



## An effect of environment temperature and pre-heat treatment on the electrofusion welding of polyethylene natural gas pipes

Asghar Najafigharehtapeh<sup>1,\*</sup>, Ramazan Kaçar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük University, Natural and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, Karabük, 78050, Turkey

<sup>2</sup>Karabük University, Technology Faculty, Department of Manufacturing Engineering, Karabük, 78050, Turkey

### Highlights:

- An effect of environment temperature on welding time of electrofusion welded polyethylene natural gas pipes
- An effect of various environment temperature on welding quality
- An effect of pre-heat treatment on welding quality

### Keywords:

- PE100
- natural gas pipe,
- electrofusion welding,
- environment temperature
- preheat treatment

### Article Info:

Received: 30.12.2014

Accepted: 29.12.2017

### DOI:

10.17341/gazimmfd.416345

### Acknowledgement:

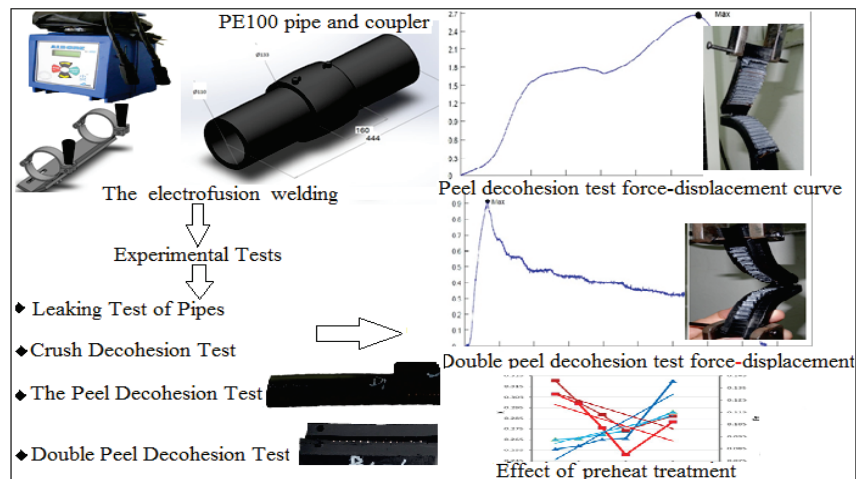
This work was supported by Research Fund of Karabük University (Project number: KBÜ-BAP-14/2-YL-032)

### Correspondence:

Author: Asghar Najafigharehtapeh  
e-mail: najafi.asghar@yahoo.com  
phone:+90 4440478

### Graphical/Tabular Abstract

The standard recommends for electrofusion welding of polyethylene pipes, used for natural gas and water transportation network to be carried out at the temperature from  $-5^{\circ}\text{C}$  up to  $+30^{\circ}\text{C}$ . In this study, an effect of the environment temperature on the properties of weldment is investigated. For this purpose, high density polyethylene (PE100) pipes were joined with electrofusion welding method at the various environment temperatures (room temperature, 0, -10, -20 and  $-30^{\circ}\text{C}$ ) as received condition and by using preheat treatment ( $60^{\circ}\text{C}$ ).



### Purpose:

In this study, it is aimed to investigate the effect of environment temperature and preheat treatment on the properties of the electrofusion welding of polyethylene (PE100) pipes.

### Theory and Methods:

According to standard, leaking and crushing test has been carried out and the double decohesion peeling test has been also applied for determining the strength of weldment. Thus, decohesion toughness,  $K$ , and nominal energy  $E_n$ , for decohesion of weldment calculated.

### Results:



- Electrofusion welded PE100 pipes have increased welding time with decreasing environment temperature. The preheat treatment has no effect on the welding time.
- Pipes joined at different environment temperatures and with pre-annealing were found to be successful in sealing and crushing test.
- The strength,  $K$ , of PE100 pipes combined at different environment temperatures, decreased with decreasing ambient temperature.
- The preheat treatment has adversely affected the strength of the PE100 joints at room temperature.
- The properties of the joints obtained at low ambient temperatures have been positively influenced by the pre heat treatment.

### Conclusion:

The strength of the weldment has been increased meanwhile the ductility decreased by increasing crystalline amount in weld region associate to increasing environment temperature. It was determined that the pre-heat treatment process affected positively features of weldment which was joined in low environment temperature meanwhile; the strength of weldment joined at room temperature is affected negatively.



## Çevre sıcaklığı ve kaynak ön tav ısıtılmasının polietilen doğalgaz borularının elektrofüzyon kaynağına etkisi

Asghar Najafiharehtapeh<sup>1\*</sup> , Ramazan Kaçar<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bölüm Dalı, Karabük, 78050, Türkiye

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük, 78050, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı çevre sıcaklıklarının polietilen doğalgaz borularının elektrofüzyon kaynak süresine etkisi
- Farklı çevre sıcaklıklarının kaynak kalitesine etkisi
- Ön tav ısıtılmasının kaynak kalitesine etkisi

#### Makale Bilgileri

Geliş: 30.12.2014

Kabul: 29.12.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416345

#### Anahtar Kelimeler:

PE100, elektrofüzyon kaynağı, çevre sıcaklığı, ön tav ısıtılması

#### ÖZET

Doğal gaz ve su dağıtım hatlarında kullanılan polietilen boruların elektrofüzyon kaynaklı birleştirmelerin standartlarda -5°C ile +30°C sıcaklık aralığında yapılması önerilmektedir. Bu çalışmada çevre sıcaklığının birleştirme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla yüksek yoğunluklu polietilen (PE100) borular elektrofüzyon kaynak yöntemi ile farklı çevre sıcaklıklarında (oda sıcaklığı, 0, -10, -20 ve -30°C) temin edildiği şekliyle ve ön tav uygulanarak (60°C) birleştirilmiştir. Birleştirmelere standartlara göre sızdırmazlık ve ezme testi yanısıra bağlantının dayanımı belirlemek için çiftli çekme soyma ayırma testi uygulanmıştır. Böylece birleştirmelerin ayrılma tokluğu, K, ve ayrılmak için normal enerji, E<sub>n</sub>, hesaplanmıştır. Sonuç olarak artan çevre sıcaklığına bağlı olarak kaynak bölgesindeki daha fazla oluşan kristalin miktarının dayanımı artırdığı ancak şekil alabilirliği azalttığı tespit edilmiştir. Ön tav ısıtılması düşük çevre sıcaklığında elde edilen birleştirmelerin özelliklerine olumlu katkıda bulunurken yüksek çevre sıcaklıklarda elde edilen bağlantının dayanımını ise olumsuz etkilediği belirlenmiştir.

