı cinsine göre makine tasarımında ilave ekipmanlar gerekli olmaktadır. FKK kullanıldığında ek ekipmanlara gerek duyulurken KKK kullanılması ile bu ekipmanlara ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Ayrıca köpük hücrelerinin çekirdeklenme mekanizması enjeksiyon işleminin türüne

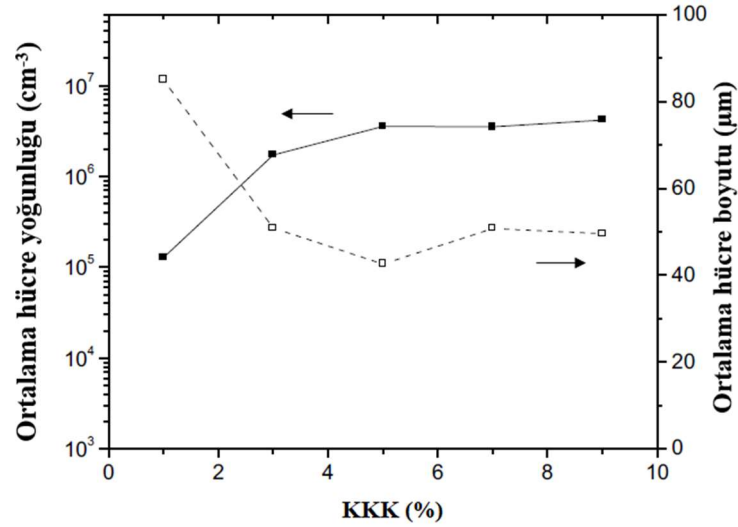
(düşük basınçlı ve yüksek basınçlı köpük enjeksiyon), köpük katkı türüne ve miktarına bağlı olmakla beraber ergiyik sıcaklığı, enjeksiyon hızı, enjeksiyon basıncı, kalıp sıcaklığı ve vida adımı gibi enjeksiyon proses parametreleri plastik köpüklerin hücre yapısını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir [39].

3.2.1. Polimer köpük üretiminde etkili parametreler

Yapmış olduğum tez çalışmasında enjeksiyon kalıplama ile KKK kullanılarak PP köpürtülmüş orta tabakaya sahip malzeme üretimi için köpük hücre morfolojisini ve mekanik özellikleri etkileyen önemli parametreler aşağıda açıklanmaktadır.

3.2.1.1. Köpük katkı miktarı

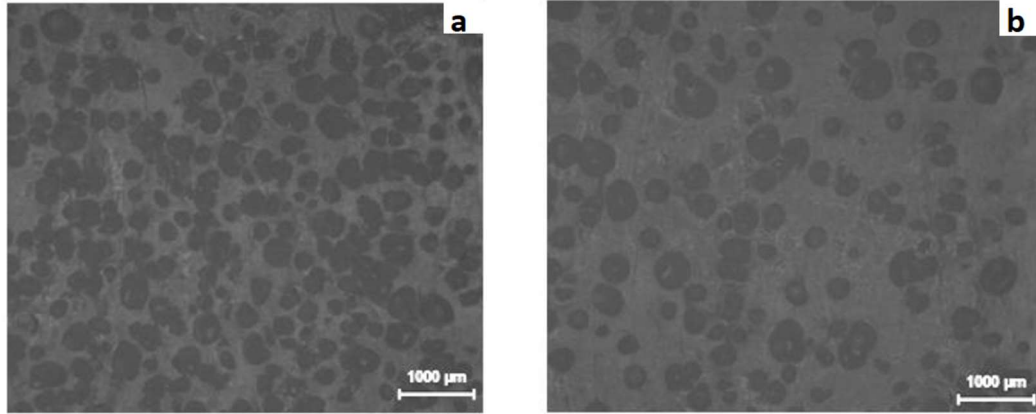
Köpük katkı miktarının kontrolü ile hücre morfolojiyi kontrol etmek mümkündür. Enjeksiyon işleminde ergiyik polimerin kalıp boşluğuna geçmesi ve köpük hücrelerinin çekirdeklenmesi sonrası hücrelerin ihtiyacı kadar gazın difüze olması ile hücrelerin büyümesi devam etmektedir. Köpük katkı miktarı arttığında ve hücrelerin büyümesi tamamlandığında hücre birleşmeleri veya hücre çökmeleri oluşmaktadır. Fazla miktardaki köpük katkı hücre birleşmesine sebep olabilmekte, sayıca az ve büyük hücre oluşumunu da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle köpük katkı miktarı dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir [42, 43]. Köpük katkının cinsi ve konsantrasyonu köpüğün hücre morfolojisini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Köpük katkı konsantrasyonu değiştikçe, ortalama hücre büyüklüğü ve köpük hücre yoğunluğu değişmektedir [44]. Şekil 3.3. KKK içeriğinin artması ile hücre yoğunluğu artış gösteriyorken, hücre boyutunda azalma olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.3. KKK içeriğine bağlı olarak ortalama hücre boyutu ve hücre yoğunluğundaki değişim [11]

3.2.1.2. Ergiyik sıcaklığı

Hücrelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi üzerinde önemli bir faktördür. Çekirdeklenme sonrası hücrelerin genleşmesi devam etmektedir ve bir süre sonra birbirleri ile temas etmektedir. Büyüme arttığında hücre kenarları temas ederek polyhedron şekli oluşmaktadır. Daha sonra birçok hücre birleşerek büyüme düzensiz şekil oluşumu meydana gelmektedir. Ergiyik sıcaklığı, optimum ergiyik viskozitesi ve köpük katkının tamamen bozunması için yeteri kadar yüksek olmalıdır [45]. Optimum değerden daha yüksek ergiyik sıcaklıklarında hücre boyutu büyük olan yapılar elde edilmektedir [43]. Şekil 3.4.'te iki farklı ergiyik sıcaklığında elde edilen mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Ergiyik sıcaklığı 160°C'den 180°C'ye çıktığında köpük hücrelerinin boyutlarında artış olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. Farklı ergiyik sıcaklıklarındaki hücre morfolojileri a) 160°C ve b)180°C [46]

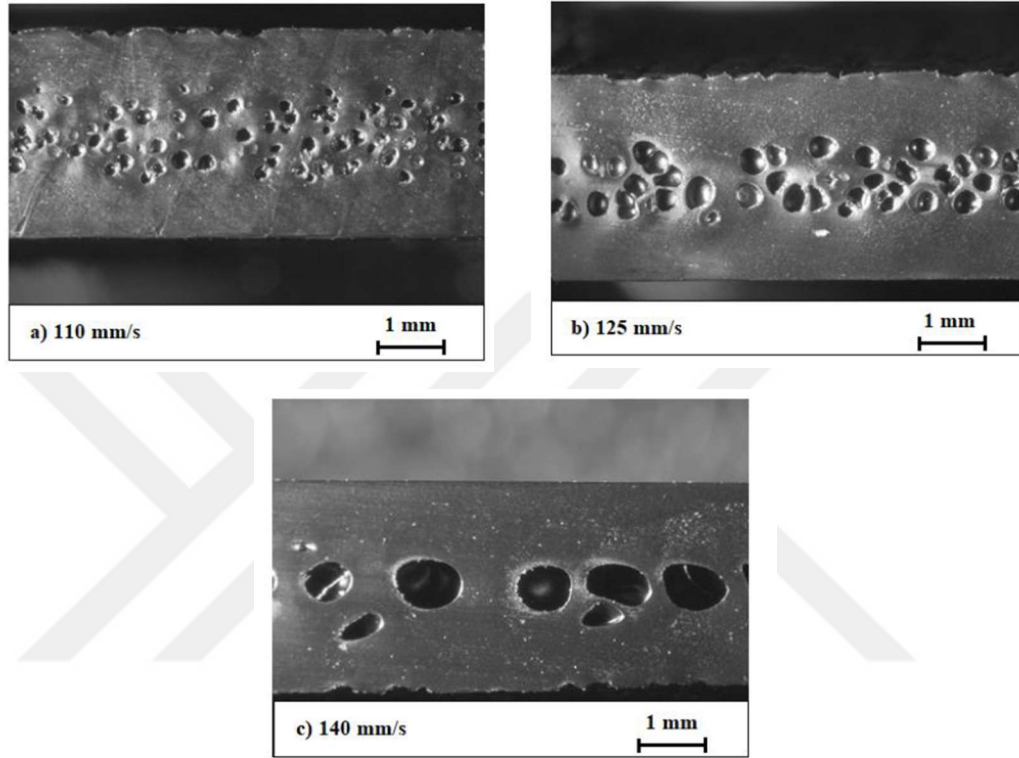
3.2.1.3. Kalıp sıcaklığı

Kalıp sıcaklığı, oluşan köpük hücrelerinin büyüklüğü ve miktarı üzerinde rol oynamaktadır. Yüksek kalıp sıcaklıklarında düşük ergiyik viskozitesi sebebiyle hücre büyümesi ve genişmesine imkân verilmektedir. Ayrıca hücreler küresel formda olmaktadır. Yüksek kalıp sıcaklığında düşük ısı transfer hızı nedeniyle daha ince kabuk tabakalı yapı elde edilmektedir. Düşük kalıp sıcaklıklarında sıcaklık farkının artması nedeniyle kalıp yüzeyi ile temas eden polimer hızlı bir şekilde katılaşmaktadır. Böylece hücre büyümesine izin verilmeyerek kalın kabuk tabakası elde edilmektedir [47, 48].

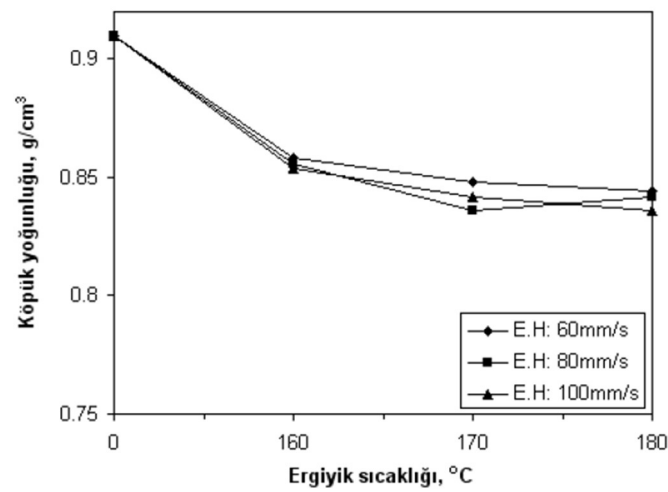
3.2.1.4. Enjeksiyon hızı

Enjeksiyon hızı ile ergiyik polimerin kalıbı hangi hızla dolduracağı belirlenmektedir. Enjeksiyon işlemi boyunca basınçtaki ani azalma ile ergiyik polimerdeki termodinamik kararsızlık sonucu hücreler çekirdeklenmekte ve hücre büyümesi meydana gelmektedir. Enjeksiyon hızı ile hücre çekirdeklenme oranı kontrol edilmektedir. Yüksek enjeksiyon hızında sıcak ergiyip polimer kalıbı yüksek hızda doldurmakta ve ilk enjeksiyon ile son enjeksiyon arasındaki reçinenin soğuma farkı oluşmamaktadır [29]. Düşük enjeksiyon hızında ergiyik polimer erken katılaşarak kalıbın dolması tamamlanamamakla beraber köpük yapı oluşamamaktadır [49]. Optimum değerin üzerinde gerçekleşen enjeksiyon hızlarında büyük köpük hücreleri elde edilmektedir. Şekil 3.5.'te farklı enjeksiyon hızlarında gözlemlenen optik

mikroskop görüntüleri incelendiğinde enjeksiyon hızının 100 mm/s'den 125 mm/s ve 140 mm/s hıza geçildiğinde köpük hücre boyutlarının arttığı görülmektedir. Şekil 3.6. ise farklı enjeksiyon hızlarında ve farklı ergiyik sıcaklıklarında köpük yoğunluğundaki değişimi göstermektedir.



