

POLİMETİLMETAKRİLAT MALZEMENİN MİKRODALGA İLE OTOJEN KAYNAĞI

Bedri BAKSAN¹ (ORCID: 0000-0002-3732-5998)*

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

Geliş / Received: 02.11.2018

Kabul / Accepted: 20.12.2018

ÖZ

Mikrodalga kullanılarak polimetilmetakrilat (PMMA) levhalar birbirine arada herhangi bir ısı çeken grafit veya silisyum karbür malzeme olmadan, otojen olarak 2 MPa yük altında 70, 80, 90 ve 100 saniye süreyle kaynaklanmıştır. Kaynaklanan parçaların bağlanma mukavemetleri kesme deneyi ile mekanik olarak test edilmiş, en iyi bağlanmanın 80 saniye süreyle kaynaklanan numunelerde olduğu görülmüştür. Bağlanma kuvveti 80 saniye süreyle kaynaklanan numune için 3,1 MPa olarak tespit edilmiştir. Kaynaklanmış parçaların optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kaynak bölgesi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: polimer malzeme, kaynak, mikrodalga

AUTOGENOUS MICROWAVE WELDING OF POLYMETHYMETHACRYLATE MATERIAL

ABSTRACT

Polymethylmethacrylate (PMMA) sheets were autogenously welded without using heat dissipating graphite or silicon carbide, under 2MPa load, for 70, 80, 90, and 100 seconds duration times. The shear tests were applied to welded samples to find the bonding strength, the highest bonding strength of 3.1MPa was found in 80 second welded sample. The weld region of samples were observed for optical and scanning electron microscopy.

Keywords: polymer materials, welding, microwave

1. GİRİŞ

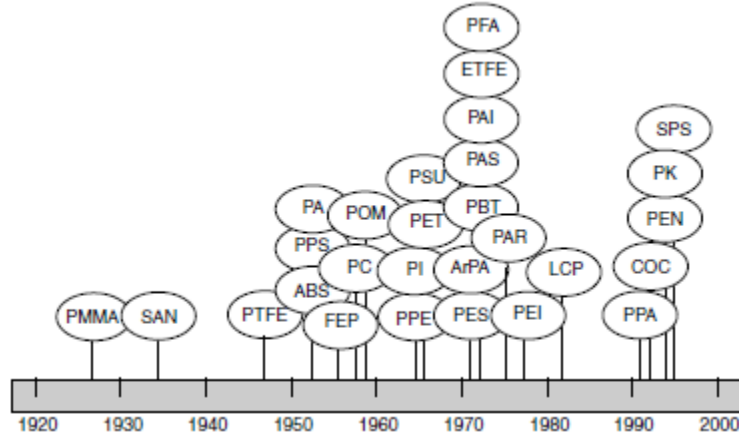
Günlük hayatımızda, etrafımıza baktığımızda neredeyse sonsuz sayıda sentetik polimerlerin kullanılmakta olduğunu ancak malzeme özelliklerini incelediğimizde fark edebilmekteyiz. Sentetik polimerler, geleneksel olarak plastik ve kauçuk olarak adlandırdığımız malzemeleri içerir. Bunlar arasında polietilen market çuvaları, polietilen tereftalat soda şişeleri ve naylon sırt çantaları gibi yaygın ve ucuz ürünler yer almaktadır. Ölçeğin diğer ucu, Kevlar kurşun geçirmez yelekler, poliasetal dişliler gibi özel özellikler sergileyen daha az yaygın ve çok daha pahalı polimerlerdir. Jet motorlarında, ofis ekipmanlarında ve yüksek sıcaklığa dayanıklı florlu polimer contalar gibi yüksek teknolojinin gerektirdiği, hatta son yıllarda nano boyutlarda polimer malzemeler günlük hayatta kullanımda yerini almıştır. Tıbbi cihazlar ve implantlardan kontrollü ilaç salınımı yapabilen ilaç kaplama malzemeleri olarak biyomalzemelerde de kullanımı artmaya başlamıştır. Üreticiler sürekli olarak yeni polimer sınıfları tanıtmakta ve kullanıldığı alanlara göre bitmiş ürün yelpazesi daha da genişlemektedir [1].

