



Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a pulsating impinging jet on a flat surface

Ünal Akdağ^{1*}, Selma Akçay², M. Levent Karabayır¹

¹Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Aksaray University, 68100, Aksaray, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Çankırı Karatekin University, 18100, Çankırı, Türkiye

Highlights:

- Cooling of the flat surface with the pulsating impinging jet
- Effects of blowing distance, pulsating amplitude and pulsating frequency
- Comparison of pulsating jet and continuous jet applications

Keywords:

- Pulsating jet
- Heat transfer enhancement
- Target surface
- Nusselt number

Article Info:

Research Article

Received: 17.11.2021

Accepted: 16.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1024995

Acknowledgement:

This work was supported by ASU-BAP with project number 2015-029. The authors thank the support provided

Correspondence:

Author: Ünal Akdağ

e-mail:

uakdag@aksaray.edu.tr

phone: +90 382 288 3697

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the cooling of a target surface consisting of a flat plate with constant heat flux using a pulsating impinging jet is experimentally investigated. The pulsating jet experimental set-up is shown in Figure A.

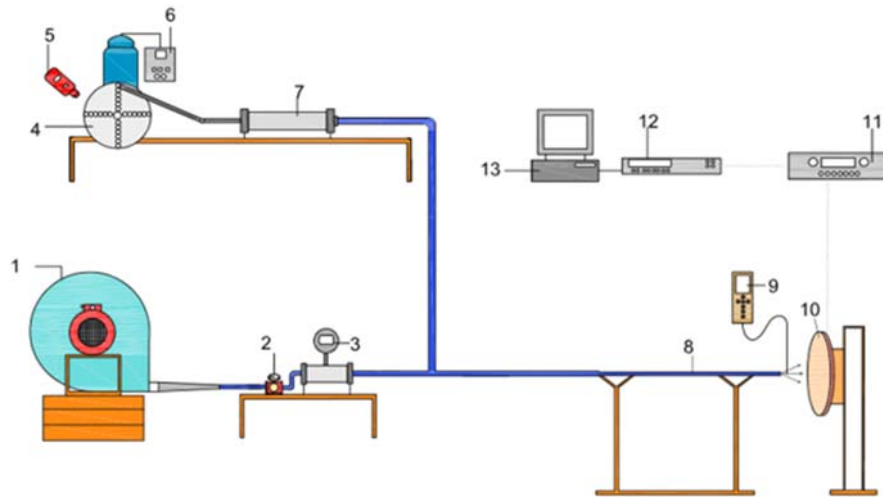


Figure A. Schematic view of the experimental set-up

(1. high pressure fan, 2. pressure regulator, 3. flowmeter, 4. flywheel, 5. digital tachometer, 6. DC motor and control unit, 7. piston-cylinder assembly, 8. blowpipe, 9. tachometer, 10. target surface, 11. power supply, 12. data logger, 13. CPU)

Purpose:

The purpose of this study is heat transfer enhancement for flat surfaces using a pulsating impinging jet.

Theory and Methods:

The effects of the distance between the jet and the target surface (H/D), jet frequency (Wo) and amplitude (A_o) on the heat transfer were analyzed. Experiments were performed for three different blowing distances, six different frequencies and four different amplitudes. The pulsating jet is used as an active heat transfer enhancement method, temperature measurements were made in detail on the experimental setup and Nusselt numbers were calculated with the based on measured temperatures.

Results:

The experimental results are expressed as a function of dimensionless numbers, and the results are compared with the heat transfer results of continuous jet impingement. The pulsating jet is affected the flow structure on the target surface.

Conclusion:

Experimental results shown that the pulsating jet significantly increased the heat transfer compared to the continuous jets.



Düz bir yüzeye çarpan pulsatif jetin ısı transferi karakteristiğinin deneysel incelenmesi

Ünal Akdağ^{1*}, Selma Akçay², M. Levent Karabayır¹

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 68100 Aksaray, Türkiye

²Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 18100 Çankırı, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Pulsatif çarpan jet ile düz bir yüzeyin soğutulması
- Çarpma mesafesi, pulsatif genlik ve pulsatif frekansın etkileri
- Pulsatif jet ile sürekli jet uygulamasının karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 17.11.2021

Kabul: 16.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1024995

Anahtar Kelimeler:

Pulsatif jet,
ısı performans iyileştirme,
hedef yüzey,
Nusselt sayısı

ÖZ

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip dairesel düz levhadan oluşan hedef yüzeyin pulsatif çarpan jet kullanılarak soğutulması deneysel olarak incelenmiştir. İncelemelerde, hedef yüzey ile jet çıkışı arasındaki mesafe (H/D), pulsatif jetin genliği (A_0) ve frekansı (Wo) değiştirilirken, jet Reynolds sayısı (Re_j), Prandtl sayısı (Pr) ve geometrik parametreler sabit tutulmuş ve ısı transferi üzerinde bu parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Deneyler, üç değişik çarpma mesafesi, dört farklı genlik ve altı farklı frekans için yapılmıştır. Aktif ısı transferi iyileştirme yöntemi olarak kullanılan pulsatif jet için imal edilen deney düzeneği üzerinde ayrıntılı olarak sıcaklık ölçümleri yapılmış ve ölçülen sıcaklıklar yardımıyla Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, boyutsuz sayılarla ifade edilmiş olup, sonuçlar sürekli jet çarpması sonucu oluşan ısı transferi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ısı transferi iyileştirmede pulsatif jetin önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Yapılan karşılaştırmalarda pulsatif jetin sürekli jete göre ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiği gözlenmiştir.

Experimental investigation of the heat transfer characteristics of a pulsating impinging jet on a flat surface

HIGHLIGHTS

- Cooling of a flat surface with the pulsating impinging jet
- Effects of impinging distance, pulsating amplitude and pulsating frequency
- Comparison of pulsating jet and continuous jet applications

Article Info

Research Article

Received: 17.11.2021

Accepted: 16.04.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1024995

Keywords:

Pulsating jet,
heat transfer enhancement,
target surface,
Nusselt number

ABSTRACT

In this research, cooling of the target surface consisting of a flat plate with constant heat flux using a pulsating impinging jet is investigated experimentally. In the investigations, the jet Reynolds number (Re_j), Prandtl number (Pr) and geometric parameters were kept constant and the effects of these parameters on the heat transfer were analyzed while changing the distance between the jet and the target surface (H/D), amplitude (A_0) and jet frequency (Wo). Experiments were performed for three different blowing distances, four different amplitudes and six different frequencies. The pulsating jet is used as an active heat transfer enhancement method, temperature measurements were made in detail on the experimental setup and Nusselt numbers were calculated with the based on measured temperatures. The results are expressed as a function of dimensionless numbers, and the results are compared with the heat transfer results of continuous jet impingement. Experimental results showed that the pulsating jet has a significant effect on heat transfer enhancement. It was observed that the pulsating jet significantly increased the heat transfer compared to the continuous jets.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *uakdag@aksaray.edu.tr, selmaakcay@karatekin.edu.tr, mlevant_karabayir@hotmail.com / Tel: +90 382 288 3697