Şekil 3.5. Farklı hızlarda üretilen PP köpüklerin optik mikroskop görüntüsü a) 110 mm/s, b) 125 mm/s ve c) 140 mm/s [50]



Şekil 3.6. Farklı enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklıklarında köpük yoğunluğundaki değişim [46]

3.2.1.5. Enjeksiyon geri basıncı

Enjeksiyon vidası her işlem öncesi geri gelmektedir ve bu esnasında enjeksiyon haznesine alınan granül formundaki polimerler ergimeye başlayarak vidanın önüne akmakta ve baskı öncesinde polimer/KKK karışımı vida tarafından belirli bir basınç altında tutulmaktadır. Standart enjeksiyon kalıplamadan farklı olarak vida içerisinde köpük hücrelerinin oluşmaması için enjeksiyon geri basıncının yüksek olması gerekmektedir [48].

3.2.1.6. Ütüleme basıncı

Standart enjeksiyon kalıplamada kalıp boşluğuna dolan ergiyik polimer soğurken çekmeye başlamaktadır. Böylece ütüleme (tutma) basıncı uygulanarak çekmeye bağlı oluşan boşluklar doldurulmaktadır. Ayrıca ütüleme basıncı parça geometrisine, boyutuna ve eriyiğin akışkanlığına bağlı olarak değişmektedir. KKK'lı proseslerde gazın genleşmesi için gerekli boşluğun olması amacı ile ütüleme basıncı düşük değerlerde olmalıdır. Çekmeye bağlı oluşan boşluklar köpük hücrelerinin oluşması ile kapatılır [48, 49].

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında matris polimeri olarak otomotiv uygulamalarında kullanılan TOTAL firmasından temin edilen PP kullanılmıştır. PP'nin ergime akış indeksi 25g/10dk (230°C/2.16kg) ve yoğunluğu ise 0,905 g/cm³'tür. Deneysel çalışmada kullanılan PP'ye ait üretici firma tarafından alınan teknik özellikleri Tablo 4.1.'de yer almaktadır.

Polimer köpük üretiminde Clariant Türkiye firmasından temin edilen endotermik bir KKK olan Hydrocerol ITP 822 kullanılmıştır. Kullanılan köpük katkı %20 etkin bileşene sahiptir. 230°C dekompozisyon sıcaklığıdır.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan PP'nin teknik özellikleri

Teknik Özellikler	PP
MFI (g/10dk)	25
Yoğunluk (g/cm ³)	0,905
Ergime sıcaklığı (°C)	165
Çekme modülü (MPa)	1050
Eğme modülü (MPa)	1050

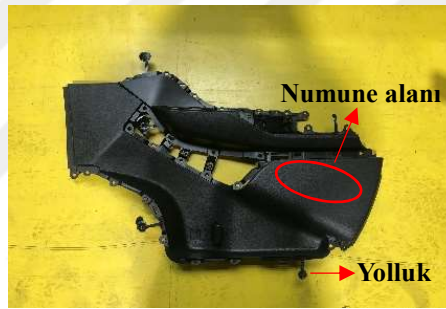
4.2. Numune Üretimi

Şekil 4.1.'de yer alan 1700T Engel marka plastik enjeksiyon cihazı ile Toyota CH-R model araca ait ön kapı paneli üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2.). Şekil 4.2.'de işaretli kısımlardan deney numuneleri CNC yardımı ile çıkarılmıştır.

Enjeksiyon makinesinde kalıp malzemesi olarak DIN 2738 plastik kalıp çeliği kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Plastik enjeksiyon cihazı



Şekil 4.2. CH-R model aracın ön kapı paneli

Köpüksüz PP (seri üretim parçası) ve köpüklü PP üretmek için kullanılan enjeksiyon parametreleri Tablo 4.2.'de yer almaktadır. Numune üretimleri öncesinde PP hammadde 100°C'de 2 saat kurutulmuştur. Köpüksüz ve köpük katkılı numunelerde ağırlıkça %2 masterbatch bulunmaktadır. PP köpük üretiminde ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 KKK kullanılmıştır. Kullanılan köpük katkının besleme bölgesinde erken gaz oluşumunun önüne geçmek amacı ile köpüksüz üretilen numunelere göre daha düşük sıcaklıkta (160°C) başlanmıştır. Gaz veriminin artması sebebi ile silindir ortası sıcaklık 230°C'dir. Matris içerisindeki gazın erken genleşmesini önlemek amacı ile köpüksüz PP'ye göre daha yüksek (80 mm/s) enjeksiyon hızı kullanılmıştır. Köpük hücrelerinin vida içerisinde oluşumunun önüne geçebilmek için enjeksiyon geri basıncı köpük PP üretiminde 0 bar'dan 10 bar'a çıkarılmıştır. Polimer köpük üretiminde köpük

hücrelerinin genleşmesi için gerekli boşluğu sağlayabilmek amacı ile ütüleme aşaması kaldırılmıştır. Ütüleme aşamasının kaldırılması ile iki plastik parçanın kalıptan çıkması arasında geçen çevrim süresini de etkilemektedir [49].

Tablo 4.2. Enjeksiyon kalıplama parametreleri

Enjeksiyon Parametreleri	Köpüksüz PP (seri üretim parçası)	PP/KKK
Silindir sıcaklığı (°C)	230-225-225-220-220-215-210-210	160-175-200-230-230-230-200-190
Kalıp sıcaklığı (°C)	50	50
Enjeksiyon hızı (mm/s)	60	80
Enjeksiyon geri basıncı (bar)	0	10
Ütüleme basıncı (bar)	100	0
Ütüleme süresi (s)	5,5	0
Toplam çevrim süresi (s)	35	29,5

Toyota Boshoku tarafından kabul edilebilen boyutsal ölçüm şartlarını yerine getiren CH-R SUV aracın iç trim kapı parçasından, her bir kompozisyon için yaklaşık 15 adet kapı paneli üretilmiş ve bu üretilen kapı panellerinden her bir kompozisyon için 5'er adet kapı paneli yapılacak deneyler için kullanılmıştır. Toplam 60 adet kapı paneli üretilmiştir. Enjeksiyon cihazının optimum şartlara ayarlanması için baştan üretilen yaklaşık 135 adet kapı paneli ile deneysel çalışmalarda kullanılmayan 40 adet kapı paneli geri dönüşüme gönderilmiştir. Toplam üretilen kapı paneli sayısı 195'dir.

4.3. Yoğunluk Deneyi

Köpüksüz PP ve köpüklü numunelerin yoğunluk testleri ISO 1183 [51] standartına göre Arşimet prensibi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler Şekil 4.3.'te yer alan Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı'nda RADWAG AS 220.R2 marka 0,1 mg hassasiyetli, 220 g kapasiteli dijital terazi kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.3. Yoğunluk ölçümü için kullanılan dijital terazi

Yoğunlukları ölçülen malzemelerin yoğunlukları 1.0 g/cm^3 'ten daha düşük olması sebebi ile kullanılan sıvı su değil etil alkol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) olmuştur. Kullanılan etil alkol %96 saflığa ve $0,79 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir. Eşitlik 4.1'de [51] verilen formül kullanılarak numunelerin önce havada sonra etil alkol içerisindeki ağırlıkları belirlenerek yoğunluklar hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m_A \times d_S}{m_A - m_S} \quad (4.1)$$

d , yoğunluk (g/cm^3)

d_S , sıvının (etil alkolün) yoğunluğu (g/cm^3)

m_A , numunenin havadaki ağırlığı (g)

m_S , numunenin sıvıdaki ağırlığı, (g)

4.4. Mikroyapı Analizleri

Ağırlıkça değişen KKK ilaveli PP köpüklerin mikroyapıdaki değişimlerini incelemek amacı ile numunelerin kesit görüntüleri Şekil 4.4.'te yer alan Sakarya Üniversitesi Polimer Esaslı Malzeme Üretim, Kaplama ve Analiz Laboratuvarı'ndaki Huvitz HDS-5800 tip 3D optik mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. PP köpüklerin ortalama köpük hücre boyutu, birim hacimdeki hücre yoğunluğu ve kabuk tabaka kalınlığını belirlemek amacı ile Image J görüntü analiz programı ile mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. 3D optik mikroskop

4.4.1. Köpük hücre boyutu ölçümü

Polimer köpük yapıda bulunan köpük hücrelerinin boyutlarını incelemek amacı ile optik mikroskop kullanılmıştır. Öncesinde numuneler 800, 1000 ve 1200'lük zımparalardan geçirilerek kesme izleri giderilmiştir. Ardından alınan kesit görüntülerinin Image J yazılımı ile köpük hücrelerinin boyutları ölçülmüştür. Küresel formda olan hücreler için tek doğru ile ölçüm alınmıştır. Küresel olmayan hücrelerde büyük ve küçük çaptan geçen iki doğrunun ortalaması ile köpük hücrelerinin boyutları belirlenmiştir.

4.4.2. Hücre yoğunluğu ölçümü

Ağırlıkça artan KKK ile PP köpüklerin birim hacimdeki hücre yoğunluğu Eşitlik 4.2’de [10] verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$N = \left(\frac{n}{A}\right)^{3/2} \quad (4.2)$$

N , birim hacimdeki hücre yoğunluğu (hücre/cm³)

n , optik mikroskopta incelenen hücre sayısı

A , optik mikroskopta incelenen görüntünün alanı (μm²)

4.4.3. Kabuk tabaka kalınlığı ölçümü

KKK’lı numunelerde köpük hücrelerinin oluştuğu çekirdek bölge ve hücrelerin oluşmadığı kabuk tabaka elde edilmektedir. Kabuk tabakada ergimiş polimerin hızlı katılaşmasına bağlı olarak köpük hücreleri oluşmamaktadır [52].

Elde edilen optik mikroskop görüntüleri Image J yazılımı ile incelenerek köpük hücrelerinin oluştuğu çekirdek bölge, üst ve alt kabuk tabakalarının ayrılması ile üç noktanın ortalaması ile hesaplanmıştır. Aynı şekilde üst ve alt kabuk tabaka kalınlıkları da en az 3’er noktanın ortalaması ile hesaplanmıştır. Üst ve alt kabuk tabaka toplamı ile toplam kabuk tabaka kalınlığı hesaplanmıştır.

4.5. Mekanik Deneyler

4.5.1. Darbe deneyi

Köpüksüz PP ve köpüklü numunelerin kırılma enerjilerini belirlemek amacı ile ISO 180 [53] standartına uygun olarak Şekil 4.5.’te yer alan deney numuneleri hazırlanmıştır. Çentikli Izod darbe deneyi için 2 mm derinliğinde ‘v’ şeklinde çentik METSPRE UV-2H çentik açma cihazı kullanılarak açılmıştır. Testler, 5,5 kJ’lük bir

çekiç kullanılarak Alarge marka cihazda Sakarya Üniversitesi Polimer Esaslı Malzeme Üretim, Kaplama ve Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Köpüksüz ve köpüklü numune için 5'er adet deney numunesi kullanılarak ortalama değerleri alınmıştır.