Mühendislik malzemesi olarak polimer malzemeler hafiflik, estetik, fonksiyonellik, kimyasal direnç, ultraviyole radyasyonuna karşı dirençli olması nedeniyle çok geniş yelpazede kullanılmaktadır. Makine imalatından, kişisel eşyalara, uçak ve uzay sanayiinden otomotiv sanayiine kadar farklı ve yüksek teknolojinin kullanıldığı alanlarda ve günlük yaşamımızda polimer malzeme kullanımı vazgeçilmez hale gelmiştir [2-4].

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: 0 222 2393750-dahili 3691; e-mail / e-posta: baksan@ogu.edu.tr

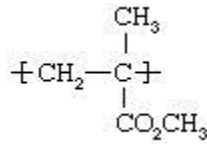
B. BAKSAN

İlk akrilik asit, 1843'te elde edilmiştir. Akrilik asitten türetilen metakrilik asit ise 1865'te formüle edildi. Metakrilik asit ve metanol arasındaki reaksiyon, ester metil metakrilat ile sonuçlanır. Polimetil metakrilat, 1930'ların başlarında İngiltere'deki Imperial Chemical Industries'te (ICI) İngiliz kimyagerler Rowland Hill ve John Crawford tarafından keşfedildi. ICI, ürünü Perspex markası altında ticari isim olarak kaydedilmiştir. Aynı zamanda, Almanya'da Rohm ve Haas AG'den kimyacı ve sanayici Otto Röhm, iki cam tabakası arasında metil metakrilatı polimerize ederek güvenlik camı üretmeye çalıştı. Polimer, camdan şeffaf plastik bir tabaka şeklinde ayrıldı, Röhm 1933'te bu malzemeye Pleksiglas ismini verdi. Hem Perspex hem de Pleksiglas 1930'ların sonlarında ticarileşti. Amerika Birleşik Devletleri'nde, E.I. du Pont de Nemours & Company (şimdi DuPont Şirketi) daha sonra kendi ürününü Lucite markası altında tanıttı. 1936 yılında Imperial Chemical Industries (şimdi Lucite International) ilk ticari olarak akrilik güvenlik cam üretimine başladı. II. Dünya Savaşı sırasında hem İttifak hem de İtilaf kuvvetleri denizaltı periskopları ve uçak ön camları, kanopiler ve gözetleme kuleleri için akrilik cam kullanmıştır. PMMA malzemeden imal edilmiş uçak kanopileri parçalandığında dahi, standart cam kullanılmış olanlarla karşılaştırıldığında pilotların gözleri daha az hasar görmekteydi.[6] Sivil uygulamalar ise ancak savaştan sonra başlamıştı.[7] Polimer malzemelerin tarihsel gelişimi ise Şekil.1 de verilmektedir.



Şekil 1. Polimer malzemelerin tarihsel gelişimi [5]

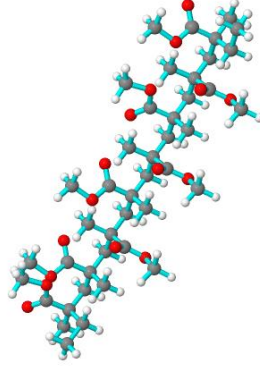
Metakrilik asidin ($\text{CH}_2 = \text{C}[\text{CH}_3]\text{CO}_2\text{H}$) bir esteri olan PMMA, reçinelerin önemli akrilik ailesine aittir. Modern üretimde, esas olarak ham petrolün daha hafif fraksiyonlarından arındırılmış bir bileşik olan propilen'den elde edilir. Propilen ve benzen, kümen veya izopropilbenzen oluşturmak üzere birlikte reaksiyona sokulur; kümen, aseton oluşturmak için asit ile muamele edilen kümen hidroperoksidi oksitlenir; Aseton, üç aşamalı bir işlemde, yanıcı bir sıvı olan metil metakrilat'a ($\text{CH}_2 = \text{C}[\text{CH}_3]\text{CO}_2\text{CH}_3$) dönüştürülür. Toplu sıvı halde veya suda ince damlacıklar halinde süspansiyon edilen metil metakrilat, katı PMMA oluşturmak üzere serbest radikal başlatıcıların etkisi altında polimerize edilir (molekülleri çok sayıda birlikte bağlar). Polimer tekrarlaması ünitesinin yapısı Şekil.2. de, model olarak gösterimi ise Şekil 3.te verilmiştir.



