

**DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA
ISI TRANSFERİ MEKANİZMASI VE BU MEKANİZMANIN
KURAMSAL VE DENEYSEL ANALİZİ**

Oğuzhan ERBAŞ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2007
ANKARA**

Oğuzhan ERBAŞ tarafından hazırlanan DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA ISI TRANSFERİ MEKANİZMASI VE BU MEKANİZMANIN KURAMSAL VE DENEYSEL ANALİZİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Ali DURMAZ

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA

Üye : Prof. Dr. Ali DURMAZ (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Faruk ARINÇ (ODTÜ)

Üye : Doç.Dr. Cemil YAMALI (ODTÜ)

Üye : Yrd. Doç Dr. Hüseyin TOPAL

Tarih : 24/05/2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Oğuzhan ERBAŞ

**DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA
ISI TRANSFERİ MEKANİZMASI VE BU MEKANİZMANIN
KURAMSAL VE DENEYSEL ANALİZİ
(Doktora Tezi)**

Oğuzhan ERBAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2007**

ÖZET

Standart dışı düşük kaliteli yakıtları tam yanma koşullarına uygun ve içsel SO_2 , NO_x emisyonu tutma özellikleri nedeniyle doğrudan yakabilecek en uygun teknoloji, genelde akışkan yatak, özelde ise dolaşimli akışkan yatak (DAY) yakma teknolojisidir. Burada yatak sıcaklığının 850-950 °C’de tutulmasına bağlı olarak uygun adsorbent ilavesi ile SO_2 ’nin tutulması ve NO_x oluşumunun azalması sonucu genelde ilgili baca gazı arıtma tesislerinin kurulmasına gerek kalmamaktadır. DAY’lı kazanlarda yatağın çok yoğun türbülanslı olması ve yanma odasını doldurması nedeni ile ısıtma yüzeylerine olan ısı transferi, diğer yakma sistemlerine kıyasla çok daha büyüktür. Bu durum yanma odasının ve ısıtma yüzeyi boyutlarını, dolayısıyla ilgili yatırım maliyetlerini düşürmektedir. Dolaşimli akışkan yataklı sistemlerde, ısıtma yüzeyine olan ısı transferi, yatak çekirdek akım bölgesi ile yüzey arasında, ısıtma yüzeyinin yakın çevresinde bulunan partikül kümelerinin ve dağılmış fazın dinamik davranışının bileşkesel etkisi altında oluşur. Bu çalışmada akışkan yatak ile duvarda konumlanan ısıtma yüzeyi arasında ve yatak ekseninde konumlanan daldırma yüzeyi ile yatak arasındaki ısı transfer özellikleri, bu amaca yönelik tasarımlanmış ve geliştirilmiş bir test sisteminde deneysel olarak incelenmiştir. Çeşitli yatak malzemeleri ve test koşullarında ısı transfer özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar sadece test koşullarındaki ısı transfer

davranışını ifade ettiğinden, ölçüm sonuçlarının genel olarak tüm sistemlere uygulanabilirliğini sağlayacak matematiksel korelasyonların türetilmesi yoluna gidilmiştir. Bu çalışmada, deney tasarım ve işletme verileri modelin tanımlanmasında kullanılan boyutsuz parametreler biçimine dönüştürülmüş, modeli tanımlayan ve tanımında baskın olan üssel fonksiyonlar, ölçüm değerlerinin kullanıldığı regrasyon analizleri ile belirlenerek, “yenilenen küme modeli” ölçüm sonuçlarını minumum sapma ile ifade edebilecek biçime getirilmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen yeni korelasyonlar endüstriyel boyuttaki ısı transferi hesaplarında ve ısıtma yüzeylerinin boyutlandırılmasında kullanılabilir. Buna göre sistemdeki ölçme hataları da ($\pm\%10$) dikkate alınırca yenilenen küme modelinin literatürde verilen korelasyonları, gerçek ısı transferi davranışını düşük yoğunlukta (silis kumu, kum, alüminyum tozu) % 30, yüksek yoğunlukta (bakır, çelik tozu) % 43 ortalama sapma ile ifade ederken, bu çalışmada geliştirilen yeni korelasyonlar, gerçek ısı transferini düşük yoğunlukta % 19, yüksek yoğunlukta ise % 27 ortalama sapma ile tanımlamaktadır. Yeni model, gerçek ısı transferini literatürde verilene kıyasla düşük yoğunluklu yatakta % 11, yüksek yoğunluklu yatakta ise % 16 daha az sapma oranı ile tanımlayabilmektedir.

Bilim Kodu : 914.1.065
Anahtar Kelimeler : Akışkan yatak, ısı transferi, deneysel ve kuramsal analiz, yenilenen küme modeli, benzeşim
Sayfa Adedi : 183
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ali DURMAZ

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL ANALYSIS OF HEAT TRANSFER
MECHANISM IN CIRCULATING FLUIDIZED BED**

(Ph.D Thesis)

Oğuzhan ERBAŞ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2007

ABSTRACT

Fluidized bed and particularly circulating fluidized bed combustion technology is the appropriate technology to directly burn low quality lignite because of the mentioned combustion technologies ability to hold internally SO_2 and NO_x emissions. With this combustion technology and keeping the bed temperature between 850-950 °C and also with the addition of absorbents emissions of SO_2 and NO_x are reduced. As a result, construction of expensive emission filtering systems can be avoided. In circulating fluidized beds highly turbulent bed fills the combustion chamber and this mechanism tremendously increases heat transfer. As a consequence of increased heat transfer from the sizing point of view overall dimensions of the combustion chamber heat transfer area and investment coast as well can be reduced. In circulating fluidized beds, heat transfer to the heating surfaces can be determined from the combination of several different dynamics interaction mechanisms including between bed core flow region and surface, particularly cluster near flow region of heating surface and dispersed phase. In this study, heat transfer characteristics between fluidized bed and heating surface on the wall and between bed and immerse surface perpendicular to bed axis have been experimentally investigated, on a setup designed for this purpose. Heat transfer characteristics have been determined for different bed materials and test conditions. To generalize the experimental results and to be able to use them for out of range values

correlations have been obtained. In this study, experimental design and working parameters have been obtained in dimensionless form. Power law functions which govern the model have been obtained through regression analysis to correlate test results according to a “cluster renewal model” with minimum deviation. Correlations can be used for heat transfer calculations (rating) and sizing problems for industrial scale applications. In the developed model uncertainties including measuring errors were around 10 %. In the literature, previous models were able to predict heat transfer with 30 % standard deviation for the low density case (silica sand, sand, aluminum) and 43 % percent standard deviation for high density case (copper, steal). With the “cluster renewal model” developed from this study low density case heat transfer can be correlated with 19 % standard deviation and for high density case devotion is within 27 %. With this new model, in low density bed 11 % and in high density bed 16 % improvement in the prediction have been obtained compared to previous available model.

Science Code : 914.1.065

Key Words : Fluidized bed, heat transfer, experimental and theoretical analysis, cluster renewal model, scale-up

Page Number : 183

Adviser : Prof. Dr. Ali DURMAZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli danışman hocam Prof.Dr. Ali DURMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocalarım; Yrd.Doç.Dr. Hüseyin TOPAL, Prof.Dr. Şenol BAŞKAYA ve Doç.Dr. Cemil YAMALI'ya, laboratuvar imkanlarından faydalandığım GEÇER Araştırma Merkezine ve laboratuvarında görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, Arş.Gör. Levent URTEKİN'e, Dr. Tuncay KARAÇAY'a ve Meral DOĞANAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, babam gazeteci-yazar Ahmet ERBAŞ'a, anneme ve kardeşime teşekkürü bir borç bilirim.

Yaşama kaynağım; kıymetli eşim İnşaat Mühendisi Ayşe Esma ERBAŞ'a, biricik oğlum ve tatlı kızıma sabırlarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	8
3. AKIŞKAN YATAĞIN HİDRODİNAMİĞİ	31
3.1. Akışkan Yatak Prosesi	31
3.2. Akışkan Yatakta Basınç Kaybı	33
3.3. Akışkan Yatakta Hidrodinamik Parametreler	34
3.4. Dolaşimli Akışkan Yatak İçin Boyutsuz Parametreler	36
4. DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ	38
4.1. Deney ve Ölçme Sistemi	38
4.2. Deney Programı	45
4.3. Deneysel Çalışmaların Yürütülmesi İle İlgili Ön Deneyler	47
4.4. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi	50
4.4.1. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transferinin deneysel belirlenmesi	50

4.4.2. Yatak - daldırılmış yüzey arası ısı transferinin deneysel belirlenmesi	74
5. DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA (DAY) ISI TRANSFERİNİN TEORİK İNCELENMESİ	85
5.1. DAY'ta Isı Transferi Analizine Yönelik Matematiksel Modellerin Geliştirilmesine Esas Olan Yatak Hidrodinamik Modeli	85
5.2. DAY'ta Isı Transferi Analizine Yönelik Matematiksel Modeller	88
5.3. DAY'ta Isı Transferi İle İlgili Yenilenen Küme Modeli	90
5.4. Yenilenen Küme Modeli İle Isı Transfer Katsayılarının Hesabı	96
5.4.1. Partikül kümelerinin ısıtma yüzeyi ile temas boyu ve zamanının model ısı transfer katsayısına etkisi	96
5.4.2. Isı transfer bileşenlerinin toplam ısı transfer katsayısına etkisi	98
5.4.3. DAY'ta ısı transferi katsayıları	100
6. DENEYSEL VE TEORİK ISI TRANSFER SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI, MODELİN İYİLEŞTİRİLMESİ	109
6.1. Deneysel ve Yenilenen Küme Model Isı Transfer Katsayısı Sonuçlarının Karşılaştırılması	109
6.2. Yenilenen Küme Model Korelasyonlarının İyileştirilmesi	114
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	122
KAYNAKLAR	125
EKLER	132
EK-1 Deney düzeneği	133
EK-2 Yatak malzemesine ait boyut dağılımları	134
EK-3 Atmosfer basıncında havanın termofiziksel özellikleri	138
EK-4 Buckingham- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi	139
EK-5 Hata analizi	145
EK-6 DAY'ın hidrodinamik özellikleri	147
EK-7 Duvar İle Yatak Arasındaki Isıl Analoji Modeli ve İlgili Eşitlikler	156
ÖZGEÇMİŞ	159

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Dolaşım akışkan yatakta tasarım parametreleri	6
Çizelge 3.1. Akışkan yatak için literatürde önerilen boyutsuz parametreler	37
Çizelge 4.1. Deney Programı ve İlgili Deney Setleri.....	46
Çizelge 4.2. Kolon üzerindeki eksenel yönde ölçüm noktalarının özellikleri	50
Çizelge 4.3. Dolaşımli akışkan yatakla ilgili ortak deney koşulları.....	51
Çizelge 4.4. Yatak malzemesi boyut dağılımındaki değişiklik(silis kumu).....	56
Çizelge 4.5. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyonların karşılaştırılması	57
Çizelge 4.6. Akışkan yatak rejim bölgelerinin duvardan yatağa olan ısı transferine katkısının partikül çapı, gaz hızı ile değişimi.....	69
Çizelge 4.7. Literatürdeki duvar-yatak arası ısı transfer deney sonuçları.....	73
Çizelge 4.8. Sistem enerji (ısı) akış diyagramı (EAD) ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması (silis kumu, $T_y = 300^{\circ}\text{C}$, $M_s=25 \text{ lt/h}$)	84
Çizelge 4.9. Literatürde tüp ile ısı transfer sonuçlarının karşılaştırılması	84
Çizelge 6.1. Isı transfer modelinin yatak malzemesine göre hata oranları	109
Çizelge 6.2. Modifiye edilen modele ait katsayılar ($R<10.000$).....	117
Çizelge 6.3. Modifiye edilen modele ait katsayılar ($R>10.000$).....	117
Çizelge 7.1. Model parametrelerinin ısı transfer katsayısına etkisi	125

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye’de elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payı	1
Şekil 1.2. Dünya’daki toplam DAY güç santrallerinin yıllara göre kapasite.....	2
Şekil 1.3. DAY’da rejim türlerinin ve hidrodinamik özelliklerin gösterimi.....	4
Şekil 2.1. Dutta’nın kullandığı deney sistemi	8
Şekil 2.2. Dutta’nın elde ettiği deney sonuçları	9
Şekil 2.3. Reddy ve Nag’ın deney sistemi	10
Şekil 2.4. Reddy ve Nag’ın eksenel yönde ısı transferi sonuçları.....	11
Şekil 2.5. Reddy ve Nag’ın radyal yönde ısı transferi sonuçları.....	11
Şekil 2.6. Bucak ve arkadaşlarının deney sistemi	12
Şekil 2.7. Courbariaux’un kullandığı deney sistemi	13
Şekil 2.8. Courbariaux’un 1,3 cm’lik probe için deney sonuçları	14
Şekil 2.9. Xie’ nin deney sistemi ve ısı değiştirici	14
Şekil 2.10. Xie’ nin ısı transfer katsayısı değişim sonuçları	15
Şekil 2.11. Looi ve arkadaşlarının deney sistemi.....	16
Şekil 2.12. Looi ve arkadaşlarının deney sonuçları	16
Şekil 2.13. Fox’un kullandığı deney sistemi.....	17
Şekil 2.14. Fox’un elde ettiği deney sonuçları.....	18
Şekil 2.15. Kolar ve Sunderasan’ın kullandığı deney sistemi.....	18
Şekil 2.16. Kolar ve Sunderasan’ın deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	19
Şekil 2.17. Gupta ve Nag’ın kullandığı deney düzeneği.....	20
Şekil 2.18. Sajjakulnukit’in kullandığı deney sistemi.....	21
Şekil 2.19. Reddy ve Basu’nun deney sonuçları.....	23

Şekil	Sayfa
Şekil 2.20. Dutta ve Basu'nun deney sonuçları	24
Şekil 3.1. Batık partiküle etkiyen kuvvetler.....	31
Şekil 3.2. Akışkan yatakta akışkanlaşma evreleri.....	32
Şekil 3.3. Akışkan yatakta basınç kaybı	33
Şekil 3.4. Dolaşımli akışkan yatakta basınç değişiminin şematik gösterimi	34
Şekil 3.5. Akışkan yatakta boşluk kesri	35
Şekil 4.1. Dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer analizi deney sistemi	38
Şekil 4.2. Isıl çiftlerin yerleşimleri (a) ve radyal sıcaklık ölçüm noktaları (b)	39
Şekil 4.3. Daldırılmış yüzeyin yatak içersindeki konumu	41
Şekil 4.4. Ortalama yatak sıcaklığının hava debisi (M_H) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi	47
Şekil 4.5. Fan hava debisinin (M_H) invertör frekansına (F) bağlı değişimi	48
Şekil 4.6. Ortalama yatak basıncının yatak kütle miktarı (M_Y) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (silis kumu, $247\mu m$)	49
Şekil 4.7. Dıştan içe ortalama yatak sıcaklığının ($\sim 300^\circ C$) radyal (r) ve eksenel (z) yönde değişimi.....	51
Şekil 4.8. Dıştan içe ortalama yatak sıcaklığının ($\sim 60^\circ C$) radyal (r) ve eksenel (z) yönde değişimi.....	52
Şekil 4.9. En alt - en üst arasındaki toplam yatak basınç düşümünün partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (silis kumu)	52
Şekil 4.10. Froude sayısının gaz hızı (U_o) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi.....	53
Şekil 4.11. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu(ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (silis kumu)	53
Şekil 4.12. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi(alüminyum)	54
Şekil 4.13. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (kum)	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (bakır tozu)	55
Şekil 4.15. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (çelik tozu)	56
Şekil 4.16. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyon denklemi ile elde edilen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması ($R < 10.000$)	58
Şekil 4.17. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyon denklemi ile elde edilen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması ($R > 10.000$)	59
Şekil 4.18. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (kum, $T_y = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	60
Şekil 4.19. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $T_y = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	60
Şekil 4.20. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (bakır tozu, $T_y = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)	60
Şekil 4.21. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (alüminyum tozu)	61
Şekil 4.22. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (çelik tozu)	61
Şekil 4.23. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak sıcaklığı (T_y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p = 247\text{ }\mu\text{m}$)	61
Şekil 4.24. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak sıcaklığı (T_y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p = 350\text{ }\mu\text{m}$)	62
Şekil 4.25. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak sıcaklığı (T_y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p = 690\text{ }\mu\text{m}$)	63
Şekil 4.26. Sıcaklıkla havanın ısı iletim katsayısının değişimi	63
Şekil 4.27. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p = 247\text{ }\mu\text{m}$)	64
Şekil 4.28. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p = 690\text{ }\mu\text{m}$)	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.29. Isıtma Yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p=262 \mu m$).....	65
Şekil 4.30. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_p=623 \mu m$).....	65
Şekil 4.31. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (bakır, $d_p=428 \mu m$)	66
Şekil 4.32. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (Çelik, $d_p=403 \mu m$).....	66
Şekil 4.33. Dolaşımlı akışkan yatakta çalışma bölgesinde boşluk oranı (ϵ) ve katı hacim oranı ($1 - \epsilon$) nın değişimi	67
Şekil 4.34. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis, $d_p=247 \mu m$)	68
Şekil 4.35. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis, $d_p=350 \mu m$)	68
Şekil 4.36. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis, $d_p=690 \mu m$)	69
Şekil 4.37. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 274 \mu m$).....	70
Şekil 4.38. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 400 \mu m$).....	70
Şekil 4.39. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 643 \mu m$).....	70
Şekil 4.40. Kümelerin termal iletkenliğine ve hacim kesrine basıncın etkisi	71
Şekil 4.41. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=247 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)	72
Şekil 4.42. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=350 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)	72
Şekil 4.43. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=690 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)	72

Şekil	Sayfa
Şekil 4.44. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis, $d_p=247\mu m$)	74
Şekil 4.45. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis, $d_p=350\mu m$)	74
Şekil 4.46. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis, $d_p=690\mu m$)	75
Şekil 4.47. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik, $d_p=279\mu m$)	75
Şekil 4.48. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik, $d_p=403\mu m$)	76
Şekil 4.49. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik, $d_p=615\mu m$)	76
Şekil 4.50. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=247\mu m$)	77
Şekil 4.51. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=350\mu m$)	77
Şekil 4.52. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=690\mu m$)	78
Şekil 4.53. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=279\mu m$)	78
Şekil 4.54. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=403\mu m$)	79
Şekil 4.55. Daldırılmış yüzeyde Δt sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=615\mu m$)	79
Şekil 4.56. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=247\mu m$, $T_y=300^\circ C$)	80
Şekil 4.57. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=350\mu m$, $T_y=300^\circ C$)	80

Şekil	Sayfa
Şekil 4.58. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=690\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	81
Şekil 4.59. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=279\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	81
Şekil 4.60. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=403\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	82
Şekil 4.61. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=615\mu m$, $T_y= 300^\circ C$)	82
Şekil 4.62. Dolaşımli akışkan yatakta enerji (ısı) akış diyagramı.....	83
Şekil 5.1. Dolaşımli akışkan yatakta ısı transferinin analizine esas olan yenilenen küme modelinin idealleştirilmiş tanımı	86
Şekil 5.2. Model için ısı transfer mekanizması ısı devresinin gösterimi	90
Şekil 5.3. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	96
Şekil 5.4. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı($t_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	96
Şekil 5.5. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	97
Şekil 5.6. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı ($t_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	97
Şekil 5.7. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	97
Şekil 5.8. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı ($t_{küme}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	98
Şekil 5.9. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc} , h_{gc} , h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p= 247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	98

Şekil	Sayfa
Şekil 5.10. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc} , h_{gc} , h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	99
Şekil 5.11. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc} , h_{gc} , h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$).....	99
Şekil 6.1. Deneysel elde edilen ısı transferi katsayılarının (h_{IY}) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p = 247 \mu m$).....	110
Şekil 6.2. Deneysel elde edilen ısı transferi katsayılarının (h_{IY}) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p = 350 \mu m$).....	110
Şekil 6.3. Deneysel elde edilen ısı transferi katsayılarının (h_{IY}) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$).....	111
Şekil 6.4. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması (çelik tozu, $d_p = 279 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	111
Şekil 6.5. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması (çelik tozu, $d_p = 403 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	112
Şekil 6.6. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması (çelik tozu, $d_p = 615 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)	112
Şekil 6.7. Deneysel veriler yardımıyla elde edilen (f)'in katı kesri (c)'ye bağlı olarak değişimi ($R < 10.000$)	115
Şekil 6.8. Deneysel veriler yardımıyla elde edilen (δ_{gaz})'in katı kesri (c)'ye bağlı olarak değişimi ($R < 10.000$)	116
Şekil 6.9. Sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim (modifikasyon) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R > 10.000$)	118
Şekil 6.10. Gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R > 10.000$)	119
Şekil 6.11. Sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R < 10.000$)	120
Şekil 6.12. Gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R < 10.000$)	120

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Yatak sıcaklığı ölçümünde kullanılan ısıl çift	39
Resim 4.2. Raynger infrared termometre	40
Resim 4.3. Duvar sıcaklıkları için kullanılan ısıl çift.....	41
Resim 4.4. Su için kullanılan ısıl çift (a) ve debimetre (b)	42
Resim 4.5. Akışkanlaşma havasını sağlayan fan (a) ve invertör (b).....	42
Resim 4.6. Transformatör(a) ve kelepçe ısıtıcı(b)	43
Resim 4.7. Sayısal göstergeli kontrol cihazı(a) ve data logger(b)	43
Resim 4.8. Hız ölçümünde kullanılan cihaz (a) ve pitot tüp (b)	44
Resim 4.9. Basınç ölçümünde kullanılan cihazlar	44
Resim 4.10. ASTM normu elek serisi	45
Resim 4.11. Malvern Mastersizer lazer cihazı	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Ar	Arşimet sayısı
D^*	Boyutsuz çap oranı ($D_k/d_p \Phi$)
d_p	Partikül çapı (μm)
d_t	Daldırılmış tüp çapı (mm)
f	Sürtünme katsayısı
Fr	Froude sayısı ($U_g^2 / g \cdot d_p \cdot \Phi$)
G_s	Katı dolaşım oranı ($g/m^2 s$)
h_{gc}	Seyrek faz gaz konveksiyon bileşeni ($W/m^2 K$)
H_k	Ana kolon yüksekliği (m)
$h_{küme}$	Yırtmasal etkili ısı transfer katsayısı ($W/m^2 K$)
h_{model}	Model ısı transfer katsayısı ($W/m^2 K$)
h_{pc}	Duvar-küme partikül konveksiyonu ($W/m^2 K$)
$h_{rküme}$	Duvar-küme radyasyon bileşeni ($W/m^2 K$)
$h_{rseyrek}$	Duvar-seyrek faz radyasyon bileşeni ($W/m^2 K$)
h_{rtop}	Toplam radyasyon bileşeni ($W/m^2 K$)
H_t	Daldırılmış tüp uzunluğu (m)
h_w	İnce gaz tabakası konveksiyon bileşeni ($W/m^2 K$)
H_y	Sabit yatak(malzeme) yüksekliği(m)
$L_{küme}$	Kümelerinin duvar ile temas uzunluğu(m)
M	Yatak malzeme miktarı (kg)
P_1	Yatak giriş basıncı (N/m^2)
P_8	Yatak çıkış basıncı(N/m^2)
Q_{elk}	Uygulanan Isıtıcı Gücü (W)
R	Boyutsuz yoğunluk oranı (ρ_g / ρ_p)

Simgeler**Açıklama**

Re_{mf}	Minimum akışkanlaşma reynold sayısı
Re_p	Partikül reynold sayısı
T_{ID}	Ortalama yatak iç duvar sıcaklığı (°C)
t_{küme}	Kümelerinin duvar ile temas zamanı (s)
T_o	Ortam sıcaklığı (°C)
T_{YID}	Ortalama yalıtım iç duvar sıcaklığı (°C)
T_Y	Ortalama yatak sıcaklığı (°C)
T_{YY}	Ortalama yalıtım yüzey sıcaklığı (°C)
U_E	Egzos çıkış hızı (m/s)
U_g	Gaz hızı (m/s)
U_{mf}*	Ortalama minimum akışkanlaşma hızı (m/s)
U_t*	Ortalama terminal hız (m/s)
z	Dağıtıcıya olan mesafe (m)
z/H_k	Boyutsuz yatak yüksekliği
ΔP_Y	Yatak basınç düşümü (N / m ²)
ε_{mf}	Minimum boşluk kesri
μ_g	Gaz viskozitesi (N.s/m ²)
ρ_g	Gaz yoğunluğu(kg/m ³)
ρ_{küme}	Partikül küme yoğunluğu(kg/m ³)
ρ_p	Partikül yoğunluğu(kg/m ³)
ρ_s	Süspansiyon yoğunluğu (kg/m ³)
Φ	Küresellik faktörü
§	Yalıtımdan olan ısı kaybı yüzdesi (%)

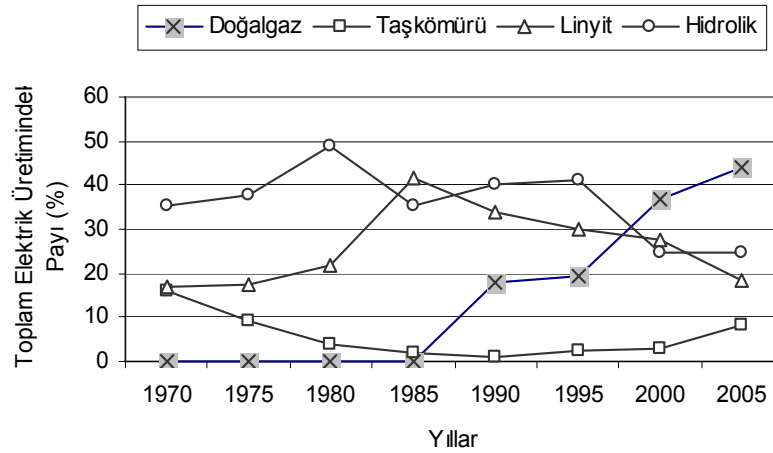
Kısaltmalar**Açıklama**

DAY	Dolaşımli Akışkan Yatak
EAD	Enerji Akış Diyagramı
GEÇER	Gazi Üniversitesi Enerji-Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon Araştırma Merkezi
PBD	Partikül Boyut Dağılımı

1. GİRİŞ

Dünyada ve Türkiye’de, giderek artan enerji tüketimi, enerji maliyeti ve çevre kirliliğinden dolayı, enerjinin verimli kullanılması, çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve yeni enerji kaynaklarının bulunarak, buna uygun sistemlerin geliştirilmesi her geçen gün daha büyük önem kazanmaktadır. Sosyo-ekonomik yaşamın ve ulusal güvenliğin sürdürülebilirliği, doğrudan ekonomik sektörlerin gereksinim duyduğu enerjinin kesintisiz olarak sağlanmasına bağlıdır. Bu bağlamda, yeni keşfedilenler ile birlikte, Türkiye’nin 8 milyar tonun üzerindeki düşük kaliteli linyit rezervinin temiz ve verimli yakılarak, enerji gereksiniminin önemli bölümünün karşılanması hayati önem taşımaktadır.

Türkiye, enerji kaynakları yönünden yetersiz bir ülkedir. Günümüzde toplam enerji tüketimindeki yerli enerji kaynakların payı %30 kadardır. Enerji verimliliği konusunda gerekli araştırma ve uygulama çalışmaları yapılmaz ise ithal enerji payı daha da artacak, enerji ve çevre sorunları sürdürülebilir kalkınmanın önünde büyük bir engel oluşturacaktır. 1987 yılında ilk kez Türkiye enerji alt yapısında yerini alan doğalgazın enerji tüketimindeki payı çok hızlı bir biçimde artarak günümüzde toplam elektrik üretiminde % 43,7’ye ulaşmıştır (Şekil 1.1).

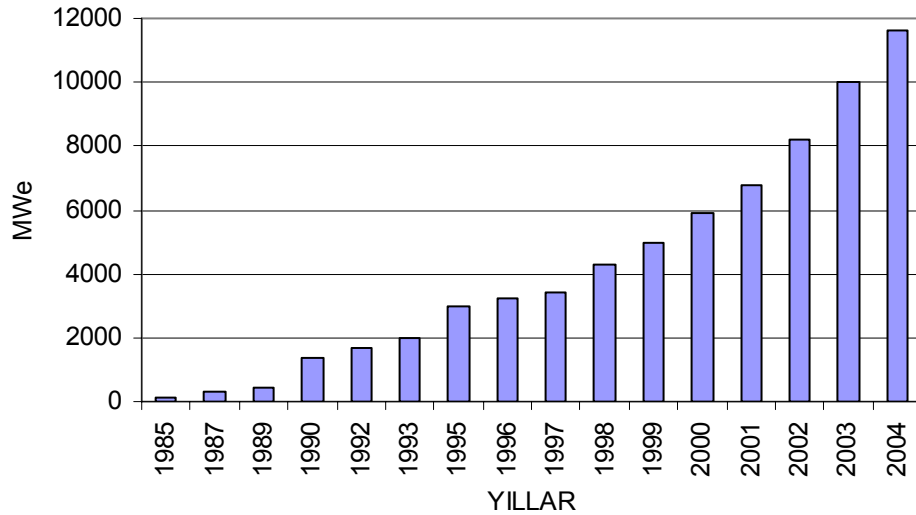


Şekil 1.1. Türkiye’de elektrik üretiminde enerji kaynaklarının payı [1]

Doğalgaz alımında yoğunluklu olarak tek bir ülkeye bağımlı olunması ve ithal enerji payının özellikle doğalgaz maliyetinin giderek aşırı biçimde artması, ülke güvenliği ve ekonomisi yönünden riskler oluşturabilir. Bu risklerin azaltılabilmesi için,

öncelikle düşük kaliteli linyit ve hidrolik potansiyellerimizden olabildiğince yararlanılmalıdır. Bunun yanında enerji tasarrufu ve yenilenebilir enerji kullanımı olabildiğince özendirilmelidir.

Düşük kaliteli linyitlerin alt ısı değerleri ($H_u \leq 1500$) düşük, kül, nem, kükürt oranları ise yüksektir. Dolaşımli akışkan yatak (DAY) bu tür yakıtların verimli yanması ile ilgili uygun yanma koşullarının (G+3T) oluşturulması, temiz yanması ile ilgili olarak, SO_2 tutma ve CO , NO_x oluşumunu bastırma özellikleri ile de ilave yatırım gerektirmeden, içsel emisyon kontrolü ile temiz yanmayı olanaklı kılmasıdır [1]. Bu nedenle, günümüzde elektrik santrallerinin de dolaşımli akışkan yatak yakma sistemi kullanımı hızla artmaktadır. Şekil 1.2’de DAY ile çalışan güç santrallerinin yıllar itibariyle kapasite değişimi gösterilmiştir [2,3].



Şekil 1.2. Dünya’daki toplam DAY güç santrallerinin yıllara göre kapasite değişimi

Toz, SO_2 ve NO_x emisyon kontrollerinin gereği gibi yapıldığı yakma sistemlerinde, ileride uygulanması zorunlu olan CO_2 tutma ve bertaraf işlemlerinin daha kolay gerçekleştirilmesi söz konusudur.

Akışkan yatakta, basınçlandırılan yakma havası ile yatak partikülünde oluşturulan sürüklenme kuvveti ve yukarı yönde oluşan ortamsal kaldırma kuvveti toplamı, aşağı yönde oluşan yatak partikül yerçekimi kuvvetleri ile dengelenerek, yatak malzemesi kararsız yoğun türbülanslı ve sıvısal hidrodinamik özellikli bir davranışa zorlanır. Bu

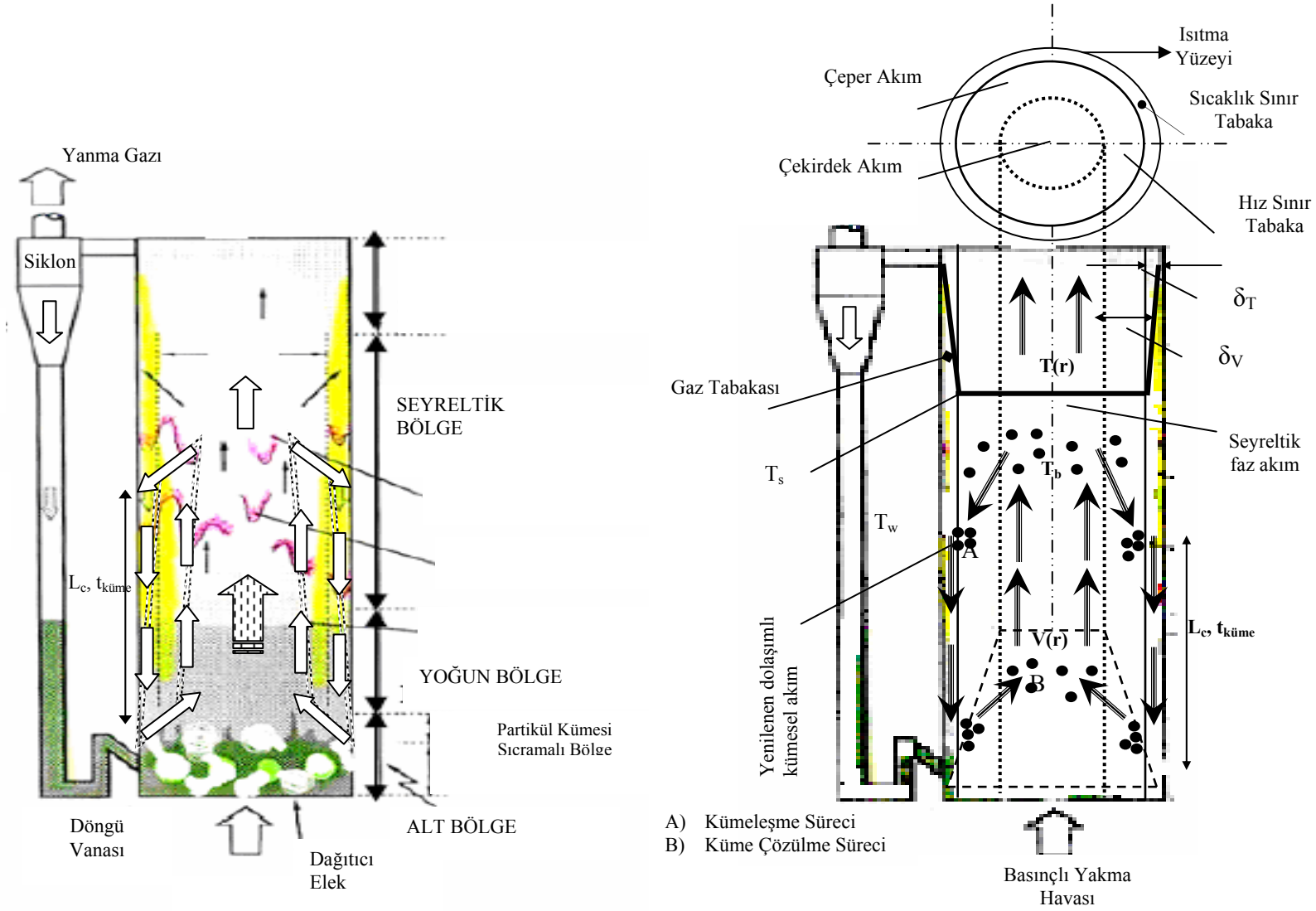
davranış yatak dolaşımının oluşturulmasına olanak sağlar ve hidrodinamiksel DAY tasarımının ve ısı transfer mekanizmasının temelini oluşturur. Akışkan yatakta yakıt oranı % 1-5, kül vb. oluşan yatak malzemesi oranı ise % 95-99 dolayındadır. Yatak kükürdünün yanması ile oluşan SO_2 'nin kireçtaşı ile reaksiyona girip sülfat veya sülfata dönüşümü ancak 850-900 °C aralığında olduğu için yatak sıcaklığının homojen biçimde bu bölgede tutulması zorunludur. Bu homojenlik büyük kapasiteli yakma sistemlerinde ancak DAY ile sağlanabilmektedir. Bu koşul kabarcıklı yatakta ancak düşük ve orta kapasitelerde gerçekleştirilebilmektedir. Yakma havası azotunun oksitlenerek NO 'ya dönüşümü genelde 1500 °C üzerinde meydana geldiğinden, öngörülen yatak sıcaklığında NO_x oluşumu çok az olmakta ve genelde yönetmelik sınır değerlerinin altında bulunmaktadır. Kömürdeki kükürdün yanması ile oluşan SO_2 , yatağa karıştırılan kireçtaşı vb. adsorbentler ile bu uygun sıcaklık bölgesinde reaksiyona girerek, kükürt, sülfat ve sülfatlara dönüşerek yatakta tutulur. Beslenen % 1-5 oranındaki kömür, yatağın yoğun türbülans etkisi altında yatağa hemen karışır, yatak ısı ile hızlı biçimde kuruyup uçucusuzlaşır. Geriye kalan kok, yoğun ısı ve kütle transferi koşullarında CO_2 ve H_2O 'nun indirgeme etkisiyle CO 'e dönüşür ve sorun CO yanmasına indirgenmiş olur. Oluşan yoğun türbülans ve geri döngü sonucunda, yatağı terk eden yanmamış koklar tekrar siklon aracılığı ve akışkanlaştırma mekanizması ile yanma odasına geri beslenir. Gazlaşma mekanizması ile CO 'e dönüştürülür ve yanmaya zorlanır. Bu nedenle akışkan yatak, düşük kaliteli yakıtların temiz ve verimli yanması için uygun bir ortam, yani, uygun içsel yanma koşulları ve emisyon kontrol mekanizmasına sahiptir. Yanma, gaz fazında oluşur. Bir kömür taneciğinin gaz fazına getirilmesi için gerekli ısı, büyük bir ısı deposu oluşturan akışkan yataktan (≈ 900 °C) sağlanır. Gazlaşma ile ilgili ısı ve kütle transferlerinin çok hızlı biçimde gerçekleştirilebilmesi, taneciğin özgül, ısı - kütle transfer kapasitesi (biçim faktörü veya A/V) ile ısı-kütle transfer potansiyelinin (T_1 , türbülans) maksimum konuma çıkartılmasını gerektirir. Kömür uygun biçimde öğütülerek, tanecik dış yüzey alanının (A) hacmine (V) olan oranı olarak tanımlanan biçim faktörü (A/V) maksimize edilmiş olur.

Akışkanlaştırılmış yatak, yatak ağırlığının (yerçekimi kuvvetinin) sürüklenme ve kaldırma kuvveti ile dengelenmesi sonucu yapısal olarak yoğun türbülanslı bir

yapıya dönüşür. Yatak içinde partiküller üzerinde genelde yukarı yöndeki kuvvetlerin (sürüklenme, kaldırma) baskın olmasına karşın, yatak çevresindeki çeper akımda, hızların düşmesi sonucu etkinlik aşağı yönde etki sergileyen yerçekimi kuvvetine geçer. Bu kuvvetsel etkileşimlerdeki değişimler sonucu, yatak üst bölgesinde, çekirdek akımdan ayrılan kaba partiküllerin aşağı yönde, ısıtma yüzeyine doğru kümeleşerek geçmesine, yüzey boyunca aşağı akımına, yoğun faz bölgesinde yukarıya açılımlı partikül çözülmesine ve partiküllerin tekrar çekirdek akıma karışmasına neden olur (Şekil 1.3). Böylelikle daha kaba partiküllerin çekirdek akım bölgesine çekilerek yanma sürelerinin uzatılmasına, ısıtma yüzeyinde sınır tabakasal yırtılmalar ile, ısı transferinin artmasına neden olan yenilenen kümeleşmeli dolaşım bir akım oluşur [4,5,6].

Beslenen yakıtın yatak havası ile iç içe karışımı, yoğun yatak türbülansı ile sağlanır (yanmanın T1 koşulu). Yakıt/hava karışımı biçimindeki yanıcı karışımın tutuşabilmesi için, sıcaklığının hızlı bir biçimde tutuşma sıcaklığı üzerine çıkarılması gerekir. Akışkanlaştırılmış yatağın, yoğun ısı depolu ve türbülanslı olması sayesinde, yanıcı karışımın sıcaklığı kolayca tutuşma sıcaklığı üzerine çıkılabilir, böylelikle yanmanın sıcaklık koşulu, T2 sağlanmış olur. Kok taneciklerinin CO₂ ve H₂O üzerinden gazlaşarak yanmasını tamamlayabilmesi için gerekli koşullar, yoğun türbülanslı, büyük ısı depolu DAY tarafından sağlanır.

Yanmanın temel koşullarının tanımlanmasında kullanılan G + 3T kısaltması, ingilizcedeki; *Gazification – Turbulance –Temperature - Time* sözcüklerinin ilk harflerinden oluşan, yanma ile ilgili bir tanımlamadır. Diğer yakma sistemlerinde yanma odası sıcaklığı 1500 °C ve üzerinde olmasına karşın, akışkan yataklı yakma sistemlerinde içsel SO₂ tutmayı sağlama ve kül ergimesini önleme amaçlı olarak, yanma odası sıcaklığı 850-900 °C 'de tutulur. Bu bağlamda akışkan yatakta yanma, bir düşük sıcaklık yanmasıdır. Bu sıcaklık düzeyinde yanmanın gerçekleştirilebilmesi, yatakta büyük ısı depolanması ve yoğun türbülans oluşturulması sayesinde olmaktadır.



Şekil 1.3.DAY’da rejim türlerinin (a) ve hidrodinamik özelliklerin (b) şematik gösterimi

Dolaşımlı akışkan yatakta ısıtma yüzeyinden olan ısı transferi, yüzey ile yatak arasında, ısıtma yüzeyinin yakın çevresinde bulunan partikül kümelerinin ve dağılmış fazın, ısı aktarımsal etkilerinin bileşkesi olarak oluşur. Isı transferi özelliği, yatak hidrodinamik davranışı ile doğrudan ilgilidir. Çekirdek ve çeper akımlardaki partiküllere uygulanan yukarı (sürüklenme, kaldırma) ve aşağı yönde (yerçekimi) etkili kuvvetlerin farklı özellik göstermeleri ve karşılıklı etkileşimleri sonucu, seyrek akım bölgesinde, partiküller kümeleşerek ısıtma yüzeyine taşınır, yüzey üzerinde belli bir süre aşağıya akar, yatak yoğun alt bölgede kümeler çözülür ve partiküller tekrar çekirdek akıma karışır (Şekil 1.3) [2,7]. DAY'ın tasarımına esas olan başlıca fiziksel özellikler ve ısı transfer mekanizmasını etkileyen diğer parametreler Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Dolaşım akışkan yatakta tasarım parametreleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	İŞLETME KOŞULLARI
Gaz	U_o = yüzeysel gaz hızı (hava debisi)
ρ_g = yoğunluk	G_s = katı dolaşım oranı
k_g = termal iletkenlik	P = sistem basıncı
μ_g = viskozite	T_y = yatak sıcaklığı (süspansiyon sıcaklığı)
c_{pg} = özgül ısı	T_d = duvar sıcaklığı (ısıtma yüzeyi sıcaklığı)
e_g = emisivite	Bağlı parametreler
Partikül	ρ_{sus} = süspansiyon yoğunluğu
ρ_p = yoğunluk	k_{sus} = süspansiyonun termal iletkenliği
k_p = termal iletkenlik	e_{sus} = süspansiyonun emisivitesi
d_p = partikül çapı	δ = gaz tabaka kalınlığı
Φ = şekil faktörü	SİSTEM GEOMETRİSİ
c_{pp} = özgül ısı	D_k = kolon çapı
e_p = emisivite	H_k = kolon yüksekliği
PBD = partikül boyut dağılımı	$D_{tüp}$ = daldırılmış tüp çapı
Isı transfer yüzeyi	$L_{tüp}$ = daldırılmış tüp boyu
k_v = termal iletkenlik	Tüpün yerleşim şekli
e_v = emisivite	Dağıtıcı elek
f = yüzey pürüzlülüğü	Diğer / g : yerçekimi ivmesi

Bu çalışmanın amacı, kazan tasarımı ve boyutlandırılması için büyük önem taşıyan DAY'ın ısı transfer davranışının hesaplanabilirliğinin deneysel olarak kanıtlanmasıdır. Bu amaçla, Gazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği Bölümü ısı güç

laboratuvarında bulunan sıcak DAY test sisteminin $\frac{1}{2}$ ölçeğinde bir benzeri olan DAY ısı transferi deney sistemi tasarımlanmış ve kurulmuştur [66].

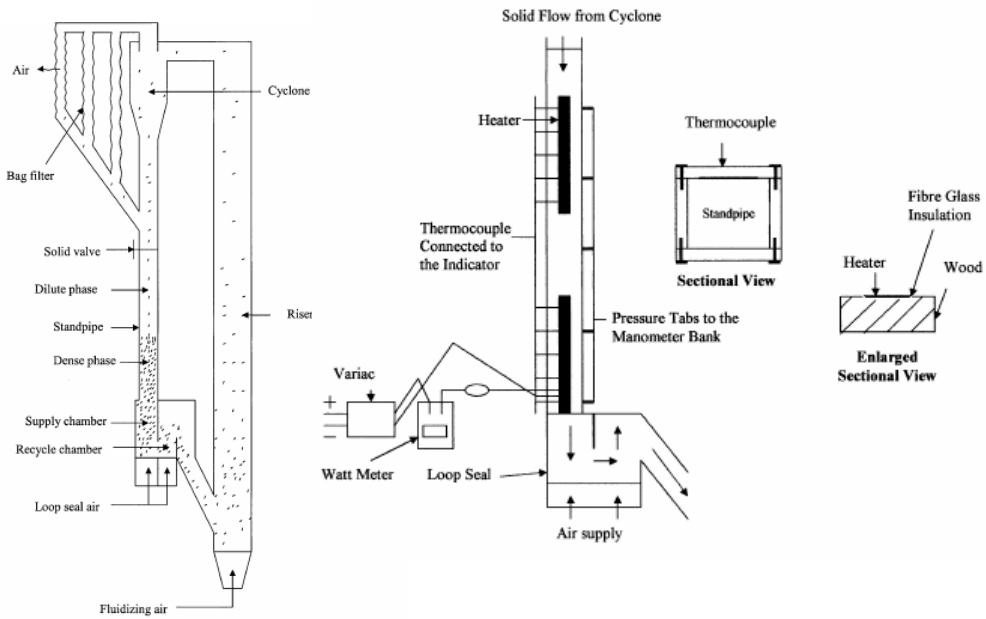
Bu sistemde farklı yatak malzemeleri ve çeşitli işletme koşullarında, ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transfer katsayıları ve yataktan daldırılmış yüzeye olan ısı transfer katsayıları deneysel olarak belirlenecektir. DAY'ta ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transfer davranışının matematiksel olarak hesaplanabilir hale getirilebilmesi için, literatürde “Yenilenen Küme Modeli” olarak isimlendirilen model kullanılacaktır.

Aynı deney koşullarındaki ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transfer katsayıları, yenilenen küme modeli yardımı ile hesaplanacak ve deney sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Bu karşılaştırma sonucunda DAY'da ısı transferinin kabul edilebilir hassasiyette hesaplanabilmesi için söz konusu modelde gerekli üstel modifikasyonlar yapılacaktır. Bu yaklaşım ile elde edilen yeni korelasyonlar endüstriyel boyuttaki ısı transferi hesaplarında ve ısıtma yüzeylerinin boyutlandırılmasında kullanılabilecektir.

Bölüm 2’de literatürde yer alan, dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer özelliklerinin deneysel olarak incelendiği çalışmalar ve sonuçları, Bölüm 3’te akışkan yatağın hidrodinamiği, akışkan yatak prosesi ve dolaşımli akışkan yatak için boyutsuz parametreler, Bölüm 4’te deney ve ölçme sistemi, deney programı, deneysel çalışmaların yürütülmesi ile ilgili ön deneyler ile DAY’ta ısıtma yüzeyinden yatağa olan ve yataktan daldırılmış yüzeye olan ısı transfer katsayılarının belirlenmesi amacıyla yapılan deney sonuçları ve deneysel verilerin değerlendirilmesi, Bölüm 5’te DAY’ta ısı transferinin teorik incelenmesi, matematiksel modellerin geliştirilmesine esas olan yatak hidrodinamik modeli ve yenilenen küme modeli ile hesaplanan ısı transfer katsayıları, Bölüm 6’ta ise deneysel ve teorik ısı transfer sonuçlarının karşılaştırılması ve modelin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, Bölüm 7’de de sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

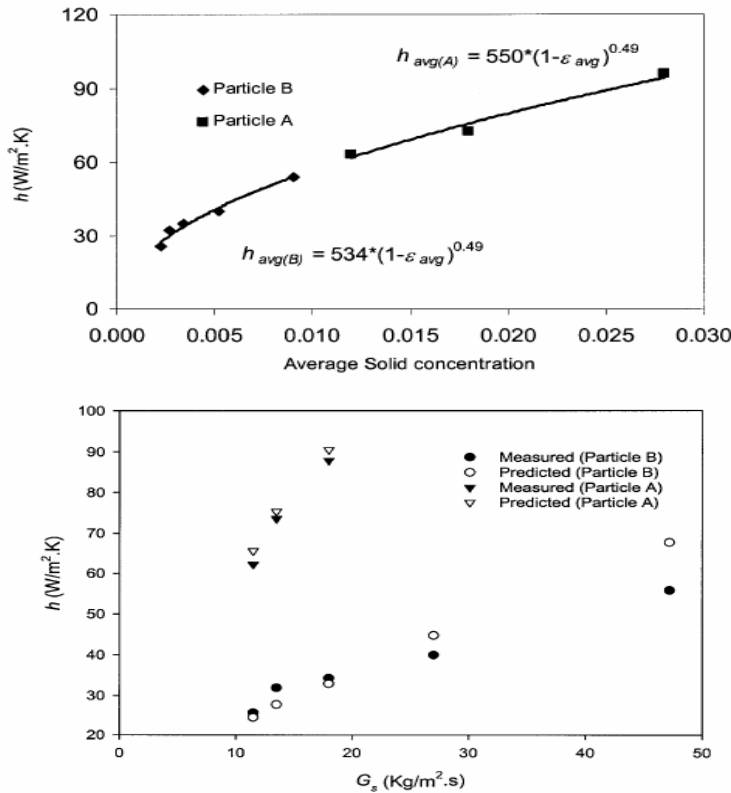
Dutta, dolaşımli bir akışkan yatağın (1,94 m boyunda ve 0,1 x 0,1 m kesitinde) dönüş kolonunda (standpipe) ısı transferini analiz etmiştir. Analiz ettiği bölgeyi yoğun ve seyrek faz olarak iki bölgede incelemiştir. Şekil 2.1’ de deney sistemi gösterilmiştir [8].



Şekil 2.1. Dutta'nın kullandığı deney sistemi [8]

Yoğun faz ve seyrek faz bölgelerinde kesitin sadece bir yüzeyi 50,8 mm x 609 mm boyutunda elektrikli ısıtıcı (flat silicon flexible electric resistance heaters) ile, diğer yüzeyler tahta malzeme ile kaplanmıştır. Basınç ölçüm noktaları 4,5 cm ara ile oluşturulmuştur. Elektrikli ısıtıcılar dönüş kolonunun en alt noktasından (loop seal air) itibaren 10 mm – 620 mm ve 1250 mm – 1860 mm aralıklarına yerleştirilmiştir (Şekil 2.1). Isıtıcılar ile tahta malzeme arasına fiberglasss yalıtım uygulanmış ve ayrıca ısıtıcıların her tarafı teflon ile kaplanmıştır. Isıtıcı yüzey sıcaklıkları teflon kaplı, T tipi, 0,3 mm kalınlığında 10 adet ısılıçift ile ölçülmüştür (0,3 sn de 0,1 °C hassasiyetli). Gaz- katı süspansiyon sıcaklığını ölçmek için ilave 2 adet ısılıçift kullanılmıştır. Isıtıcıların gücü bir varyag sayesinde kontrol edilmiştir.

