



Dizel Enjektör Yakıt Deliğinin Aşındırıcı Akış ile İşlenmesi (AFM) Sonrası Kalıntı Macundan Temizlenmesine Yönelik Makinenin Geliştirilmesinde Kullanılacak Kompakt Isı Eşanjörü Tasarım Analizi

Alp Büyükbayraktar¹, Hasan Melih Kınagu², İbrahim Altın³, Abdurrahman Alper Özalp⁴, Elif Büyük Ögüt^{5*}, Nezih Kamil Salihoğlu⁶, Gülçin Deniz⁷, Semih Alan⁸, Ahmet Gökhan Poyraz⁹, Mehmet Atak¹⁰, Serhat Ekmekçi¹¹, Gülcan Uludağ Mutaf¹²

¹ Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7344-0694), alp23bbayraktar@gmail.com

² Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0003-0594-4927), melihkinagu@hotmail.com

³ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7017-2607), ibrahimaltin@dogupres.com

⁴ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0002-4976-9027), aozalp@uludag.edu.tr

^{5*} Kocaeli Üniversitesi, Hereke Asım Kocabıyık MYO, Makine ve Metal Tek. Bölümü, Kocaeli, Türkiye (ORCID: 0000-0002-5647-4040), elif.ogut@kocaeli.edu.tr

⁶ Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7730-776X), nkamils@uludag.edu.tr

⁷ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0002-9724-7717), gulcindeniz@dogupres.com

⁸ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0001-7792-9377), semihalan@dogupres.com

⁹ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0002-2369-8814), gokhanpoyraz@dogupres.com

¹⁰ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0003-1558-3379), mehmetatak@dogupres.com

¹¹ Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0003-3887-8647), serhatekmekci@dogupres.com

¹² Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Bursa, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2876-462X), gulcanuludag@dogupres.com

(1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences ICEANS 2022, May 10-13, 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1113144)

ATIF/REFERENCE:, Büyükbayraktar, A., Kınagu, H.M., Altın İ., Özalp, A.A., Ögüt, E.B, Salihoğlu N.K., Deniz, G. Alan S., Poyraz A.G., Atak M., Ekmekçi, S. & Mutaf, G.U., (2022) Dizel Enjektör Yakıt Deliğinin Aşındırıcı Akış ile İşlenmesi (AFM) Sonrası Kalıntı Macundan Temizlenmesine Yönelik Makinenin Geliştirilmesinde Kullanılacak Kompakt Isı Eşanjörü Tasarım Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 243-254.

Öz

AFM prosesi sonrasında enjektör gövdesi, yakıt deliğinde kalıntı halde bulunan AFM macununun delikten uzaklaştırılması, bu macunun toplanması suretiyle yeniden kullanımı, bununla birlikte 250 mikron ile 500 mikron arasındaki kalıntı partikül sayısını azaltmak suretiyle temizlik kriterlerini karşılayacak nitelikte yakıt deliğinin temizlenmesine yönelik bir temizlik prosesi geliştirilmesi üzerine şekillenmiştir. Mevcut durumda, parçanın ilgili temizlik kriterini sağlaması için uzun ve yüksek maliyetli genel yıkama işlemi yürütülmekte olup, buna rağmen temizlik kriteri zorlukla sağlanabilmektedir. Temizlik konusunda karşılaşılabilecek muhtemel problemler çalışmadan elde edilecek bulgular sayesinde, tasarım ve analiz aşamasında öngörülerek önlenmesi hedefiyle kurgulanmıştır. Kompakt ısı eşanjörü etkinliğinin irdelenerek çözücü akışkanın etkinliğinin irdelenmesine yönelik yürütülen deneysel tasarımlarda Taguchi yönteminden faydalanılması uygun görülmüş ve toplamda 8 farklı Kompakt ısı eşanjörünün deneysel tasarım ve analizlerinden çözücü akışkan olan Contox SLF adlı akışkanın optimum boru içerisindeki boru çıkış sıcaklığı minimum enerji tüketimi göz önüne alınarak tayin edilmiştir. Ayrıca Ansys Fluent paket programı üzerinde, enjektör gövdesi yakıt deliğinin iki boyutlu modeli kullanılarak tek fazlı bir akış analizi yürütülmüştür. Elde edilen veriler, delik içi akış karakteristiğinin ve ağ yapısının oluşturulması için girdi teşkil etmiştir. Sürekli rejimde çözücü uygulaması ile hassas temizlik prosesi geliştirme çalışmalarında Taguchi yöntemi ile tasarlanan kompakt ısı eşanjörlerinin etkinlikleri hesaplanarak, çözücü akışkanın boru içerisindeki ısı, basınç ve hız davranışları incelenmiştir. Çözücü akışkanın boru içerisine giriş hızı ve kompakt ısı eşanjörüne verilen yüzey ısı akıları hesaplanıp, çözücü akışkanın boru çıkış sıcaklığı tespit edilmiştir. Tasarlanan Kompakt ısı eşanjörleri çözücü akışkanın kritik sıcaklığına olan etkisi kontrol edilmiş olup tasarımdaki parametrelerin etkisi irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompakt Isı Eşanjörü, AFM Prosesi, Contox SLF, Taguchi Yöntemi, Ansys Fluent.

Design Analysis of a Compact Heat Exchanger to be Used in the Development of a Machine for Cleaning the Diesel Injector Fuel Hole from Residue Paste after Abrasive Flow Treatment (AFM)

Abstract

After the AFM process, the injector body has been shaped on the development of a cleaning process for the cleaning of the fuel hole, which will meet the cleaning criteria by removing the AFM paste remaining in the fuel hole from the hole, collecting this paste and reusing it, along with reducing the number of residual particles between 250 microns and 500 microns. . In the current situation, a long and costly general washing process is carried out in order for the part to meet the relevant cleaning criterion, although the cleaning criterion can be met with difficulty. Possible problems in cleaning were designed with the aim of preventing them by foreseeing them in the design and analysis phase, thanks to the findings obtained from the study. In the experimental designs carried out to examine the efficiency of the solvent fluid by examining the efficiency of the compact heat exchanger, it was deemed appropriate to use the Taguchi method and from the experimental designs and analyzes of 8 different compact heat exchangers in total, the pipe outlet temperature of the solvent fluid Contox SLF in the optimum pipe was determined by considering the minimum energy consumption. . In addition, a single-phase flow analysis was carried out using the two-dimensional model of the injector body fuel hole on the Ansys Fluent package program. The obtained data provided input for the formation of the in-hole flow characteristic and the network structure. The efficiency of compact heat exchangers designed with the Taguchi method in the development of sensitive cleaning process with solvent application in continuous regime was calculated and the heat, pressure and velocity behaviors of the solvent fluid in the pipe were investigated. The inlet velocity of the solvent fluid into the pipe and the surface heat fluxes given to the compact heat exchanger were calculated, and the pipe outlet temperature of the solvent fluid was determined. The effect of the designed compact heat exchangers on the critical temperature of the solvent fluid has been checked and the effect of the parameters in the design has been examined.

Keywords: Compact Heat Exchanger, AFM Process, Contox SLF, Taguchi Method, Ansys Fluent.