Şekil 2. Poli-metil metakrilatın yapısı

Zamanla, daha fazla akrilik polimer ve kopolimer geliştirilmiştir, ağırlıklı olarak akrilatlar, metakrilatlar ve akrilonitril malzemeler. PMMA oldukça iyi sayılabilir saydamlıkta mükemmelleşen camsı bir polimerdir (camsı geçiş sıcaklığı $T_g = 120^\circ\text{C}$), sert ve ağır hava koşullarına karşı dayanıklılıklarından dolayı cama alternatif bir malzeme olarak günümüzde tercih edilmektedir.

POLİMETİLMETAKRİLAT MALZEMENİN MİKRODALGA İLE OTOJEN KAYNAĞI



Şekil 3. Poli-metil metakrilat model görünümü [6]

Bu çalışmada ele alınan polimetilmetakrilat (PMMA) polimer malzemeler;

- Olağanüstü optik özellikler.
- Saydamlık ve parlak görünüm.
- Rijitlik ve boyutsal sağlamlık.
- Sertlik ve çizilmeye karşı dayanıklılık.
- Güneş ışınlarına (ultraviyole radyasyonu) ve hava etkisiyle aşınmaya karşı mükemmel direnç.

gibi temel özelliklerinin yanında, aşağıda belirtildiği gibi özel nitelikler ve etkiler elde etmek için de değişik formüllerle farklı uygulamalarda kullanılabilirler [2-4, 7]:

- Darbe modifiyesi
- Gıdaya uygunluk.
- Tıbbi uygulamalar için uygunluk.
- UV saydamlık.
- İleri kimyasal direnç.
- Gama sterilizasyonuna karşı direnç.
- Mat ve Buzlu yüzey

Bu bahsedilen özellikler, otomotiv, aydınlatma, kozmetik ve tıbbi endüstriler için PMMA'nın tercih edilen polimer olmasını sağlamaktadır.

- Gözlük Camları
- Uçak Camları
- Lensler
- Mercek Camları
- Otomobil Stop/Sinyal Lambaları
- Gloplar ve Aydınlatma Armatürleri
- Mutfak ve Banyo Dolapları
- Küvetler

Bu çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır [2-4, 7]. Bu malzemelerin birleştirilmelerinde genellikle kaynak işleminden ziyade yapıştırma, solvent veya ısıl işlem destekli solvent kullanarak birleştirme teknikleri uygulanmaktadır[8-10]. Diğer yöntemlerle, örneğin lazer kullanarak yüksek enerji ile kaynak yöntemi, lazer ekipmanlarının pahalı olması nedeniyle kullanımını sınırlamaktadır[11-16]. Ultrases kullanarak polimerlerin kaynaklanması en yaygın tekniklerden biridir, bu teknik lazer kaynak tekniğine göre daha düşük maliyetlidir. Bu nedenle daha yaygın olarak özellikle polimerlerin kaynaklanmasında tercih edilmektedir [16-18].

Bu çalışmada ele alınan mikrodalga ile kaynak yöntemi de maliyet ve işletme ekipmanları açısından, üstelik kaynak işlem zamanı açısından diğer yöntemlere göre çok hızlı kaynak tekniklerinden biridir, zira kaynak işlemi ortalama 60-70 saniye gibi zamanda gerçekleşebilmektedir [16, 19-25]. Bu yolla aynı zamanda daha düşük güç kullanarak üretimin gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu enerji ve işlem maliyetlerinin yükseldiği ve çok değerli olduğu günümüzde, kaynak işlemi sırasında oldukça büyük oranda zaman tasarrufu ve maliyet düşüşü sağlamak demektir. Literatür taramasına bakıldığında otojen kaynak yöntemi kullanılmakla birlikte mikrodalga ile PMMA malzemenin otojen kaynak işlemine rastlanmamıştır, mikrodalga ile yapılan kaynak işleminde iletken bir tabaka ile kaynaklama yoluna gidilmiştir, bunlar arasında metalik folyolar (Au, Ag, Cu gibi) veya grafit, SiC

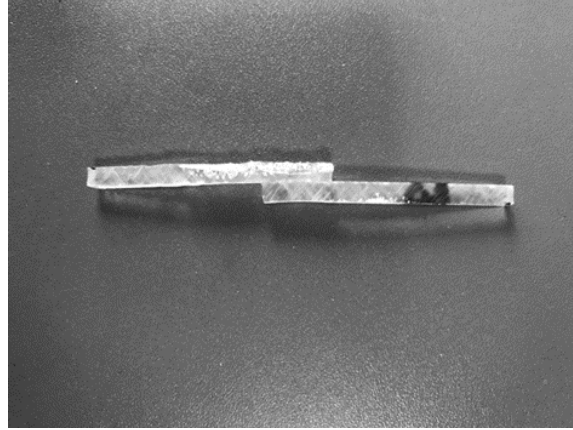
B. BAKSAN

granülleri gibi toz formunda iletkenliği ve mikrodalgayı kendine çekme özelliği gösteren ara tabakalar kullanılmıştır [26].