## An effect of environment temperature and pre-heat treatment on the electrofusion welding of polyethylene natural gas pipes

### H I G H L I G H T S

- An effect of environment temperature on welding time of electrofusion welded polyethylene natural gas pipes
- An effect of various environment temperature on welding quality
- An effect of pre-heat treatment on welding quality

#### Article Info

Received: 30.12.2014

Accepted: 29.12.2017

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.416345

#### Keywords:

PE100, electrofusion welding, environment temperature, preheat treatment

#### ABSTRACT

The standard recommends for electrofusion welding of polyethylene pipes, used for natural gas and water transportation network to be carried out at the temperature from -5°C up to +30°C. In this study, an effect of the environment temperature on the properties of weldment is investigated. For this purpose, high density polyethylene (PE100) pipes were joined with electrofusion welding method at the various environment temperatures (room temperature, 0, -10, -20 and -30°C) as received condition and by using preheat treatment (60°C). According to standard, leaking and crushing test has been carried out and the double decohesion peeling test has been also applied for determining the strength of weldment. Thus, decohesion toughness, K, and nominal energy E<sub>n</sub>, for decohesion of weldment calculated. Conclusively, the strength of the weldment increased meanwhile the ductility decreased by increasing crystalline amount in weld region associate to increasing environment temperature. It was determined that the pre-heat treatment process affected positively features of weldment which was joined in low environment temperature meanwhile; the strength of weldment joined at room temperature is affected negatively.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: najafi.asghar@yahoo.com / Tel: +90 4440478

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Termoplastikler içerisinde yüksek yoğunluklu polietilenler (HDPE) ekonomiklikleri, iyi mekanik ve korozyon özellikleri sebebiyle ilgi çekici malzemelerdir [1, 2]. Temelini hidrokarbonların oluşturduğu polietilenler, etilen moleküllerinin molekül zincirleri şeklinde bağlanmasıyla oluşan plastik malzemelerdir [3, 4]. Endüstrinin değişik alanlarında oldukça sık kullanılmakta ve dış ortam uygulamaları için oldukça iyi bir potansiyele sahiptirler [5]. Yapısal olarak yarı kristal malzeme sınıfında yer alırlar. Yapıdaki kristalin miktarı, moleküllerin özgül ağırlığına ve yönlendirmelerine bağlı olarak değişir [6]. Kristal yapı; molekül zincirlerinin bir araya gelerek yönlendirmesiyle lamellerden ve lamellerinde bir araya gelerek oluşturduğu "spherulite"lerden meydana gelir [7, 8]. Kristal miktarı malzemenin dayanımının ve sertliğinin bir göstergesidir. Amorf yapı oranının yüksek olması malzemenin düşük dayanımlı ve daha sünek olması anlamını ifade etmektedir [9].

Modern alt yapı sistemlerin imalatında, özellikle doğal gaz ve suyun taşınması veya dağıtılmasında polietilen borular tercih edilmektedir [1]. Artan taleple beraber plastik malzemelerinin kaynaklı birleştirmeleri gündeme gelmiştir. PE boruların birleştirilmesinde en çok kullanılan alın ve elektrofüzyon olmak üzere iki çeşit kaynak yöntemi mevcuttur [2, 3]. Doğalgaz dağıtım hatlarında daha emniyetli olduğu için elektrofüzyon kaynağı kullanılır [1, 2]. Bağlantı elemanları içine yerleştirilmiş rezistans sargı tellerine uygun bir gerilim ve akım verilerek, tellerin ısıtılması sonucu bağlantı elemanı iç yüzeyindeki PE malzeme ile borunun dış yüzeyindeki tabakanın erimesi sonucu birleşme sağlanır [1, 3]. Elektrofüzyon kaynak yöntemi, kuluçka, birleşme ve sağlamlaşma, plato ve soğuma aşaması olmak üzere dört kaynak zamanından

oluşur. Daha fazla ısı girdisi devamında ise yapıda bozulma süreci başlar [5]. Literatür araştırmalarında polietilen (PE) borularla ilgili kaynak yöntemleri ve bilhassa elektrofüzyon kaynak uygulamaları ilgili çalışmalara rastlanmaktadır [10, 11]. Ancak uygulamadaki çevresel faktörlerin belirlenmesi ve kaynak sonrası birleştirmenin özelliklerini iyileştirme çalışmaları hala devam etmektedir. PE doğal gaz boru elektrofüzyon kaynaklı birleştirmelerin standartlarda  $-5^{\circ}\text{C}$  ile  $+25^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında yapılması önerilmektedir [2, 3]. Bir başka standartta  $+3^{\circ}\text{C}$  üzerindeki sıcaklıklarda birleştirmenin yapılması gerekliliğini vurgulanmıştır [12]. DVS 2207 göre ise birleştirme sıcaklık aralığı ise  $+5$  ile  $+50^{\circ}\text{C}$  olarak ifade edilmiştir [2, 13]. Ancak iklim şartları düşünüldüğünde özellikle soğuk ülkelerde ve acil durumlarda belirtilenden daha düşük sıcaklıklarda kaynak gerçekleştirildiğinde birleştirmenin özellikleri üzerinde detaylı bir çalışmaya ihtiyaç vardır.

Bu amaçla doğalgaz dağıtım hatlarında kullanılan polietilen (PE100) borulara uygulanan elektrofüzyon kaynağında çevre sıcaklığının yanısıra uygulanan ön tav ısıl işleminin birleştirmenin özellikleri üzerindeki etkisi etraflıca araştırılmıştır. Farklı çevre sıcaklıklarında (oda sıcaklığı,  $0$ ,  $-10$ ,  $-20$  ve  $-30^{\circ}\text{C}$ ) temin edildiği şekliyle ve  $60^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta iki saat ön tav işlemini uygulanarak birleştirilen PE100 borulara standartlarda belirlenmesi gereken sızdırmazlık ve bağlantının dayanımı belirlemeyi amaçlayan ezme ve çiftli çekme soyma-ayırma testleri uygulanmıştır.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

### 2.1. Malzeme (Material)

Çalışmada özellikleri Tablo 1'de verilen 10 mm et kesit kalınlığına sahip,  $\text{Ø}110$  mm çapında ve 220 mm boyunda, yüksek yoğunluklu polietilen (PE100 boru) ve alın altına

**Tablo1.** PE100 polietilen boru ve bağlantı elemanlarının özellikleri (The properties of PE100 pipes and coupler)

Malzeme	Yoğunluk ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Akma katsayısı ( $190^{\circ}\text{C}$ , 5 kg)	Sıcaklık dayanımı (OIT $200^{\circ}\text{C}$ )	Eklemler
PE100	96	0,4	$\geq 20$ min	%2 karbon karası



**Şekil 1.** PE100 boru ve bağlantı elemanı (PE100 pipe and coupler)

birleştirilmesi için bağlantı elemanı kullanılmıştır. PE100 boru ve bağlantı elemanı Şekil 1’de gösterilmiştir.