1. Giriş

Isı eşanjörleri santral, klima, petrokimya endüstrisi, soğutma, proses endüstrisi, güneş enerjili su ısıtıcı, kimyasal reaktörler ve nükleer reaktör gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Isı eşanjörlerinin ısı transfer performansının artırılması enerji tasarrufu sağlayabilir, işlem süresini kısaltabilir, termal performansı iyileştirebilir ve çalışma ömrünü uzatabilir. Isı transfer uygulamaları için yüksek performanslı termal sistemlere olan talebe bağlı olarak, bu sistemlerin ısı transfer davranışına ilişkin pratik uygulamaları için ısı transfer verimliliğine yönelik çalışmalar yapılmakta ve yöntemler geliştirilmektedir. özellikle binalar, endüstriler ve otomotivlerdeki uygulamalar için, optimum ısı eşanjörü tasarımı, enerji tasarrufu açısından minimum pompalama gücü (yani minimum basınç düşüşü) ve verimli ısı transferi açısından büyük bir öneme sahiptir.

Ranganayakulu ve Seetharamu [1] Çapraz akışlı plakalı kompakt ısı eşanjörünün analizinde, ısı eşanjörünün duvarı boyunca iki boyutlu uzunlamasına ısı iletiminin , giriş sıvısının homojen olmayan akışının ve sıcaklık dağılımının kombine etkilerini dikkate alarak, sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Sıvı akışındaki olası sapmalar göz önüne alındığında, ısı eşanjörünün çeşitli tasarım ve çalışma koşulları için uzunlamasına ısı iletimi, akışkanlık ve yüksek sıcaklık farkının etkilerini hesaplamışlardır. Bazı tipik uygulamalarda performans farklılıklarının oldukça önemli olduğunu bulmuşlardır.

Singh vd. [2] Kompakt ısı eşanjörlerinde daha iyi enerji kullanımı için genel kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Kompakt ısı eşanjörlerinde sıcaklık ve akış açısından mevcut olan tekdüzeliklerin ve bunların çeşitli enerji transfer ekipmanlarının performansı üzerindeki etkilerinin gözden geçirilmesini ele almaktadırlar. Kompakt ısı eşanjörlerinin girişindeki akış dağılımı ve akış şemasının anlaşılması ve ısı eşanjörünün davranışının

tahmin edilmesini de gözden geçirmişlerdir. Sıcaklık ve akışkanlık için farklı modeller tartışılmıştır. Sıcaklık ve akışın tekdüzeliklerinden dolayı kararlı durum ve geçici termal performans üzerine araştırmalar da ayrıca incelenmiştir.

Eksenel ısı iletimi etkileri de dahil olmak üzere, yüksek verimli karşıt akışlı ısı eşanjörlerinin etkisizliği gözden geçirmiştir. Sabit malzeme özelliklerinin temel varsayımı ve eşanjör ile çevresi arasında ısı değişiminin olmaması altında, kapalı form denklemleri hem dengeli hem de dengesiz akış için değerlendirmiştir. Kriyojenik uygulamalar için yüksek verimli ısı eşanjörlerinin tasarımı, ısı eşanjörünün geleneksel çalışmasında genellikle ihmal edilebilecek bir etki olan ısı eşanjörünün tasarımı ve sıvıları aracılığıyla akış yönünde eksenel ısı iletiminin dikkate alınmasını gerektirdiğini ortaya sunmuştur. En ciddi performans bozulması, her iki sıvı da aynı ısı kapasitesi oranına sahip olduğunda ortaya çıktığını vurgulamıştır.[3]

Hidrokarbonlar, soğutma, klima ve ısı pompası uygulamaları için alternatif akışkanlar olarak kabul edilir. Saf bütan, propan veya bunların karışımları kabul edilebilir, ancak yanıcı özelliklerinden dolayı, sistemlerin soğutucu akışkanın yükü en aza indirilecek şekilde tasarlanması gerekir. Bu nedenle, bu tür sistemlerde kompakt ısı eşanjörleri ve gelişmiş geometriler benimsenmiştir. Saf hidrokarbonlar ve bunların karışımları için iki fazlı ısı transfer hesaplamaları için analiz edilmektedir. Geliştirilmiş borular ve kompakt ısı eşanjörleri de dahil olmak üzere çeşitli geometrilerde buharlaşma ve yoğunlaşma ısı transferini tahmin etmek çeşitli modeller önerilmektedir [4].

Dixit ve Ghosh,[5] yaptıkları çalışmalarda günümüzde enerji kaynaklarının tükenmesi, onları korumak için itici güç haline geldiklerini ifade etmişlerdir. Sistem verimliliğinin artırılması, minyatürleştirmenin başarılı bir şekilde çözüm sağladığı enerji sürdürülebilirliğinin sağlanabileceği bir yöntem olduğunu savunmaktadırlar. Minyatür ısı eşanjörleri, yüksek termal

performansları nedeniyle, enerji verimli sistemler sağlama potansiyeline sahip olabileceği ve buna ek olarak, kompaktlık, küçük boyut ve daha az ağırlık özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılabileceklerini ileri sürmüşlerdir. Ismail vd. [6] kompakt plakalı kanatlı ısı eşanjörlerinin basınç düşüşü ve ısı transfer özellikleri açısından pompalama gücü üzerindeki etkileri üzerine çalışmaları incelemiştir.

Bu çalışmanın amacı, sürekli rejimde çözücü uygulaması ile hassas temizlik prosesi geliştirme çalışmalarında Taguchi yöntemi kullanılarak tasarlanan kompakt ısı eşanjörlerinin etkinlikleri hesaplanarak, çözücü akışkanın boru içerisindeki ısı, basınç ve hız davranışları incelenmiştir. Çözücü akışkanın boru içerisine giriş hızı ve kompakt ısı eşanjörüne verilen yüzey ısı akıları hesaplanıp, çözücü akışkanın boru çıkış sıcaklığı tespit edilmiştir. Tasarlanan Kompakt ısı eşanjörleri çözücü akışkanın kritik sıcaklığına olan etkisi kontrol edilmiş olup, tasarımdaki parametrelerin etkisi irdelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 AFM Macununun Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

AFM macununun reolojik özellikleri deneysel olarak tayin edilememiştir. Macun, belirli bir kuvvete kadar şekil değiştirmemekte, kuvvet ancak eşik değeri geçtikten sonra şekil değişimi gözlenmektedir. Bununla birlikte, macun üzerinden kuvvet kaldırıldığında şeklini büyük ölçüde korumaktadır. Başka bir deyişle, malzeme kuvvet uygulanmadığında katı, kuvvet uygulandığında akışkan özellikleri gösterdiğinden, macunun akma sınırı olan ve kayma ile incelenen Newton tipi olmayan bir akışkan (yield – pseudoplastic) olduğu bilinmektedir.

Newton tipi akışkanlarda gerilme tensörü τ , (1) no.lu denklemdeki gibidir.

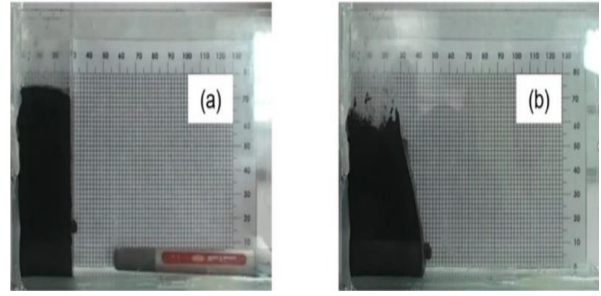
$$\tau(\dot{\gamma}) = 2\mu(\dot{\gamma}) \quad (1)$$

Burada; $\dot{\gamma}$ ve μ ifadeleri sırasıyla kayma hızı (s^{-1}) ve dinamik viskoziteyi (Pa.s) temsil etmektedir. Kayma ile incelenen Newton tipi olmayan akışkan davranışı sergileyen AFM macununu simüle etmek için (2) no.lu denklemde verilen Carreau Newton tipi olmayan akış modeli kullanılmıştır.