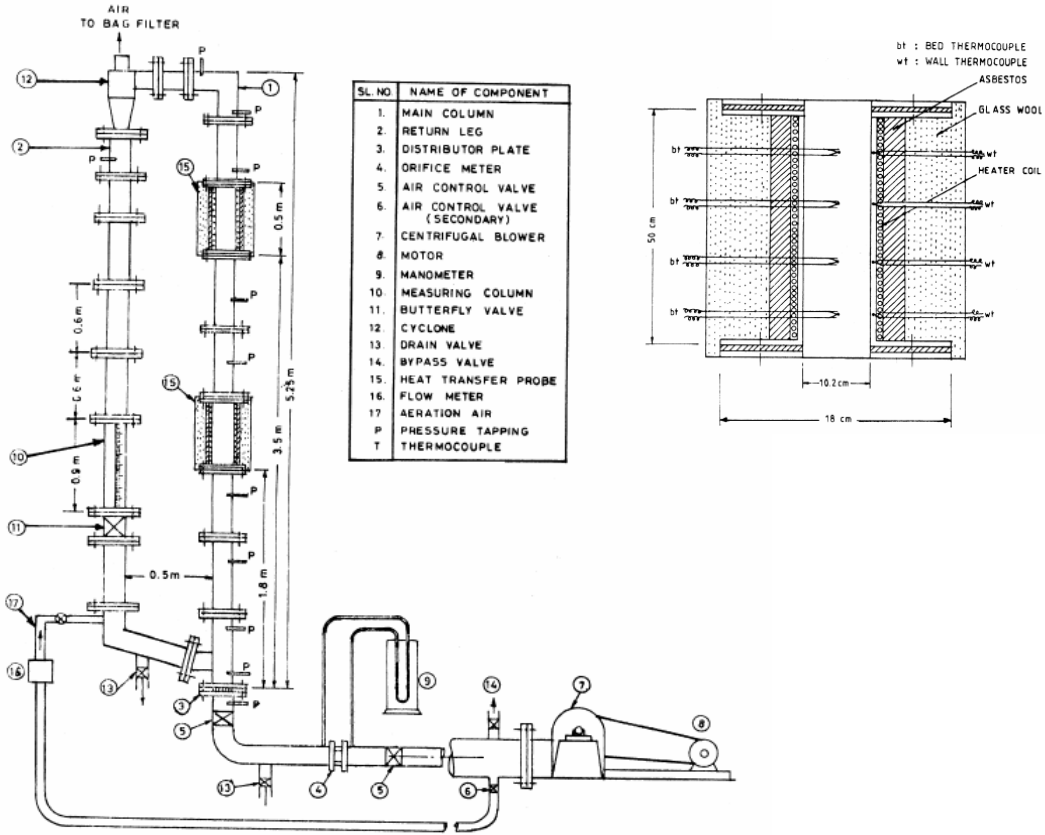
Yoğun faz bölgesindeki ısı transfer hesaplarında hareketsiz katı akısı nedeniyle *sabit yatak* korelasyonları uygulanmıştır. Dönüş kolonu üzerinde ele alınan seyrek faz bölgesi özellikleri, ana kolon (riser) bölgesi özellikleri ile çok benzerdir. Bu yüzden ele alınan bu bölge için ana kolon (riser) bölgesi korelasyonları kullanılmıştır. Gaz konvektif bileşeninin ana kolon üzerinde önemlidir. Fakat bu çalışmada dönüş kolonu üzerinde seyrek faz kısmında gaz hızı çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Gaz konvektif bileşeni için Wen Miller denklemi önerilmiştir. Deney sonuçları, Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Dutta'nın elde ettiği deney sonuçları [8]

B.V Reddy ve P.K Nag yaptıkları çalışmada dolaşımli akışkan yatakta eksenel ve radyal ısı transferini incelemişlerdir. Uzunluğu 5,25 m ve 102 mm x 102 mm kesitinde olan ana kolon üzerinde iki tane 500 mm uzunluğunda çelikten yapılmış (elektrikli ısıtıcı ile ısıtılan) bölge üzerinde eksenel ısı transferi incelenmiş ve radyal ısı transferi çalışması için ise çelikten yapılmış 22,5 mm çapında yatay bir tüp kullanılmıştır. Şekil 2.3’de deney sistemi gösterilmiştir.

Deneyler sırasında hava hızı 4,21 – 7,30 (m/s) arasında uygulanmıştır. Yatak malzemesi olarak 248 μm boyutunda kum kullanılmıştır. Eksenel ısı transferi için 529 W/m^2 , radyal ısı transferi için ise 5894 W/m^2 ısı akısı uygulanmıştır [9].



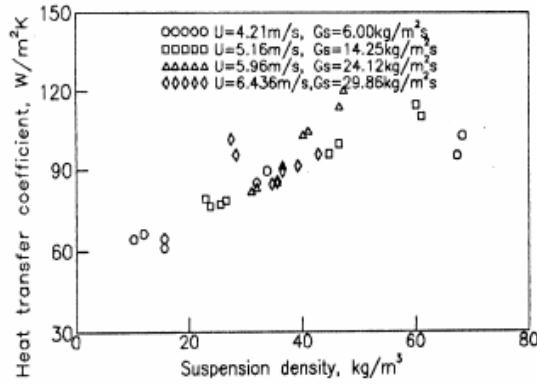
Şekil 2.3. Reddy ve Nag'ın deney sistemi [9]

Eksenel ısı transferi için; Şekil 2.3'de görüldüğü gibi yatak sıcaklığını ve duvar sıcaklığını ölçen dörder adet ısı çifti kullanılmıştır.

Yalıtım asbest ve cam yünü ile yapılmıştır. Isıtıcı gücü, üzerinde voltmetre ve ampermetre bulunan bir transformatör (varyak) ile kontrol edilmiştir. Yapılan deneyler ile ;

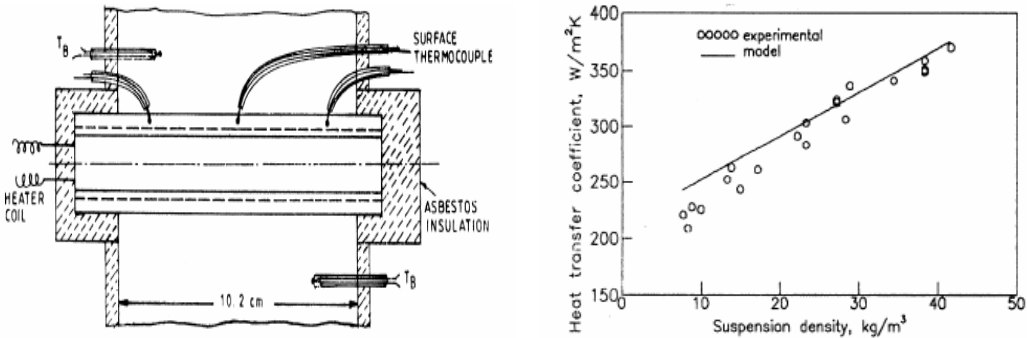
- Düşük hızda (4,2 m/s) yatağın alt bölgelerinde ısı transfer katsayısının, süspansiyon yoğunluğunun fazla olması sebebiyle maksimum, yatağın üst bölgelerinde ise partikül konsantrasyonunun düşük olması sebebiyle minimum olduğu,

- Hızın yükselmesiyle beraber katı partiküllerin alt bölgeden üst bölgeye taşınmaya başladığı ve bu bölgelerdeki partikül konsantrasyonunun artmasıyla beraber ısı transferinde artış olduğu (Şekil 2.4),
- En yüksek hızdan (7,30m/s) sonra ise süspansiyon yoğunluk profilinin değişmemesinden dolayı (uniform hal) ısı transferinde değişim olmadığı,
- Ana kolon çıkışında 90° dirsek olan kısımda partikül konsantrasyonunun birikme sonucu yükselmesi ile ısı transferinin arttığı,
- Süspansiyon yoğunluğunun dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer mekanizmasını artıran başlıca parametre olduğu (Şekil 2.4) sonuçlarına varılmıştır.



Şekil 2.4. Reddy ve Nag'ın eksenel yönde ısı transferi sonuçları [9]

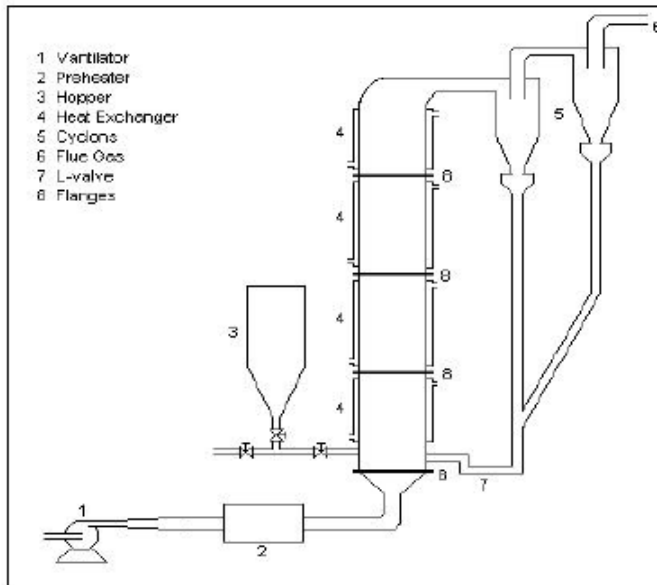
Radyal ısı transferi çalışmalarında ise Şekil 2.5' de gösterilen; ana kolonda dağıtıcı elek üzerinden 4,3 m yükseğe yerleştirilen ve çapı 22,5 mm olan yatay bir tüp kullanılmıştır. Tüp yüzeyinde üç yerde yüzey ölçüm noktası oluşturulmuştur.



Şekil 2.5. Reddy ve Nag'ın radyal yönde ısı transferi sonuçları [9]

Tüp içindeki ısıtıcı, üzerinde voltmetre ve ampermetre bulunan bir transformatör yardımıyla kontrol edilmiştir. Yatak malzemesi olarak yine 248 μm çapında kum kullanılmış ve hava hızı da 4,21 – 7,30 m/s arasında uygulanmıştır. Yapılan deneyler ile, duvarlara yakın yerlerde partikül yoğunluğunun fazla, merkezde ise seyrek olmasından dolayı, ısı transfer katsayısı duvarlara yakın yerlerde maksimum, merkezde ise minimum olarak bulunmuştur. Hava hızının artırılması ile yukarılara taşınan partikül miktarı artmış ve böylece ısı transfer katsayısı da artmıştır [9].

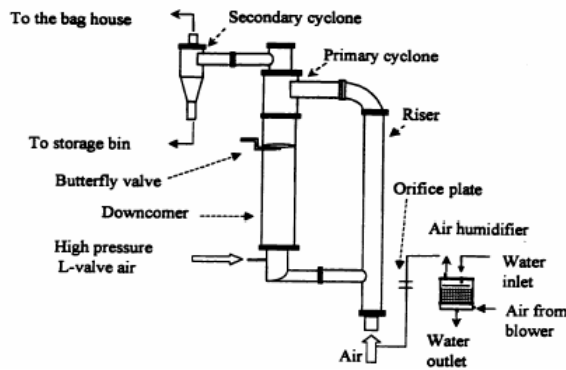
Bucak ve arkadaşları, 6,5 m boyunda, 155 mm çapında 250 kW kapasiteli bir dolaşimli akışkan yatakta yakıt olarak seytömer kömürü(0,9–2,38 mm) kullanmışlardır. Yanma enerjisini kazanmak için yataktan, su soğutmalı soğutucu gömleklere olan ısı aktarımını incelemişlerdir. Yoğunluğu 20 – 55 kg /m³ olan gaz – katı fazı için ısı aktarım katsayısını 121 W/m² bulmuşlardır. Sistemin ısı verimi % 63 olarak bulunmuştur. İki tane seri bağlanmış siklon, kül gibi yanmamış partikülleri yakalamada kullanılmıştır. Şekil 2.6’da deney sistemi gösterilmiştir. Buldukları ısı aktarım katsayısının deneysel verilerini yenilenen küme modeli ile karşılaştırmasını yapmışlardır [10].



Şekil 2.6. Bucak ve arkadaşlarının deney sistemi [10]

Courbariaux, 0,102 m çapında, 6,4 m yüksekliğinde, plexiglass malzemenen yapılmış ana kolon ve 0,152 m çapında cam malzemenen imal edilmiş dönüş kolonu bulunan dolaşimli akışkan yataкта, elektrikli ısıtıcılarla ısıtılan, 1,3 cm ve 2,5 cm çapındaki yatay problarla ısı transferini incelemiştir. Her iki prob da üç bölmeli ısıtıcıdan oluşmuştur. Dış tarafta, ısı transfer katsayısı bakıra göre daha düşük olan paslanmaz çelik kullanılmıştır. Deney sistemi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

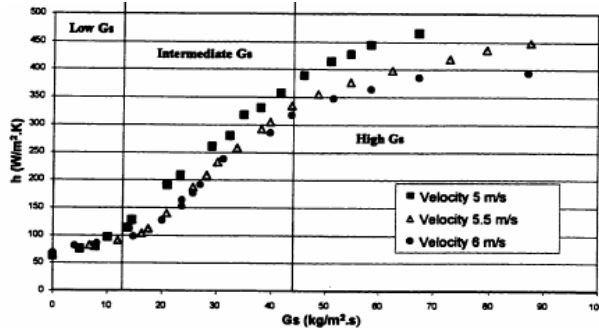
Yatak malzemesi olarak FCC partikül kullanılmıştır. Daha önce ön ısıtma uygulanan havanın hızı 4-6 m/s, katı dolaşım oranı da 6-100 kg/m²s ölçülmüştür [11].



Şekil 2.7. Courbariaux’un kullandığı deney sistemi [11]

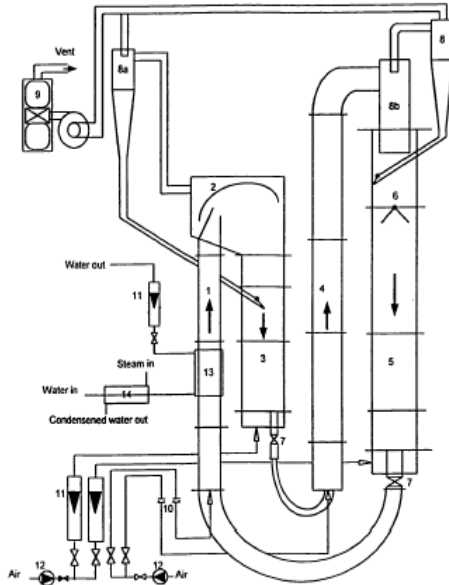
1,3 cm’ lik probe, ana kolonda L valfin 4,75 m üzerine yerleştirilmiş, hava hızının 5-6 m/s , katı dolaşım oranının da 4-90 kg/m²s uygulandığı deney sonuçları Şekil 2.8’ de gösterilmiştir.

Isı transfer katsayısı 70-475 W/ m²K arası bulunmuştur. Katı dolaşım oranı 12 – 45 kg/m²s arasında uygulandığında ısı transferinde keskin bir artış <12 ve >45 kg/m²s uygulandığında ise yavaş bir artış görülmüştür. Dönüş kolonunda yapılan deneylerde, ısı transfer katsayısının hava hızından bağımsız olduğu görülmüş ve en yüksek katı dolaşım oranında ısı transfer katsayısı 310 W/m²K bulunmuştur [11].



Şekil 2.8. Courbariaux'un 1,3 cm'lik probe için deney sonuçları [11]

Donglai Xie, yüksek yoğunluklu dolaşımli akışkan yatakta ısı transferini incelemiştir. Grace tarafından katı dolaşım oranı $G_s > 200 \text{ kg / m}^2 \text{ s}$ olan sistemler yüksek yoğunluklu olarak tanımlanmıştır. Deney sistemi Şekil 2.9'da gösterilmiştir [12].

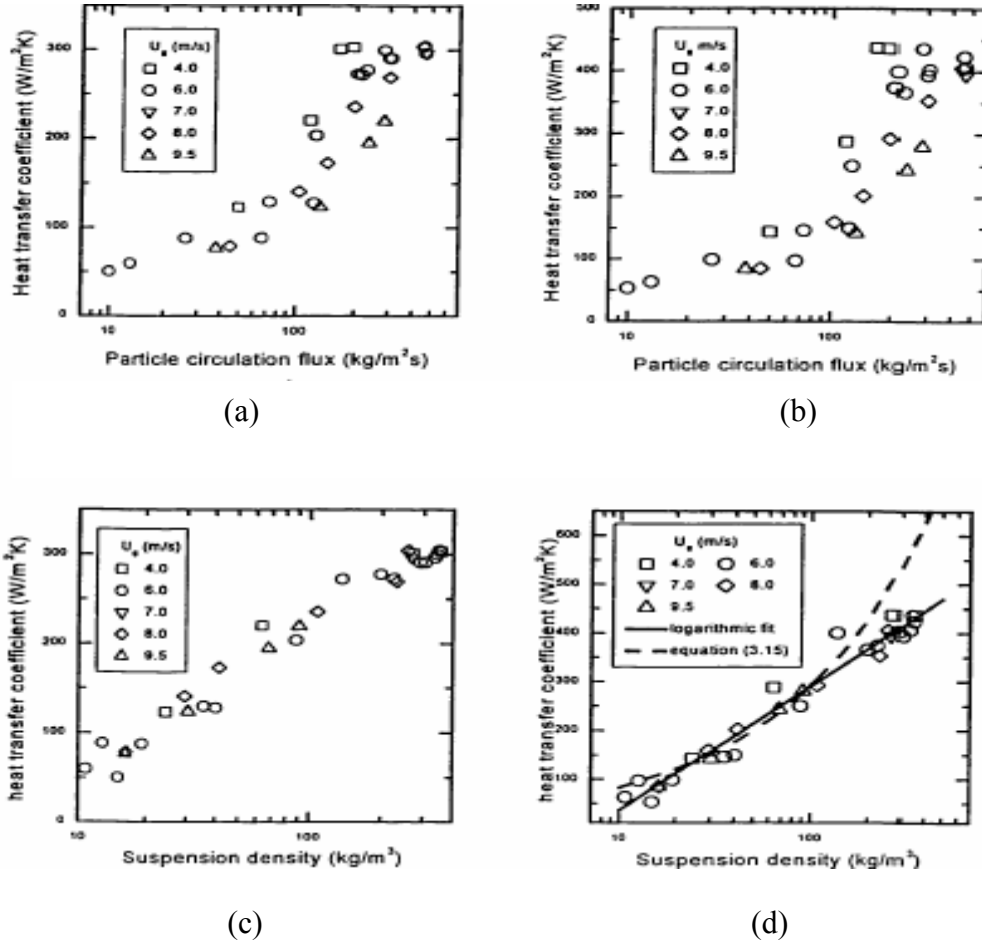


Şekil 2.9. Xie' nin deney sistemi ve ısı değiştirici [12]

Isı transferi analizi için Şekil 2.9'da görülen ısı değiştirici sistemi kullanılmıştır. Yatak malzemesi olarak ortalama çapı $65 \mu\text{m}$ olan FCC ($\rho = 1600 \text{ kg / m}^3$) partiküller kullanılmıştır. Süspansiyon yoğunluğu ve katı dolaşım oranının artması ile ısı transfer katsayısı da artmıştır. Şekil 2.10' da deney sonuçları gösterilmiştir.

Özellikle duvar çevresindeki partikül ve gaz hareketine bağlı olarak, süspansiyon ile duvar arasındaki ısı transferinde sistemin hidrodinamik yapısı çok önemlidir.

Partiküller, duvar tabakasından aşağıya inerken bir yandan konveksiyonla gazı ısıtırken , diğer yandan merkezden gelen taze partiküllerden de ısı alırlar. Gaz, ısı transferi bölgesinde hızlıca alçalan anüler partiküller tarafından aşağıya doğru çekilir [12].



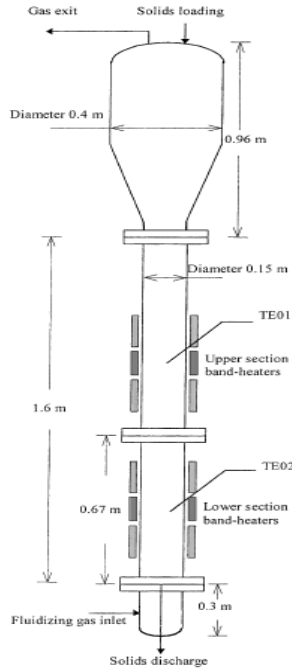
Şekil 2.10. Xie' nin ısı transfer katsayısı değişim sonuçları [12]

a) Düşük katı dolaşımı b)Yüksek katı dolaşımı c)Düşük yoğunluk d)Yüksek yoğunluk

Art Yew Looi ve arkadaşları kabarcıklı akışkan yatakta, 150-1100 kPa arasında değişen basınç uygulayarak, duvardan yatağa olan ısı transferini incelemişlerdir [13]. Uzunluğu 1,6 m, çapı 150 mm olan ana kolon iki bölgede dış yüzeyden elektrikli ısıtıcılarla ısıtılmıştır (Şekil 2.11).

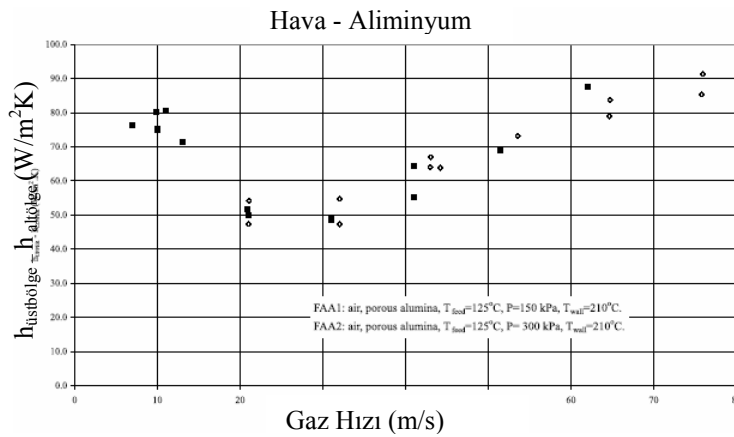
Yatak malzemesi olarak, 105 μm çapında ($\rho = 1380 \text{ kg / m}^3$) alüminyum oksit (Grup A) ve 201 μm çapında ($\rho = 2660 \text{ kg / m}^3$) kum (Grup B), akışkanlaştırıcı gaz olarak da

hava ve su buharı kullanılmıştır. Distribütör konik olarak imal edilmiştir. Deneyler sırasında duvar sıcaklığı 125-275 °C arasında ölçülmüştür. Artan gaz hızı ve basınçla beraber duvardan yatağa olan ısı transferi artmıştır. Slugging rejimde ise ısı transferinde azalma olmuştur.



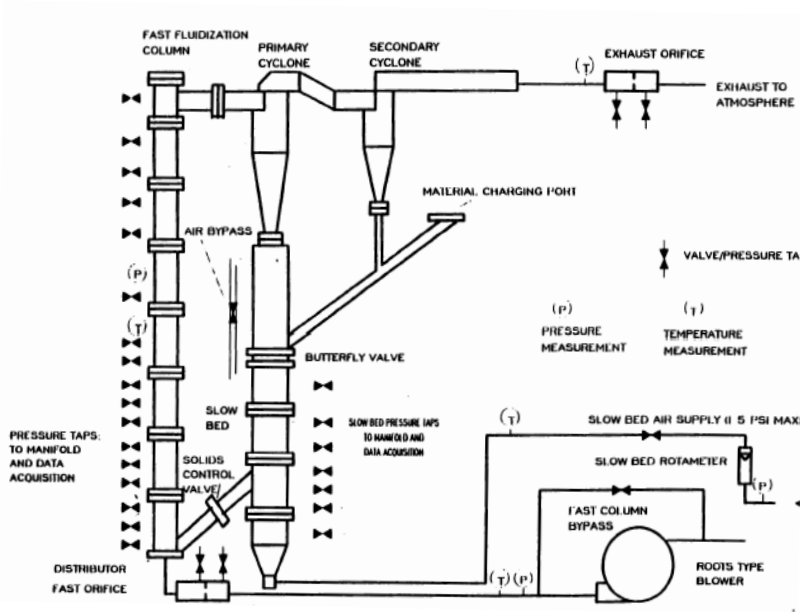
Şekil 2.11. Looi ve arkadaşlarının deney sistemi [13]

Veriler en az 15 dakika sürekli şartlar sağlanarak alınmıştır. Hava – alüminyum oksit karışımında yapılan deneylerde artan gaz hızına karşılık $h_{üstbölge}$ 'de artış olduğu görülmüştür. Deney sonuçları Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Looi ve arkadaşlarının deney sonuçları [13]

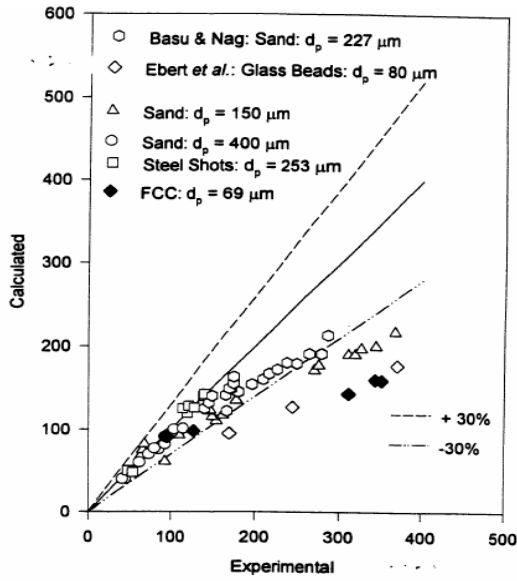
Fox W.B, yaptığı çalışmada dolaşimli akışkan yataklı bir sistemde ısı transferini deneysel olarak incelemiş ve bulduğu sonuçları “Yenilenen Küme Modeli (Cluster Renewal Model)” ile karşılaştırmıştır. Ana kolon boyu 6 m ve iç çapı 20,32 cm olan akışkan yataklı deney sistemi Şekil 2.13’de gösterilmiştir [14].



Şekil 2.13. Fox’un kullandığı deney sistemi [14]

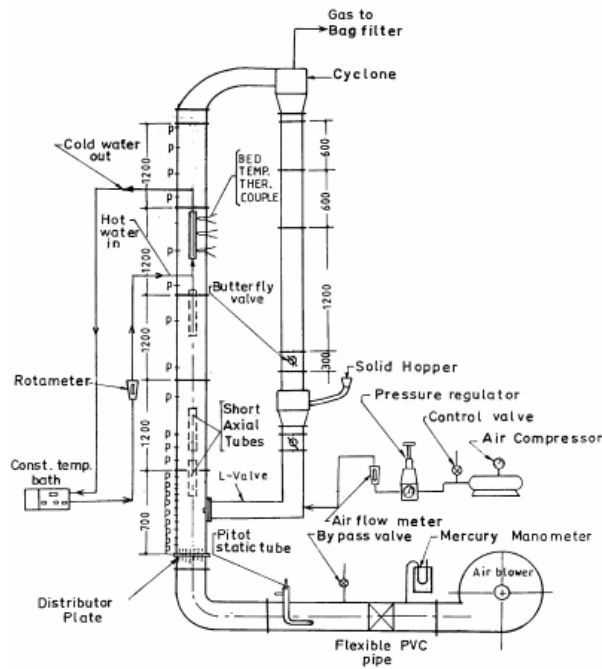
Ana kolon ve dönüş kolonu parçalı silindirlere (polycarbon malzeme) yapılarak, alüminyum flanşlarla birbirine bağlanmıştır. Yatak malzemesi olarak silika kum (2500 kg/m^3), çelik (7320 kg/m^3), FCC (710 kg/m^3) kullanılmıştır. Ana kolon çıkışı iki siklondan oluşmuştur.

Isı transfer analizi için ana kolonda, dağıtıcı eleğin 1,97 m üzerine yerleştirilen ısı transfer probu Şekil 2.13’de gösterilmiştir. Isı transfer probu alüminyum yarı çapı 10,55 cm olan borudan imal edilmiştir. Yüzeyi mavi polistiren köpük ve kırmızı RTV (kükürtle sertleştirilmiş) silikon ile yalıtılmıştır. Sıcaklık ve basınç ölçümleri 4’er adet (T tipi) ısılıçift ile yapılmıştır. Isı kaynağı; boyutu 14 x 14 cm ve kalınlığı 7,62 cm olan yüzeyin arka bölümüne (Şekil 2.13) elektrik teli konarak sağlanmıştır. Katı dolaşım oranı hesaplanmasında, dönüş kolonunda bulunan kelebek valf kapatılarak basınç düşümü hesaplanmıştır. Kelebek valf kapatıldığında dönüş kolonunda katı miktarındaki azalma ile beraber basınç azalması da görülmüştür. Şekil 2.14’de deney sonuçları verilmiştir [14].



Şekil 2.14. Fox'un elde ettiği deney sonuçları [14]

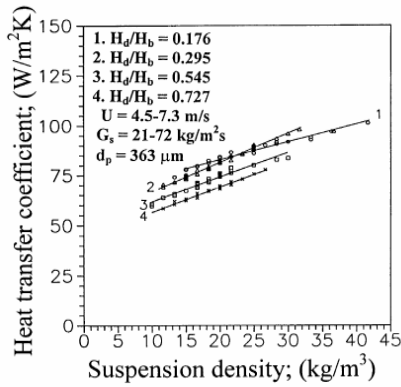
Kolar ve Sundaresan yaptığı çalışmada, 5,5 m uzunluğundaki dolaşımli bir akışkan yatakta, 100 mm x 100 mm kesitli ve akışı görmek için saydam plexiglass malzemeden yapılmış ana kolon içersine yerleştirilen dik bir tüp ile yatak arasındaki ısı transferi incelenmiştir. Şekil 2.15 'de deney sistemi gösterilmiştir [15].



Şekil 2.15. Kolar ve Sunderasan'ın kullandığı deney sistemi [15]

Bakır tüp'e dış çapı 9,6 mm olan ve içersinden sıcak su geçen bakır boru bağlanmıştır. Deneyler sırasında tüp distribütörden 4 m, 3 m, 1,62 m ve 0,97 m uzaklıklara yerleştirilmiştir. Yatak malzemesi (20 kg) olarak 363 μm çapında silika kum kullanılmıştır. Hava hızı 4,5 m/s – 7,3 m/s, katı akısı da 21 – 72 $\text{kg/m}^2\text{s}$ arasında uygulanmıştır. Hesaplanan ısı transferi 58 – 101 $\text{W/m}^2\text{K}$ arasında değişmiş ve ana kolonun alt noktasından üst noktasına doğru azalma eğilimi göstermiştir.

Dolaşan katı akısının ve süspansiyon yoğunluğunun artmasıyla ısı transfer katsayısı da artmış (Şekil 2.16), gaz hızının artmasıyla ise azalmıştır. Tüpün yüzeyine yakın katılar ısı transferini etkilemiştir. Katı dolaşım oranını bulmak için kelebek valf kapatılarak zamana göre ölçüm yapılmıştır.



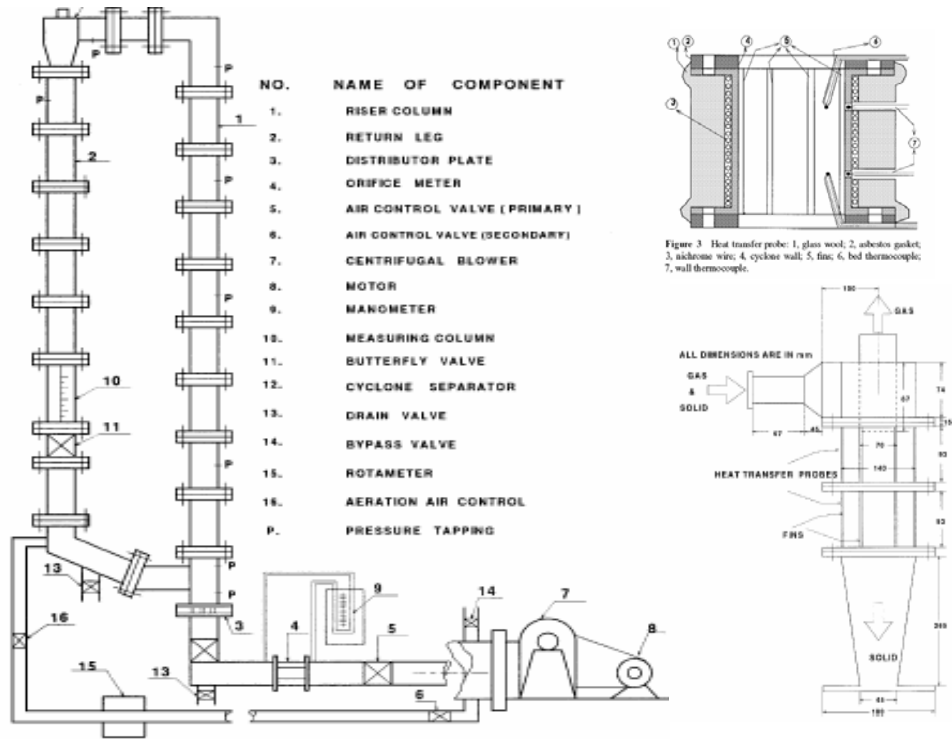
Şekil 2.16. Kolar ve Sunderasan'ın deney sonuçlarının karşılaştırılması [15]

Deneyler sonucunda,

- Süspansiyon yoğunluğu bağımsız bir parametre değildir, partikül boyutu, gaz hızı, katı dolaşım oranı, yatak geometrisi etkilidir.
- Fiziksel olarak, ısı transfer yüzeyinin yakınındaki ve çevresindeki gaz - partikül hareketi ısı transferini etkilediği için kesit ortalama yoğunluğundansa, yerel yoğunluk daha önemlidir. Fakat literatürdeki datalar ile karşılaştırma yapılabilmesi için ortalama yoğunluk dikkate alınmıştır. Gerçek lokal yoğunluk aslında o eksendeki bu ortalama yoğunluktan daha düşüktür [15].

Gupta ve Nag, uzunluğu 5,25 m ve 102x102 mm kesit alanlı plexiglass malzemeden yapılmış soğuk bir dolaşım akışkan yatağın 140 mm çapındaki siklonunda değişen

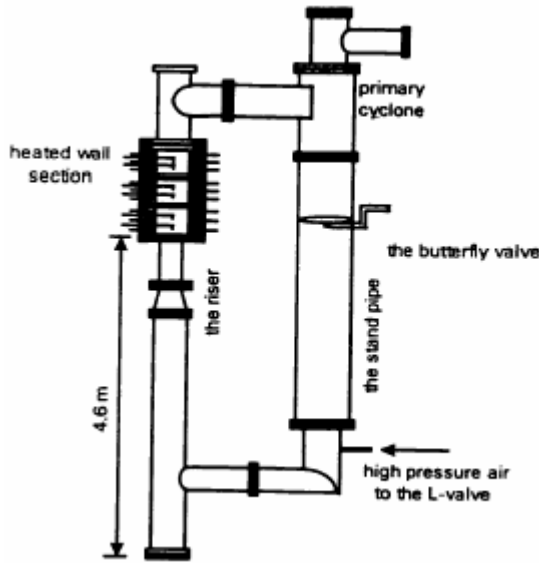
parametrelere bağılı olarak ısı transferi değişimlerini analiz etmişlerdir. Şekil 2.17 de deney düzeneği verilmiştir [16].



Şekil 2.17. Gupta ve Nag'ın kullandığı deney düzeneği [16]

Test edilen siklon bölgesi(iki ısı transfer hücresi)dışardan elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmıştır. Isıtıcılar bir varyag ile kontrol edilmiştir. Duvar sıcaklıkları ve yatak sıcaklıklarını ölçmek için dörder adet ısılıçift yerleştirilmiştir. Katı dolaşım oranı ve gaz hızı arttıkça ısı transferi de artmıştır [16].

Sajjakulnukit, soğuk DAY'da, ana kolon da dağıtıcı elek üzerinden 4,6 m yükseklikte dışardan elektrikli ısıtıcılar ile ısıtılan 6,35 cm çapındaki bölgede ısı transfer analizi yapmıştır. Deney sistemi Şekil 2.18' de gösterilmiştir [17]. Çalışmasında, hava hızının, partikül çapının, katı dolaşım oranının, yatak geometrisi ve ısıtılmış yüzey uzunluğunun, ısıtılmış dik duvar yüzeyi ile yatak arası ısı transferine etkisini incelemiştir. Isı transfer katsayısı, yüzeysel gaz hızı ve ortalama katı hacim kesri ($1 - \epsilon$) ve katı dolaşım oranı ile doğru orantılı, ortalama partikül çapı ile ters orantılı olarak değişmiştir. Isıtılmış duvar üzerinde, yukarı doğru eksenel olarak ısı transfer katsayısının azaldığı görülmüştür.



Şekil 2.18. Sajjakulnukit'in kullandığı deney sistemi [16]

Grace, dolaşımli akışkan yatakta suspansiyondan yüzeye olan ısı transferini iki yaklaşımla incelemiştir. Tartışılan modeller tek partikül bombardıman modeli ve sınırlı paket modelidir. 50 – 500 μm boyutlarında partikül ile 8 m/s hız ve 298 – 1123 K sıcaklıklar arasında deneyler yapmıştır. Isı transfer katsayısını 150 – 250 $\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$ arasında bulmuştur. Katı konsantrasyon oranının artması ile büyük ölçüde ısı transfer katsayısı artmış, artan partikül çapı ile azalmıştır. Ayrıca ısı transfer katsayısı kolonun uzunluğu boyunca ters ilişki göstermiştir [18].

Subbarao ve Basu çapı 0,1 m olan ve 4,5 m uzunluğundaki bir sistemde, duvardan yatağa olan ısı transfer katsayısını incelemiştir. Yatak, ana kolon çevresine sarılan sıcak su duvarı ile ısıtılmıştır. Isı transfer katsayısı 90- 350 $\text{W} / \text{m}^2 \text{K}$ arasında değişmiştir. Düşük yoğunluklu yataklarda partikül boyutunun ısı transferine etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir [19].

Reddy ve Nag , yataktan su duvarlarına olan ısı transferini, 5,25 m uzunluğunda ve 102x102 mm kesitindeki akışkan yatakta incelemiştir. Yakıt olarak doğal gaz ve kömür kullanmışlardır. Yatak sıcaklığı ve süspansiyon yoğunluğu arttıkça ısı akışı da artmıştır. Kanatçıkların ilave edilmesi ile yataktan olan ısı absorpsiyonunun değişimi belirlenmiş ve arttığı görülmüştür [20].

Basu ve Nag, yaptıkları çalışmada, dolaşimli akışkan yatağın duvarlarından olan ısı transferi ile ısı transfer modellerini irdelemiş ve partikül taşınım katsayısı için yenilenen küme modelini önermişlerdir. Isı transfer katsayısı $100 - 200 \text{ W/m}^2\text{K}$ arasında değişmiştir. Dolaşimli akışkan yatakta ısı transferinde en önemli etki süspansiyon yoğunluğu daha sonra ise yatak sıcaklığı ve ısı değiştiricinin dik uzunluğudur. Partikül boyutunun etkisi küçük dolaşimli akışkan yataklarda olmasına rağmen büyük ısı kapasiteli akışkan yataklarda etkisi yoktur [21].

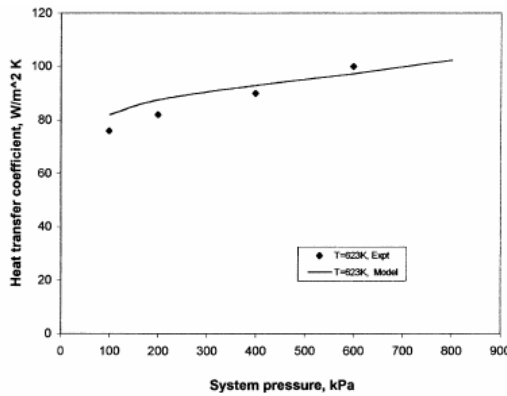
W.Luan ve arkadaşları yataktan duvara olan ısı transferini yeni bir model ile incelemişlerdir. Bu model değişen sıcaklıklarda, ısı aktarımı yüzeylerine yakın olan katıların konsantrasyonunda ve duvar ile karışım tabakası arasında ince bir gaz tabakası olduğunu kabul eder. $152 \times 152 \times 7,3 \text{ m}$ boyutlarında ki dolaşimli akışkan yatakta, $800 - 900 ^\circ\text{C}$ sıcaklıkta $286 - 334 \text{ }\mu\text{m}$ çapında silis kumu ile deneyler yapılmıştır. Yatak sıcaklığı $400 ^\circ\text{C}$ civarlarında olduğunda radyasyonla gerçekleşen ısı transferinin toplam ısı transferinin sadece % 6 ' sı olduğunu belirlemişlerdir [22].

Dinçer ve arkadaşları, ısıtılan akışkan yatakta küresel partiküllerin ısı aktarımı modellemesini deneysel ve teorik olarak incelemişleridir. $0,9 \text{ m}$ yüksekliğinde ve $0,22 \text{ m}$ çapındaki akışkan yatakta, yatak malzemesi olarak $0,5 - 1 \text{ mm}$ aralığında partikül kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar, ısıtma esnasında küresel partiküllerin merkezindeki sıcaklık dağılımını sağlamıştır. Bu veriler boyutsuz formda sunulmuş ve mevcut analitik modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İki durumda inceleme yapılmıştır; birincisi sadece taşıma ile ısı aktarımı katsayısının yüzey ısı aktarım katsayısı olarak göz önüne alınması, ikinci durum ise taşıma ve ısıma ile ısı aktarımı katsayılarının toplamının yüzey ısı aktarım katsayısı olarak göz önüne alınmasıdır. En iyi sonuç ikinci durumda elde edilmiştir ve sonuç olarak ısıma ile ısı aktarımındaki en önemli etki sıcaklık dağılımıdır [23].

Reddy ve Basu, yenilenen küme modeli ile yataktan duvara olan ısı transferini incelemişlerdir [24]. Bu model, partikül taşınım ısı transfer katsayısı, partikül demetlerinin ısı iletim katsayısı ve partikül demetlerinin yoğunluğu üzerine basıncın etkisini kapsamaktadır.

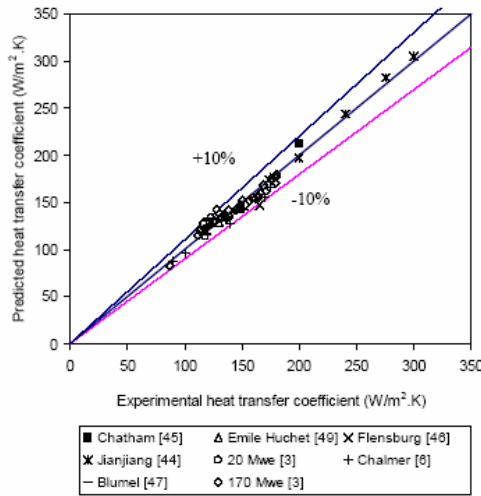
Yataktan duvara olan ısı transfer katsayısına, yatak sıcaklığı ve basıncın etkisi de irdelenmiştir. Model sonuçları, 2 m yükseklik ve 52,4 mm çapındaki elektrikli ısıtıcı ile ısıtılmış dolaşımli akışkan yatakta elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda ;

- Basıncın termofiziksel özellikler ve partikül kümelerin temas zamanına etkisi hesaba katıldığında, kümelerin yenileme işlemini temel alan bir model, ısı transferi davranışını uygun şekilde izah edebilir.
- Basıncın küme ısıl iletkenlik katsayısı, kapasite ve temas zamanı üzerine etkisinin sonucunda, ısı transfer katsayısı, artan partikül boyutu ve dağılan faz taşınım katsayısı sebebiyle artan basınca bağlı olarak artar (Şekil 2.19).
- Süspansiyon yoğunluğunun artması duvar yakının da partikül kümesi içersindeki katı yoğunluğunun artışına sebep olur.
- Deneysel veriler ve nümerik sonuçlar birbiriyle uyum halindedir.



Şekil 2.19. Reddy ve Basu'nun deney sonuçları [24]

Dutta ve Basu “yenilenen küme modelini” dolaşımli akışkan yataklarda su duvarları için geliştirmişlerdir [25]. Bu model su duvarları için uygulana bilecek en iyi model olmakla beraber(% 10 hata ile)duvarlardaki sürtünme olayının ısı transferine etkisini içine almaktadır (Şekil 2.20). Modeldeki başlıca parametreler; duvar üzerinde oluşan gaz tabakası kalınlığı, partikül yoğunluğu, ısıl sınır tabaka, oluşan partikül kümelerinin konsantrasyonu ve hızı, yayılan faz konveksiyonudur. Duvarlardaki sürtünme, katıların konsantrasyonuna, ısı transfer yüzeyinin boyutuna ve boyutsuz çapa bağlıdır (sağlanan havanın yüzeyinin yüksekliği / hidrolik çap).



Şekil 2.20. Dutta ve Basu'nun deney sonuçları [25]

Zevenhoven ve arkadaşları, duvara yakın partiküllerin hız ve konsantrasyonlarını incelemek için sıcak (800°C) ve soğuk dolaşımli akışkan yatakta video çekimi kullanmışlardır. Sıcak dolaşımli akışkan yatakta su soğutmalı deneyler yapılmıştır. Yenilenen küme modeli ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Soğuk dolaşımli akışkan yatakta ısı transferinin % 20'nden daha fazlası partikül konveksiyonu ile gerçekleşmiştir [26].

Vijay ve Reddy, temiz kömür teknolojisi olarak adlandırdıkları DAY'da yanma sırasında, yoğun faz ($< 20\text{-}40 \text{ kg / m}^3$) – seyrek fazda ($< 10 \text{ kg / m}^3$) değişen şartlar altında yataktan duvara olan ısı transferini incelemişlerdir. Yataktan duvara olan ısı transferini üç bileşene bağlamışlardır; partikül konveksiyonu, gaz konveksiyonu ve radyasyonun katkısı. Deney sonuçları, yenilenen küme modeli ile karşılaştırılmıştır. Partikül konveksiyonu, oluşan partikül kümeleri ve bu kümelerle duvar arasında oluşan gaz tabakası kalınlığının direncine bağlıdır. Yoğun fazda partikül konveksiyonu daha fazla, seyrek fazda ise gaz konveksiyonu daha fazla gerçekleşmiştir. Radyasyonla ısı transferi ise, seyrek fazda ve yüksek sıcaklıklarda önemli olmuştur [27].

Noymer ve Glicksman, bir infra camera (TIV- Thermal Image Velocimetry) ile dolaşımli akışkan yatağın duvarlarında oluşan partikül kümelerinin hareketini ve partikül konveksiyonunu araştırmışlardır [28].

Uzunluğu 2,44 m ve 0,159 m kare kesitli akışkan yatakta partikül kümelerinin hızları 0,9 – 1,2 m/s arası ölçülmüştür. Gamma olasılık fonksiyonu yardımıyla partikül kümelerinin duvarla temas zamanı ortalama 0,4 s bulunmuştur [28].

Chao ve arkadaşları, üç fazlı bir dolaşimli akışkan yatak ta (0,102 m çap ve 3,5 m yüksekliğinde) farklı sıcaklık değişimlerinde yatak ile daldırılmış ısıtıcı yüzey arasındaki ısı transferini ve kabarcık özelliklerinin ısı transferine etkisini araştırmışlardır. Kabarcık hızı, değişen gaz hızı ve sıvı hızı ile artmış, fakat artan katı dolaşım oranı ile az miktarda azalmıştır [29].

Grulovic ve arkadaşları, üzerinde buhar ceketi bulunan 25,4 mm çapındaki bakır tüplü akışkan yatakta, 1,20- 2,98 mm cam partiküller kullanarak duvardan yatağa olan ısı transferini ve akış durumunu incelemişlerdir [30].

Bi, Jin ve arkadaşları, 186 mm çapında dolaşimli akışkan yatakta dört farklı uzunluktaki elektrikle ısıtılan ısı probuyla, ısı transfer yüzeyinin dik uzunluğunun etkisini incelemişlerdir. Yatak malzemesi olarak 48 μm çapında ve 1474 kg/m^3 yoğunluğunda FCC partikül kullanmışlardır. Katı dolaşım oranı 20-150 $\text{kg} / \text{m}^2\text{s}$, yüzeysel gaz hızı 2,5-6 m/s, yatak sıcaklığı 30 $^{\circ}\text{C}$ -50 $^{\circ}\text{C}$, probe yüzey sıcaklığı da 50 $^{\circ}\text{C}$ -80 $^{\circ}\text{C}$ arası ölçülmüştür. Radyal yöndeki ısı transfer katsayısı, artan probe uzunluğu ile azalmıştır [31].

Zhang ve arkadaşları, 1 x 0,5 m kesitli, 5 m yüksekliğindeki DAY da ana kolonun en üst noktasında, elektrikli ısıtıcı ile ısıttıkları bölgede ısı transfer mekanizmasını incelemişlerdir. Yatak malzemesi olarak 244 μm çapında ve 2600 kg / m^3 yoğunluğunda silica kum kullanılmıştır. Ana kolon çıkışında katı dolaşım oranı ve yüzeysel gaz hızı değişiminin etkisi önemsiz bulunmuştur [32].

Chang ve arkadaşları, Yüksekliği 6 m ve 200 x 300 mm kesitli DAY'da ana kolona yerleştirilen ve elektrikle ısıtılan yatay tüp ile ısı transferini araştırmışlardır. Yatak malzemesi olarak kül ve eposy reçin kullanmışlardır. Yatak merkezinden katı dönüşüm zonuna doğru farklı yüzeysel hızlarda ısı transfer katsayısı değişmiştir. Ortalama en büyük ısı transfer katsayısı katı dönüşüm zonunda, en düşük ise yatak

merkezinde bulunmuştur. Yatak genişliği ile ısı transfer katsayısında artma görülmüştür [33].

Sundaresan ve Kolar, DAY'da ana kolon içersine daldırılmış ve içersinden sıcak su geçen bir tüp ile deneyler yapmıştır (Şekil 2.21). Yatak malzemesi olarak 256 – 363 μm çapında kum kullanılmıştır. Akışkanlaşma hızı 4,5-7,3 m/s, katı dolaşım oranı 21-72 $\text{kg/m}^2\text{s}$, yatak sıcaklığı da 35°C - 45°C arası değişmiştir. 100 mm kare kesitli, 5,5 m uzunluğundaki soğuk dolaşımli akışkan yatakta ekstenel yönde farklı yüksekliklere yerleştirilen 10 mm çapında dikey tüp ile yatak arası ısı transfer analizi yapılmış ve ısı transfer modeli oluşturulmuştur. Ayrıca suspansiyon özelliklerinin reynold ve nusselt sayılarına etkisi de incelenmiştir. Partikül boyutunun azalması ile ısı transfer katsayısı artmıştır. Maksimum ısı transfer katsayısı 0,6 m uzunluğundaki tüp için $100 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$, minumum ısı transfer katsayısı 2,5 m uzunluğundaki tüp için $30 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ bulunmuştur [34].

Watanabe ve arkadaşları, yatak malzemesi olarak cam boncuk ve aliminyum kullandıkları, çapı 21 mm, uzunluğu 1,8 m olan akışkan yatakta, katı partiküller ile gaz arasındaki ısı transferini incelemişlerdir. Partikül içersindeki sıcaklık dağılımının, kayma hızının ve partikül gecikmesinin ısı transferine etkisi araştırılmıştır. Katı partikül özellikleri değiştiğinde, gaz sıcaklık gradyenti ve gaz ile katı arasındaki ısı dengede değişmiştir.. Gaz ve katı partiküllerin temas alanından dolayı, ana kolonun en altında ki basınç düşümü, dağıtıcı elekten 0,5 m yükseklikte ölçülenden daha büyük çıkmıştır [35].