### 2.2. Boruların Kaynak Öncesi Hazırlığı (The preparation of pipes prior to welding)

Özel kesme makası ile dik olarak kesilen boruların bağlantı elemanının içerisine girecek kısmı mengeneye sabitlenerek yüzeyinden uygun bir kazıyıcı ile homojen bir şekilde 0,2 mm derinlikte oksit tabakası kazınarak kaldırıldı. Daha sonra borunun bağlantı elemanı içerisine girecek baş kısımları ve bağlantı elemanı iç yüzeyleri keten bir bezle silinerek iyice temizlenmesine özen gösterildi. Temizlenen boru bağlantı elemanı içerisine yerleştirildikten sonra konum sabitleyiciye doğru bir şekilde tutturuldu.

### 2.3. PE 100 Borularının Birleştirilmesi (The Joining of PE100 Pipes)

PE100 boruların birleştirilme öncesi kaynak makinesinin kalibrasyonu gerçekleştirildi. Elektrofüzyon kaynak makineleri ile birleştirme yapabilmek amacıyla içerisinden bakır rezistans telleri dolaştırılan bağlantı elemanlarının özellikleri bir barkod okuyucu sistemle kaynak makinesine aktarılır. Bu özelliklere uygun çevre sıcaklığını hesaba katarak üzerinden akım dolaştırılan bakır tellerin ısınmasıyla bağlantı elemanının iç yüzeyi ile borunun dış yüzeyi arasında bir bağ oluşturmaya yetecek kadar zaman makine tarafından ayarlanır ve uygulanır. Şekil 2’de elektrofüzyon kaynak makinesi ve boru konum sabitleyici gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrofüzyon kaynak makinesi ve boru konum sabitleyici (The electrofusion welding machine and pipe holder)

Çalışmanın amaçlarından birisi çevre sıcaklığının PE100 boruların kaynak kabiliyetine etkisinin belirlenmesi olduğu

için düşük çevre sıcaklıklarında birleştirilecek borular konumlandırıcıya yerleştirilmiş durumda ve kaynak makinesiyle birlikte iki saat derin dondurucuda istenilen çevre sıcaklığında bekletildi. -30°C çevre sıcaklığı deneyleri beyaz et şoklama ünitesinde aynı zaman dilimi bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Ön tav ısıtma işlemi uygulanan boru ve bağlantı elemanları temizlendikten sonra konumlandırıcıya bağlanarak istenilen çevre sıcaklığında bekletilen dondurucu içerisinde birleştirilmiştir. Böylece makine tarafından birleştirme için çevre sıcaklığına uygun zaman dilimi akım geçmesine müsaade edilerek borular birleştirilmiştir.

Kaynaktan sonra borular 15 dakika soğutulmuş bağlantı elemanının soketinden kaynak makinesi ayrılmış ve 30 dakika boruların konumlandırıcı üzerinde kalmasına müsaade edilmiştir. Daha sonra borular numaralandırılarak basınç testine hazır hale getirilmiştir. Kaynaklı boruların kesiti Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kaynaklı boruların kesit görüntüsü  
(The sectional view of welded pipes)

### 2.4. Boruların Sızdırmazlık Testi (DIN 4279-1) (Leaking Test of Pipes (DIN 4279-1))

Standartta göre boruların sızdırmazlık testine tabi tutulabilmesi için kaynak işleminden sonra iki saat geçmesi gerekir. Sızdırmazlık testi Şekil 4’de gösterilen düzenek yardımıyla uygulanmıştır.



Şekil 4. Basınç test deney düzeneği (Pressure test assembly)

Düzeneğe bağlanan borulara kompresör aracılığıyla 6 bar basınçlı hava uygulandıktan sonra vana kapatılarak bu

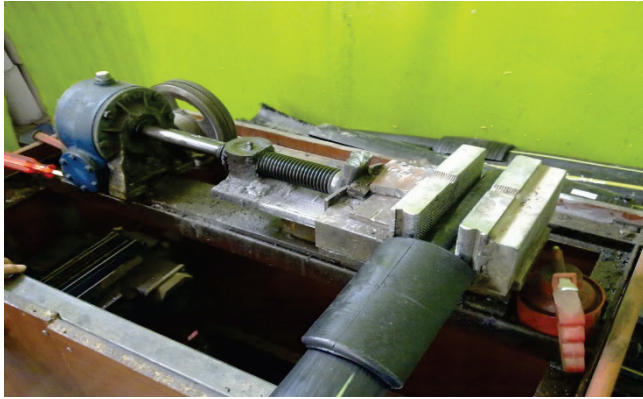
şekilde 3 saat bekletildi. Belirli aralıklarla köpükle kontrol edilerek ve bekleme süresi sonunda basınç düşmesi oluşmamışsa birleştirmenin sızdırmazlık testinden başarıyla geçtiği kabul edildi.

### 2.5. Ezme Testi (ISO 13955) (Crush Decohesion Test (ISO 13955))

Standartta ezme testi için Ø110mm boru birleştirmeler 90° kesme açısıyla, boyuna doğrultuda kesilerek dörde ayrılması önerilir (Tablo 2) [14]. Böylece 445 mm uzunluğundaki çeyrek daire şeklindeki numuneler mengene tipi tasarlanmış ezme cihazına yerleştirildi (Şekil 5). Numuneler 100mm/dak  $\pm 10$  sabit ilerleme hızıyla mengenenin ağızları 2t mesafesine gelinceye kadar sıkıştırıldı.