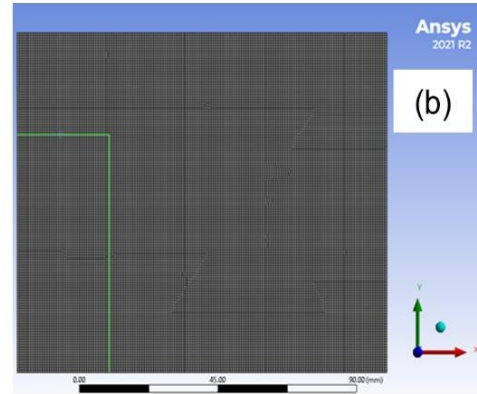
$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})[1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (2)$$

Burada; $n, \mu_0, \mu_{\infty}, \lambda$, ifadeleri sırasıyla Power-Law endeksi, sıfır kayma hızındaki dinamik viskozite (Pa.s), sonsuz kayma hızındaki dinamik viskozite (Pa.s) ve zaman sabiti (s) değişkenlerini temsil etmektedir. Malzemenin akış karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla bir deney düzeneği hazırlanmıştır. 20 mm aralıkla paralel bir şekilde yerleştirilmiş iki cam plaka ile oluşturulan deney düzeneği, derinlik boyutunda herhangi bir akışa müsaade etmediğinden 2 boyutlu akış karakterize etmektedir. Bu deney düzeneğine 70 mm yüksekliğinde ve 30 mm genişliğinde doldurulan AFM macunu serbest akma koşullarında incelenmiş, $t=0$ s anından itibaren serbest akış takip edilerek kayıt altına alınmıştır (Şekil 1). Ardından, deney düzeneğinin iki boyutlu modeli oluşturulmuş ve Ansys Meshing programı kullanılarak 21.280 adet dörtgen hücreye ayrılmıştır (Şekil 2). AFM bölgesinde patch oluşturulabilmesi için 70 mm yükseklik ve 30 mm genişliğindeki alan ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılan bölgeye AFM macunu, diğer

bölgeye program veri tabanında yer alan hava akışkanı tanımlanmıştır.



Şekil 1. AFM macununun akışkan özelliklerinin belirlenmesi için oluşturulan deney düzeneğinde $t=0$ s (a) ve $t=120$ s (b) andaki macun akışı



Şekil 2. AFM macunu akışkan özelliklerinin belirlenmesi için oluşturulan iki boyutlu modele ait ağ yapısı

AFM macunu için Denklem (2)'de verilen değişkenlere ait değerler bilinemediğinden, malzemenin gerçek akış koşulları ile kalibrasyonu esnasında bu değerlerin farklı seviyeleri incelenmiştir. Başlangıçta literatürde yer alan değerler (n : 0,2, λ : 0,04, μ_0 : 26013, μ_{∞} : 650) program içerisine tanımlanmış ve malzeme çözüm için hazır hale getirilmiştir.

Modelde herhangi bir giriş sınır koşulu tanımlanmamış, modelin tüm kenarları duvar sınır şartı olarak tanımlanıp kaymazlık şartı aktif hale getirilmiştir. Analizlerde laminer ve sıkıştırılmaz akış tercih edilmiş, model olarak "Volume of Fluid" iki fazlı akış tayin edilmiştir. Birincil faz olarak hava, ikincil faz olarak AFM macunu tanımlanmış, birleşik hız ve basınç denklemlerinde SIMPLE yarı kapalı çözüm yöntemi uygulanmış ve terimlerin ayrıştırılmasında ikinci derece çözümlerden faydalanılmıştır. Yakınsatma faktörleri için varsayılan değerler (basınç 0,75; momentum 0,75; türbülans özellikleri 0,8) alınmış; yakınsama kriteri de 10^{-6} olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerinde sıkıştırılmaz akışta süreklilik ve iki boyutlu momentum denklemleri çözdürülmüş olup, bunlarla ilgili bağıntılar (3) ile (9) no.lu denklemler arasında verilmiştir.

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Burada; ρ, t, u, v, w ifadeleri sırasıyla yoğunluk, zaman, x-eksenindeki hız bileşeni, y-eksenindeki hız bileşeni ve z-eksenindeki hız bileşenini temsil etmektedir.

Akış iki boyutlu, zamana bağlı ve sıkıştırılmaz tercih edildiği için (3) no.lu denklem (4) no.lu forma dönüşmüştür.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

Momentum denklemleri:

x-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

y-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

z-bileşeni:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Burada; P, g, μ ifadeleri sırasıyla basınç, kütle kuvveti ve dinamik viskoziteyi temsil etmektedir.

Akış iki boyutlu, zamana bağlı ve sıkıştırılmaz tercih edildiği için, (5) ve (6) no.lu denklemler dikkate alınmış ve bu denklemler sırasıyla (8) ve (9) no.lu denklemlerle ifade edilen formlara dönüşmüştür.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

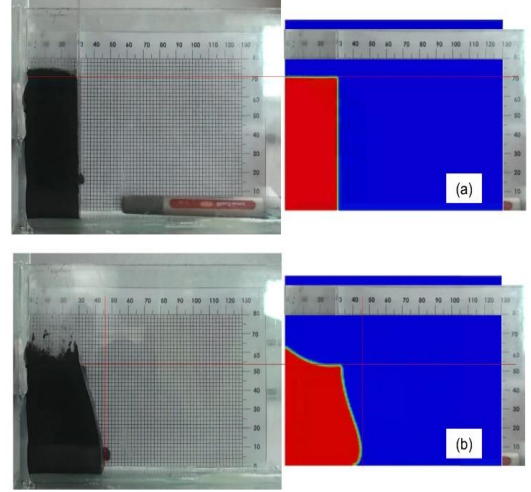
$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

Zamana bağlı yürütülen analizlerde, zaman adımı 0.0005 s ve her adım 20 iterasyon olacak şekilde, toplamda 120 saniyelik; zamana bağlı, yerçekimine bağlı serbest akış analizleri yürütülmüştür.

Zamana bağlı analizlerin sonucunda, macunun 120 saniye sonrasındaki serbest akış görüntüsü ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Macun viskozite değişkenleri için literatürde yer alan viskozite değerleri kullanıldığında, analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında uyum gözlenmemiştir. Çözüme hızlı ulaşmak amacıyla, Tablo 1'de verilen farklı macun değişkenleri kullanılarak analizler 8 kez tekrarlanmış ve serbest akış takip edilerek elde edilen her bir nümerik sonuç deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda, macunun x-ekseninde 46 mm ve y-ekseninde 52 mm mesafeye kadar aktığı tespit edilmiştir. Bu akışı profili, simülasyonlarda 8. denemede gözlenmiş olup (Şekil 3). macun viskozite değişkenleri aşağıdaki gibi tayin edilmiştir:

- Power-Law Endeksi, n: 0,010
- Zaman Sabiti, s: 4,00
- Sıfır Kayma Hızındaki Dinamik Viskozite, Pa.s: 16000

- Sonsuz Kayma Hızındaki Dinamik Viskozite, Pa.s: 15000



Şekil 3. AFM macunu yerçekimi ile serbest akış deneysel çalışması ve Deneme 8'de belirtilen parametre seviyeleri kullanılarak yürütülen zamana bağlı, yerçekimine bağlı serbest akış nümerik analiz kıyaslaması, $t = 0$ s (a) ve $t = 120$ s (b).