Kim ve Lee, akışkan yatakta elektrikle ısıttıkları dik bir bakır tüp içersinde, cam boncuk-su akışının ısı transfer özelliklerini ve hidrodinamiğini incelemişlerdir. Partikül boyutunun büyümesi ile akış hızı azalmış, ısı transferi ile beraber basınç kaybı da büyümüştür. Cam boncuk-su içersindeki basınç kaybı ve ısı transfer özelliklerini, duvara yakın partiküllerin davranışları yani partikül kayma hızı, duvara çarpma frekansı vb. etkilemiştir [36].

Chiu ve Ziegler , üç fazlı (hava – su – katı partikül) DAY’da elektrikli ısıtıcılarla ısıttıkları ana kolon bölgesinde duvardan yatağa olan ısı transferini incelemişlerdir. Yatak malzemesinde katı partikül olarak, cam boncuk ve aliminyum partiküller kullanmışlardır. Sıvı hızı, aliminyum partiküller kullanıldığında 7-8 cm /s, cam boncuklar ile de 12,8 cm/s ölçülmüştür. Bütün partikül boyutu ve sıvı hızlarında, gaz hızının artışı ile beraber ısı transfer katsayısı da artmıştır [37].

Pagliuso ve arkadaşları, DAY’da gaz-katı suspansiyondan duvara olan ısı transferini 72,5 mm çap ve 6 m yükseklikteki sistemde, duvarlarda bulunan ısı değiştirici yardımıyla (su ceket) incelemişlerdir. Sisteme verilmeden önce havaya elektrikli ısıtıcılarla ön ısıtma uygulanmış ve sisteme soğuk su girişi yapılarak sıcak su elde edilmiştir. Yatak malzemesi olarak 179–545µm boyutunda kum kullanılmıştır. Yatak sıcaklığı 150 °C de ve gaz hızı 10,5 m/s’de sabit kalmış, suspansiyon yoğunluğu, partikül çapı ile katı dolaşım oranının değişiminin ısı transferine etkisi incelenmiştir. Katı dolaşım oranı ve suspansiyon yoğunluğunun artışı ile ısı transfer katsayısı artmış, fakat partikül çapının artışı ile azalmıştır [38].

Sunderesan ve Clark, ana kolonda (30,5 x 30,5 cm) distribütörün 14,8 cm üzerine yerleştirilen ve içersinden sıcak su geçen yatay ısı transfer tüpü yardımıyla ısı transfer analizi yapmışlardır. Yatak malzemesi olarak iki farklı boyutta kum, cam boncuk ve taşlama malzemesi (abrasive) kullanılmıştır [39].

Dutta ve Basu, ana kolonda su duvarları ve kanatçıklar bulunan, 1 x 0,5 m kesitli ve 5 m yüksekliğindeki DAY’da farklı konumlar için ısı transferini incelemişlerdir. Yatak malzemesi olarak ortalama çapı 263 µm ve yoğunluğu 2564 kg/m³ olan kum kullanılmıştır. Deneyler sonucunda, su duvarları ile kanatçık yüzeyleri üzerindeki hidrodinamik koşulların farklı olduğu, kanatçık yüzeylerindeki ısı transferinin su duvarlarına nazaran daha düşük olduğu ve kanatçık yüzeylerinden maksimum ısı transferinin, ana kolonun en üst noktasına yerleştirildiği konumda elde edildiği görülmüştür [40].

Wang ve arkadaşları, 6,2 m yüksekliğinde ve 0,161 m çapındaki DAY'da, 2,6-4,6 m/s yüzeysel hız, 275-520 °C yatak sıcaklığı koşullarında ısı transferi incelemişlerdir. Su duvarı olarak üç adet 0,8 m uzunluğunda, 10 x 10 mm kesitli ve 1 mm kalınlığında paslanmaz çelik tüp ana kolon içersine yerleştirilmiştir. Yatak malzemesi olarak ortalama çapı 100µm, yoğunluğu 2650 kg/m³ olan silica kum kullanmışlardır [41].

Wen & Miller, hızlı bir yatağın duvarının daima topaklaşmalar ile temasta olmadığını, duvarın zaman zaman clusterların arasından yukarı doğru akan ve dağınık katıları içeren gaz ile de temas ettiğini belirterek, seyreltik üniform gaz katı süspansiyonlarından ısı transferi için korelasyon oluşturmuşlardır. Glicksman, dağınık fazdan kaynaklanan radyatif ısı transferinin $T > 700$ °C ve yatak yoğunluğu < 30 kg/m³ iken, ısı transferinin önemli bir şekli olduğunu belirterek, cluster ile temas etmeyen, dağınık fazdan duvara olan radyatif ısı transferinin tahmini için çalışma yapmıştır [42].

Baskakov, büyük tanecikli (> 2 mm) kazanlarda etkin ısı transferi katsayısının 250 w/m²K civarında kaldığını, radyasyon kaynaklı bileşenin de 800-1000° C sıcaklığı ve 200° C civarındaki boru sıcaklığı için, yaklaşık 65 w/m²K değerinde olduğunu, yüzey ve partikül arasındaki temas noktasında gaz ve transfer yüzeyindeki partiküllerden, iletim ile ısı transfer edildiğini belirtmiştir [43].

Zabrodsky, radyasyon ile ısı transferini ihmal ederek, maksimum yatak/yüzey ısı transfer katsayısıyla ilgili korelasyonu 380, 480 ve 530µm partikül büyüklüklerindeki tuzla akışkanlaşmış yatak için deneysel çalışmalar neticesinde oluşturmuştur [44].

Khan ve arkadaşları, çok az yoğun A grubu taneleri için sıcaklıkla değişen gazın fiziksel özelliklerinin yatak/yüzey ısı transfer katsayısı ve yatağın akışkanlaşma davranışına etkileriyle ilgili çalışma yapmışlardır [45].

Kharechenko ve Makherin, tuz ve kil kullanarak, ısı transfer katsayısını ölçmüşlerdir. Yatağın farklı bölgelerinde 12,5 mm çapında daldırılmış bakır kürelerle yatak ısı transfer özellikleri, 220 mm çapında bir yatakta incelenmiştir. Ölçümlerde kullanılan prob, eksen boyunca ve yatağın duvarları boyunca hareket ettirilerek deneyler

yapılmıştır. Deneylerde yatak, 120 μ m ϕ apında partiküllerle ve 0,2 m/s hava akış hızı ile akışkanlaştırılmıştır. Farklı açılarda ve 160mm x 220mm yüzey alanına sahip levha yatağa daldırılmış, levha yakınlarında karışım sıcaklığı ölçülmüştür. Levha üzerine üç adet ısıtıcı yerleştirilmiştir. Levha üzerindeki ortalama ısı transfer katsayıları, transfer yüzeyi aşağı doğrultulduğunda 200 W/m² °C iken, düşeyle 10⁰ lik bir açıda 450 W/m² °C'a yükselmiş, levha düşey yerleştirildiğinde 300 W/m² °C olarak ölçülmüştür [45].

Gel Perin ve arkadaşları, 380 x 380 mm kesit alanlı akışkan yatakta deneyler yapmışlardır. Deneylerde, 20 mm ϕ apında beş ve dokuz tüpten oluşan tüp demetleri kullanılmıştır. Yatak malzemesi olarak 160, 263 ve 350 μ m eşdeğer ϕ apta tuz kullanılmıştır. Yatağı akışkanlaştırmak için 0,15 ve 1 m/s arasında yüzeysel gaz hızları kullanılmıştır. Deneylerde, ısı transfer katsayıları 160 ve 330 W/m² °C arasında değişen değerler de ölçülmüştür. Tüplerin dizilme aralığı 120 mm 'den 40 mm'ye düşürüldüğünde, maksimum ısı transfer katsayısı 320 W/m² °C'dan 260 W/m² °C'a kadar düşmüştür [45].

Kolar ve arkadaşları, akışkan yatakta daldırılmış yüzey-yatak arasındaki toplam ısı transferinin iletim, taşıma ve radyasyon bileşenlerinden, 1100 °K'den düşük sıcaklıklar için radyasyon bileşeninin etkisinin ihmal edilebileceğini yaptıkları çalışma ile göstermişlerdir [46].

Vreendenberg, 40 - 220 °C arası yatak sıcaklığı ve 0,009-0,16 kg /m²s katı dolaşım oranı şartlarında, 560 mm ϕ apındaki yatağa daldırılmış dikey tüp ile yaptığı deneyler sonucu; ısı transfer katsayısını 110 – 520 W / m² °C bulmuştur. Artan akışkanlaşmış kütle hızı ve yatak sıcaklığına bağlı olarak ısı transferi de artmıştır. Deneysel işletme sıcaklığı artırıldığında, gaz iletkenliğinin de % 20 arttığı gözlenmiştir. Tüp yatağın merkezinden 200 mm uzaklığa yerleştirildiğinde yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmiştir. Ayrıca eksenel daldırılmış ısı transfer yüzeyine yakın güçlü partikül alış-verişi de incelenmiştir [47].

Fritz, 140 mm ϕ apında akışkan yatak ile 10 mm ϕ apında dikey ısıtılmış bakır tüp arasındaki ısı transferini incelemiş ve tüp boyunca sıcaklık gradyentini ölçmüştür. Yatak malzemesi olarak 180 – 900 μ m arası alüminyum, tuz ve cam küreler

kullanmıştır. Deneyler, 45, 60 ve 70⁰ konik girişli ve gözenekli plaka dağıtıcılar kullanılmıştır. Artan partikül çapı ile ısı transferi azalmış, fakat artan gözenek çapı ile artmıştır [47].

Noe ve Knudsen, yatağa dikey daldırılmış 1,5 uzunluğundaki tüpler ile ortalama ve bölgesel ısı transfer katsayılarını belirlemişlerdir. Yatak malzemesi olarak 150 – 450 µm çapında cam partiküller kullanmışlardır. Yatak ve akışkan arasındaki ısı transferi, serbest akış ve engellenmiş akış koşulları için ayrı ayrı irdelenmiştir [47].

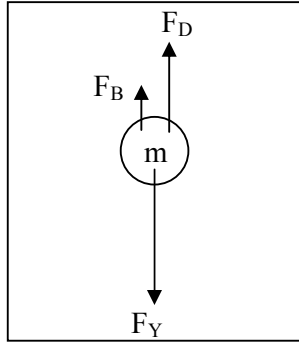
Shi ve arkadaşları, yarı endüstriyel 0,411 m çap ve 8,5 m yüksekliğindeki DAY'da yataktan duvara olan ısı transferini incelemişlerdir. Küçük arşimet sayılarında gaz içersinde ısı iletimi, büyük arşimet sayılarında ise gaz konveksiyon etkisi daha anlamlı bulunmuştur. Artan katı konsantrasyonu ile, duvar bölgesindeki soğuk partikül kalkanı sonucu radyasyon ile ısı transferi azalmıştır [48].

3. AKIŞKAN YATAĞIN HİDRODİNAMİĞİ

3.1. Akışkan Yatak Prosesi

Bir akışkan ile içinde batık halde bulunan m kütledeki bir cisim veya partikül arasında göreceli (relativ) hız (V_r) farkı var ise basit partikül mekaniğinin temel prensibini kullanarak, partikülün hareketi hakkında fikir sahibi olunabilir [4]. Partikül üzerine etki eden yer çekimi kuvveti, elektrik kuvveti veya manyetik kuvvet gibi harici kuvvetleri, akışkan tarafından partiküle uygulanan kaldırma kuvvetini ve yine akışkan tarafından partiküle uygulanan sürüklenme kuvvetini dikkate alarak Newton'un hareket yasası partikül için (Şekil 3.1) Eş. 3.1 deki gibi yazılır.

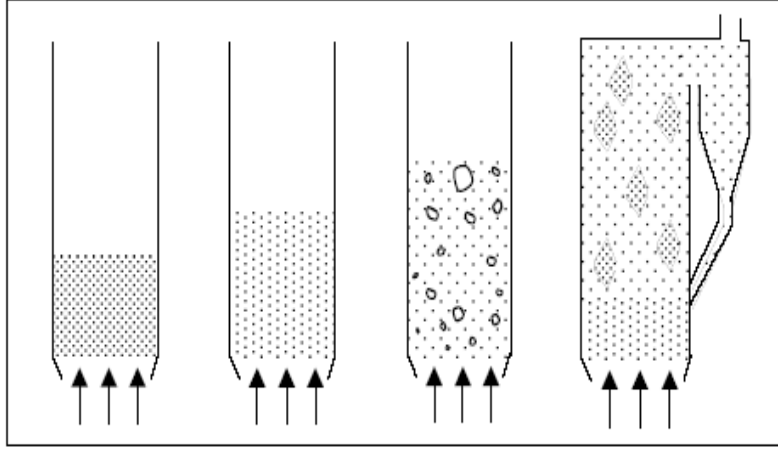
$$m [dV_r / dt] [1 / g_c] = F_Y - F_B - F_D \quad (3.1)$$



Şekil 3.1. Batık partiküle etkiyen kuvvetler

F_Y = Yer çekimi kuvveti , F_B = Kaldırma Kuvveti, F_D = Sürüklenme Kuvveti

Bir kolon içinde yığılı durumda bulunan taneciklerin teşkil ettiği yatak bölgesine alttan düşük bir hızla hava verilmeye başlandığında, hava, parçacıklar üzerinde fazla kuvvet uygulayamaz ve parçacıklar arasından kendine boşluklar bularak yukarı hareket eder. Bu durum parçacıkların hareket etmediği sabit yatak konumudur (Şekil 3.2). Akış hızı arttırıldıkça, hava, parçacıklara daha fazla kuvvet uygulayarak, parçacıkların arasındaki yerçekiminden kaynaklanan kuvvetleri azaltır. Hız daha da arttırıldığında, parçacıkların üzerindeki kaldırma kuvveti yerçekimini dengeleyerek, yukarı doğru akan havanın içinde parçacıkların asılı kalmalarını sağlar. Yani partikül üzerine uygulanan kuvvetlerin vektörel toplamı sıfır olur (minimum akışkanlaşma koşulu).



Şekil 3.2. Akışkan yatakta akışkanlaşma evreleri

Yatak bölgesinin kapladığı hacmi fazla değiştirmeyen bu konumda hız daha da arttırılırsa, yatak içinde hava kabarcıkları oluştuğu ve kabarcıkların yatağı, suyun kaynamasına benzer bir şekilde terk ettikleri görülür.

Kabarcıklı akışkan yatak olarak adlandırılan bu sistemlerde, gaz-katı karışımının kapladığı hacmin sabit yatak konumuna göre belirgin şekilde artmasına rağmen, yatak bölgesi ile üzerinde bulunan serbest bölge arasında halen kolaylıkla ayırım yapılabilmekte ve gözle görülür bir yatak yüzeyi bulunmaktadır.

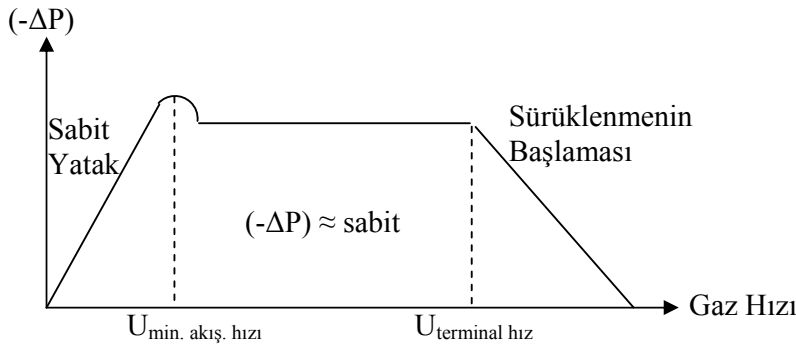
Hava akışının daha da hızlandırılması durumunda, kabarcıklar daha da büyüyecek ve birleşerek yatakta daha büyük boşluklar oluşturacaktır. Türbülanslı akışkan yatak olarak adlandırılan bu durumda, katılar yüksek katı derişimine sahip, birbirine bağlı gruplar halinde bulunurlar.

Terminal hız, bir gaz – katı akışkanlaşma sürecinde yatağı oluşturan katı taneciklerin gaz akımı ile yataktan dışarı taşınacağı gaz hızıdır. Eğer gaz akışı ile hareket eden katılar, havadan ayrıştırılarak yatağa geri döndürülürse ($V > V_{\text{terminalhız}}$), parçacıklar bir döngüde dolaşmaya başlayacaklardır ve bu halde sistem dolaşimli akışkan yatak olarak tanımlanır.

3.2. Akışkan Yatakta Basınç Kaybı

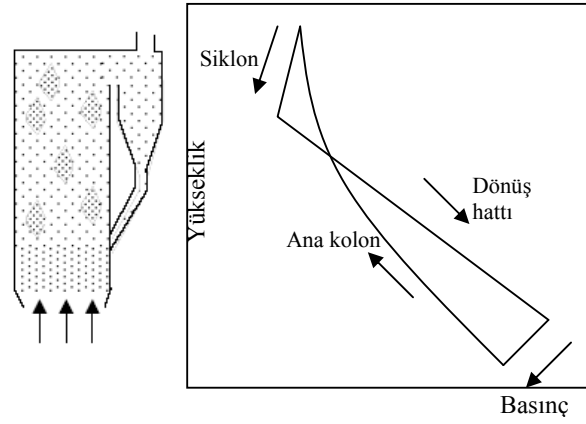
Minimum akışkanlaşma hızında basınç kaybında biraz yükselme olur [4]. Bu partiküller arası etkileşim kuvvetini yenmek içindir (Şekil 3.3). Ancak gaz hızının artmasıyla bir kez bu nokta geçilip partiküller gaz içinde asılı hale geldiklerinde bu etkileşim kuvveti ortadan kalkar ve basınç kaybı biraz düşer. Bu noktadan itibaren akışkan yatakta basınç kaybı sabit kalır. Minimum akışkanlaşma hızından itibaren gaz hızı artırıldığında, yüksek hızlarda partiküllere uygulanan sürüklenme kuvveti de artar.

Gaz hızı partikülün terminal hızından daha büyük değere ulaştığında, partiküller gaz ile sürüklenip yataktan dışarıya taşınırlar. Şayet yatakta kullanılan partiküller tek boyutlu değil de belirli bir boyut dağılımına sahiplerse, önce küçük partiküller daha sonra büyük partiküller dışarıya taşınırlar. Böylece yatakta ki partikül miktarı da sürekli azalacağından, akışkan yatak boyunca gözlenen basınç kaybı da azalacaktır. Sonunda yatakta hiç partikül kalmayınca, basınç kaybı da sıfır olacaktır.



Şekil 3.3. Akışkan yatakta basınç kaybı [4]

Dolaşımli akışkan yatakta genel sistem ele alındığında, basınç değerlerindeki değişim Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Ana kolon boyunca, aksenal yönde, çıkışa yaklaştıkça basınç düşüşü görülmektedir. Siklonda daha da düşen basınç değeri, dönüş borusundan itibaren tekrar artmaktadır.



Şekil 3.4. Dolaşımlı akışkan yatakta basınç değişiminin şematik gösterimi

3.3. Akışkan Yatakta Hidrodinamik Parametreler

Minimum Akışkanlaşma Hızı (U_{mf}) [m/s]

i.) Kunii ve Levenspiel [49]:

$$\frac{1.75}{\Phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_{partikül} U_{mf} \rho_{gaz}}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\Phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_{partikül} U_{mf} \rho_{gaz}}{\mu} \right) = Ar \quad (3.2)$$

ii.) Wen ve Yu'ya göre [50]:

$$\frac{1}{\Phi_s \varepsilon_{mf}^3} \cong 14 \text{ ve } \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\Phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \cong 11 \quad (3.3)$$

$$Re_{mf} = \left[(33,7)^2 + 0,0408 Ar \right]^{1/2} - 33,7 \quad (3.4)$$

$$Ar = \frac{d_{partikül}^3 \rho_{gaz} (\rho_{partikül} - \rho_{gaz}) g}{\mu^2}, \quad Re_{mf} = \frac{d_{partikül} U_{mf} \rho_{gaz}}{\mu} \quad (3.5), (3.6)$$

iii.) Thonglimp ve Arkadaşları [51]:

$$Re_{mf} = \left[(31,6)^2 + 0,0425 Ar \right]^{1/2} - 31,6 \quad (3.7)$$

iv.) Leva;

$$U_{mf} = 1,1 \times 10^{-3} \left[\frac{d_{partikül}^{1,82} (\rho_{partikül} - \rho_{gaz})^{0,94} g^{0,94}}{\mu^{0,88} \rho_{gaz}^{0,06}} \right] \quad (3.8)$$

Terminal Hız (U_T) [m/s]

Dolaşımli akışkan yataklarda işletmede en önemli parametrelerden birisi, basınç düşüşünün sıfıra yaklaştığı andaki akışkanlaşma hızı olan terminal hızdır . İşletme hızı, terminal hızın üzerinde olmalıdır. Terminal hız için Eş. 3.8 (Perales Korelasyonu) [5] ve Eş. 3.9 [14] önerilmektedir.

$$U_T = \frac{1,45 \cdot \mu \cdot Ar^{0,484}}{\rho_{gaz} \cdot d_{partikül}} \quad (3.9)$$

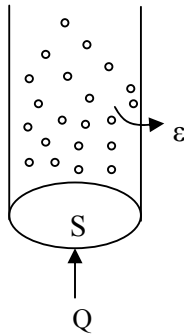
$$U_T = \frac{U^*}{\left[\frac{\rho_{gaz}^2}{g \mu_{gaz} (\rho_{partikül} - \rho_{gaz})} \right]^{1/3}} \quad U^* = \left[\frac{18}{Ar^{2/3}} + \frac{(2,3348 - 1,7439 \phi_s)}{Ar^{1/6}} \right]^{-1} \quad (3.10)$$

$$0,5 < \phi_s < 1 \quad \text{Küresel partiküller için} \quad \phi_s = 1$$

Minimum Boşluk Kesri (ε_{mf})

Yatak yüksekliği yardımıyla ($H_{mf} \approx H_{sabit}$) [4]

$$(1 - \varepsilon_{mf}) = \frac{4M}{H_{mf} \pi \cdot D^2 \cdot \rho_{partikül}} \quad (3.11)$$



Şekil 3.5. Akışkan yatakta boşluk kesri

Yüzeysel Gaz Hızı (U_0) [m/s]

$$U_0 = \frac{Q(m^3 / s)}{Sc(m^2)} \quad (3.12)$$

Q = Kompresör Hava Debisi

Sc = Akışkan Yatak Kesit Alanı

Gerçek Gaz Hızı (U_{gaz}) [m/s]

$$U_{gaz} = \frac{Q(m^3 / s)}{Sc(m^2) \cdot \varepsilon_{ortalama}} \quad (3.13)$$

Q = Kompresör Hava Debisi , Sc = Akışkan Yatak Kesit Alanı

Süspansiyon Yoğunluğu [52] (ρ_{sus}) [kg/m³]

$$\rho_{süspansiyon} = \Delta P / gL \quad (3.14)$$

Ortalama Boşluk Kesri [53] ($\varepsilon_{ortalama}$)

$$\varepsilon_{ortalama} = \frac{(\rho_{süspansiyon} - \rho_{partikül})}{(\rho_{gaz} - \rho_{partikül})} \quad (3.15)$$

Partikül Hızı (U_p) [m/s]

$$U_p = U_{gaz} - U_T \quad (3.16)$$

3.4. Dolaşım Akışkan Yatak İçin Boyutsuz Parametreler

Laboratuar ölçekli DAY ısı transfer deney ünitesinde yapılacak deneyler sırasında hesaplanacak boyutsuz parametrelerin, endüstriyel ölçekli sistemlerde aynı koşullarda deney yapılması durumunda, sonuçların taşınmasına ve benzeşim çalışmalarına katkısı olabilecektir.

Akışkan yatak hidrodinamiği yatak geometrisi ile, yatak özelliği ve yatakta etken olan kuvvetlerce tanımlanan boyutsuz parametrelerce belirlenir. Yani laboratuvar ölçekli test sistemi ile endüstriyel boyuttaki bir sistemde boyutsuz sayıların (Fr, Re, Ar, yoğunluk oranı, çap oranı, katı dolaşım oranı, hız oranı, basınç oranı vb.) birbirine eşit olması durumunda yatak içerisindeki bir partikülün akış özellikleri her iki yatakta da benzerdir denilebilir.

Çizelge 3.1’ de literatürde kullanılan boyutsuz parametreler gösterilmiştir. Buckingham-II yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi ekte verilmiştir.

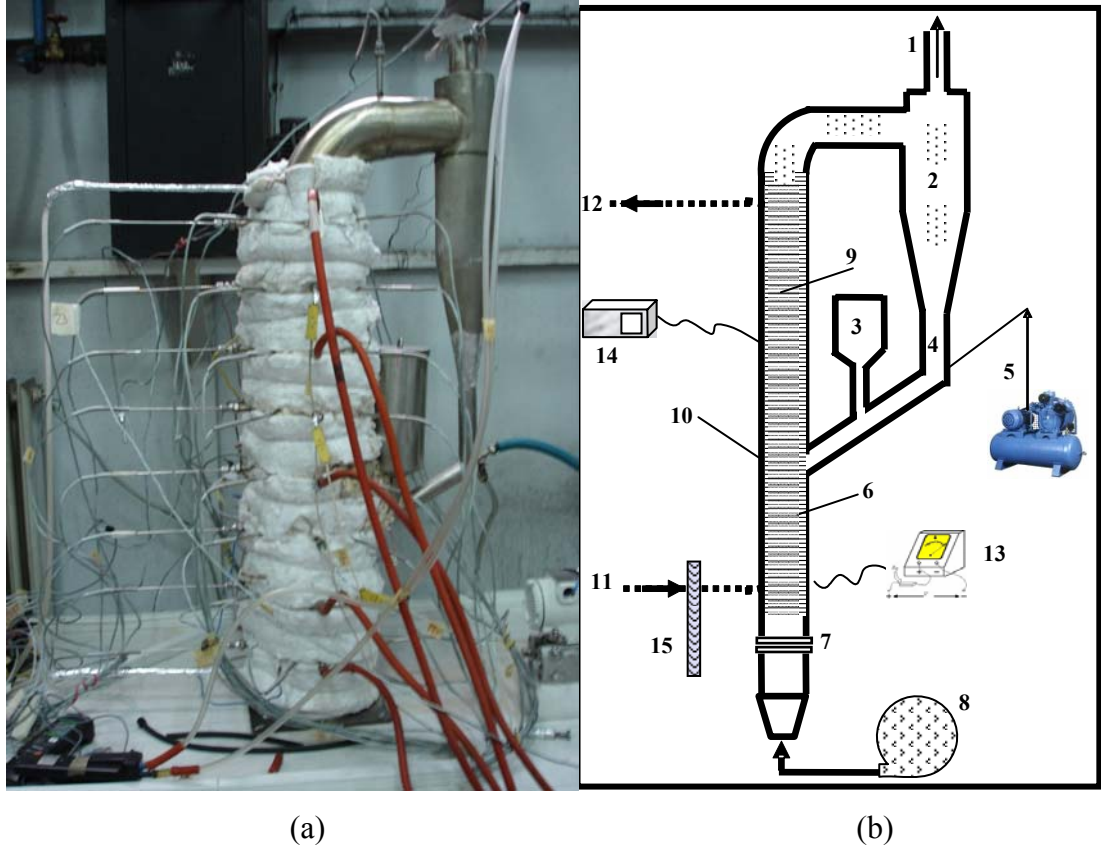
Çizelge 3.1. Akışkan yatak için literatürde çeşitli araştırmacılarca önerilen boyutsuz parametreler

Araştırmacı	Önerilen Boyutsuz Parametre
Griffith[56]	$\frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{\rho_{gaz} \cdot \rho_{partikül} \cdot D_{partikül}^3 \cdot g}{\mu_{gaz}^2}, \frac{D_{kolon}}{d}$ $\frac{G_s}{U_{gaz} \cdot \rho_{partikül}}, \frac{d \cdot g}{U_{gaz}^2}, \frac{U_{gaz}}{U_t}, \frac{P}{\rho_{partikül} \cdot g \cdot D}$ $d = \Phi^\alpha d_{partikül} \text{ (Hidrodinamik Çap)}, \alpha = 1$
Vego[57]	$\frac{d \cdot g}{U_{gaz}^2}, \frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{U_{gaz}}{U_t}, \frac{G_s}{U_{gaz} \cdot \rho_{partikül}}, \frac{L_{kolon}}{D_{kolon}}$
Kelkar [58]	$\frac{d \cdot g}{U_{gaz}^2}, \frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{U_{gaz}}{U_t}, \frac{G_s}{U_{gaz} \cdot \rho_{partikül}}, \frac{L_{kolon}}{D_{kolon}}$
Detamore [59]	$\frac{G_s}{U_{gaz} \cdot \rho_{partikül}}, \frac{d \cdot g}{U_{gaz}^2}, \frac{\rho_{gaz} \cdot \rho_{partikül} \cdot D_{partikül}^3 \cdot g}{\mu_{gaz}^2}, \frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{D_{kolon}}{d}, \frac{U_{gaz}}{U_{mf}}$
Chang[59]	$\frac{\rho_{gaz} \cdot \rho_{partikül} \cdot D_{partikül}^3 \cdot g}{\mu_{gaz}^2}, \frac{d \cdot g}{U_{gaz}^2}, \frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{D_{kolon}}{d}, \frac{G_s}{U_{gaz} \cdot \rho_{partikül}},$ $\frac{P}{\rho_{partikül} \cdot g \cdot d_{partikül} \cdot \phi}$
Roy [58]	$\frac{\rho_{gaz} \cdot U_{gaz} \cdot D_{partikül}}{\mu_{gaz}}, \frac{\rho_{partikül}}{\rho_{gaz}}, \frac{d \cdot g}{(U_{gaz} - U_{mf})^2}, \frac{D_{kolon}}{d}$

4.DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAKTA ISI TRANSFER ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

4.1. Deney ve Ölçme Sistemi

Kolon malzemesi olarak ısıya dayanıklı ve ısı transfer katsayısı yüksek paslanmaz çelik kullanılan, dağıtıcı elekten itibaren 0,9 m yüksekliğinde, 10 cm çapında ana kolona sahip deney sistemi (Şekil 4.1) ile, dolaşimli akışkan yatakta ısı transfer özellikleri ve etkili parametreler deneysel olarak incelenmiştir. Bölüm 4’de bahsedilen “Yenilenen küme modeli” ile elde edilen teorik ısı transfer hesapları, tasarımılanan test düzeneğinde yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Dolaşimli akışkan yatakta ısı transfer analizi deney sistemi

a) Deney sistem yapısı b) Deney sistemi şematik gösterimi

1-Egzoz 2-Siklon 3- Yatak besleme 4-Dönüş borusu 5-Kompresör (ikincil hava)

6- Elektrikli ısıtıcı 7-Dağıtıcı elek 8-Fan (birincil hava) 9-Bakır tüp 10-Ana kolon

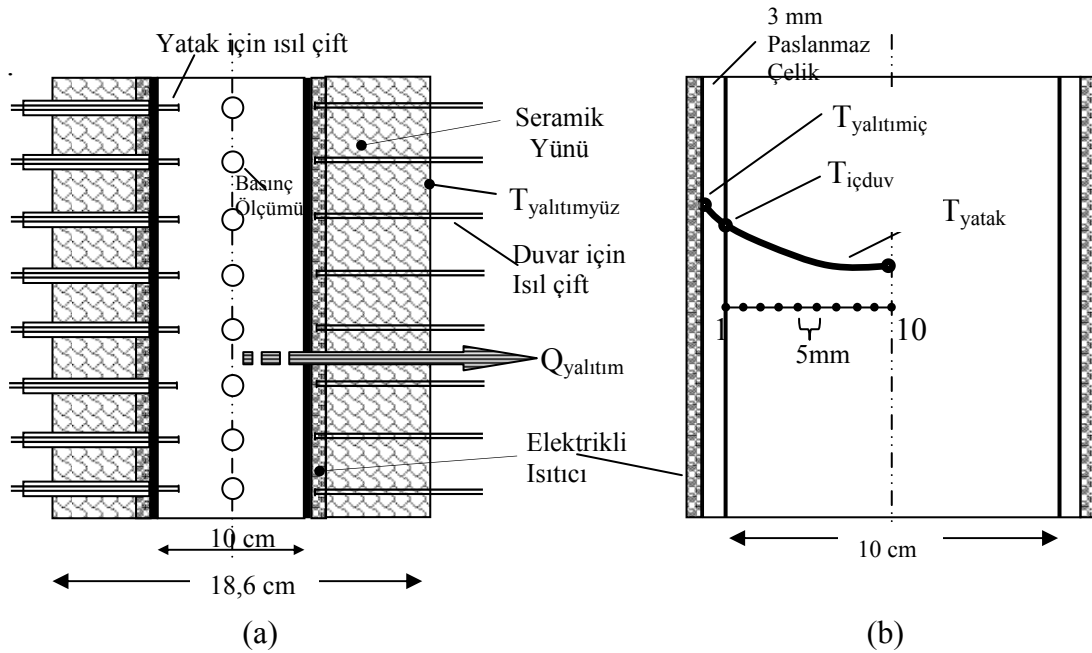
11-Su giriş 12-Su çıkış 13-Varyak 14-Veri kaydedici 15-Su debi ölçer

Isıtılmış yüzey-yatak arası ısı transfer analizi için, ana kolon boyunca hava dağıtıcısından itibaren aksel yönde, her 10 cm' de bir, doksan derece açı ile bir adet sıcaklık ölçmek için, bir adet de basınç ölçmek için $\frac{1}{2}$ " çapında 8'er adet ölçüm alma noktaları bulunmaktadır.

Resim 4.1'de görülen, NiCr-Ni - K tipi, 25 cm uzunluğundaki ısı çiftler ile radyal yönde yatak sıcaklık dağılımları, yatak merkezine doğru 5mm aralıklarla belirlenen noktalarda (toplam 10 noktada) incelenmiş (Şekil 4.2.b) ve her deneyde ana kolon da toplam 80 adet ölçüm değerinin ortalaması alınarak ortalama yatak sıcaklığı bulunmuştur.



Resim 4.1. Yatak sıcaklığı ölçümünde kullanılan ısı çift [67]



Şekil 4.2. Isıl çiftlerin yerleşimleri (a) ve radyal sıcaklık ölçüm noktaları (b) [67]

Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan ısı çiftler, DIN 43710, IEC 584 ve TS EN 60584 standartlarında olup, radyal yönde hareket için rekorlu ve gaz çıkışını engelleyecek biçimde özel olarak imal edilmişlerdir. Dünya ülkelerinde çeşitli standartlarda üretilen ısı çift telleri “Uluslararası Elektronik Komitesi” tarafından 1977 yılından beri sürdürülen çalışmalar sonunda tek standarda döndürülmüştür (IEC 584).

Yatak içersinde, duvar yüzey sıcaklığının (Şekil 4.2.b, $T_{içduv}$) bulunabilmesi için öncelikle, yalıtım yüzey sıcaklıkları Resim 4.2’de gösterilen Raynger infrared termometre ile ölçülmüş ve dış hava sıcaklığına göre yalıttımdan olan ısı kaybı hesaplanmıştır ($Q_{net} = Q_{ısıtıcı} - Q_{yalıtım}$). Dolaşımli akışkan yatak test sisteminde duvardan yatağa olan ısı transfer mekanizması ısı devresinin şematik gösterimi bölüm 4.2’de detaylı biçimde verilmiştir.

Her bir deneyde ana kolonda yalıtım yüzeyi üzerinde Raynger infrared termometre yardımıyla 32 ölçüm değeri alınarak (Resim 4.2) ortalama yalıtım sıcaklığı hesaplanmıştır.



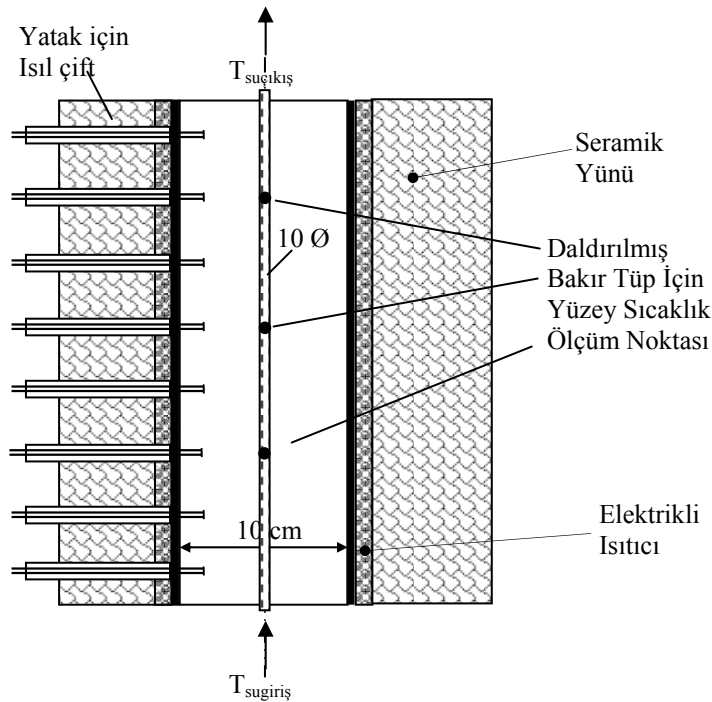
Resim 4.2. Raynger infrared termometre [67]

$T_{yalıtımcı}$ (yalıtım-ısıtılan duvar arası) sıcaklık ölçümü için ise, Resim 4.3’de gösterilen 10 cm uzunluğunda NiCr-Ni - K tipi ısı çift kullanılmıştır. Dış duvar (yalıtım-ısıtılan duvar arası) sıcaklıkları ölçülürken de, her bir deneyde ana kolon üzerinde 32 adet ölçüm alınmış ve bunların ortalaması hesaplanmıştır.



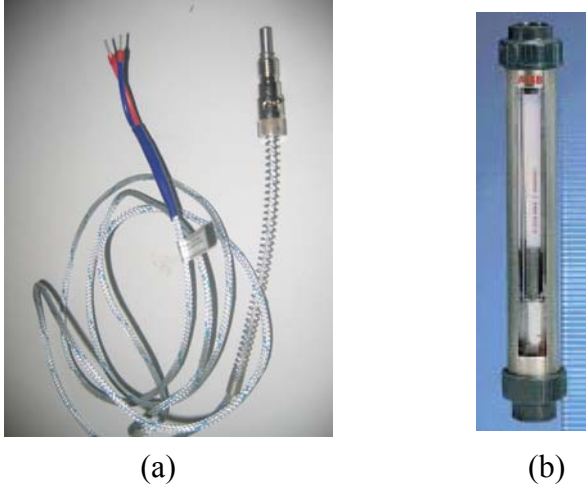
Resim 4.3. Duvar sıcaklıkları için kullanılan ısı çift [67]

Yatak – daldırılmış yüzey arası ısı transferi analizi için, kolon ekseni boyunca daldırılan 0,8 m boyunda ve 10 mm çapında bakır tüp kullanılmıştır. Tüp içersine giriş yapan soğuk su ve çıkıştaki sıcak su sıcaklıkları ile tüp yüzeyinde üç noktada ölçülen yüzey sıcaklıkları yardımıyla ısı transferi incelenmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3.Daldırılmış yüzeyin yatak içersindeki konumu [67]

Giren ve çıkan su sıcaklıklarının ölçümü için Resim 4.4'a da verilen ısı çift ve giren su debisini ölçmek içinde Resim 4.4.b'de gösterilen ABB debimetre (0-220 lt/h) kullanılmıştır.



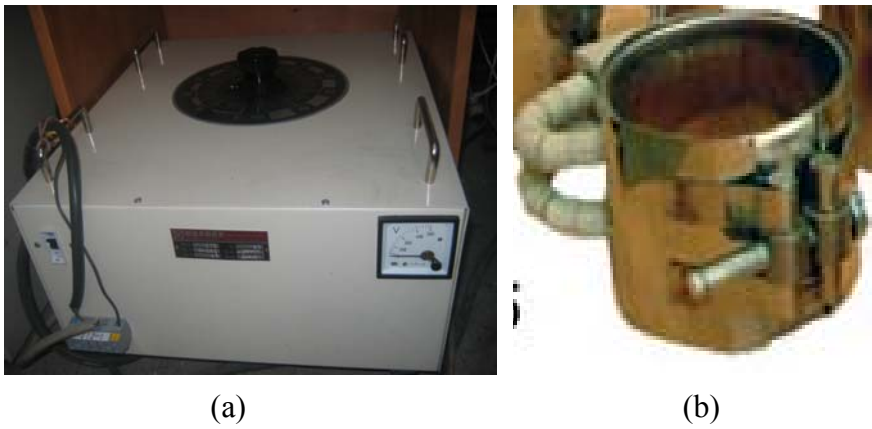
Resim 4.4. Su için kullanılan ısıl çift (a) ve debimetre (b) [67]

Yatak malzemesini akışkanlaştırmak amacıyla Resim 4.5.'de gösterilen fan (350 mmSS, 700 m³/h) ile sağlanan basınçlı hava, dağıtıcı elekten geçerek, ana kolona ulaşmaktadır. Hava daha sonra siklondan dışarı atmosfere verilirken, yatak malzemesi siklondan tekrar yatağa geri beslenmektedir. Fan devri ve frekans kontrolü için ise Hyundai İnvertör (3,5 kW) kullanılmıştır. Dönüş kolonunda tıkanmayı önlemek ve dolaşımın daha iyi sağlanması amacıyla, az miktarda ikincil bir havada kompresör yardımıyla sağlanmıştır.



Resim 4.5. Akışkanlaşma havasını sağlayan fan (a) ve invertör (b) [67]

Sistem üzerinde kelepçeli elektrikli ısıtıcı ($7 \times 740 + 2000$ W) montajı yapılan bölgelerin seramik yünü ile izolasyonu yapılmıştır. Ana kolona ilk girişteki bölgede ısıtıcı gücü, havanın ilk giriş bölgesi olması açısından 2000 W'lık olarak düşünülmüştür. Elektrikli ısıtıcı güç ayarı, değişken bir transformatör (varyak) ile kontrol edilebilmekte, çekilen voltaj değerleri voltmetre yardımı ile görülebilmektedir. Resim 4.6.'da ısıtıcı kontrolünü sağlayan 10 kVA'lık varyak ve kelepçeli elektrikli ısıtıcı gösterilmiştir.



Resim 4.6. Transformatör(a) ve kelepçe ısıtıcı(b) [67]

Yatak içersindeki sıcaklığın sabitlenmesi ve yatışkın (kararlı) halin sağlanması için, transformatör gücünü açıp-kapayacak Resim 4.7 a'da ki sayısal göstergeli kontrol cihazı (termostat), sıcaklık ve basınç değerlerinin okunması için de Resim 4.7. b'deki 64 kanallı data logger kullanılmıştır.



Resim 4.7. Sayısal göstergeli kontrol cihazı(a) ve data logger(b) [67]

Gaz hızı ölçümleri, pitot tüpü yardımıyla ASTM normunda “D3154-00 Standard Test Method for Average Velocity in a Duct” (Pitot Tube Method) ’a uygun TESTO 512 cihazı ile yapılmıştır(Resim 4.8.a). Bu cihaz yardımıyla basınç fark değerleri de okunabilmektedir. Baca çıkışındaki kesit üzerinde 10 noktada düz tip pitot tüpü (Furness Control) (Resim 4.8.b) yardımıyla yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak, ortalama gaz hızı hesap edilmiştir.



(a)



(b)

Resim 4.8. Hız ölçümünde kullanılan cihaz (a) ve pitot tüp (b) [67]

Yatak basınç değişimlerinin (statik basınç) ölçümü için kullanılan BRIGON 5200 basınç ölçer (0-100 mbar) ve ABB basınç transmitterler (0-50 mbar) Resim 4.9’de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Resim 4.9. Basınç ölçümünde kullanılan cihazlar [67]

Yatak Malzemesi ortalama çapı hesaplanırken, ASTM Normu (8inç) elek serisi kullanılarak (Resim 4.10) elek analizi yapılmış ve kümülatif yöntem uygulanmıştır.

Ayrıca 500 μm ' ye kadar olan partiküllerin ortalama çapı Resim 4.11'de görülen Malvern Mastersizer laser ölçüm cihazı yardımıyla bulunmuştur. Mie Teorisi ile çalışan bu cihaz, ışığın ortam içerisinde tane boyu etrafındaki hem kırılmasını hem de geçirgenliğini dikkate alır. Partikül ortalama çap hesabı için, partikül boyut dağılımını gösteren grafik ve değerler ekte verilmiştir.



Resim 4.10. ASTM normu elek serisi [67] Resim 4.11. Mastersizer laser cihazı [67]

4.2. Deney Programı

Isıtma yüzeyinden yatağa olan toplam ısı transferi; dolaşımli kümesel akım ve seyrek faz akımlarına taşınımli olan ısı transferi ile ısıtma yüzeyi ve bu iki akım arasındaki radyasyon ile ısı transferinin, sürtünme katsayısı üzerinden, bileşkesi olarak hesaplanmaktadır. “Yenilenen Küme Modeli” yardımıyla hesaplanan ısı transferinin, bir dolaşımli akışkan yatakta oluşan gerçek ısı transfer davranışını ne ölçüde belirlediğinin saptanabilmesi için bir deney düzeneğinde benzer koşullarda ölçümlerin yapılması, hesap ve deney sonuçlarının karşılaştırılması gerekir. Bu amaçla, Gazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği Bölümü ısı gücü laboratuvarında bulunan sıcak DAY test sisteminin 1/2 ölçeğinde bir benzeri olan DAY ısı transferi deney sistemi tasarımılanmış ve kurulmuştur (Bu çalışma GEÇER (Gazi Üniversitesi Enerji-Çevre Sistemleri ve Endüstriyel Rehabilitasyon Araştırma Merkezi)ve 06/2006-05 kodlu Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir).

Dolaşımli akışkan yatak ısı transfer test düzeneğinde,

- I. Isıtılmış yüzey – yatak arası ısı transfer analizi
- II. Yatak – daldırılmış yüzey arası ısı transfer analizi yapılacaktır. Bu analizler kapsamında;

- Yatak Malzemesinin
- Süspansiyon Yoğunluğunun
- Gaz Debisinin (M_H)
- Partikül Çapının (d_p)
- Yatak Sıcaklığının (T_y)
- Katı Dolaşım Oranının (G_s)
- Akışkanlaşma Bölgesinin (H_k)
- Yatak Basıncının (P_Y) ısı transferine etkileri incelenecektir.

Çizelge 4.1’de Deney programı ve deneylerle ilgili başlıca parametreler verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney programı ve ilgili deney setleri

Parametre Deney Seti*	Yatak Malzeme Türü	Partikül Çapı d_p [μm]	Ortalama Yatak Sıcaklığı ($^{\circ}C$)
1.	Silis Kumu	247	~55
2.	Silis Kumu	350	~55
3.	Silis Kumu	690	~55
4.	Çelik Tozu	279	~55
5.	Çelik Tozu	403	~55
6.	Çelik Tozu	615	~55
7.	Kum	284	~55
8.	Kum	390	~55
9.	Kum	677	~55
10.	Silis Kumu	247	~300
11.	Silis Kumu	350	~300
12.	Silis Kumu	690	~300
13.	Çelik Tozu	279	~300
14.	Çelik Tozu	403	~300
15.	Çelik Tozu	615	~300
16.	Bakır Tozu	299	~300
17.	Bakır Tozu	428	~300
18.	Bakır Tozu	612	~300
19.	Aliminyum Tozu	262	~300
20.	Aliminyum Tozu	432	~300
21.	Aliminyum Tozu	623	~300
22.	Kum	284	~300
23.	Kum	390	~300
24.	Kum	677	~300

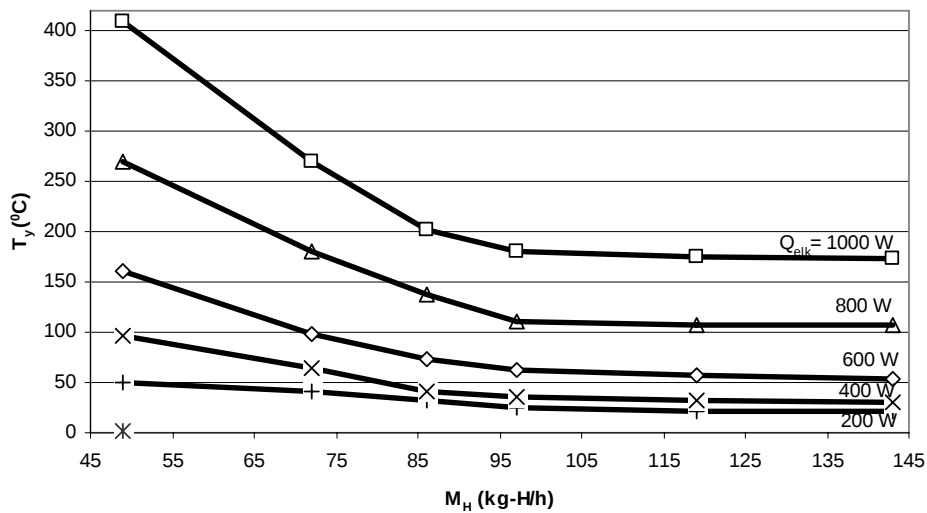
*Her bir deney seti altı alt deney grubundan oluşmaktadır.

Deney sisteminde dış yüzeyden verilen elektriksel ısının hangi oranda akışkan yatağa iletiltiğinin hesaplanması ile ilgili ısı analoji modeli ve ilgili eşitlikler Ek 7’de verilmiştir.

4.3. Deneysel Çalışmaların Yürütülmesi ile İlgili Ön Deneyler

Deneysel çalışmalar yatışkın (kararlı) dolaşimli yatak koşullarında yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce tasarımılanan test sisteminin yatışkın yatak koşullarının oluşturma özelliklerinin belirlenmesi, oluşabilecek aksaklıkların giderilmesi için sistemde ön testler yapılmıştır.

Sisteme tasarım aşamasında önce çubuk ısıtıcılar monte edilmiş, fakat verim elde edilememesinden dolayı kelepçeli ısıtıcılar ile değiştirilmiştir. Bu sayede sistemin yatışkın (kararlı) hale geçiş süresi kısalmıştır. Yatak çalışma koşullarının yatışkın hale gelmesinden sonra bir termostat sayesinde yatak sıcaklığı sabit tutulmaya çalışılmıştır. İlerki çalışmalarda da yardımcı olması açısından, ortalama yatak sıcaklığının hava debisi (M_H) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi belirlenmiştir (Şekil 4.4).

