

Talc/EPDM/Polipropilen polimer kompozit köpük üretimi ve üretim şartlarının optimize edilmesi

Production of Talc/EPDM/Polypropylene polymer composite foam and optimizing production conditions

Salih Hakan YETGİN^{*1,a}, Hüseyin ÜNAL^{2,b}

¹ Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya

• Geliş tarihi / Received: 24.12.2021

• Düzeltilecek geliş tarihi / Received in revised form: 09.06.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 17.06.2022

Öz

Bu çalışmada, talc ve etilen-propilen-dien-monomer (EPDM) katkılı polipropilen (T-EPDM-PP) kompozit köpüklerin hücre yapısı ve mekanik özelliklerine enjeksiyon proses şartlarının etkisi incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı, geri besleme basıncı, enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklığı gibi farklı proses şartları kullanılmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek için ise çekme testi ve darbe testi gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerin karşılaştırılabilmesi için köpüklendirilmemiş T-EPDM-PP polimer kompozit numuneleri de üretilmiştir. Elde edilen deneysel veriler Taguchi metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Köpüklerin hücre morfolojisi, farklı proses şartlarına bağlı olarak, stereomikroskop kullanarak kabuk tabakası kalınlığı (KTK), hücre boyutu ve hücre yoğunluğu açısından incelenmiştir. Enjeksiyon basıncı (E.B), enjeksiyon hızı (E.H) ve ergiyik sıcaklığı (E.S)'nin artması ile köpük numunelerin çekme ve darbe dayanımları azalırken geri besleme basıncının artması ile artmıştır. Kabuk tabakası kalınlığının artması ile kompozit köpüğün çekme ve darbe dayanımları artmıştır. Artan E.B ve enjeksiyon hızlarında hücre boyutu azalmıştır. Yüksek enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ile birlikte düşük geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı kullanıldığında yüksek hücre yoğunluğu elde edilmiştir. Artan E.B, E.H ve E.S ile köpük yoğunluğu azalmıştır. T-EPDM-PP esaslı kompozit köpük üretiminde yüksek çekme ve darbe dayanımı elde etmek için optimum proses parametreleri olarak geri besleme basıncı 100 bar, ergiyik sıcaklığı 160 °C, enjeksiyon hızı 60 mm/s ve enjeksiyon basıncı 60 bar olarak tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enjeksiyon köpük kalıplama, Köpük morfolojisi, PP, EPDM, Talc, Taguchi analizi

Abstract

The effect of injection process conditions on the cell structure and mechanical properties of talc and ethylene-propylene-diene-monomer (EPDM) filled polypropylene (T-EPDM-PP) composite foams was investigated. Different process conditions such as injection pressure, feedback pressure, injection speed and melting temperature were used. Tensile test and impact test were performed to determine the mechanical properties of the foam materials. In order to compare the mechanical properties, unfomed T-EPDM-PP polymer composite samples were also produced. Obtained experimental data were analyzed using the Taguchi method. The cell morphology of the foams was investigated in terms of skin layer thickness, cell size and cell density using a stereomicroscope, depending on different process conditions. With the increase of injection pressure, injection speed and melting temperature, the tensile and impact strengths of foam samples decreased, while it increased with the increase of the feedback pressure. The tensile and impact strengths of the composite foam increased with the increase in skin layer thickness. Cell size decreased with increasing E.B and EB. High cell density was obtained when low feedback pressure and melting temperature were used together with high injection pressure and injection speed. Foam density decreased with increasing E.B, E.H and E.S. In order to obtain high tensile and impact strength in T-EPDM-PP based composite foam production, optimum process parameters were determined as feedback pressure 100 bar, melting temperature 160 °C, injection speed 60 mm/s and injection pressure 60 bar.

Keywords: Injection foam molding, Foam morphology, PP, EPDM, Talc, Taguchi analysis

*a Salih Hakan YETGİN, shyetgin@gmail.com, Tel: (0324) 600 00 33, orcid.org/0000-0002-6068-9204

^b orcid.org/0000-0003-0521-6647

1. Giriş

1. Introduction

2020 yılından sonra üretilen araçlar için daha düşük bir CO₂ emisyon hedefi belirleyen Avrupa Birliği mevzuatı ışığında, araçlardaki yakıt tüketimini ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını azaltmak için araçların hafifletilmesi temel görevlerden biri haline gelmiştir. Otomobil parçalarının hafifletilmesi için son yıllarda oldukça yaygın bir şekilde kullanılan yöntemlerden birisi polimer matris bünyesinde çok sayıda gaz kabarcıklarının (hücrelerin) oluşturulmasıdır (Zhen vd., 2010; Yinping vd., 2020). Hücresel veya köpükendirilmiş polimerler farklı metotlarla fiziksel veya kimyasal köpük ajanları kullanılarak üretilmektedir (Zhen vd., 2010; Andrzej & Omar, 2006). Kimyasal köpük ajanları (KKA), proses sıcaklığında bozularak karbondioksit (CO₂) ve nitrojen (N₂) gibi gazları serbest bırakan katı malzemelerdir (Andrzej & Omar, 2006). Endotermik kimyasal köpük ajanları ise hem sitrik asit hem de sitrik asit ester içeren sodyum bikarbonat veya alkali karbonatlardır (Qin, 2006). Bozulma sonucu kalan katı artıklar çekirdekleyici ajan gibi davranır ve daha küçük hücre boyutu elde edilmesini sağlamaktadır (Andrzej & Omar, 2006).

Batch köpüklenme, ekstrüzyon köpüklenme ve enjeksiyon köpük kalıplama gibi birkaç çeşit köpük üretim yöntemi mevcuttur (Zhen vd., 2010). Bu yöntemlerin arasında enjeksiyon kalıplama prosesi, parça ölçü kararlılığı, kısa çevrim zamanı ve hafiflik gibi birçok avantaja sahiptir (Ming-Cheng vd., 2007; Altan & Demirci, 2018; Yinping vd., 2020). Ancak, ekstrüzyon ve batch prosesleri ile karşılaştırıldığında, enjeksiyon hızı, vida adımı ve ütüleme basıncı gibi ilave parametrelerin eklenmesi nedeniyle enjeksiyon köpük prosesinin kontrolü oldukça karmaşık ve zor olur. Her bir proses parametresi polimer köpüğün hücre morfolojisini ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu yüzden, proses şartlarının kontrolü köpük yapısının optimize edilmesi için oldukça önemlidir. Bununla ilgili literatürde daha önce yapılmış birçok çalışmaya rastlanmıştır. Wei ve arkadaşları (2014), plastik parçaların ağırlığını azaltmak ve ölçü kararlılığını geliştirmek için enjeksiyon kalıplama yöntemini kullanmışlardır. Ürettikleri polimer köpüklere sıcaklık, süre, basınç ve gaz miktarı gibi enjeksiyon proses parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Barzegari ve Rodrigue (2009) alçak yoğunluklu polietilen köpük yapısı üzerine köpük ajanı miktarının etkisi ile kalıp sıcaklığı, enjeksiyon basıncı ve ütüleme basıncı gibi enjeksiyon kalıplama proses parametrelerinin etkisini araştırmışlardır.