Tablo 1. Macun viskozite tayini için yürütülen deneysel çalışmaya ve zamana bağlı, yerçekimine bağlı serbest akış simülasyonlarına ait parametre seviyeleri ve bunlara ait akış sonuçları

Macun Malzemesi: Yoğunluk [kg/m ³]: 1300)	Deneme 1	Deneme 2	Deneme 3	Deneme 4	Deneme 5	Deneme 6	Deneme 7	Deneme 8
Time Constants	0.04	1,00	2,00	4,00	6,00	4,00	4,00	4,00
Power-Law Index, n	0,200	0,100	0,100	0,050	0,010	0,005	0,005	0,010
Infinity Viscosity Pa.s	650	1000	1000	1000	7000	7000	8000	15000
Zero Viscosity Pa.s	26013	12000	8000	8000	8000	8000	9000	16000
t=120 s Maks. x-Mesafesi	106	83	74	56	56	56	54	46
t=120 s Min. y-Mesafesi	12	28	34	42	42	42	46	52

2.2. Çözücü Akışkanın Akış Tipinin Belirlenmesi ve Hesaplanması

Çözücüyle temizleme işlemi için Tablo 2’te verilen 1 parametresi 4 seviye, 4 parametresi 2 seviyeli Taguchi L8 karışık seviyeli deney tasarımı dikkate alınmıştır. (Şekil 4). ve (Şekil 5). de gösterildiği üzere Taguchi L8 tablosuna denk gelen 2 ve 4 borulu elektrikli ısıtıcı Kompakt ısı eşanjörü tasarımları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

Tablo 2. Çözücü ile temizleme işlemi için oluşturulan Taguchi L8 deney tasarımı

Boru No	Isıl Güç (W)	Boru Uzunluk (cm)	Boru Çapı (mm)	Boru Sayısı	Toplam Debi (l/s)
1	30	5	5	2	0,013
2	30	10	10	4	0,011
3	26	5	10	4	0,013
4	26	10	10	2	0,011
5	22	10	5	4	0,013
6	22	5	10	2	0,011
7	18	10	10	2	0,013
8	18	5	5	4	0,011



Şekil 4. 2 Borulu Elektrikli Isıtıcı Kompakt Isı Eşanjörü Tasarımı



Şekil 5. 4 Borulu Elektrikli Isıtıcı Kompakt Isı Eşanjörü Tasarımı

Kompakt ısı eşanjörüne ait datalarda iki farklı hacimsel debi analiz edilmiştir. İlki 0.013 l/s ve diğeri 0.011 l/s’dir. Boruların çapları 5 mm ve 10 mm olmak üzere iki farklı şekilde tasarlanmıştır. Çapları farklı olan iki tipteki borudan iki farklı hacimsel debi tanımlanmıştır. Taguchi tablosunda tanımlanan debiler toplam debi olarak tanımlanmıştır. Bir tek boru için tanımlanan debi ise toplam debiyi boru sayısına bölerek (10) nolu denklemden elde edilmiştir. Bu da analizlerde akışkanın boru içerisine giriş hızını tek bir boru için tanımlamakta kullanılmıştır. Aşağıda sekiz farklı boru tasarımına ait çözücü akışkanın tek bir boru giriş hızları gösterilmiştir.

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = V \text{ (m/s)} \times A \text{ (m}^2\text{)} \quad (10)$$

$$1.3 \times 10^{-5} = V \times \pi \times (0.005)^2 / 4$$

$$V_{(0.013\text{/s})} = 0.6624 \text{ m/s olarak hesaplanır.}$$

Aynı şekilde diğer akışkan hızları da hesaplanırsa;

$$D=5\text{mm için}$$

$$D=10 \text{ mm için;}$$

$V_{(0,013 L/s)} = 0.6624 \text{ m/s}$ $V_{(0,013 L/s)} = 0.1656 \text{ m/s}$
 $V_{(0,011 L/s)} = 0.5605 \text{ m/s}$ $V_{(0,011 L/s)} = 0.1401 \text{ m/s}$ olarak elde edilmiştir.

Tek Bir Boru İçin Giriş Hızları:

Giriş Hızı = Boru Giriş Hızı / Boru Sayısı

Yukarıdaki formüle göre hesaplanarak sekiz farklı çalışmada kullanılacak olan çözücü akışkanın boru giriş hızları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Çözücü akışkanın Tek bir borudaki boru giriş hız değerleri

Sıra No	Boru Uzunluğu (cm)	Boru Çapı (mm)	Boru Sayısı	Toplam Debi (l/s)	Giriş hızları (m/s)
1	5	5	2	0,013	0,3312
2	10	10	4	0,011	0,0350
3	5	10	4	0,013	0,0414
4	10	10	2	0,011	0,0700
5	10	5	4	0,013	0,1656
6	5	10	2	0,011	0,0700
7	10	10	2	0,013	0,0828
8	5	5	4	0,011	0,1401

Analizlerde kullanılacak akışkan olarak Contox SLF çözücü akışkanını Ansys Fluent paket programında tanımlamak için aşağıdaki termodinamik özellikler kullanılmıştır.

ρ : 780 (kg/m³) μ : 0.85 mPa/s

C_p : 2090 (J/kg K) k : 0.149 (W/mK)

Boru giriş hızları tayin edildikten sonra akışın laminar veya türbülanslı olma durumu incelenmektedir. Çözücü akışkan sekiz farklı datada Reynolds sayısı aşağıdaki (11) nolu denklemden yararlanarak kritik 2320 değerinden düşük olduğu için laminar akış olarak tanımlanmıştır.

$$Re = \rho V D / \mu \quad (11)$$

$Re_1 = 1.519,62$ laminar akış

$Re_2 = 312,17$ laminar akış

$Re_3 = 379,90$ laminar akış

$Re_4 = 642,35$ laminar akış

$Re_5 = 759,81$ laminar akış

$Re_6 = 642,35$ laminar akış

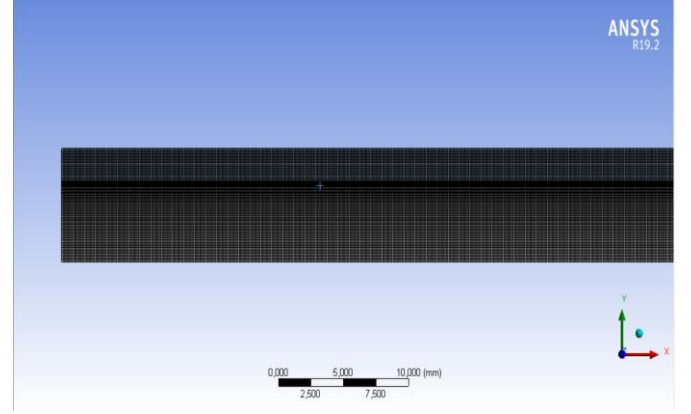
$Re_7 = 759,81$ laminar akış

$Re_8 = 642,81$ laminar akış olarak hesaplanmıştır.

e-ISSN: 2148-2683

2.3. Kompakt Isı Eşanjör / Isıtıcı Tasarımlarına ait Modellerin Ansys Fluent Analiz Programında Çözüm Ağı Yapısının Oluşturulması ve Ağdan Bağımsızlık Çalışmasının Yapılması