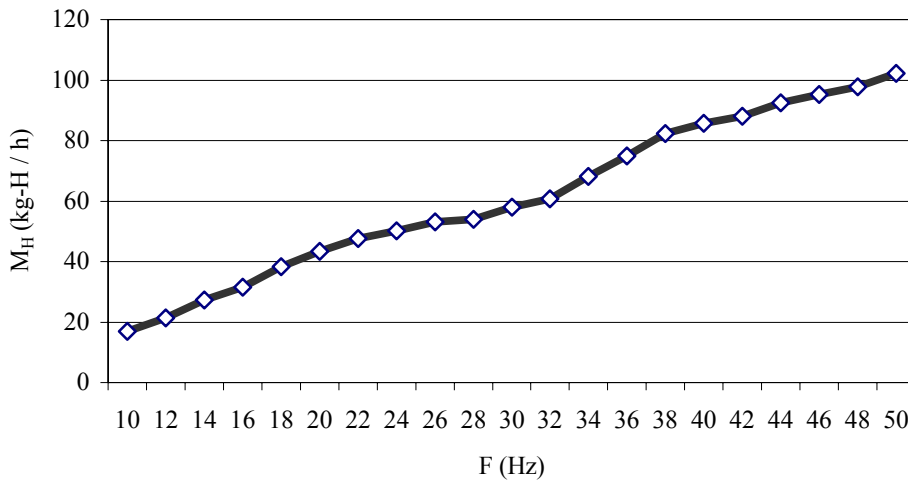


Şekil 4.4. Ortalama yatak sıcaklığının hava debisi (M_H) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi

Ön deneyler aşamasında, yatışkın halde yatak sıcaklığının 300 °C 'nin üzerinde olduğu deney koşullarında sistemdeki elektrikli ısıtıcılar yanmıştır. Literatürde de benzer sebeplerden dolayı bu tip deney sistemlerinde daha düşük sıcaklıklar uygulanmıştır. Bu nedenle yatak sıcaklığı ~300 °C yatışkın yatak koşulları ile sınırlandırılmıştır.

Dönüş kolonunda tıkanma olduğu tespit edilmiş, bu nedenle bu noktada dolaşımın sürekliliğinin sağlanması amacıyla, kompresör yardımıyla az miktarda ikincil bir ek hava beslemesi yapılmıştır. Baca çıkışında çok küçük (<100µm) partiküllerin yüksek hızlarda hava ile yatağı terk ettikleri görülmüş, bunun önlenmesi amacıyla baca çıkışına filtre takılmıştır.

İlk deneysel çalışmalarda birincil hava beslemesi için kompresör kullanılmış, havanın yetersiz kalmasından dolayı daha sonra 700 m³/h kapasitesindeki fan bağlantısı yapılmıştır. Fan hava debisinin (M_H) invertör frekansına (F) bağlı değişimi Şekil 4.5 'de gösterilmiştir.

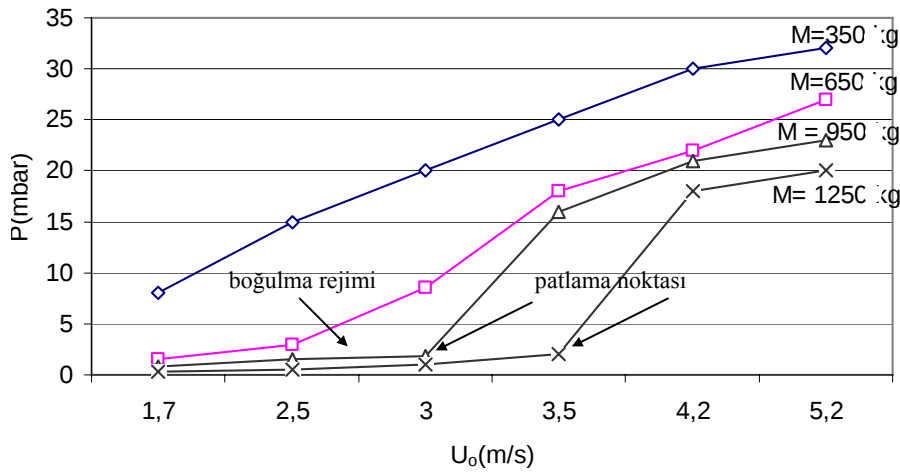


Şekil 4.5. Fan hava debisinin (M_H) invertör frekansına (F) bağlı değişimi

Buna ilave olarak, dağıtıcı elek altında bulunan ve havanın beslendiği ilk bölge olan giriş kısmı çapı, yetersiz hava sağlanması sebebiyle genişletilmiştir.

Fan çıkışına konulan kelebek vananın hava debisini sağlamada verimli olmamasından dolayı, fan devri ve frekansı invertör yardımıyla ayarlanmıştır.

Yatak malzeme miktarı ile yatak davranışının belirlenmesi amacıyla 350, 650, 950 ve 1250 gr kütleler için ön deneyler yapılmış ve yatağın davranışı incelenmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Ortalama yatak basıncının yatak kütle miktarı (M_Y) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (silis kumu, $247\mu\text{m}$)

Düşük yoğunluk oranına sahip silis kumu, kum ve alüminyum tozu ile 650 gr yatak malzemesinden daha fazla miktardaki deneylerde, değişen gaz hızına karşılık, basınç değeri önce yaklaşık olarak sabit kalmış (boğulma rejimi) ve daha sonra yatak birden patlayarak, akışkanlaşmaya çalışmıştır (Şekil 4.6).

Şekil 4.6'da değişen gaz hızlarında ve kütle miktarlarında ortalama yatak basınç değişimleri gösterilmiştir. Bu durum dolaşımli akışkan yatak için istenilen bir hal olmadığı için yatak malzemesi miktarı 650 gr olarak uygun görülmüştür. Aynı şekilde yüksek yoğunluk oranına sahip bakır ve çelik tozları için ise yatak malzemesi miktarı 400 gr olarak belirlenmiştir.

4.4. Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

Bölüm 4.2’de verilen deney programı (Bkz. Çizelge 4.1) uyarınca deneyler yapılmıştır. Yatak yatışkın rejime geçtiğinde, yatağa beslenen hava hızı yavaş yavaş artırılmaya başlanmış, sıcaklık düşümüne karşılık değişken transformatör yardımıyla yatak sıcaklığı sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Deneyler sırasında, eksenel yönde 8 noktada ve bu her bir noktada da radyal yönde 10’ar ölçüm yapılarak (toplam 80 ölçüm) ortalama yatak sıcaklığı bulunmuştur. Ayrıca II, IV ve VI. seviyelerinde basınç transmitterler yardımıyla basınç değerleri kaydedilmiştir. I. ve VIII. seviyeleri arasında da fark basınç transmitteri yardımıyla ΔP_{yatak} okunabilmiştir. Ana kolon üzerindeki eksenel yönde ölçüm noktalarının özellikleri Çizelge 4.2.’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Ana kolon üzerindeki eksenel yönde ölçüm noktalarının özellikleri

	I. Seviye	II. Seviye	III. Seviye	IV. Seviye	V. Seviye	VI. Seviye	VII. Seviye	VIII. Seviye
z (m)	0,11	0,21	0,31	0,41	0,51	0,61	0,71	0,81
z/H _k	0,135	0,260	0,383	0,5	0,630	0,753	0,876	1

Yalıtımdan olan ısı kaybının belirlenmesi amacıyla yalıtım yüzey sıcaklıkları (32 noktada) ölçülerek, ortalama yalıtım yüzey sıcaklığı hesaplanmıştır. Ortalama duvar sıcaklığı da ana kolon üzerinde 32 noktada alınan ölçümlerin ortalamasıdır.

Yatak-daldırılmış yüzey arası ısı transferi için ise yatak yatışkın rejime ulaştığında, 0,9 m uzunluğunda yatak eksenine daldırılan bakır tüp (Ø 0,1 m) yüzeyi üzerinde, değişen su debilerinde ve gaz hızlarında üç noktada sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Giren su ve çıkan su sıcaklıkları da ölçülerek ortalama yatak-daldırılmış yüzey arası ısı transfer katsayısı h_{DY} (W/m²K) hesaplanmıştır.

4.4.1. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transferi deney sonuçları

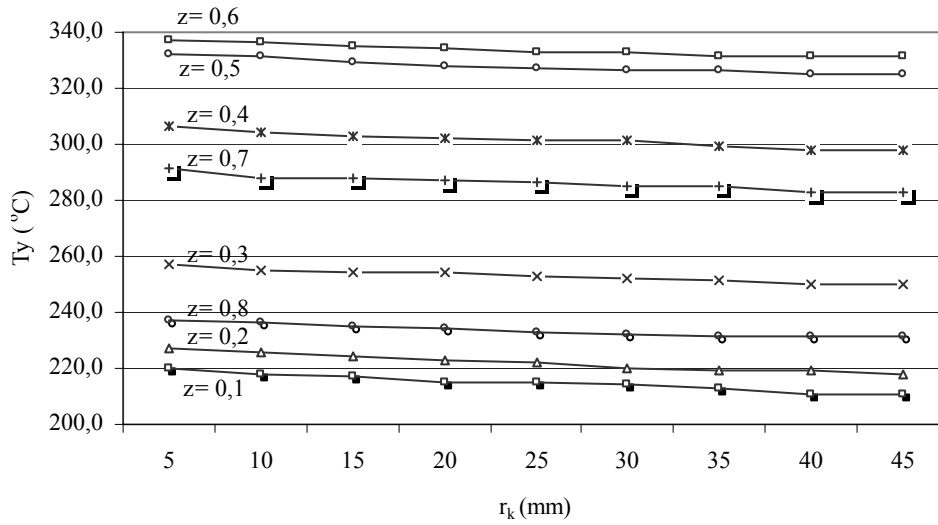
Deneyler sırasında 1-24 nolu deney setlerine (Bkz. Çizelge 4.1) uygulanan dolaşımli yatışkın akışkan yatak deney koşulları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Dolaşımli akışkan yatakla ilgili ortak deney koşulları

Deney Seti* Parametre	1,2,3	4,5,6	7,8,9	10,11,12	13,14,15	16,17,18	19,20,21	22,23,24
$\rho_p(\text{kg/m}^3)$	2400	7046	2100	2400	7046	8050	2600	2100
$\rho_g(\text{kg/m}^3)$	0,998	0,998	0,998	0,642	0,642	0,642	0,642	0,642
$\mu_g(\text{N.s/m}^2)$	2,075 E-05	2,075 E-05	2,075 E-05	2,848 E-05	2,848 E-05	2,848 E-05	2,848 E-05	2,848 E-05
$H_y(\text{m})$	0,061	0,026	0,065	0,064	0,026	0,025	0,062	0,065
$M(\text{kg})$	0,650	0,650	0,650	0,650	0,400	0,400	0,650	0,650
$R(\rho_p/\rho_g)$	2404	7060	2104	3738	10975	12538	4049	3271
$T_Y(^{\circ}\text{C})$	55	55	55	284	282	284	286	288

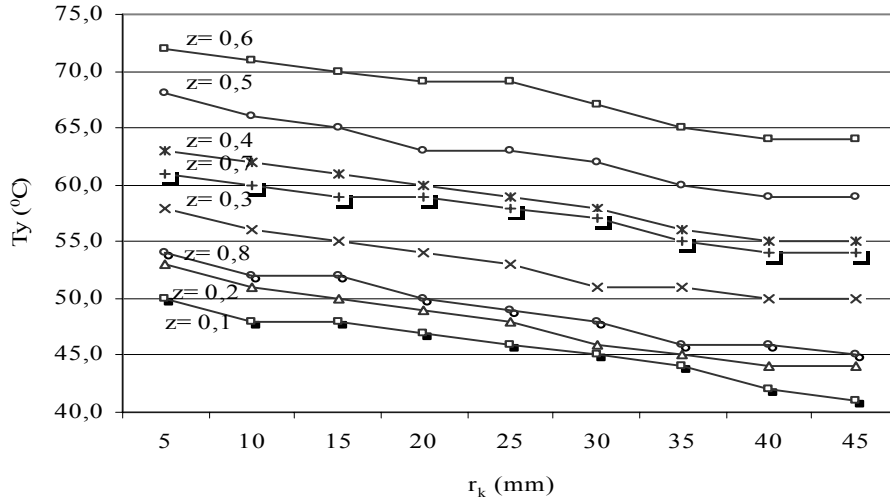
* Her bir deney seti altı alt deney grubunu içermektedir.

Yatışkın rejimde ortalama yatak sıcaklığının $\sim 300^{\circ}\text{C}$ olduğu koşullarda, I-VIII. seviyelerdeki yatak sıcaklık değerlerinin, yatak yüksekliği (z) ve kolon yarı çapı (r_k)'na göre değişimi Şekil 4.7 'de gösterilmiştir.



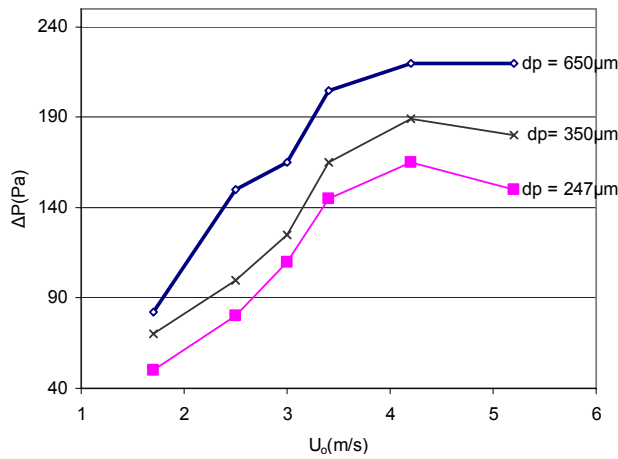
Şekil 4.7. Dıştan içe ortalama yatak sıcaklığının ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) radyal (r) ve eksenel (z) yönde değişimi ($\Delta T/\Delta r = 4 [^{\circ}\text{C}/\text{mm}]$)

Yatışkın rejimde ortalama yatak sıcaklığının $\sim 60^{\circ}\text{C}$ olduğu, I-VIII. seviyelerdeki yatak sıcaklık değerlerinin, yatak yüksekliği (z) ve kolon yarı çapı (r_k)'na göre değişimi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Sabit yatak sıcaklığı ve artan gaz hızına karşılık, 1-24 nolu deney setleri için dolaşımli akışkan yatakta hidrodinamik parametrelerdeki değişimler Ek 6'da verilmiştir.



Şekil 4.8.Dıştan içe ortalama yatak sıcaklığının ($\sim 60^\circ\text{C}$) radyal (r) ve eksenel (z) yönde değişimi ($\Delta T/\Delta r = 1 [^\circ\text{C}/\text{mm}]$)

Şekil 4.9’da akışkan yatakta basınç düşümünün gaz hızı ile değişimi gösterilmiştir. Akışkan yatakta dağıtıcı elekten yatağa ulaşan hava neticesinde, bir partiküle yerçekimi kuvveti, kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvveti etki etmektedir. Partiküller birbirleriyle temas halinde olduklarında partiküller arası etkileşim kuvveti de etkili olmaktadır.

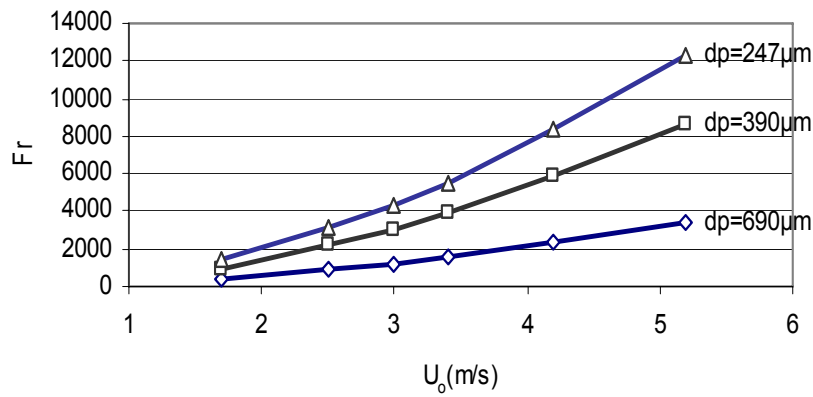


Şekil 4.9.En alt - en üst arasındaki toplam yatak basınç düşümü (ΔP) nün partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $M_Y = 650$ gr)

Şekil 4.9 incelendiğinde, partiküller arası etkileşim kuvveti karşısında ΔP ’nin yükseldiği görülmektedir. Gaz hızının artmasıyla, yatak içersindeki etkileşim kuvveti ortadan kalkmakta ve akışkan yatakta basınç kaybı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.

500 μm den daha küçük partiküller ile yapılan deneylerde yüksek gaz hızlarında, ΔP_{yatak} daki sabit değişim azalmaya dönüşmektedir (Bkz. Süspansiyon Yoğunluğunun Isı Transfer Katsayısına Etkisi).

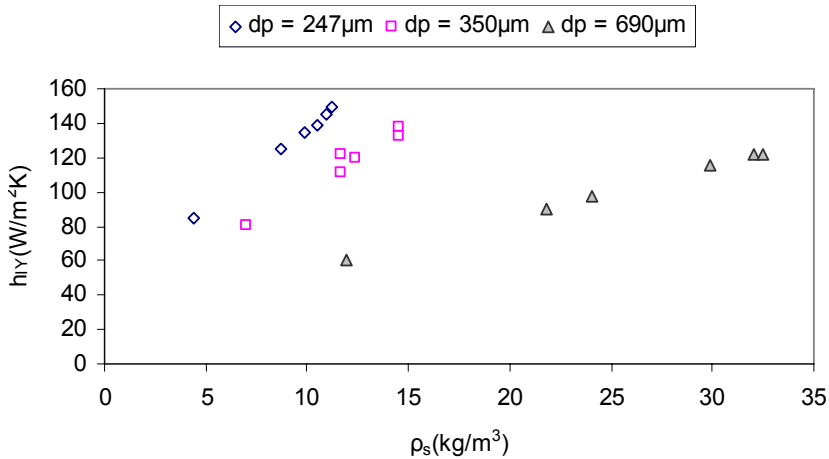
Gaz debisi (akışkanlaşma hızı) arttıkça froude sayısı ($Fr = U_0^2/g \cdot dp \cdot \Phi$) artmakta, yani yerçekimi kuvvetlerinin etkisi azalmaktadır. Şekil 4.10 'da gaz hızı ve partikül çapı ile Fr sayısının değişimi gösterilmiştir.



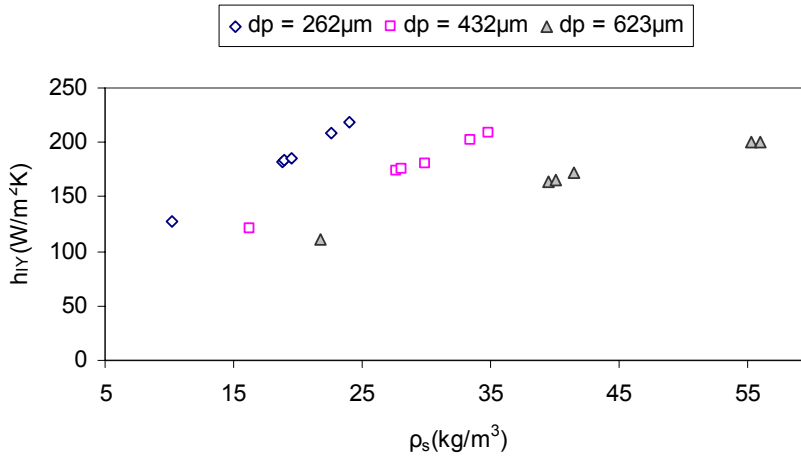
Şekil 4.10. Froude sayısının gaz hızı (U_0) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi

Süspansiyon yoğunluğunun (ρ_s) ısı transfer katsayısına etkisi

Deneyler sonucunda, dolaşımli akışkan yatakta süspansiyon yoğunluğunun ısı transferine etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.11- Şekil 4.15 arası süspansiyon yoğunluğunun ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (silis kumu, $T_y = 300^\circ\text{C}$)

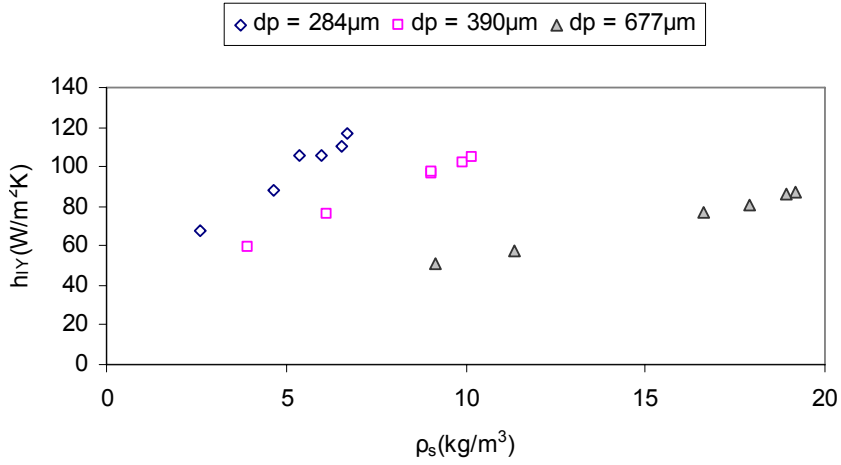


Şekil 4.12. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (alüminyum, $T_y = 300^\circ C$)

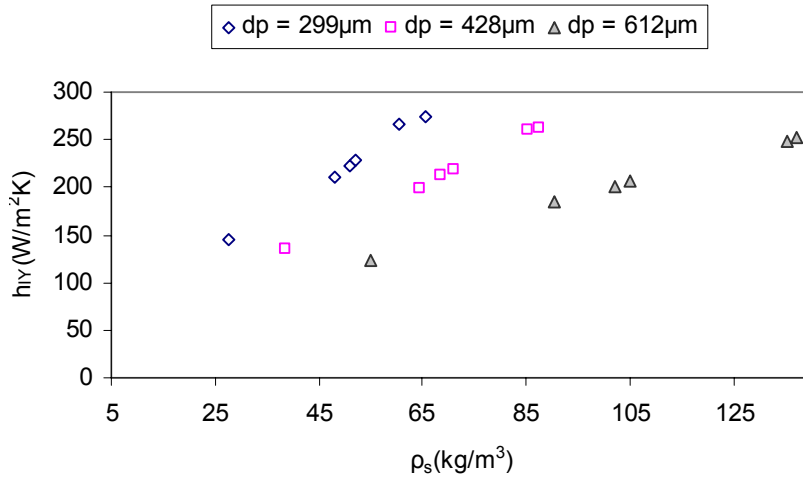
Süspansiyon yoğunluğu yani askısal yoğunluk (ρ_s), ana kolonun en alt ve en üst seviyesi arasındaki statik basınç düşümüne göre hesaplanmıştır. Isıtılmış duvar ile yatak arasındaki ısı transfer katsayısı, ısı transfer yüzeyindeki yenilenen partikül oranına bağlıdır.

Yatak içersinde oluşan kabarcıklar, yüzeyleri süpürerek, değişime ve yenilenmeye sebep olmaktadır. Kabarcıklar patladıkları sırada taşıdıkları tanecikleri balistik doğrultularında püskürtürler. Düşük süspansiyon yoğunluğunda gaz konveksiyonunun ortalama ısı transfer katsayısına katkısı büyük iken, yüksek süspansiyon yoğunluğunda ise partikül konveksiyonun katkısının daha büyük olduğu görülmüştür.

Süspansiyon yoğunluğu arttıkça duvar (ısıtma yüzeyi) çevresindeki partikül konsantrasyonu artmaktadır. Bunun sonucunda, ilave partiküller ile ısıtma yüzeyinden merkeze daha çok enerji taşınmakta, daha çok partikül ısıtma yüzeyi ile ilettime geçmekte ve böylece toplam ısı transferi de artmaktadır. Bu artışın başka bir nedeni de katıların ısıl kapasitesinin gazdan daha yüksek oluşudur.

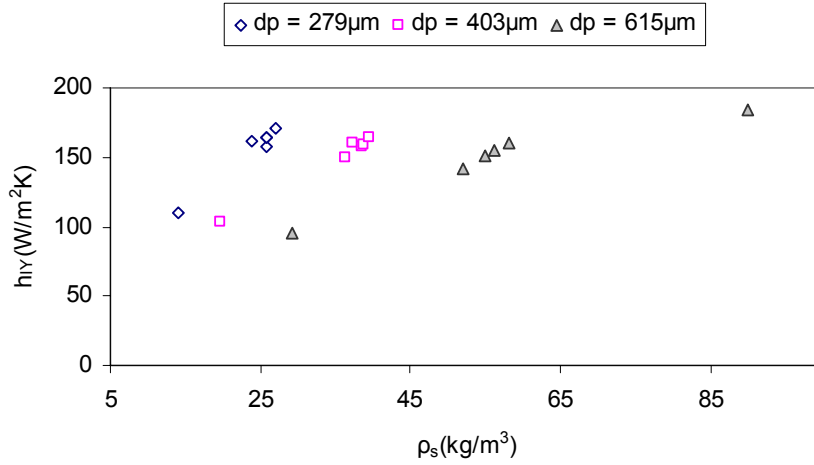


Şekil 4.13. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (kum, $T_y = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Şekil 4.14. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (bakır tozu, $T_y = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

500 μm den daha büyük partiküller ile yapılan deneyler sırasında terminal hızın üstünde, bir noktadan sonra süspansiyon yoğunluğu değişmemekte ve ısı transfer katsayısı yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. 500 μm den daha küçük partiküller ile yapılan deneylerde yüksek gaz hızlarında, ortalama ısı transfer katsayısındaki sabite yakın olan değişim, ΔP_{yatak} da azalma yani süspansiyon yoğunluğundaki azalma ile beraber düşüşe geçmektedir.



Şekil 4.15. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının süspansiyon yoğunluğu (ρ_s) ve partikül çapı (d_p) ile değişimi (çelik tozu, $T_y = 300^\circ C$)

Bunun sebebi; gaz debisinin (akışkanlaşma hızının) artışı sırasında önce küçük partiküller sonra büyük partiküller yatağı terk etmektedir. Yani küçük partiküllerin yatak (ısıtılmış yüzey ile çevrili ana kolon) içersindeki yolculuğu akışkanlaşma hızının artması ile daha kısa sürmektedir. Özellikle yatak içersindeki hızlı çarpışmalar neticesinde partikül boyutundaki küçülmeler (Çizelge 4.4.) sonucu (elutriation - carry over); küçük partiküllerin çok yüksek gaz hızlarında (>5 m/s,) yatağı çabuk terk etmesi ile, ısıtma yüzeyi ile temas eden çeper akım içersindeki aşağı akışlı partikül kümesi oranı azalmakta, bunun yerine yatak dışına taşınan yukarı akışlı partikül miktarı artmakta ve partiküller ısı transferi için ısıtma yüzeyi ile yeterli temas zamanını bulamamaktadır.

Çizelge 4.4 Yatak malzemesi boyut dağılımındaki değişiklik(silis kumu)

Ortalama d_p Aralığı (μm)	Deney Öncesi Kütle Kesri (%)	Deney Sonrası Kütle Kesri (%)
79	6,15	10
127	2,30	1,5
199	4,15	3,83
375	10,46	13,83
545	76,92	70,83

Çizelge 4.4 incelendiğinde, silis kumu için, deneyin bitiminden sonra yapılan elek analizi sonuçları ile başlangıçta yapılan elek analizi sonuçlarının farklı olduğu görülmektedir. Ortalama $d_p = 79 \mu m$ için % kütle kesri oranı %6,15 ten % 10'a çıkmış

ve ortalama partikül boyutu $350\mu\text{m}$ 'den $308\mu\text{m}$ 'ye düşmüştür. Toplam yatak malzemesi miktarı da, malzemedeki ufalanma sonucu bacadan kaçan miktar ile, yaklaşık % 7,7 oranında azalmıştır. Bunun sonucu olarak ta ısı transfer katsayısında düşüş olmaktadır. Sonuç olarak dolaşımli akışkan yatakta kullanılan malzemenin partikül boyut dağılımı ve seçilecek olan akışkanlaşma hızı çok önemlidir. Bu iki parametre içinde optimumun sağlanması şarttır.

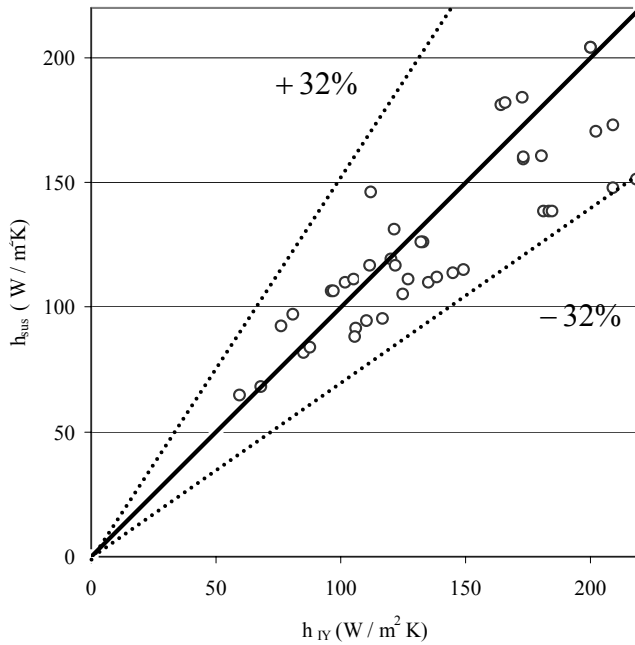
Literatürde de dolaşımli akışkan yatak için oluşturulan korelasyonlar incelendiğinde, süspansiyon yoğunluğuna bağlı oluşturulan korelasyonların sayısı daha fazladır ve bu korelasyonlar diğer parametrelere göre sistemi daha iyi tanımlamaktadır. Çizelge 4.5'de literatürdeki korelasyonlar verilmiştir.

Çizelge 4.5. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyonların karşılaştırılması

Araştırmacı	Korelasyon($\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$)
Anderson ve Leckner(1992)	$h = 30\rho_{sus}^{0,5}$
Golriz ve Sunden (1994)	$h = 88 + 9,45\rho_{sus}^{0,5}$
Divilio ve Boyd (1994)	$h = 23,2\rho_{sus}^{0,55}$
Anderson (1996)	$h = 70\rho_{sus}^{0,085}$, $h = 58\rho_{sus}^{0,085}$
Basu ve Nag (1996)	$h = 40\rho_{sus}^{0,5}$
Breitholtz (2000)	$h = 110\rho_{sus}^{0,21}$
Baskakov (2001)	$h = 85\rho_{sus}^{0,3}$
Xie (2001)	$h = 111\ln \rho_{sus} - 221$
Dutta (2002)	$h = 25\rho_{sus}^{0,58}$
Bu çalışma	$h = 48\rho_{sus}^{0,36}$ ($R < 10.000$)
	$h = 81\rho_{sus}^{0,22}$ ($R > 10.000$)

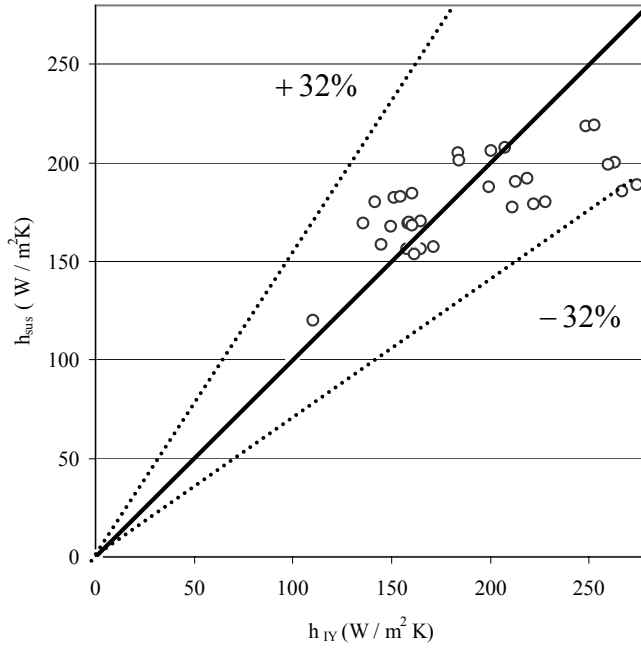
Bu çalışma için, süspansiyon yoğunluğuna bağlı olarak oluşturulan korelasyon denklemleri yoğunluk oranı $R(\rho_p/\rho_g) < 10.000$ için $h = 48\rho_{sus}^{0,36}$ (denklemin açıklayıcılık yüzdesi veya belirleyicilik gücü olan belirtme katsayısı $R^2 = 0,88$) ve $R(\rho_p/\rho_g) > 10.000$ için ise $h = 81\rho_{sus}^{0,2022}$ ($R^2 = 0,81$) olarak bulunmuştur.

Dataların beraber değerlendirilmesi sonucu ise $R^2 = 0,69$ seviyesine düşmüş, korelasyon belirleyicilik gücü azalmıştır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de elde edilen korelasyona göre hesaplanan ortalama ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyon denklemi ile elde edilen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması ($R < 10.000$)

Bu tip bir korelasyon denklemi bir bağımlı değişkene karşılık, sadece tek bir bağımsız değişken içerdiği için başarı oranı düşük çıkmıştır ($sapma(hata) \approx \pm 32\%$). Bölüm 6’da “yenilene küme modeli” nin modifiyesi sonucu sistem için ısı transfer katsayısını belirleme oranı çok daha iyi elde edilmiştir.



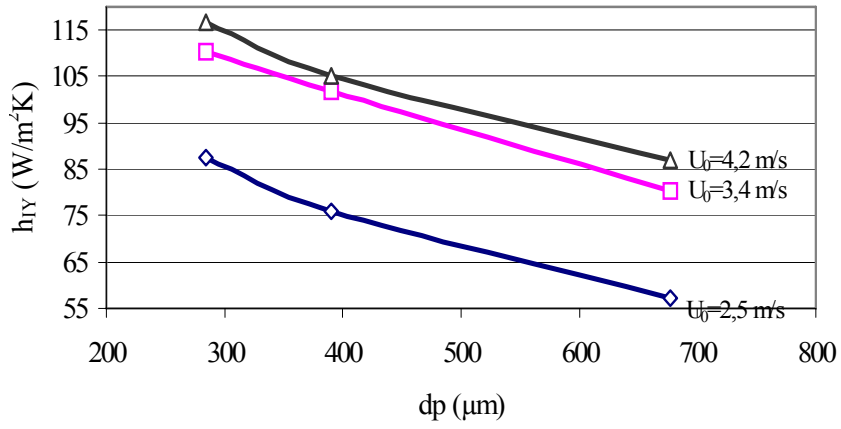
Şekil 4.17. Süspansiyon yoğunluğuna bağlı korelasyon denklemi ile elde edilen ısı transfer katsayılarının karşılaştırılması ($R > 10.000$)

Partikül çapının (d_p) ısı transfer katsayısına etkisi

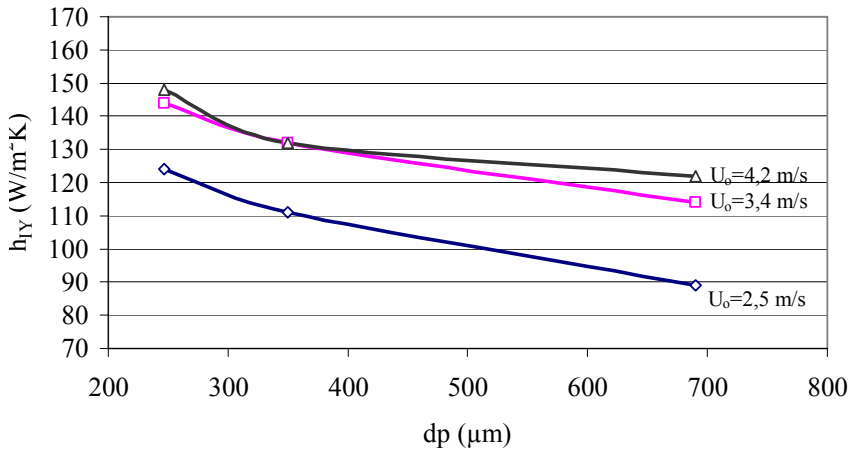
Dolaşımli akışkan yatakta ortalama partikül çapı azaldıkça ısı transferi de artmaktadır. Şekil 4.18 - Şekil 4.21 arasında partikül çapının ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir.

Süspansiyon ile ısıtma yüzeyi arasındaki gaz tabakasının ısı direnci tabakanın kalınlığına bağlıdır ki, bu da dolayısıyla gaz içersine karışan partikül parçacıklarının büyüklüğüne bağlıdır. Çünkü daha ufak partiküller gaz içersinde daha iyi bir karışım oluşturmakta, partikül kümeleri ile ısıtma yüzeyi arasındaki iletim için gerekli olan mesafe kısalmakta, yani gaz tabakası incelmekte ve bunun sonucunda termal iletim direnci azalarak, ısı transfer oranı daha yüksek olmaktadır.

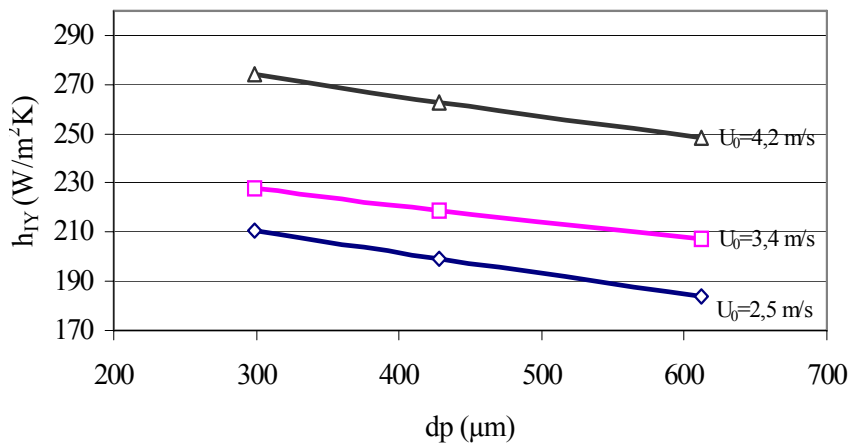
Ayrıca daha küçük partiküller daha büyük toplam yüzey alanlarına sahip olduğundan partiküller ile gaz arasındaki taşınım ile ısı transferi artmaktadır. İkinci olarak partikül çapı küçüldükçe ortalama katı hacim kesri ve ısı transfer alanını kaplayan partikül miktarı da artmaktadır.



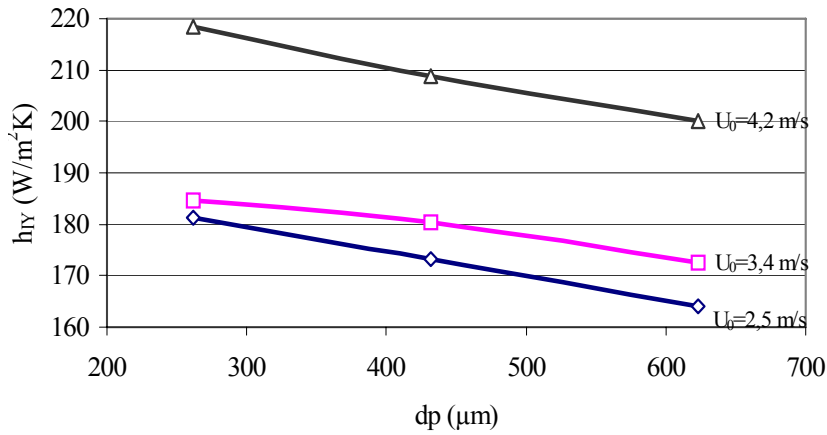
Şekil 4.18. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı(d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (kum, $T_y = 300$ °C)



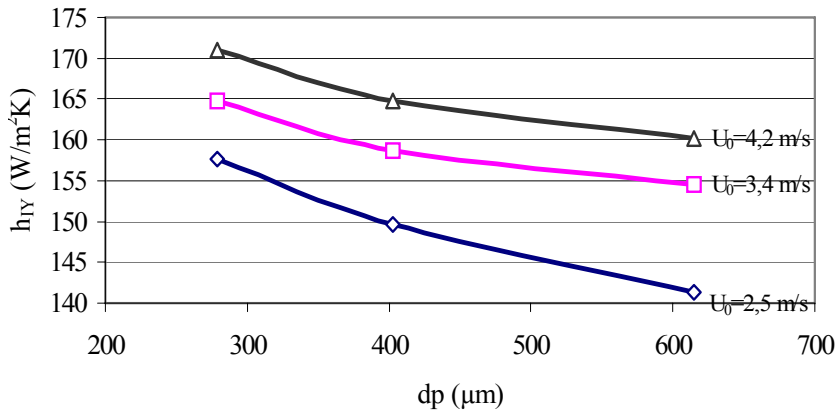
Şekil 4.19. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı(d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (silis kumu, $T_y = 300$ °C)



Şekil 4.20. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı(d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (bakır tozu, $T_y = 300$ °C)



Şekil 4.21. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı(d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (alüminyum tozu, $T_y = 300$ °C)



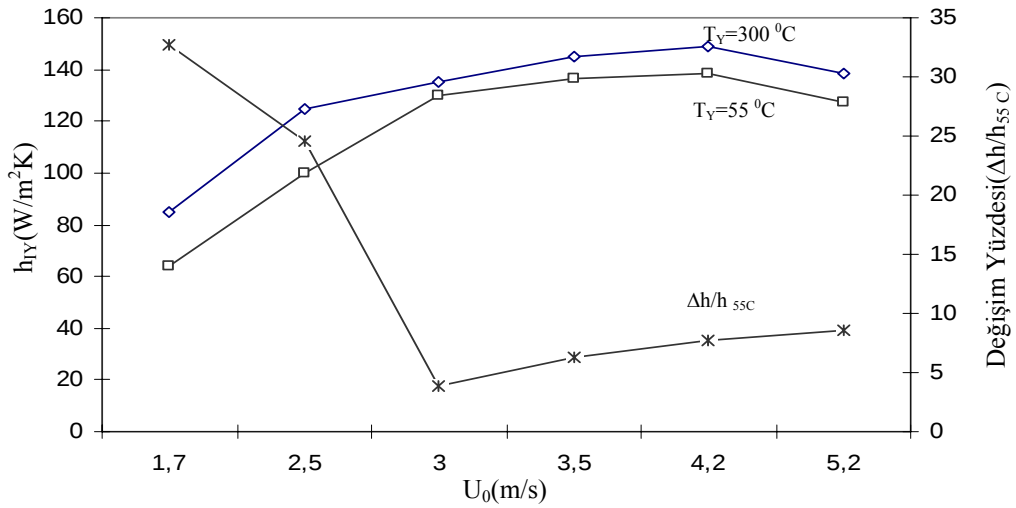
Şekil 4.22. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının partikül çapı(d_p) ve gaz hızı (U_o) ile değişimi (çelik tozu, $T_y = 300$ °C)

Küçük partiküllerin daha büyük toplam yüzey alanlarına sahip olması partiküller ile ısıtma yüzeyi arasındaki ısı transfer kapasitesinin büyümesini sağlamakta, böylece partiküller ile gaz arasındaki ısı transferi de artmaktadır. Partikül çapı küçüldükçe ortalama ısı transfer alanını kaplayan partikül miktarının artması da ısıtma yüzeyinden yatak merkezine enerji taşınma oranının artmasını sağlamaktadır.

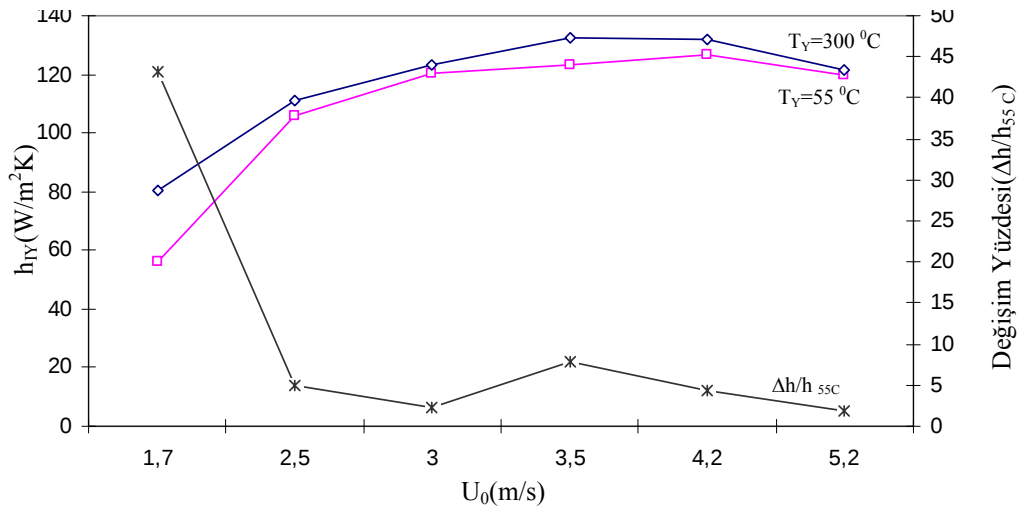
Partikül çapının etkisi kısa ısı transfer yüzeylerinde daha fazladır. Duvara paralel olarak hareket eden partiküller, uzun ısıtma yüzeyleri (ısı transfer yüzeyleri) boyunca yüzey sıcaklığına eşitlenmek için yeterli zamanı bulabilmekte ve gaz tabakasındaki iletim ile ısı transferinin önemi azalmaktadır. Böylelikle uzun ısıtma yüzeylerinde partikül boyutunun ısı transferine etkisi daha azdır [8].

Yatak sıcaklığının (T_y) ısı transfer katsayısına etkisi

Yükselen ve artan kabarcıkların oluşturduğu partikül sirkülasyonu nedeniyle akışkan yatak çok iyi karışmaktadır. Büyük ısı transfer alanı sebebiyle gaz ve partiküller aynı sıcaklığa yani ısı dengeye çabuk gelirler. Yatak kütlesi incelendiğinde pratikte eşit sıcaklık dağılımı görülmektedir. Deney sonuçları incelendiğinde eksenel ve radyal yönde sıcaklık dağılımlarında büyük farklar görülmemektedir. Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25’de yatak sıcaklığının ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir.

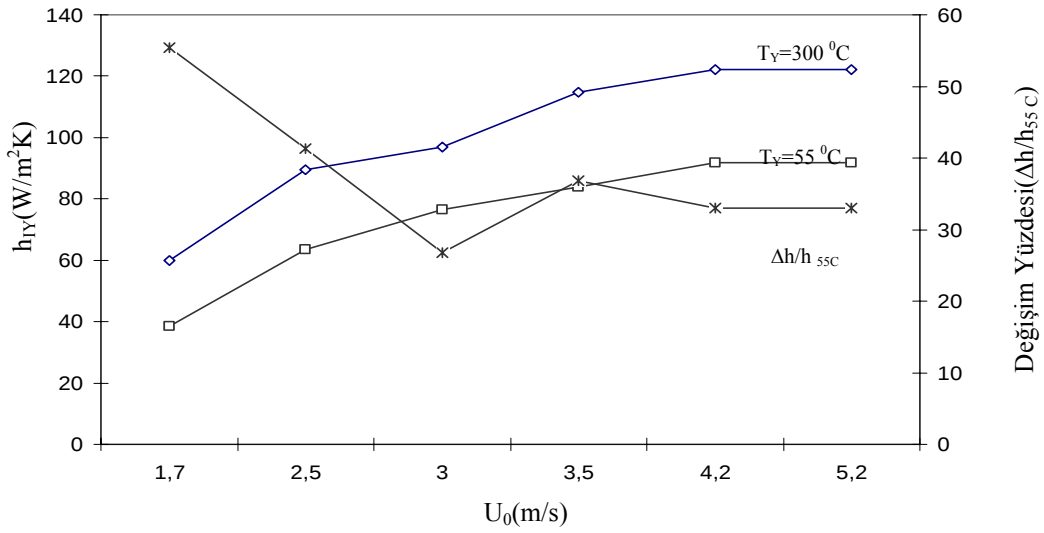


Şekil 4.23. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak sıcaklığı (T_y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=247 \mu\text{m}$)



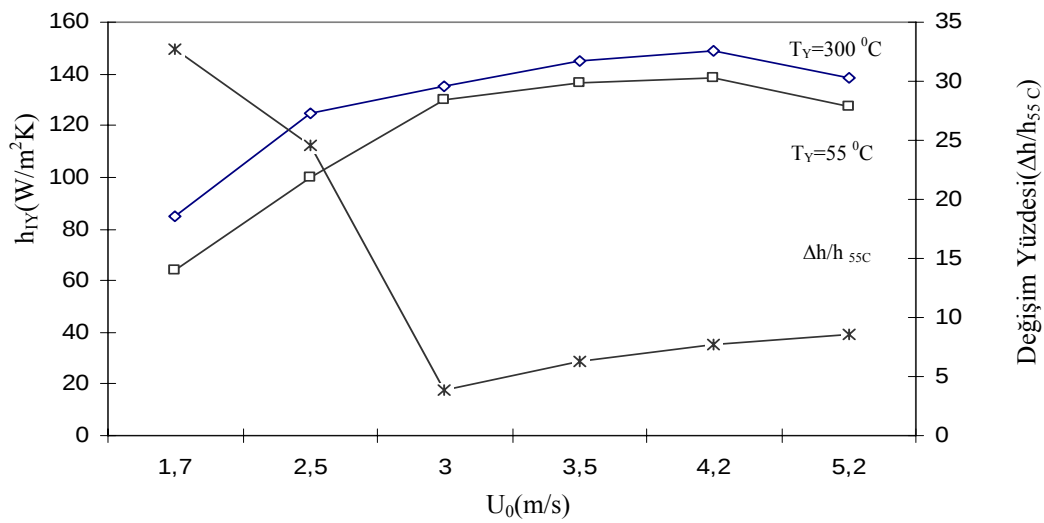
Şekil 4.24. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak Sıcaklığı (T_y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=350 \mu\text{m}$)

Şekil 4.25 incelendiğinde maksimum partikül çapı olan $d_p=690\mu\text{m}$ çapındaki silis kumu için, yatak sıcaklığının artması ile gerçekleşen ısı transfer katsayısındaki değişim küçük çaplara göre daha fazla olmuştur.



Şekil 4.25. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak sıcaklığı (T_Y) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=690\text{ }\mu\text{m}$)

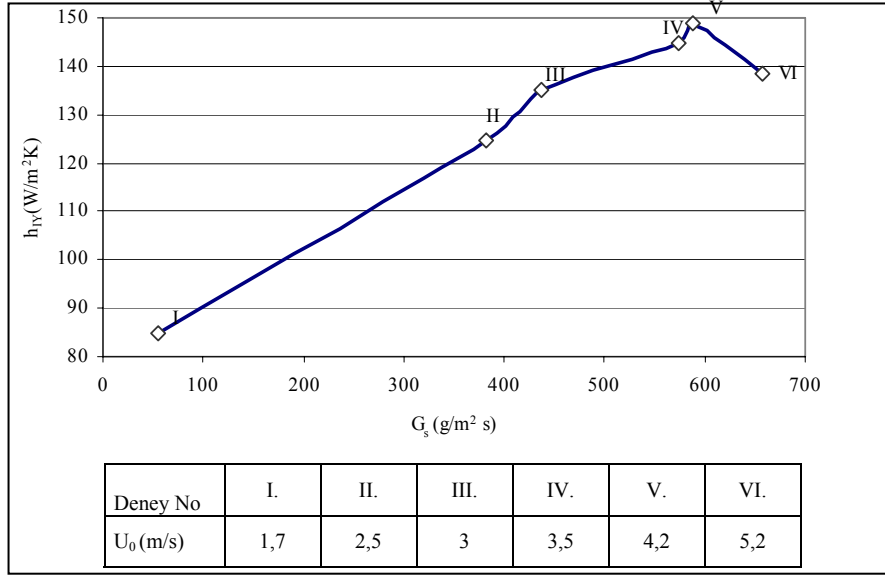
Yatak sıcaklığının artması ortalama ısı transfer katsayısını da arttırmaktadır. Şekil 4.26 da sıcaklıkla havanın ısı iletim katsayısındaki değişim gösterilmiştir.