Şekil 4.5. Çentikli Izod darbe deney numunesi

4.5.2. Çekme deneyi

Köpüksüz PP ve köpüklü numuneler için mekanik özellikleri incelemek amacı ile Şekil 4.6.'da yer alan numuneye çekme deneyi yapılmıştır. Deneyler, Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda Zwick 5 kN marka çekme cihazı ile ASTM D638 [54] standartına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6. Çekme deney numunesi

Çekme deneyleri için köpüksüz ve köpüklü numune için 5'er adet deney numunesi kullanılarak ortalama değerleri alınmıştır. Deneyler 5 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Köpüksüz ve köpüklü malzemelerin çekme mukavemet değerleri Eşitlik 4.3 [55] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{P_{\zeta}}{A_0} \quad (4.3)$$

σ_c , çekme mukavemeti (MPa)

P_c , maksimum çekme yükü (N)

A_0 , numunenin daraltılmış bölgesindeki kesit alanı (mm²)

Malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirence elastikiyet modülü denilmektedir. Elastik modülü, gerilim-birim uzama grafiğinin elastik şekil değiştirme bölgesindeki eğrinin eğimine eşittir ve Eşitlik 4.4'te [55] yer alan formül ile hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad (4.4)$$

E , elastik modül (N/mm²)

σ_i , elastik sınır içerisinde herhangi bir gerilme değeri (N/mm²)

ε_i , σ_i gerilmesine karşılık gelen birim uzama miktarı (mm/mm)

% uzama miktarını belirlemek amacı ile Eşitlik 4.5 [55] kullanılmıştır.

$$\% \text{ uzama} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \quad (4.5)$$

Δl , uzama miktarı ($l_s - l_0$) (mm)

l_0 , numunenin ilk boyu (mm)

l_s , numunenin son boyu (mm)

4.5.3. Eğme deneyi

Köpüksüz PP ve köpüklü numunelerin eğme mukavemeti ve eğmede elastik modül değerinin belirlemek amacı ile 127x12,7x2,5 mm boyutlarına sahip deney numunelerine ASTM D790 [56] standartına uygun olarak Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda Zwick 5 kN marka cihazda üç noktalı eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Eğme deney numunesi Şekil 4.7.'de yer

almaktadır. Test hızı 2 mm/dk ve mesnetler arası mesafe 40 mm'dir. Köpüksüz ve köpüklü numune için 5'er adet deney numunesi kullanılmış ve ortalama değerleri alınmıştır. Eşitlik 4.6'da [56] yer alan formül yardımı ile eğme mukavemeti belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (4.6)$$

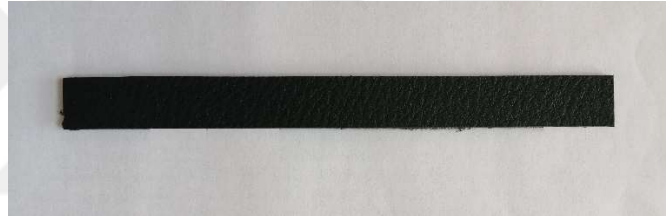
σ , eğme mukavemeti (MPa)

P_{max} , maksimum eğme yükü (N)

L , mesnetler arası mesafe (mm)

b , numune genişliği (mm)

h , numune kalınlığı (mm)



Şekil 4.7. Eğme deney numunesi

Eğmede elastik modülü belirlemek amacı ile Eşitlik 4.7'de [56] yer alan formül kullanılmıştır.

$$E = \frac{mL^3}{4bh^3} \quad (4.7)$$

E , elastik modül (MPa)

m , yük-deplasman eğrisinin ilk düz çizgi kısmına gelen teğetin eğimi (N/mm)

b , numune genişliği (mm)

h , numune kalınlığı (mm)

4.5.4. Sertlik deneyi

Köpüksüz ve köpüklü numunelerin sertliklerini belirlemek amacı ile ASTM D2240 [57] standartına uygun olarak Sakarya Üniversitesi Polimer Esaslı Malzeme Üretim, Kaplama ve Analiz Laboratuvarı'nda Shore D sertlik deneyi uygulanmıştır. Sertlik ölçümü için kullanılan ALIYIQI marka LD-J model durometre Şekil 4.8.'de yer almaktadır. Kullanılan batıcı uç olarak 1,40 mm (0,055 inç) çapa sahip 30°'lik konik bir uç kullanılmaktadır. Uygulanan yük ise 5 kg'dır. Her bir numune yüzeyinden 5'er adet ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır.



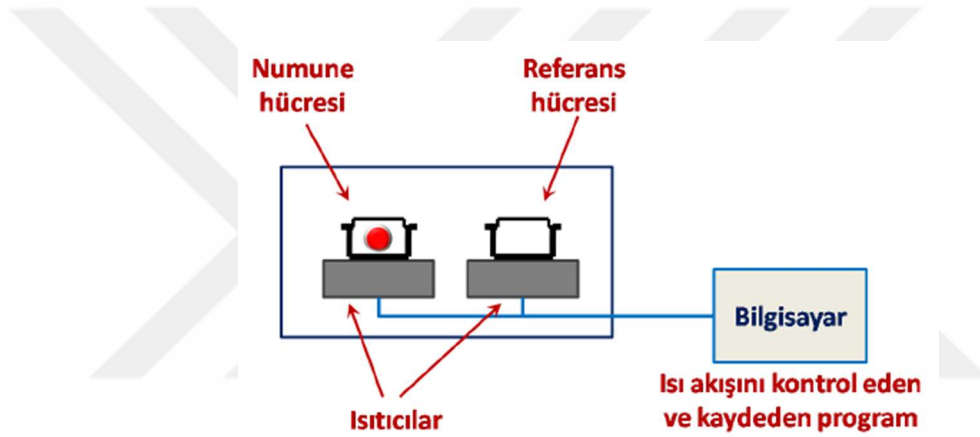
Şekil 4.8. Shore D sertlik ölçüm cihazı

4.6. DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) Analizi

Polimerlerin ve polimer karışımlarının termal analizi için diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz yöntemi kullanılmaktadır. DSC ile polimer malzemelerin kristallenme davranışları, ergime (T_e) ve camsı geçiş (T_g) sıcaklıkları incelenmektedir [58, 59]. Şekil 4.9.'da DSC uygulamasının şematik gösterimi yer almaktadır [60]. İki adet kalorimetreden oluşan DSC hücresinde kalorimetrelerden birine numunenin olduğu kroze diğerine ise referans içeren kroze yerleştirilmektedir. Krozeler genellikle alüminyumdan yapılmaktadır. Numune ve referans aynı sıcaklık programına tabii tutularak istenilen sıcaklığa sabit bir hızla ısıtma ve soğutma işlemine maruz

kalmaktadır. Değişen sıcaklık ile her iki krozeeye aktarılan ısı farkı milivolt olarak ölçülerek, numunenin olduğu krozedeki numunenin aldığı veya verdiği ısı kayıt altına alınmaktadır. Bu ısı farkı, faz geçişi veya reaksiyon bölgelerinde endotermik veya ekzotermik tepeler olarak gözlenmektedir [60].

Köpüksüz PP ve KKK ilaveli polimer köpük numunelerinin termal analizleri NETZSCH DSC 200F3 cihazı ile ISO 11357-1 [58] standartına uygun olarak Sakarya Üniversitesi Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (SARGEM) gerçekleştirilmiştir. Testler azot atmosferinde 20 ml/dk akış hızıyla, 10°C/dk ısıtma hızında, -50°C'den 300°C'ye ısıtılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9. Diferansiyel taramalı kalorimetre uygulaması [60]

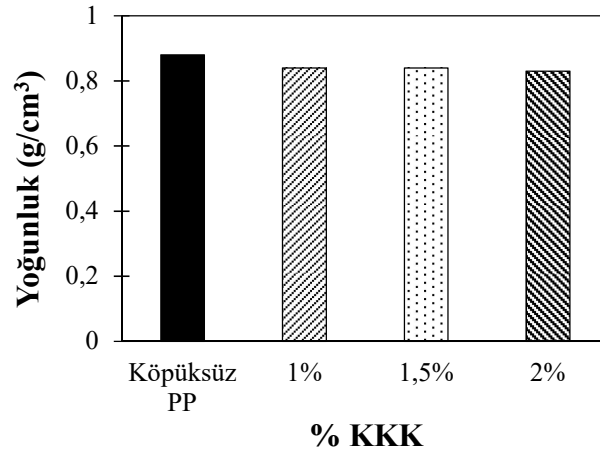
4.7. FESEM (Alan Emisyon Taramalı Elektron Mikroskobu) Analizi

Darbe deneyi sonrasında numunelerin kırık yüzeyleri Sakarya Üniversitesi Araştırma-Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (SARGEM) alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanılarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler için FEI marka QUANTA FEG 450 tip cihaz kullanılmıştır.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Yoğunluk Deney Sonuçları

Arşimet prensibine göre önce havada daha sonra etil alkolde ağırlık ölçümleri yapılarak Bölüm 4'te yer alan Eşitlik 4.1'e göre yoğunlukları ölçülen köpüksüz ve köpüklü PP numunelerine ait sonuçlar Şekil 5.1. ve Tablo 5.1.'de yer almaktadır.



Şekil 5.1. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yoğunluk sonuçları

Tablo 5.1. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yoğunluk sonuçları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)	Hafifletme (%)
Köpüksüz PP	0,88	-
%1 KKK	0,84	4,5
%1,5 KKK	0,84	4,5
%2 KKK	0,83	5,7

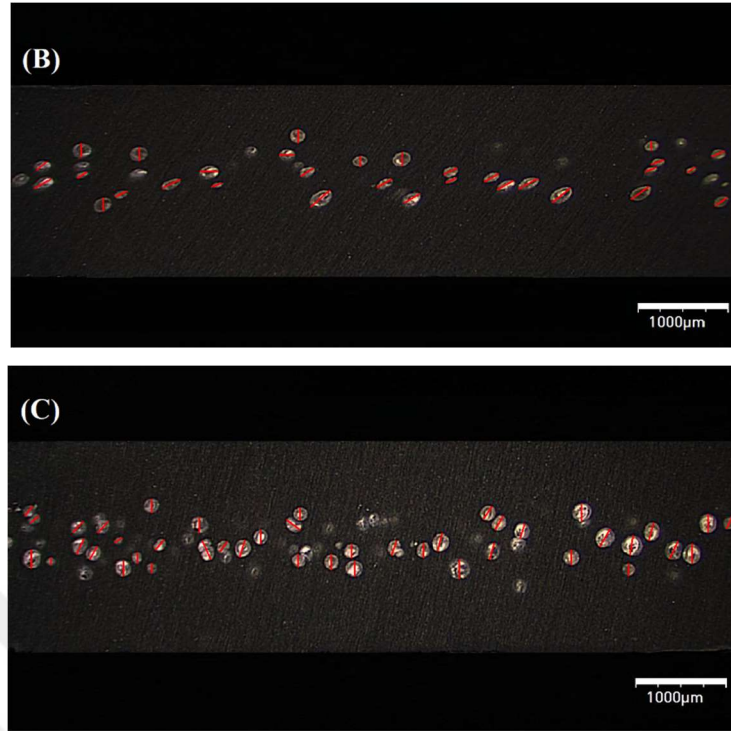
Sonuçlar incelendiğinde köpük katkı ile yoğunlukta azalma olduğu görülmektedir. Köpürme işleminde, önce hücreler çekirdeklenir ve daha sonra çekirdekli hücreler difüzyon için yeterli gaz olduğu sürece büyümeye devam etmektedir. Gaz difüzyonunun etkisi sonucunda hücre büyümesine bağlı olarak artan köpük katkı içeriği ile nihai ürünün yoğunluğunda azalma meydana gelmektedir. Köpüksüz PP'nin yoğunluğu $0,88 \text{ g/cm}^3$ iken köpük katkı ile %4,5-%5,7 arasında değişen hafifletme sağlanmıştır. %1 ve %1,5 KKK'da %4,5 hafifletme sağlanmıştır. En fazla hafifletme %2 KKK ilaveli numunede elde edilmiştir. Badem [48] yapmış olduğu çalışmada, PP matrisine ağırlıkça %1,5 KKK ilave ederek değişen enjeksiyon hızlarında (110 mm/s, 125 mm/s ve 140 mm/s) PP köpük elde ettiği çalışma sonucunda köpüksüz PP için yoğunluğun $0,98 \text{ g/cm}^3$, köpüklü numunelerde değişen enjeksiyon hızına bağlı olarak yoğunluk değerinin $0,90\text{-}0,92 \text{ g/cm}^3$ arasında olduğunu belirtmiştir. Unal ve Yetgin [46] PP malzemeye %1 KKK ilaveli farklı ergiyik sıcaklıklarında ve enjeksiyon hızlarında yaptıkları çalışmada yoğunluk sonuçlarını incelediklerinde katkısız PP'nin yoğunluğu $0,91 \text{ g/cm}^3$ iken köpüklendirme işlemi sonrasında elde edilen köpük yoğunluklarının $0,835\text{-}0,850 \text{ g/cm}^3$ arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