Tasarlanan Modellerde tüm ısıtıcılar bakır boru olarak tanımlanmıştır. Tasarımda çözücü akışkana ait olan akışkan alanı tanımlanmıştır. 2 Boyutlu incelenen çalışmada duvar kalınlığı ve akışkan bölgesi arasında kalan alana daha sık bir ağ yapısı uygulanarak incelenmiştir. Bütün duvar kenar ve yüzey ağırları atılarak tasarlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Isıtıcı Boruya ait 2 boyutlu HAD analizleri için oluşturulan ağ yapısı

Çalışmada modelin akış alanına uygun ağ yapısı için beş farklı ağ göz önünde bulundurulmuştur. Ağ çalışmasındaki yüzey ağlarına geçilmiş ve çapların oranı kadar bölünme sayısı seçilerek yüzey ağırları sisteme dahil edilmiştir. Çarpıklık (Skewness) değeri $2,7088 \times 10^{-2}$, Element Quality değeri 0,94989 ve Orthogonal Quality değeri 0,99876 olarak tanımlanmıştır. Çözücü akışkan hız sınır şartı 0,5 m/s tek bir boru için bu hızın altında olan her durumda çözücü akışkan alanına ait çıkış sıcaklıkları birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Tablo 4'te verilen sonuçlar M3 için ağ yapısının ve ağ sayısından bağımsızlığının elde edildiği sonucuna varılmıştır.

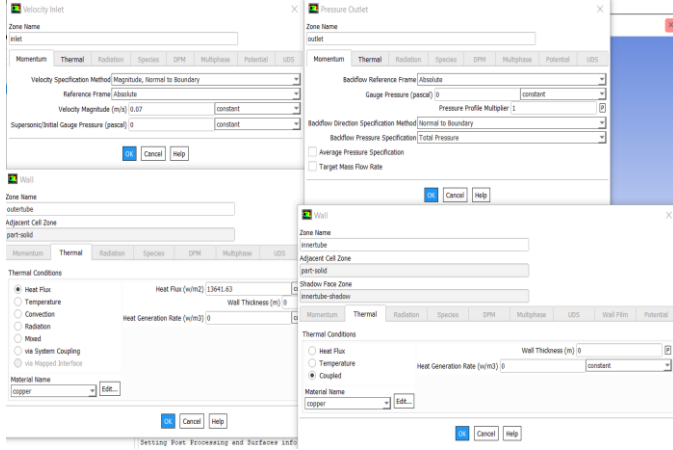
Tablo 4. Kompakt ısı eşanjörüne ait ağdan bağımsızlık çalışması

Ağ yapısı	Çıkış Sıcaklıkları (K)
M1-22454	319,830 K
M2-40050	319,840 K
M3-44730	319,842 K
M4-221591	319,843 K
M5-441990	319,843 K

2.4 Modellerin Sınır Koşulları ve Yönetici Denklemler

Isıtıcı borular aşağıdaki görselde bulunan boru içi giriş hızı değerleri çaplara göre "Velocity inlet" kısmında tanımlanırken akışkanın boru çıkış hızı "Pressure Outlet" olarak tanımlanmıştır. İki boyutlu yapılan çalışmada borular x eksenini etrafında döndürülerek Ansys'e tanımlı "Axisymmetric" butonu aktifleştirilerek boru için koşulları girilmiştir. Aşağıda (Şekil 7). de gösterilen tanımlı kısımda "Outertube" sınır koşuluna yine Ansys paket programından elde edilen "Reports" kısmından "Area" sekmesinden modele ait yüzey alanı elde edilerek verilen ısı güçleri ile birlikte sisteme ne kadarlık yüzey ısı akışı verileceği

hesaplanıp sınır koşulu olarak “*Outertube Wall*” bölümüne W/m^2 şeklinde yüzey ısı akıları tanımlanmıştır. Cidarın iç kısmı olan “*Innertube*” ise *Coupled* olarak tanımlanmış ve böylelikle sistemin sınır şartları oluşturulmuştur. Model sınır başlangıç koşulu olarak Ansys Fluent’e tanımlı “*hybrid initialization*” kısmı kullanılarak denklem sistemlerinin bir dizi yinelenmesini kolaylaştırdığından ve akış değişkenlerini, özellikle basınç alanı için daha iyi yakınsama yapmasından dolayı analizlerde tercih edilmiştir.



Şekil 7. Isıtıcı borunun sınır koşullarının Ansys Fluent programında gösterilmesi

İki boyutlu geometri Design Modeler ara yüzünde, sayısal analizler ise Fluent ara yüzünde yapılmıştır. Momentum ve enerji denklemleri ikinci mertebeden Upwind yaklaşımı, basınç hız denklemi ise SIMPLE algoritması ile çözülmüş olup laminar akış

modeli kullanılmıştır. Tüm değişkenler için yakınsama aralığı 10^{-4} sayısına ulaştığında çözümlerin yakınsadığı kabul edilmiş olup her bir data için 1000 iterasyon yapılmıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

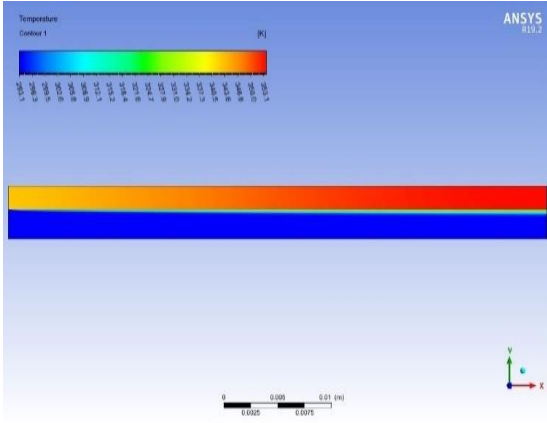
3.1. Sisteme Verilecek Yüzey Akılarının Tayini ve Analizi

Sisteme verilecek yüzey ısı akıları; Ansys paket programı içinde yer alan “*Reports*” kısmından “*Area*” sekmesinden modele ait yüzey alanı elde edilerek (m^2) verilecek olan ısı güçleri (W) bölünerek yüzeye ait ısı akıları, her bir data için oluşturulmuştur. Buna göre aşağıdaki tabloda her bir boru için yüzey alanı ve o yüzey alanına ait verilen ısı güçleriyle birlikte yüzey ısı akıları Tablo 5’te gösterilmiştir.

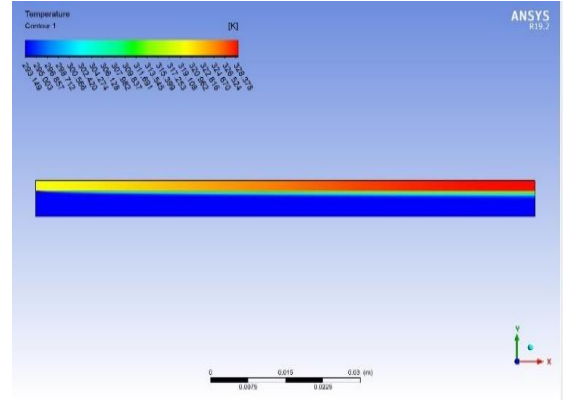
Yüzey akıları belirlenen sınır koşulları ile birlikte çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklıkları ve hız değerleri aşağıdaki görseller ile verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere çözücü akışkan boru içerisinde hareketine başlarken elektrikli ısıtıcıdan gelen ısı güç ile birlikte boru çıkışında ilk giriş sıcaklığına göre daha fazla sıcaklık artışı olduğu bununla birlikte boru cidarında ve cidara yakın bölgelerde çözücü akışkanın sıcaklığının daha da fazla olduğu ve çözücü akışkanın ısınmasından dolayı sürekli olarak ısı güce maruz kaldığı ve boru çıkışında bakır borunun da boru girişine göre bir miktar daha fazla sıcaklık artışı olduğunu göstermektedir. (Şekil 9). da görüldüğü üzere en yüksek çözücü akışkan çıkış sıcaklığına sahip 2 numaralı boru olmakla birlikte en düşük sıcaklığa sahip boru ise (Şekil 14). de ki 7 numaralı boru olmaktadır.