1. Giriş (Introduction)

Endüstride ısıtma, soğutma ve kurutma gibi uygulamalarda ısı transferini artıran yöntemler üzerinde pek çok araştırma yer almaktadır. Bunlardan biri olan jet uygulamaları en çok araştırma yapılan konular arasındadır. Literatürde yaygın jet uygulaması çarpan jetler olup bu konuda literatürde çok sayıda deneysel ve sayısal çalışma bulunmaktadır [1,2]. Isı transferi üzerinde, Jambunathan vd. [3] tekli dairesel çarpan jetleri, Beitelmal vd. [4] çarpan hava jetlerinin eğimini, Chung vd. [5] zamana bağlı çarpan jetlerin etkilerini, Zhou vd. [6] ve Celik [7] çarpan jetlerde levhanın yüzey pürüzlülüğünün etkilerini incelediler. Yapılan bu çalışmalar ile çarpan jetlerin ısı ve kütle transferini artırdığı bildirilmiştir. Çarpan jet, değişik çıkış geometrilerdeki jetin hedef yüzeye çarptırılması ile elde edilir. Bu jetler durma noktasında, hidrodinamik ve termal sınır tabakaları incelterek ısı ve kütle geçişinde önemli iyileşmeler sağlamaktadır. Dolayısı ile akışkan ile çarpma yüzeyi arasında büyük miktarda yerel ısı taşınım katsayısı elde edilerek çarptığı yüzeyde ısı ve kütle transferini artırır. Isı ve kütle transferindeki bu iyileşme, jet çıkışı-hedef yüzey arası mesafe, jet çıkış geometrisi, çoklu çarpan jetlerde jet dizileri arasındaki mesafe, hedef yüzeyin şekli, jet çarpma açısı gibi geometrik parametreler ile jet Reynolds sayısı, jet sıcaklığı, kullanılan akışkan, jetin tipi gibi akış parametrelerine bağlı olarak da değişmektedir [8-10]. Çalışır vd. [11] yivli yüzeylerde çarpan jetlerin etkilerini, Kılıç vd. [12] farklı parametreler için nanoakışkan akışında çarpan jetin birleşik etkisini, Barewar vd. [13] nanoakışkan akışında çarpan jetlerin jet-levha mesafesinin etkilerini araştırmışlar ve bu çalışmaların sonucunda, kullanılan jet parametrelerinin ısı transferi üzerinde son derece etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarında da belirtildiği gibi çarpan jetlerin kullanılması, ısı ve kütle transferini önemli derecede etkilemektedir. Çarpan jetlere periyodik hareket ilave edilmesi ile elde edilen pulsatif çarpan jetler, son zamanlardaki en önemli çalışma konuları arasındadır. Periyodik olarak uyarılan akış ile pulsatif bir etki oluşturulması momentum akısında bir artışa neden olmaktadır [14, 15]. Bu momentum akısının etkisi belirlenen jet parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu durum pulsatif çarpan jetleri daha da avantajlı hale getirmektedir. Akışa salınım hareketi sağlamak için, diyafram, akustik sistemler, piezoelektrik membranlar, solenoid vana, döner kepenkler, piston-silindir gibi düzenekler kullanılmaktadır. Pulsatif çarpan jetler ile ilgili literatürde sayısal ve deneysel çalışmalar sınırlı olmakla birlikte [16-18] sürekli jet şartları ile karşılaştırıldığında uygun parametrelerin seçilmesi halinde ısı ve kütle transferini önemli derecede artırdığı belirtilmiştir.

Hofmann vd. [19] pulsatif çarpan jetlerin akış yapısı ve ısı transferi üzerindeki etkisini farklı frekans, genlik, nozul-plaka arası mesafe ve Reynolds sayılarında deneysel olarak incelemişler ve ana akıştaki periyodik dalgalanmaların taşınımıyla ısı transferini etkilediğini göstermişlerdir. Mladin ve Zumbrennen [20] pulsatif dalga şekli, frekans ve genliğe bağlı olarak pulsatif çarpan jetin düzlemsel bir durma noktası etrafındaki davranışını detaylı sınır tabaka analiz yaparak sayısal olarak incelemişlerdir. İncelemelerinde Strouhal sayısı için bir kritik değerin olduğunu, bu değerin altında ısı transferinde bir artışın olmadığını bildirmişlerdir. Azevedo vd. [21] döner bir valf kullanarak elde ettikleri pulsatif hava jetlerini değişik frekans ve ortalama jet hızında deneysel olarak incelemişler ve çalışmalarının sonucunda sürekli çarpan jetlerle karşılaştırıldığında pulsatif çarpan jetler için durgunluk noktasında ısı transferinde küçük bir azalma olduğunu göstermişlerdir. Liengkongsatoporn vd. [22] slot tipi çarpan pulsatif jetlerin ısı transferi üzerindeki etkilerini sayısal olarak incelemişler ve aynı ortalama jet hızı için pulsatif genliğin artmasıyla yüzey üzerindeki ısı transferinin arttığını göstermişlerdir. Xu vd. [23] slot tipi türbülanslı pulsatif çarpan jetin ısı transferine

etkisini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Akış alanında pulsasyonların etkisiyle büyük vorteks yapılarının oluştuğunu, akış sürüklenmesinin arttığını ve yüzey üzerinde zamanla gelişen ısı ve hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azaldığını bunun sonucunda da ısı transferinin iyileştiğini bildirmişlerdir. Travnicsek ve Vit [24] bir duvar üzerine çarpan dört farklı jet akışının (sentetik jetler, hibrit sentetik jetler, birleşik pulsatif çarpan jetler ve sürekli çarpan jetler) ısı ve kütle transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişler ve sonuçları duman tel yöntemi ile görüntülemişlerdir. Deneylerini 4000-6000 aralığında değişik Reynolds sayılarında, 8 mm çapında jet çıkışı kullanarak gerçekleştirmişler ve iş yapan akışkan olarak hava kullanmışlardır. Re sayısı arttıkça ısı ve kütle transferinin de arttığını gözlemleyerek akış osilasyonlarının %12-40 arasında ısı ve kütle transferinde bir iyileşmeye neden olduğunu bildirmişlerdir. Alimohammadi vd. [25] pulsatif akış ile zamana bağlı çarpan jetler ile ilgili geniş kapsamlı hem deneysel hem sayısal bir çalışma yapmışlar ve bir plakaya çarpan uyarılmış pulsatif jet durumunda elde edilen Nu sayısının uyarılmamış jet durumunda elde edilen Nu sayısından oldukça yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Son yıllarda, çarpan jetlerle ısı transferini artırmak için yapılan arayışlar ile ilgili Maghrabie [26] geniş kapsamlı bir derleme çalışması sunmuştur. Çarpan jetlerde ısı transfer etkinliğini daha fazla artırmak için farklı düzenlemelerde jetler incelenmiştir. Bunlar arasında halkasal jetler, dönmeli jetler, süpürme jetler, akış kaynaklı titreşimli jetler gibi pasif yöntemlerin yanında, sentetik jetler, pulsatif jetler ve hibrid yöntemler gibi aktif teknikler de incelenmiştir. Birbirlerine göre bazı avantaj ve deavantajları olsa da, uygun parametrelerin kullanımının önemli olduğu belirtilmiştir. Isı transferi artırmada zamana bağlı jetlerin yeni fırsatlar sunduğu belirtilmiştir [27, 28]. Yapılan çalışmalarda uygun parametrelerin kullanılması halinde pulsatif çarpan jetlerin ısı ve kütle transferi üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu bildirilmiş olmasına rağmen, zamana bağlı çarpan jet uygulamalarının ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkileri tam olarak anlaşılmış değildir ve bu konuda tam olarak görüş birliği bulunmamaktadır [29-31]. Bu nedenle yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, genellikle genliğin etkisi dikkate alınmadan yüksek frekanslarda akış titreşimlerinin etkisi incelenmiştir. Literatürde yer alan çalışmalarda daha çok çarpan jet frekansı üzerine yoğunlaşılması, salınım hareketinin daha çok akustik sistemler, piezoelektrik diyaframlar, solenoid (döner) valfler ile sağlanması, seçilen pulsatif genlik ve frekans gibi parametrelerin de bu nedenle sınırlı olması, daha geniş genlik ve frekansta, makro ölçekte çalışmaların sayısının az olması, aynı zamanda çalışmayı daha çok sayısal olması ve iki boyutla sınırlı olması bu çalışmayı yapmamızın temel nedenini oluşturmaktadır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak pulsatif akış mekanizması için piston-silindir düzeneği kullanılmış olup, yüksek genliklere çıkılarak frekansla birlikte genliğin etkisinde araştırılmıştır. Burada, hedef bir yüzeyin soğutulması için, serbest pulsatif çarpan jet kullanılarak sıcak yüzeyin etkin bir şekilde soğutulması deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalar, farklı H/D oranı, genlik ve frekanslarda yapılmış ve bu parametrelerin ısı transferi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, fiziksel parametrelere bağlı boyutsuz sayılarla ifade edilmiştir.