**Tablo 2.** Ezme testi için polietilen boru birleştirme verileri  
(The crush decohesion test data for polyethylene pipes weldment)

Boru dış çapı $d_n$	Numune kesme açısı	Numune sayısı	Kaynak dışı boru uzunluğu
$16\text{mm} < d_n < 90\text{mm}$	180°	2	$2d_n$ ya 100mm
$d_n \geq 110\text{mm}$	90°	4	$2d_n$



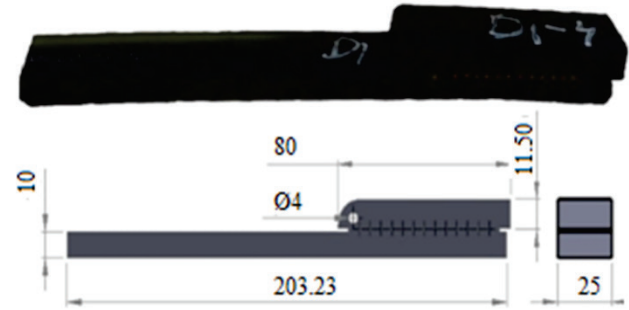
**Şekil 5.** Ezme test düzeneği (The crush decohesion test assembly)

2t et kesit kalınlığına ezilen birleştirmelerinin boru ile bağlantı elemanı arayüzeyi bir levye ile ayrılmağa zorlandı. Standartta göre ayrılma kaynak arayüzeyden olursa sünek, yüksek dayanımlı ve dolayısıyla geçerli kaynak kabul

edildi. Birleştirme düşük dayanımlı ve gevrekse; gevrek bölge birleştirme bölgesinin %20'den azsa birleştirme geçerli kabul edildi. Ancak gevrek bölge birleştirme bölgesinin %20'den fazlaysa kaynaklı birleştirme testten başarılı sayılmadı.

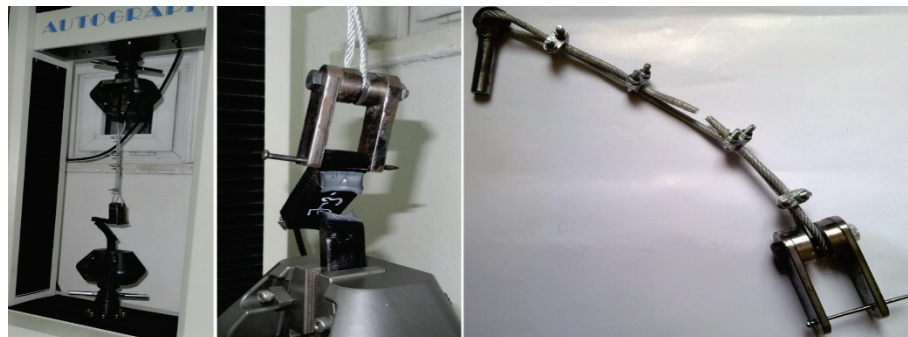
### 2.6. Çekme Soyma-Ayırma Testi (ISO 13954/ EN12814-4) (The Peel Decohesion Test (ISO 13954/ EN12814-4))

Kaynaklı boruların dayanımı belirlemek için tekli ve çiftli soyma testi (Peel Decohesion Test/Double Peel Decohesion Test) uygulanır. Tekli soyma ayırma testi ISO 13954, çiftli soyma ayırma testi ise EN 12814-4 standartlarına göre hazırlanan numunelere uygulanır [15, 16]. Her iki test içinde gevrek ayrılma kaynak bölgesinin %33'den daha az ise kaynak başarılı kabul edilir. Bu amaçla soyma-ayırma test numuneleri ISO 13954 standardına göre Şekil 6'da gösterildiği boyutlarda kesilip ve freze tezgâhında işlenerek hazırlandı. Daha sonra numuneye standartta belirtildiği yerden delik açıldı.



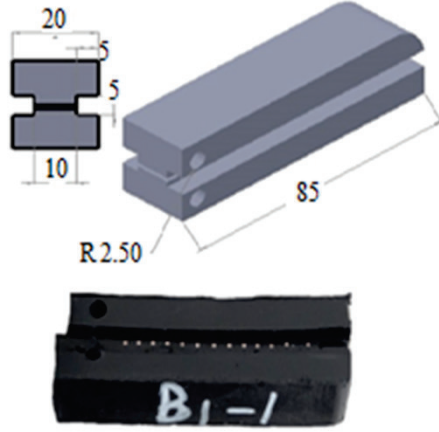
**Şekil 6.** Çekme soyma-ayırma test numunesi  
(The peel decohesion test sample)

Deney numunelerini soyma-ayırma testine tabi tutabilmek amacıyla çekme test cihazında numuneyi asılmak için Şekil 7'de gösterilen tutucu hazırlandı. Numuneler tutucuya yerleştirildikten sonra 50kN kapasiteli Schimatzu marka çekme test cihazında 25mm/dak çekme hızında çekilerek koparıldı. Her bir parametre için 8 deney numunesi test edilmiştir. Tekli çekme soyma testinde ayrılma kaynak arayüzeyinden oluşmaması sebebiyle test yöntemindeki eksiklikleri gidermek amacıyla detayları EN12814-4



**Şekil 7.** Çekme test cihazı ve soyma-ayırma test numunesi tutucusu (Tensile test machine and peel decohesion test sample holder)

standardında belirtilen çiftli soyma-ayırma testi daha uygun bir test yöntemidir [1]. Bu amaçla deney numuneleri Şekil 8'de gösterildiği boyutlarda frezede işlenerek hazırlanmıştır. Numuneler bu amaçla geliştirilen tutucu (Şekil 9) ile 25 mm/dak çekme hızında çekilerek kaynak arayüzeyinden koparıldı. Her bir parametre için 8 deney numunesi test edilmiştir.



**Şekil 8.** Çiftli çekme soyma-ayırma test numunesi (Double peel decohesion test sample)

Bu test yönteminde numuneler kaynak arayüzeyinden ayrıldıkları için inceleme işlemi daha kolay ve verimli hale gelmiştir. Böylece bağlantının birleştirme tokluğu, Eş. 1, soyma-ayırma enerjisi (kuvvet-birim şekil değiştirme eğrisinin altındaki taralı alan), Eş. 2 ve normal soyma-ayırma enerjisi, Eş. 3 aşağıdaki denklemlerde gösterilmiştir [1, 14].

$$K = \frac{F_w \cdot C}{3} (3,46 + 2,38 \frac{H}{c}) \quad (1)$$

Bu denklemde:

$$E_P = \int_0^{X_f} P(x) dx \quad (2)$$

$$E_N = \frac{E_P}{W(L - n\phi_w)} \quad (3)$$

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. Sızdırmazlık ve Ezme Testi (Leaking and Crush Decohesion Test)

PE100 doğal gaz boruların elektrofüzyon kaynaklı birleştirmelerin kabul kriterleri içerisinde sızdırmazlık testi zorunluluğunun yanısıra ezme testinin de uygulanması gerekir [11]. Bu amaçla belirlenen her bir çevre sıcaklığında temin edildiği şekliyle ve ön tav ısıl işlemi uygulanmış şekliyle birleştirilen borularının sızdırmazlık testi 6 bar hava basıncında 3 saat bekletilerek basınç düşmesi kontrol edilmiştir [17]. Sonuç olarak tüm boru birleştirmeleri sızdırmazlık testinden başarıyla geçtiği belirlenmiştir. Standartta uygun olarak hazırlanan ezme test numuneleri 2t mesafesine kadar katlandıktan sonra bağlantı elemanı ile boru birleştirme arayüzeyi levye yardımıyla ayrılmağa zorlanmıştır. Belirlenen tüm parametrelerde ayrılma borudan meydana geldiği için numuneler ezme testinden başarılı sayıldı.