Tablo 5. Taguchi L8 tablosuna ait farklı ısı güçleriyle oluşturulan yüzey akısı değerleri

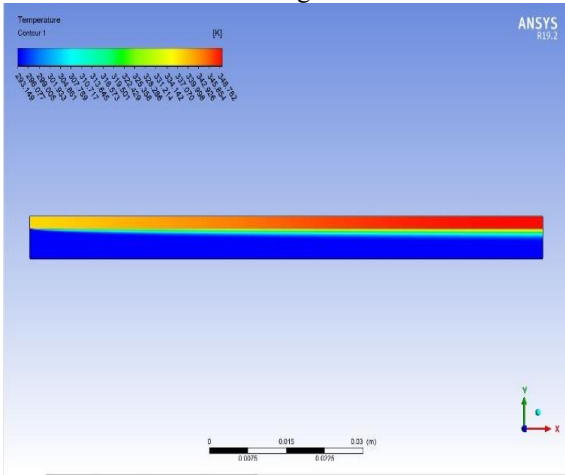
Boru No	Yüzey Alanları m^2	30W	26W	22W	18W
1	0.001413717	2220,65 (W/ m^2)			
2	0.00439823	6820.2 (W/ m^2)			
3	0.002199115		11822.93 (W / m^2)		
4	0.004399823		5911.46 (W / m^2)		
5	0.002827433			7780.90 (W m^2)	
6	0.002199115			10004.02 (W/ m^2)	
7	0.00439823				4092.55 (W / m^2)
8	0.001413717				12732.39 (W/ m^2)



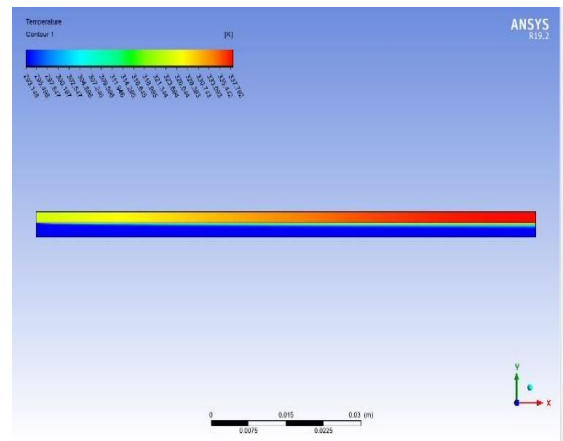
Şekil 8. (1 Numaralı Data): 5mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 30 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



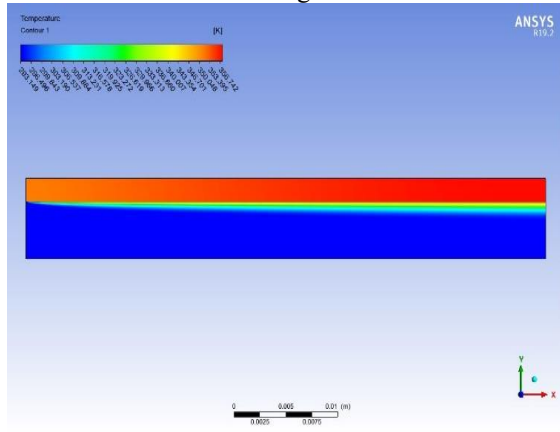
Şekil 11. (4 Numaralı Data): 10 mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 26 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



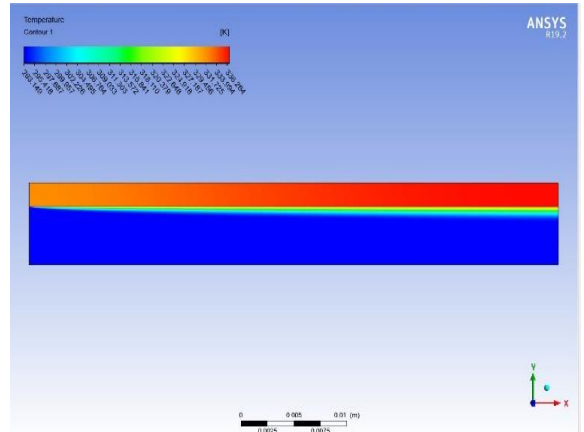
Şekil 9. (2 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 30 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



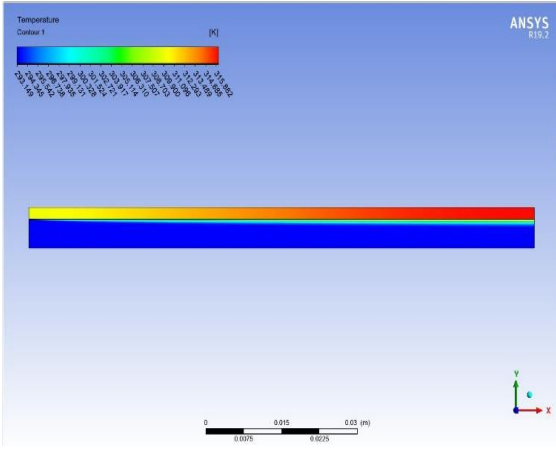
Şekil 12. (5 Numaralı Data): 5 mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 22 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



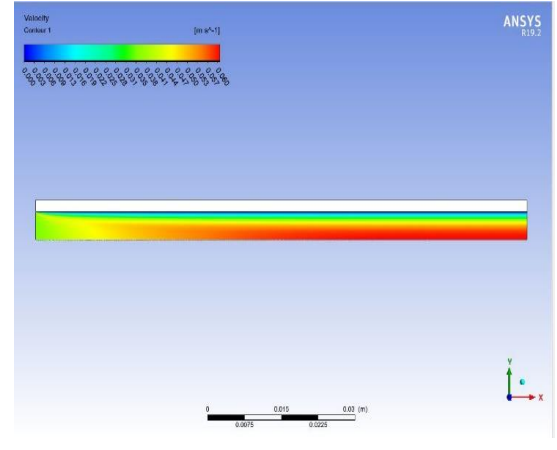
Şekil 10. (3 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 26 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



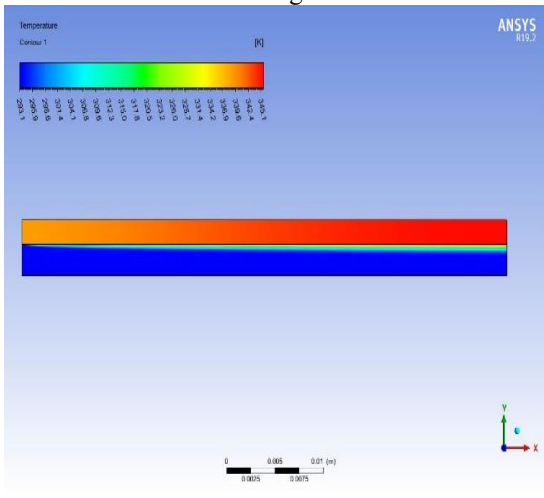
Şekil 13. (6 Numaralı Data): 10 mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 22 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