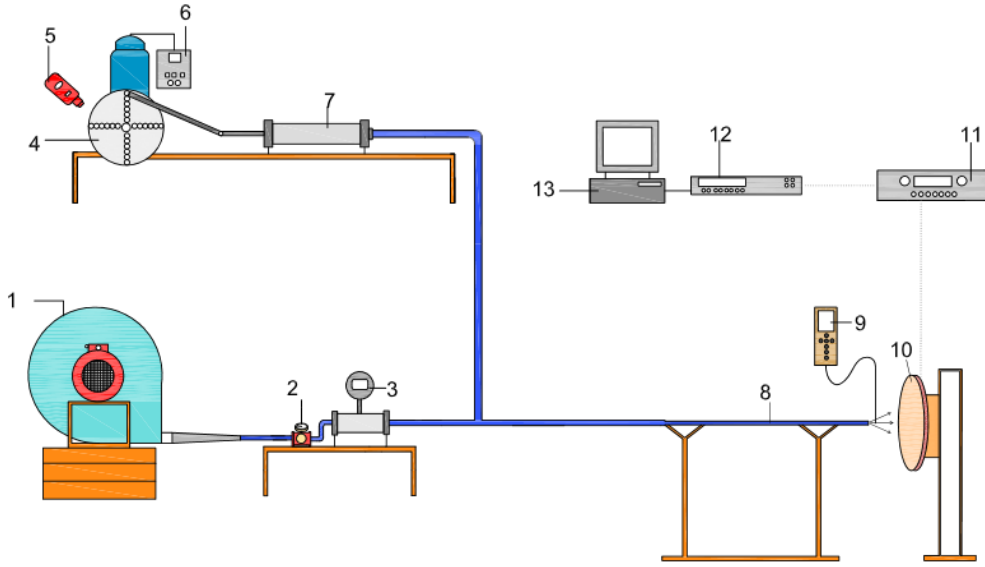
2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

2.1. Deney Tesisatı (Experimental Set-up)

Pulsatif çarpan jet deney düzeneği, Şekil 1 ve Şekil 2'de resim ve şematik olarak verilmiştir. Deney düzeneği, yüksek basınçlı bir fan ve fandan gelen kütlesek akıya pulsatif etki vermek için kullanılan bir piston-silindir düzeneğinden oluşmaktadır. Piston silindir düzeneğini hareket ettirmek için 2,4 KW DC motor ve gerektiği ayarlamak için bir



Şekil 1. Deney tesisatı resmi (Picture of the experimental set up)



Şekil 2. Deney tesisatının şematiği (Schematic of the experimental set up)

(1. Yüksek basınçlı fan, 2. basınç regülâtörü, 3. debi ölçer, 4. volan, 5. dijital takometre, 6. DC Motor ve kontrol ünitesi, 7. piston-silindir düzeneği, 8. üfleme borusu, 9. hız ölçer, 10. hedef yüzey, 11. güç kaynağı, 12. veri toplama sistemi, 13. CPU)

volan kullanılmaktadır. Volan üzerine açılan delikler vasıtasıyla genlik ayarlanabilmekte, motor devir sayısı değiştirilerek frekans değiştirilebilmektedir. Motor devir ayarı için DC sürücü kullanılmakta ve devir göstergesinden elektronik olarak okunabilmektedir. Ayrıca motor devri dijital foto takometre ile ölçülerek doğrulanmaktadır. Fandan gelen havanın debisi fan çıkışına konulan hassas bir basınç düzenleme valfi kullanılarak ayarlanmaktadır. Deneylerde, hava bir borulama tesisatı ile hedef yüzeye yönlendirildiğinden borularda ve debi ölçme sisteminde basınç kaybı oluşmaktadır. Fandan gelen havayı, hedef yüzeye çarpan (jet Reynolds sayısının belirlenmesinde) akışkan debisi olarak belirlenen $10 \text{ m}^3/\text{h}$ değerinde sabit tutmak için fan çıkışına bir basınç regülâtörü yerleştirilmiştir. Havanın hacimsel debisini ölçmek için, *swirl tip* (ABB-4000), ölçüm hassasiyeti $\pm\%0,5$ olan bir hızölçer

kullanılmıştır. Hızölçerin çalışma prensibi, yüksek basınçlı fandan gelen hava hızölçere girişte yönlendirici kanatlar vasıtasıyla dönmeye zorlanır. Kanatlardan dönmeye çalışan fakat dönmeyen akışkan geri akış nedeniyle meydana gelen ikincil bir dönme hareketi meydana getirir. Bu dönme hareketinin merkezinde bir vorteks çekirdeği oluşur. Oluşan bu ikinci dönme hareketi, akış hızı ile orantılıdır ve bir piyezo sensör vasıtasıyla hızı dönüştürülmektedir.

2.2. Deneysel Prosedür (Experimental Procedure)

Deneyler Şekil 1'de resmi ve Şekil 2'de şematiği verilen düzenek kullanılarak yapılmıştır. Deneyler, sürekli jet akışı ve pulsatif jet akışı olmak üzere iki farklı akış rejimi için uygulanmıştır. Bunlardan ilki, yalnızca yüksek basınçlı fanın çalıştığı durum (sürekli jet), ikincisi ise

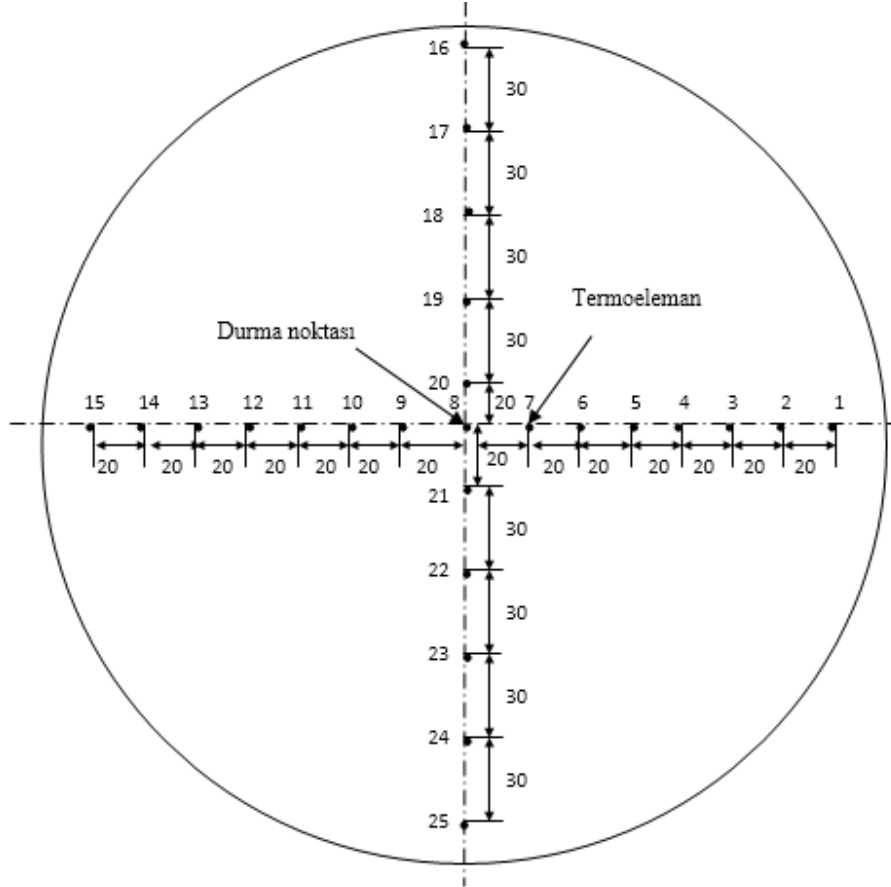
fanın ve piston-silindir düzeneğinin aktif olduğu durum (pulsatif jet) için yapılan deneylerdir. İlk durumda sadece yüksek basınçlı fanın aktif olduğu (daimi akış) sürekli jet durumu için deneyler yapılmıştır. Bunun için üfleme borusu ucundaki daimi akış hızı, sıcak tel anemometresi ölçümleri sonucunda belirlenen hıza ayarlanarak fan çalıştırılmıştır. Daha sonra swirl tip debi ölçer vasıtasıyla hava debisi $10 \text{ m}^3/\text{h}$ olacak şekilde hava debisi sabit tutulmuştur. Fan ile jet çıkışı arasında oluşan yüksek basınç kayıplarından dolayı hava hızının değiştirilebileceği kadar bir opsiyona deney seti izin vermediğinden hava debisi sabit tutulmuştur. Hedef yüzeydeki ısıtıcı aktif hale getirilerek yüzeyin ısınması sağlanmış ve sistem rejim haline gelinceye kadar beklenmiştir. Sistemin rejim haline gelip gelmediği, sıcaklık ölçümleri vasıtasıyla belirlenmektedir. Sistem rejim haline geldikten sonra belirli noktalardan (Şekil 3'de gösterilen dairesel levha üzerine belirli aralıklarla yerleştirilen termoelemanlar vasıtasıyla) sıcaklıklar ölçülerek kaydedilmiştir. Sürekli ve pulsatif jet durumu için jet ile hedef yüzey arasındaki mesafe (H/D) üç defa değiştirilmiştir.