Villamizar ve Chang (1978), kalıp dolumu ve soğuma aşaması süresince yüksek yoğunluklu polietilen ve polikarbonat polimerlerinde kabarcıkların oluşumu ve büyümesi üzerine proses şartlarının (E.B, E.S ve kalıp sıcaklığı) ve kimyasal köpük ajanı miktarının etkisini çalışmışlardır. Chien ve arkadaşları (2004) proses şartlarının PP esaslı köpük malzemenin çekme dayanımı, eğme dayanımı ve rijitlik gibi mekanik özelliklere etkisini analiz etmişlerdir. E.H, E.S, kalıp sıcaklığı ve ütüleme basıncı gibi proses şartlarının etkisini incelemişler ve ağırlık azalımı ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde çalışmışlardır. Ayçiçek ve arkadaşları (2018) akrilo-nitril-bütadien-stiren (ABS) polimerini farklı oranlarda (%1, 1.5, 2, 2.5,3) kimyasal köpük ajanı kullanarak üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda ABS polimerine ilave edilen köpük ajanı miktarının artması ile polimer köpüğün Shore D sertliği ve darbe dayanımı azalmıştır. Heidari ve Fasihi (2019) %2 oranında azodikarbonamit ve sodyum bikarbonat gibi iki farklı kimyasal köpük ajanı kullanarak ürettikleri talk katkılı PP/poliolen- elastomer (POE) karışımının darbe dayanımı üzerine hücresel yapının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında sodyum bikarbonatın daha büyük hücre boyutu ve hücre duvar kalınlığı oluşturduğu tespit edilmiştir. Hem katkısız hem de polimer karışımı köpüklerin darbe dayanımlarının köpük özellikleri ve yapısı ile yakından ilişkili olduğu belirlenmiştir. Artan POE miktarı ile polimer karışımı köpüklerin darbe dayanımı %400 oranında artarken hücre boyutu ve hücre duvar kalınlığı azalmıştır. Daha büyük hücre duvar kalınlığına sahip köpüklerin darbe dayanımlarını iyileştirdiği de belirlenmiştir. Palutkiewicz ve arkadaşları (2020) köpük ajanı miktarı (%1-2), talk (%10-20) ve enjeksiyon hızı gibi değişkenlerin PP esaslı kompozit köpüklerin hücre morfolojisi ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında PP polimer bünyesindeki köpük ajanı miktarı ve talk içeriğinin mekanik özelliklere önemli oranda etki ettiği, ağırlıkça %2 oranında köpük ajanı miktarında çevrim zamanının kısaldığı belirtilmiştir. PP bünyesindeki köpük ajanı miktarının artması ile malzemenin çekme dayanımı, sertlik ve darbe dayanımı değerlerinin azaldığı belirtilmiştir. Talk mineral katkısı, parçaların ağırlığını artırırken sertlik, darbe dayanımı ve çekme dayanımını azaltmıştır. Enjeksiyon hızının köpük parçalar üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı gözlenmemiştir. Literatür incelendiğinde farklı polimer malzemeler bünyesinde talk katkının, köpük ajanı katkı oranı ve proses şartları üzerine çalışmalar olduğu görülmektedir. Ancak talk mineral katkısı ile EPDM elastomeri ve

polipropilen kombinasyonu ile yapılan literatürde daha önce yapılmış bir çalışma olmadığı gözlenmiştir. Özellikle otomotiv sektöründe hafifletmeyi sağlamak ve bu konuya ışık tutmak için otomotiv parçaları arasında oldukça önemli olan ön ve arka tamponların hafifletilmesi için bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

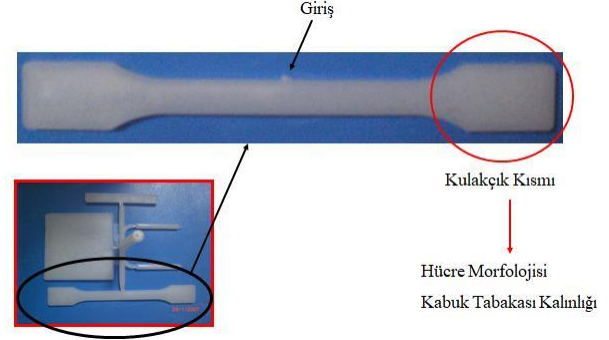
Bu çalışmada, Talk/EPDM katkılı PP esaslı köpükler, E.B, E.H, geri besleme basıncı ve E.S gibi parametreler kullanarak enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Mekanik özelliklerin yanı sıra kompozit köpük malzemenin K.T.K, hücre boyutu ve hücre yoğunluğu gibi köpük morfolojisini etkileyen enjeksiyon proses şartları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen mekanik özellikler ile K.T.K, hücre boyutu ve hücre yoğunluğu gibi köpük morfolojisini etkileyen enjeksiyon proses şartları Taguchi metodu ile analiz edilmiştir.

2. Materyal ve metod

2.1. Material and method

Bu çalışmada, 17 g/10dak. (230°C/2.16kg) ergime akış indeksine ve 1.0g/cm³ yoğunluğa sahip ağırlıkça %20 oranında talk/EPDM katkılı polipropilen malzemesi kullanılmış olup TRC 103P kodlu Lyondell Basell firmasından temin edilmiştir. Köpüklendirme işlemlerinde, Foaming MB-FA 2984 PE kodlu kimyasal köpük ajanı kullanılmış olup Tosaf firmasından temin edilmiştir. Kimyasal köpük ajanı 140 °C bozulma sıcaklığına ve 130 ml/gr bozulma miktarına sahip olup, köpük ajanı bozduğunda, açığa çıkan gaz, karbon monoksit, karbon dioksit ve bazı amonyak ürünlerini içermektedir. Köpüklendirme işleminde geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi kullanılmış olup köpük ajanı miktarı %1 olarak sabitlenmiştir. Köpüklendirilmemiş T-EPDM-PP kompozit üretiminde 100 bar EB, 100 mm/s EH, 100 bar geri besleme basıncı ve 163-160-160 °C sıcaklık dağılımı kullanılmıştır. Köpüklendirme işleminden önce granül formundaki T-EPDM-PP kompoziti ve köpük ajanı mekanik olarak karıştırılmış ve 150 ton kapasiteli geleneksel enjeksiyon kalıplama yöntemi ile köpüklendirme işlemleri yapılmıştır. Üretimlerde çevrim zamanı 27 s ve soğutma zamanı ise 10 s olarak belirlenmiştir. Farklı enjeksiyon parametreleri kullanılarak polimer köpüklerin üretilmesinden sonra hücresel yapıda meydana gelen değişimleri incelemek için Şekil 1'de gösterildiği gibi standartlara uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri kullanılmıştır. Polimer köpüğün kulakçık kısımlarında oluşan köpük yapısındaki değişimleri görmek için hücre morfolojisi ve kabuk

tabakası incelemeleri bu bölgede gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kulakçık kısmı, kesikli çizgi ile gösterilen yerlerden kesilmiştir. Kesilen kısımların kesiti alınarak bu bölgelerde hücre morfolojisi ve kabuk tabakası incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