5.2. Mikroyapı Analiz Sonuçları

Ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 KKK'lı numunelerin Şekil 5.2.'de köpük hücre boyutlarının ölçüldüğü optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.2. (A) %1 KKK, (B) %1,5 KKK ve (C) %2 KKK'lı PP köpük numunelerin köpük hücre dağılımı

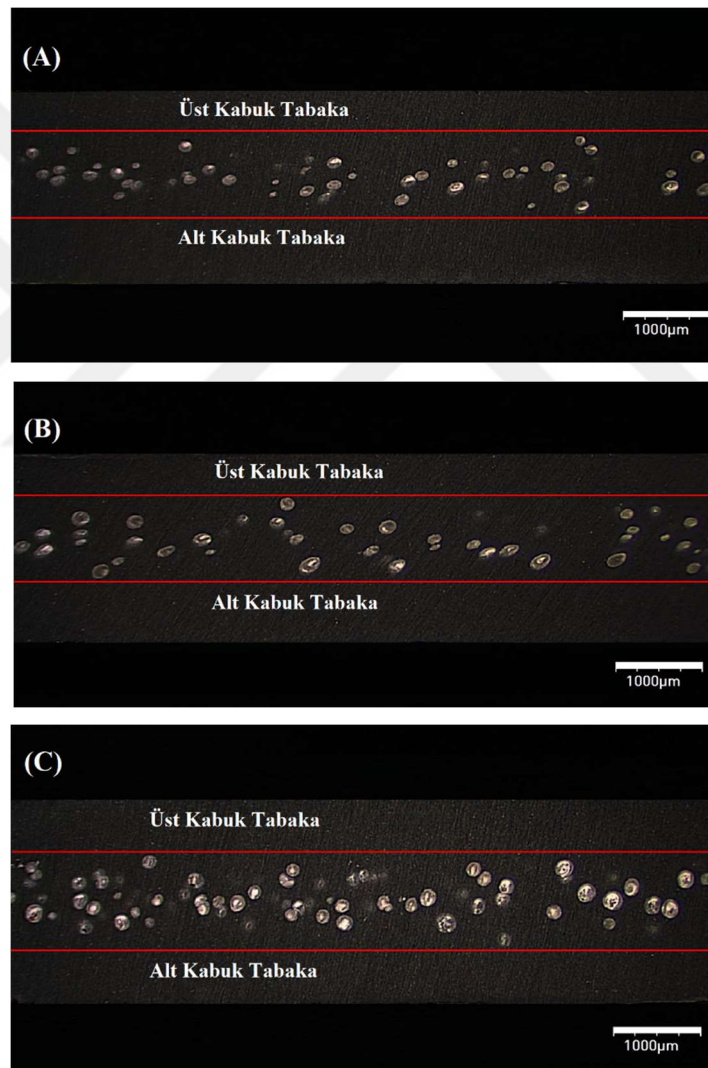


Şekil 5.2. (Devam)

Köpük katkının ağırlıkça miktarı arttıkça köpük hücre boyutları da artmaktadır. Sırası ile ortalama köpük hücre boyutları 111 μm , 145 μm ve 156 μm 'dir. Ağırlıkça KKK oranının artması ile de köpük hücrelerinin boyutu artmaktadır. Bu durum literatürde fazla miktardaki köpük katkı içeriğinin hücre birleşmesine sebep olabilmesi ile sayıca az ve büyük hücre oluşumunu da beraberinde getirdiği belirtilmektedir [42, 43]. Köpük katkı konsantrasyonu değiştikçe, ortalama hücre büyüklüğü ve köpük hücre yoğunluğu değişmektedir [44]. Chang ve ark. [11] otomotiv uygulamaları için PP matris ve KKK (%1, %3, %5, %7, %9) kullandıkları çalışmada köpük morfolojisi, mekanik özellikler ve parçaların yüzey kalitesini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda KKK içeriğinin artmasıyla köpük hücre boyutlarında artış görülmüştür. Babaei ve ark. [61] HDPE/nano kil kompozitlere ağırlıkça %2 ve %4 oranında KKK ekleyerek ürettikleri numunelerde ortalama hücre boyutu ve hücre yoğunluğunun KKK oranının artmasıyla arttığını tespit etmişlerdir.

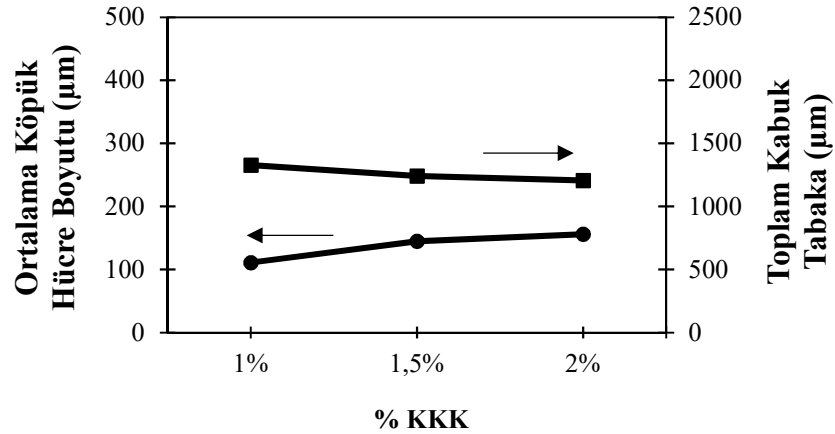
Köpük katkılı parçalarda merkez gözenekli iken kabuk tabaka ise köpük hücrelerinin yer almadığı kısımdan oluşmaktadır. Oluşan kabuk tabaka kalınlığı mekanik özellikler üzerinde önemli bir role sahiptir. Kabuk tabaka ergiyik polimerin kalıp duvarı ile

temas etmesi sonrasında hızla soğuması ile yüzeye yakın yerlerde köpük hücrelerin kırılması sonucu şekillenmektedir [29]. Kabuk tabaka kalınlığındaki değişim numunelerin merkez kısmında (çekirdek bölge, $e_{çek}$) oluşan köpük hücrelerine bağlı olarak değişmektedir. Tüm PP/KKK polimer köpüklerin üst ($e_{üst}$) ve alt (e_{alt}) kabuk tabakası kalınlıklarının toplamı ile toplam kabuk tabaka kalınlığı incelenmiştir. Ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 KKK'lı numunelerin kabuk tabaka kalınlıklarına ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.3.'te yer almaktadır.



Şekil 5.3. (A) %1 KKK, (B) %1,5 KKK ve (C) %2 KKK'lı PP köpük numunelerin kabuk tabaka dağılımı

Şekil 5.4.'te ağırlıkça değişen oranlarda KKK'lı numunelerin ortalama köpük hücre boyutu ve toplam kabuk tabaka kalınlığına ait grafik verilmektedir. Tablo 5.2.'de ise KKK'lı numunelerin hücre morfolojilerine ait veriler yer almaktadır.



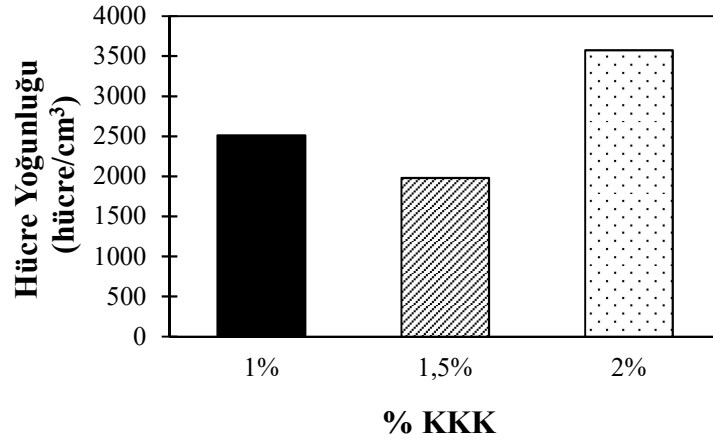
Şekil 5.4. Ağırlıkça değişen KKK oranlarında ortalama köpük hücre boyutları

Tablo 5.2. KKK oranının köpük morfolojisi üzerindeki etkisi

		%1 KKK	%1,5 KKK	%2 KKK
Minimum hücre boyutu (µm)		65	89	78
Maksimum hücre boyutu (µm)		161	217	226
Ortalama köpük hücre boyutu (µm)		111	145	156
e _{üst} (µm)		514	496	597
e _{alt} (µm)		814	746	609
e _{çek} (µm)		928	968	1095
Toplam kabuk tabaka kalınlığı (µm)		1328	1242	1206
Hücre yoğunluğu (hücre/cm ³)		2512	1979	3573

Şekil 5.4. ve Tablo 5.2.'de görüldüğü gibi ağırlıkça köpük katkı oranı arttıkça toplam kabuk tabaka kalınlığı azalmaktadır. Ayrıca KKK'nın artması ile ortalama köpük hücre boyutu artarken toplam kabuk tabaka kalınlığı azalmaktadır. Oluşan kabuk tabaka kalınlıklarındaki değişimin yapıdaki köpük hücre boyutu, hücre yoğunluğu ve dağılımı ile ilgili olduğu görülmektedir.

Şekil 5.5.'te Bölüm 4'te yer alan Eşitlik 4.2'ye göre hesaplanan birim hacimdeki köpük yoğunluğuna ait grafik yer almaktadır.



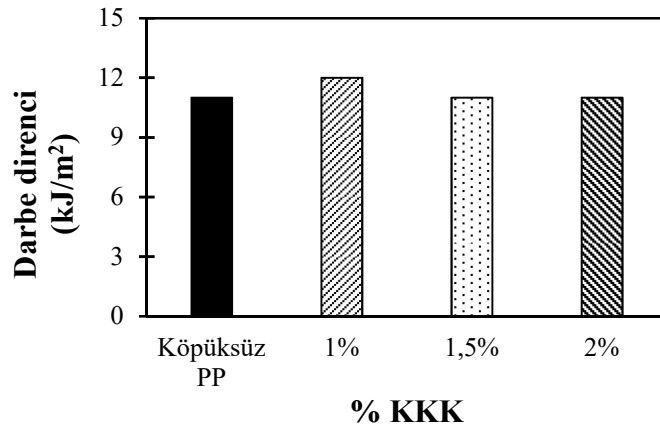
Şekil 5.5. Ağırlıkça değişen KKK oranlarında birim hacimdeki hücre yoğunluğu

Şekil 5.5.'te görüldüğü üzere KKK içeriğinin artışı ile matris içerisinde açığa çıkan gaz miktarının artışı sonucunda birim hacimdeki köpük hücre yoğunluğu artmaktadır. Unal ve Yetgin [12] enjeksiyon kalıplama ile PP matrise %1 ve %2 oranında KKK ile ürettikleri PP köpük malzemeyi incelediklerinde KKK miktarının artışı ile birim hacimdeki hücre yoğunluğunun azaldığını gözlemlemişlerdir.