2.3. Deneysel Ölçümler (Experimental Measurements)

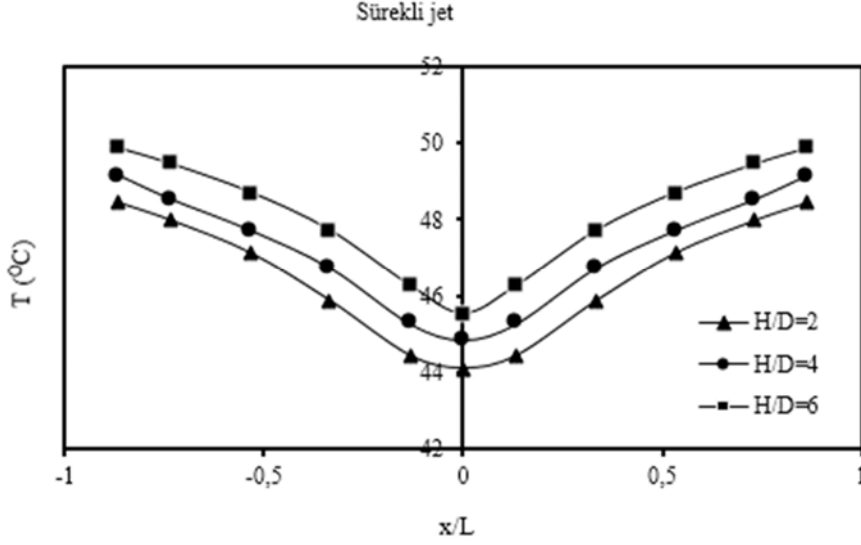
Bu çalışmada, sabit ısı akışı ile ısıtılan dairesel bir levha yüzeyinin soğutulması sırasında ısı transferindeki iyileşmeye, akışa uygulanan pulsatif jet uyarıcının etkisinin anlaşılabilmesi için, belirlenen parametrelerde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termoelemanlar levha yüzeyine iki sıra halinde dizilmiştir. Dairenin iki eksenini de tarayacak şekilde belirli aralıklarla levha yüzeyine gömülen toplam yirmi beş adet termoeleman ve jet sıcaklığının ve ortam sıcaklığının

belirlenmesi için iki adet termoeleman olmak üzere toplam yirmi yedi adet termoeleman vasıtasıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termoelemanların levha yüzeyindeki konumları Şekil 3'de verilmiştir. Hedef yüzeyin sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için termoelemanlar bakır levha üzerine x ve y koordinatları boyunca yerleştirilmiştir. Durma noktasına yakın bölgelere daha sık olmak üzere, buradan uzaklaştıkça daha seyrek olacak şekilde belirli aralıklarla termoelemanlar yerleştirilmiştir. Termoelemanlar, ısıtıcı platform üzerinde bulunan bakır levha üzerine önce yivler açılarak uçları yerleştirilmiş, daha sonra bu yivlerin içi lehim ile doldurularak yüzeye sabitlenmiştir. Hedef levha üzerinde pürüzsüz bir yüzey elde etmek için daha sonra bu kısımlar ince bir zımpara ile zımparalanarak düzgün yüzey elde edilmiştir. Termoeleman ucu tam yüzeye sıfır noktada kaldığından sıcaklık ölçümüne etkisi ihmal edilecek düzeydedir. Hedef yüzey kesiti ve yüzey üzerine termoeleman yerleşimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Termoeleman kabloları yüzeyin arka kısmından çıkarılarak veri toplama sistemine bağlanmıştır.

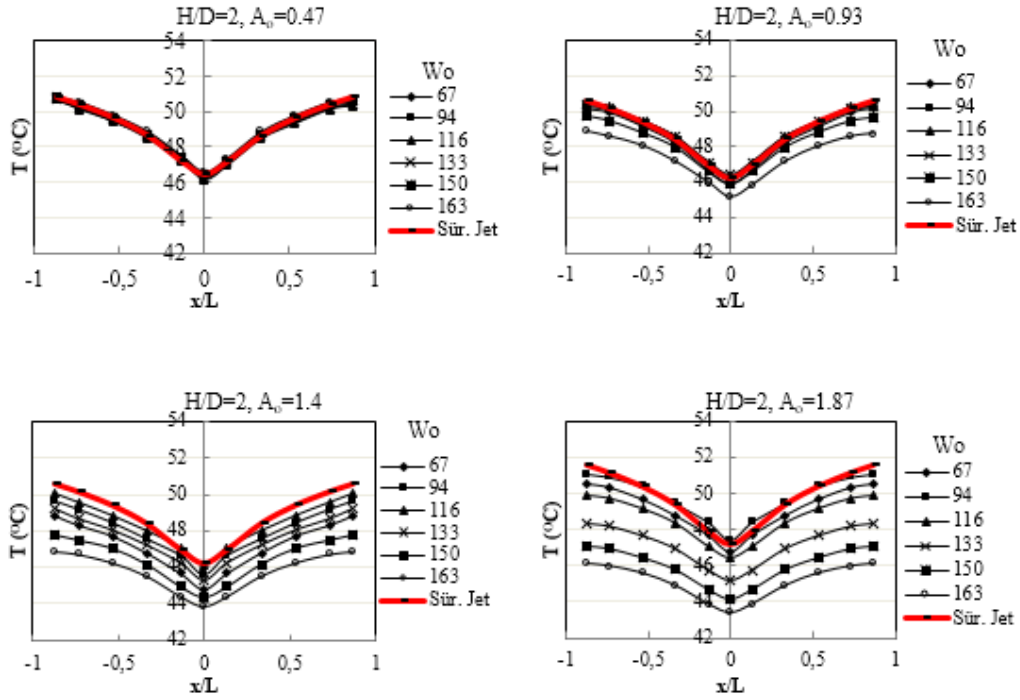
Hedef yüzey 2 mm kalınlığında bakır levha, arkasında çok ince Kapton ısıtıcı, daha sonra 20 mm taş yünü yalıtım malzemesi gelecek şekilde özel olarak hazırlanmış ahşap bir çerçeve içerisine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Bakır levha, yüzeyde homojen bir ısı dağılımı elde etmek için kullanılmıştır. Taş yünü ise verilen ısının tamamen ön yüzeyden transfer olması için yalıtım amacıyla kullanılmıştır. Burada çok iyi bir yalıtım sağlanmış olup, deneylere başlamadan önce hedef yüzey arkasında yapılan sıcaklık ölçümlerinde ortam sıcaklığına yakın bir sıcaklık olduğu belirlenmiştir. Bu durumda güç kaynağı tarafından verilen gücün tamamının ön yüzeyden transfer olduğu kabul edilmiş ve ısı kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 3. Hedef yüzeyde termoeleman yerleşimi (Thermocouple locations on the target surface)