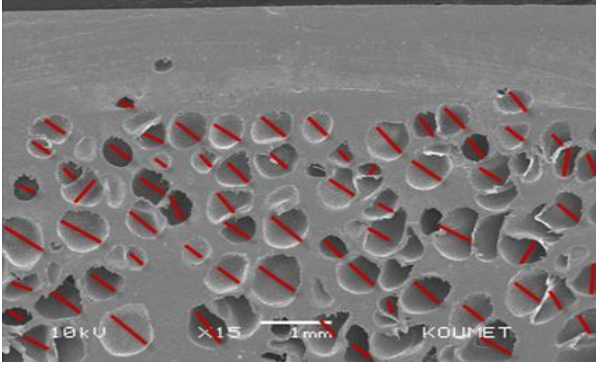


Şekil 1. Standartlara uygun çekme deneyi ve hücre morfolojisi numunesi

Figure 1. Tensile test and cell morphology sample in accordance with standards

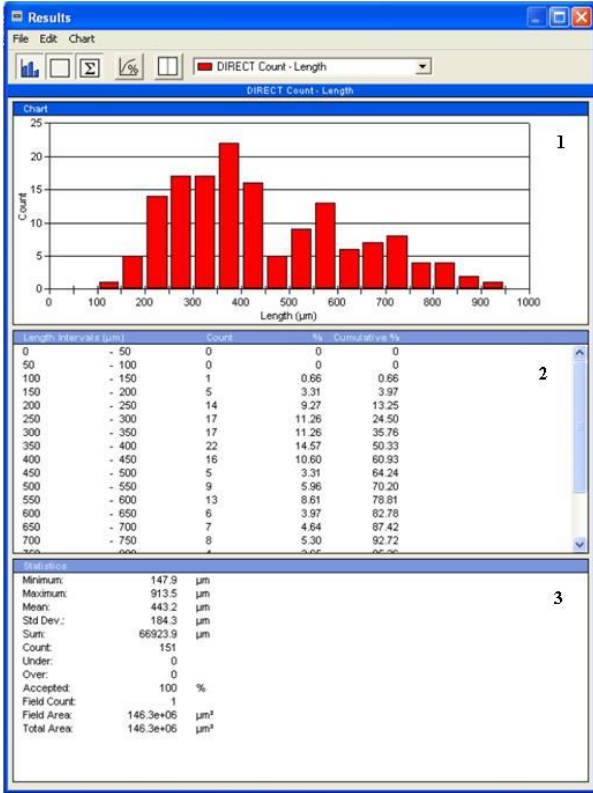
Şekil 2'de ise örnek olarak hücre boyutunun analiz programı yardımıyla belirlenmesi gösterilmiştir. Mikroyapı üzerinde belirgin olan bütün hücrelerin boyut ölçümleri yapılmıştır. Küresel olan hücrelerin boyutları merkezinden geçen tek bir doğru ile belirlenirken elips şeklinde olan hücrelerin boyutlarının ölçümünde büyük ve küçük çaptan geçen iki doğru çizilerek ortalaması alınmıştır. Şekil 3'te ise, Şekil 2'deki ölçümlerin sonucunda elde edilen ve üç kısımdan oluşan sonuç sayfası verilmiştir. Birinci kısımda yer alan grafikte, örneğin hücre boyutu inceleniyorsa, x eksenini hücre boyutu dağılımını, y eksenini ise ölçümü yapılan hücre boyutu sayısını göstermektedir. İkinci kısımda ise ölçüm yapılan hücre boyutlarının hangi aralıkta kaç adet olduğunu gösteren Excel program çıktısı bulunmaktadır. Son kısımda ise minimum, maksimum, ortalama, standart sapma, ölçüm sayısı ve yüzey alanının bulunduğu, analiz sonuçlarının temelini oluşturan kısım bulunmaktadır. Hücre boyutu ölçümlerinin sonucunda elde edilen grafiğin üçüncü kısmı incelendiğinde, "maximum" yazan kısım, maksimum hücre boyutunu, "minimum" yazan kısım minimum hücre boyutunu, "mean" yazan kısım ortalama hücre boyutunu, "Std. Dev." yazan kısım standart sapma miktarını, "Count" yazan kısım birim alanda kaç adet hücre boyutunun ölçüldüğünü, "Field Area" yazan kısım ise incelenen mikroyapının alanını ifade etmektedir. Bu kısımda yer alan, mikro yapının alanı (Field Area) ve mikroyapıda ölçülen hücre boyutu adedi (Count), birim hacimdeki hücre yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılmıştır. Deneylerde

kullanılan tüm köpükendirilmiş numunelerin her biri için ortalama hücre boyutunun ve birim alandaki hücre sayısının belirlenmesinde bu işlemler yapılmıştır (Yetgin, 2012). Polimer köpüklerin kabuk tabakası kalınlığı ölçümleri mikroyapı resimleri kullanılarak analiz programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te gösterildiği gibi alt ve üst kabuk tabakası kalınlıkları, numunenin bittiği (referans çizgisi) noktadan ilk hücrenin görüldüğü noktaya olan mesafenin ölçülmesi ile belirlenmiştir.



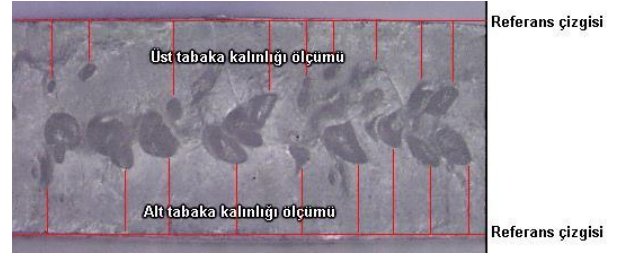
Şekil 2. Hücre boyutunun analiz programı kullanılarak ölçülmesi (Yetgin, 2012)

Figure 2. Measurement of cell size using the analysis program



Şekil 3. Hücre boyutu ölçümü sonrasında elde edilen program çıktısı (Yetgin, 2012)

Figure 3. Program output obtained after cell size measurement



Şekil 4. Alt ve üst tabaka kalınlıklarının ölçülmesi (Yetgin, 2012)

Figure 4. Measurement of the bottom and top layer thicknesses

Çekme testleri MIRC 350 Tensometer test cihazında ASTM 638 standardına uygun olarak 50mm/dak. çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Darbe testleri ISO 179 standardı kullanılarak Zwick B 5113 cihazında oda sıcaklığında (23 °C) yapılmıştır. En az 5 adet test yapılmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. T-EPDM-PP kompozit köpük numunelerin hücre morfolojisi incelemelerinde ise çekme numunelerinin orta kısmı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri Clemex Vision Lite görüntü analiz programı adapte edilmiş Nikon Eclipse L150A optik mikroskobu ile yapılmıştır. Köpük yoğunluğu ISO 1183 standardına göre belirlenmiştir.

Denklem 1 ile birim hacimdeki hücre yoğunluğu (N_f) belirlenmiştir (Kumar & Suh, 1990). Burada, N_f : Birim hacimdeki hücre yoğunluğu, hücre/cm³, n : Optik mikroskopta elde edilen hücre sayısı'dır (Bkz. Şekil 3'te, "Count" olarak elde edilen sayıdır), A : Optik mikroskopta elde edilen görüntünün alanı, µm, (Bkz. Şekil 3'te, "Field Area" olarak elde edilen sayıdır), M : Büyütme faktörüdür.

$$N_f = \left(\frac{n \times M^2}{A} \right)^{3/2} \quad (1)$$

Denklem 2 ile köpüksüz numunenin 1 cm³'ündeki hücre sayısı (N_0) belirlenmiştir. Burada, V_f : polimer köpükteki yoğunlukta azalma miktarıdır. Polimer köpük malzemelerindeki yoğunlukta azalma miktarı ise köpükendirilmemiş ve köpükendirilmiş polimerlerin yoğunluklarına bağlı olarak Eşitlik 3'teki gibi hesaplanmıştır (Wentao vd., 2006).

$$N_0 = \frac{N_f}{1 - V_f} \quad (2)$$

$$V_f = 1 - \frac{\rho_{köpük}}{\rho_{polimer}} \quad (3)$$

Taguchi deneysel planında L9 ortogonal dizileri Tablo 1'de gösterildiği gibi yapılmıştır. L9 deneyleri, üç farklı seviyede ve dört farklı kalıplama parametresi içermektedir. Deneysel sonuçlar, sinyal/gürültü (signal-to-noise, S/N) oranına dönüştürülmüştür. Bu çalışmanın amacı, enjeksiyon kalıplama yöntemi ile kalıplanmış numunelerin ortalama hücre boyutunu, kabuk tabakası kalınlığını ve köpük yoğunluğunu en aza indirmek, hücre yoğunluğunu, çekme ve darbe mukavemetlerini ise en üst düzeye çıkarmaktır. Bu nedenle, daha düşük ortalama hücre boyutu, kabuk

tabakası kalınlığı ve köpük yoğunluğu için, Denklem 4'te verilen “küçük olan en iyisi” ve yüksek hücre yoğunluğu, çekme ve darbe mukavemeti için Denklem 5'te verilen “büyük olan en iyisi” S/N fonksiyonları kullanılmıştır. Burada, y_i : deneysel ölçümler ve y_i : deney sayısıdır.