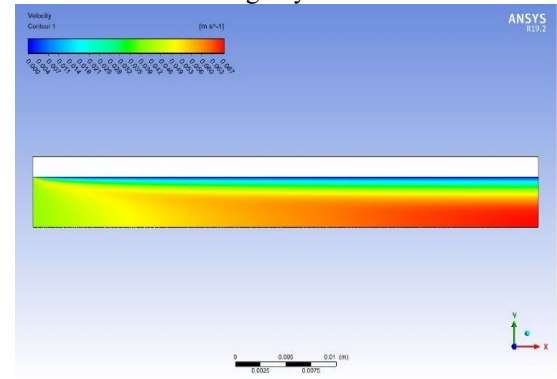
Şekil 14. (7 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 18 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



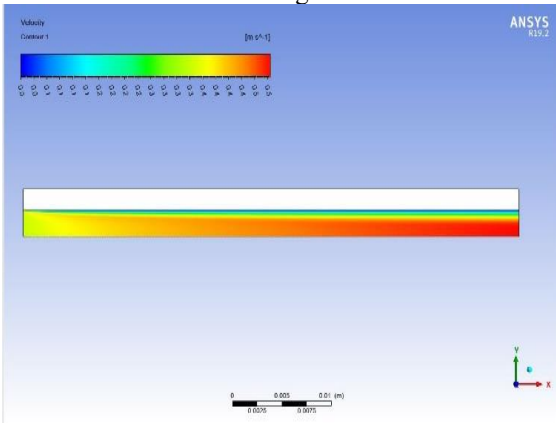
Şekil 17. (2 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 30 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



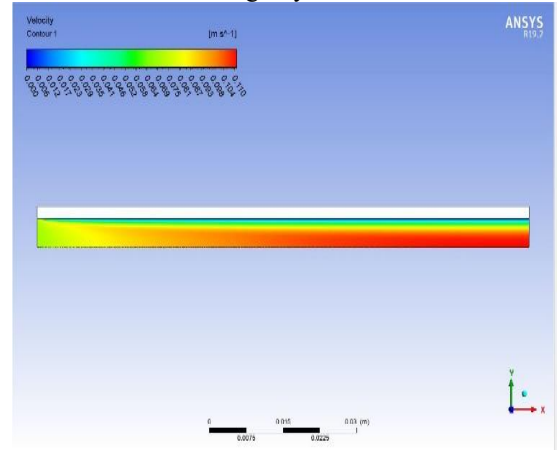
Şekil 15. (8 Numaralı Data): 5mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 18 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış sıcaklığı



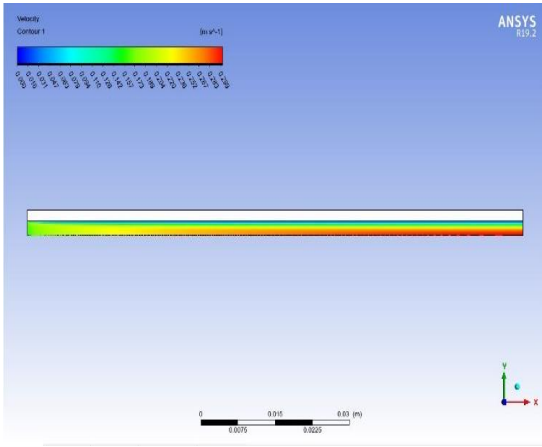
Şekil 18. (3 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 26 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



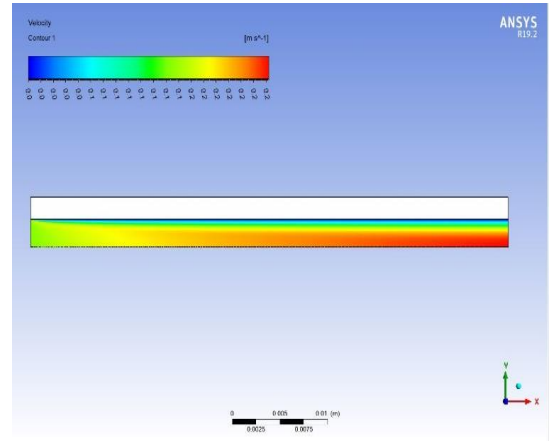
Şekil 16. (1 Numaralı Data): 5mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 30 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



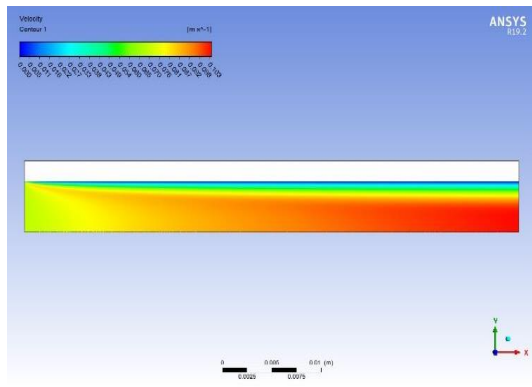
Şekil 19. (4 Numaralı Data): 10 mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 26 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



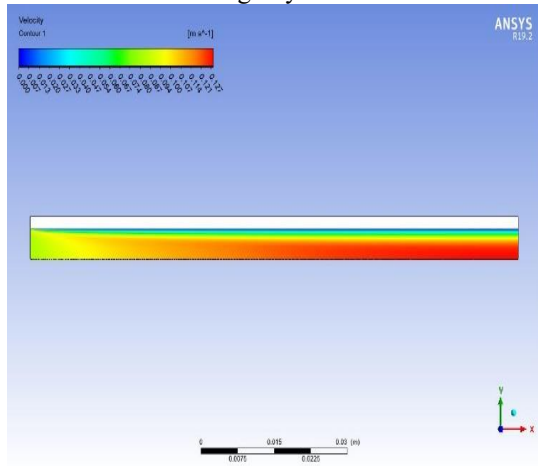
Şekil 20. (5 Numaralı Data): 5 mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 22 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



Şekil 23. (8 Numaralı Data): 5mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 18 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



Şekil 21. (6 Numaralı Data): 10 mm Boru Çapı 5 cm Boru uzunluğu 22 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı



Şekil 22. (7 Numaralı Data): 10mm Boru Çapı 10 cm Boru uzunluğu 18 W Isıl Güç: Çözücü akışkanın ısıtıcı borudan çıkış hız gradyanı

Hız gradyanları boru cidarında hızın sıfır olduğunu ve boru merkezine doğru yaklaştıkça çözücü akışkanın hızın arttığı ve basınç düşüşünün gerçekleştiği yukarıdaki hız kontür görüntülerinden gözlemlenmektedir.

Taguchi tablosuna göre en yüksek çözücü akışkanın çıkış sıcaklıkları Ansys Surface İntegral Bölümünde yer alan "Mass – Weighted Average" bölümünde bulunan kısımda çözücü akışkana ait çıkış sıcaklık ortalama değerleri aşağıdaki Tablo 6 da verilmiştir.