5.3. Mekanik Deney Sonuçları

5.3.1. Darbe deney sonuçları

Aşağıda Şekil 5.6. ve Tablo 5.3.'te 5'er adet numuneye uygulanan çentikli Izod darbe deneyleri sonucunda ortalama sonuçlar yer almaktadır.



Şekil 5.6. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çentikli Izod darbe deney sonuçları

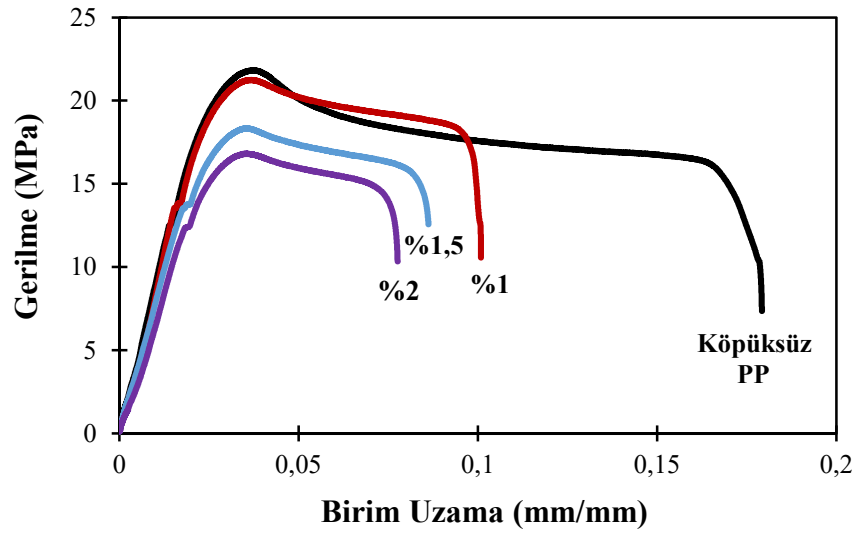
Tablo 5.3. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çentikli Izod darbe test sonuçları

Numune	Darbe Direnci (kJ/m ²)
Köpüksüz PP	11
%1 KKK	12
%1,5 KKK	11
%2 KKK	11

Sonuçlar incelendiğinde köpüksüz PP'nin kırılma enerjisi 11 kJ/m²'dir. Matrise KKK ilave edilmesi ile darbe mukavemet değerlerinde değişim görülmemektedir. Yapıda bulunan köpük hücreleri darbe enerjisini sönmleme kabiliyetine sahiptir. Hücresel boşluklar numuneyi yumuşatmakta ve hücresel yapı enerji absorbe etme kabiliyetini arttırmaktadır. Böylece uygulanan darbe yüklerinin neden olduğu çatlak büyümesini önleyerek çatlak yayılma oranını azaltmaktadır ve böylelikle enerji emilimi iyileştirilmektedir [62]. Unal ve ark. [46] farklı enjeksiyon parametreleri (ergiyik sıcaklığı 160°C, 170°C ve 180°C; enjeksiyon hızı 60 mm/s, 80 mm/s ve 100 mm/s) kullanarak yaptıkları çalışma sonucunda %1 KKK'lı numunede darbe mukavemetinde azalma olmadığını gözlemlemişlerdir. Darbe mukavemet değeri köpüksüz PP için 15,5 kJ/m² iken 60 mm/s enjeksiyon hızında ve 160°C ergiyik sıcaklığında 15,6 kJ/m² elde edilmiştir. Enjeksiyon hızının ve ergiyik sıcaklığının artışı ile darbe mukavemet değerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Böylece enjeksiyon parametrelerinin mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

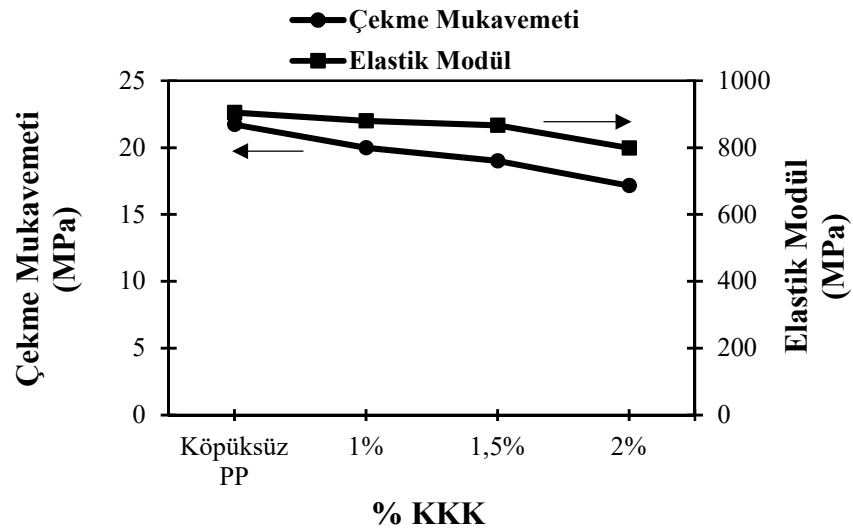
5.3.2. Çekme deney sonuçları

Köpüksüz PP ve ağırlıkça değişen köpük katkı içeriklerindeki numunelerin çekme testi sonrasında elde edilen gerilme-birim uzama grafikleri Şekil 5.7.'de yer almaktadır.



Şekil 5.7. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin gerilme-birim uzama eğrileri

Köpük katkı ile çekme mukavemetinin ve birim uzama miktarının azaldığı grafikten görülmektedir. Şekil 5.8. çekme mukavemeti ve elastik modül değerlerinin değişimine ait grafiğe aittir. Tablo 5.4. ise çekme deneyi sonrasında elde edilen veriler yer almaktadır.



Şekil 5.8. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çekme mukavemet ve elastik modül değerleri

Tablo 5.4. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çekme deney sonuçları

Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastik Modül (MPa)	% uzama
Köpüksüz PP	22	905	17,9
%1 KKK	20	880	10
%1,5 KKK	19	867	8,6
%2 KKK	17	799	7,7

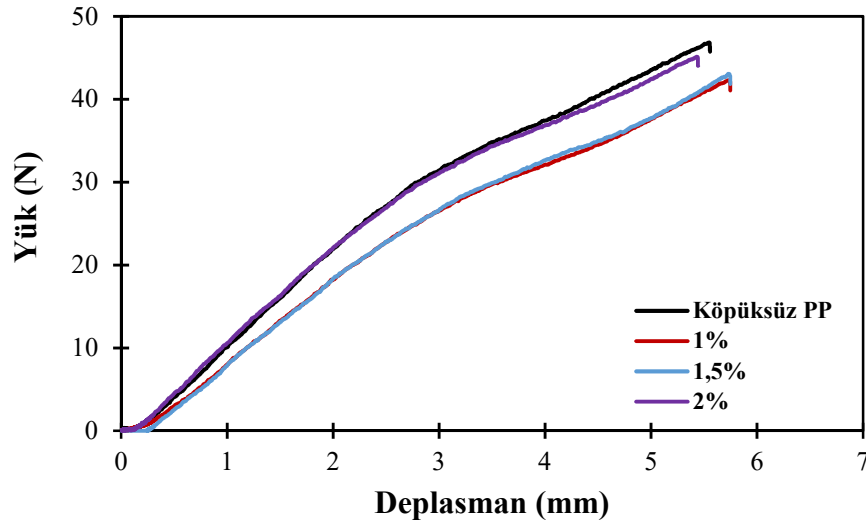
Köpük katkı ile birim hacimdeki malzeme miktarının azalması çekme mukavemeti ve elastik modülde azalmaya sebep olmaktadır. Köpüksüz PP'nin çekme mukavemeti 22 MPa iken katkı ile bu değer 17-20 MPa arasında değişmektedir. En düşük çekme mukavemet değeri %22,7 azalma ile %2 KKK'da (17 MPa) görülmektedir. %1 KKK'da %9 azalma oranı, %1,5 KKK'da ise %13,6 azalma görülmektedir. Elastik modül değerleri incelendiğinde köpüksüz PP'nin elastik modülü 905 MPa iken ağırlıkça değişen KKK içeriği ile azalmaktadır. %1 KKK'da yaklaşık %2,8 azalma, %1,5 KKK'da %4 azalma ve %2 KKK'da ise %11,7 azalma elde edilmiştir. Hem elastik modül hem de çekme mukavemet değerlerine bakıldığında %1 KKK, %1,5 ve %2'ye göre bir miktar yüksek değerdedir. Bu durum kabuk tabaka kalınlığının %1 KKK'da daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yetgin ve Ünal [63] PP ve PP kompozit köpüklerinin mekanik ve köpüklenme özelliklerini inceledikleri çalışmada kabuk tabaka kalınlığının artması ile çekme mukavemetinde ve elastik modülde artış

olduğunu belirtmişlerdir. Bledzki ve Faruk [30] yaptıkları çalışmada köpüksüz PP için çekme mukavemetinin 25,58 MPa'dan köpük katkı ile 16,71 MPa'a düştüğünü belirtmişlerdir. Aynı şekilde Najafi ve ark. [64] PLA polimerini köpüklenirerek mekanik özelliklerini incelediklerinde köpük katkı ile mekanik özelliklerde düşüş yaşandığı belirtilmiştir.

Tablo 5.4. incelendiğinde % uzama miktarının köpük katkı ile azaldığı görülmektedir. Köpüksüz PP'de uzama miktarı %17,9 iken köpük katkı ile %7-%10 arasında değişmektedir.

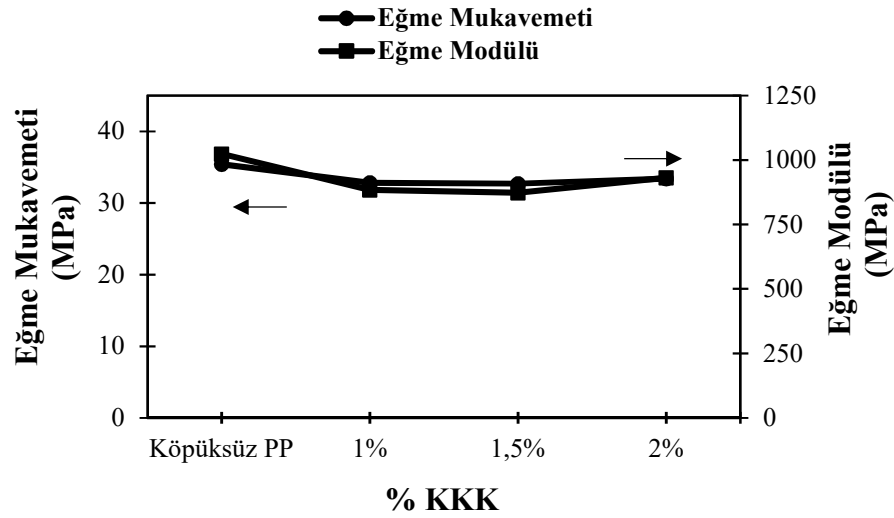
5.3.3. Eğme deney sonuçları

Üç noktalı eğme testi sonrasında köpüksüz PP ve KKK'lı numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 5.9.'da yer almaktadır.



Şekil 5.9. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin yük-deplasman eğrileri

Test sonucunda 5'er adet numunenin Eşitlik 4.6 ve Eşitlik 4.7'ye göre hesaplanan ortalama eğme mukavemeti ve eğme modülü değerleri Şekil 5.10. ve Tablo 5.5.'te yer almaktadır.