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}{n} \right) \quad (4)$$

$$S/N = -10 \times \log \left(\frac{1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2}{n} \right) \quad (5)$$

Tablo 1. L9 ortogonal dizileri

Table 1. L9 orthogonal arrays

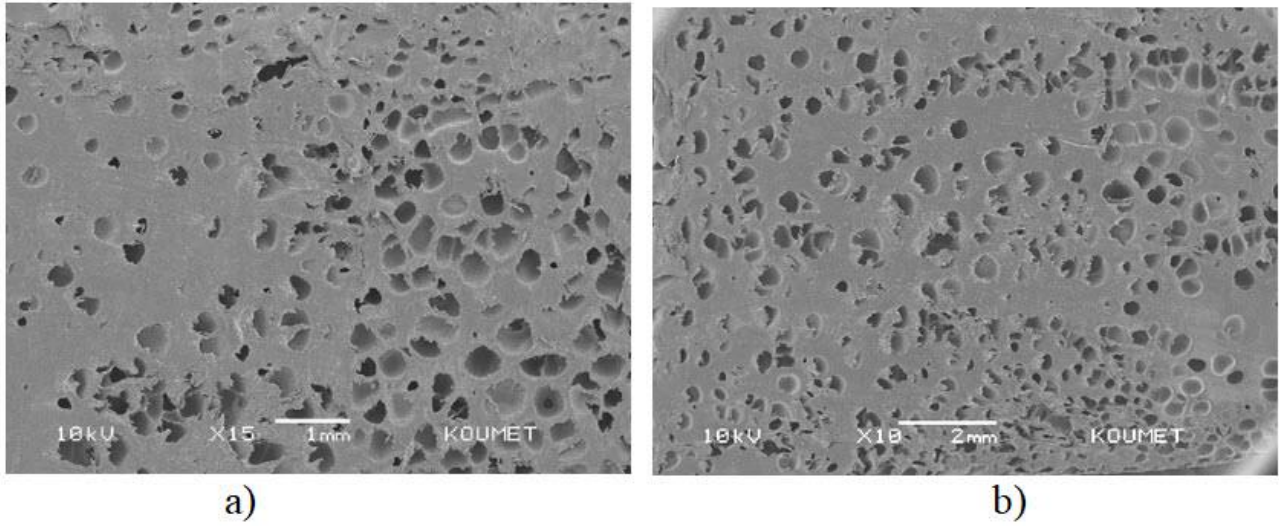
Deneme	Enjeksiyon basıncı, (E.B)		Enjeksiyon hızı, (E.H)		Geri besleme basıncı		Ergiyik sıcaklığı, (E.S)	
	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre	Seviye	Parametre
1	1	60	1	60	1	20	1	160
2	1	60	2	80	2	60	2	170
3	1	60	3	100	3	100	3	180
4	2	80	1	60	2	60	3	180
5	2	80	2	80	3	100	1	160
6	2	80	3	100	1	20	2	170
7	3	100	1	60	3	100	2	170
8	3	100	2	80	1	20	3	180
9	3	100	3	100	2	60	1	160

3. Bulgular ve tartışma

3. Results and discussion

Tablo 2’de L9 ortogonal tasarıma göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen morfolojik ve mekanik deney sonuçları verilmiştir. Şekil 5’te ise farklı enjeksiyon kalıplama parametreleri (Deneme 3 ve 5 için) kullanılarak üretilen kompozit hücre yapılarının taramalı elektron mikroskobu (SEM)’nda alınan görüntüleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yapıdaki hücreler matris bünyesinde hemen hemen homojen olarak dağılmış ve kapalı gözenek yapısına sahip hücrelerin oluştuğu gözlenmiştir. Polimer köpüklerin hücre morfolojisi, köpük ajanı miktarının yanında enjeksiyon kalıplama proses parametrelerine de

önemli oranda bağlıdır. Şekil 5a ve 5b karşılaştırıldığında Şekil 5a’da daha büyük hücreler gözlenirken 5b’ de ise daha küçük hücreler oluştuğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi proses parametreleri ile ilişkilidir. Şekilde görüldüğü gibi E.B, E.H ve E.S dahil olmak üzere diğer kalıplama koşullarının da hücre çekirdeklenmesini ve büyümesini ve dolayısıyla hücre yapısını etkilediği görülmektedir. Çekirdeklenen hücrelerin sayısının artması köpük yapısındaki hücre sayısını artırıp sistemdeki mevcut gazın hızlı bir şekilde tüketilmesini ve dolayısıyla hücre boyutunun daha düşük elde edilmesini sağlayacaktır.



Şekil 5. Farklı enjeksiyon kalıplama proses parametrelerinde T-EPDM-PP kompozitin hücre yapısı, a) Deneme 3 ve b) Deneme 5

Figure 5. Cell structure of T-EPDM-PP composite at different injection molding process parameters, a) Trial 3 and b) Trial 5

Tablo 2. Morfolojik ve mekanik deney sonuçları

Table 2. Morphological and mechanical test results

Deneme	Hücre çapı (μm)	Hücre yoğunluğu (10^3 cells/ cm^3)	Kabuk tabakası kalınlığı (μm)	Köpük yoğunluğu (g/cm^3)	Çekme dayanımı (MPa)	Darbe dayanımı (kJ/m^2)
Köpüklendirilmemiş	-	-	-	-	16.11	146.5
T-EPDM-PP						
1	213	5.65	1920	0.938	13.97	129.2
2	222	6.26	1760	0.916	13.68	131.8
3	236	5.47	1740	0.898	13.00	121.9
4	242	5.10	1678	0.868	12.85	121.2
5	198	6.22	1840	0.887	14.00	123.1
6	166	7.88	1522	0.826	13.02	101.8
7	217	4.58	1610	0.896	13.27	118.1
8	177	7.69	1235	0.804	12.24	101.0
9	159	9.51	1380	0.847	13.04	105.1

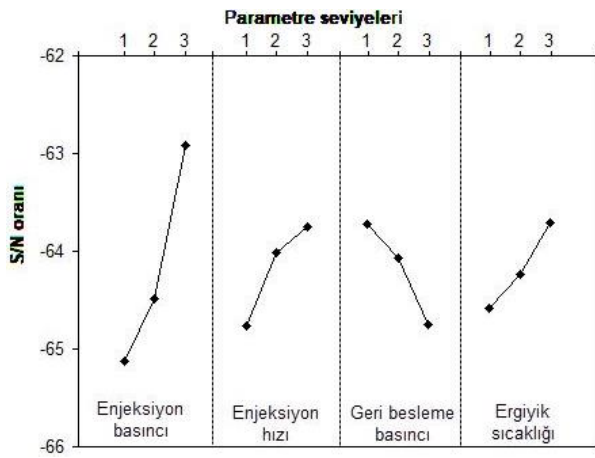
3.1. Proses şartlarının kabuk tabakası kalınlığına etkisi

3.1. Effect of process conditions on skin layer thickness

Şekil 6'da T-EPDM-PP polimer kompozit köpük numunelerin kabuk tabakası kalınlığına proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Kabuk tabakası kalınlığı için "düşük olan en iyisi" formülü uygulanmıştır. Şekil incelendiğinde yüksek E.B, yüksek E.H ve yüksek E.S ile düşük geri besleme basınçlarında en yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Düşük kabuk tabakası kalınlığı için optimum proses şartları 100 bar E.B,

100 mm/s E.H, 20 bar geri besleme basıncı ve 180 °C E.S altında elde edilmiştir. Artan E.B, E.H ve E.S ile kabuk tabakası kalınlığı azalırken artan geri besleme basıncı ile kabuk tabaka kalınlığı artmıştır. Ayrıca, T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin kabuk tabakası kalınlığını etkileyen en önemli parametrenin enjeksiyon basıncı olduğu belirlenmiştir. Enjeksiyon basıncının artması ile kabuk tabakası kalınlığının azalmasının viskozite ve soğuk kalıp ile temas eden sıcak polimerin temas süresinin azalması ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Enjeksiyon basıncı ile artan basınç azalım oranı kabuk tabakası kalınlığını azaltmıştır (Barzegari & Rodrigue, 2009). Kabuk tabakası

kalınlığının hücre boyutu ve hücre sayısı ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir (Heidari & Fasihi, 2019). Ergiyik haldeki polimerin reolojik özellikleri hem hücre büyümesi hem de hücrelerin kararlılığı açısından önemli bir parametredir. İki fazlı polimer-gaz çözeltisinin reolojik özellikleri, kayma oranına, köpük ajanı miktarına, ergiyik ve kalıp sıcaklığına bağlıdır (Barzegari & Rodrigue, 2009). Yüksek kayma viskozitesi, büyük basınç azalımı oluşturur ve daha fazla çekirdeklenme alanlarının oluşumuna katkı sağlamaktadır (Xiangmin vd., 2003). Aynı zamanda, artan viskozite büyüyen hücrelerden gaz kaybı meydana geldiğinde, hücrelerin birleşmesini ve/veya çökmesini engellemektedir (Spitael & Christopher, 2004).