2. MATERYAL VE METOT

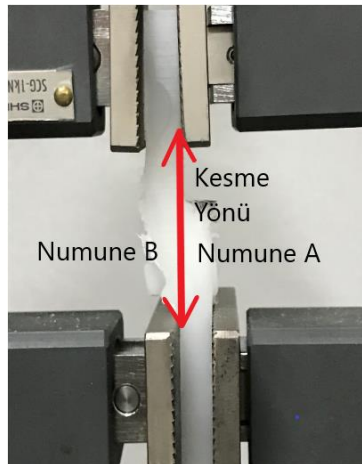
Deneyisel çalışmalarda kullanılan 5 mm kalınlığındaki PMMA levha yerel malzeme tedarikçisinden temin edilmiştir. Bu levha, kaynaklama ve mekanik deneyler için 5 mm genişlik ve 100 mm uzunlukta kesilmiştir (Şekil 4).

Kaynak deneyi için numuneler 20 mm birbiri üzerine binecek şekilde özel tasarım fişür ile 2 MPa basınç uygulanarak temas ettirilmiştir. Sıkıştırılan deney numunelerinin kaynak işlemi 2,4GHz frekanslı, 850 watt gücünde mutfak mikrodalga fırını içinde sırasıyla 60, 70, 80, 90, 100 ve 110 saniye süreyle yapılmıştır.



Şekil 4. Bindirme ile otojen kaynaklanmış numunenin yandan görünümü

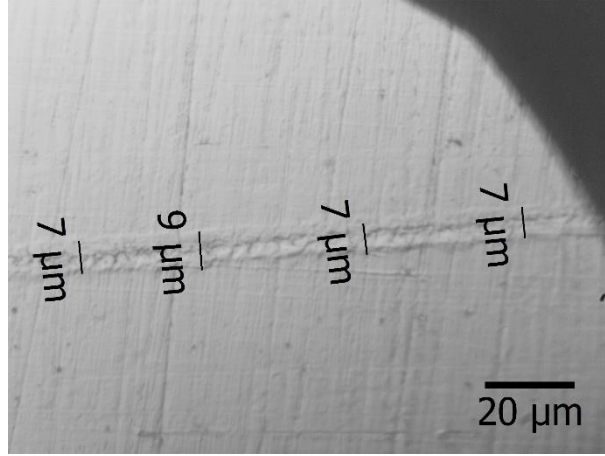
Kaynaklanmış numunelerin kaynak bölgeleri metalografik inceleme için standart metalografik zımpara ve parlatma işlemi uygulanmış, bitirme 3µm boyutlu elmas pasta ile yapılmıştır ve optik mikroskop (OM) görüntüleri alınmıştır. Metalografik incelemeye taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile devam edebilmek için numuneler altın ile kaplanmış ve ardından Zeiss Supra 40VP ile SEM incelemesi yapılmıştır. Bağlanma kuvvetinin belirlenebilmesi için mekanik deneyler ise Shimadzu AG-IS 250kN cihazında numuneler tam birleşme ekseninden (Şekil 5) bağlanarak kesme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 5. Bindirme ile birleştirilmiş numunenin kesme deneyi öncesi görünümü

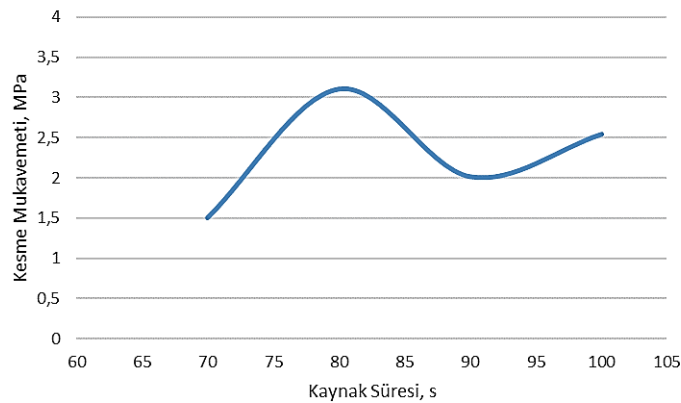
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