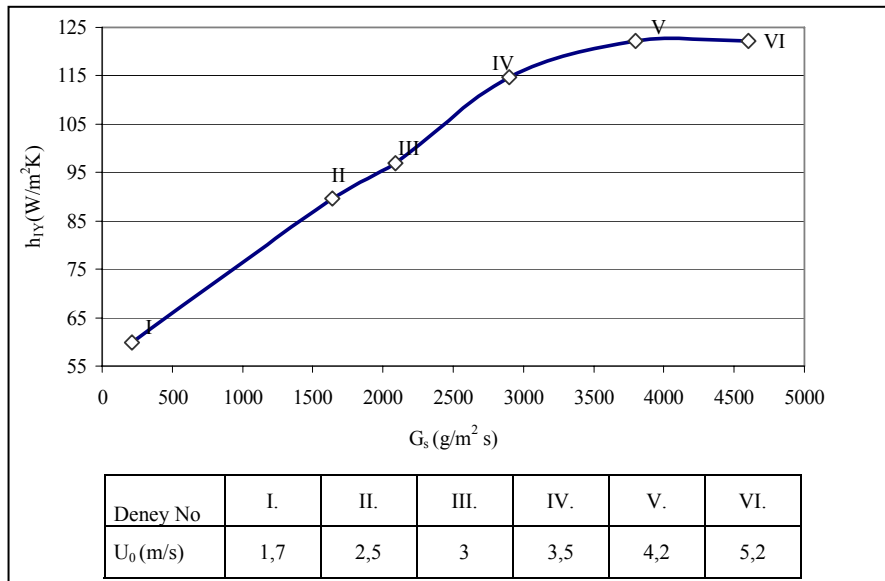
Şekil 4.26. Sıcaklıkla havanın ısı iletim katsayısının değişimi

Katı dolaşım oranının (G_s) ısı transfer katsayısına etkisi

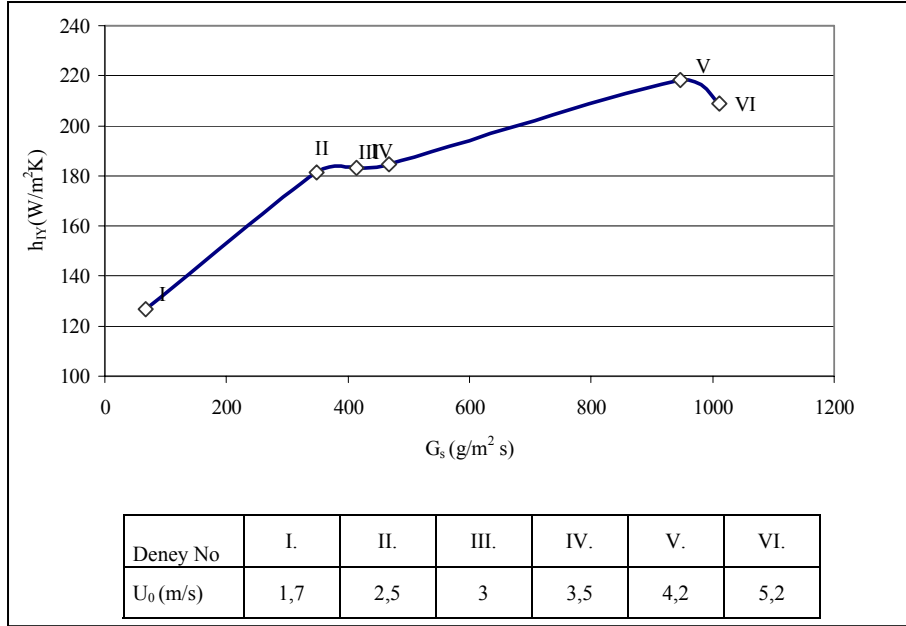
Katı dolaşım oranının ortalama ısı transfer katsayısına etkisi Şekil 4.27 ile Şekil 4.32 arasında gösterilmiştir.



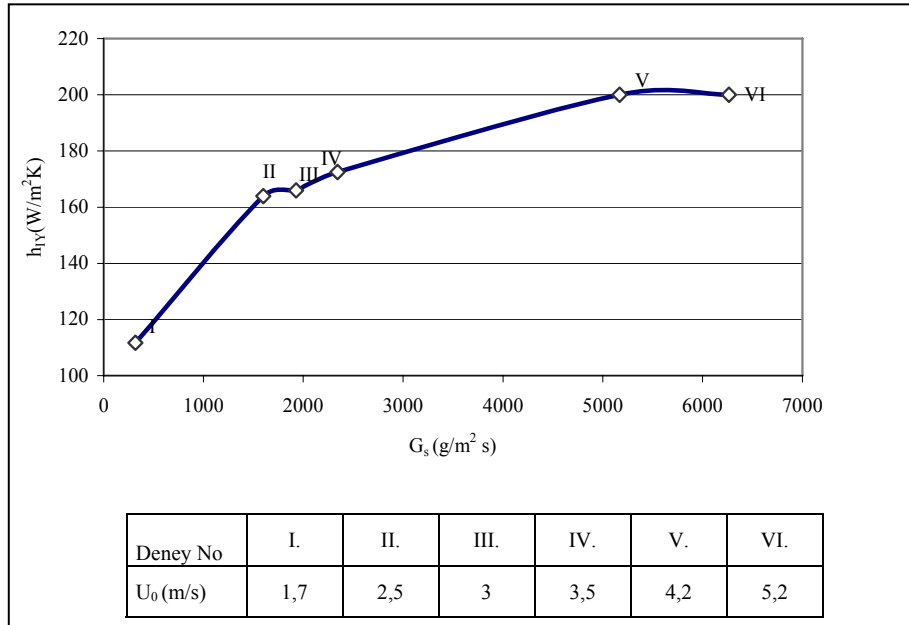
Şekil 4.27. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=247 \mu m$)



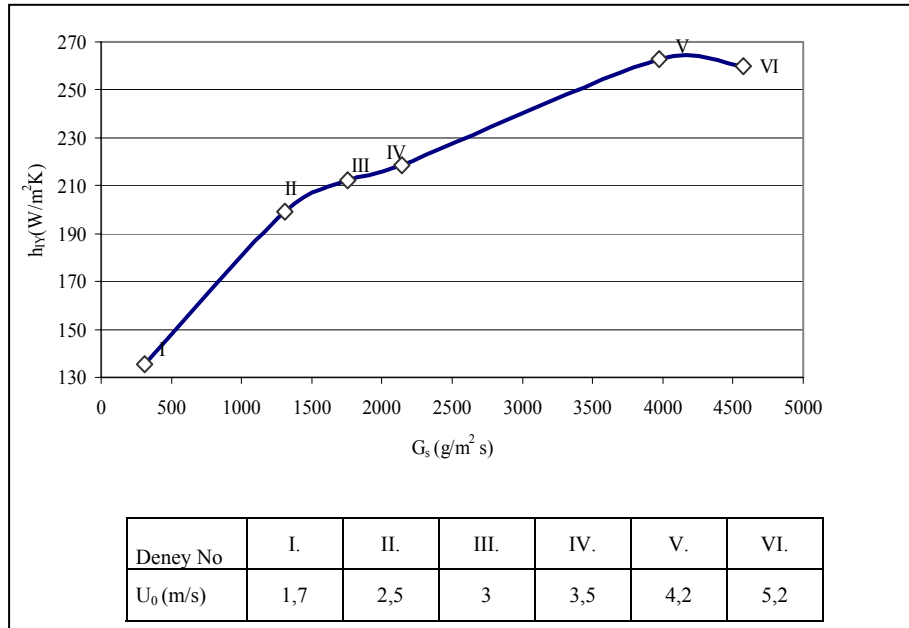
Şekil 4.28. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=690 \mu m$)



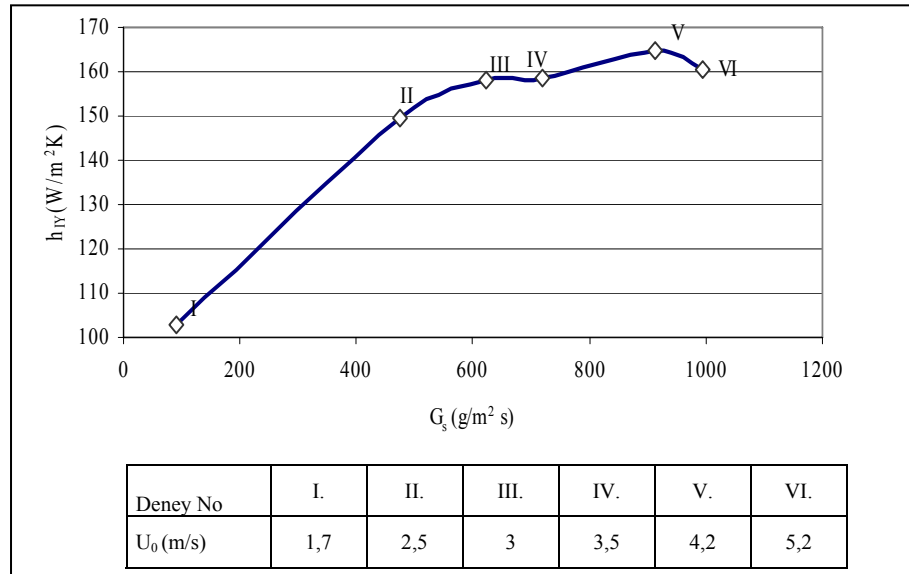
Şekil 4.29. Isıtma Yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (alüminyum tozu, $d_p=262 \mu m$)



Şekil 4.30. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (alüminyum tozu, $d_p=623 \mu m$)



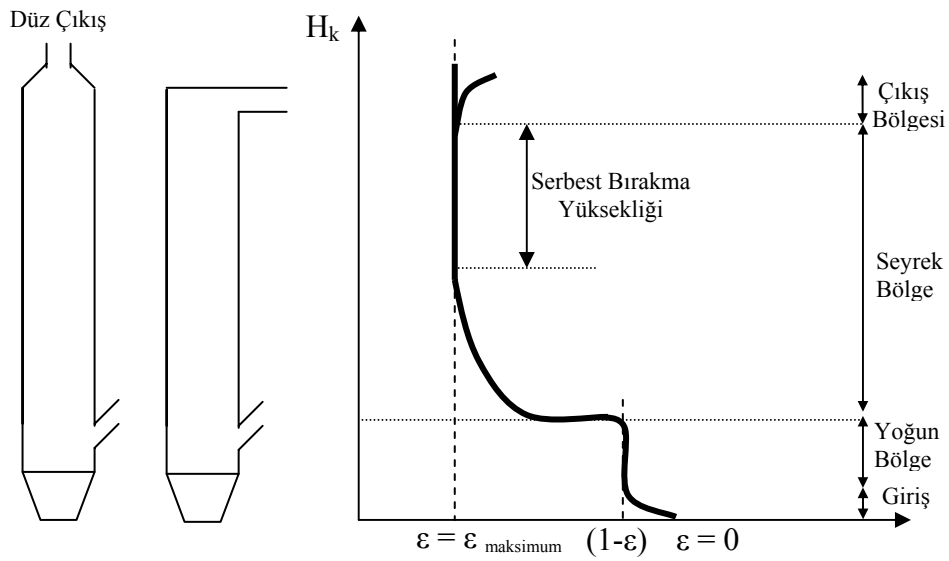
Şekil 4.31. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (bakır, $d_p=428 \mu\text{m}$)



Şekil 4.32. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının katı dolaşım oranı (G_s) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (Çelik, $d_p=403 \mu\text{m}$)

Akışkanlaşma Bölgesinin Isı Transfer Katsayısına Etkisi

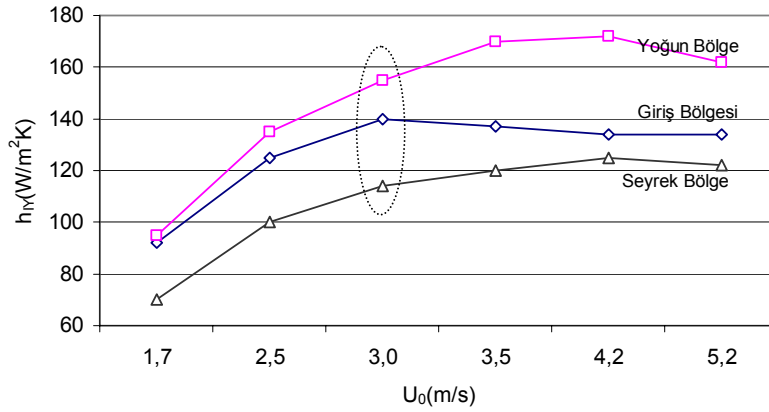
Akışkanlaşma bölgesinin ısı transferine etkisinin incelenmesi amacıyla; kaldırma kuvvetinin baskın olduğu giriş bölgesinde, yoğun yatak rejim bölgesinde ve en üstte de çıkış bölgesine yakın seyrek yatak rejim bölgesinde ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır. Seyrek faz akımı, düşük konsantrasyonlarda partiküller içermektedir. Dolaşımli akışkan yatakta eksenel profil değişimi Şekil 4.33 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Dolaşımli akışkan yatakta çalışma bölgesinde ($0 < \epsilon < \epsilon_{\text{maksimum}}$) boşluk oranı (ϵ) ve katı hacim oranı ($1 - \epsilon$) nın değişimi

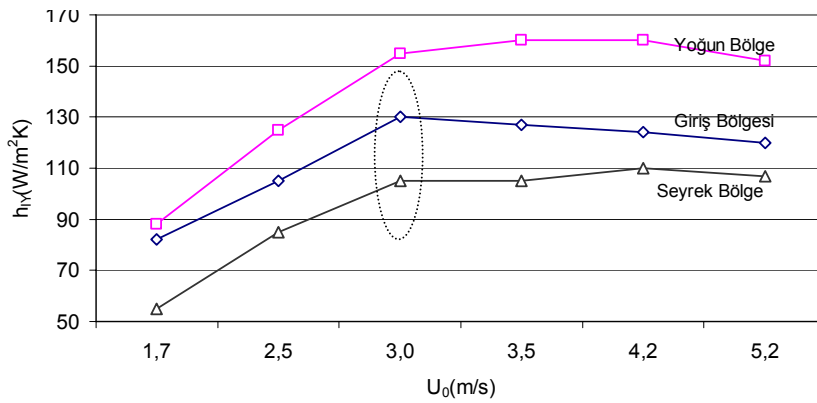
Şekil 4.33. incelendiğinde, kolon yüksekliği arttıkça boşluk kesri (ϵ) artmakta yani katı hacim kesri ($1 - \epsilon$) azalmaktadır. Kullanılan partikül boyutuna göre exponansiyel bir şekilde değişip çıkış bölgesine ulaşmaktadır. Belirli bir yükseklikten sonra ise partikül boyutuna göre konsantrasyonda değişiklik olmamaktadır. Yukarı doğru dümdüz aynı konsantrasyon gözlenmektedir. Bu yükseltiye “serbest bırakma yüksekliği” denmektedir. Bu bölge içerisinde özellikle büyük partiküller belli bir yüksekliğe çıktıktan sonra, ters bir ivme ile hareketlenmekte ve hızları azalmaktadır. Bu durumu belirleyen en önemli faktör partikül boyut dağılımıdır.

Yapılan deneyler sonucu diğer bölgelere göre yoğun yatak rejim bölgesinde ısı transfer katsayısının yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.35’de akışkanlaşma bölgesinin ısı transfer katsayısına etkisi gösterilmiştir.



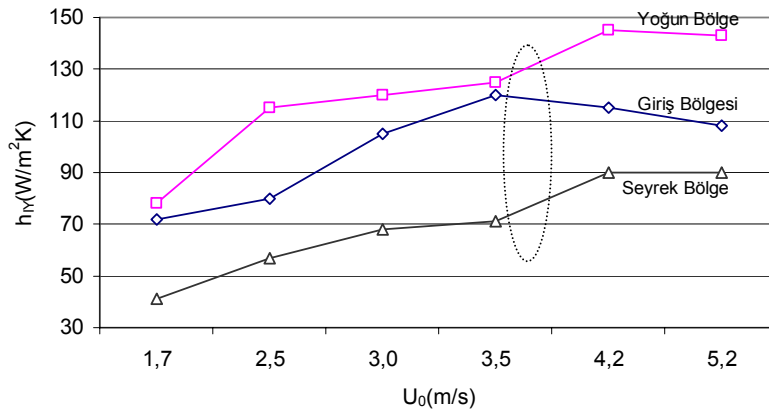
Şekil 4.34. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=247 \mu m$)

Şekil 4.34. incelendiğinde, 3.noktadan itibaren akışkanlaşma hızının artışı ile beraber, giriş bölgesinden üst bölgelere taşınan partikül miktarının artmasıyla kaldırma kuvvetinin çok etken olduğu giriş bölgesinde ısı transfer katsayısı değeri düşerken, yoğun bölge ve seyrek bölgede ise ısı transfer katsayısı daha da artmıştır.



Şekil 4.35. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=350 \mu m$)

Şekil 4.36. incelendiğinde partikül boyutu büyüdüğünde, değişim noktası 4. nokta olmuştur. Bu noktadan itibaren yoğun bölge ve çıkış bölgesinde ısı transfer katsayısı daha da artmıştır.



Şekil 4.36. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının akışkanlaşma bölgesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (silis kumu, $d_p=690 \mu\text{m}$)

Çizelge 4.6.'da akışkan yatak rejim bölgelerinin toplam ısı transferine katkısının ($Q_n/Q_{toplaml}$) partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi verilmiştir. Partikül çapı büyüdükçe yukarlara taşınan partikül miktarı oranı azaldığından seyrek akım bölgesinin katkısı da azalmaktadır.

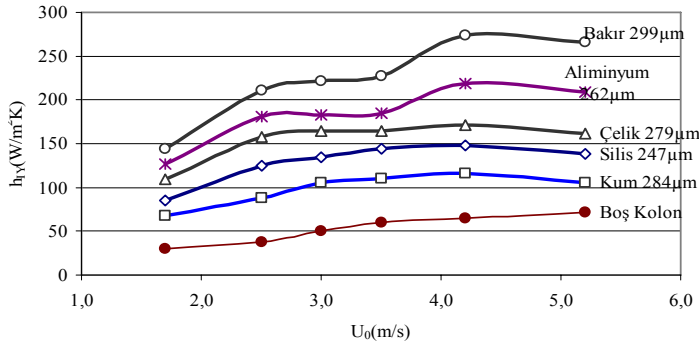
Çizelge 4.6. Akışkan yatak rejim bölgelerinin duvardan yatağa olan toplam ısı transferine katkısının partikül çapı (d_p) ve gaz hızı (U_0) ile değişimi (%)

	U_0 (m/s)	1,7	2,5	3	3,5	4,2	5,2
$d_{p_{\text{silis}}}=247\mu\text{m}$	Giriş B. (%)	35,8	34,7	34,2	32,1	31,1	32,1
	Yoğun B. (%)	37,0	37,5	37,9	39,8	39,9	38,8
	Seyrek B. (%)	27,2	27,8	27,9	28,1	29,0	29,2
$d_{p_{\text{silis}}}=350\mu\text{m}$	Giriş B. (%)	36,4	33,3	33,3	32,4	31,5	31,7
	Yoğun B. (%)	39,1	39,7	39,7	40,8	40,6	40,1
	Seyrek B. (%)	24,4	27,0	26,9	26,8	27,9	28,2
$d_{p_{\text{silis}}}=690\mu\text{m}$	Giriş B. (%)	37,7	31,7	35,8	38,0	32,9	31,7
	Yoğun B. (%)	40,8	45,6	41,0	39,6	41,4	41,9
	Seyrek B. (%)	21,5	22,6	23,2	22,5	25,7	26,4

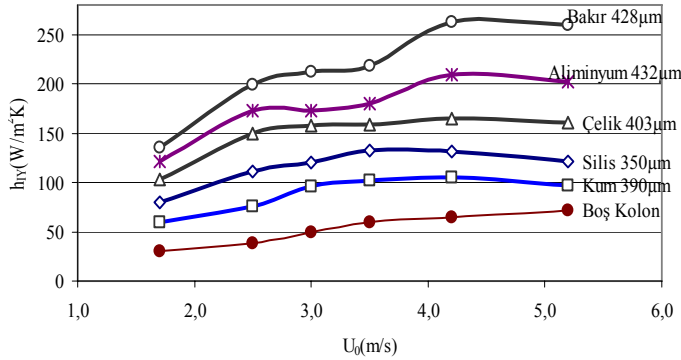
Yatak malzemesinin ısı transfer katsayısına etkisi

Dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer prosesi duvar çevresindeki gaz karışımı ve katıların hidrodinamiği tarafından kontrol edilmektedir. Deneyler sonucunda, akışkan yataklı sistemde katı olmadan elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri, katı olması durumunda elde edilen değerlerden daha düşüktür (Şekil 4.37,4.38,4.39). Şekil 4.37,

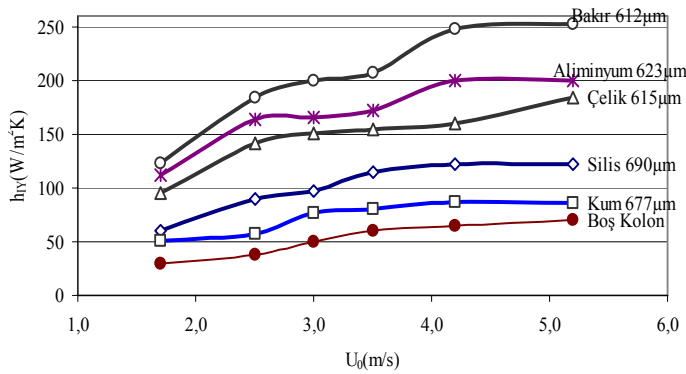
4.38 ve 4.39 incelendiğinde akışkan yatak içersinde kullanılan farklı malzemeler ile elde edilen ısı transfer katsayıları karşılaştırıldığında en yüksek ısı transfer katsayısı bakır malzeme ile, en düşük ise kum malzeme ile elde edilmiştir.



Şekil 4.37. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 274 \mu\text{m}$)



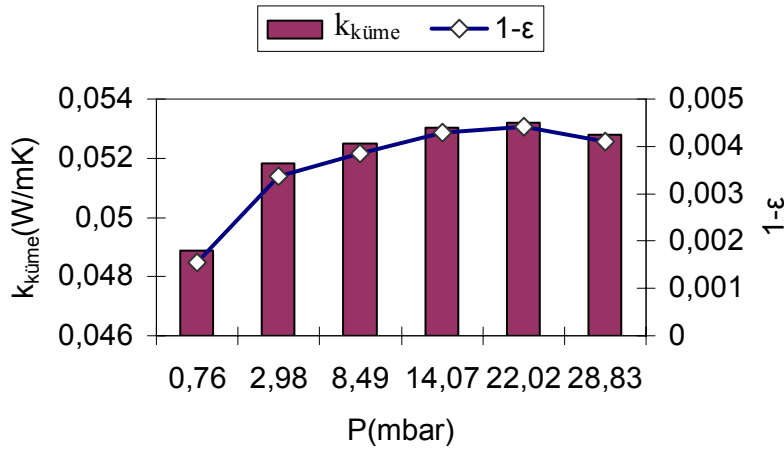
Şekil 4.38. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 400 \mu\text{m}$)



Şekil 4.39. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının yatak malzemesi ve gaz hızı (U_0) ile değişimi ($d_{p \text{ ort}} = 643 \mu\text{m}$)

Yatak basıncının (P_Y) ısı transfer katsayısına etkisi

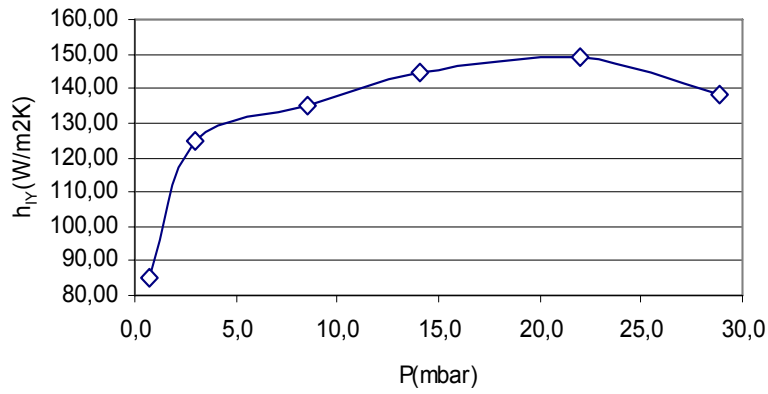
Dolaşımli akışkan yatakta kümelerin termal iletkenliği (kümesel ısı iletim katsayısı), yatak sıcaklığının ve sistem basıncının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Daha yüksek basınçlarda ve yatak sıcaklıklarında yüksek gaz termal iletkenliği ile beraber kesit alanındaki katı hacim konsantrasyonu ve kümelerin termal iletkenliği hızlı biçimde artmaktadır. Şekil 4.40.'da basınç ile kümelerin termal iletkenliğinin ve katı hacim kesrinin değişimi gösterilmiştir.



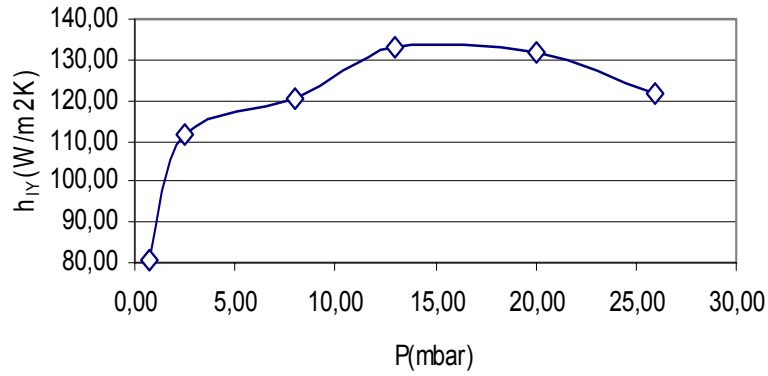
Şekil 4.40. Kümelerin termal iletkenliğine ve katı hacim kesrine basıncın etkisi

DAY'taki ısı transfer mekanizması, ısıtma yüzeyi, yatak malzemesi, akım sınır tabakası, çeper ve çekirdek akımları vb. faktörler arasındaki karşılıklı etkileşim süreci ile oluşur.

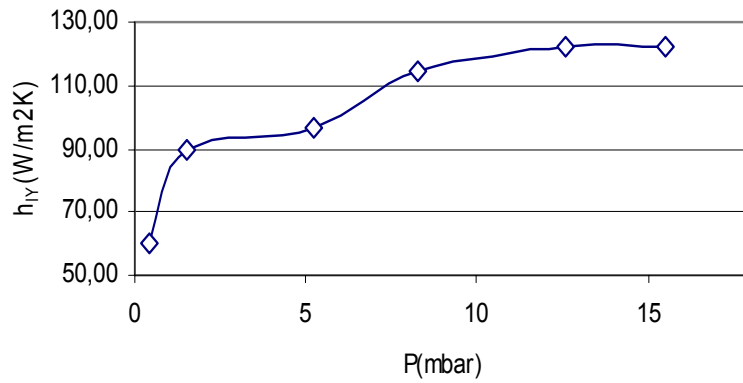
Yüksek basınçlarda duvar ile kümeler arasındaki gaz tabakasındaki yırtılma, bozulma ve incelmeler sonucu termal iletim direnci de azalmaktadır. Ortalama katı hacim konsantrasyonundaki yükselme, kümeler içerisindeki katı miktarının ve duvar yakınındaki küme yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Böylece kümede daha büyük miktardaki katının varlığı ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transfer katsayısını arttırmaktadır (Şekil 4.41-Şekil 4.43).



Şekil 4.41. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=247 \mu\text{m}$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)



Şekil 4.42. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=350 \mu\text{m}$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)



Şekil 4.43. Isıtma yüzeyi ile yatak arası ısı transfer katsayısının sistem basıncı ile değişimi (silis kumu, $d_p=690 \mu\text{m}$, $T_y = 300 \text{ }^\circ\text{C}$)

Bu çalışma ile literatürde yer alan ısıtma yüzeyi-duvar arası ısı transfer deney özellikleri ve sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.7.'de verilmiştir. Deneyler ile elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

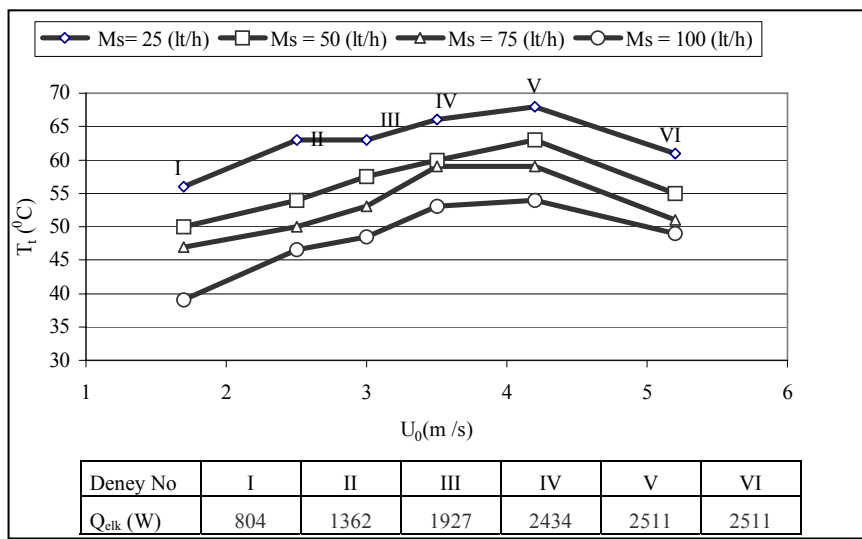
Çizelge 4.7 Literatürde yer alan ısıtma yüzeyi-duvar arası ısı transfer deney sonuçları

	Malzeme	d_p (μ m)	T_{duvar} (°C)	T_{yatak} (°C)	U_g (m/s)	Kolon Kesit (m)	Isıtma Tipi
Dutta, A.,2002	Silis kumu	266	46,72	36,5	4,4	0,1x0,1	Elektrikli ısıtıcı
Rt Yew Looi,Oi-Ming Mao,Martin Rhodes,2002	Aliminyum oksit	105	125-275	65-125	1-8	Ø 0,150	Elektrikli ısıtıcı
Rt Yew Looi,Oi-Ming Mao,Martin Rhodes,2002	Kum	201	125-275	65-125	1-8	Ø 0,150	Elektrikli ısıtıcı
Sajjakulnukit, B.,1999	Kum	279	80	-	7,3	Ø 0,06	Elektrikli ısıtıcı
Sajjakulnukit, B.,1999	Kum	279	80	-	5,5	Ø 0,06	Elektrikli ısıtıcı
Courbariaux, Y.,1998	Fluid Catalytic Cracking	87	41	21	5,5	Ø 0,102	Elektrikli ısıtıcı
B.V Reddy ve P.K Nag,1997	Kum	248	-	-	4,21	0,1x0,1	Elektrikli ısıtıcı
B.V Reddy ve P.K Nag,1997	Kum	248	-	-	6,43	0,1x0,1	Elektrikli ısıtıcı
Fox, W.B.,1997	Çelik	253	330	312	7,16	Ø 0,2	Elektrikli ısıtıcı
Fox, W.B.,1997	Kum	400	321	302	7,16	Ø 0,2	Elektrikli ısıtıcı
Farag ve Tsai,1993	Cam	37	-	294	2-8	Ø 0,08	Elektrikli ısıtıcı
Mahalingam ve Kolar,1993	Kum	156-3625	-	67	2-8	0,1x0,1	Elektrikli ısıtıcı
Molerus,1993	Cam,Kum, Bronz,FCC, Polyester	58-827	-	-	-	Ø 0,18	Elektrikli ısıtıcı
Nag ve Moral,1991	Kum	310	-	92	5-11	Ø 0,1	Elektrikli ısıtıcı
Mickley ve Trilling ,1949	Cam	70-450	-	417	1-4	Ø 0,1	Elektrikli ısıtıcı
Bu çalışma	Silis kumu	247 350 690	65-380	54-284	1- 6	Ø 0.1	Elektrikli ısıtıcı
	Çelik Tozu	279 403 615	65-380	54-284	1- 6	Ø 0.1	Elektrikli ısıtıcı
	Bakır Tozu	299 428 612	65-380	54-284	1- 6	Ø 0.1	Elektrikli ısıtıcı
	Alüminyum	262 432 623	65-380	54-284	1- 6	Ø 0.1	Elektrikli ısıtıcı
	Kum	284 390 677	65-380	54-284	1- 6	Ø 0.1	Elektrikli ısıtıcı

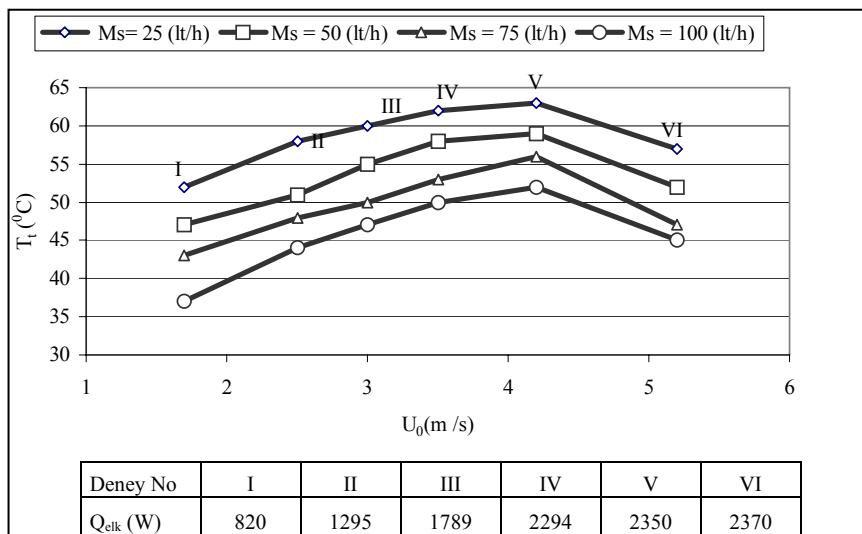
4.4.2. Yatak ile daldırılmış yüzey arası ısı transferinin deneysel belirlenmesi

Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığı değişimleri

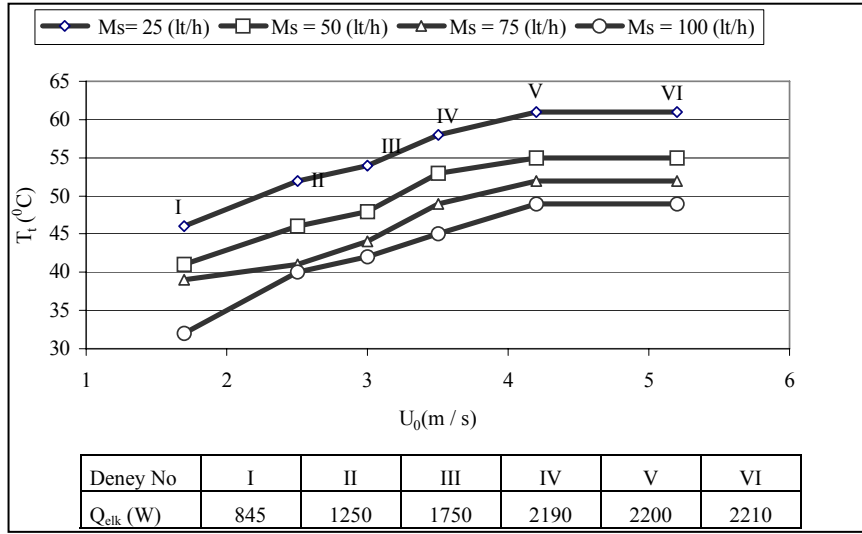
Dolaşımli akışkan yatakta daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi Şekil 4.44. - Şekil 4.49'da gösterilmiştir.



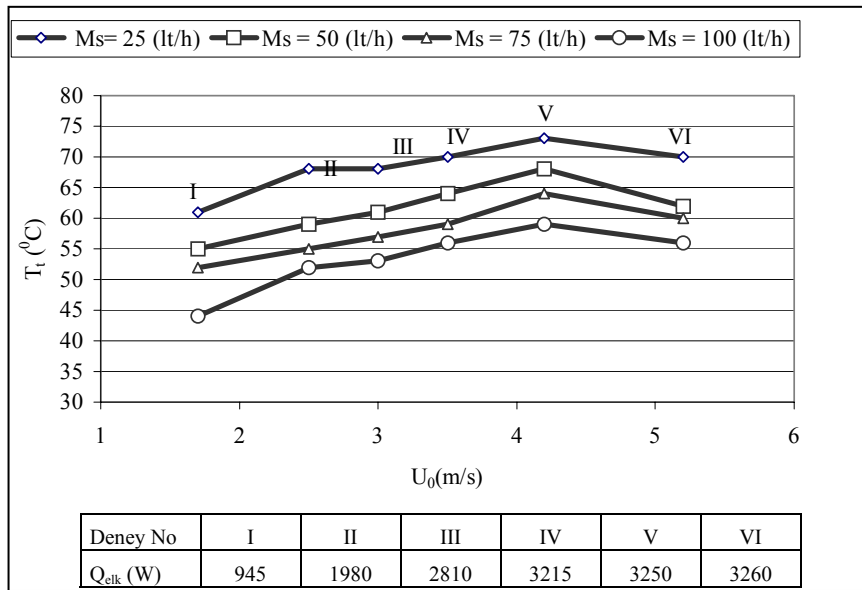
Şekil 4.44. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



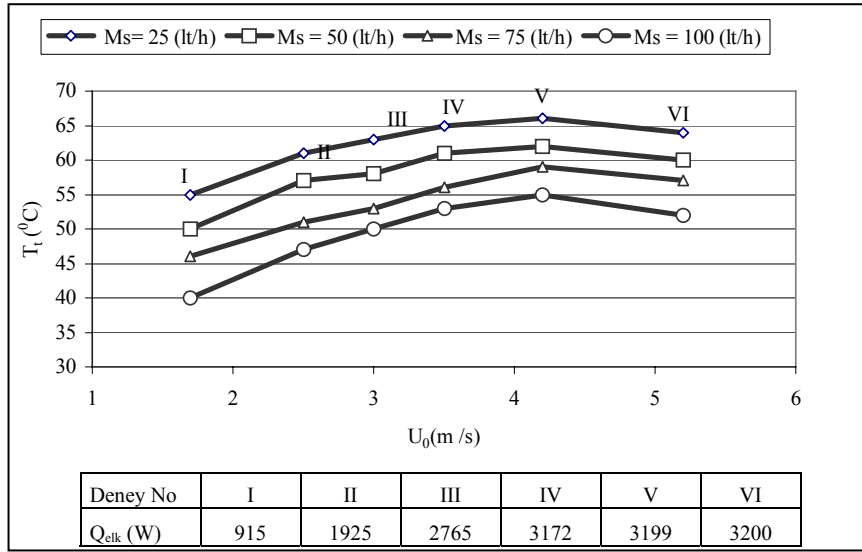
Şekil 4.45. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=350\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



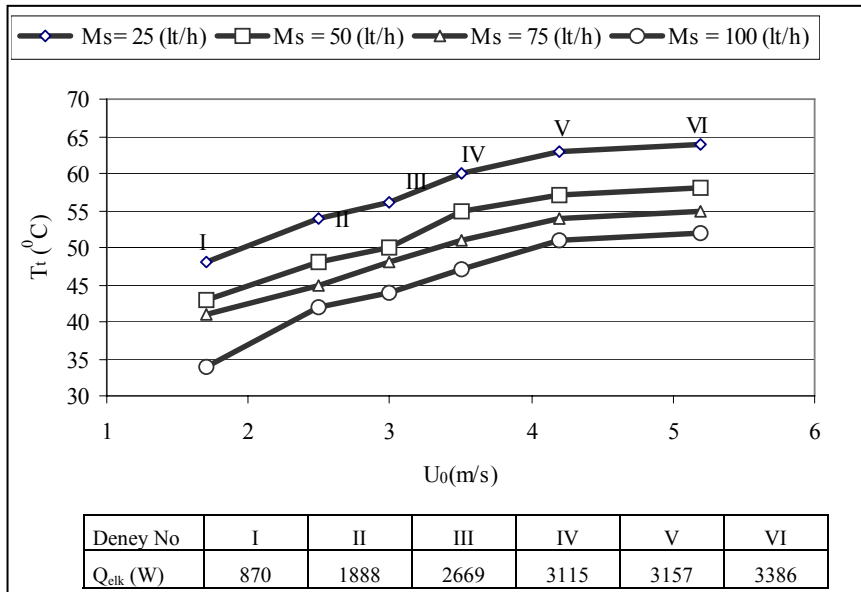
Şekil 4.46. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 4.47. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p = 279 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



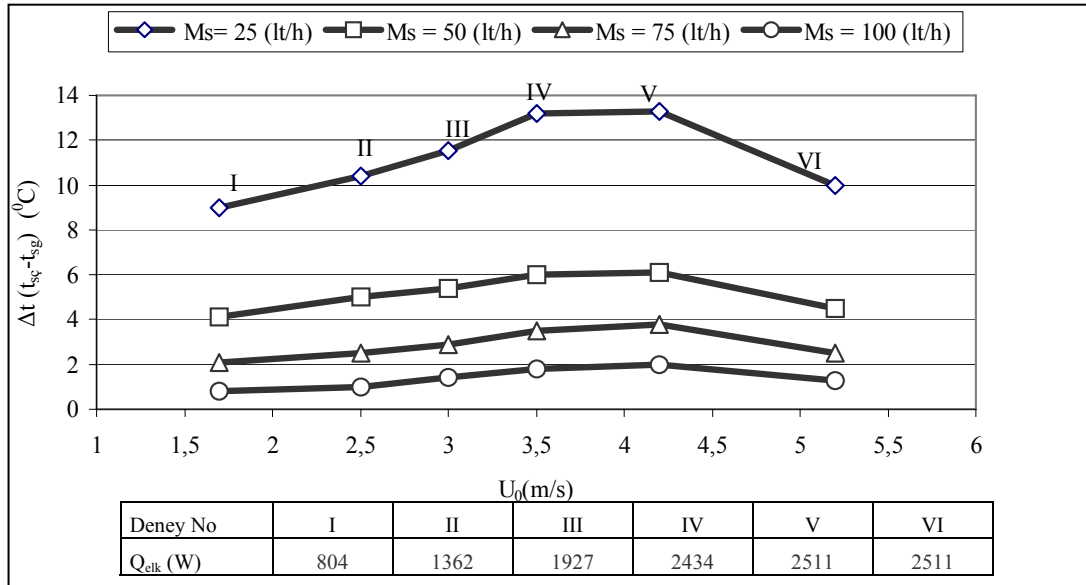
Şekil 4.48. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=403\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



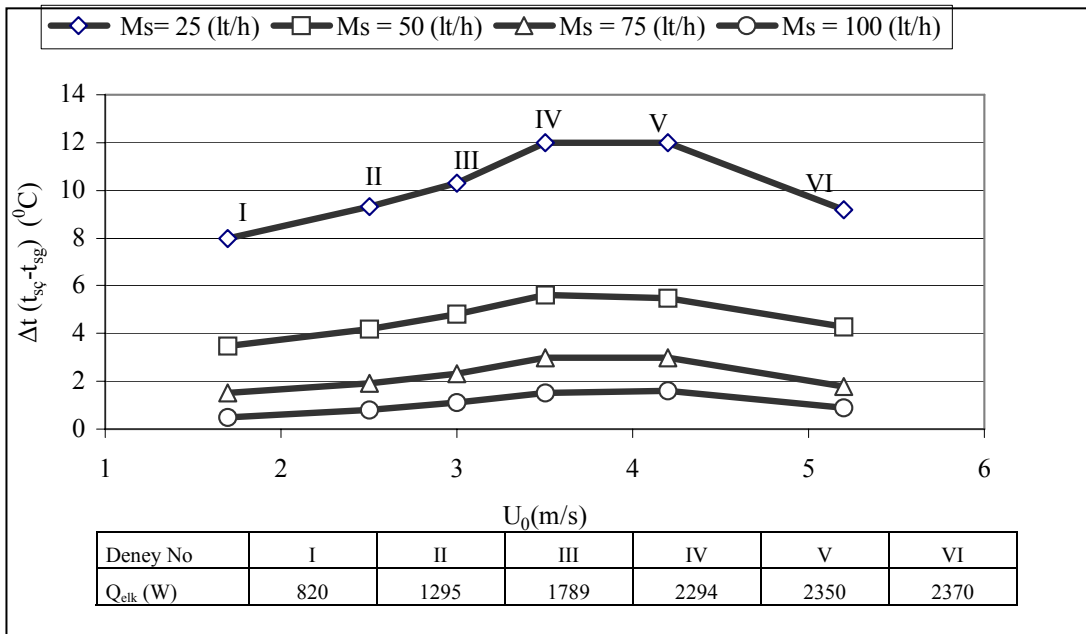
Şekil 4.49. Daldırılmış tüp yüzey sıcaklığının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=615\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)

Daldırılmış yüzeyde Δt ($t_{sc}-t_{sg}$) sıcaklığının değişimi

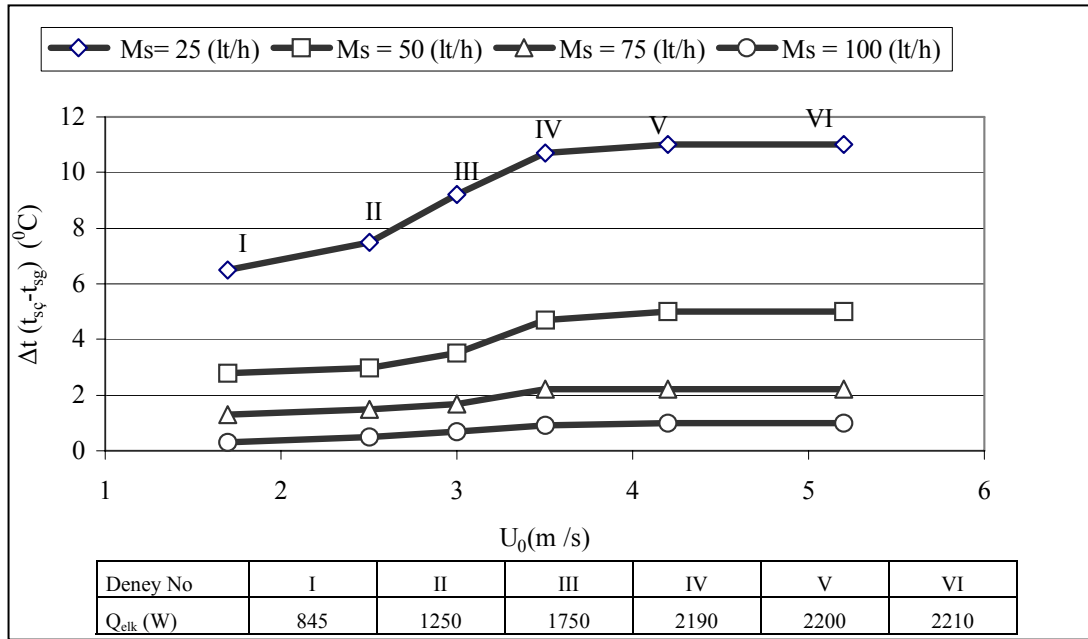
Daldırılmış yüzeyde Δt ($t_{sc}-t_{sg}$) sıcaklığının, gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi Şekil 4.50-4.55 arasında gösterilmiştir.