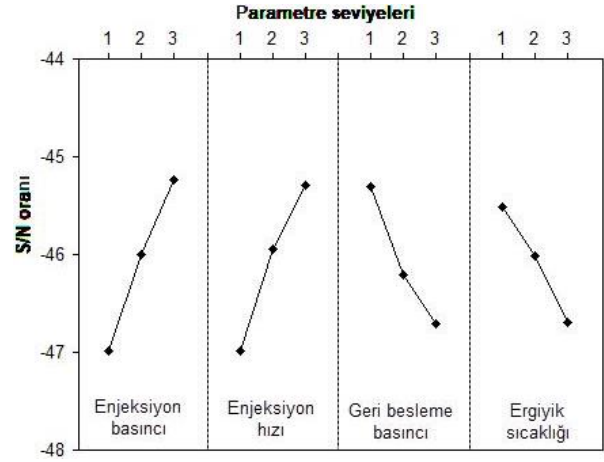
Şekil 6. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının kabuk tabakası kalınlığına etkisi
Figure 6. The effect of the process conditions on the skin layer thickness of T-EPDM-PP polymer composite

3.2. Proses şartlarının hücre boyutuna etkisi

3.2. Effect of process conditions on cell size

Şekil 7’de ise T-EPDM-PP köpük numunelerin hücre boyutuna proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Küçük hücre boyutu için “küçük olan en iyisi” formülü uygulanmıştır. Şekil incelendiğinde, yüksek E.B ve yüksek E.H ile düşük geri besleme basıncı ve E.S kullanıldığında en yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Artan E.B ve enjeksiyon hızlarında hücre boyutu azalmıştır. Yüksek basınç ve hızlarda, kalıp girişinde premature kabarcık oluşma ihtimali azalacaktır. Hücrelerin oluşumu kalıp içerisinde başlayacak ve dolayısıyla hücre boyutu azalacaktır. Ayrıca yüksek basınç altında polimer malzemenin rijitliği artacak ve hücrelerin büyümesi için daha fazla enerji gerekecektir, dolayısıyla hücre boyutu önemli oranda azalacaktır. Tejada ve arkadaşları (2005) ise

polietilen/polipropilen karışımına ilave ettikleri ikinci bir fazın hücrelerin çekirdeklenme oranını artıracak ve köpük numunelerin azalan hücre boyutu ile yüksek hücre yoğunluğuna sahip olacağını belirtmişlerdir.

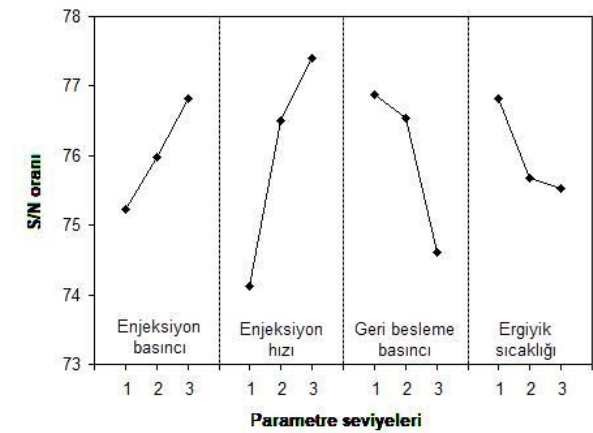


Şekil 7. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının hücre boyutuna etkisi
Figure 7. The effect of the process conditions on the cell size of T-EPDM-PP polymer composite

3.3. Proses şartlarının hücre yoğunluğuna etkisi

3.3. Effect of process conditions on cell density

Barzegari ve Rodrigue (2009) tarafından yapılan çalışmada hücre çekirdeklenme oranının hücre yoğunluğunu önemli oranda etkilediği belirtilmiştir. Eğer, polimer-gaz karışımına ait basıncın, çözünürlük basıncı altına düştüğünde hücrelerin çekirdekleneceği belirtilmiştir. Şekil 8’de köpük hücre yoğunluğu için daha yüksek S/N oranının daha iyi olduğu anlamına gelen “büyük olan en iyisi” S/N formülü uygulanarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir.



Şekil 8. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının hücre yoğunluğuna etkisi
Figure 8. The effect of the process conditions on the cell density of T-EPDM-PP polymer composite

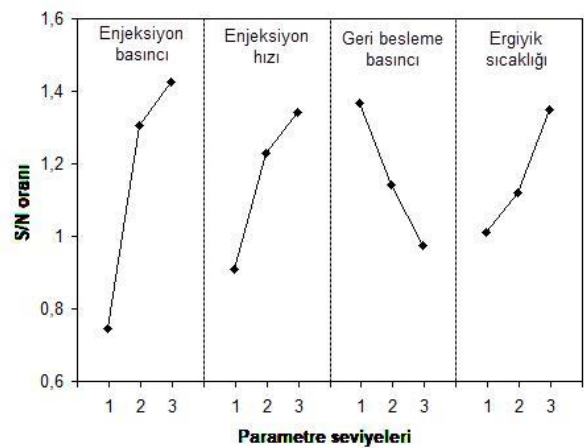
Yüksek enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ile birlikte düşük geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı kullanıldığında yüksek S/N oranı elde edilmiştir. Bilindiği gibi hücre yoğunluğu polimer ergiyik içerisindeki çekirdeklenme oranı ile yakından ilişkilidir. Çekirdeklenme meydana geldiğinde, gaz molekülleri mevcut çekirdeklenen hücelere doğru difüze olacaktır. Dolayısıyla her bir hücrenin büyüme miktarı gazın miktarı ile ilişkilidir. Artan enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı ergiyik polimerdeki köpük ajanının bozunma miktarını ve bozunma sonucu açığa çıkan gaz miktarını artıracaktır. Dolayısıyla hücre çekirdeklenmesi ve hücre yoğunluğu (birim hacimdeki hücre sayısı) artacaktır. Artan ergiyik sıcaklığı ise viskoziteyi ve basınç azalım oranını azaltacağından dolayı çekirdeklenme oranı azalacaktır. Benzer bir açıklama [Heidari ve Fasihi \(2019\)](#) tarafından yapılmış ve %2 oranında azodikarbonamit ve sodyum bikarbonat gibi iki farklı köpük ajanı ile üretilen talk katkılı PP/poliolenin-elastomer (POE) karışımında, çekirdeklenme karakteristiğinin hücre boyutunu azalttığı ve hücre yoğunluğunu (sayısını) artırdığı belirtilmiştir. Hücrelerin çekirdeklenmesi ile birlikte köpük ajanının bozunması sonucu ortaya çıkan gaz molekülleri çekirdeklenmiş hücelere difüze olacaktır. Oluşan hücrelerin büyümesi köpük ajanı miktarı ve polimerin ergiyik dayanımına bağlıdır. Düşük E.B, ergimiş polimerdeki gazın tamamını çözmekte ve daha düşük genleşme oranı elde edilmektedir. Artan E.B ile köpük ajanının bozunması artmakta ve hücre çekirdeklenmesi ve büyümesi meydana gelmektedir ([Barzegari & Rodrigue, 2009](#)). Yüksek E.B ile oluşan yüksek basınç azalım oranı çekirdeklenme için gerekli olan serbest entalpiyi (ΔG^*) azaltmakta ve çekirdeklenme oranı artmaktadır. Hücre sayısı basınç azalım oranının artmasıyla önemli oranda artmıştır ([Larissa vd., 2009](#)). Hücrelerin oluşumu ve hücre büyümesi için sistemdeki mevcut enerjinin hücre oluşum enerjisinden daha yüksek olması gerekmektedir. Eğer sistemdeki bu enerji hücre oluşum enerjisinden daha düşük olduğunda hücreler çökecektir. Homojen hücre çekirdeklenmesi için Eşitlik 6'da verilen aktivasyon enerjisi (Gibbs serbest enerjisinin) (ΔG^*_{hom}) ve basınç azalımı arasındaki ilişki verilmiştir ([Martial vd., 2011](#); [Colton & Suh, 1987](#)). Burada; ΔG^*_{hom} : şekillenen kritik bir çekirdeğin Gibbs serbest enerjisi, γ_{bp} : polimerin yüzey enerjisi, ΔP : kabarcık içerisindeki ve matris çevresindeki gaz basıncı arasındaki fark (gaz doyma basıncı) ([Leung vd., 2012](#); [Christopher & Monika, 2008](#); [Wentao vd., 2006](#)).