PMMA levhaların otojen kaynağından sonra yapılan karakterizasyon çalışmalarının ilk adımı metalografik inceleme adımıdır. Bu aşamada malzemelerin OM'tan alınan görüntüleri (Şekil 6) incelendiğinde bağlanmanın iyi bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Yine OM incelemesinde kaynaklı birleşme bölgesinin metalik malzemelerde rastlandığı şekilde ergime bölgesi ve ısıdan etkilenen bölge gibi bölgeler mikroyapı fotoğraflarında görülmektedir. Yapılan incelemelerde ergime bölgesi genişliği ortalama 7 µm olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Bindirme ile birleştirilmiş 80 saniye süreyle kaynaklanmış PMMA malzemelerin kaynak bölgesi OM mikroyapısı

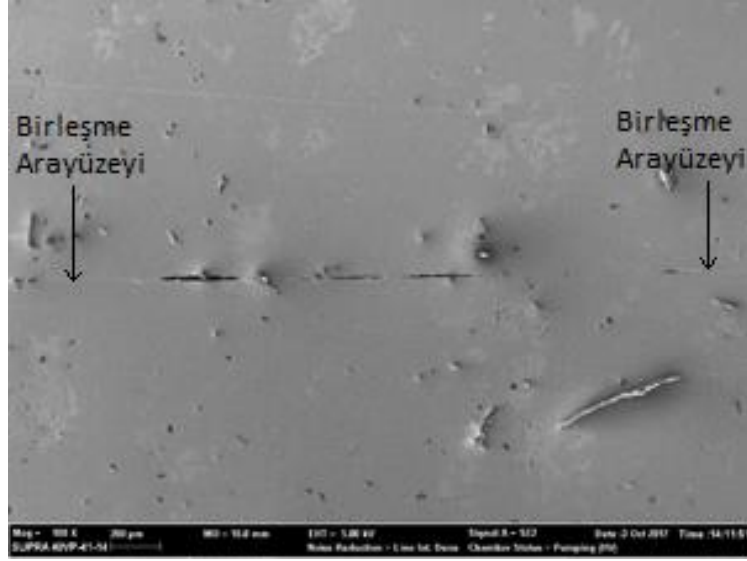
Kaynaklı malzemelerin bağlanma kuvvetlerini belirleyebilmek için yapılan kesme deneyi sonuçları ise Şekil 7'te verilmektedir. Kesme deneyi sonucunda 80 saniye süreyle kaynaklanan numunelerde en yüksek kesme mukavemeti değeri olan 3,1 MPa bulunmuştur. Yapılan kesme deneylerinde işlem görmemiş PMMA levhanın mukavemeti ortalama 25 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen kaynaklı malzeme kesme mukavemet değeri esas malzemenin mukavemetinin yaklaşık % 12 civarında bulunmasına rağmen bu değer birçok polimer malzeme uygulamaları için yeterli bir mukavemet değeri olarak yorumlanabilir. 60 saniye sürede kaynaklanma olmaması, 110 saniyede ise malzeme yanma sonucu tahrip olmuştur. 100 saniye süreyle kaynaklanan malzemede mukavemet değeri grafiğe göre artmakta olduğu görülmekle birlikte aşırı yumuşama ve kısmi yanma görüldüğü için bu süre malzemenin temel özellikleri bozulduğu için uygun değildir.



Şekil 7. Kaynaklama süresine bağlı olarak kesme mukavemetinin değişimi

SEM incelemelerinde kaynak bölgesinin genel olarak düzenli olduğu, bazı yerlerde ise muhtemelen levha yüzeyinin düzgün olmayışından kaynaklandığını zannettiğimiz boşluklar birleşme hattı boyunca görülmektedir (Şekil 8). Kaynaklanmış parçaların birleşmelerinde optik mikroskopide ara tabaka gibi bir tabaka oluşmasına rağmen, SEM mikroyapılarında birleşme mükemmel olarak görülmektedir.

B. BAKSAN



Şekil 8. 80 saniye süreyle kaynaklanan parçaların kaynak bölgesinin SEM görüntüsü.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile PMMA levhaların mikrodalga ile kaynaklanması başarı ile gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga ile kaynak yöntemi korunma tedbirleri alındıktan sonra etkin ve hızlı kaynak yöntemi olduğu, hatta bazı malzemelerin ergitilmesinde temiz, ucuz ve hızlı bir yöntem olması bu yöntemin mühendislik malzemelerinin kaynağında ve ergitilmesinde başarı ile kullanılabileceğini göstermektedir.