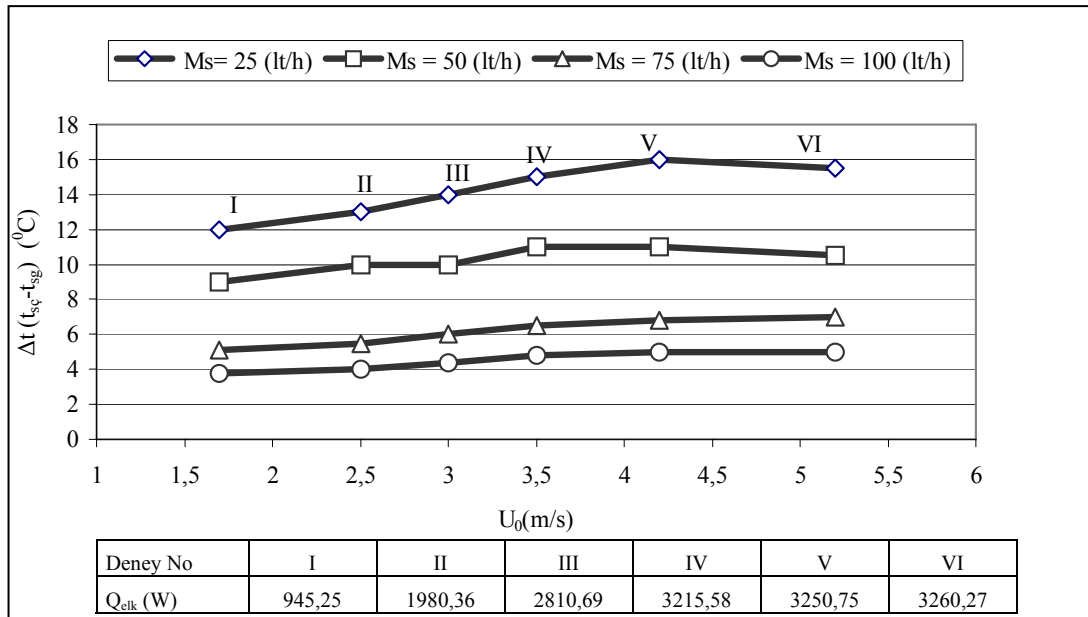
Şekil 4.50. Daldırılmış yüzeyde Δt ($t_{sc}-t_{sg}$) sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



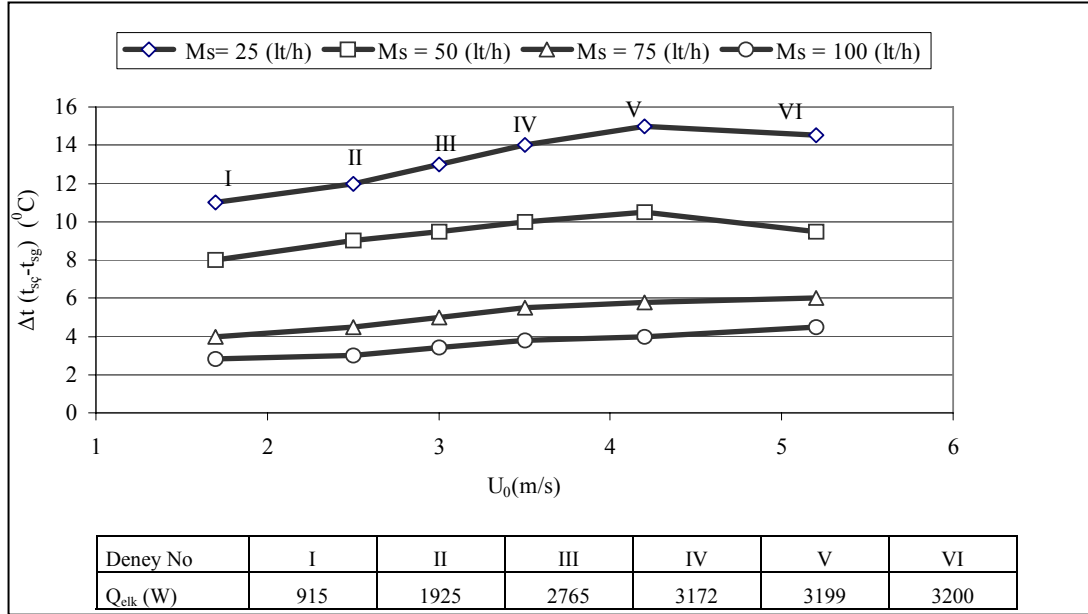
Şekil 4.51. Daldırılmış yüzeyde Δt ($t_{sc}-t_{sg}$) sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=350\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



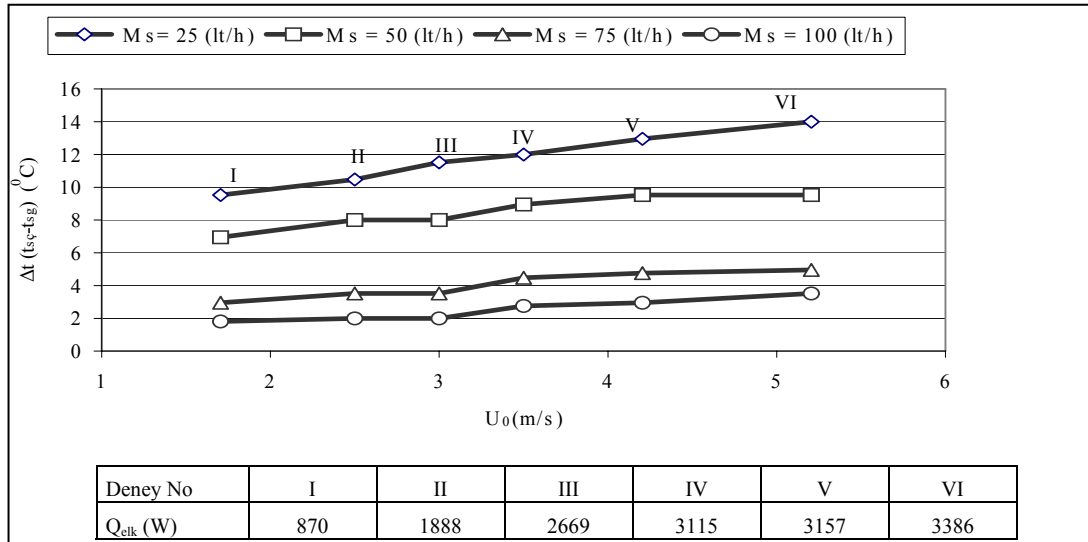
Şekil 4.52. Daldırılmış yüzeyde $\Delta t (t_{sc} - t_{sg})$ sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300^{\circ}C$)



Şekil 4.53. Daldırılmış yüzeyde $\Delta t (t_{sc} - t_{sg})$ sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p = 279 \mu m$, $T_y = 300^{\circ}C$)



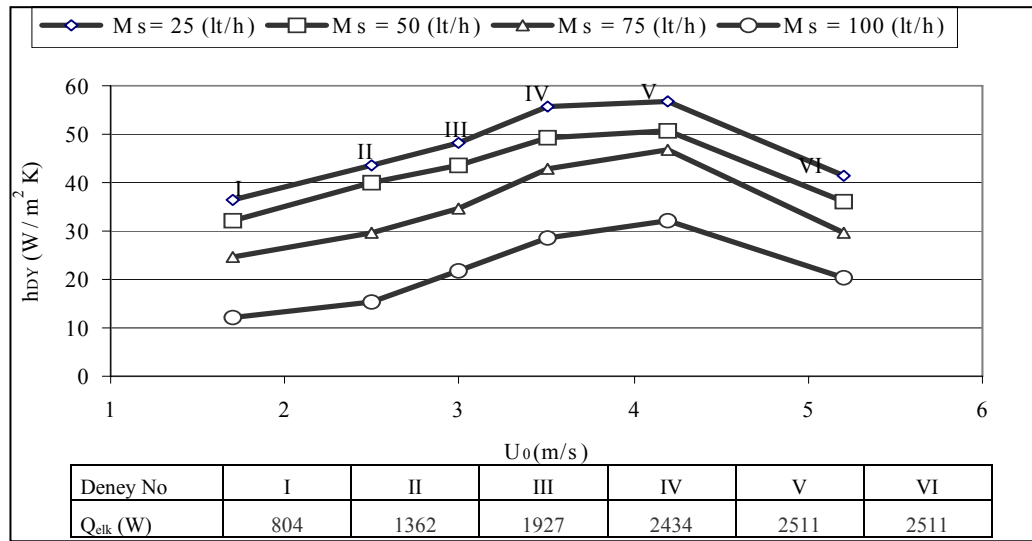
Şekil 4.54. Daldırılmış yüzeyde $\Delta t (t_{sc} - t_{sg})$ sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=403\mu\text{m}$, $T_y = 300^{\circ}\text{C}$)



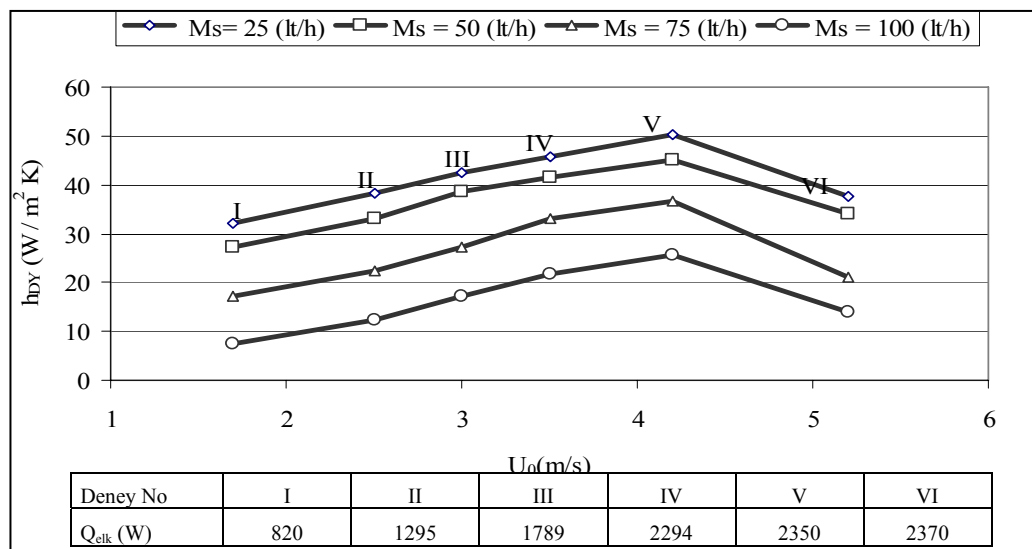
Şekil 4.55. Daldırılmış yüzeyde $\Delta t (t_{sc} - t_{sg})$ sıcaklığının gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=615\mu\text{m}$, $T_y = 300^{\circ}\text{C}$)

Yatak ile daldırılmış yüzey arası ısı transfer katsayısının değişimi

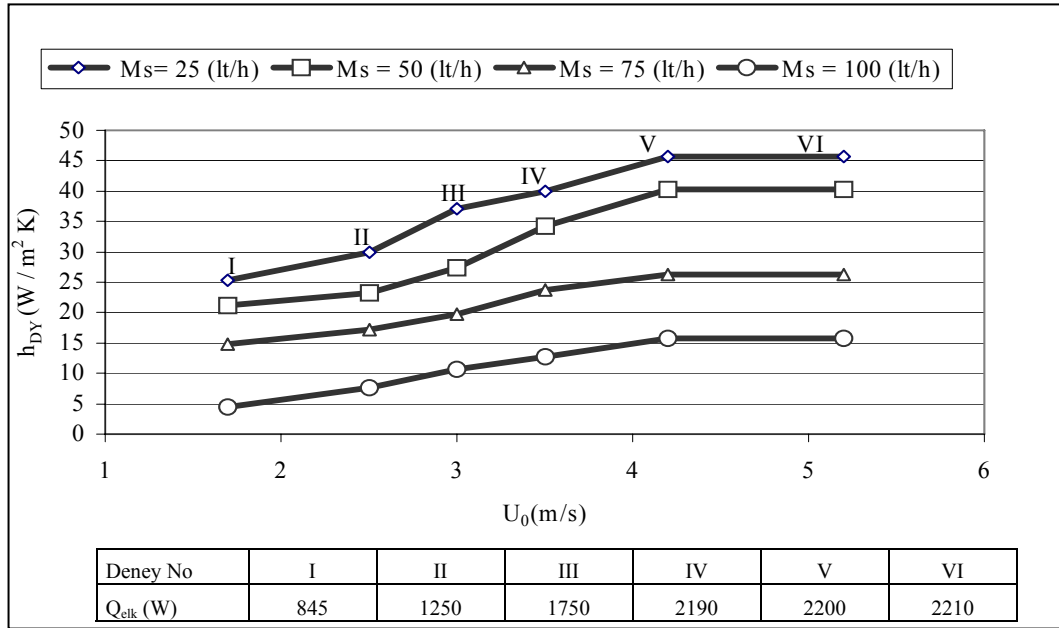
Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi Şekil 4.56 – Şekil 4.61 arasında gösterilmiştir.



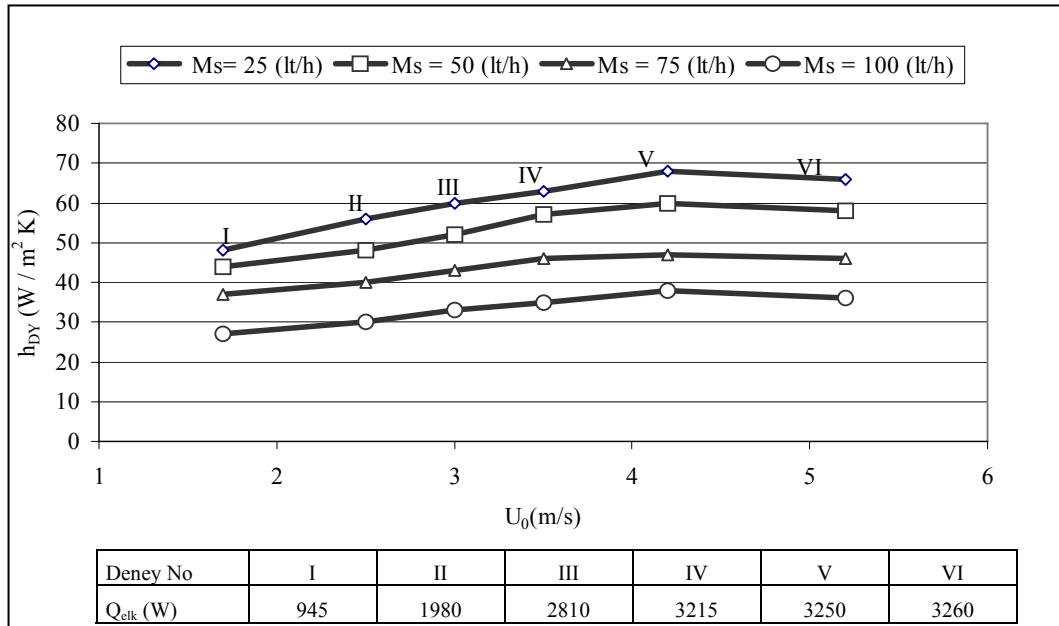
Şekil 4.56.Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne(Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=247\mu m$, $T_y= 300^\circ C$)



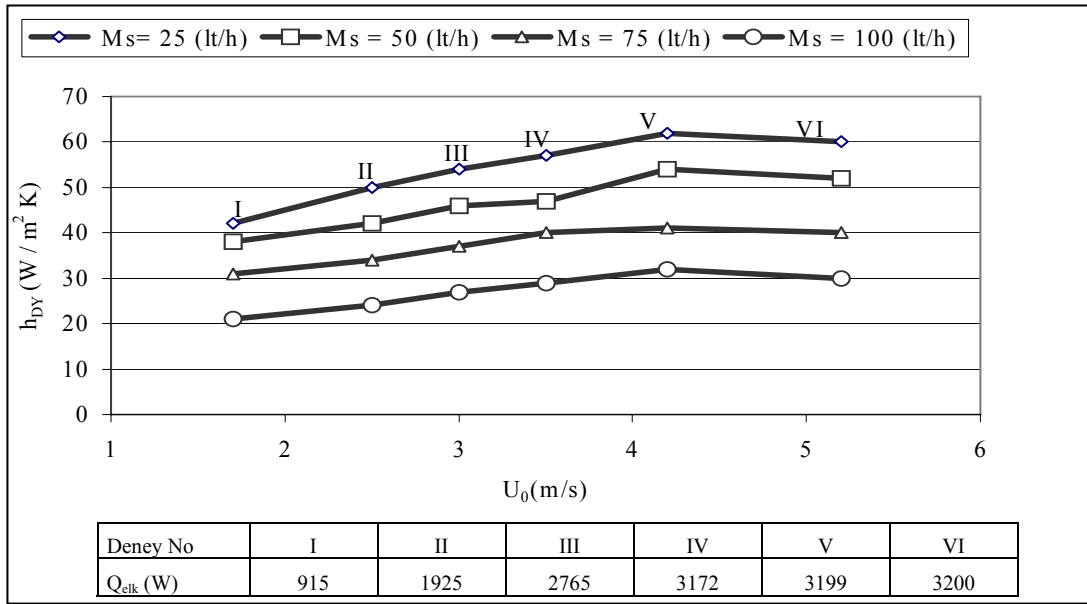
Şekil 4.57.Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne(Q_{elk}) bağlı olarak değişimi



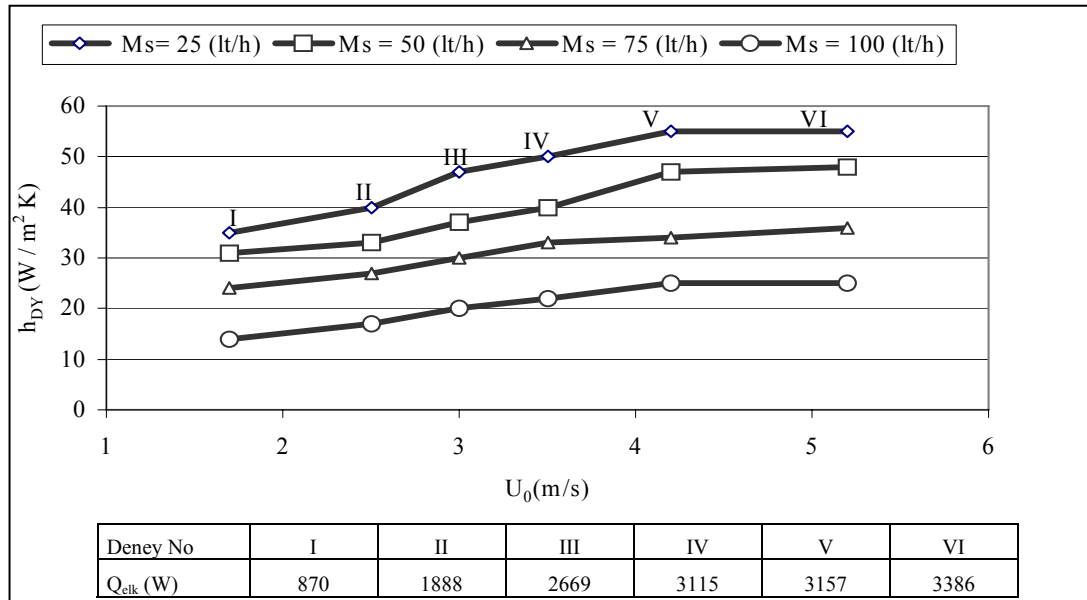
Şekil 4.58. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (silis kumu, $d_p=690\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 4.59. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=279\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



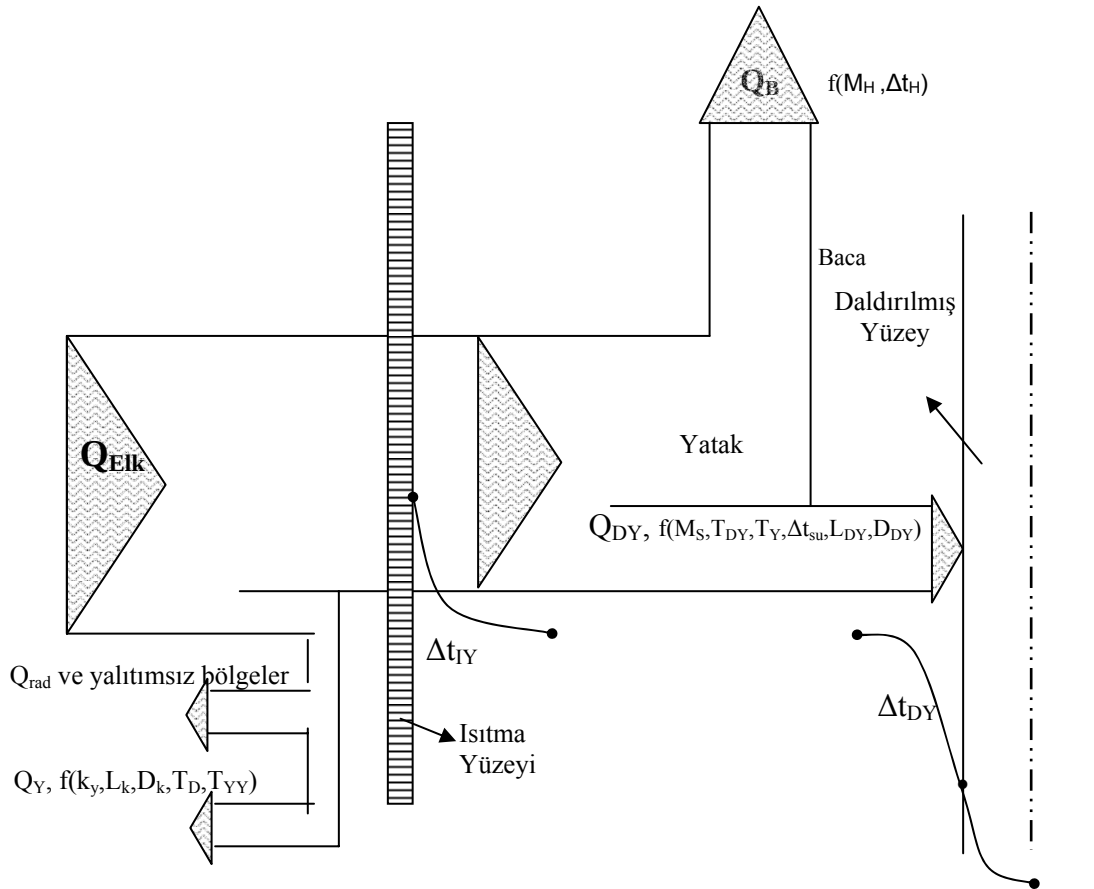
Şekil 4.60. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=403\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 4.61. Daldırılmış yüzey ile yatak arası ısı transfer katsayısının su debisi (M_s), gaz hızı (U_0) ve elektrik yüküne (Q_{elk}) bağlı olarak değişimi (çelik tozu, $d_p=615\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)

Dolaşımlı akışkan yatakta kararlı rejim şartlarında sistem enerji (ısı) akış diyagramı(EAD) Şekil 4.62’de gösterilmiştir. Deneyler sırasında sisteme verilen Q_{elk} değeri bilindiğinden, duvardan dış ortama olan yalıtım ısı kaybı Q_Y , bacadan olan ısı kaybı Q_B ve yataktan daldırılmış yüzeye olan ısı transferi Q_{DY} hesaplanarak, $Q_{elk} = Q_{YAD}(Q_Y + Q_B + Q_{DY})$ bulunmuş ve enerji (ısı) akış diyagramı ile hesaplanan değerlerin sisteme verilen elektrik gücü ile karşılaştırılması yapılmıştır(Çizelge 4.8.).

Çizelge 4.8 incelendiğinde karşılaştırmalarda görülen % fark, test sisteminde ana kolondan sonra bacaya kadar olan kısım ve siklon ile partikül dönüş hattının yalıtımsız olması ve buralarda oluşan ısı kayıplarından kaynaklanmaktadır. Çünkü ana kolonu terk eden partiküller taşıdıkları enerji ile birlikte siklona, oradan da dönüş hattı üzerinden tekrar ana kolona ulaşmaktadır.



Şekil 4.62. Dolaşımlı akışkan yatakta enerji (ısı) akış diyagramı

Çizelge 4.8.Sistem enerji (ısı) akış diyagramı (EAD) ile hesaplanan değerlerin karşılaştırılması (silis kumu, $T_y = 300^\circ\text{C}$, $M_s=25 \text{ lt/h}$)

$U_0 \text{ (m/s)}$	$Q_{\text{elk}} \text{ (W)}$	$Q_{\text{elk EAD}} \text{ (W)}$ $(Q_Y + Q_B + Q_{DY})$	% Fark
1,7	810	659	18,6
2,5	1370	1020	25,5
3	1940	1511	21,1
3,5	2450	1864	23,9
4,2	2550	2003	21,4
5,2	2560	1942	24,1

Q_Y = Yalıtımdan Olan Isı Kaybı(W), Q_B =Bacadan Olan Isı Kaybı(W)
 Q_{DY} =Daldırılmış Yüze A Aktarılan Isı(W)

Deney sisteminde ana kolondan sonra bacaya kadar olan kısım ve siklon ile partikül dönüş hattının cam yünü ile izolasyonu yapılmış ve buradaki ısı kayıpları azaltılarak Çizelge 4.8’de verilen değerler ortalama %12 oranına düşürülmüştür. Ayrıca sıcaklık, basınç ve hava debisi ölçüm noktalarındaki küçük kayıplarda buna ilave edilebilir.Bu çalışma sonuçları ile literatürde yer alan yatak ile daldırılmış tüp arası ısı transfer deney sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.9’ de verilmiştir.

Çizelge 4.9. Literatürdeki daldırılmış tüp ile ısı transfer sonuçlarının karşılaştırılması

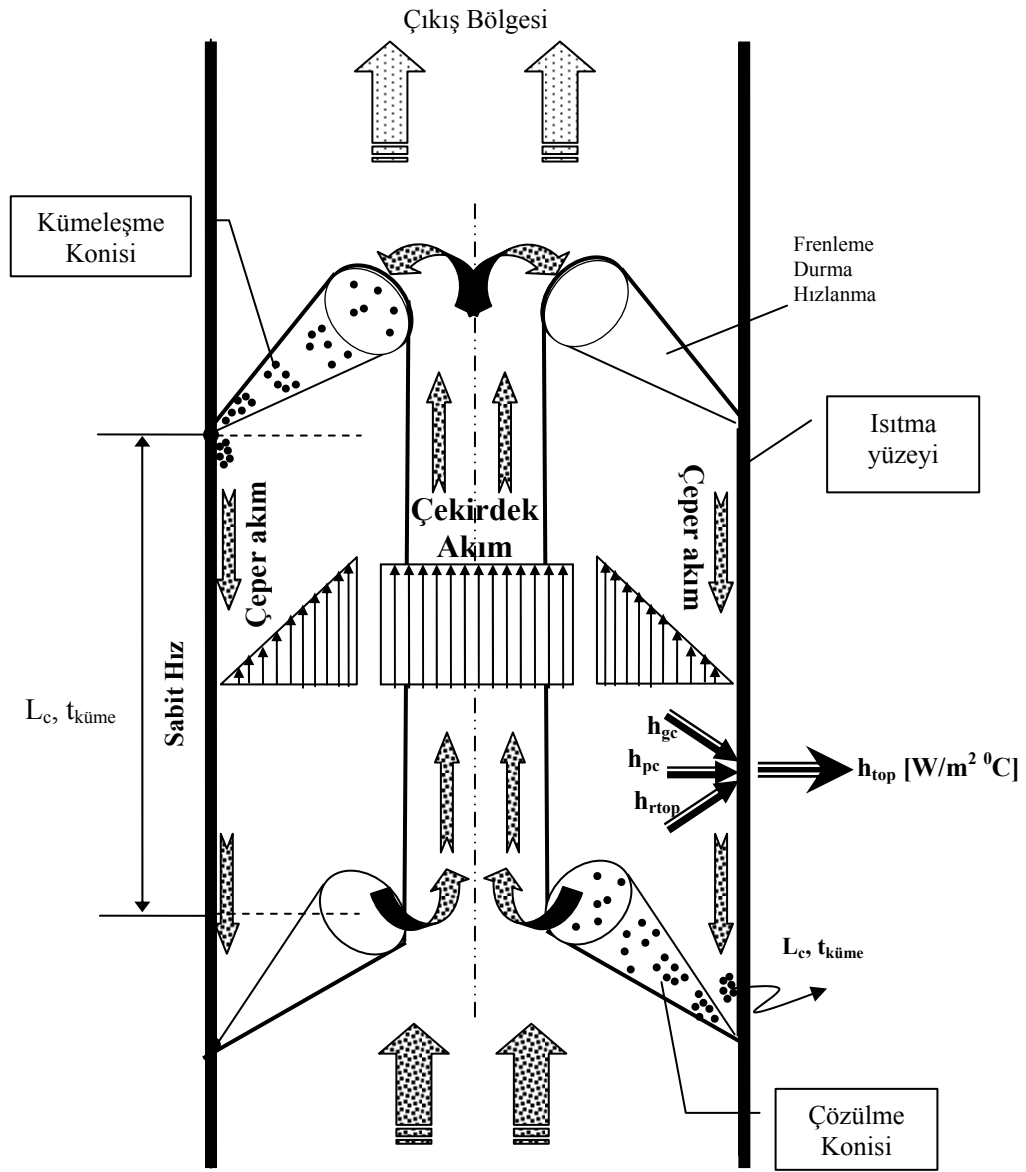
Araştırmacı	Yatak Kesiti (mm)	H_k (m)	Tüp Tipi	d_t (mm)	H_t (m)	H_d (m)	H_d/H_k	U_g (m/s)
Sunderesan ve Kolar	100x100	5,5	Eksenel	9,6	0,6	5,2	0,95	4,5
Kiang ve arkadaşları	Ø 100	3,66	Eksenel	19	0,057	0,56-3,15	0,153-0,86	4,9
Basu	202x202	6,3	Eksenel	38	0,81	5,9	0,93	-
Zheng ve arkadaşları	Ø 112	5.5	Eksenel	10	3,7	2,8	0,51	2,6-5,8
Ahn ve Han	Ø 50	2.5	Eksenel	4,75	0,9	1,8	0,72	2,5-6,0
Mincic ve arkadaşları	Ø 120	5	Eksenel	-	-	0,8-3,6	0,16-0,72	2,5
Bu çalışma	Ø 100	0.9	Eksenel	10	0,9	0,45	0,5	1-6

5.DOLAŞIMLI AKIŞKAN YATAK'TA ISI TRANSFERİNİN TEORİK İNCELENMESİ

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan termik santrallerin akışkan yataklı kazanları, DAY türündendir. Bunların yanma hızları, ısı kapasiteleri ve türbülanslık dereceleri, kabarcıklılara kıyasla çok daha yüksektir. Dairesel kesitli bir dolaşimli akışkan yatağın gerçek hidrodinamik özellikleri ve rejim türleri Şekil 1.3.a'da, ısı transferinin analizine yönelik matematiksel modellerin geliştirilmesine esas olan idealleştirilmiş yatak hidrodinamik yapısı ise Şekil 1.3.b'de şematik olarak gösterilmiştir.

5.1.DAY'ta Isı Transferi Analizine Yönelik Matematiksel Modellerin Geliştirilmesine Esas Olan Yatak Hidrodinamik Modeli

Dağıtıcı eleğin üzerinde bulunan yatak malzemesi, alttan verilen basınçlı yakma havası ile yukarıya doğru püskürtülen partiküller üzerinde, yerçekimi kuvvetine daha baskın kaldırma kuvveti oluşturulur. Kaldırma kuvvetinin çok etken olduğu bu bölge, alt rejim bölgesi olarak tanımlanır, alt ve sıçramalı bölümlerden oluşur. Onun üzerinde sırasıyla yoğun yatak rejim bölgesi, seyreltilmiş yatak rejim bölgesi ve en üstte de çıkış bölgesi bulunur. Yoğun bölge çıkışında belirsiz bir sınır bölümü bulunur. Yatak ortasında, partikül hızlarının yüksek, kaldırma kuvvetinin baskın olduğu çekirdek akımı söz konusudur. Bunun etrafında ise, ısıtma yüzeyine doğru hızların azaldığı dolayısıyla partiküller üzerine olan yerçekimi kuvvetinin baskınlaşarak, ısıtma yüzeyinde en üst düzeye çıktığı çeper akımı bulunur (Şekil 1.3.b). Bu iki akım arasındaki kuvvetsel etkileşimler sonucu partiküllerin bir kısmı, çekirdek akımdan çeper akıma ve oradan ısıtma yüzeyine doğru itilir. Çeper akımda yerçekimi kuvvetinin etkinleşmesi süreci altında buraya gelen yüksek hızlı partiküller yavaşlatılır, hızı sıfırlanır (yerçekimi baskın partikül kümeleşme konisi, Şekil 5.1), hızlandırılır ve ardından ısıtma yüzeyine paralel biçimde belli bir süre ($t_{k\ddot{u}me}$) ve belli bir yol boyunca (L_c) sabit bir hızla aşağı doğru akmaya zorlanır (Şekil 5.1). Isıtma yüzeyi ile kümeleşmiş partikül arasında ince bir gaz sınır tabakası bulunur.



Şekil 5.1. Dolaşımlı akışkan yataкта ısı transferinin analizine esas olan yenilenen küme modelinin idealleştirilmiş tanımı

Kümeleşmiş partikül akım, kaldırma kuvvetinin etken olduğu alt rejim bölgesi yakınında, çeper akımda yukarı açılımda yavaşlamaya, hız sıfırlamaya, tekrar hızlanmaya (kümeleşme çözülmesi süreci, çözülme konisi, Şekil 5.1) zorlanır. Buradan çekirdek akıma geçer. Böylelikle kaldırma, yerçekimi kuvvetlerinin karşılıklı ve değişken etkinleşmeleri sonucu çekirdek ve çeper akımdan oluşan akışkan yatak hidrodinamiğine yeni bir akış “Dolaşımli Yenilenen Kümesel Partikül

Akımı” eklenir. Dolaşımlı partikül akım dışında kalan, genelde küçük partiküller, çekirdek bölgesinde yoğunluklu olmak üzere, seyreltilmiş bölgeden asılı partikül akım biçiminde çıkış bölgesine ve oradan da siklona sürüklenir. Bu partiküllerin büyük bir bölümü siklonda ayrışır ve dönüş borusu üzerinden yatağa tekrar geri beslenir. Seyrek faz akımı, çok ince ve düşük konsantrasyonlarda partiküller içerir. Bu akımın benzer termodinamik koşullarda, bir gaz akımıyla aynı ısı transfer özelliği gösterdiği kabul edilir. Bu nedenle ısı transferi analizinde, seyrek faz akımı ısı transferi, gaz ısı transferi olarak hesaplanır [6]. DAY’ta yatağı çevreleyen ısıtma yüzeyinden, yatağa olan karmaşık ısı transferi mekanizmasının anlaşılabilir ve hesaplanabilir hale getirilebilmesi için, bu mekanizmanın tanımlanması ve kavranması ile ilgili bir model yaklaşımının ortaya konması gerekir. İdealleştirilmiş yatak hidrodinamiği, model yatak hız ve sıcaklık dağılımı, akım türleri (çekirdek, çeper, yenilenen kümesel ve dağılmış faz) ve özellikleri şematik olarak Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Yatağın ortasında oluşan hızlı-homojen dağılımlı çekirdek akım ile yanlarda bunu çevreleyen yavaş ve değişken hızlı çeper akımın, karşılıklı etkileşimi ile partikül kümelenme süreçleri sonucu, dolaşımlı yenilenen kümesel akım oluşur. Burada hız sınır tabakası kalınlığı (δ_v) ile, sıcaklık sınır tabakası kalınlığı (δ_T) ile gösterilmiştir. Yanma ile oluşan ısı, özellikle çekirdek akımda yatak partiküllerine yüklenmektedir. Yoğun türbülans ve yüksek partikül biot sayısı nedeniyle, ısı yoğun bir biçimde yayılarak, yatak kesitinde homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturmasını sağlar. Şekil 1.3.b’de görüldüğü gibi sıcaklık sınır tabakası kalınlığı (δ_T), hız sınır tabakasına kıyasla çok küçüktür. Bu çok ince sınır tabakasında oluşan yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle ısı aktarım katsayısı çok yüksektir. Sınır tabakasının çok ince olması ve çapraz partikül hareketleri ile bu tabakanın sürekli yırtılması, ısıtma yüzeyine olan ısı direnci azaltmakta, dolayısıyla ısı transferinin daha da artmasına neden olmaktadır. Üst bölümlerinde dağınık faz bölgesine doğru azalmaya başlayan kaldırma kuvveti, basınç salınımları ve yoğun türbülans etkisi altında, çekirdek akımdaki partiküller, yavaş çeper akım bölgesine geçer. Bu bölgede, partiküller üzerine olan yerçekimi etkisinin, ısıtma yüzeyine doğru artarak daha da etkin hale gelmesi ile partiküller birbirine yaklaşır, yavaşlar, hızları sıfırlanır ve kümeleşirler(kümeleşme konusunda kümeleşme süreci, Şekil 5.1).

Bu partiküller daha sonra hızlanır ve sabit bir hıza kavuşarak, bir müddet bu hızla (temas boyu $L_{k\ddot{u}me}$, temas zamanı, $t_{k\ddot{u}me}$) aşağı akar. Isıtma yüzeyi boyunca kümelenmiş partiküller, zaman zaman gaz sınır tabakasını yırtarak, yerçekimi etkisiyle aşağı doğru yoğun faz bölgesine sürüklenirler. Alt bölgeye yaklaşıldığında, kaldırma kuvveti yerçekimi kuvvetine baskın hale gelir, kümeleşme konisine ters yönde ve yukarıya yönelik partikül çözülme konisinde, partiküller çözülerek, çekirdek akıma geri döner.

5.2. DAY'ta Isı Transferi Analizine Yönelik Matematiksel Modeller

DAY'taki ısı transfer mekanizması, ısıtma yüzeyi, yatak malzemesi, akım sınır tabakası, çeper ve çekirdek akımları vb. faktörler arasındaki karşılıklı etkileşim süreci ile oluşur. Isıtma yüzeyi yakınındaki dolaşım kümesel partikül akımı aşağı doğrudur (Şekil 5.1). DAY ta hidrodinamik modelde belirtildiği gibi ısı transferi, doğrudan, yerçekimi ve kaldırma kuvvetleri etkileşimi altında oluşan yatak hidrodinamik davranışı ile ilgilidir. Tüm endüstriyel kazanlarda olduğu gibi DAY'lı kazanda da ısı transferi veya ısıtma yüzeyleri yanma odasında, oda duvarlarına yukarı akışlı paneller biçiminde yerleştirilir. Kabarcıklı akışkan yataklı kazanlarda ısıtma yüzeyleri yatak içine de daldırılmaktadır. Büyük ısı uygulamalarında uygun ısı performans ve SO_2 emisyon kontrolü nedeni ile tamamen DAY uygulamalarına geçilmiştir. Bu nedenle tüm ısı transferi araştırmaları yanma odasına yerleştirilen ısıtma yüzeyleri ile DAY arasındaki ısı transferine yönelmiştir. Bunun sonucu olarak, literatürde önerilen tüm teorik çalışmalar duvarsal ısıtma yüzeyi ve yatak arasındaki ısı transferi ile ilgilidir. Bu yüzden bu çalışmada da, duvarsal ısıtma yüzeyi ile yatak arası toplam ısı transferi katsayısının hesaplanmasına yönelik matematiksel modeller üzerinde durulmaktadır. Yatak hidrodinamiğinin etkisi altında yatak malzemesi belli bir yükseklikten sonra çekirdek akımdan ayrılarak duvara doğru yönelmekte, burada kümeleşerek aşağıya doğru akmaktadır. Belli bir minimum konuma ulaşıldığında sürüklenme ve kaldırma kuvvetinin etkisi ile yatak malzemesi çekirdek akıma yönelmekte ve onunla karışmaktadır. Böylelikle duvarsal ısıtma yüzeyinde sürekli

yenilenen bir kümesel malzeme akımı oluşmaktadır. Duvarsal ısıtma yüzeyine yataktan olan toplam ısı transferi;

- a) Partikül konveksiyonu
- b) Gaz konveksiyonu
- c) Radyasyon olarak temelde üç bileşenden oluşmaktadır

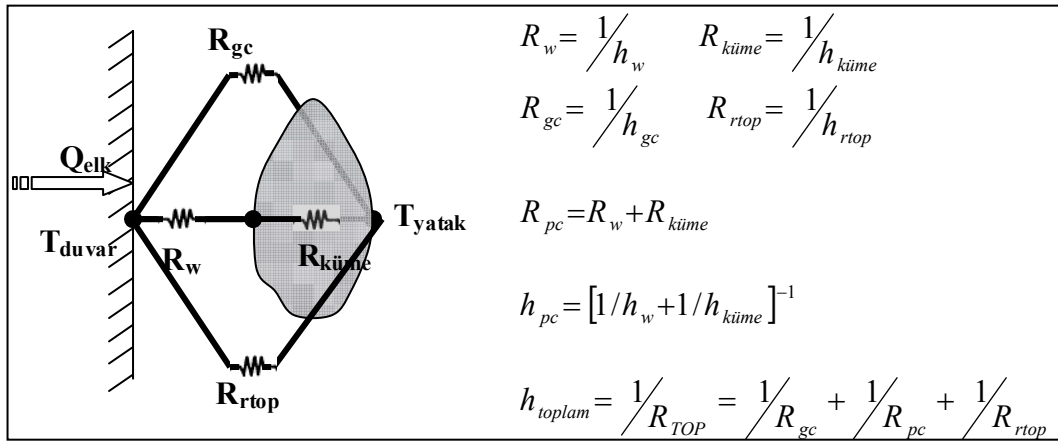
Gaz konveksiyonu ve radyasyon ile ısı transferi mekanizmalarında literatürde verilen partikül içeriğine göre modifiye edilen genel korelasyon eşitlikleri kullanılmaktadır. Literatürdeki modelleme çalışmalarındaki genel farklılık partikül konveksiyonu (h_{pc}) bileşeni ile ilgilidir. Partikül konveksiyon bileşeni ile ilgili literatürde başlıca üç yaklaşım bulunmaktadır. Bu modeller;

- Tek Partikül Modeli (Sekthira ve arkadaşları. (1988) ,Johnsson ve arkadaşları .(1988), Kudo ve arkadaşları. (1991), Qi ve Farag. (1993)).
- Gaz – Katı Homojen (sürekli) Film Modeli (Chen ve arkadaşları. (1988), Leckner.(1991), Mahalingam ve Kolar (1991)).
- Yenilenen Küme Modeli (Subbarao ve Basu .(1986), Basu ve Nag. (1987), Glicksman. (1988), Yenming ve arkadaşları .(1989), Wu ve arkadaşları. (1990), Basu ve Fraser (1991), Chen . (1992), Lints ve Glicsman .(1994), Wang ve arkadaşları (1996), Basu ve Nag .(1996), Fox .(1997), Bucak ve Uysal . (1999), Zevenhoven ve arkadaşları . (1999), Reddy ve Basu .(2001), Golriz ve Grace. (2002), Dutta ve Basu .(2004), Vijay ve Reddy (2005)).

Bu yaklaşımlar içerisinde dolaşımli akışkan yatakta duvar bölgesinde hidrodinamik partikül akış davranışını en gerçekçi tanımlayan fiziksel model, duvarda sürekli oluşan yeniden malzeme kümeleşme modelidir. Literatürde verilen çalışmalarda, partikül konveksiyonu ile ilgili en gerçekçi değerleri bu modelin verdiği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, DAY ısı transferinin teorik incelenmesinde yenilenen küme modeli esas alınmıştır.

5.3. DAY'ta Isı Transferi İle İlgili Yenilenen Küme Modeli

Dolaşımlı akışkan yataklı sistemlerde, ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transferi, ısıtma yüzeyi ile yatak çekirdek akım bölgesi arasında, ısıtma yüzeyinin yakın çevresinde bulunan partikül kümelerinin ve dağılmış fazın dinamik davranışının bileşke etkisi tarafından belirlenir. Şekil 5.2'de dolaşımlı akışkan yatakta, ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transferine ait ısı devre şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Model için ısı transfer mekanizması ısı devresinin şematik gösterimi

DAY'da yatağı çevreleyen ısıtma yüzeyinden, yatağa olan toplam ısı transferi;

- Dolaşımlı yenilenen kümesel akımın oluşturduğu (Şekil 5.1) taşınımli partikül ısı transferi (h_{pc})
- Yukarı akışlı seyreltilmiş veya dağılmış faz akımının oluşturduğu taşınımli gaz ısı transferi(h_{gc})
- Dolaşımlı yenilenen kümesel akım (h_{pr}) ve dağılmış faz akımı (h_{gr}) ile ısıtma yüzeyi arasındaki radyasyonlardan oluşan, toplam radyasyon h_{rtop} , ısı transferleri bileşenlerinin (a,b,c) kümülatif bileşkesi olarak ortaya çıkar.

Bu durumda, ısıtma yüzeyinden olan toplam ısı transfer katsayısı için aşağıdaki eşitlik yazılabilir [2].

$$h_{toplam} = f \cdot h_{pc} + (1 - f)h_{gc} + h_{rtop} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.1)$$

Burada f, partikül demetleri ile duvar yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısıdır. Lints ve Glicksman tarafından sürtünme katsayısı;

$$f = \alpha \cdot c^\beta = 3,5 \cdot c^{0,37} \quad c = 1 - \varepsilon \quad (5.2)$$

olarak verilmiştir. Aşağıda, çeşitli tür ısı transferi biçimlerinin, toplam ısı transferine olan katkıları ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Dolaşımli yenilenen kümesel partikül akımının ısıtma yüzeyinden yatağa olan toplam ısı transferine katkısının hesabı (h_{pc})

Kümesel partiküllerin duvar boyunca kat ettikleri sabit hız bölgesinde, temas uzunluğu ($L_{küme}$) ve temas zamanı ($t_{küme}$) olarak verilmiştir. $L_{küme}$ boyunca ve $t_{küme}$ süresince zaman zaman kümesel partiküller ısıtma yüzeyi ile temasa geçerek gaz tabakasını yırtar. Yırtmasal etkili kümesel ısı transfer katsayısı $h_{küme}$ Eş. 5.3'de verilmiştir [3].

$$h_{küme} = \left(\frac{4k_{küme} \rho_{küme} c_{küme}}{\pi \cdot t_{küme}} \right)^{0,5} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.3)$$

Eş. 5.3 deki $k_{küme}$ (partikül kümelerinin ortalama ısı iletim katsayısı) için Gelperin ve Einstein tarafından önerilen eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$k_{küme} = k_{gaz} \left(1 + \frac{(1 - \varepsilon_{küme})(1 - k_{gaz}/k_{partikül})}{(k_{gaz}/k_{partikül}) + 0,28 \cdot \varepsilon_{küme}^{0,63} (k_{partikül}/k_{gaz})^{0,18}} \right) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.4)$$

Eş. 5.3 deki partikül kümelerinin özgül ısısı $c_{k\ddot{u}me}$ için verilen eşitlik aşağıda gösterilmiştir [4].

$$c_{k\ddot{u}me} = (1 - \varepsilon_{k\ddot{u}me})c_{partik\ddot{u}l} + \varepsilon_{k\ddot{u}me} \cdot c_{gaz} \quad [j / kg \ K] \quad (5.5)$$

Kümelerin hacimsel boşluk kesrinin belirlenmesinde, Lints ve Glicksman tarafından kullanılan korelasyon aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_{k\ddot{u}me} = \left[1 - 1,23(1 - \varepsilon_{ortalama})^{0,54} \right] \quad (5.6)$$

Duvar ile partikül kümeleri arasındaki ısı transferinin (Eş. 5.3) hesaplanması için gerekli olan partikül kümelerinin yoğunluğu aşağıda verilmektedir [3].

$$\rho_{k\ddot{u}me} = (1 - \varepsilon_{k\ddot{u}me})\rho_{partik\ddot{u}l} + \varepsilon_{k\ddot{u}me} \cdot \rho_{gaz} \quad [kg / m^3] \quad (5.7)$$

Partikül kümelerinin duvar ile temas zamanı $t_{k\ddot{u}me}$ aşağıda verilmiştir [3].

$$t_{k\ddot{u}me} = L_{k\ddot{u}me} / U_{k\ddot{u}me} \quad [s] \quad (5.8)$$

Burada $U_{k\ddot{u}me}$, partikül kümelerinin hızını tanımlanmakta ve Glicksman tarafından önerilen aşağıdaki korelasyon kullanılarak hesaplanmaktadır [5].

$$U_{k\ddot{u}me} = 0,75 \sqrt{g \cdot d_{partik\ddot{u}l} \frac{\rho_{partik\ddot{u}l}}{\rho_{gaz}}} \quad [m / s] \quad (5.9)$$

Wu ve arkadaşları tarafından tanımlanan partikül kümelerinin karakteristik uzunluğu $L_{k\ddot{u}me}$ (Eş. 5.8) (duvar ile temas uzunluğu) aşağıdaki gibi hesaplanabilir [5].

$$L_{k\ddot{u}me} = 0,0178 \cdot \rho_{suspansiyon}^{0,596} \quad [m] \quad (5.10)$$

Duvar ile partikül kümeleri arasında bulunan, taşınımli ısı transferi ısıl direncini oluşturan, ince gaz tabakasından(δ_{gaz}) iletimle ısıtma yüzeyinden ulaşan ısıнын taşınımsal eşdeğeri h_w için aşağıdaki korelasyon yazılabilir [6].

$$h_w = \frac{k_{gaz}}{\delta_{gaz} \cdot d_{partikül}} \quad [W/m^2K] \quad (5.11)$$

Burada δ_{gaz} , duvar ile partikül kümeleri arasında oluşan boyutsuz gaz tabaka kalınlığıdır. Lints ve Glicksman'ın boyutsuz gaz tabaka kalınlığı için önerdiği korelasyon aşağıdaki gibidir.

$$\delta_{gaz} = \xi \cdot c'' = 0.0282 \cdot (1 - \varepsilon_{ortalama})^{-0.59} \quad (5.12)$$

Isıtma yüzeyine olan, yırtmasal etkili kümesel ısı transferi ve ince gaz tabakasından (δ_{gaz}) iletimle gerçekleşen ısı transferinin, toplam eşdeğer taşınım katsayısının (h_{pc}) hesabında aşağıdaki eşitlik kullanılır;

$$h_{pc} = \left[\frac{1}{h_{küme}} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} \quad [W/m^2K] \quad (5.13)$$

Eş. 5.3 ve 5.11, Eş. 5.13'de yerine konulursa, ısıtma yüzeyi ile kümesel dolaşımli akım arasındaki bileşkesel taşınım ısı transferi katsayısı h_{pc} veya ısıtma yüzeyinden yatağa olan toplam ısı transferine katkısı, aşağıdaki biçimi alır.

$$h_{pc} = \frac{1}{\left(\frac{\pi t_{küme}}{4k_{küme} \rho_{küme} c_{küme}} \right)^{0.5} + \frac{\delta \cdot d_{partikül}}{k_{gaz}}} \quad [W/m^2K] \quad (5.14)$$

Yukarı akışlı dağılmış fazın ısıtma yüzeyinden yatağa olan ısı transferine katkısının hesabı (h_{gc})

Isıtma yüzeyi bitişiğindeki, yukarı akışlı çok seyreltilmiş gaz-partikül akım ile yatağa olan taşınım ısı transferi, gaz ısı transferi biçiminde ele alınabilir. Wen ve Miller aşağıdaki korelasyonu önermiştir [6].

$$h_{gc} = \frac{k_{gaz} \cdot c_{partikül}}{d_{partikül} \cdot c_{gaz}} \left(\frac{\rho_{seyrekfaz}}{\rho_{partikül}} \right)^{0,3} \left(\frac{U_{terminal}^2}{g \cdot d_{partikül}} \right)^{0,21} \cdot Pr \quad [W/m^2K] \quad (5.15)$$

Isıtma yüzeyi bitişiğindeki seyreltilmiş faz akımının prandtl sayısı, yerine gaz (hava) prandtl sayısı kullanılır(Eş. 5.16).

$$Pr = c_{gaz} \cdot \mu_{gaz} / k_{gaz} \quad (5.16)$$

Dağılmış partiküllerden oluşan seyrek fazın yoğunluğu ($\rho_{seyrekfaz}$) Eş. (5.17) den bulunabilir.

$$\rho_{seyrekfaz} = \rho_{partikül} \cdot Y + \rho_{gaz} \cdot (1 - Y) \quad [kg / m^3] \quad (5.17)$$

Yukarıdaki eşitlikte Y, dağılmış partiküllerden oluşan seyrek faz içersindeki partiküllerin hacimsel konsantrasyonunu ifade etmektedir. Bu değer Basu tarafından % 0,001 olarak önerilmektedir [6]. Bu partikül konsantrasyonundaki iki fazlı akım davranışı, tek fazlı akım davranışına yakın özellik gösterir.