$$\Delta G^*_{hom} = \frac{16 \cdot \pi \cdot \gamma_{bp}^3}{3 (\Delta P)^2} \quad (6)$$

3.4. Proses şartlarının köpük yoğunluğuna etkisi

3.4. Effect of process conditions on foam density

Şekil 9'da T-EPDM-PP polimer kompozit köpük numunelerin köpük yoğunluğuna proses şartlarının etkisini gösteren S/N ana etki grafiği verilmiştir. Köpük yoğunluğunu daha düşük elde etmek için "küçük olan en iyisi" formülü uygulanmıştır. Şekil 9'da görüldüğü gibi artan E.B, E.H ve E.S ile köpük yoğunluğu azalmıştır. Enjeksiyon basıncı köpük yoğunluğu üzerine önemli bir etkiye sahipken geri besleme basıncı ve ergiyik sıcaklığı köpük yoğunluğunu daha az etkilemiştir. Azalan köpük yoğunluğu 20 bar geri besleme basıncı, 180 °C E.S, 100 mm/s E.H ve 100 bar E.B şartlarında elde edilmiştir. [Tsivintzelis ve arkadaşları \(2007\)](#), köpük ajanının çözünme miktarının artması ile hücrelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi için ve aynı zamanda çekirdek alanlarının oluşması için büyük öneme sahip olan enjeksiyon basıncının yüksek değerlerde kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Tapılan çalışma sonucunda artan enjeksiyon basıncı ile birlikte artan hücre sayısı ve azalan hücre boyutlarına sahip düşük köpük yoğunluklu polimerler elde edildiğini belirtmişlerdir. [Barzegari ve Rodrigue \(2009\)](#), enjeksiyon basıncının polimer köpük yoğunluğunu en çok etkileyen parametre olduğunu belirtmişlerdir. Çekirdeklenme miktarının basınç değişiminden daha fazla etkilendiği belirtilmiştir.



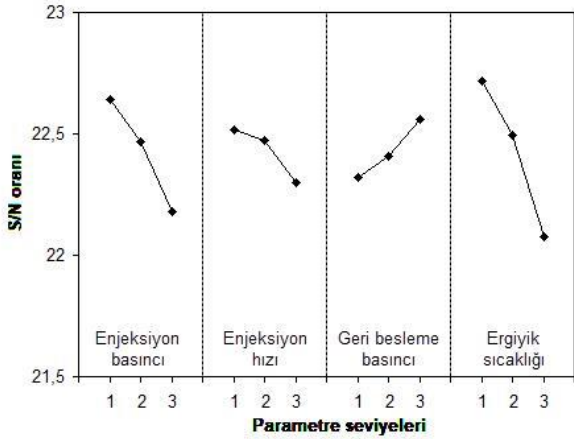
Şekil 9. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının köpük yoğunluğuna etkisi

Figure 9. The effect of the process conditions on the foam density of T-EPDM-PP polymer composite

3.5. Proses şartlarının mekanik özelliklere etkisi

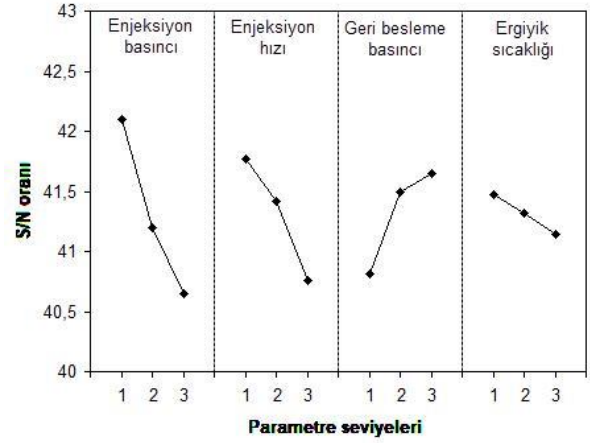
3.5. Effect of process conditions on mechanical properties

Şekil 10'da farklı enjeksiyon kalıplama şartlarının T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin çekme dayanımı üzerine etkileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi köpük numunelerin çekme dayanımlarını etkileyen en önemli parametrenin ergiyik sıcaklığı olduğu gözlenirken sonrasında sırası ile enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve geri besleme basıncı olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi enjeksiyon proses parametrelerinden olan yüksek geri besleme basıncı hücre yoğunluğunu azaltmasına sebep olmaktadır. Bu ise kabuk tabakası kalınlığının artmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda ise köpük malzemenin çekme dayanımı artmaktadır. Ayrıca, yüksek E.B ve E.H, yüksek basınç azalım oranı ile sonuçlanmaktadır ve bu durum çekirdeklenen hücrelerin sayısını artırmakta ve daha küçük hücrelerin oluşumuna sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak köpük malzemenin çekme dayanımı azalmaktadır. En yüksek çekme dayanımı 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C E.S, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B kullanıldığında elde edilmiştir.



Şekil 10. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının çekme dayanımına etkisi

Figure 10. The effect of the process conditions on the mechanical properties of T-EPDM-PP polymer composite



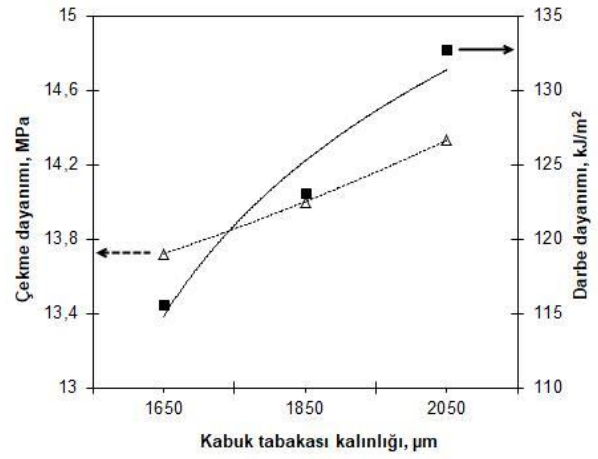
Şekil 11. T-EPDM-PP polimer kompozitin proses şartlarının darbe dayanımına etkisi

Figure 11. The effect of the process conditions on the impact strength of T-EPDM-PP polymer composite