Şekil 5. Sürekli jet için levha yüzey sıcaklığın değişimi. (Variation of plate surface temperature for the continuous jet)



Şekil 6. $H/D=2$ için levha yüzey sıcaklığının genlik ve frekansla değişimi
(Variation of plate surface temperature with amplitude and frequency for $H/D=2$)

sonuçlardan, yüksek genlik ve frekansta en yüksek ısı geçişinin olduğu anlaşılmaktadır.

2.5 Fiziksel Parametreler (Physical Parameters)

Bir piston-silindir düzeneği vasıtasıyla oluşturulan periyodik karakteristiğine sahip, pulsatif çarpan jet için, ilgili fiziksel parametreler yazılır ve boyutsuzlaştırma yapılırsa ısı transferini etkileyen boyutsuz parametreler bulunur. Bu çalışma deneysel ağırlıklı bir çalışma olduğu için boyutsuzlaştırma yapılmış ve elde edilen sonuçların boyutsuz sayılar cinsinden verilmesine özen gösterilmiştir. Bu çalışmadaki boyutsuz sayılar, boyutsuz jet çarpma mesafesi (H/D) Eş. 3, boyutsuz genlik (A_o) Eş. 4, boyutsuz frekans

(Wo) Eş. 5, Prandtl sayısı (Pr) Eş. 6 ve jet Reynolds sayısı (Re_j) Eş. 7 ile tanımlanmıştır.

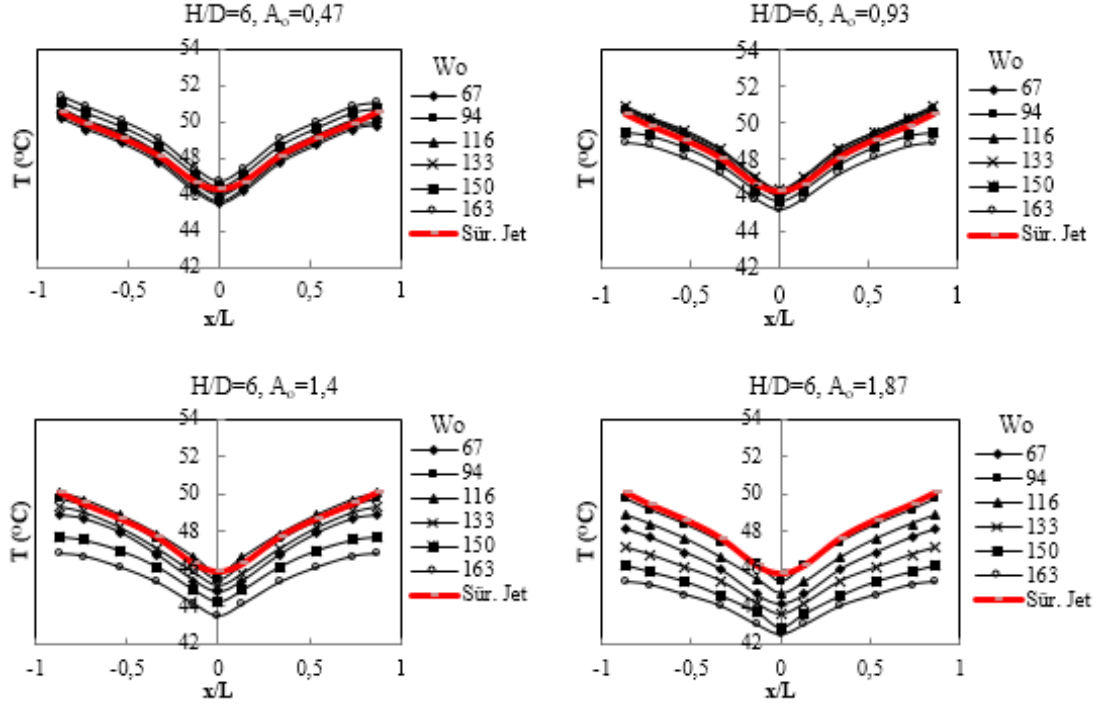
$$\text{Boyutsuz jet çarpma mesafesi} = \frac{H}{D} \quad (3)$$

$$A_o = \frac{x_m}{L} \quad (4)$$

$$Wo = L\sqrt{\omega/\nu} \quad (5)$$

$$Pr = \nu/\alpha \quad (6)$$

$$Re_j = U_j D/\nu \quad (7)$$



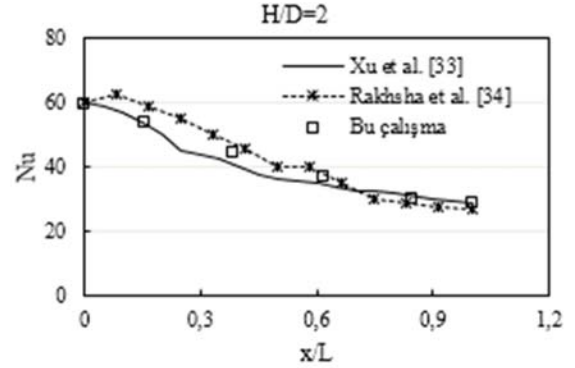
Şekil 7. $H/D=6$ için levha boyunca yüzey sıcaklığının genlik ve frekansa değişimi
(Variation of plate surface temperature with amplitude and frequency for $H/D=6$)

Bu durumda hedef yüzeyden ısı geçişini ifade eden Nusselt sayısı boyutsuz sayıların (H/D , A_0 , Wo , Re_j , Pr) bir fonksiyonu olarak elde edilebilir.

Bu çalışmada, ısı transferini etkileyen üç önemli parametre boyutsuz çarpma mesafesi (H/D), pulsatif çarpan jetin genliği (A_0) ve frekansıdır (Wo). Diğer parametreler sabit tutularak bu parametrelerin ısı transferine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada diğer bir önemli parametre olan jet Reynolds sayısı (Re_j), deney düzeneğindeki ölçme problemlerinden dolayı değiştirilememiş ve sabit tutulmuştur. Burada çalışmada kullanılan geometrik büyüklükler, $L=150$ mm ve $D=16$ mm dir. Burada x_m genliği gösteren piston strok uzunluğudur. Termodinamik büyüklükler, yüzey sıcaklığı ve serbest jet çıkış sıcaklığı kullanılarak elde edilen film sıcaklığına göre belirlenmiştir.