#### 3.2. Tekli ve Çiftli Soyma Ayırma Testi (Peel Decohesion and Double Peel Decohesion Test)

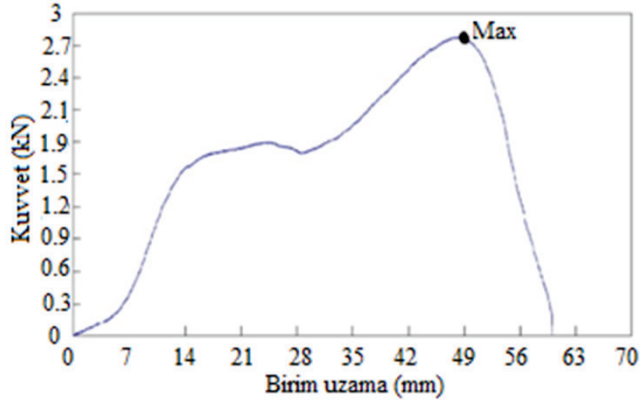
Kaynaklı birleştirmelerin statik kuvvet etkisi altındaki davranışlarını belirlemek için ISO 13954 standardına göre çekme soyma-ayırma testinin uygulanması istenir [1]. Standartta uygun olarak hazırlanan deney numunelerine öncelikle tekli çekme soyma-ayırma testi uygulandı. Numunelerin çekme soyma-ayırma testi kuvvet-birim uzama grafiği Şekil 10'da, ayrılma biçimleri ise Şekil 11'de gösterilmiştir.

Tekli çekme soyma-ayırma test numunelerinin %80 ana malzemeden, %15 delikten ve %5 ise kaynak arayüzeyinden meydana geldiği belirlendi. Test sonunda numunenin boru ile bağlantı elemanı arayüzeyindeki gevrek kırılma miktarı ergime bölgesinin toplam uzunluğuna oranlanarak yüzde gevreklik miktarı belirlenmiştir. Test edilen her bir şart için 8 numunenin gevreklik miktarı %33 ve altında ise birleştirme testten başarılı sayıldı [1, 15]. Tekli soyma-ayırma testi yük altındaki birleştirmelerin arayüzeyden ayrılıncaya kadar davranışlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemdir. Ancak bu yöntem bireysel olduğu için objektif bir ölçüm verememektedir [1].

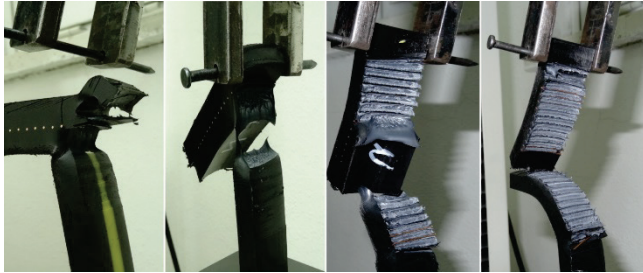


**Şekil 9.** Çiftli çekme-ayırma test numune tutucusu (Double peel decohesion test sample holder)

Numunenin gevreklik ve sünekliliğinin miktarını belirlemek için yeni bir yöntem gereklidir. Bu amaçla numunelere çiftli çekme soyma-ayırma testi uygulanmıştır. Numunelerin çiftli çekme soyma-ayırma testi kuvvet-uzama grafiği Şekil 12'de, ayrılma biçimleri ise Şekil 13'de gösterilmiştir.



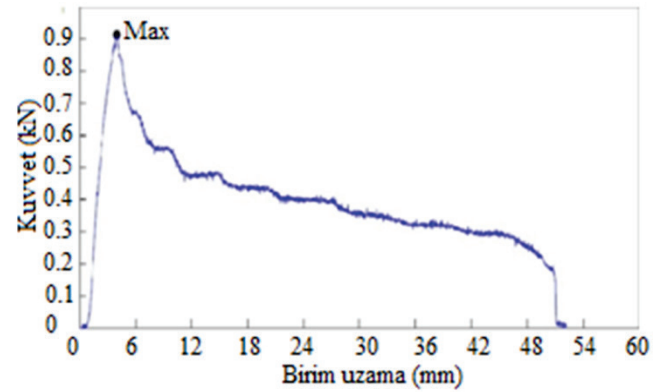
Şekil 10. Tekli çekme soyma-ayırma testi kuvvet-uzama grafiği  
(Peel decohesion test force-displacement curve graphic)



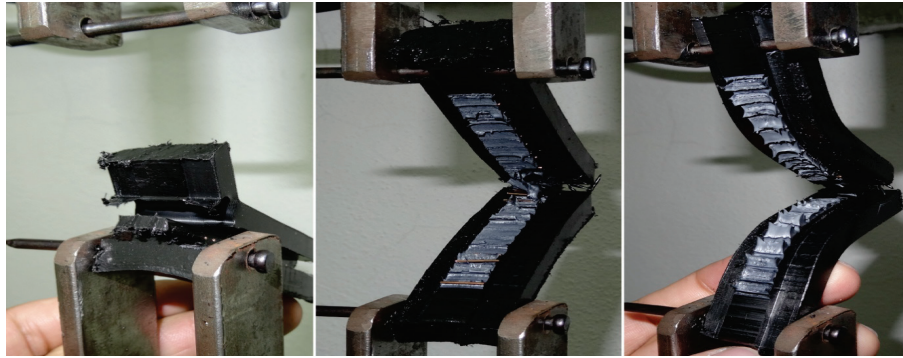
Şekil 11. Tekli soyma-ayırma test numunesi ayrılma biçimi  
(Peel decohesion test sample fracture mode)

Birleştirmelerin soyma-ayırma enerjisi,  $E_p$ , tekli çekme soyma-ayırma testi ile elde edilen kuvvet-birim şekil değiştirme eğrisinin altındaki alan olarak hesap edilir. Numune genişliği ve birleştirme bölgesi uzunluğu değiştiği için normal soyma-ayırma enerjisi,  $E_n$ , hesaplanır. Ancak tekli soyma-ayırma testinde kaynak arayüzeyinden ayrılma tamamen gerçekleşmediği için normal soyma-ayırma enerjisini yansıtmadığı düşünülmektedir.