Şekil 5.10. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin eğme mukavemeti ve eğme modülü değerleri

Tablo 5.5. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin eğme test sonuçları

Numune	Eğme Mukavemeti (MPa)	Eğme Modülü (MPa)
Köpüksüz PP	35,4	1023,4
%1 KKK	32,8	884
%1,5 KKK	32,7	873
%2 KKK	33,4	931

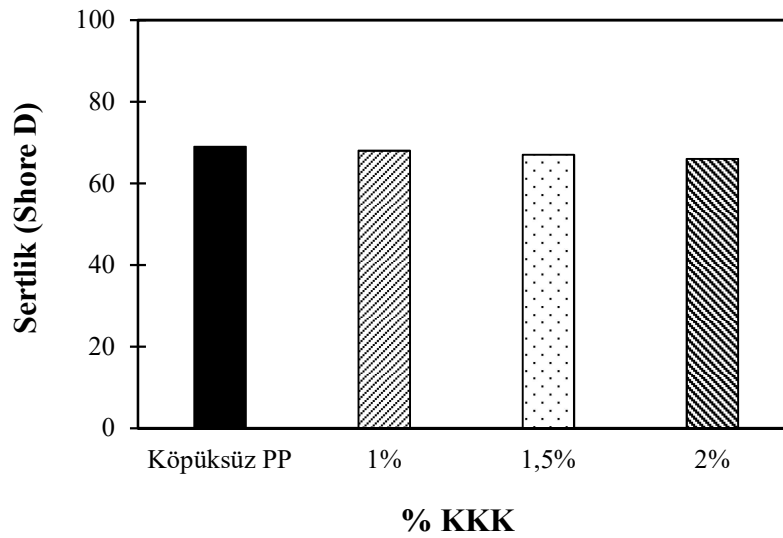
Şekil 5.10. incelendiğinde eğme mukavemeti köpüksüz PP'de 35,4 MPa iken köpük katkı ile 32,7-33,4 MPa arasında değişmektedir. Eğme modülü ise köpüksüz PP'de 1023,4 MPa, KKK ile 873-931 MPa arasında değişmektedir. KKK PP'ye ilave edilen KKK ilavesinin artışıyla eğme mukavemet ve modülünde düşme gözlenirse de, köpüksüz PP'ye göre çok fazla bir değişim görülmemektedir. Meng ve ark. [65] yaptıkları çalışmada %4 KKK ile PP'nin eğme mukavemetinin yaklaşık 26 MPa'dan 24 MPa'a düştüğünü belirtmişlerdir. Wang ve Chen [7] yaptıkları çalışmada köpük katkı ile PP'nin eğme mukavemetinin 46 MPa'dan 43 MPa'a ve eğme modülün 1645 MPa'dan 1209 MPa'a düştüğünü belirtmişlerdir. Albooyeh ve ark. [62] PP malzemeyi FKK olan CO₂ kullanarak farklı köpürme sürelerinde (90s, 180s ve 270s) işleme tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda köpürme süresinin artması ile eğilme mukavemetinde ve modülünde azalma meydana gelmiştir. Köpürme süresinin artışı ile

köpük hücre oluşumunun artması sonucu yük taşıyıcı malzeme miktarının azalması ile mukavemet değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Yapılan bu tez çalışmasında PP matrise ilave edilen %1 ve %1,5 KKK'da eğme mukavemetinde ve eğme modülünde azalma görülmüştür, değerler birbirine yakındır. Ağırlıkça %2 KKK'da matrise dağılan köpük hücrelerinin %1 ve %1,5 köpük ajanı ilavelerine göre daha homojen dağılım göstermesi eğme yüklerinde köpük hücrelerinin uygulanan eğme kuvvetini absorbe etmesini sağlamıştır.

5.3.4. Sertlik deney sonuçları

Köpüksüz PP ve ağırlıkça değişen KKK oranlarındaki 5'er adet numuneye yapılan Shore D sertlik sonuçlarının ortalama değerleri Şekil 5.11. ve Tablo 5.6.'da yer almaktadır.



Şekil 5.11. Köpüksüz PP ve ağırlıkça değişen KKK içeriğine bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim

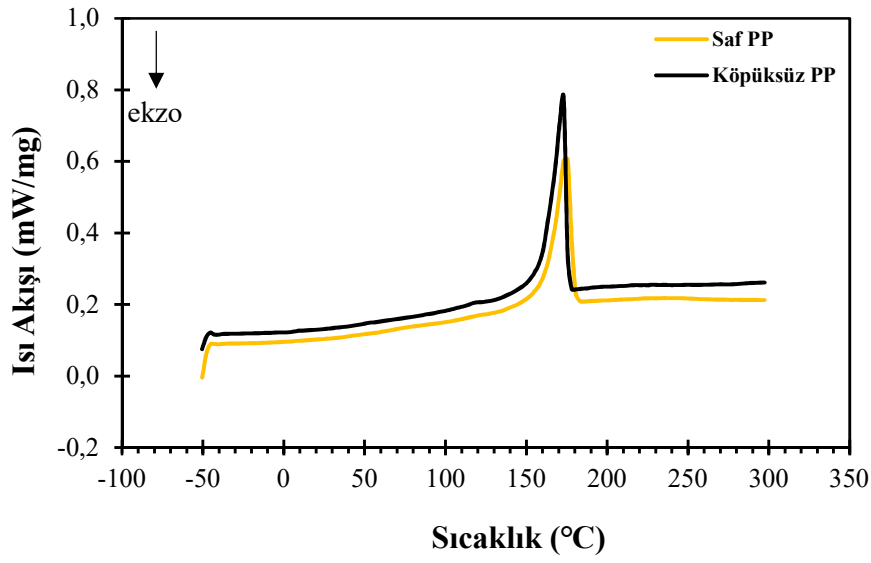
Tablo 5.6. Shore D sertlik deney sonuçları

Numune	Sertlik (Shore D)
Köpüksüz PP	69
%1 KKK	68
%1,5 KKK	67
%2 KKK	66

Köpüksüz PP için ortalama sertlik sonucu 69 Shore D iken köpük katkı ile sertlik değerleri 66-68 Shore D arasında görülmektedir. En düşük sertlik değeri %2 KKK içeriğinde 66 Shore D'dir. Mekanik özellikler köpük hücre morfolojisi ile değişim göstermektedir. Ağırlıkça KKK oranı arttıkça köpük hücre yoğunluğu artmakta ve kabuk tabaka kalınlığını azalmaktadır. Bu morfolojide, sertlik değerlerinde de azalma görülmektedir. Bu sonuçlar literatür ile uyumludur. Yetgin [29] yapmış olduğu çalışmada köpüklendirilmemiş PP numunenin sertliği 71 Shore D iken %1 köpük katkı ile 68 Shore D, %2 köpük katkıda ise sertlik 67 Shore D elde edilmiştir.

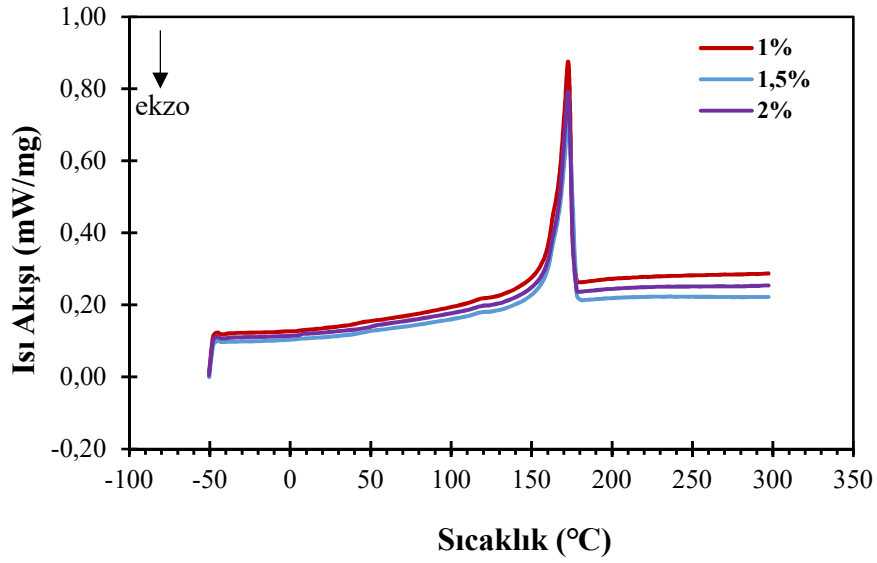
5.4. DSC Analiz Sonuçları

Şekil 5.12.'de üretici firma tarafından temin edilen saf PP ve kalıplanan köpüksüz PP parçaya yapılan DSC analizi sonucunda elde edilen endotermik termogram eğrilerini göstermektedir.



Şekil 5.12. Saf PP ve köpüksüz PP'nin endotermik termogram eğrileri

Saf PP için ergime sıcaklığı 174,6°C'dir, köpüksüz PP için ise 172,6°C'dir. Köpük katkılı numunelere ait termogram eğrileri ise Şekil 5.13.'te yer almaktadır. Tablo 5.7.'de ise bütün numunelerin ergime sıcaklık değerleri yer almaktadır.



Şekil 5.13. Ağırlıkça değişen oranlarda KKK'lı numunelerin endotermik termogram eğrileri

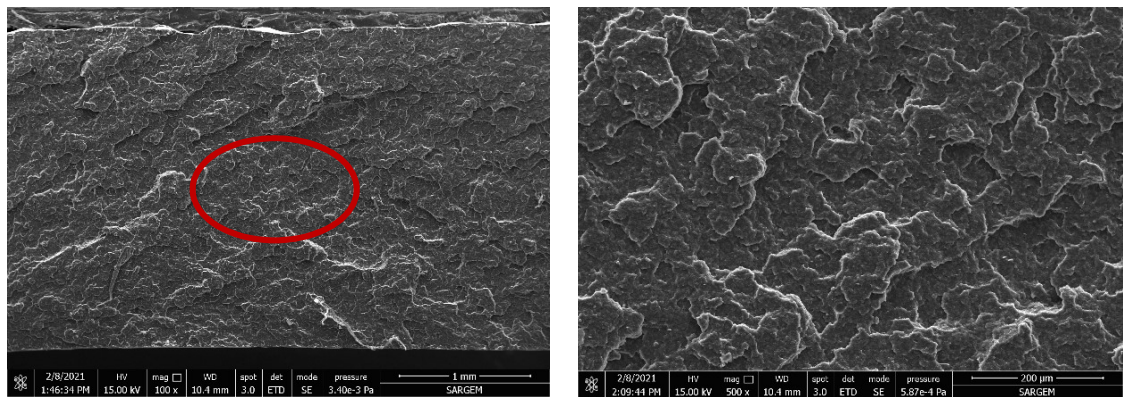
Tablo 5.7. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin ergime sıcaklık değerleri

Numune	Ergime Sıcaklığı, T _e (°C)
Saf PP	174,6
Köpüksüz PP	172,6
%1 KKK	172,9
%1,5 KKK	173,2
%2 KKK	172,8

Köpük katkı ile ergime sıcaklıkları 172,8-173,2°C arasında değişmektedir. KKK'nın ergime sıcaklığını düşürdüğü ancak çok fazla etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatür ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Yetgin [29] yapmış olduğu çalışmada PP'nin ergime sıcaklığını 167,8°C olarak elde etmiştir. %1 ve %2 KKK'lı numunelerde ise ergime sıcaklığını 164,6°C elde ederek köpük katkının ergime sıcaklığı üzerinde düşme yönünde bir etkisi olduğunu ancak fazla fark oluşturmadığını gözlemlemiştir.