2.6. Deneysel Sonuçların Doğrulanması (Verification of Experiment Results)

Deneysel sonuçları, literatürde bulunan benzer çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Literatürde sürekli jet ile ilgili çok sayıda çalışma bulmak mümkündür. Bu anlamda doğrulama için bu çalışmaya en yakın sürekli jet durumu için aynı jet Reynolds sayısında ($Re_j=15000$) karşılaştırmalar yapılmış [33, 34] ve sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde levha boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi verilmektedir. Durma noktasına çarpan jetin çekirdek bölge etrafında dağılmaya başlamasıyla levha boyunca sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir. Durma noktasından uzaklaştıkça, jet momentum etkisini kaybetmekte ve sıcaklık düşüşü azalmaktadır. Sıcaklık ölçümü için her noktaya termoeleman yerleştirme imkanı olmadığından, mevcut çalışmadan elde edilen Nu değerlerinin referans çalışmadaki eğilim ile uyum karakteristiğine bakılmıştır. Burada sürekli jet için yapılan karşılaştırmalarda deneysel sonuçlarının literatürle iyi bir uyum sağladığı görülmektedir. Buradan hareketle pulsatif jet için çalışmalar yapılmış ve sürekli jete göre ısı transferindeki artış oranları belirlenmiştir.



Şekil 8. Deneysel sonuçların doğrulanması
(Validation of the experiment results)

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Isı Transferi Hesabı (Heat Transfer Calculation)

Bu çalışmada, ısı taşınım katsayısının bulunabilmesi için sıcaklık ölçümleriyle, hedef yüzeyden serbest akışa geçen net ısı belirlenmektedir. Periyodik akışta, düz bir yüzey üzerindeki akış benzer şekilde anlık yerel Nusselt sayısı Eş. 8 ile gösterildiği gibi yazılabilir.

$$Nu_{x,t} = \frac{h(x,t)L}{k} \quad (8)$$

Burada L ısıtılan levha boyunu, k akışkanın ısı iletim katsayısını ve $h(x,t)$ de yerel anlık ısı taşınım katsayısını göstermektedir. Akış periyodik olarak çarptığı için ortalama ısı taşınım katsayısının hesaplanmasında çevrim ortalama değerleri esas alınmaktadır. Anlık ısı taşınım katsayısının ortalaması alınır ve eşitlik, Nusselt sayısı

cinsinden ifade edilirse çevrim ortalama Nusselt sayısı Eş. 9 ile elde edilir.

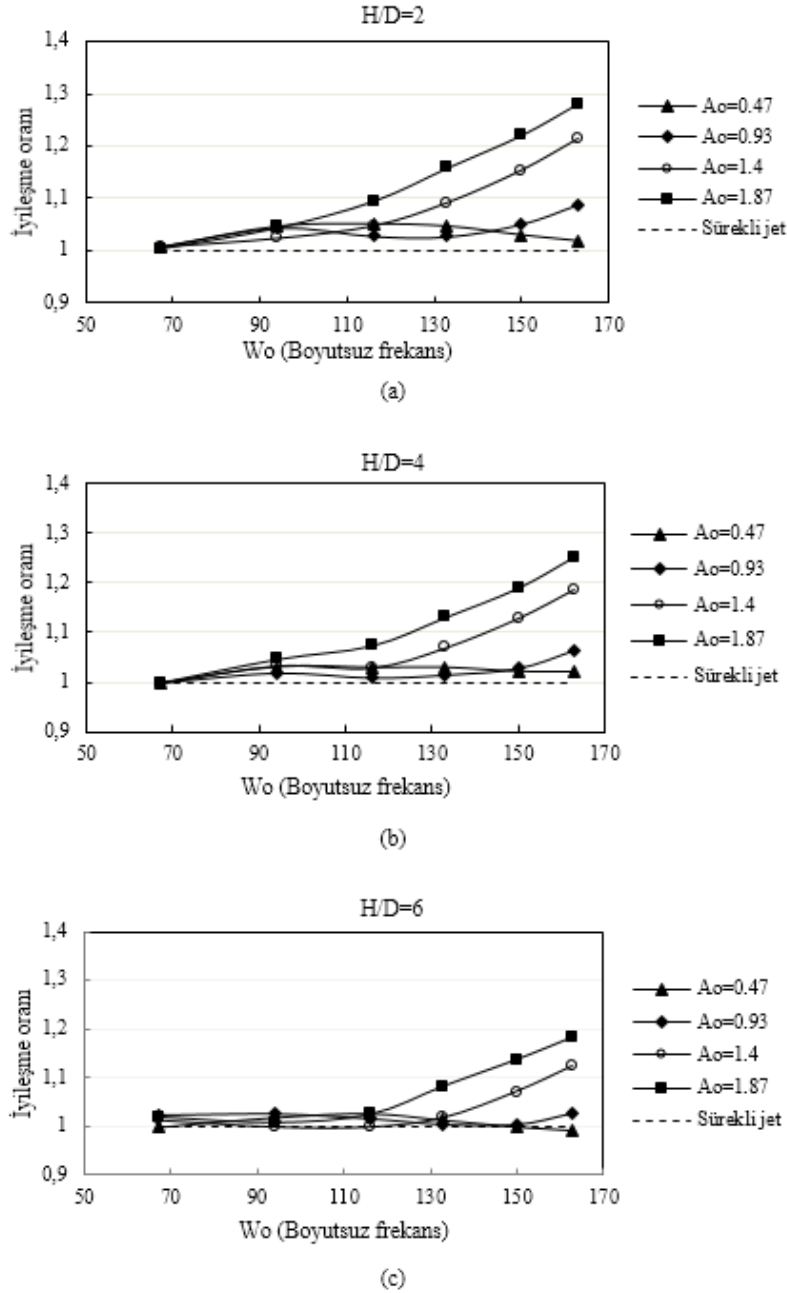
$$Nu = \frac{1}{\tau L} \int_0^L \int_0^{\tau} Nu_{x,\tau} dt dx \quad (9)$$

Eş. 4 ile verilen integrallerin hesaplanması sonucunda, ortalama Nusselt sayısı Eş. 10 ile ifade edilir.

$$Nu = \frac{q''}{(\bar{T}_x - T_f) k} L \quad (10)$$

Burada, q'' ısıtıcıdan verilen ısı akısı, L , hedef yüzey uzunluğu (karakteristik uzunluk), \bar{T}_x , çevrim ortalama yüzey sıcaklığı ve T_f ise serbest jet ortalama akışkan sıcaklığıdır. Elde edilen ortalama

sıcaklıklar vasıtasıyla, farklı H/D oranlarında her bir genlik ve frekans için çevrim-ortalama Nusselt sayıları (Nu_p) pulsatif çarpan jet için hesaplanmıştır. Ayrıca daimi akış şartlarında sürekli jet için ortalama Nusselt sayısı (Nu_s) da hesaplanmıştır. Aynı jet Reynolds sayısı için elde edilen pulsatif jet ortalama Nusselt sayısının, sürekli jet Nusselt sayısına bölünmesi ile ($\eta = Nu_p/Nu_s$) ısı transfer etkenliği (iyileşme oranı) elde edilmiştir. Isı transferi hesapları sonucu elde edilen sonuçlar boyutsuz büyüklüklere bağlı olarak Şekil 9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre artan genlik ve frekanslarda ısı transferindeki iyileşme görülmektedir. $H/D=2$ için (Şekil 9a) yapılan değerlendirmede düşük frekans ve genliklerde ısı transferinde, kayda değer bir iyileşmenin olmadığı gözlenmektedir. Isı transferinin artan genlikle birlikte logaritmik olarak arttığı görülmektedir. Belirli bir frekanstan sonra,



Şekil 9. Farklı H/D oranları için ısı transferi performansının genlik ve frekansla değişimi (Variation of heat transfer enhancement with amplitude and frequency for different H/D)

artan frekans ve genlikle birlikte ısı transferinin de önemli derecede arttığı gözlenmektedir. Bu artışın frekans ve genlikle logaritmik artışa benzer bir şekilde değiştiği gözlenmektedir. En yüksek genlik ve en yüksek frekans için sürekli çarpan jete göre ısı transferinde yaklaşık %30 değerinde bir iyileşme söz konusudur. Bu durumun pulsatif çarpan jet uygulaması için önemli bir ısı transferi iyileşme oranı olarak kabul edilebileceği öngörülmektedir. $H/D=4$ için (Şekil 9b) yapılan değerlendirmede düşük olan ilk iki genlik değeri için ısı transferinde kayda değer bir iyileşmenin olmadığı görülmektedir. Buna rağmen yüksek olan genliklerde kayda değer artışların olduğu görülmektedir. Bu çarpma mesafesi için ($H/D=4$), yüksek genlik ve frekansta yaklaşık %25'lik bir artışın olduğu gözlenmiştir. $H/D=6$ için yapılan değerlendirmede (Şekil 9c), düşük genliklerde ısı transferinde önemli bir artışın olmadığı, yalnızca yüksek genliklerde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Jet çarpma mesafesi arttıkça jetin etkisi azalmakta ve ısı transferi azalmaktadır. $H/D=6$ için en yüksek genlikte ve frekansta yaklaşık %20'lik bir iyileşme olduğu gözlenmektedir.