Çiftli soyma-ayırma testinde ayrılma kaynak arayüzeyinden meydana geldiği için  $E_n$  çiftli soyma-ayırma testi kuvvet-birim şekil değiştirme eğrisi verilerinden hesap edilmiştir. Farklı çevre sıcaklığında temin edildiği şekliyle ve ön tav ısıl işlemi uygulanarak elde edilen birleştirmelerin tokluğu,  $K$ , ve harcanan normal soyma-ayırma enerjisi,  $E_n$ , hesaplanarak Tablo 3'de verilmiş ve ayrıca ayrılma yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 12. Çiftli çekme soyma-ayırma testi kuvvet - uzama grafiği  
(Double peel decohesion test force-displacement curve graphic)

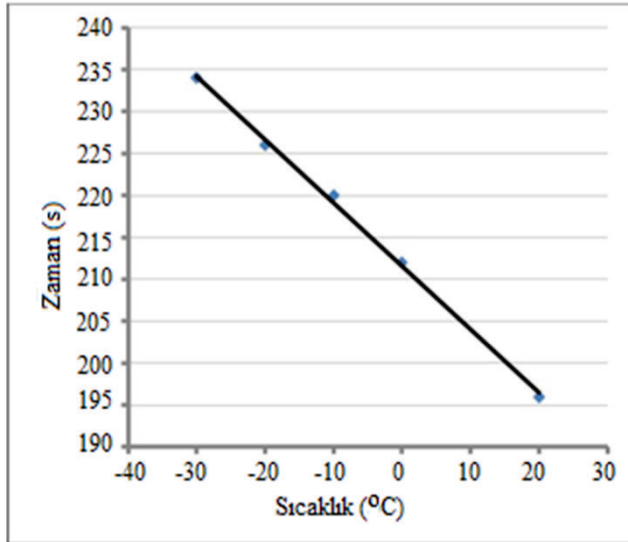


Şekil 13. Çiftli çekme soyma-ayırma test numuneleri ayrılma biçimleri (Double peel decohesion test samples fracture mode)

Tablo 3. Birleştirme için kaynak zamanı, birleştirmenin tokluğu,  $K$ , normal çekme soyma-ayırma enerjisi,  $E_n$ , ayrılma yüzeyi (The time for joining, weldment toughness,  $K$ , energy for normal peel decohesion,  $E_n$ , fracture surface)

Sıcaklık (°C)	20	0	-10	-20	-30					
Numune	A	C	E	F	G					
Kodu	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>
Ön Tav (°C)	-	60	-	60	-	60	-	60	-	60
Süre (s)	196	194	212	211	220	221	226	227	234	232
$K$ ortalama	0,32	0,299	0,266	0,273	0,265	0,27	0,259	0,266	0,258	0,265
$E_n$ ortalama	0,112	0,107	0,10	0,080	0,113	0,102	0,123	0,122	0,141	0,13

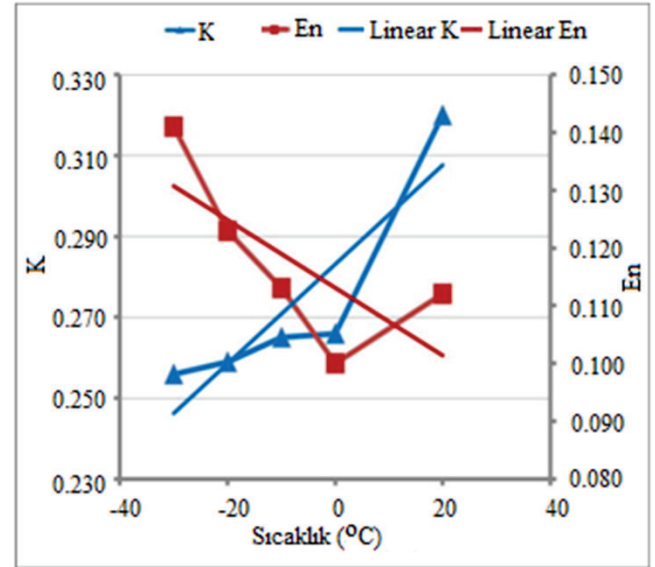
Tablodaki verilerden yararlanarak çevre sıcaklığıyla birleştirme kaynak zamanı arasındaki ilişki araştırılmış, grafiksel olarak Şekil 14'de gösterilmiştir. Çevre sıcaklığının ortalama K ve  $E_n$  üzerindeki etkisi Şekil 15'de gösterilmiştir. Farklı çevre sıcaklığında birleştirilen numunelere kaynak öncesi 60°C sıcaklıkta uygulanan ön tav ısıl işleminin ortalama K ve  $E_n$  üzerindeki etkisi ise Şekil 16'da gösterilmiştir. Şekil 14 ve Tablo 3'den görüldüğü gibi azalan çevre sıcaklığıyla kaynak zamanının belirgin bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. Ancak kaynak makinesi kaynak zamanının çevre sıcaklığıyla ilişkilendirilerek belirlediği için ön tav ısıl işleminin kaynak zamanı üzerinde etkisi olmamıştır. Şekil 15 ve Tablo 3'den görüldüğü gibi PE100 boru birleştirmelerinin dayanımı, K, genel eğilim olarak azalan çevre sıcaklığıyla belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Dayanım azalmasının arkasında birleştirme bölgesindeki azalan kristalin miktarının sorumlu olduğu düşünülmektedir. Çünkü polietilen plastiklerin yapısındaki kristalin miktarı sıcaklıkla ilişkilidir [18, 19]. Kristalin miktarı çevre sıcaklığına bağlı olarak soğuma hızından olumsuz etkilenmektedir. Kaynak sonrası soğuma hızı artışı yapıda oluşan kristalin miktarını azalttığı rapor edilmiştir [2, 5]. Kaynak öncesi uygulanan ön tav ısıl işlemi kaynak sonrası soğuma hızını yavaşlatarak yapıdaki kristalin miktarını arttırarak dayanımı iyileştirmeyi hedeflemiştir.