Kaynaklı birleştirmelerde başarılı birleştirmeler elde edilmiş olmakla birlikte, bu konuda daha ileri çalışmaya ihtiyaç olduğu açıktır, çünkü 3,1 MPa bağ kuvveti yeterli olmakla birlikte geliştirilmesi gerekmektedir. Çünkü PMMA malzemenin kendi mekanik dayanımı olan yaklaşık 45 MPa değeri gözönüne alındığında yaklaşık PMMA'nın çekme mukavemetinin % 7 sine karşılık gelen bir kesme kuvveti sözkonusudur. Daha iyi birleşmenin sağlanabilmesi için kaynaklanacak parçaların arasına ara tabaka olarak mikrodalga dalgalarını bünyesine çekebilecek olan SiC ve grafit gibi ara tabakaların toz veya çözelti şeklinde uygulanarak kullanılması kaynaklanma verimini daha da artırabilir, çünkü bazı ergitme uygulamalarında mikrodalgaın efektif gücünü kaynak bölgesine aktarabilmek için mikrodalga dalgalarını çekebilmek için SiC veya grafit potlar veya çubuklar kullanılarak dolaylı ergitme yapılmaktadır. Burada da benzer şekilde mikrodalgaın birleşme yerlerine etkin bir şekilde iletilmesi için ara tabaka kullanımı faydalı olacaktır. Esasen bu konuda çalışmalarımız devam etmektedir, halen deneyler tamamlanmadığı için burada SiC ve grafit kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları verilmemiştir.

Birleşme bağ mukavemetinin artırılabilmesi konusunda yapılabilecek diğer bir çözüm olarak yüksek sıcaklıkta kürlenmiş yapıştırıcılarla birlikte mikrodalga veya indüksiyon akımı kullanılması olacaktır. Bu konuda yapılan araştırmalar mevcut olup Sung ve ark. [27] nin yaptığı çalışmada yapıştırıcı kullanımı ile konvansiyonel fırında kürlenme sonucu yaklaşık 16 MPa elde edilen kesme mukavemet değerinden daha yüksek değerlere mikrodalga kullanılarak yaklaşık 25 MPa gibi kesme mukavemeti değerlerine ulaşıldığı gösterilmiştir. Burada aynı zamanda geleneksel fırında kürlenme işlemine göre mikrodalga fırında kürlenme işleminin süre yönünden %25-30'u kadar zaman azaltılabildiği de ifade edilmiştir.