Şekil 11'de ise darbe dayanımı için "büyük olan en iyisi" S/N formülü uygulanarak elde edilmiş sonuçlar verilmiştir. T-EPDM-PP polimer köpüklerin darbe dayanımı artan E.B, E.H ve E.S ile azalırken geri besleme basıncı ile artmıştır. Proses şartları içerisinde en etkili parametrenin enjeksiyon basıncı olduğu belirlenmiştir. Yüksek enjeksiyon basıncı daha fazla hücre oluşmasına (Şekil 3) sebep olarak darbe dayanımını azaltmıştır. En yüksek darbe dayanımı 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C E.S, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B şartlarında elde edilmiştir. T-EPDM-PP polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin azalmasında artan hücre sayısı ve buna bağlı olarak azalan K.T.K sebep olmuştur. Wong ve arkadaşları (2008) azalan K.T.K ile polimer malzemenin miktarının azaldığı belirtilmiştir. Minoru ve arkadaşları (2007) kesitteki azalma ve gözenekler nedeniyle oluşan gerilim yığılmaları nedeniyle polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin azaldığını belirtmişlerdir. Kabuk tabakasının mekanik özellikler üzerinde baskın olduğu ve köpüklü numunelerin mekanik özelliklerinin hücre boyutu ve dağılımını kapsayan köpük yoğunluğuna da bağlı olduğu belirtilmiştir (Andreas & Altstadt, 2007). Mengeloğlu ve Laurent (2003) yaptığı çalışmada büyük hücre boyutunun çatlak veya hata gibi davrandığı ve hata başlangıcına sebep olduğu ve PVC kompozitlerin rijitliğinin azaldığı belirtilmiştir. Farklı bir açıklama ise Rodriguez-Perez (2009) tarafından yapılmıştır. Hücre boyutunun elastik bölgede çalışması durumunda rijitliği etkilemediği belirtilmiştir. Park ve Cheung (1997) ise yaptığı çalışmada büyük hücre boyutlu ve açık hücreli morfolojinin köpükte düzensiz bir yapı oluşturduğu ve bu durumda gerilim yığılmalarına sebep olduğu belirtilmiştir. Yuan ve

arkadaşları (2004), yaptığı çalışmada küçük ve yoğun mikrohücrelerin oluşması ile yüksek darbe dayanımı elde edildiğini ve aynı zamanda köpüksüz polimer ile karşılaştırıldığında çekme dayanımındaki azalma oranının azaldığını belirtmişlerdir. Ancak, Doroudiani ve Kortschot (2003) ise PS köpüklerde hücre morfolojisinin darbe direncine etkisini inceledikleri çalışmada, hücre boyutunun, köpüğün darbe dayanımını etkilemediğini, köpüğün darbe dayanımı üzerine relatif yoğunluğunun daha fazla etki ettiğini belirtmişlerdir.

Enjeksiyon kalıplama prosesi ile üretilen numuneler kabuk tabakası bölgesi ve çekirdeklenmiş bölge olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır (Jae & Sung, 2004). Kabuk tabaka bölgesi, köpük numunede köpüklenmemiş bölge olarak adlandırılırken sıcak ergiyik polimer ile soğuk kalıp duvarları arasındaki yüksek ısı transferi nedeniyle oluşmaktadır (Blanchet & Rodrigue, 2004). Oluşan bu kabuk tabakasının kalınlığı köpük malzemenin çekme dayanımı ve darbe dayanımını önemli oranda etkilemektedir. Şekil 12’de enjeksiyonla kalıplama yöntemi ile üretilen T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin K.T.K ile çekme ve darbe dayanımlarındaki değişim verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi artan K.T.K ile çekme ve darbe dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Köpüklenmemiş bölgenin artması nedeniyle bu beklenen bir sonuçtur. Birim alana düşen malzeme miktarı artmış ve bu durum da polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin artmasına neden olmuştur. Zhen ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada da benzer bir sonuç elde etmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda polimer köpüklerin mekanik özelliklerinin köpük yoğunluğu, hücre yapısı ve hücre duvar kalınlığındaki değişimlere bağlı olduğu belirtilmiştir (Heidari & Fasihi, 2019; Barlow vd., 2001). Polimer köpük morfolojilerinde hücre sayısı, hücreler arası mesafe, hücre yoğunluğu ve kabuk tabakası kalınlığı arasında mevcut bir ilişki vardır. Köpük ajanının bozunması ile meydana gelen çekirdeklenme mekanizması sonucu oluşan hücreler ve bu hücrelerin sayısının artması veya azalması hücreler arası mesafeyi, hücre yoğunluğunu ve dolayısıyla oluşan kabuk tabakası kalınlığını etkilemektedir. Hücre sayısının daha fazla olduğu bölgelerde kabuk tabakası kalınlığının daha az, hücre sayısının sınırlı olduğu alanlarda ise kabuk tabakası kalınlığının daha fazla olduğu belirtilmiştir (Yetgin vd., 2013).



Şekil 12. T-EPDM-PP polimer kompozit köpüklerin kabuk tabakası kalınlığına bağlı olarak çekme ve darbe dayanımlarındaki değişim
Figure 12. The change in tensile and impact strengths of T-EPDM-PP polymer composite foams depending on the skin layer thickness.

4. Tartışma ve sonuçlar

4. Discussion and conclusions

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama şartlarının T-EPDM-PP polimer köpüklerin mekanik ve morfolojik özelliklerine etkisi incelenmiş ve analiz edilmiştir. Düşük K.T.K, hücre boyutu, köpük yoğunluğu ve yüksek hücre yoğunluğu, çekme dayanımı ve darbe dayanımına sahip polimer köpük üretimi için optimum şartlar S/N ana etki grafikleri ile analiz edilmiştir. T-EPDM-PP kompozit köpüklerin hücre morfolojisi için enjeksiyon basıncı ve enjeksiyon hızı en etkili enjeksiyon proses parametreleri olarak tespit edilmiştir. Polimer kompozit köpük malzemelerin çekme ve darbe dayanımları artan enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı ve ergiyik sıcaklığı ile azalırken geri besleme basıncı ile artış göstermiştir. Çekme ve darbe dayanımları kabuk tabakası kalınlığının artması ile artmıştır. T-EPDM-PP polimer kompozit köpük üretiminde yüksek çekme ve darbe dayanımı elde etmek için uygulanması gereken optimum parametreler; 100 bar geri besleme basıncı, 160 °C ergiyik sıcaklığı, 60 mm/s E.H ve 60 bar E.B olarak belirlenmiştir.

Teşekkür

Acknowledgement

Bu çalışma, Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. (Proje No: 2014-84). Yazarlar desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilir.

Yazar katkısı*Author contribution*

Yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Etik beyanı*Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar*References*