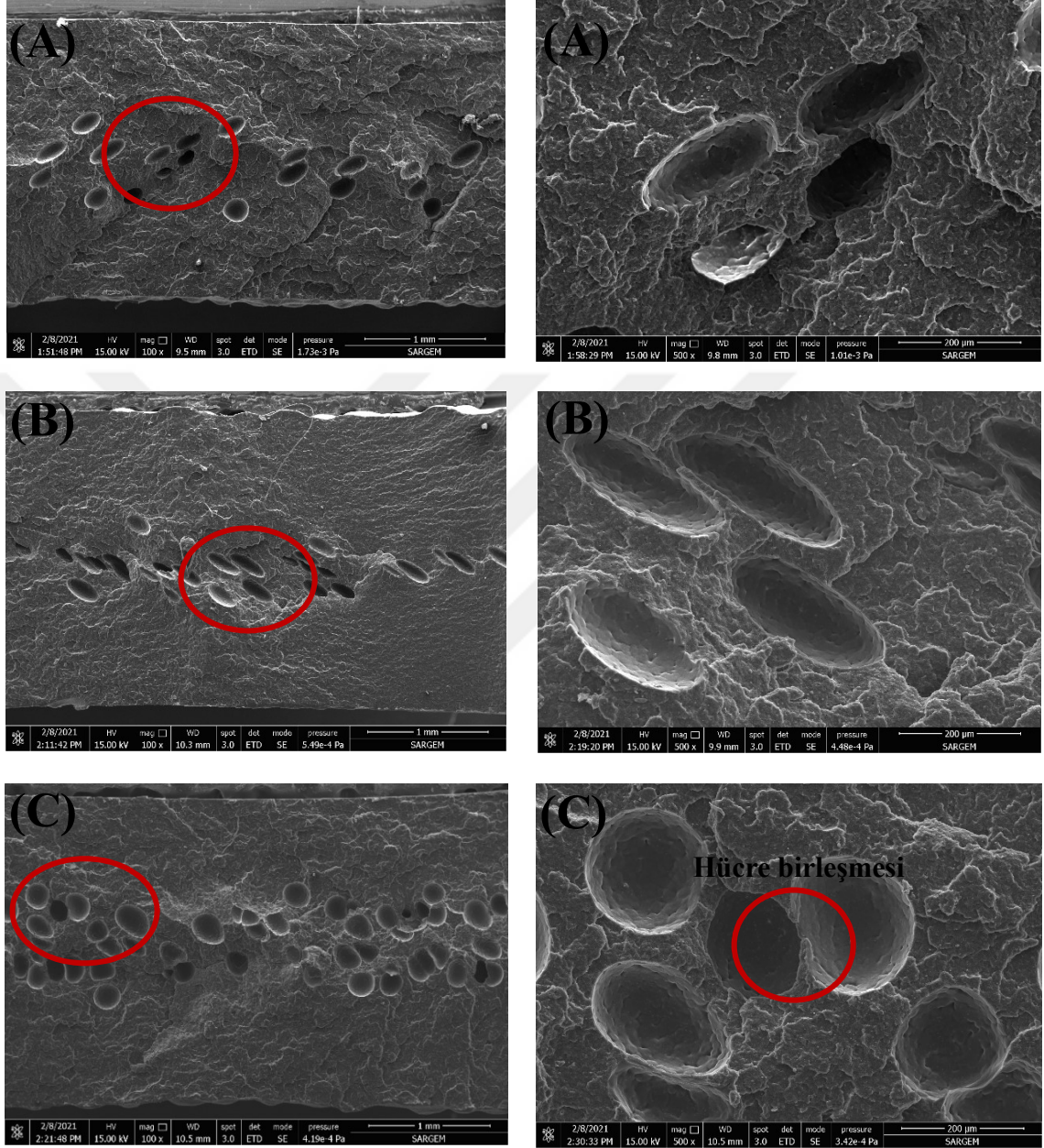
5.5. FESEM Analiz Sonuçları

Şekil 5.14.'te köpüksüz PP'ye ait darbe deneyi sonrasında elde edilen kırık yüzeyin FESEM görüntüsü yer almaktadır. 100X büyütmede alınan görüntünün işaretli kısmından 500X büyütmede de görüntü alınmıştır. Yüzeyde oluşan lifli ve mat görünüm sünek kırılmanın meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 5.14. Köpüksüz PP'nin mikroyapı görüntüleri (100X ve 500X)

Ağırlıkça değişen köpük katkı içeriklerindeki PP köpük numunelere ait farklı büyütmelerdeki (100X ve 500X) FESEM görüntüleri Şekil 5.15.'te yer almaktadır.



Şekil 5.15. KKK'lı numunelerin mikroyapı görüntüleri A) %1 (100X-500X), B) %1,5 (100X-500X) ve C) %2 (100X-500X)

Köpük hücreli numunelerde hücre morfolojisi oluşan hücelere bağlıdır. Şekil 5.16 incelendiğinde ağırlıkça %1 ve %1,5 KKK ilavesinde köpük hücrelerinin elips şekilde olduğu görülmektedir. Köpük katkı konsantrasyonu %2 olduğunda hücreler küre

şeklini almaktadır ve KKK miktarı arttığında hücre duvarlarının teması sonrasında hücre birleşmeleri meydana gelir ve büyük çapa sahip hücreler oluşmaktadır. Oluşan büyük hücreler PP köpüklerde mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Köpüklendirme sonrasında tüm köpüklü numunelerin kırık yüzeylerine bakıldığında lifli görünümün devam ettiği ve sünek kırılmanın meydana geldiği görülmektedir.



BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİ

6.1. Sonuç

Bu tez çalışmasında otomotiv sektöründe yaygın kullanıma sahip olan PP polimeri KKK kullanılarak Toyota CH-R model aracın ön kapı panelleri üretilmiştir. PP matrise ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 oranında KKK ilave edilmiştir. PP köpük numuneleri köpüksüz PP'ye göre farklı enjeksiyon parametreleri kullanılarak üretilmiştir. Otomotiv sektöründe kullanılabilecek hafifletilmiş PP malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. PP köpük numunelerin hücre boyutu, birim hacimdeki hücre yoğunluğu, kabuk tabaka kalınlıkları incelenmiştir. Köpüksüz PP ve KKK'lı numunelerin çekme, eğme, darbe ve sertlik gibi mekanik özellikleri, DSC ile ergime sıcaklıkları, Arşimet prensibi ile yoğunlukları ölçülmüştür.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar;

- Yoğunluk deneyleri sonucunda KKK ilavesi ile %4,5 ile %5,7 arasında yoğunluk düşüşü elde edilmiştir. %2 KKK'da %5,7 ile en yüksek oranda yoğunluk düşüşü gerçekleşmiştir.
- Köpük katkı ilavesinin %1'den %2'ye artması ile birim hacimdeki hücre yoğunluğu artmış, köpük hücre boyutu artmış ve kabuk tabaka kalınlığı azalmıştır. Homojen köpük hücre dağılımı %2 KKK'lı numunede elde edilmiştir.
- Köpük katkı ilavesi ile darbe mukavemet değerinde herhangi bir değişim görülmemektedir.
- Çekme mukavemetinde, elastik modülde ve % uzamada ağırlıkça köpük katkı miktarı arttıkça azalma görülmektedir. Ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 köpük katkı içeriğinde sırası ile çekme mukavemeti 20 MPa, 19 MPa ve 17 MPa elde

edilmiştir. Elastik modül değerleri ise 880 MPa, 867 MPa ve 799 MPa elde edilmiştir.

- Eğme testi sonucunda elde edilen eğme mukavemeti ve eğme modülleri incelendiğinde ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 köpük katkı ilavesinde sırası ile eğme mukavemeti 32,8 MPa, 32,7 MPa ve 33,4 MPa elde edilmiştir. Eğme modülü ise 884 MPa, 873 MPa ve 931 MPa elde edilmiştir.
- Sertlik testi sonucunda %1, %1,5 ve %2 KKK ilavesinde sırası ile 68, 67 ve 66 Shore D elde edilmiştir.
- DSC analizleri sonucunda köpüksüz PP'nin ergime sıcaklığı 172,6°C iken ağırlıkça %1, %1,5 ve %2 KKK ile sırasıyla 172,9°C, 172,8°C ve 173,2°C elde edilmiştir.
- Köpüksüz CH-R model aracın kapı paneli üretiminde 5,5 s ütüleme süresi uygulanırken KKK'lı üretimlerde ütüleme aşaması iptal edilerek çevrim süresinden 5,5 s kazanç elde edilmiştir. Böylece enjeksiyon çevrim süresi 35 s iken 29,5 s olmuştur. Toplam çevrim süresinde %15,7 azalma meydana gelmiştir. Ütüleme süresindeki bu azalma sayesinde seri üretimde maliyet düşüşü gerçekleşmektedir.

6.2. Öneri

- Enjeksiyon proses parametreleri değiştirilerek köpük hücre morfolojilerindeki değişim ile mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenebilir.
- Matrise mukavemet artırıcı takviyeler ile mekanik özellikler geliştirilebilir.
- Farklı tip köpük ajanı kullanımı ile mekanik, fiziksel, termal ve morfolojik özellikler incelenebilir.
- Köpük katkı miktarı artışı ile ortalama köpük hücre boyutunun artışının engelleyebilmek için ergiyik sıcaklığında değişimler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kâtip, A., Karaer, F., Özengin, N., Otomotiv sektörünün çevresel açıdan değerlendirilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 19(2): 51-66, 2014.
- [2] Otomotiv Sektörü Raporu, Sektörel Raporlar ve Analizler Serisi, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, 2019.
- [3] Plastics and Polymer Composites in Light Vehicles, Economics & Statistics Department, American Chemistry Council, 2020.
- [4] Plastics in Automotive Markets Technology Roadmap: A New Vision for the Road Ahead, American Chemistry Council, 2009.
- [5] Wu, H., Zhao, G., Wang, G., Zhang, W., Li, Y., A new core-back foam injection molding method with chemical blowing agents. Materials and Design, 144, 331–342, 2018.
- [6] Patil, A., Patel, A., Purohit, R., An overview of polymeric materials for automotive applications. Materials Today: Proceedings, 4, 3807–3815, 2017.
- [7] Wang, J., Chen, D., Flexural properties and morphology of microcellular-insert injection molded all-polypropylene composite foams. Composite Structures, 187, 403–410, 2018.
- [8] Liu, P.S., Chen, G.F., Producing polymer foams. Processing and Applications, Porous Materials, 345–382, 2014.
- [9] Mills, N.J., Foamed thermoplastics: microstructure and processing, Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide, Polymer Foams Handbook, 39–67, 2007.
- [10] Wang, G., Zhao, G., Dong, G., Mu, Y., Park, C.B., Lightweight and strong microcellular injection molded PP/talc nanocomposite. Composites Science and Technology, 168, 38-46, 2018.