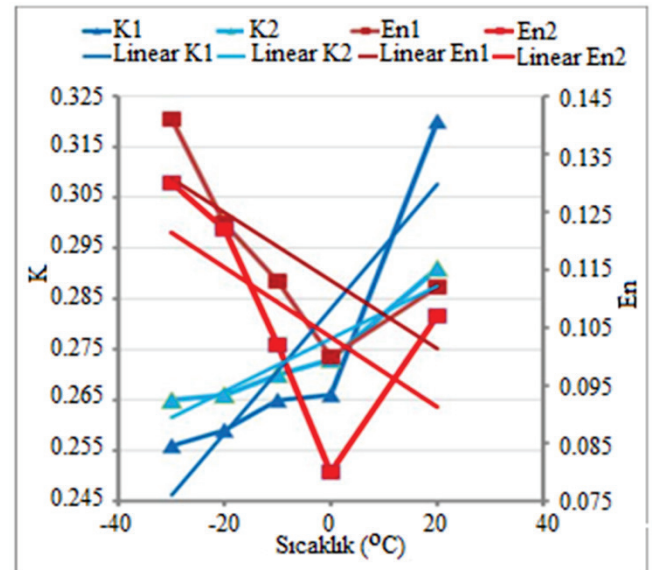
Şekil 14. Çevre sıcaklığı ile ilişkili birleştirme için gerekli zaman (The relationship between environment temperature and required time for joining)

Şekil 16'dan görüldüğü gibi birleştirmelerin  $E_n$  ise azalan çevre sıcaklığıyla birlikte belirgin bir şekilde artış eğilimi göstermiştir. Düşük çevre sıcaklıklarında birleştirilen PE100 boruların kristalin miktarındaki azalma dayanımda düşüşe sebep olurken çekme soyma-ayırma enerjisinde, diğer bir ifadeyle birleştirmenin süneklilik/gevreklik kavramının değerlendirilmesinde çok titiz davranılmalıdır. Zira  $E_n$  gerilim-uzama eğrisi ile ilişkili bir alan hesaplaması olduğundan ( $E_p = \int_0^{X_f} P(x) dx$ ), birleştirmenin dayanımının

yanı sıra birim uzamasından da etkilenir. Birleştirmenin dayanımının yüksek olması PE100 kaynaklı birleştirmelerinden istenilen bir durumdur. Ancak birim uzamanın yüksek olması boruların yüksek basınçlarda kullanılmasından dolayı istenilmez. Bu çalışmada amaç gevrekliği fazla arttırmadan dayanımı yükseltmektir. Daha öncede ifade edildiği gibi elektrofüzyon kaynaklı birleştirme özellikleri üzerinde etkisi olan parametreler, yapıdaki kristalin miktarı, molekül ağırlığı ve moleküllerin yönleri, molekül zincir uzunluğu, molekül zincirlerinin yan dal sayısı, boyutları ve biçimleri, lamella boyutları, yönleri ve aralarındaki mesafe, çevresel koşullar ve karışımlar olarak sıralanmaktadır [5, 20].



Şekil 15. Çevre sıcaklığının K ve  $E_n$  üzerindeki etkisi (Effect of environment temperature on the K and  $E_n$ )



Şekil 16. Ön tav ısıl işleminin ortalama K ve  $E_n$  üzerindeki etkisi (An effect of preheat treatment on the mean K and  $E_n$ )

PE100 borularına uygulanan ön tav ısıl işleminin birleştirmenin kalitesi üzerindeki etkisi de çalışmada



araştırılmıştır. Şekil 16 ve Tablo 3'den görüldüğü gibi belirlenen tüm çevre sıcaklıkları için uygulanan ön tav ısıl işleminin oda sıcaklığında birleştirilen numunelerin dayanımı ve  $E_n$  değerini düşürdüğü tespit edilmiştir. Araştırmalar PE100 boruların kaynak süresi çevre sıcaklığına bağlı makine tarafından belirlenen sürenin %62'de dahi birleştirilebileceğini göstermiştir [1]. Çok uzun kaynak zamanı PE malzemenin yapısının bozulmasına yol açarak birleştirmenin gevrek ve düşük dayanımlı olmasına neden olmaktadır [1, 6].

Çalışmada oda sıcaklığında birleştirilen borular için makine tarafından belirlenen kaynak zamanı yeterince uzun tutulmasına ilaveten ön tav ısıl işlemi uygulanması birleştirmeye verilen ısı girdisinin artışına sebep olarak PE100 boruların yapısının bozulmasına diğer bir ifadeyle molekül zincirlerinin hasar görmesine neden olarak dayanım ve süneklik düşüşüne yol açmıştır. Ancak 0°C ve daha düşük çevre sıcaklıklarında ön tav uygulanarak birleştirilen numunelerin dayanımında temin edildiği şekliyle birleştirilen numuneye oranla belirgin bir iyileşme tespit edilmiştir. Bunda yapıdaki kristalin miktarının artmasının yanı sıra molekül yan dallarının artışı sorumlu olduğu düşünülmektedir. Çekme soyma-ayırma enerjilerinde ise artan ön tav sıcaklığıyla birlikte belirgin bir değişiklik tespit edilmemiştir. Sonuç olarak ön tav ısıl işlemi PE100 borularının kaynaklı birleştirmelerinin kalitesine oda sıcaklıklarında olumsuz etki ederken daha düşük çevre sıcaklıklarında elde edilen birleştirmelerin özelliklerine olumlu etki etmektedir.

Tablo 3'den görüldüğü gibi çiftli soyma-ayırma test sonucunda oda sıcaklığında birleştirilen numunelerin ayrılma yüzeyleri genel olarak sünek bir ayrılmaya işaret ederken, düşük çevre sıcaklıklarda birleştirilen numune ayrılma yüzeylerine oranla daha az sünek ayrılma biçimi göstermektedir. Düşük çevre sıcaklıklarında elde edilen birleştirme arayüzeyleri daha lifli ve girintili çıkıntılı bir görünüme sahiptir. Bu durumun kaynaklı birleştirmelerin kristalin miktarı ve ona bağlı olarak lamel iç bağların değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir [1, 5]. Yapıdaki kristalin miktarının fazla olması, lamellerin daha kalın ve geniş yüzeyli olması ve sonuç olarak kovalent bağ şeklinde oluşan iç bağların dayanımı artırmasına ve ayrılmanın daha az sünek oluşmasına neden olur [6]. Ancak düşük çevre sıcaklıklarında birleştirilen numunelerin yapısının daha ziyade amorf olması diğer bir ifadeyle yapıda hacimce daha az oluşmuş küçük yüzeyli lameller arasında oluşan zayıf Wandervals bağları kolayca kopar. Böylece birleştirmenin sünekliğini arttırarak dayanımda azalmaya ve ayrılmanın daha sünek gerçekleşmesine sebep olur [21]. Özetle, yüksek dayanımlı lameller içi bağlar kristal miktarı yüksek olan malzemelerde daha gevrek ayrılmalara neden olmaktadır. Birleştirme öncesi uygulanan ön tav işlemi oda sıcaklığında birleştirilen numunelerin yapısının bozulması yanı sıra kristalin miktarının artmasına neden olarak düşük çevre sıcaklıklarında birleştirilen numunelere göre daha az sünek ayrılma davranışı sergilemesine neden olduğuna inanılmaktadır.