Şekil 9'da tüm H/D oranları için, sürekli jet ve pulsatif çarpan jet için hesaplanan ısı transfer etkinliği birlikte verilmiştir. Sürekli jet ile pulsatif jet şartları karşılaştırıldığında ısı geçişi üzerinde pulsatif jet parametrelerinin önemli derecede etkili olduğu gözlenmektedir. Artan genlik ve frekanslarda ısı geçişinin kayda değer bir şekilde arttığı görülmektedir. Düşük genliklerde ve düşük frekanslarda ısı geçişindeki iyileşmenin çok anlamlı olmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan jetin çarpma mesafesi arttıkça jetin etkinliği azalmakta ve ısı transferinde azalmaktadır. Mesafe azaldıkça jet akışı, potansiyel çekirdek bölgesinde ve en yüksek hızla yüzeye çarptığından ısı transferi artmaktadır. Mesafe arttığında ise jet akışı yüzeye serbest jet bölgesinde, dolayısıyla maksimum hızın olduğu potansiyel çekirdek alanı dışında çarptığından ısı transferi de azalmaktadır [35-37]. Bu durumda en yakın çarpma mesafesi, en yüksek genlik ve frekansta en iyi durum elde edilmektedir. Burada elde edilen sonuçlardan pulsatif jet için genliğin baskın bir parametre olduğu, konvektif etkiyi artırarak, yüksek frekansla birlikte ısı transferini artırdığı anlaşılmıştır [38, 39]. Pulsatif çarpan jet periyodik olarak değişen hızlarda yüzeye çarptığı için, yüzey üzerinde sabit olan sınır tabakanın puls etkisiyle periyodik olarak değiştiği/yenilediği ve bu durumun ısı transferinde kayda değer artışlara sebep olduğu değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada deneysel olarak incelenen parametrelere bağlı olarak ısı transferinin hangi şartlarda iyileştiği araştırılmış ve jet ile hedef yüzey arasındaki mesafenin (H/D) düşük, genlik ve frekansın yüksek değerleri için hedef yüzeyden ısı transferinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Günümüzde özellikle elektronik soğutma gibi kritik öneme sahip cihazların etkin bir şekilde soğutulması için ısı transferi iyileştirme teknikleri ile ilgili arayışlar devam etmektedir. Bu anlamda pulsatif çarpan jetle, ısı transferinin önemli bir oranda artırılabilirliği öngörülmektedir. Pulsatif çarpan jetlerin bu tip uygulamalar için güvenilir bir şekilde kullanılabilirliği değerlendirilmektedir.

3.2. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Bu çalışmada, yapılan deneylerde meydana gelen belirsizlikler daha çok ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu durumda, deneysel belirsizlikleri tespit etmek için, Holman [40] tarafından önerilen "belirsizlik analizi" yöntemi uygulanmıştır. Burada, belirsizliğe sebep olan büyüklükler, çarpan jet hızı U_j , ölçme hatası ($\pm 0,5$ m/s), yüzey sıcaklığı T_w ($\pm 1,5^\circ\text{C}$), akışkan sıcaklığı T_j ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) ve frekans ($\omega = \pm 0,1$ rad/s) ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu büyüklükler ile ilgili ölçme hataları, kaynağından itibaren alınarak sonuçta ne kadar belirsizliğe sebep olduğu bulunmaktadır.

Belirtilen belirsizlik oranlarının her bir deney için Nusselt sayısının hesabında ne kadar belirsizliğe sebep olduğu Eş. 11 ile bulunmuştur.

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \left[\left(\frac{\partial Nu}{\partial T_w} w_{T_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial T_\infty} w_{T_\infty} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial U_j} w_{U_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial Nu}{\partial \omega} w_\omega \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Yapılan tüm deneylerin değerlendirmeleri sonucunda ortalama belirsizliğin yaklaşık %5,02 olduğu tespit edilmiş ve Eş. 12 ile verilmiştir.

$$\frac{w_{Nu}}{Nu} = \pm \%5,02 \quad (12)$$

Bu oranda kabul edilebilir deneysel belirsizlik sınırları içerisinde kalmaktadır.

4. Simgeler (Symbols)

A_o	: Boyutsuz genlik [= x_m/L]
D	: jet çıkış çapı
H	: jet ile hedef yüzey arası mesafe
$h_{x,t}$: anlık-yerel ısı transfer katsayısı [$\text{W/m}^2\text{K}$]
k	: ısı iletim katsayısı [W/m. K]
L	: hedef yüzey uzunluğu [m]
Nu	: Nusselt sayısı
Nu_p	: Pulsatif jet ortalama Nusselt sayısı
Nu_s	: Sürekli jet ortalama Nusselt sayısı
$Nu_{x,t}$: Anlık yerel Nusselt sayısı
q''	: Isı akısı [W/m^2]
Pr	: Prandtl sayısı [= v/a]
Re_j	: jet Reynolds sayısı [= $U_j D/v$]
T_w	: ortalama yüzey sıcaklığı [K]
T_j	: serbest jet akışkan sıcaklığı [K]
U_j	: jet çıkış hızı [m/s]
Wo	: Womersley sayısı [= $L(\omega/v)^{1/2}$]
x_m	: genlik [m] (piston strok uzunluğu)
x, y	: koordinatlar

4.1. Yunanca Harfler (Greek symbols)

ω	: frekans [rad/s]
τ	: çevrim zamanı
ν	: kinematik viskozite [m^2/s]

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, sabit ısı akısına sahip dairesel düz levha yüzeyinin türbülanslı pulsatif çarpan jetle soğutma karakteristiği deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneği vasıtasıyla, belirlenen jet parametreleri için hız ve sıcaklık ölçümleri yapılmış olup, her bir parametre için yüzeyden ısı geçişinin göstergesi olan $\eta = Nu_p/Nu_s$ şeklinde ısı transferi iyileşme oranı hesaplanmıştır. Deneylerde jet ile hedef yüzey arasındaki çarpma mesafesi üç defa, genlik dört defa ve frekans altı defa değiştirilerek ısı transferi davranışı incelenmiştir. Pulsatif çarpan jetle yüzey soğutulduğu için hedef yüzey üzerinde periyodik akış alanı oluşmakta, bundan dolayı ısı geçişi de periyodik olarak gerçekleşmektedir. Isı geçişi hesaplamalarında bir çevrim esas alınarak, çevrim boyunca olan ısı geçişi bulunmuştur. Elde edilen sıcaklıklar yardımıyla Nusselt sayıları hesaplanarak sürekli jet ile kıyaslanmıştır. Pulsatif çarpan jetin, ısı transferini sürekli çarpan jete göre $H/D=2$ 'de yüksek genlik ve yüksek frekansta %30 civarında artırdığı gözlenmiştir. Pulsatif jetin hedef yüzeyde akış yapısını etkili bir şekilde değiştirdiği, sınır tabakayı çevrim boyunca periyodik olarak yenilediği değerlendirilmiştir. Bunun sonucunda, ısı geçişinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalarda, deney tesisatının izin verdiği ölçüde parametreler değiştirilmiştir. Pulsatif çarpan jetin ısı transferini artırmada etkili bir yöntem olduğu, çarpan jet uygulamalarında daha fazla ısı transferi sağlamak amacıyla kullanılabilirliği öngörülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, ASÜ-BAP tarafından 2015-029 nolu proje ile desteklenmiştir. Sağlanan desteğe teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