- [11] Chang, E., Mahmud, M.B., Li, X., Mohebbi, A., Park, C.B., Optimizing chemical blowing agent content in foam injection molding process of polypropylene. Antec Anaheim, 1571-1574, 2017.
- [12] Unal, H., Yetgin, S.H., Enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle üretilen PP köpük malzeme özelliklerine kimyasal köpük ajanının etkisinin incelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey, 26-30, 2011.
- [13] Zhao, J., Wang, G., Zhang, L., Li, B., Wang, C., Zhao, G., Park, C.B., Lightweight and strong fibrillary PTFE reinforced polypropylene composite foams fabricated by foam injection molding. European Polymer Journal, 119, 22-31, 2019.
- [14] Ameli, A., Nofar, M., Jahani, D., Rizvi, G., Park, C.B., Development of high void fraction polylactide composite foams using injection molding: crystallization and foaming behaviors. Chemical Engineering Journal, 262, 78-87, 2015.
- [15] Wang, G. Zhao, J., Wang, G., Zhao, H., Lin, J., Zhao, G., Park, C.B., Strong and super thermally insulating in-situ nanofibrillar PLA/PET composite foam fabricated by high-pressure microcellular injection molding. Chemical Engineering Journal, 390, 124520, 2020.
- [16] Girijappa, Y.G.T., Ayyappan, V., Puttegowda, M., Rangappa, S.M., Parameswaranpillai, J., Siengchin, S., Plastics in automotive applications. Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers, 1-11, 2020.
- [17] Gümüş, E., Poli(etilen tereftalat)-polipropilen harmanlarının kristalizasyon özelliklerinin incelenmesi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [18] Smith, W.F., Polimer malzemeler. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 3. Baskıdan Çeviri, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 307-341, 2006.
- [19] Yalım, N., Polipropilen (PP)/etilen-propilen-dien-monomer (epdm) termoplastik vulkanizatlarının hazırlanması ve karakterizasyonu. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [20] Callister, W.D., Rethwisch, D.G., Polimer yapılar. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, 8. Baskıdan Çeviri, Nobel Yayıncılık, Ankara, 532-559, 2014.
- [21] Maier C., Calafut, T., Polypropylene. The Definitive User's Guide and Databook, Plastics Design Library, 3-9, 1998.

- [22] Turan, U., Kolemanit katkılı polipropilen malzemelerin kırılma davranışı. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [23] Kodal, M., Polipropilen ve dolgu maddeleri ile hazırlanan karışımların fiziksel ve kimyasal özelliklerinin incelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [24] Lee, S.T., Park, C.B., Ramesh, N.S., Introduction to polymeric foams. Polymeric Foams, Science and Technology, 1-21, 2007.
- [25] Nadeau A., A study of direct gas Injection foam extrusion of polyolefins for a wire coating application. Massachusetts Lowell Üniversitesi, Plastik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [26] Yetgin, S.H., Ünal, H., Polimer esaslı köpük malzemeler. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17, 117-128, 2008.
- [27] Sayer, S., Yalçın Melikoğlu, A., Termoplastik parça üretiminde mikrohücreli köpük teknolojisinin kullanımı. Mühendis ve Makina, 57 (678), 53-59, 2016.
- [28] Iliev, R.P., Processing of fine-cell polypropylene foams in compounding-based rotational foam molding. Toronto Üniversitesi, Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1999.
- [29] Yetgin, S. H., Otomotiv sektörü için polimer köpük malzeme üretimi ve karakterizasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitim Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 2012.
- [30] Bledzki, A.K., Faruk, O., Effects of the chemical foaming agents, injection parameters, and melt-flow index on the microstructure and mechanical properties of microcellular injection-molded wood-fiber/polypropylene composites. Journal of Applied Polymer Science, 97, 1090–1096, 2005.
- [31] Wouterson, E.M., Boey, F.Y.C., Hu, X., Wong, S.C., Specific properties and fracture toughness of syntactic foam: effect of foam microstructures. Composites Science and Technology, 65, 1840-1850, 2005.
- [32] Yuan, J., An, Z., Zhang, J., Effects of hollow microsphere surface property on the mechanical performance of high strength syntactic foams. Composites Science and Technology, 199, 108309, 2020.

- [33] Babat, V., Alüminyum, cam küre ve bor karbür ilaveli akrilonitril bütadien stiren (ABS) polimer kompozitinin mekanik, sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Eğitim Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [34] Gavgalı, E., Cam fiber/sentetik köpük/polimer kompozitlerin darbe ve burkulma davranışlarının belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [35] Yetgin, S.H., Ünal, H., Mimaroglu, A., Usability of injection moulded polypropylene and talc-epdm filled PP composite foam materials in automotive industry. *International Journal of Vehicle Design*, 71, 364-376, 2016.
- [36] Saraç, L., Plastik enjeksiyon kalıplama metodu ile üretilen plastik parçalarda birleşme izlerinin mekanik ve kozmetik özelliklerinin iyileştirilmesi. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [37] Yelkenci, Ş., Plastik enjeksiyon kalıplama teknikleri ve özel uygulamalar. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [38] Azgüler, O., Köpük ekstrüzyon yöntemiyle nanopartikül takviyeli polimerlerin özelliklerinin geliştirilmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [39] Shaayegan, V., Wang, G., Park, C.B., Study of the bubble nucleation and growth mechanisms in high-pressure foam injection molding through in-situ visualization. *European Polymer Journal*, 76, 2–13, 2016.
- [40] Wang, L., Hikima, Y., Ishihara, S., Ohshima, M., Fabrication of lightweight microcellular foams in injection-molded polypropylene using the synergy of long-chain branches and crystal nucleating agents. *Polymer*, 128, 119-127, 2017.
- [41] Lee, J.W.S., Wang, J., Yoon, J.D., Park, C.B., Strategies to achieve a uniform cell structure with a high void fraction in advanced structural foam molding. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(23), 9457–9464, 2008.
- [42] Villamizar, C.A., Han, C.D., Studies on structural foam processing II. bubble dynamics in foam injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 18, 699-710, 1978.

- [43] Han, C.D., Yoo, H.J., Studies on structural foam processing IV. bubble growth during mold filling. *Polymer Engineering and Science*, 21, 518-533, 1981.
- [44] Najib, N.N., Ariff, Z.M., Manan, N.A., Bakar, A.A., Sipaut, C.S., Effect of blowing agent concentration on cell morphology and impact properties of natural rubber foam. *Journal of Physical Science*, 20(1), 13–25, 2009.
- [45] Zhou, Q., Chuan-Bo, C., Exo-endothermic blowing agent and its foaming behavior,. *Journal of Cellular Plastics*, 41, 225-234, 2005.
- [46] Unal, H., Yetgin, S.H., Polipropilen köpük malzemenin mekanik özelliklerine ve hücre morfolojisine proses şartlarının etkisinin incelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey, 201-207, 2011.
- [47] Guo, M.C., Heuzey, M.C., Carreau P.J., Cell structure and dynamic properties of injection molded polypropylene foams. *Polymer Engineering and Science*, 47(7), 1070-1081, 2007.
- [48] Badem, İ., Polipropilen köpüklerde proses parametrelerinin mekanik, mikroyapı ve yüzey kalite özelliklerine etkisinin araştırılması. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Lif ve Polimer Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [49] Demirci, U., Köpük ajanı içeren polipropilenin plastik enjeksiyon kalıplanmasında çarpılmanın ve çevrim zamanının optimizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [50] Akkoyun, M., Badem, İ., Öztoksoy, M.E., Aslan, Y., Polypropylene/chemical blowing agent foams: effect of the injection speed and core back distance on microstructure and mechanical properties. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 638-647, 2020.
- [51] TS EN ISO 1183-1, Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics - Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method, 2019.
- [52] Lee, J.J., Cha, S.W., Characteristics of the skin layers of microcellular injection molded parts. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 45, 871–877, 2006.
- [53] ISO 180, Plastics - Determination of Izod impact strength, 2000.

- [54] ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, May 2015.
- [55] Uzun, H., Malzemelerin mekanik özellikleri, Mühendisler için Malzeme Biliminin Temel İlkeleri, Bölüm 8, 305-514, 2012.
- [56] ASTM D790-10, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, April 2010.
- [57] ASTM D2240-15, Standard Test Methods for Rubber Property - Durometer Hardness, 2017.
- [58] ISO 11357-1, Plastics - Differential scanning calorimetry (DSC) - Part 1: General principles (ISO 11357-1:2016), October 2016.
- [59] Schawe, J.E.K. Analysis of non-isothermal crystallization during cooling and reorganization during heating of isotactic polypropylene by fast scanning DSC. *Thermochimica Acta*, 603, 85–93, 2015.
- [60] Plastik Teknolojisi, Termal Analiz Uygulamaları, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, 24-26, 2014.
- [61] Babaei, I., Madanipour, M., Farsi, M., Farajpoor, A., Physical and mechanical properties of foamed HDPE/wheat straw flour/nanoclay hybrid composite. *Composites: Part B*, 56, 163–170, 2014.
- [62] Albooyeh, A., Eskandarzadeh, S., Mousavi, A., Influence of different foaming conditions on the mechanical, physical, and structural properties of polypropylene foam. *Mechanics of Advanced Composite Structures* 6, 225-237, 2019.
- [63] Yetgin, S.H., Ünal, H., PP ve PP/talk kompozitlerin mekanik ve köpüklenme özellikleri üzerine ergiyik sıcaklığı ve enjeksiyon basıncının etkilerinin incelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(1), 44-56, 2018.
- [64] Najafi, N., Heuzey, M.C., Carreau, P.J., Therriault, D., Park, C.B., Mechanical and morphological properties of injection molded linear and branched-poly(lactide (PLA) nanocomposite foams. *European Polymer Journal* 73, 455–465, 2015.
- [65] Meng, Z., Yuan, Q., Guo, W., Xia, Z., Zho, L., Hua, L., Cellular structure and mechanical strength of straw fiber/polypropylene plastics under chemical foam molding. *The Journal of The Textile Institute*, 112(1), 109–116, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : SEDEF ÇAKIR

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2021
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2017
Lise	80. Yıl Nuh Çimento Anadolu Lisesi	2013

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2019-2021	TÜBİTAK	Bursiyer Öğrenci
2018-2019	Sakarya Üniversitesi	Bursiyer Öğrenci

YABANCI DİL

İngilizce

ESERLER (makale, bildiri, proje vb.)

1. Termoplastik İç Trim Parçalarında Köpüklendirici Katkı Malzemeleri Kullanılarak Yeni Formül Geliştirilmesi, Parça Ağırlığı ile Enjeksiyon Çevrim Süresinin Azaltılması ve Parça Yüzeyi İyileştirilmesi, TUBİTAK Projesi, 5190030, Bursiyer Öğrenci, 2019-2021.
2. Cakir, S., Aycicek, M., Ozsoy, N., Ozsoy, M., Usta, M., Akinci A., “Using Foamed Polypropylene to Reduce Weight and Injection Cycle Time in Toyota CH-R SUV Door Panel Production”, El-Cezerî Journal of Science and Engineering, Vol. 8(2), 800-808, DOI: 10.31202/ecjse.893850, 2021.

3. Aycicek, M., Cakir S., Yuksel G., Akinci, A., “Development of Surface Features by Adding Nano Particles in Isophthalic Polyester Resin”, 7th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering, Turkey, 2020.
4. Otomotiv Endüstrisine Yönelik Doğal ve Sentetik Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Hafif Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Bilimsel Araştırma Projesi, 2017-0108-042, Bursiyer Öğrenci, 2017-2019.
5. Aycicek, M., Cakir, S., Akinci, A., “Prepare Foam with Injection Molding Method in Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Matrix Using Chemical Foam Agent”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(4), DOI: 10.18063/msacm.v2i4.917, 2018.
6. Cakir, S., Aycicek, M., Altun, E., Akinci, A., “The Effect of Foaming Agent on Mechanical and Physical Properties of Polypropylene”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(2), ISSN : 2529-7783, DOI:10.18063/msacm.v2i1.693, 2018.
7. Cakir, S., Aycicek, M., Akinci, A., “Investigation of The Mechanical and Physical Properties of PLA Produced by Injection Molding For Matrix Material of Polymer Composites”, Materials Science: Advanced Composite Materials, Vol. 2(1), ISSN : 2529-7783, DOI: 10.18063/msacm.v2i1.607, 2018.