Dolaşımlı partikül ve dağılmış faz akımları ile ısıtılmış yüzey arasındaki radyasyon ısı transferlerinin toplam ısı transferine katkısının hesabı (h_{rtop})

Akışkan yatakta radyasyon ısı transferi, yatak sıcaklığının $>700^\circ C$ üzerinde olduğu durumlarda önem kazanmaktadır. Bu ısı transferi; partikül kümeleri - duvar arası

radyasyon ısı transferi ($h_{rküme}$) ile dağılmış partiküllerden oluşan seyrek faz - duvar arası radyasyon ısı transferinin ($h_{rseyrek}$), sürtünme katsayısı f üzerinden bileşkelendirilmeleri ile toplam radyasyon ısı transferi katkısı h_{rtop} aşağıdaki gibi hesaplanır [6].

$$h_{rtop} = f \cdot h_{rküme} + (1-f) h_{rseyrek} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.18)$$

Partikül kümeleri ile duvar arasındaki radyasyon ile ısı transferi ($h_{rküme}$), partikül küme sıcaklığında ve ısıtma yüzeyi sıcaklığında, iki paralel yüzey arasındaki basitleştirilmiş ışıma mekanizması yardımıyla aşağıdaki biçimde hesaplanabilir [6].

$$h_{rküme} = \frac{\sigma(T_{du\ var}^4 - T_{yatak}^4)}{\left[\left(\frac{1}{e_{küme}} \right) + \left(\frac{1}{e_{du\ var}} \right) - 1 \right] (T_{du\ var} - T_{yatak})} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.19)$$

Grace tarafından verilen, kümelerin emisivitesinin ($e_{küme}$) hesaplanması ile ilgili korelasyon aşağıda verilmiştir [7].

$$e_{küme} = 0,5(1 + e_{partikül}) \quad (5.20)$$

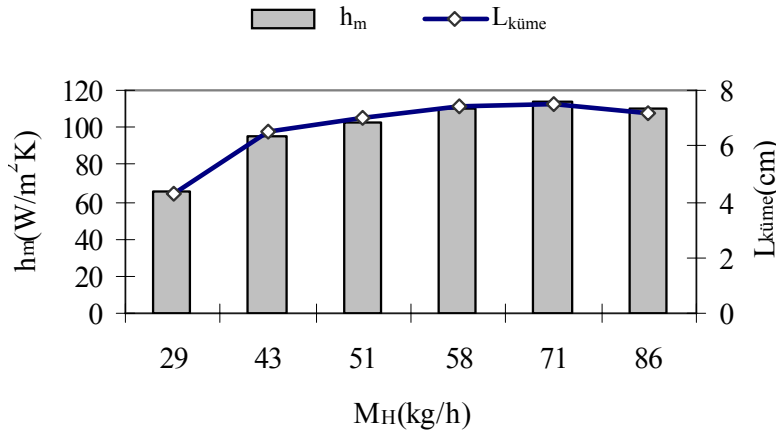
Dağılmış partiküllerden oluşan seyrek faz ile ısıtma yüzeyi arasındaki, ışımaya eşdeğer ısı transferi katsayısı ($h_{rseyrek}$), yine iki paralel yüzey arasındaki ısı radyasyon gibi düşünülerek hesaplanabilir [6].

$$h_{rseyrek} = \frac{\sigma(T_{du\ var}^4 - T_{yatak}^4)}{\left[\left(\frac{1}{e_{seyrekfaz}} \right) + \left(\frac{1}{e_{du\ var}} \right) - 1 \right] (T_{du\ var} - T_{yatak})} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5.21)$$

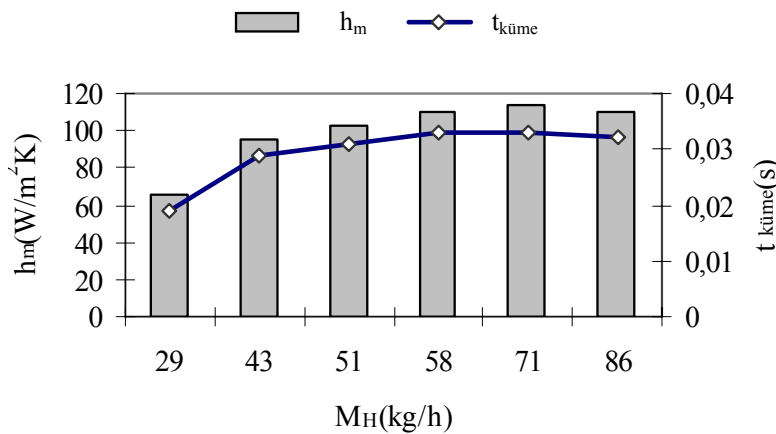
5.4. Yenilenen Küme Modeli İle Isı Transfer Katsayılarının Hesabı

5.4.1. Partikül kümelerinin ısıtma yüzeyi ile temas boyu ve zamanının model ısı transfer katsayısına etkisi

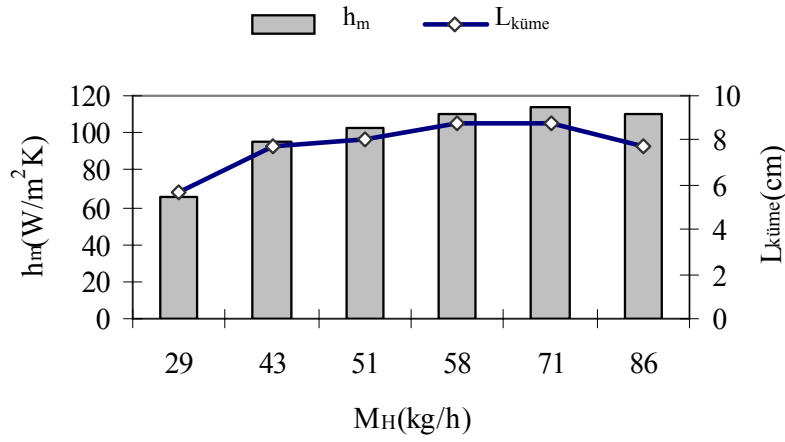
Isıtma yüzeyi boyunca kümelenmiş partiküller, yerçekimi etkisiyle aşağı doğru yoğun faz bölgesine doğru sürüklenirken zaman zaman gaz sınır tabakasını yırtarak ısıtma yüzeyi ile temasa geçerler. Temas boyu($L_{k\ddot{u}me}$) ve temas zamanının($t_{k\ddot{u}me}$) artması ile ısı transfer katsayısı da artmaktadır (Şekil 5.3.-Şekil 5.8).



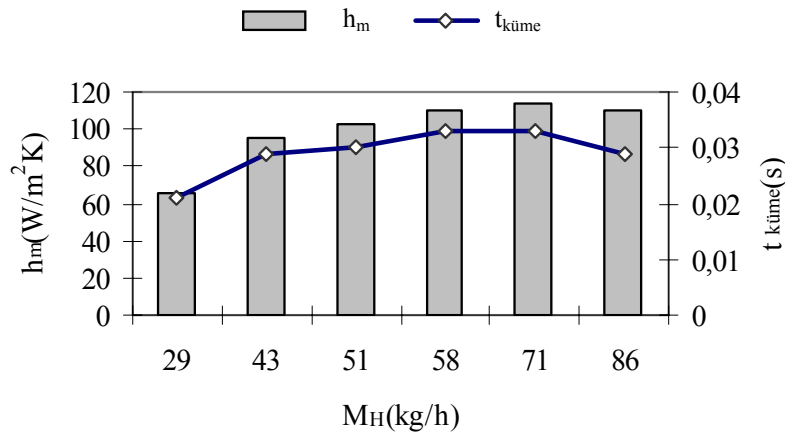
Şekil 5.3. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_H) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 247 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ C$)



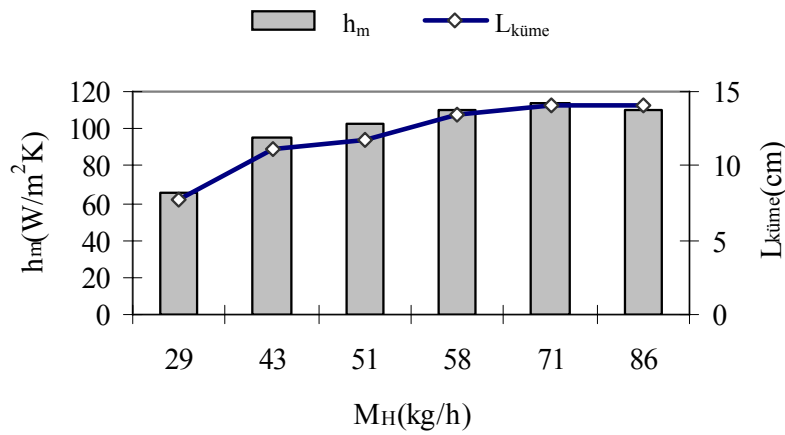
Şekil 5.4. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı($t_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_H) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 247 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ C$)



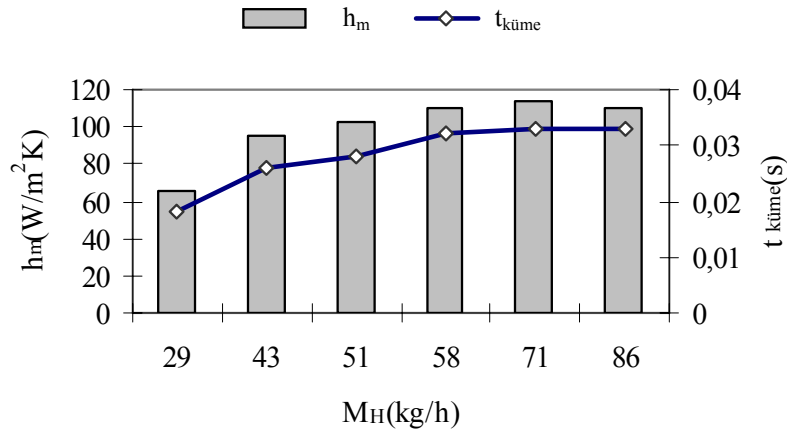
Şekil 5.5. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_H) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 5.6. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı ($t_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_H) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



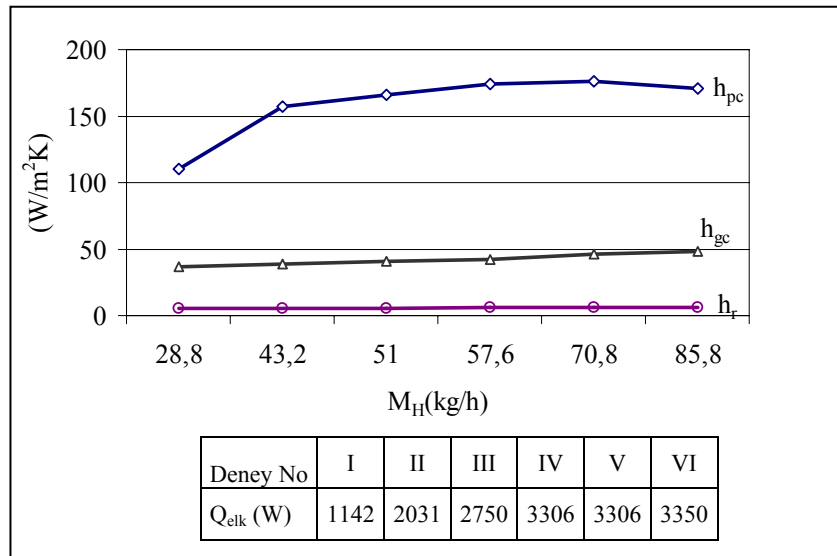
Şekil 5.7. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas boyu($L_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_H) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 5.8. Model ısı transfer katsayısı(h_m)'nın temas zamanı ($t_{k\ddot{u}me}$) ve hava debisi (M_h) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ C$)

5.4.2. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc}, h_{gc}, h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısı

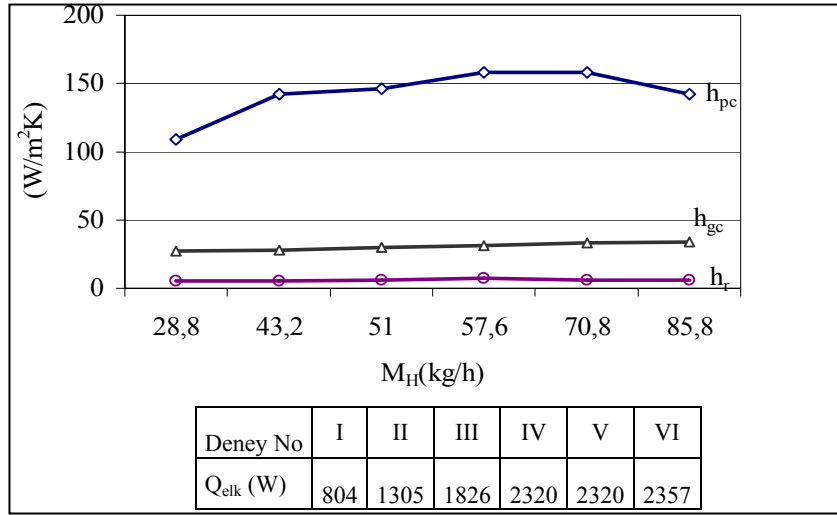
Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc}, h_{gc}, h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısı Şekil 5.9-Şekil 5.11' de gösterilmiştir.



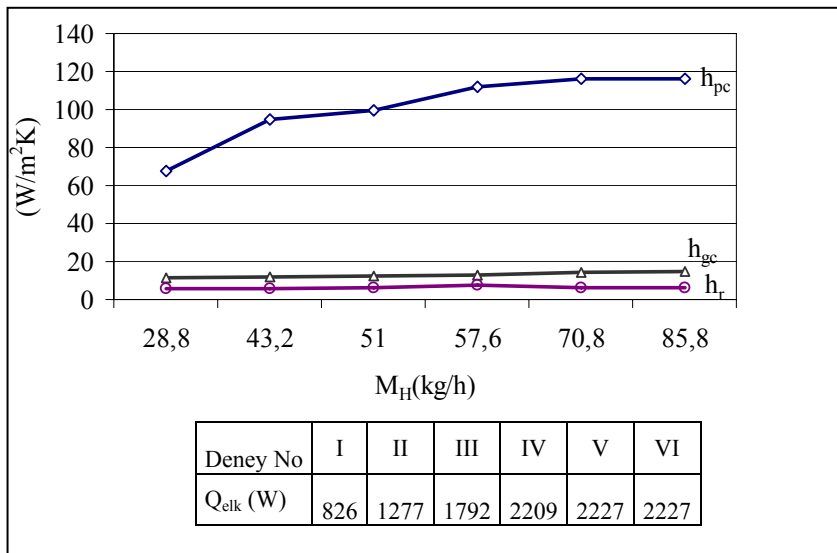
Şekil 5.9. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc}, h_{gc}, h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 247 \mu m$, $T_y = 300 \text{ }^\circ C$)

Yırtmasal etkili kümesel ısı transferi ve ince gaz tabakasından (δ_{gaz}) iletimle gerçekleşen ısı transferinin toplam eşdeğer taşınım katsayısı h_{pc} 'nin, toplam ısı

transfer katsayısına katkı değerinin, yukarı akışlı seyrelmiş veya dağılmış faz akımının oluşturduğu taşınımlı gaz ısı transferi h_{gc} ve toplam radyasyon h_{rtop} ısı transferi bileşenlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.10. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc} , h_{gc} , h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 350 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 5.11. Isı transfer bileşenlerinin (h_{pc} , h_{gc} , h_r) toplam ısı transfer katsayısına katkısının hava debisi (M_h) ve elektrik yükü (Q_{elk}) ile değişimi (silis kumu, $d_p = 690 \mu m$, $T_y = 300^\circ C$)

5.4.3. DAY'ta Isı Transferi Katsayıları

Isı transfer hesaplarının sonuçları Çizelge 5.1 ile 5.18 arasında verilmiştir.

Çizelge 5. 1. Silis kumu ($d_p = 247\mu\text{m}$, $T_Y = 55^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,263	0,433	0,472	0,490	0,486	0,452
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	68,643	140,863	159,316	168,443	166,201	149,717
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,036	0,068	0,077	0,081	0,080	0,072
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,020	0,038	0,042	0,045	0,044	0,040
$h_{pc}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	83,130	154,898	170,342	177,619	175,853	162,434
$h_{gc}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	40,217	41,579	42,844	44,027	46,996	48,145
$h_{rtop}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	0,039	0,045	0,054	0,057	0,057	0,059

Çizelge 5. 2. Silis kumu ($d_p = 350\mu\text{m}$, $T_Y = 55^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,293	0,476	0,527	0,545	0,545	0,516
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	79,909	161,639	187,228	196,536	196,536	181,389
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,040	0,078	0,091	0,095	0,095	0,088
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,019	0,036	0,042	0,044	0,044	0,041
$h_{pc}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	72,667	138,027	155,959	162,223	162,223	151,962
$h_{gc}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	29,108	30,094	31,009	31,865	34,015	34,846
$h_{rtop}(\text{W/m}^2 \text{ K})$	0,040	0,047	0,057	0,059	0,059	0,061

Çizelge 5.3. Silis kumu ($d_p = 690\mu\text{m}$, $T_Y = 55\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,419	0,536	0,612	0,627	0,649	0,649
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	134,234	191,602	232,758	241,079	253,119	253,119
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,065	0,093	0,114	0,118	0,125	0,125
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,019	0,027	0,033	0,035	0,036	0,036
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	54,533	77,950	94,266	97,514	102,184	102,184
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	11,945	12,349	12,725	13,076	13,958	14,299
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	0,045	0,052	0,063	0,066	0,066	0,066

Çizelge 5 .4. Silis kumu ($d_p = 247\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,320	0,426	0,448	0,465	0,470	0,458
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	90,436	137,160	147,441	155,957	158,318	152,357
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,043	0,065	0,070	0,074	0,075	0,072
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,019	0,029	0,031	0,033	0,033	0,032
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	110,279	157,383	166,779	174,325	176,381	171,161
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	37,655	39,573	41,295	42,864	46,665	48,093
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,132	5,313	5,689	5,990	5,999	6,148

Çizelge 5. 5. Silis kumu ($d_p = 350\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,389	0,477	0,489	0,521	0,521	0,477
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	120,360	161,805	167,476	183,585	183,585	161,805
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,057	0,077	0,080	0,088	0,088	0,077
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,021	0,029	0,030	0,033	0,033	0,029
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	109,437	142,335	146,608	158,467	158,467	142,335
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	27,365	28,758	30,010	31,150	33,912	34,950
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,143	5,352	5,744	7,331	6,034	6,227

Çizelge 5.6. Silis kumu ($d_p = 690\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,482	0,608	0,631	0,685	0,704	0,704
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	164,093	230,249	242,735	273,629	284,469	284,469
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,078	0,112	0,118	0,135	0,141	0,141
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,018	0,026	0,028	0,032	0,033	0,033
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	67,669	94,733	99,737	111,975	116,221	116,221
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	11,419	12,001	12,523	12,999	14,152	14,585
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,573	5,661	6,168	7,626	6,156	6,156

Çizelge 5.7. Çelik tozu ($d_p = 279\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,345	0,436	0,436	0,436	0,442	0,423
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	294,749	415,051	415,051	415,051	423,993	396,654
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,086	0,124	0,124	0,124	0,127	0,118
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,021	0,030	0,030	0,030	0,031	0,029
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	120,184	165,660	165,660	165,660	168,910	158,918
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	32,123	36,237	39,480	42,199	48,197	50,305
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,024	5,469	5,988	6,299	6,245	6,383

Çizelge 5.8. Çelik tozu ($d_p = 403\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,392	0,496	0,506	0,508	0,511	0,501
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	356,009	500,446	515,635	518,841	523,088	508,089
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,105	0,152	0,157	0,158	0,159	0,154
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,021	0,031	0,032	0,032	0,032	0,031
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	105,333	146,561	150,778	151,665	152,838	148,686
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	22,786	25,704	28,004	29,933	34,187	35,683
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,066	5,518	6,043	6,358	6,302	6,365

Çizelge 5.9. Çelik tozu ($d_p = 615\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,456	0,567	3,194	0,583	0,591	0,721
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	442,633	608,234	7584,750	633,831	647,187	863,849
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,133	0,188	3,019	0,196	0,201	0,275
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,022	0,031	0,501	0,033	0,033	0,046
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	91,947	126,289	#SAYI!	131,511	134,226	177,357
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	15,584	17,580	19,153	20,472	23,382	24,405
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,106	5,563	6,718	6,409	6,356	6,228

Çizelge 5. 10. Bakır tozu ($d_p = 299\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,425	0,524	0,535	0,539	0,588	0,570
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	457,436	619,432	639,676	646,633	733,679	701,080
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,129	0,179	0,185	0,188	0,215	0,205
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,028	0,039	0,041	0,041	0,047	0,045
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	153,090	202,166	208,052	210,062	234,708	225,587
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	29,988	34,247	37,537	40,265	46,221	48,300
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	4,854	5,306	5,856	6,056	5,851	5,855

Çizelge 5.11. Bakır tozu ($d_p = 428\mu\text{m}$, $T_Y = 300^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,482	0,584	0,598	0,607	0,655	0,649
$\rho_{\text{küme}} (\text{kg/m}^3)$	548,182	726,543	752,137	767,656	858,020	846,292
$L_{\text{küme}} (\text{m})$	0,157	0,213	0,221	0,226	0,256	0,252
$t_{\text{küme}} (\text{s})$	0,029	0,039	0,041	0,042	0,047	0,046
$h_{\text{pc}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	134,861	176,489	182,305	185,813	205,959	203,370
$h_{\text{gc}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	21,408	24,448	26,797	28,744	32,996	34,480
$h_{\text{rtop}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	4,890	5,347	5,902	6,104	5,898	5,875

Çizelge 5.12. Bakır tozu ($d_p = 612\mu\text{m}$, $T_Y = 300^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,551	0,663	0,693	0,701	0,770	0,774
$\rho_{\text{küme}} (\text{kg/m}^3)$	667,133	874,215	932,977	948,072	1087,217	1096,081
$L_{\text{küme}} (\text{m})$	0,194	0,261	0,280	0,285	0,331	0,334
$t_{\text{küme}} (\text{s})$	0,030	0,040	0,043	0,044	0,051	0,051
$h_{\text{pc}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	119,947	156,510	166,693	169,295	193,022	194,518
$h_{\text{gc}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	15,193	17,351	19,018	20,400	23,417	24,471
$h_{\text{rtop}} (\text{W/m}^2 \text{ K})$	4,955	5,420	5,985	6,190	5,963	5,934

Çizelge 5.13. Alüminyum tozu ($d_p = 262\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,446	0,565	0,566	0,566	0,621	0,607
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	152,747	215,542	215,914	215,914	247,325	238,908
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,071	0,102	0,102	0,102	0,118	0,114
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,030	0,043	0,043	0,043	0,050	0,048
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	160,725	210,074	210,343	210,343	232,135	226,457
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	35,607	37,489	39,172	40,703	44,396	45,779
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	4,930	5,394	5,896	5,896	5,954	6,040

Çizelge 5.14. Alüminyum tozu ($d_p = 432\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,535	0,656	0,659	0,662	0,716	0,705
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	198,847	267,372	269,691	271,228	304,043	297,019
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,094	0,129	0,130	0,131	0,148	0,144
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,031	0,042	0,043	0,043	0,049	0,047
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	141,669	182,624	183,941	184,811	202,972	199,151
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	22,478	23,665	24,728	25,694	28,026	28,899
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	4,970	5,439	6,029	6,318	6,031	6,095

Çizelge 5.15. Alüminyum tozu ($d_p = 623\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,599	0,751	0,754	0,764	0,851	0,851
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	234,602	325,644	327,606	334,077	390,941	390,941
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,112	0,159	0,161	0,164	0,195	0,195
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,031	0,044	0,044	0,045	0,053	0,053
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	124,260	167,295	168,187	171,116	196,231	196,231
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	15,940	16,783	17,536	18,221	19,875	20,494
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,017	5,497	6,091	6,386	6,104	6,104

Çizelge 5.16 Kum ($d_p = 284\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,266	0,345	0,383	0,398	0,402	0,367
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	60,640	88,587	103,071	108,973	110,407	96,864
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,032	0,045	0,052	0,055	0,055	0,049
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,014	0,020	0,023	0,024	0,024	0,021
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	76,214	108,364	123,820	129,895	131,351	117,293
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	33,372	34,876	36,242	37,497	40,572	41,738
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	5,894	5,800	6,206	6,535	6,623	6,699

Çizelge 5.17. Kum ($d_p = 390\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,321	0,387	0,454	0,470	0,476	0,454
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	79,586	104,573	131,499	138,693	141,021	131,499
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,040	0,052	0,066	0,070	0,071	0,066
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,015	0,020	0,025	0,026	0,027	0,025
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	76,204	98,719	121,563	127,427	129,304	121,563
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	24,946	26,070	27,091	28,030	30,329	31,200
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	6,057	5,855	6,265	6,596	6,701	6,781

Çizelge 5.18 Kum ($d_p = 677\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için model sonuçları

Deney No Parametre	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
f	0,456	0,497	0,575	0,593	0,605	0,605
$\rho_{k\ddot{u}me}(\text{kg/m}^3)$	132,721	150,022	185,861	193,926	200,006	200,006
$L_{k\ddot{u}me}(\text{m})$	0,067	0,076	0,095	0,099	0,103	0,103
$t_{k\ddot{u}me}(\text{s})$	0,016	0,019	0,023	0,025	0,025	0,025
$h_{pc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	60,845	68,845	85,161	88,783	91,501	91,501
$h_{gc}(\text{W/m}^2\text{ K})$	11,266	11,774	12,235	12,659	13,697	14,090
$h_{rtop}(\text{W/m}^2\text{ K})$	6,244	6,123	6,451	6,707	6,780	6,764

6.DENEYSEL VE TEORİK ISI TRANSFER SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI,MATEMATİKSEL MODELİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Deney programında verilen deney setlerindeki ısı transfer katsayıları ilgili deney koşulları dikkate alınarak yenilenen küme modeli yardımıyla (Eş.5.1) hesaplanmış, hesap sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

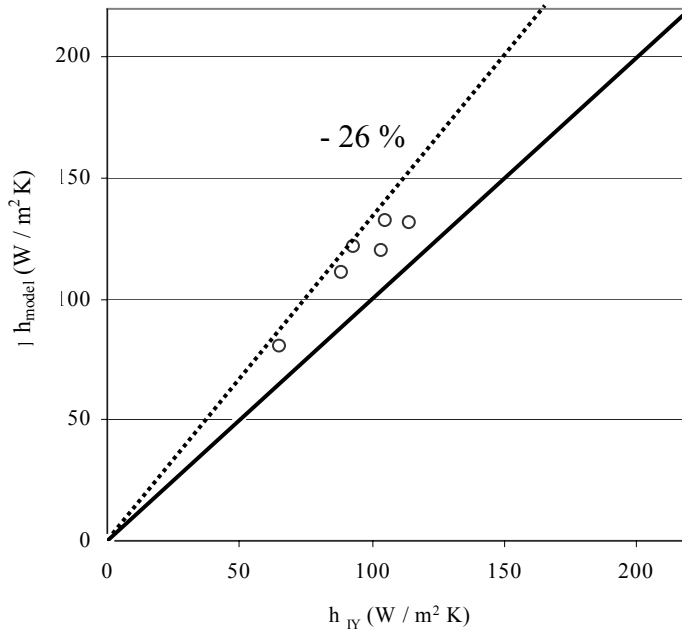
6.1.Deneysel ve Yenilenen Küme Model Isı Transfer Katsayısı Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 6.1.'de görüldüğü gibi, boyutsuz yoğunluk oranı (R) arttıkça, modeldeki hata oranında artmaktadır. Buradan görüldüğü gibi model sonuçları sistematik biçimde ölçülen sonuçların altında bulunmaktadır.Bu ise üssel model modifikasyonunun yapılmasının gerekli olduğunu göstermektedir.

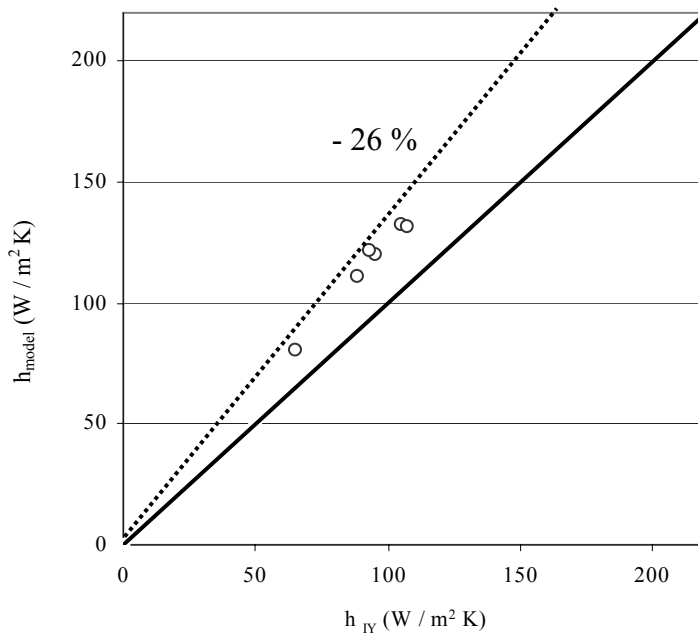
Çizelge 6.1. Isı transfer modelinin yatak malzemesine göre hata oranı değişimi

Parametre Yatak Malzemesi	Yoğunluk Oranı $R(\rho_p/\rho_g)$	Deneysel Isı Transfer Katsayısı $h_{iy}(W/m^2K)$	Teorik Isı Transfer Katsayısı $h_{model}(W/m^2K)$	Sapma Oranı (%)	Ortalama Sapmalar (%)
Kum	3269	51-106	40-76	18-28	23
Silis Kumu	3736	60-139	44-111	20-26	23
Alüminyum Toz	3892	112-209	86-161	11-24	17,5
Çelik Tozu	10969	95-161	55-103	23-41	32
Bakır Tozu	12533	145-252	87-162	35-42	38,5

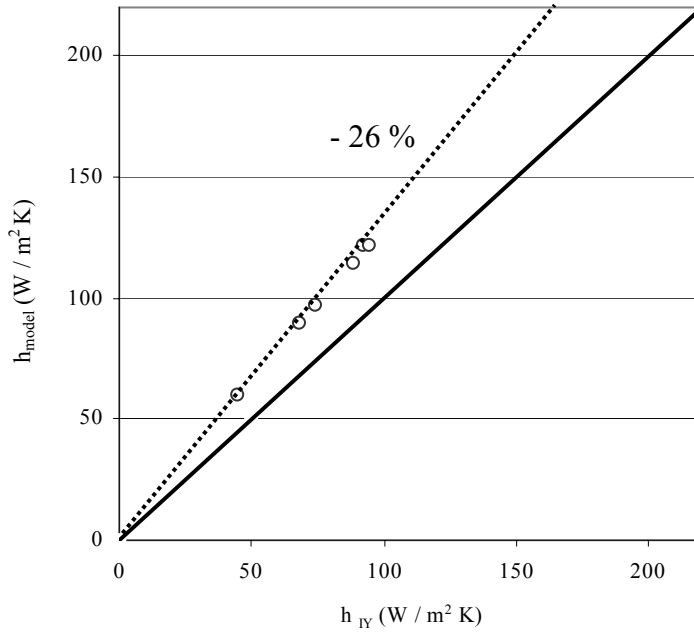
Yoğunluk oranı R, yatak basınç düşümünü, süspansiyon yoğunluğunu dolayısıyla da yatak hidrodinamiğini etkilemektedir. $R < 10.000$ için ölçümlerde sapma oranı % 11-28 arasında iken, $R > 10.000$ için ise bu oran % 23-42 arasında değişmektedir. Şekil 6.1. - Şekil 6.3. arasında silis kumu için çeşitli tane boyutlarında hesaplanan ısı transferi katsayılarının ölçülenlerden sapmaları gösterilmiştir. Silis kumu için, maksimum sapma oranının -% 26 olduğu görülmektedir. Tane boyutu arttıkça sapma oranlarındaki değerler -% 26 doğrusu üzerine kaymaktadır.



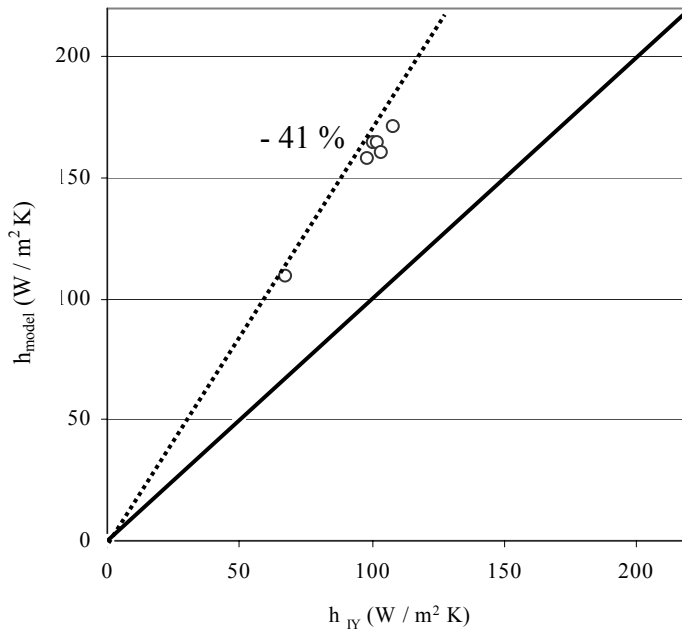
Şekil 6.1. Deneysel elde edilen ısı transferi katsayılarının ($h_{İY}$) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p=247\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



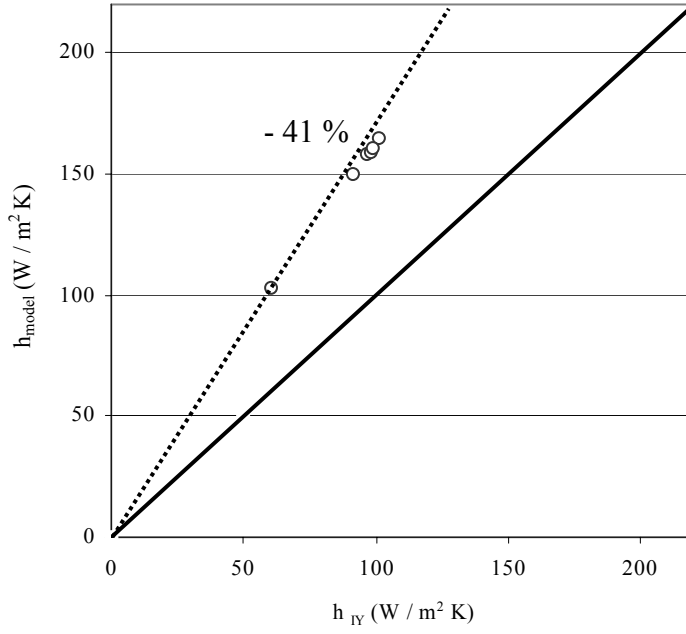
Şekil 6.2. Deneysel elde edilen ısı transferi katsayılarının ($h_{İY}$) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p=350\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



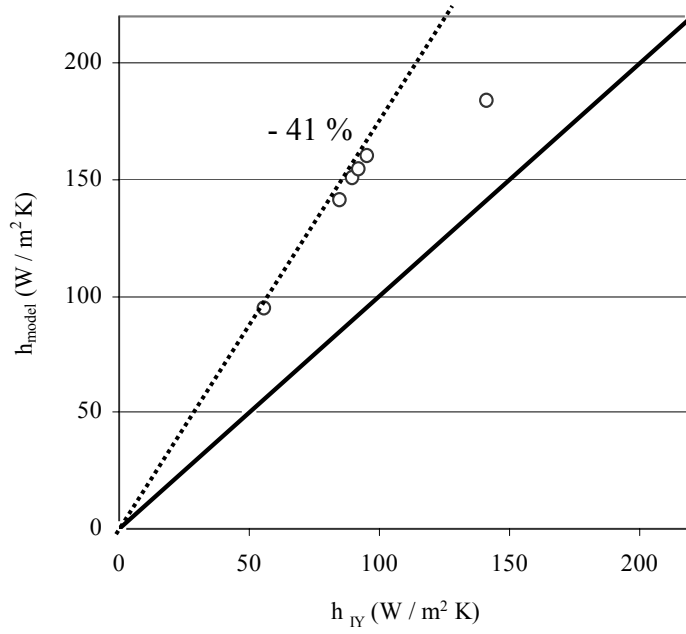
Şekil 6.3. Deneyssel elde edilen ısı transferi katsayılarının ($h_{İY}$) teorik hesap sonuçları (h_{model}) ile karşılaştırılması (silis kumu, $d_p=690\mu\text{m}$, $T_y = 300^\circ\text{C}$)



Şekil 6.4. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması (çelik tozu, $d_p=279\mu\text{m}$, $T_y = 300^\circ\text{C}$)



Şekil 6.5. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması
(çelik tozu, $d_p=403\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)



Şekil 6.6. Deney sonuçlarının ısı transfer modeli ile karşılaştırılması
(çelik tozu, $d_p=615\mu m$, $T_y = 300^\circ C$)

Çelik tozu için, ölçümlerin yapıldığı tane boyutu bölgesinde maksimum sapma oranı -% 41 dolayındadır. Burada da silis tozunda olduğu gibi, tane boyutu arttıkça sapma oranları maksimum sapma oranı olan -% 41 eğrisi üzerine doğru kaymaktadır.

Bu araştırmalardan çıkan sonuç; literatürde verilen yenilenen küme modeli ile hesaplanan ısı transfer katsayıları sistematik olarak ölçülen değerlerin altında bulunmaktadır. Bu sapma, yatak malzemesinin türüne (silis kumu, kum, alüminyum tozu, bakır tozu ve çelik tozu) ve tane boyutuna göre değişmektedir.

Düşük yoğunluk oranına sahip malzemelerin (silis kumu, kum ve alüminyum tozları) sapma oranları ile yüksek yoğunluk oranına sahip (bakır tozu ve çelik tozu) yatak malzemelerinin sapma oranlarının kendi aralarında bir sapma eğrisi üzerinde kümeleştikleri görülmektedir.

Hesap sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında, düşük yoğunluktaki yatak (silis kumu, kum, alüminyum tozu) durumunda ortalama % 22, yüksek yoğunluklu yatak (bakır, çelik tozu) durumunda ise ortalama % 36 'lık sistematik bir sapma görülmüştür (Bölüm 6, Çizelge 6.1). Ölçme hataları da dikkate alınırsa gerçek durumdan bileşkesel sapma, düşük yoğunluklu yatak için % 30, yüksek yoğunluklu yatak için ise % 43 dolayındadır.

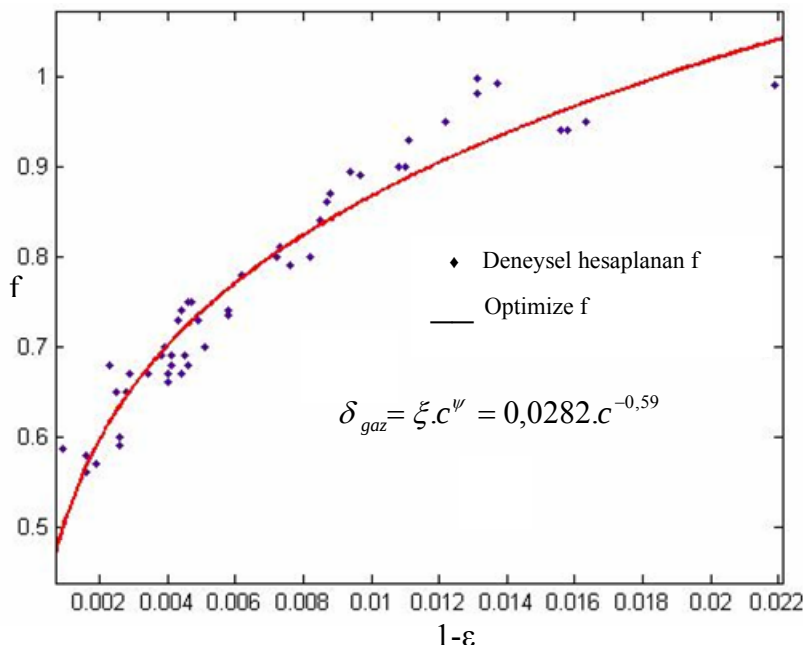
Bu nedenle literatürde akışkan yatak malzemeleri için genel biçimde verilen yenilenen küme modeli ısı transferi hesaplama korelasyonlarının, düşük ve yüksek yoğunluklu yatak malzemesi grupları için ayrı ayrı modifikasyonlarının uygun olacağı görülmektedir. Yukarıda ki veriler kullanılarak üssel modifiye edilmiş yeni denklemler Bölüm 6.2 'de türetilecektir.

6.2. Yenilenen Küme Modelinin İyileştirilmesi

Deneysel ve teorik çözümleme ile aynı koşullarda elde edilen ısı transferi katsayıları Bölüm 6.1’de grafikler biçiminde karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde görüldüğü gibi düşük yoğunluk oranına sahip silis kumu, kum, alüminyum tozu ile ilgili yataklarda teorik olarak hesaplanan ısı transfer katsayıları deneysel olarak belirlenenlerin sürekli ve sistematik biçimde altında olup sapma oranı kum, silis kumu ve alüminyum tozu için ortalama %22’dir. Çelik ve bakır tozları için ise sapma oranı ortalama % 36’dır. (Çizelge 6.1). Bu nedenle yenilenen küme modelinin üssel modifikasyonu ile söz konusu model deney sonuçlarını en az sapma ile doğrudan verebilecek hale getirilebilir. Kazanlarda akışkan yatak malzemesi olarak genelde kömürün yanmasıyla oluşan kül kullanılır. Kömür kül analizlerinden, külün tamamına yakını silisyum, kalsiyum, potasyum, magnezyum vb. gibi toprak alkali metaller ile çok düşük oranlarda alüminyum, demir, bakır vb. metallere oluşur. Bu nedenle düşük yoğunluk oranına sahip kum, silis kumu, alüminyum grubu için ve yüksek yoğunluk oranına sahip bakır ve çelik tozları için iki ayrı iyileştirilmiş yenilenen küme modeli korelasyonları elde edilebilir. DAY’ta duvarsal ısıtma yüzeyi ile yatak arasındaki ısı transferini belirleyen bileşenler olan partikül konveksiyonu, gaz konveksiyonu ve radyasyon ısı transfer katsayıları matematiksel modelde doğrudan deneyde kullanılan deneysel verilere bağlıdır. Bu veriler kümesel iletkenlik ($k_{k\ddot{u}me}$), kümesel yoğunluk ($\rho_{k\ddot{u}me}$), kümesel kesir($\epsilon_{k\ddot{u}me}$), gaz iletkenliği (k_{gaz}), partikül çapı (d_p), gaz özgül ısısı (c_{gaz}), gaz viskozitesi (μ_{gaz}), duvar sıcaklığı (T_{duvar}), yatak sıcaklığı (T_{yatak}), duvar ve kümesel emisivitelere, hızlara vb. verilere bağlıdır.

Toplam ısı transfer katsayısının matematiksel hesabında, partikül demetleri ile duvar yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı (f) ve duvar ile partikül kümeleri arasında oluşan gaz tabaka kalınlığı(δ_{gaz}) ısı transferini doğrudan etkilemekte, bunların deneysel verilerle bağıntısı bilinmemektedir. Literatürde verilen ısı transfer hesaplarında sürtünme katsayısı için $f = \alpha.c^\beta = 3,5.c^{0,37}$, $c = 1 - \epsilon$ ve gaz tabaka kalınlığı $\delta_{gaz} = \xi.c^\gamma = 0,0282.c^{-0,59}$, $c = 1 - \epsilon$ eşitlikleri verilmektedir. Literatürde

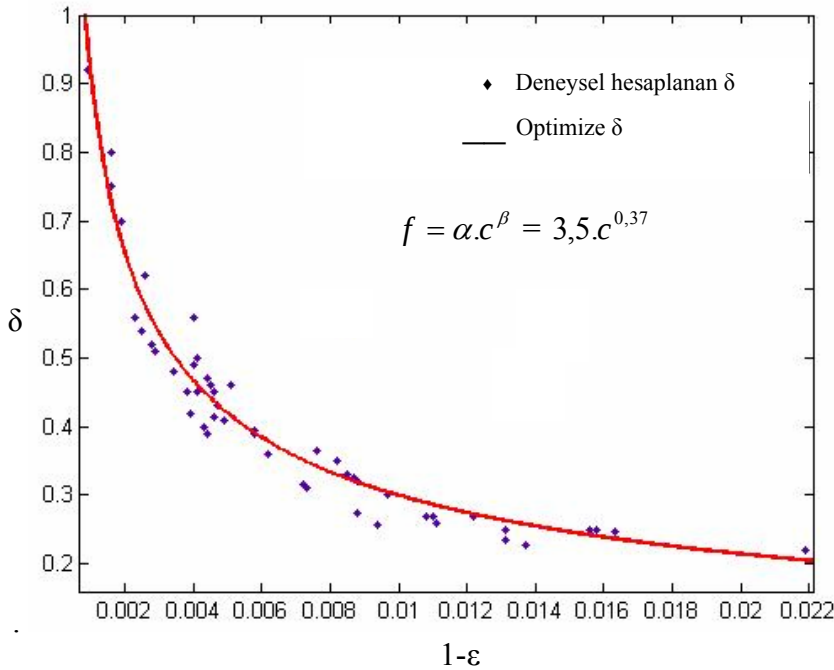
verilen yenilenen küme modelinin deneysel verileri en az sapma ile verebilmesi için ölçülen ısı transfer katsayıları kullanılarak belirlenecek sürtünme katsayısı ve gaz tabaka kalınlığı fonksiyonlarının belirlenip bunları tanımlayan nonlinear regresyon analizi ile ölçülen değerleri veren korelasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Eş. 5.1. kullanılarak ısı transfer bileşenleri h_{pc} , h_{gc} , h_{rtop} deneysel veriler yardımıyla hesaplanmış sürtünme katsayısı f 'in katı kesri $c = 1 - \varepsilon$ 'na göre değişimi hesaplanarak bulunmuştur(Şekil 6.7). Deneysel veriler ile elde edilen $f = f(c)$ eğrisine MATLAB 7.0 ve SPSS programları yardımıyla regresyon analizi ($R^2 = 0,893$) uygulanarak bu kümeleşmeyi en küçük sapma ile belirleyen üssel fonksiyon $f = \alpha.c^\beta = 2,525.c^{0,2322}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 6.7.Deneysel veriler yardımıyla elde edilen (f)'in katı kesri (c)'ye bağlı olarak değişimi ($R < 10.000$)

İlgili regresyon analizleri (curve fitting) üssel fonksiyonun iki haline ($a.x^b$ ve $a.x^b+c$) göre yapılmış, bu iki fonksiyon biçimine göre elde edilen korelasyon katsayıları birbirine çok yakın çıkmıştır. Literatürde Lints ve Glicksman'ın denklem tipine uygunluk açısından ($a.x^b$) tipi fonksiyon seçilmiş ve uygulanmıştır. Bu yaklaşımla elde edilen sürtünme ile ilgili üssel fonksiyonun katsayısı $\alpha = 2,525$ ve üssü

$\beta = 0,2322$ olarak elde edilmiştir. DAY'ta yatak ile duvarsal ısıtma yüzeyi arasındaki gaz tabakası kalınlığı partikül konveksiyonunu önemli bir şekilde etkilemektedir. Duvarda sürekli kümeleşen ve yenilenen partiküller ile duvar arasında partikül konveksiyonu bağlamında bir gaz tabakası oluşur. Bu gaz tabakasının partiküller tarafından yırtılması ile partikül konveksiyonu ile olan ısı transferi artar. Bu partikül gaz tabakası kalınlığı teorik ısı transferi analizleri için bilinmesi gerekir. Hesaplanan ısı transferi katsayılarının deneysel sonuçları en az sapmayla verebilmesi için bu tabaka kalınlığı ile ilgili üssel fonksiyonun deney verileri kullanılarak yeniden belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yine genel bileşkesel ısı transferi denklemi Eş. 5.1. kullanılarak ölçülen ısı transfer değeri h_{toplam} ve bileşkesel ısı transfer katsayıları h_{pc} , h_{gc} , h_{rtop} kullanılarak partikül konveksiyonu için baskın önemde olan partikül gaz tabakası kalınlığı(Eş. 5.14.) hesaplanmıştır. Deneysel veriler yardımıyla elde edilen (δ_{gaz}) 'ın katı kesri (c)'ye bağlı olarak değişimi Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Deneysel veriler yardımıyla elde edilen (δ_{gaz}) 'in katı kesri (c)'ye bağlı olarak değişimi ($R < 10.000$)

Şekil 6.8’de verilen deneysel veriler ile hesaplanan partikül gaz tabakası kalınlığı değerleri arasında regrasyon analizi kullanılarak δ_{gaz} ‘ı optimum biçimde en az sapmayla tanımlayan yeni üssel fonksiyon belirlenmiştir. Korelasyon katsayısı (denklemin açıklayıcılık yüzdesi veya belirleyicilik gücünü ifade eden belirtme katsayısı) $R^2 = 0,911$ olarak bulunmuştur. Literatürde verilen yenilenen kümesel modelin sonuçlarını en az sapma ile vermesine olanak sağlayan üssel fonksiyon aşağıdaki biçimi almaktadır.

$$\delta_{gaz} = \xi \cdot c^\psi = 0,0323 \cdot c^{-0,4837}, \quad c = 1 - \varepsilon$$

Yenilenen küme modelinin literatürde verilen ve bu çalışmada ölçüm sonuçlarını en az sapma ile veren biçimlerini belirleyen modelsel katsayılar ve üsler $R < 10000$ için Çizelge 6.2’de, $R > 10000$ için ise Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Modifiye edilen modele ait katsayılar ($R < 10.000$)

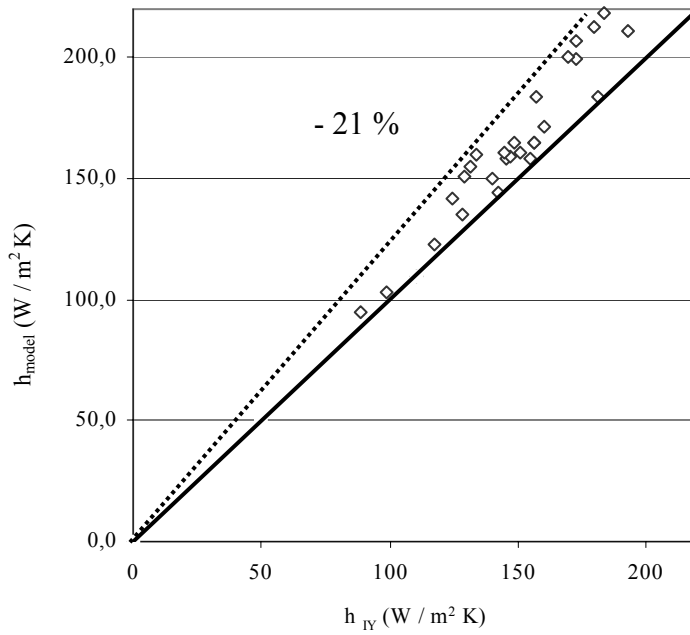
Model Parametresi	Katsayı	Literatürde verilen model değeri (Lints-Glicksman)	Yeni model değeri
Sürtünme katsayısı çarpanı	α	3,5	2,525
Sürtünme katsayısı üssü	β	0,37	0,2322
Gaz tabakası çarpanı	ξ	0,0282	0,0323
Gaz tabakası üssü	ψ	-0,59	-0,4837

Çizelge 6.3. Modifiye edilen modele ait katsayılar ($R > 10.000$)

Model Parametresi	Katsayı	Literatürde verilen model değeri (Lints-Glicksman)	Yeni model değeri
Sürtünme katsayısı çarpanı	α	3,5	1,674
Sürtünme katsayısı üssü	β	0,37	0,14
Gaz tabakası çarpanı	ξ	0,0282	0,0889
Gaz tabakası üssü	ψ	-0,59	-0,2843

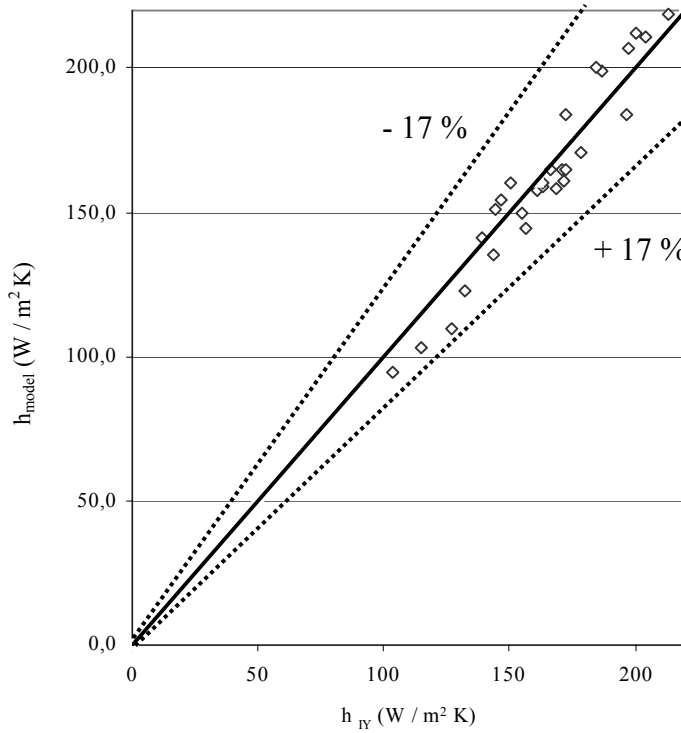
Deneysel çalışmalar sonucu düşük ve yüksek yoğunluk oranlarına sahip yatak malzemeleri için oluşturulan yeni veya yeniden düzenlenmiş yenilenen küme modeli ile elde edilen teorik ısı transfer sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yüksek yoğunluk oranlı ($R > 10000$) yatak malzemesi grubuna giren bakır ve çelik tozları için geçerli teorik – deneysel ısı transferi sapmaları ile ilgili olarak sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim (iyileştirme) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması Şekil 6.9’da, gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim (iyileştirme) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması da Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.9. Sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim (modifikasyon) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R > 10.000$)

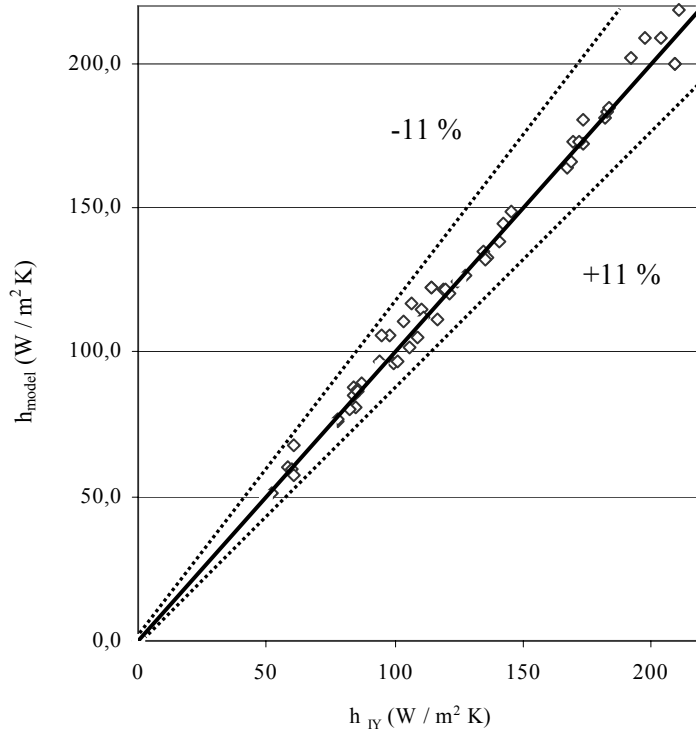
Yeni model ile hesaplanan ve deneysel olarak bulunan ısı transferleri arasındaki sapma $R > 10000$ için f ’e bağlı olarak $\pm \%21$, δ_{gaz} ’e bağlı olarak ise $\pm \%17$ aralığında bulunmaktadır. Literatürde verilen modelde ise bakır malzeme için maksimum sapma $\pm \%42$ bulunmuştur.