Tablo 6. Taguchi L8 tablosudaki ısı güç değerlerine göre çözücü akışkanın çıkış sıcaklıkları

	30W
1 Nolu Data	22,82 °C
2 Nolu Data	26,28 °C
	26W
3 Nolu Data	24,62 °C
4 Nolu Data	22,65 °C
	22W
5 Nolu Data	24,39 °C
6 Nolu Data	22,32 °C
	18W
7 Nolu Data	21,54 °C
8 Nolu Data	24,03 °C

Yukarıdaki grafik ve tablolardan da görüldüğü üzere boru içerisindeki en az hıza sahip olan 2 numaralı boru, çok daha fazla ısınmıştır. Ayrıca boru çapı ve boru uzunluğunun diğerlerine göre yüksek olması sebebiyle yine çözücü akışkana ait olan çıkış sıcaklığı da diğer datalara göre daha yüksek bir çıkış sıcaklığına sahip olmuştur.

3.2. Sisteme Verilecek Yeni Yüzey Akılarının Tayini

Analizlerde kullanılan Contox SLF akışkanının kritik sıcaklığı olan 40°C değerine ulaşabilmek tüm datalara eşit miktarda ısı güç verilmiş olup, başlangıçta öngörülen ısı güçler belli bir oranda artırılmıştır. Hem daha fazla veriyi görebilmek hem de hangi

boruların hangi ısı güçte kritik sıcaklığa ulaştığı veya ulaşmadığı tespit edilmiştir. Buna göre sekiz dataya ait verilen artırılmış yeni ısı güçler ve bu ısı güçlere ait yüzey ısı akı değerleri Tablo 7' de gösterilmiştir. Bu akı değerlerine karşılık gelen boru çıkış sıcaklıkları yine verilen ısı güçlerin aynı yüzey alanlarına oranlayarak Tablo 8 de belirtilmiştir.

Tablo 8. 30W - 60W - 90W -120 W verilen ısı güç değerleri ile oluşturulan çözücü akışkanın boru çıkış sıcaklıkları (Tek Bir Boru için)

	30W	60W	90W	120W
1 Nolu Boru	22,82 °C	25,64 °C	28,46 C°	31.30 °C
2 Nolu Boru	26,28 °C	33,32 °C	40,03 C°	46.67 °C
3 Nolu Boru	25,34 °C	30,86 °C	36,64 C°	42.03 °C
4 Nolu Boru	23,16 °C	26,36 °C	29,7 C°	32.96 °C
5 Nolu Boru	25,80 °C	31,45 °C	37,30 C°	42.77 °C
6 Nolu Boru	23,17 °C	26,47 °C	29,78 C°	33.09 °C
7 Nolu Boru	22,67 °C	25,38 °C	28,26 C°	30.98 °C
8 Nolu Boru	26,18 °C	32,82 °C	39,53 C°	46.19 °C

Tablo 7. 30W - 60W - 90W -120 W verilen ısı güçlere karşılık gelen yüzey ısı akıları (W/m²)

	Yüzey Alanları(m ²)	30W	60W	90W	120W
1	0.001413717	2220,6 (W/ m ²)	42441.30 (W/ m ²)	63661.96 (W/ m ²)	84882 (W/ m ²)
2	0.00439823	6820.2 (W/ m ²)	13641.85 (W/ m ²)	20462.77 (W/ m ²)	27283 (W/ m ²)
3	0.002199115	13641.63 (W/ m ²)	27283.26 (W/ m ²)	40924.90 (W/ m ²)	54566 (W/ m ²)
4	0.004399823	6820.2 (W/ m ²)	13641.8 5 (W/ m ²)	20462.77 (W/ m ²)	27283 (W/ m ²)
5	0.002827433	10610.33 (W/ m ²)	21220.66 (W/ m ²)	31830.99 (W/ m ²)	42441.2 (W/ m ²)
6	0.002199115	13641.63 (W/ m ²)	27283.2(W/ m ²)	40924.90 (W/ m ²)	54566.5 (W/ m ²)
7	0.00439823	6820.2 (W/ m ²)	13641.85 (W/ m ²)	20462.77 (W/ m ²)	27283.7 (W/ m ²)
8	0.001413717	2220,65 (W/ m ²)	42441.30 (W/ m ²)	63661.96 (W/ m ²)	84882.6 (W/ m ²)

4. Sonuç

Dizel enjektör yakıt deliğinin aşındırıcı akış ile işlenmesi (AFM) sonrası kalıntı macundan temizlenmesine yönelik makinenin geliştirilmesinde kullanılacak kompakt ısı eşanjör tasarımında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Sıcaklık konturlarından da gözlemlendiği gibi akışkanın sıcaklığı boru içerisinde artarken borunun da sıcaklığı boru çıkış noktasında artmaktadır. Akışkan ısınarak ilerlediği için boru içerisindeki bu durum gözlemlenmiştir.

- Görüldüğü üzere en fazla çıkış sıcaklığına sahip datalar 2 ve 8 numaralı datalar olmuştur. Bunun sebebi çözücü akışkanın debisinden kaynaklıdır. 2 ve 8 numaralı datalar en düşük debi ve en düşük boru giriş hızına sahiptir. Bundan dolayı akışkan boru içerisinde daha yavaş hareket ederken daha fazla ısı güce maruz kalmaktadır.

- 2 nolu boru 8 nolu boruya göre bir miktar daha fazla ısınmıştır. Fakat bu ısınma çok küçük miktardadır. 8 nolu boru hacim olarak 2 nolu borudan küçük olmasına rağmen verilen ısı akısıyla bu sıcaklık farkını kapatmıştır.

- Bilindiği üzere, Contox SLF akışkanının kritik sıcaklığı 40°C'dir. Bu akışkanın sanayide kullanımı için kritik sıcaklığın %85'i güvenli bölge olarak tayin edilmiştir. Dolayısıyla, akışkanın sıcaklığı maksimum 34 °C mertebesinde çalışması uygun görülmüştür.

-Minimum enerji tüketimi için kompakt elektrikli ısıtıcı tasarımı için yapılan analizler incelendiğinde çalışmada en etkin 60 W ısı güç ve 2 no.lu tasarım seçilmesinin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

5. Teşekkür

“Dizel Enjektör Yakıt Deliğinin Aşındırıcı Akış ile İşlenmesi (AFM) Sonrası Kalıntı Macundan Temizlenmesine Yönelik Proses ve Makinenin, Temizlik ve Atık Yönetim Kriterleri Çerçevesinde, Geliştirilmesi” başlıklı 5210005 nolu 1505 projemize vermiş oldukları desteklerinden dolayı TÜBİTAK’ a teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Ch. Ranganayakulu and K.N. Seetharamu, “The Combined Effects Of Longitudinal Heat Conduction, Flow Nonuniformity And Temperature Nonuniformity In Crossflow Plate-Fin Heat Exchangers” *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 5, pp. 669-678, 1999
- [2] S.K. Singh, M. Mishra, P.K. Jha, “Nonuniformities in compact heat exchangers—scope for better energy utilization: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 583-596, 2014.
- [3] P.G. Kroeger, (1967) “Performance Deterioration in High Effectiveness Heat Exchangers Due to Axial Heat Conduction Effects”, In: Timmerhaus, K.D. (eds) *Advances in Cryogenic Engineering. Advances in Cryogenic Engineering*, vol 12. Springer, Boston, MA.
- [4] B. Thonon, “A review of hydrocarbon two-phase heat transfer in compact heat exchangers and enhanced geometries” *International journal of Refrigeration* 31 (4), 633-642, 2008.
- [5] T. Dixit and I. Ghosh, “Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.41, pp. 1298-1311, 2015.
- [6] L.S. Ismail, R. Velraj, C. Ranganyakulu, “Studies on pumping power in terms of pressure drop and heat transfer characteristics of compact plate-fin heat exchangers—A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, 1, pp. 478-485, 2010.