Birleşme mukavemetinin 80 saniye sürede en yüksek değere ulaştığı görülmekte, 80 saniye altında ve üstünde yeterli mukavemet veya bağlanma olmadığı gözlenmiştir. 80 saniyeden az işlem yapıldığında bağlanma yetersiz olmakta bu nedenle mukavemet düşük çıkmakta, 80 saniye üzerinde ise polimer zincirlerinin bozulmasından, hatta aşırı derecede bozularak parçalanmasından dolayı mukavemetler düşük çıkmaktadır. 80 saniye üzerinde polimer yapısının bozunması sonucunda yanma görülmekte, bu nedenle mühendislik uygulamalarında bu sürelerin tercih edilemeyeceği ortaya çıkmakla birlikte mikrodalga gücünün azaltılarak sürenin artırılması, ayrıca yapıştırıcılar kullanılmak suretiyle birleşme mukavemetinin optimize edilmesi çalışmaları bizlere daha iyi bağlanma mukavemetini sağlayacak kombinasyonu verebilecektir. Bu sayede mikrodalgaın endüstriyel uygulamalarda hızlı ve temiz kaynak imkanı sağlayabileceği öngörülmekte ve bu konuda çalışmaların devamının bizlere faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ANDREW J. PEACOCK, A.C., *Polymer chemistry : properties and applications*. 1st ed. 2006, Munich, Germany: Carl Hanser Verlag.
- [2] KLAUS ALBRECHT, M.S., THOMAS R., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 40 Volume Set*. 2011: Wiley.
- [3] PMMA – POLİMETİLMETAKRİLAT. 17.07.2018]; Available from: <http://www.resinex.com.tr/polimer-turleri/pmma.html>.
- [4] PAGEV. *Polimetil Metakrilat (PMMA)*. 17.07.2018]; Available from: <https://www.pagev.org/pmma>.
- [5] MARK, H.F., *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. 2003: John Wiley & Sons, Incorporated.
- [6] University of Southern Mississippi, D.o.P.S. *Polymer 3D Models*. Available from: <https://pslc.ws/modelhtms/pmmadb.htm>.
- [7] FOSTER, K.L. and R.P. WOOL, *Strength of Polystyrene Poly(Methyl Methacrylate) Interfaces*. *Macromolecules*, 1991. **24**(6): p. 1397-1403.
- [8] DU, C.S., C.T. HU, and S. LEE, *The microstructures of solvent-welded joints of irradiated poly(methyl methacrylate)*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(1): p. 83-96.
- [9] CHO, K., J. KRESSLER, and T. INOUE, *Adhesion and Welding in the System San Pmma*. *Polymer*, 1994. **35**(6): p. 1332-1335.
- [10] LIN, C.B., S.B. LEE, and K.S. LIU, *The Microstructure of Solvent-Welding of Pmma*. *Journal of Adhesion*, 1991. **34**(1-4): p. 221-240.
- [11] WATANABE, W., Y. LI, and K. ITOH, [INVITED] *Ultrafast laser micro-processing of transparent material*. *Optics and Laser Technology*, 2016. **78**: p. 52-61.
- [12] WANG, X., et al., *Investigation on enhancement of weld strength between PMMA and PBT in laser transmission welding-Using intermediate material*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016. **133**(44).
- [13] POYRAZ, S., et al., *Ultrafast Microwave Welding/Reinforcing Approach at the Interface of Thermoplastic Materials*. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2015. **7**(40): p. 22469-22477.
- [14] JIANG, X., S. CHANDRASEKAR, and C.H. WANG, *A laser microwelding method for assembly of polymer based microfluidic devices*. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015. **66**: p. 98-104.
- [15] CHENG, Y.T., et al., *Comparative Study of the Shear Strength of Plastic Sheet Joined by Laser Transmission Welding (LTW)*. *Lasers in Engineering*, 2015. **32**(1-2): p. 89-97.
- [16] MAPLESTON, P., *Plastics welding: The choices widen*. *Plastics Engineering*, 2008. **64**(4): p. 10-+.
- [17] NOROUZI, A., M. HAMEDİ, and V.R. ADİNEH, *Strength modeling and optimizing ultrasonic welded parts of ABS-PMMA using artificial intelligence methods*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. **61**(1-4): p. 135-147.
- [18] STOKES, V.K., *The vibration welding of poly(methyl methacrylate) to itself and to polycarbonate, poly(butylene terephthalate), and modified poly(phenylene oxide)*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(4): p. 457-466.
- [19] POTENTE, H., O. KARGER, and G. FIEGLER, *Laser and microwave welding - The applicability of new process principles*. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2002. **287**(11): p. 734-744.
- [20] WISE, R.J. and I.D. FROMENT, *Microwave welding of thermoplastics*. *Journal of Materials Science*, 2001. **36**(24): p. 5935-5954.
- [21] YARLAGADDA, P.K.D.V. and T.C. CHAI, *Study of microwave dielectric properties of thermoplastics*. *Processing and Fabrication of Advanced Materials Vi, Vols 1 & 2*, 1998: p. 1539-1551.
- [22] SIORES, E. and D. DOREGO, *Microwave Applications in Materials Joining*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995. **48**(1-4): p. 619-625.
- [23] STEEL, J., *Microwave Welding Process*. *Search*, 1993. **24**(1): p. 16-16.
- [24] KATHIRGAMANATHAN, P., *Microwave Welding of Thermoplastics Using Inherently Conducting Polymers*. *Polymer*, 1993. **34**(14): p. 3105-3106.
- [25] VARADAN, V.K. and V.V. VARADAN, *Microwave Joining and Repair of Composite-Materials*. *Polymer Engineering and Science*, 1991. **31**(7): p. 470-486.
- [26] J.TROUGHTON, M., *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2nd ed. 2008, Norwich, NY, USA: William Andrew Inc.
- [27] SUNG, P.C., T.H. CHIU, and S.C. CHANG, *Microwave curing of carbon nanotube/epoxy adhesives*. *Composites Science and Technology*, 2014. **104**: p. 97-103.