- Tesař V., Impinging Jets, Fluid Mechanics and Its Applications, 111, 191-231, 2015.
- Guo Q., Wen Z., Dou R., Experimental and numerical study on the transient heat-transfer characteristics of circular air-jet impingement on a flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, 104, 1177-1188, 2017.
- Jambunathan K., Lai E., Moss M.A., Button B.L., A review of heat transfer data for single circular jet impingement, Int J Heat Fluid Flow, 13, 106-115, 1992.
- Beitelmal A.H., Saad M.A., Patel C.D., The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet, Int. J. Heat Fluid Flow, 21, 156-163, 2000.
- Chung Y.M., Luo K.H., Sandham N.D., Numerical study of momentum and heat transfer in unsteady impinging jets, Int. J. Heat Fluid Flow, 23 (5), 592-600, 2002.
- Zhou J.W., Wang Y.G., Geng L.P., Effect of surface roughness on unsteady impinging jet heat transfer characteristics, J. Engineering Thermophysics, 30 (4), 687-690, 2009.
- Celik N., Effects of the surface roughness on heat transfer of perpendicularly impinging co-axial jet, Heat and Mass Transfer, 47 (10) 1209-1217, 2011.
- Ozturk, M.S., Demircan, T., Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (1), 57-74, 2022.
- Polat S., Huang B., Mujumdar A.S., Douglas W.J. M., Numerical flow and heat transfer under impinging jets: A Review, Annual Review of Heat Transfer, 2, 2, 1989.
- Zuckerman N. Lior N. , Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling, Advances in Heat Transfer, 39, 565-631, 2006.
- Çalışır T., Çalışkan S., Kılıç M., Başkaya Ş., Numerical investigation of flow field on ribbed surfaces using impinging jets, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 119-130, 2017.
- Kilic M., Ozcan O., A numerical investigation of combined effect of nanofluids and impinging jets for different parameter, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (3), 1501-1515, 2019.
- Barewar S.D., Tawri S., Chougule S.S., Heat transfer characteristics of free nanofluid impinging jet on flat surface with different jet to plate distance: An experimental investigation, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 136, 1-10, 2019.
- Hewakandamby B.N., A numerical study of heat transfer performance of oscillatory impinging jets, Int. J. Heat Mass Transfer, 52, 396-406, 2009.
- Mladin E.C., Zumbrennen D.A., Alterations to coherent flow structures and heat transfer due to pulsations in an impinging air-jet, Int. J. Therm. Sci. , 39, 236-248, 2000.
- Hofmann H.M., Kaiser R., Kind M. Martin H., Calculations of steady and pulsating impinging jets- An assessment of 13 widely used turbulence models, Numerical Heat Transfer, Part B, 51, 565-583, 2007.
- Akalanne L.C., MacGregor S.A., The effect of pulsating and streamwise flow on the heat transfer of an obstacle, Experimental Heat Transfer, 24, 1-14, 2011.
- Utturkar Y., Arik M., Charles E., Seeley C.E., Gursoy M., An experimental and computational heat transfer study of pulsating jets, Journal of Heat Transfer, 130, 062201, 2008.
- Hofmann H.M., Movileanu D.L., Kind M., Martin H., Influence of a pulsation on heat transfer and flow structure in submerged impinging jets, Int. Jour. Heat and Mass Transfer, 50, 3638-3648, 2007.
- Mladin E.C., Zumbrennen D.A., Local convective heat transfer to submerged pulsating jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 40 (14), 3305-3321, 1997.
- Azevedo L. F. A., Webb B. W., Queiroz M., Pulsed air jet impingement heat transfer, Experimental Thermal Fluid Sci., 8, 206-213, 1994.
- Liewkongsatoporn W., Patterson T., Ahrens F., Pulsating jet impingement heat transfer enhancement, Drying Technology, 26 (4) 433-442, 2008.
- Xu P., Yu B., Qiu S., Poh H. J., Mujumdar A. S., Turbulent impinging jet heat transfer enhancement due to intermittent pulsation, International Journal of Thermal Sciences, 49, 1247-1252, 2010b.
- Travnicek Z., Vit T., Impingement heat/mass transfer to hybrid synthetic jets and other reversible pulsating jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 85, 473-487, 2015.
- Alimohammadi S., Murray D.B., Persoons T., On the numerical-experimental analysis and scaling of convective heat transfer to pulsating impinging jets, International Journal of Thermal Sciences, 98, 296-311, 2015.
- Maghribie H.M., Heat transfer intensification of jet impingement using exciting jets-A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139, 110684, 2021.
- Poh H.J., Kumar K., Mujumdar A.S., Heat transfer from a pulsed laminar impinging jet, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 32, 1317-1324, 2005.
- Xu P., Yu B., Qiu S., Poh H.J., Mujumdar A.S., Turbulent impinging jet heat transfer enhancement due to intermittent pulsation, Int. J. Thermal Sciences, 49, 1247-1252, 2010.
- Tesař V., Trávníček Z., Increasing heat and/or mass transfer rates in impinging jets, Journal of Visualization, 8, (2) 91-98, 2005.
- Jafari M., Farhadi M., Sedighi K., Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugate channel: A LBM approach, Int. Commun. Heat Mass Transfer, 45, 146-154, 2013.
- Esmailpour K., Hosseinalipour M., Bozorgmehr B., Mujumdar A.S., A numerical study of heat transfer in a turbulent pulsating impinging jet, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 93 (5), 959-969, 2015.
- Akcay, S., Akdag, U., Palancioglu, H. Experimental investigation of mixed convection on an oscillating vertical flat plate. International Communications in Heat and Mass Transfer, 113, 104528. 2020.
- Xu P., Mujumdar A.S., Poh H.J., Yu B., Heat transfer under a pulsed slot turbulent impinging jet at large temperature differences, Thermal Science, 14 (1), 271-281, 2010.
- Rakhsha S., Zargarabadi M.R., Saedodin S., Experimental and numerical study of flow and heat transfer from a pulsed jet impinging on a pinned surface, Experimental Heat Transfer, 34 (4), 376-391, 2021.
- Tepe, A. Ü., Uysal, Ü., Yetişken, Y., Arslan, K., Jet impingement cooling on a rib-roughened surface using extended jet holes. Applied Thermal Engineering, 178, 115601. 2020.
- Selimefendigil, F., Öztop, H. F., Pulsating nanofluids jet impingement cooling of a heated horizontal surface. International Journal of Heat and Mass Transfer, 69, 54-65. 2014.
- Raizner, M., Rinsky, V., Grossman, G., van Hout, R., Heat transfer and flow field measurements of a pulsating round jet impinging on a flat heated surface. International Journal of Heat and Fluid Flow, 77, 278-287. 2019.
- Kharoua, N., Khezzer, L., Nemouchi, Z., LES study of contrasting behavior of pulsating plane impinging jets for heating and cooling applications. International Communications in Heat and Mass Transfer, 118, 104833. 2020.
- Akdag, U., Akcay, S., Demiral, D., The investigation of the heat transfer characteristics of a cross-flow pulsating jet in a forced flow, Computational Thermal Sciences, 9 (6) 567-582. 2017.
- Holman J.P., Experimental Methods for Engineers, McGraw-Hill, New York, 2001.