#### 4. SİMGELER (SYMBOLS)

$\phi_w$	: Rezistans direnç tellerin çapı
B	: Numune genişliği
C	: Çekme çivisi-kaynak başlangıcı arasındaki mesafe
$F_w$	: En yüksek yük
$E_N$	: Normal soyma-ayırma enerjisi
$E_P$	: Soyma ayrılma enerjisi
H	: Numune kalınlığı
K	: Birleştirme tokluğu
L	: Kaynak bölgesi uzunluğu
N	: Kaynak bölgesindeki rezistans tel sayısı
$P^{(x)}$	: Uygulanan yük
W:	: Numune genişliği
$x_f$	: Soyma enerjisi

#### 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrofüzyon kaynağıyla birleştirilen PE100 boruların kaynak zamanı azalan çevre sıcaklığı ile arttığı tespit edildi. Kaynak makinesi kaynak zamanını çevre sıcaklığıyla ilişkilendirilerek belirlediği için ön tav ısıl işleminin kaynak zamanı üzerinde etkisi olmamıştır. Farklı çevre sıcaklıklarında temin edildiği şekliyle ve ön tav uygulanarak birleştirilen boruların sızdırmazlık testinden başarı ile geçtiği tespit edildi. Farklı çevre sıcaklıklarında temin edildiği şekliyle ve ön tav uygulanarak birleştirilen boruların tamamı ezme testinden başarılı bulundu.

Elektrofüzyon kaynak yöntemiyle farklı çevre sıcaklıklarında birleştirilen PE100 boruların dayanımı, K, azalan çevre sıcaklığıyla azaldığı tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda birleştirilen boruların kristalin miktarındaki azalma süneklikte artışa ve numunelerde daha sünek bir ayrılmaya sebep olmuştur. Ön tav ısıl işlemi (60°C sıcaklıkta 2 saat için) PE100 birleştirmelerin dayanımına oda sıcaklığında olumsuz etki ederken, daha düşük çevre sıcaklıklarında elde edilen birleştirmelerin özelliklerini ise olumlu etkilediği tespit edilmiştir.

#### 5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Proje destek ofisince desteklenmektedir. Adı geçen birime teşekkür edilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Boge L., Hjrtfors E., Surface Analysis of Polyethylene Pipes and Failure Characterization of Electrofusion Joints, Report No. 380, Göteborg-Sweden, 2011.
2. Akkurt A., An Analysis of Electromelting and Hot Element Welding Method's Safety Used to Join PE Natural Gas Pipes, International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering, 3 (2), 493-504, 2014.
3. Akkurt A. ve Saraç E., Farklı Ortam Sıcaklıklarında Elektroergitme Kaynağı ile Birleştirilen PE Doğalgaz Transfer Hatlarının Güvenirliklerinin Araştırılması, Electronic Journal of Machine Technologies, 9 (2) 39-52, 2012.

4. Akkurt A. ve Ertürk İ., Sıcak Elaman Alın Kaynak Yöntemi ile Birleştirilen PE Doğalgaz Borularının Güvenirliklerinin Araştırılması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 (2) 2, 221-233, 2010.
5. Ünal H. ve Yetgin S.H., The Investigation Of Tribological Performance of Polyamide 6 Polymer And Polyamide 6/Wax Blend Against Themselves, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 457-463, 2016.
6. Bowman J., A Review of the Electrofusion Joining Process for Polyethylene Pipe Systems, Polymer Engineering and Science, 37 (4), 674, 1997.
7. Joy J.J., Mechanical and Chemical Properties of High Density Polyethylene: Effects of Microstructure on Creep Characteristics, Doctoral Thesis, University of Waterloo, 2008.
8. Say S.S. ve Akgüngör, A.A., Welding Defects And Their Reasons Observed In Electrofusion Welding Of Polyethylene Pipes, 24th World Gas Conference, WGC Argentina, 2009.
9. Hiroyuki N., Fumio I., Akio N., Testuo I., Design of Electrofusion Joints and Evaluation of Fusion Strength Using Fusion Simulation Technology, Polymer Engineering and Science, 34 (20), 1529, 1994.
10. Stakenborghs R. and Rouge B., Microwave Based NDE Inspection of HDPE Pipe Welds, Proceedings of The 17th International Conference On Nuclear Engineering, Brussels, Belgium, 2009.
11. Fujikakef M., Fukumurat M., Kitao K., Analysis of The Electrofusion Joining Process In Polyethylene Gas Piping Systems, Computer and Structures, 64 (5-6), 939-948, 1997.
12. Iranian Gas Standards, IGS-C-DN-001, Code of Practice for Construction and Commissioning of P.E. Gas Networks.
13. DVS 2207-1 Standard, Supplement, Welding of Thermoplastics – Heated tool welding of pipes, pipeline components made of PE-HD.
14. ISO 13955:1997 Standard, Plastics Pipes and Fittings - Crushing Decohesion Test for Polyethylene (PE) Electrofusion Assemblies.
15. ISO 13954:1997 Standard, Plastics Pipes and Fittings - Peel Decohesion Test for Polyethylene (PE) Electrofusion Assemblies of Nominal Outside Diameter Greater Than or Equal to 90 mm.
16. BS EN 12814-4:2001 Standard, Testing of welded joints of thermoplastic semi-finished products –Part 4: peel tests.
17. DIN 4279-1 part 1. Standard, Leak test of pressure pipe systems.
18. Boyer S.A.E. and Haudin J.-M., Crystallization of Polymers at Constant and High Cooling Rates: A New Hot-Stage Microscopy Set-UPQ, Polymer Testing, 29, 445–452, 2010.
19. Strobl G., Crystallization and melting of bulk polymers: New observations, conclusions and a thermodynamic scheme, Prog. Polym. Sci. 31, 398–442, 2006.
20. Wang L.Y., Lugito G., Woo E.M., Wang Y.H., Phase behavior, polymorphism and spherulite morphology in Poly (1,4-butylene adipate) interacting with two structurally similar acrylic polymers, Polymer, 53, 3815-3826, 2012.
21. Weissbach W., Materials Science and Materials Testing, Verlag, ISBN 3-8348-0295-6, 2007.