- Altan, M., & Demirci, M. (2018). Effect of process parameters on shear layer thickness in injection molded short-glass fiber reinforced polypropylene. *International Polymer Processing*, 33(5), 714-720. <https://doi.org/10.3139/217.3585>
- Andreas, N. J. S., & Altstadt, V. (2007). Controlling morphology of injection molded structural foams by mold design and processing parameters. *Journal of Cellular Plastics*, 43(4-5), 313-330. <https://doi.org/10.1177/0021955X07079043>
- Andrzej, K. B., & Omar, F. (2006). Microcellular injection molded wood fiber-PP composites: Part I-Effect of chemical foaming agent content on cell morphology and physico-mechanical properties. *Journal of Cellular Plastics*, 42(1), 63-76. <https://doi.org/10.1177/0021955X06060945>
- Aycicek, M., Sedef, C., & Akın, A. (2018). Prepare foam with injection molding method in acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) matrix using chemical foam agent. *Materials Science: Advanced Composite Materials*, 2(4), 1-4. <http://dx.doi.org/10.18063/msacm.v0i0.917>
- Barlow, C., Kumar, V., Flinn, B., Bordia, R. K., & Weller, J. (2001). Impact strength of high density solid-state microcellular polycarbonate foams. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 123(2), 229-233. <https://doi.org/10.1115/1.1339004>
- Barzegari, M. R., & Rodrigue, D. (2009). The effect of injection molding conditions on the morphology of polymer structural foams. *Polymer Engineering and Science*, 49(5), 949-959. <https://doi.org/10.1002/pen.21283>
- Blanchet, J. F., & Rodrigue, D. (2004). The effect of skin thickness on the mechanical properties of structural foams. *Cellular Polymers*, 23(4), 193-210. <https://doi.org/10.1177/026248930402300401>
- Chien, R. D., Chen, S. C., Lee, P. H., & Jien-Sheng, H. (2004). Study on the molding characteristics and mechanical properties of injection-molded foaming polypropylene parts. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(4), 429-444. <https://doi.org/10.1177/0731684404031891>
- Colton, J. S., & Suh, N. P. (1987). The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives: Part II: experimental results and discussion. *Polymer Engineering & Science*, 27(7), 493-499. <https://doi.org/10.1002/pen.760270703>
- Christopher, C. I., & Monika, B. (2008). Current trends in nanocomposite foams. *Journal of Cellular Plastics*, 44(6), 493-515, 2008. <https://doi.org/10.1177/0021955X08097707>
- Doroudiani, S., & Kortschot, M. T. (2003). Polystyrene foams. II. Structure-impact properties relationships. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(5), 1421-1426. <https://doi.org/10.1002/app.12805>
- Heidari, A., & Fasihi, M. (2019). Cell structure-impact property relationship of polypropylene/thermoplastic elastomer blend foams. *eXPRESS Polymer Letters*, 13(5), 429-442. DOI:10.3144/expresspolymlett.2019.36
- Jae, D. Y., & Sung, W. C. (2004). A mold surface treatment for improving surface finish of injection molded microcellular parts. *Cellular Polymers*, 23(1), 39-48. <https://doi.org/10.1177/026248930402300103>
- Kumar, V., & Suh, N. P. (1990). A process for making microcellular thermoplastic parts. *Polymer Engineering & Science*, 30(20), 1323-1329. <https://doi.org/10.1002/pen.760302010>
- Leung, S. N., Anson, W., Lilac, C. W., & Park, C. B. (2012). Mechanism of extensional stress-induced cell formation in polymeric foaming processes with the presence of nucleating agents. *Journal of Supercritical Fluids*, 63, 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.12.018>
- Larissa, Z., Martin, J., & Munstedt, H. (2009). Foaming of thin films of a fluorinated ethylene propylene copolymer using supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 49(1), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.11.013>
- Martial, S., Jacques, F., Audrey C., Clemence, N., & Elisabeth, R. (2011). New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide.

- Progress in Polymer Science*, 36(6), 749–766. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.12.004>
- Mengelöglü, F., & Laurent, M. M. (2003). Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 9(1), 26-31. <https://doi.org/10.1002/vnl.10058>
- Minoru, S., Iku, H., & Yasushi, M. (2007). Mechanism of strength improvement of foamed plastics having fine cell. *Journal of Cellular Plastics*, 43(2), 157-167. <https://doi.org/10.1177/0021955X06075585>
- Ming-Cheng, G., Marie-Claude, H., & Pierre, J. C. (2007). Cell structure and dynamic properties of injection molded polypropylene foams. *Polymer Engineering and Science*, 47(7), 1070-1081. <https://doi.org/10.1002/pen.20786>
- Palutkiewicz, P., Milena, T., & Elzbieta, B. (2020). The influence of blowing agent addition, talc filler content, and injection velocity on selected properties, surface state, and structure of polypropylene injection molded parts. *Cellular Polymers*, 39(1), 3-30. <https://doi.org/10.1177/0262489319873642>
- Park, C. B., & Cheung, L. K. (1997). A study of cell nucleation in the extrusion of polypropylene foams. *Polymer Engineering and Science*, 37(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/pen.11639>
- Qin, X., Thompson, M. R., & Hrymak, A. N. (2006). Rheological comparison of chemical and physical blowing agents in a thermoplastic polyolefin. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(8), 2734-2740. <https://doi.org/10.1021/ie0510932>
- Rodriguez-Perez, M. A., & Lobos, J. (2009). Mechanical response of polyethylene foams with high densities and cell sizes in the microcellular range. *Journal of Cellular Plastics*, 45(5), 389-403. <https://doi.org/10.1177/0021955X09103946>
- Spitael, P., & Christopher, W. M. (2004). Strain hardening in polypropylenes and its role in extrusion foaming. *Polymer Engineering and Science*, 44(11), 2090-2100. <https://doi.org/10.1002/pen.20214>
- Tejeda, E. H., Carlos Zepeda, S., Ruben Gonzalez, N., & Denis, R. (2005). Morphology and mechanical properties of foamed polyethylene-polypropylene blends. *Journal of Cellular Plastics*, 41(5), 417-435. <https://doi.org/10.1177/0021955X05056959>
- Tsvintzelis, I., Anastasia, G. A., & Costas, P. (2007). Foaming of polymers with supercritical CO₂: An experimental and theoretical study. *Polymer*, 48(20), 5928-5939. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.08.004>
- Villamizar, C. A., & Chang, D. H. (1978). Studies on structural foam processing II. Bubble dynamics in foam injection molding. *Polymer Engineering and Science*, 18(9), 669-710. <https://doi.org/10.1002/pen.760180905>
- Wei, G., Huajie, M., Bei, L., & Xiangyu, G. (2014). Influence of processing parameters on molding process in microcellular injection molding. *Procedia Engineering*, 81, 670-675. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.058>
- Wentao, Z., Jian, Y., Lichuan, W., Weiming, M., & Jiasong, H. (2006). Heterogeneous nucleation uniformizing cell size distribution in microcellular nanocomposites foams. *Polymer*, 47(21), 7580-7589. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.08.034>
- Wong, S., John, W. S. L., Hani, E. N., & Park, C. B. (2008). Effect of processing parameters on the mechanical properties of injection molded thermoplastic polyolefin (TPO) cellular foams. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(7), 605-613. <https://doi.org/10.1002/mame.200700362>
- Xiangmin, H., Changchun Z., Lee, L. J., Kurt, W. K., & David, L. T. (2003). Extrusion of polystyrene nanocomposite foams with supercritical CO₂. *Polymer Engineering and Science*, 43(6), 1261-1275. <https://doi.org/10.1002/pen.10107>
- Yetgin, S. H. (2018). *Otomotiv sektörü için polimer köpük malzeme üretimi ve karakterizasyonu* [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü]. <https://hdl.handle.net/20.500.12619/76563>
- Yetgin, S. H., Unal, H., Mimaroglu A., & Fındık, F. (2013). Influence of process parameters on the mechanical and foaming properties of PP polymer and PP/Talc/EPDM composites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(5), 433-439. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.748802>
- Yinping, T., Srichand, H., Robert, H., Anselmo, G., & Paulo, J. B. (2020). A study of physico-mechanical properties of hollow glass bubble, jute fibre and rubber powder reinforced polypropylene compounds with and without MuCell® technology for lightweight applications. *Polymers*, 12(11), 2664. <https://doi.org/10.3390/polym12112664>
- Yuan, M., Turng, L. S., Gong, S., Caulfield, D., Hunt, C., & Spindler, R. (2004). Study of injection molded microcellular polyamide-6 nanocomposites. *Polymer Engineering and*

Science, 44(4), 673-686.
<https://doi.org/10.1002/pen.20061>

Zhen, X. X., Zhen, X. Z., Kaushik, P., Jong, U. B., Sung, H. L., & Jin, K. K. (2010). Study of microcellular

injection-molded polypropylene/waste ground rubber tire powder blend. *Materials & Design*, 31(1), 589-593.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.002>