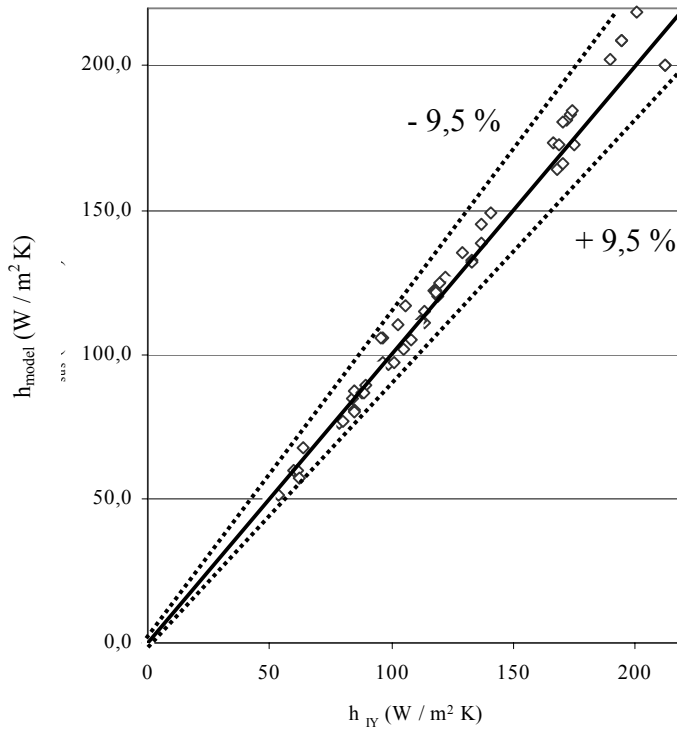
Şekil 6.10. Gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim (modifikasyon) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R > 10.000$)

Düşük yoğunluk oranlı ($R < 10000$) yatak malzemesi grubuna giren silis, kum ve alüminyum tozları için geçerli teorik – deneysel ısı transferi sapmaları ile ilgili olarak sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim (iyileştirme) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması Şekil 6.11’de, gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim (iyileştirme) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması da Şekil 6.12’de verilmiştir.

Yeni model ile hesaplanan ve deneysel olarak bulunan ısı transferleri arasındaki sapma $R < 10000$ için f ’e bağlı olarak $\pm 11\%$, δ_{gaz} ’e bağlı olarak ise $\pm 9,5\%$ aralığında bulunmaktadır. Literatürde verilen modelde ise kum malzeme için maksimum sapma $\pm 28\%$ bulunmuştur. Gaz tabakasına (δ_{gaz}) bağlı iyileştirilmiş modelin $R < 10.000$ için en az sapma oranını verdiği görülmektedir.



Şekil 6.11. Sürtünme katsayısına (f) bağlı sayısal değişim (modifikasyon) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R < 10.000$)



Şekil 6.12. Gaz tabakası kalınlığına (δ_{gaz}) bağlı sayısal değişim (modifikasyon) sonucu ısı transfer katsayısının karşılaştırılması ($R < 10.000$)

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Akışkan yataklı sistemlerde yanma, emisyon davranışı ve ısı transferi özellikleri doğrudan hidrodinamik parametrelere ve yatak çalışma rejimine bağlıdır. Akışkan yataklı yakma yöntemi, ızgaralı yakma sistemindeki (türbülanssız, sınırlı ısı depolu) ile toz kömür yakma sistemindeki (sınırlı türbülanslı) yakıt dinamik davranış bölgeleri arasındaki (yoğun türbülanslı, ısı depolu, emisyon tutma özellikli) bir yakma uygulamasıdır. DAY'ta yatağı çevreleyen ısıtma yüzeyinden, yatağa olan karmaşık ısı transferi mekanizmasının anlaşılabilir ve hesaplanabilir hale getirilebilmesi için, bu mekanizmanın tanımlanması ve kavranması ile ilgili bir model yaklaşımının ortaya konması gerekir. Bu çalışmada, akışkan yatak ile duvarda konumlanan ısıtma yüzeyi arasında ve yatak eksenine dikey konumlanan daldırma yüzeyi ile yatak arasındaki ısı transfer özellikleri, bu amaca yönelik tasarlanmış ve geliştirilmiş bir test sisteminde deneysel olarak incelenmiştir. Çeşitli yatak malzemeleri ve test koşullarında ısı transfer özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar sadece test koşullarındaki ısı transfer davranışını ifade ettiğinden, ölçüm sonuçlarının genel olarak tüm sistemlere uygulanabilirliğini sağlayacak matematiksel korelasyonların türetilmesi yoluna gidilmiştir. Bunun için DAY'ta fiziksel ısı transferi modelinin tanımlanmasında kullanılan matematiksel modellerden yararlanılmıştır. Günümüzde bu fiziksel davranışı en uygun biçimde tanımlayan model, literatürde “yenilenen küme modeli” olarak isimlendirilen modeldir. Bu çalışmada, deney tasarım ve işletme verileri modelin tanımlanmasında kullanılan boyutsuz parametreler biçimine dönüştürülmüş, modeli tanımlayan ve tanımında baskın olan üssel fonksiyonlar, ölçüm değerlerinin kullanıldığı regrasyon analizleri ile belirlenerek, “yenilenen küme modeli” ölçüm sonuçlarını minimum sapma ile ifade edebilecek biçime getirilmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen yeni korelasyonlar endüstriyel boyuttaki ısı transferi hesaplarında ve ısıtma yüzeylerinin boyutlandırılmasında kullanılabilir.

Isı transfer katsayılarının belirlenmesindeki sapma olasılıkları tasarım ve işletme parametrelerine olan duyarlılıkları hesaplanmış, ölçüm sonuçlarının bileşkesel sapma(hata) oranının $\pm\%10$ 'luk bir oranda olduğu görülmüştür. Yenilenen küme modeli korelasyonları literatürde verildiği biçimi ile test sistemi tasarım ve işletme

verileri ile kullanılarak, dış yüzey ile yatak arasındaki ısı transferi teorik olarak hesaplanmıştır. Boyutsuz yoğunluk oranı $R(\rho_p/\rho_g)$ katsayısı arttıkça model sonuçlarındaki hata oranının arttığı tespit edilmiştir(Bölüm 6, Çizelge 6.1). Yoğunluk oranı R , yatak basınç düşümünü, süspansiyon yoğunluğunu dolayısıyla da yatak hidrodinamiğini etkilemektedir. Hesap sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında, düşük yoğunluktaki yatak (silis kumu, kum, alüminyum tozu) durumunda ortalama % 22, yüksek yoğunluklu yatak (bakır, çelik tozu)durumunda ise ortalama % 36 ‘lık sistematik bir sapma görülmüştür(Bölüm 6, Çizelge 6.1). Ölçme hataları da dikkate alınırsa gerçek durumdan bileşkesel sapma, düşük yoğunluklu yatak için % 30, yüksek yoğunluklu yatak için ise % 43 dolayındadır. Yeni geliştirilen yenilenen küme korelasyonları ile yapılan hesaplamalar sonucu, deneysel ve teorik hesaplama sonuçları arasındaki fark düşük yoğunluklu yatak için ortalama % 10, yüksek yoğunluklu yatak için ise ortalama % 19 olmuştur. Ölçüm hatalarından kaynaklanan belirsizlik oranı % 10 olarak kabul edilirse, yeni korelasyonların gerçek ısı transferi davranışını belirlemedeki hata oranları, düşük yoğunluklar için % 19’a yüksek yoğunluklu yataklar için ise % 27 olmuştur. Buna göre yenilenen küme modelinin literatürde verilen korelasyonları, bu çalışmanın yapıldığı deney sistemindeki gerçek ısı transferi davranışını düşük yoğunlukta % 30, yüksek yoğunlukta % 43 ortalama sapma ile ifade ederken, bu çalışmada geliştirilen yeni korelasyonlar, gerçek ısı transferini düşük yoğunlukta % 19, yüksek yoğunlukta ise % 27 ortalama sapma ile tanımlamaktadır. Yeni model, gerçek ısı transferini literatürde verilene kıyasla düşük yoğunluklu yatakta % 11, yüksek yoğunluklu yatakta ise % 16 daha az sapma oranı ile tanımlayabilmektedir. Yenilenen küme modeli ile ilgili literatürde verilen ve bu çalışmada elde edilen parametreler ve exponansiyel üs katsayıları Çizelge 6.2 ve 6.3’de verilmiştir.

Endüstriyel boyutlardaki dolaşımli akışkan yataklarda deneysel çalışmaların güçlüğü, maliyeti ve zorluğu göz önünde tutulursa, bu çalışma ile laboratuvar koşullarında elde edilen sonuçlar, akışkan yataklı yakma sistemi ve ısı transfer yüzeylerinin tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Akışkan yataklı sistemlerde ısı transfer mekanizmasının çok karmaşık (kompleks) oluşu ve bir çok parametrenin eş zamanlı etkili olması, sistemi tanımlayan başarılı bir model oluşturmayı zorlaştırmaktadır.

Buna ilave olarak, küçük ölçeklerden endüstriyel ölçeklere geçişte büyük zorluklar vardır. Günümüzde dünyada bu konu üzerine çalışan şirketler pratikte elde ettikleri sonuçları açıklamamaktadırlar. Akışkan yatak hidrodinamiği yatak geometrisi ile, yatak özelliği ve yatakta etken olan kuvvetlerce tanımlanan boyutsuz parametrelerce belirlenir. Yani laboratuvar ölçekli test sistemi ile endüstriyel boyuttaki bir sistemde boyutsuz sayıların (Fr, Re, Ar, yoğunluk oranı, çap oranı, katı dolaşım oranı, hız oranı, basınç oranı vb.) birbirine eşit olması durumunda yatak içersindeki bir partikülün akış özellikleri her iki yatakta da benzerdir denilebilir. Ancak akışkan yatağın aşırı türbülanslı, kararsız ve iki fazlı akım özellikleri ile hidrodinamik yapının karmaşıklığı(parametre sayısının fazlalığı) göz önüne alındığında benzeşim çalışmalarının zorluğu da ortaya çıkmaktadır. Benzeşim çalışmaları ticari uygulamalara da ışık tutmaktadır. Bu amaçla önce literatürde önerilen boyutsuz parametreler Buckingham-II yöntemi ile belirlenmiş ve deneyler sonucunda gerekli boyutsuz parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ileride yapılacak benzeşim çalışmaları için büyük bir katkı sağlayacaktır.

Dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer prosesi duvar çevresindeki gaz karışımı ve katıların hidrodinamiği tarafından kontrol edilmektedir. Dolaşımli akışkan yatakta ısı transfer katsayısını etkileyen en baskın faktör süspansiyon yoğunluğudur (Şekil 4.22). Yüksek süspansiyon yoğunluğunda partikül konveksiyonunun toplam ısı transferine katkısının daha büyük olduğu görülmüştür. Çünkü, duvar (ısıtma yüzeyi) çevresindeki partikül konsantrasyonu miktarı süspansiyon yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Deneyler sonucunda, akışkan yataklı sistemde katı olmadan elde edilen ısı transfer katsayısı değerleri, katı olması durumunda elde edilen değerlerden daha düşüktür.

Ülkemizde düşük kaliteli linyitlerin, DAY'ta temiz ve verimli yakma koşullarının deneysel olarak belirlendiği ve bu koşullardaki hidrodinamik yapı ile ısı transfer özelliklerinin araştırıldığı çalışmaların artırılması gerekmektedir. Ülkemiz milli çıkarları doğrultusunda iyi bir planlama çalışması ile orta ve büyük ölçekli enerji tesislerinde akışkan yatak teknolojisinin yaygınlaşması ve ülkemizde üretime yönelik Ar-Ge çalışmalarının yapılması büyük bir önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- 1- İnternet : Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı “2006 Enerji İstatistikleri” <http://www.enerji.gov.tr/istatistik> (2005).
- 2- Durmaz, A., Kömürün Yanması, Yakma Sistemleri ve Tasarımı, **II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi**, 26-28 Mayıs, Kütahya, 15-20 (2004).
- 3- İnternet : World Energy Council “Energy” <http://www.worldenergy.org/energy> (2006).
- 4- Uysal, Z., “Akışkanlar Mekaniği”, **Alp Yayınevi**, , Ankara, 68-87 (2003).
- 5- Topal,H., “Dolaşımli Akışkan Yatağın Hidrodinamik, Yanma ve Emisyon Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniv. Fen Bil. Enst.**, Ankara, 64-80 (1999).
- 6- JEA Large-Scale CFB Combustion Demonstration Project, Advanced Electric Power Generation, Fluidized Bed Combustion, **US Department of Energy**, 17-23 (1999).
- 7- O. Oymak, İ. Temuçin and G. Türeli, “Performance Test Data from the First 23 MWth ABFB Boiler in Turkey”, **Proceedings of the 16th International Conference on Fluidized Bed Combustion**, (ed. Donald J. Geiling, P.E.), ASME, 45-54 (2001).
- 8- Dutta, A., “Heat Transfer Circulating Fluidized Bed Boilers”, Doctor Of Philosophy, **Dalhousie University**, Halifax, Nova Scotia, 67-73 (2002).
- 9- Reddy, BV., Nag, PK., "Axial and radial heat transfer studies in a circulating fluidized bed", **Int. Journal of Energy Research**, 21, 1109 -1122, (1997).
- 10- Bucak, O., Dogan, Ö.M., Uysal, B.Z., "Heat Transfer in Circulating Fluidized Bed Combustor", **15th Int. Cong. on Fluidized Bed Combustion**, Savannah, Georgia, USA, 16-19, (1999).
- 11- Courbariaux,Y., “Heat Transfer In A Circulating Fluidized Bed”, Master Of Science In Engineering, **In The Graduate Academic Unit Of Chemical Engineering**, New Brunwick University, 76-84 (1998).
- 12- Xie, D., “Modeling Of Heat Transfer In Circulating Fluidized Beds”, Doctor Of Philosophy, **British Columbia University**, 111-119 (2001).
- 13- Looi, A., Mao, O., Rhodes, M., “Experimental study of pressurized gas-fluidized bed heat transfer”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 45 (2): 255-265, (2002).

- 14- Fox, W.B., "Determination Of Particle And Gas Convective Heat Transfer Components In A Circulating Fluidized Bed" , Doctor Of Philosophy, **North Dakota University**, 34-45 (1997).
- 15- Kolar, A., Sundaresan R., " Heat transfer characteristics at an axial tube in a circulating fluidized bed riser", **International Journal of Thermal Sciences**, 673-681 (2002).
- 16- Gupta, A., Nag.,P.K., "Prediction Of Heat Transfer Coefficient In The Cyclone Separator Of A CFB" , **International Journal Of Energy Research**, 1065-1079 (2000).
- 17- Sajjakulnukit, B., "Hydrodynamics And Heat Transfer In A Circulating Fluidized Bed", Doctor Of Philosophy, **New Brunswick University**, 78-83 (1999).
- 18- Grace,J.R., "Heat transfer in Circulating Fluidized Bed", Circulating Fluidized Bed Technology, **Proceedings of the First International Conference on Circulating Fluidized Bed**, Pergamon Press, Canada, 12-16 (1986).
- 19- Subbarao, D. and Basu, P., "Heat transfer in Circulating Fluidized Bed",,, **Proceedings of the First International Conference on Circulating Fluidized Bed**, Pergamon Press, Canada, 167-176 (1986).
- 20- Reddy,B.V.,Nag,P.K., "Effect Of Lateral And Extended Fins On Heat transfer In a Circulating Fluidized Bed",**Int.J.Heat Mass Transfer**, 139-146 (1997).
- 21- Basu, P., Nag, P.K., "Heat transfer To Walls of a Circulating Fluidized-Bed Furnace", **Chemical Engineering Science**, 1-26 (1995).
- 22- Luan,W., Lim,C.J.,Brereton,C.,Bowen, B., Grace,J.R., "Experimental And Theoretical Study Of Total And Radiative Heat Transfer In Circulating Fluidized Beds", **Chemical Engineering Science**, 3749-3764 (1999).
- 23- Dincer,I.,Kilic,Y.A.,Kahveci,N., "Heat Transfer Modelling Of Spherical Particles Subject To Heating In a Fluidized Bed", **Int. Comn. Heat Mass Transfer**, 705-712 (1996).
- 24- Reddy,B.V.,Basu,P., "A Model For Heat Transfer In a Pressurized Circulating Fluidized Bed Furnace", **Int. Comn. Heat Mass Transfer**, 2877-2887 (2001).
- 25- Dutta, A., Basu, P., "An Improved Cluster-Renewal Model for Estimation of Heat Transfer Coefficients on the Water-Walls of Commercial Circulating Fluidized bed Boilers", **ASME Journal of Heat Transfer**, 1243-1255 (2004).

- 26- Zevenhoven, R., Kohlmann, J., Laukkanen, T., Tuominen M., Blomster A., “Near-Wall Particle Velocity And Concentration Measurements In Cfb In Relation To Heat Transfer”, *Proceedings of the 15th International Conference on Circulating Fluidized Bed Combustion*, Savannah, Georgia, 97-106 (1999).
- 27- Vijay,G.N.,Reddy,B.V., “Effect Of Dilute And Dense Phase Operating Conditions On Bed – To – Wall Heat Transfer Mechanism In A Circulating Fluidized Bed Combustor”, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 3276-3283 (2005).
- 28- Noymer, P.D., Glicksman L.R., “Cluster Motion And Particle – Convective Heat Transfer At The Wall Of A Circulating Fluidized Bed”, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 147 – 158 (1998).
- 29- Choa, Y.J., Kima, S.J., Nama,S.H., Kang Y., Kimb,S.D., “Heat transfer and bubble properties in three-phase circulating fluidized beds”, *Chemical Engineering Science*, 6107-6115 (2001).
- 30- GrulovicR.G., Grbavcic,Z.B.,Arsenijevica, Z.L., “Heat transfer and flow pattern in vertical liquid–solids flow”, *Powder Technology*, 163 – 171 (2004).
- 31- Bi, H., Jin,Y., Yu,Z.,Bai,D., “An Investigation On Heat Transfer In Circulating Fluidized Bed”, *Proceedings Of The Three International Conference on Circulating Fluidized Bed*, 235-245 (1990).
- 32- Zhang,R.,Dutta,A.,Basu,P., “An Experimental Investigation On Heat Transfer To The Ceiling Of The Riser Of Circulating Fluidized Bed”, *Proceedings Of The Eight International Conference on Circulating Fluidized Bed*, China, 456-460 (2005).
- 33- Chang, L.D.,Ping,H.Y.,Liang,W.Y.,Jie,L.Z., “Experimental Studies Of Heat Transfer In Circulating Fluidized Bed”, *Proceedings Of The Three International Conference on Circulating Fluidized Bed*, 116-123 (1990).
- 34- Sundaresan,R., Kolar, A.K., “A Semi Empirical Heat Transfer Model In The Core Of A CFB Riser”, *Proceedings Of The Eight International Conference on Circulating Fluidized Bed*, China, 57-63 (2005).
- 35- Watanabe, T., Chen, Y.,Hasatani,M., “Gas – Solid Heat Transfer In Fast Fluidized Bed”, *Proceedings Of The Three International Conference on Circulating Fluidized Bed*, 87-98 (1990).
- 36- Kim, N., Lee, Y.P., “ Hydrodynamic And Heat Transfer Characteristics Of Glass Bead-Water Flow In A Vertical Tube”, *Desalination*, 233-243 (2001).
- 37- Chiu,T.M.,Ziegler,E.N., “Heat Transfer In Three-Phase Fluidized Beds”, *AIChE Journal*, 677-685 (1983).

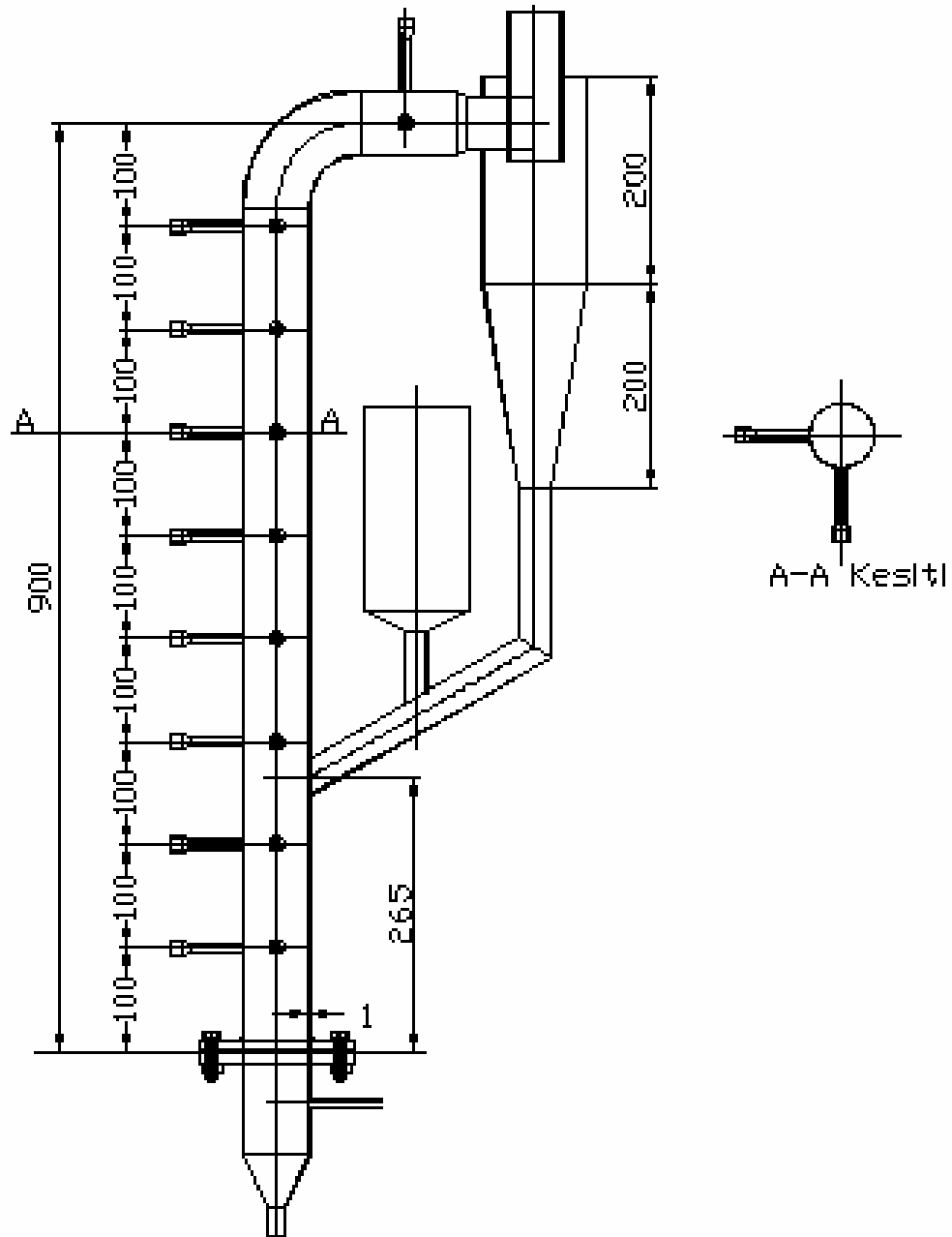
- 38- Pagliuso, J.D., Lombardi, G., Goldstein, L., "Experiments On The Local Heat Transfer Characteristics Of A Circulating Fluidized Bed, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 170-179 (2000).
- 39- Sunderesan, R.S., Clark, N.N., "Local Heat transfer Coefficients On The Circumference Of A Tube In A gas Fluidized Bed", *Int. J. Multiphase Flow*, 1003-1024 (1995).
- 40- Dutta, A., Basu, P., "An Experimental Investigation Into The Heat Transfer On Wing Walls In A Circulating Fluidized Bed Boiler", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1567-1580 (2002).
- 41- Wang, X.S., Rhodes, M.J., Gibbs, B.M., Geldart, D., "Heat Transfer In Dilute Gas-Particle Suspensions", *Chemical Engineering Science*, 3617-3621 (1997).
- 42- Glicksman, L.R., "Heat Tansfer In Circulation Fluidized Beds", Chapter 9 Of Circulation Fluidized Beds , Grace, J.R., Avidan , A.A., Knowlton , T.M. eds., *Blackie Academic and Professional*, 261-311 (1997).
- 43- Baskakov, A.P., Leckner B., Radiative heat transfer in circulating fluidized bed furnaces, *Powder Thechn.*, 213-218 (1997).
- 44- Zabrodsky, S.S.; "Hydrodynamics and Heat Transfer in Fluidized Beds", *M.I.T. Press* , A.B.D., 48-57 (1966).
- 45- Geldart, D., "Gaz Fluidization Technology", *Newyork Press*, 145-152 (1986).
- 46- Kolar, A.K., Grewel, N.S. ve Saxena, Ş.C., "Investigation Of Radiative Contribution İn A Fluidized Bed Using The Alternate Slab Model" , *Int. Journal Heat Mass Transfer*, 1695-1703 (1979).
- 47- Botteril, J.S.M., "Fluid Bed Heat Transfer", *Academic Press*, London, 67-71 (1975).
- 48- Shi, D., Nicolai, R., Reh, L., "Wall-To-Bed Heat Transfer In Circulating Fluidized Beds", *Chemical Engineering and Processing* , 287-293 (1998).
- 49- Kunii, D., ve Levenspiel, O., "Fluidization Engineering", *Newyork Press*, 87-98 (1969).
- 50- Wen, C.Y., Yu, Y.H., "A Generalized Method For Predicting The Minumum Fluidization Velocity", *AIChE J.*, 610-615 (1966).
- 51- Thonglimp, V., Hiquily, N. ve Laquerie, I., "Vitesse Minimale De Fluidization Et Expansion Des Coughes Fluidisees Per Un Gaz", *Powder Tech.*, 233-253 (1984).

- 52- Pagliuso, J.D., Geraldo, L., Goldstein, L., “Experiments on the local heat transfer characteristics of a circulating fluidized bed”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 170-179 (2000).
- 53- Vijay, N., Reddy, B.V., “Effect of dilute and dense phase operating conditions on bed-to-wall heat transfer mechanism in a circulating fluidized bed combustor” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 3276-3283 (2005).
- 54- Basu, P., Fraser, S.A., “Circulating Fluidized Bed Boilers”, *Butterworth Heieman*, U.S.A., 233-241 (1991).
- 55- Mickley, H., Fairbanks, D.F., “Mechanism of heat transfer to fluidized beds”, *AIChE J.*, 374–384 (1955).
- 56- Griffith, A., “Convective Heat Transfer Scaling At The Wall Of Circulating Fluidized Bed Risers”, Doctor Of Philosophy, *Cornell University*, 45-58 (2000).
- 57- Vego, A., “Experimental And Scaling Studies On Circulating Fluidized Beds”, Doctor Of Philosophy, *Kentucky University*, 87-108 (2000).
- 58- Kelkar, V., Ng, M., “Development Of Fluidized Catalytic Reactors: Screening And Scale Up”, *AIChE J.*, 1498–1518 (2002).
- 59- Detamore, M., Swanson, M., Frender, K., Hrenya, C., “A Kinetic-Theory Analysis Of The Scale-Up Of Circulating Fluidized Bed”, *Powder Technology*, 190 – 200 (2000).
- 60- Glicksman L.R., Westphalen D., “Verification Of The Scaling Laws For Circulating Fluidized Beds”, *Third Int. Conf. On CFB*, Nagoya, Japan, 119-124 (1990).
- 61- Horio M., Ishii H., Yamanaishi N., “A Scaling Law for CFB, *J. Of Chem. Eng. Of Japan*, 587-592 (1989)
- 62- Schouten J.C., “Zijerveld C.R., Scale-Up Of Bottom-Bed Dynamics And Axial Solids-Distribution In Circulating Fluidized Beds Geldart-B Particles”, *Chemical Engineering Science*, 2103-2112 (1999).
- 63- Safoniuk M., Grace J., “Use Of Dimensional Similitude For Scale-Up Of Hydrodynamics In Three-Phase Fluidized Beds”, *Chemical Engineering Science*, 4961-4966 (1999).
- 64- Knowlton T.M., Kari S.B.R., “ Scale-Up Of Fluidized Bed Hydrodynamics”, *Powder Technology*, 72-77 (2005).
- 65- Rambali B., Baert L., “Scaling Up Of The Fluidized Bed Granulation Process”, *Int. Journal of Pharmaceutics*, 197-206 (2003).

- 66- Araştırma Fonu Projesi, , “Akışkan yatakta ısı transfer davranışının incelenmesi ile ilgili araştırma ve test sistemi tasarımı ve kurulması”, *MMF*, **06/2002-12**, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 24-43 (2002).
- 67- Erbaş, O., “Dolaşımli akışkan yatak ısı transfer test düzeneğine ait cihaz ve alet resimleri arşivi”, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 1-20 (2007)

EKLER

EK – 1 Deney Düzeneği



EK- 2 Yatak malzeme boyut dağılımı (silis kumu)

Malzeme: Silis Kumu

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	250
2	150	500
3	175	590
4	250	840
5	480	1000
6	650	1410

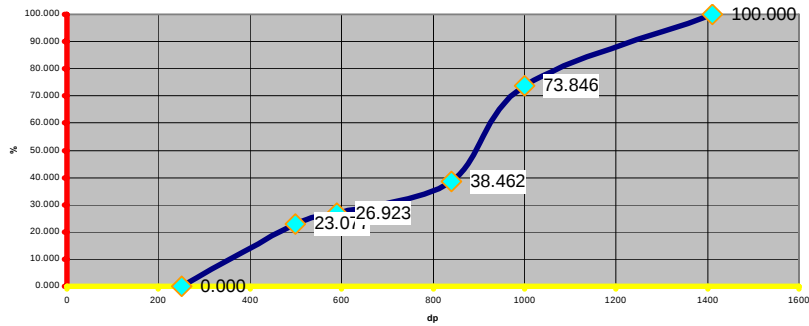
HESAPLANAN DEĞERLER

dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
1 ve 2	375	23.0769	0.000
2 ve 3	545	3.8462	23.077
3 ve 4	715	11.5385	26.923
4 ve 5	920	35.3846	38.462
5 ve 6	1205	26.1538	73.846
TOPLAM=		100.0000	100.000

	x / dp
	0.0006
	0.0001
	0.0002
	0.0004
	0.0002
TOPLAM	0.0014

ORTALAMA ÇAP= 690 (Mikronmetre)

Kümülatif Değere Göre



EK- 2 (Devam) yatak malzeme boyut dağılımı (çelik tozu)

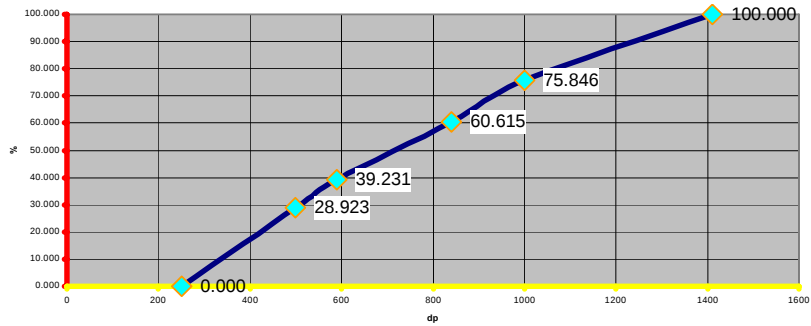
Malzeme: Çelik

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	250
2	188	500
3	255	590
4	394	840
5	493	1000
6	650	1410

HESAPLANAN DEĞERLER

dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
1 ve 2	375	28.9231	0.000
2 ve 3	545	10.3077	28.923
3 ve 4	715	21.3846	39.231
4 ve 5	920	15.2308	60.615
5 ve 6	1205	24.1538	75.846
TOPLAM=		100.0000	100.000

	x / dp
	0.0008
	0.0002
	0.0003
	0.0002
	0.0002
TOPLAM	0.0016

ORTALAMA ÇAP= 615 (Mikronmetre)**Kümülatif Değere Göre**

EK- 2 (Devam) yatak malzeme boyut dağılımı (kum)

Malzeme: Kum

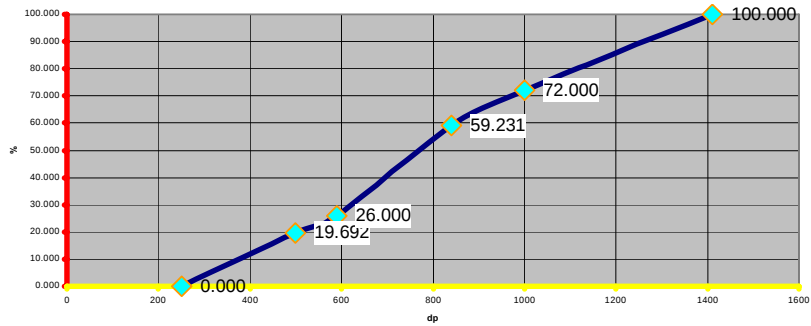
No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	250
2	128	500
3	169	590
4	385	840
5	468	1000
6	650	1410

HESAPLANAN DEĞERLER

dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
1 ve 2	375	19.6923	0.000
2 ve 3	545	6.3077	19.692
3 ve 4	715	33.2308	26.000
4 ve 5	920	12.7692	59.231
5 ve 6	1205	28.0000	72.000
TOPLAM=		100.0000	100.000

x / dp	
0.0005	
0.0001	ORTALAMA ÇAP= 677 (Mikronmetre)
0.0005	
0.0001	
0.0002	
TOPLAM	
	0.0015

Kümülatif Değere Göre



EK- 2 (Devam) yatak malzeme boyut dağılımı (alüminyum tozu)

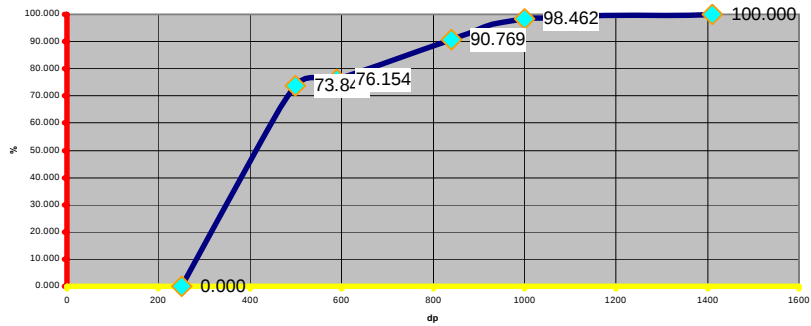
Malzeme: Aliminyum

No	Kümülatif Ağırlık(gr)	Boyut(mikron metre)
1	0	250
2	480	500
3	495	590
4	590	840
5	640	1000
6	650	1410

HESAPLANAN DEĞERLER

dp aralığı	dp	Kütle Kesri(x) %	Kümülatif Yüzde %
1 ve 2	375	73.8462	0.000
2 ve 3	545	2.3077	73.846
3 ve 4	715	14.6154	76.154
4 ve 5	920	7.6923	90.769
5 ve 6	1205	1.5385	98.462
TOPLAM=		100.0000	100.000

	x / dp	
	0.0020	
	0.0000	ORTALAMA ÇAP= 432 (Mikronmetre)
	0.0002	
	0.0001	
	0.0000	
TOPLAM	0.0023	

Kümülatif Değere Göre

EK -3 Atmosfer basıncında havanın termofiziksel özellikleri

T K	ρ kg/m ³	c_p kJ/ kg C	μ kg/m s 10 ⁻⁵	ν m ² /s 10 ⁻⁶	k W/ m C	α m ² /s 10 ⁻⁴	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1,923	0,009246	0.02501	0,770
150	2.3675	1.0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1.7684	1.0061	1,3289	7,490	0,01809	0.10165	0,739
250	1.4128	1.0053	1.488	9,49	0.02227	0.13161	0,722
300	1.1774	1.0057	1,983	15,68	0.02624	0,22160	0,708
350	0.9980	1.0090	2.075	20,76	0,03003	0,2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25,90	0,03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2,484	28,86	0,03707	0,4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2,848	44,34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51,34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3,177	58,51	0.04953	0.8573	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66,25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3,481	73,91	0.05509	1,0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3,625	82,29	0.05779	1,1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3,765	90,75	0.06023	1,3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3,899	99,3	0.06279	1,4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108,2	0.06525	1,5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4,152	117,8	0.06752	1,6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4,44	138,6	0.0732	1,969	0.704
1200	0.2947	1.179	4,69	159,1	0.0782	2,251	0.707
1300	0.2707	1,197	4,93	182,1	0.0837	2,583	0.705
1400	0.2515	1,214	5,17	205,5	0.0891	2,920	0.705
1500	0.2355	1.230	5,40	229,1	0.0946	3,262	0.705
1600	0.2211	1,248	5,63	254,5	0.100	3,609	0.705
1700	0.2082	1,267	5,85	280,5	0.105	3,977	0.705
1800	0.1970	1.287	6,07	308,1	0.111	4,379	0.704
1900	0.1858	1.309	6,29	338,5	0.117	4,811	0.704
2000	0.1762	1,338	6,50	369,0	0.124	5,260	0.702
2100	0.1682	1,372	6,72	399,6	0.131	5,715	0.700
2200	0.1602	1,419	6,93	432,6	0.139	6,120	0.707
2300	0.1538	1,482	7,14	464,0	0.149	6,540	0.710
2400	0.1458	1,574	7,35	504,0	0.161	7,020	0.718
2500	0.1394	1,688	7,57	543,5	0.175	7,441	0.730

Not: μ , k , c_p ve Pr basınca fazla değişmediğinden,
basıncın oldukça geniş bir aralığında bu değerler sabit
varsayılabilir.

EK- 4 Buckingham- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

Bir fiziksel olay $A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$ gibi (i) sayıdaki fiziksel büyüklük ile

$$A_1 = f(A_2, A_3, A_4, \dots, A_i)$$

tanımlanabiliyorsa ve bu fiziksel büyüklükler, j adet temel boyut ile ifade edilebiliyorsa, bu olayda;

$$f[\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{(i-j)}] = 0$$

(i-j) adet boyutsuz sayı grubu yazmak mümkündür. Burada her biri boyutsuz olan Π sayılarının arasındaki ilişki, deneysel yöntemler ile bulunacaktır.

Asmund Vego, (1997) ve Vaibhav V. Kelkar, Ka M.Ng, (2002) 'nin kullanmış olduğu boyutsuz sayıların eldesi için Buckingham- Π yöntemi ile ısı transferini etkileyen parametreler,

$$f(\rho_{\text{partikül}}, \rho_{\text{gaz}}, D_{\text{partikül}}, g, U_{\text{gaz}}, D_{\text{kolon}}, G_s) = 0$$

şeklinde $i = 7$ adet fiziksel büyüklük ile ifade edilebilir. Burada, ($\rho_{\text{partikül}}$) partikül yoğunluğu, (ρ_{gaz}) gaz yoğunluğu, ($D_{\text{partikül}}$) partikül çapı, (g) yerçekimi ivmesi, (U_{gaz}) gaz hızı, (D_{kolon}) kolon çapı, (G_s) katı dolaşım oranını ifade etmektedir.

Bu fiziksel büyüklükler, tablo da görüldüğü gibi [L] uzunluk, [M] kütle, [t] zaman olmak üzere $j = 3$ adet temel boyut ile tanımlanabilir.

Çizelge 1. Fiziksel büyüklükler ve temel boyut ifadeleri

Büyüklük	ρ	g	U	D	G_s
Boyut	$\frac{[M]}{[L]^3}$	$\frac{[L]}{[t]^2}$	$\frac{[L]}{[t]}$	[L]	$\frac{[M]}{[L]^2[t]}$

$$\Pi_1 = U_{\text{gaz}}^{a_1}, \rho_{\text{gaz}}^{b_1}, D_{\text{partikül}}^{c_1}, g$$

EK- 4 (Devam) buckingam- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

$$\Pi_1 = \frac{[L]^{a_1}}{[t]} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{b_1} [L]^{c_1} \frac{[L]}{[t]^2}$$

ise $b_1 = 0$, $c_1 = 1$, $a_1 = -2$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_1 = U_{\text{gaz}}^{-2} D_{\text{partikül}} g$

$$\Pi_1 = \frac{D_{\text{partikül}} \cdot g}{U_{\text{gaz}}^2} (\text{Fr}^{-1}) (\text{Froude Sayısı} = \text{Atalet kuvvetleri/Yerçekimi kuvveti})$$

$$\Pi_2 = U_{\text{gaz}}^{a_2}, \rho_{\text{gaz}}^{b_2}, D_{\text{partikül}}^{c_2}, \rho_{\text{partikül}}$$

$$\Pi_2 = \frac{[L]^{a_2}}{[t]} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{b_2} [L]^{c_2} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]$$

ise $c_2 = 0$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_2 = \rho_{\text{gaz}}^{-1} \rho_{\text{partikül}}$

$$\Pi_2 = \frac{\rho_{\text{partikül}}}{\rho_{\text{gaz}}} (\text{Yoğunluk Oranı})$$

$$\Pi_3 = U_{\text{gaz}}^{a_3}, \rho_{\text{gaz}}^{b_3}, D_{\text{partikül}}^{c_3}, D_{\text{kolon}}$$

$$\Pi_3 = \frac{[L]^{a_3}}{[t]} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{b_3} [L]^{c_3} [L]$$

ise $c_3 = -1$ bulunur.

EK- 4 (Devam) buckingam- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_3 = D_{\text{partikül}}^{-1} D_{\text{kolon}}$

$$\Pi_3 = \frac{D_{\text{partikül}}}{D_{\text{kolon}}} \text{ (Çap Oranı)}$$

$$\Pi_4 = U_{\text{gaz}}^{a_4}, \rho_{\text{gaz}}^{b_4}, D_{\text{partikül}}^{c_4}, G_s$$

$$\Pi_3 = \frac{[L]^{a_4}}{[t]} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{b_4} [L]^{c_4} \frac{[M]}{[L]^2 [t]}$$

ise $c_4 = 0$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_4 = U_{\text{gaz}}^{a_4} \rho_{\text{gaz}}^{b_4} G_s$

$$\Pi_4 = \frac{G_s}{U_{\text{gaz}} \cdot \rho_{\text{gaz}}} \text{ (Katı Yükleme)}$$

Anna Elizabeth Griffith,(2000), M.S. Detamore ve arkadaşları, (2000), Hong-Der Chang, (1991), R. Roy and J.F. Davidson, (1989)'ın kullanmış oldukları boyutsuz sayıların eldesi için ise;

$$f(h, k_{\text{partikül}}, \mu_{\text{gaz}}, \rho_{\text{partikül}}, \rho_{\text{gaz}}, D_{\text{partikül}}, g, U_{\text{gaz}}, D_{\text{kolon}}, G_s) = 0$$

şeklinde $i = 10$ adet fiziksel büyüklük ile ifade edilirse, burada (h) ısı taşınım katsayısı, ($k_{\text{partikül}}$) partiküllerin ısı iletim katsayısı, (μ_{gaz}) gazın dinamik viskozitesi, ($\rho_{\text{partikül}}$) partikül yoğunluğu, (ρ_{gaz}) gaz yoğunluğu, ($D_{\text{partikül}}$) partikül çapı, (g) yerçekimi ivmesi, (U_{gaz}) gaz hızı, (D_{kolon}) kolon çapı, (G_s) katı dolaşım oranını ifade etmektedir.

EK- 4 (Devam) buckingam- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

Bu fiziksel büyüklükler, tablo da görüldüğü gibi [L] uzunluk, [M] kütle, [t] zaman, [T] sıcaklık olmak üzere $j = 4$ adet temel boyut ile tanımlanabilir.

Çizelge 2. Fiziksel Büyüklükler ve temel boyut ifadeleri

Büyüklük	h	k	μ	ρ	g	U	D	G_s
Boyut	$\frac{[M]}{[t]^3[T]}$	$\frac{[M][L]}{[t]^3[T]}$	$\frac{[M]}{[L][T]}$	$\frac{[M]}{[L]^3}$	$\frac{[L]}{[t]^2}$	$\frac{[L]}{[T]}$	$\frac{[L]}{[T]}$	$\frac{[M]}{[L]^2[T]}$

$$\Pi_1 = k_{\text{partikül}}^{a1}, \mu_{\text{gaz}}^{b1}, \rho_{\text{gaz}}^{c1}, D_{\text{partikül}}^{d1}, \rho_{\text{partikül}}$$

$$\Pi_1 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a1} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b1} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c1} [L]^{d1} \frac{[M]}{[L]^3}$$

ise $b1 = 0$, $c1 = -1$, $d1 = 0$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_1 = (\rho_{\text{gaz}}^{-1}) \rho_{\text{partikül}}$

$$\Pi_1 = \frac{\rho_{\text{partikül}}}{\rho_{\text{gaz}}} \text{ (Yoğunluk Oranı)}$$

$$\Pi_2 = k_{\text{partikül}}^{a2}, \mu_{\text{gaz}}^{b2}, \rho_{\text{gaz}}^{c2}, D_{\text{partikül}}^{d2}, g$$

$$\Pi_2 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a2} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b2} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c2} [L]^{d2} \frac{[L]}{[t]^2}$$

ise $b2 = -2$, $c2 = 2$, $d2 = 3$ bulunur.

EK- 4 (Devam) buckingham- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_2 = \mu_{\text{gaz}}^{-2} \rho_{\text{gaz}}^2 D_{\text{partikül}}^3 g$

$$\Pi_2 = \frac{\rho_{\text{gaz}}^2 . D_{\text{partikül}}^3 . g}{\mu_{\text{gaz}}^2} = \frac{\text{Partikül.Ağ}}{\text{Viskos.Kuvvet}} \text{ (Arşimet Sayısı)}$$

$$\Pi_3 = k_{\text{partikül}}^{a3}, \mu_{\text{gaz}}^{b3}, \rho_{\text{gaz}}^{c3}, D_{\text{partikül}}^{d3}, U_{\text{gaz}}$$

$$\Pi_3 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a3} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b3} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c3} [L]^{d3} \frac{[L]}{[T]}$$

ise $b3 = -1$, $c3 = 1$, $d3 = 1$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_3 = \mu_{\text{gaz}}^{-1} \rho_{\text{gaz}} D_{\text{partikül}} U_{\text{gaz}}$

$$\Pi_3 = \frac{\rho_{\text{gaz}} . D_{\text{partikül}} . U_{\text{gaz}}}{\mu_{\text{gaz}}} = \frac{\text{Atalet.Kuvveti}}{\text{ViskosKuvvet}} \text{ (Reynold Sayısı)}$$

$$\Pi_4 = k_{\text{partikül}}^{a4}, \mu_{\text{gaz}}^{b4}, \rho_{\text{gaz}}^{c4}, D_{\text{partikül}}^{d4}, D_{\text{kolon}}$$

$$\Pi_4 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a4} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b4} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c4} [L]^{d4} [L]$$

ise $b4 = 0$, $c4 = 0$, $d4 = -1$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_4 = D_{\text{partikül}}^{-1} D_{\text{kolon}}$

EK- 4 (Devam) buckingham- π yöntemi ile boyutsuz parametrelerin belirlenmesi

$$\Pi_4 = \frac{D_{kolon}}{D_{partikül}} \quad (\text{Çap oranı})$$

$$\Pi_5 = k_{partikül}^{a5}, \mu_{gaz}^{b5}, \rho_{gaz}^{c5}, D_{partikül}^{d5}, G_s$$

$$\Pi_4 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a5} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b5} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c5} [L]^{d5} \frac{[M]}{[L]^2[T]}$$

ise $b5 = -1$, $c5 = 0$, $d5 = 1$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_5 = \mu_{gaz}^{-1} D_{partikül}^1 G_s$

$$\Pi_5 = \frac{D_{partikül} \cdot G_s}{\mu_{gaz}} \quad (\text{Katı Dolaşım Oranı})$$

$$\Pi_6 = k_{partikül}^{a6}, \mu_{gaz}^{b6}, \rho_{gaz}^{c6}, D_{partikül}^{d6}, h$$

$$\Pi_6 = \left[\frac{[M][L]}{[t]^3[T]} \right]^{a6} \left[\frac{[M]}{[L][T]} \right]^{b6} \left[\frac{[M]}{[L]^3} \right]^{c6} [L]^{d6} \frac{[M]}{[t]^3[T]}$$

ise $b6 = 0$, $c6 = 0$, $d6 = 1$ bulunur.

İlk denklemde katsayılar yerine yazılırsa, $\Pi_6 = k_{partikül}^{-1}, D_{partikül}^1, h$

$$\Pi_6 = \frac{h \cdot D_{partikül}}{k_{partikül}} \quad (\text{Nusselt Sayısı}) \quad \text{elde edilmiş olur.}$$

EK-5 Sistem hata analizi

Deneysel bulguların hata analizi için Kline-McClintock'un denklemleri ile belirsizlik analizi (uncertainly analysis) yapılmıştır. Bu yöntemle göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük (R) ve bu büyüklüğe etki eden (n) adet bağımsız değişkenler ise $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ ise,

$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ yazılabilir.

Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_R ise,

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \text{ şeklinde yazılabilir.}$$

Newton'un soğutma yasasına göre ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılan denklem;

$$h = \frac{q}{A(\Delta T)}$$

$q = V.I$ voltaj giriş değeri * amper değeri

$A = \pi.D.L$ ısıtılan yüzey uzunluğu * çap

$$(\Delta T) = T_{du \text{ var}} - T_{yatak}$$

Isı transfer katsayısı h , $f(V, I, T_{du \text{ var}}, T_{yatak}, D, L_{yüzey})$ parametrelerinin bir fonksiyonu olmaktadır.

Analiz için gerekli türevler ve hata oranı ifadeleri;

$$w_h = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial V} w_v \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial I} w_I \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{du \text{ var}}} w_{Td} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial T_{yatak}} w_{Ty} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial D} w_D \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial L_{yüzey}} w_L \right)^2 \right]^{1/2}$$

$h = 59,95 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ için,

$$T_{du \text{ var}} = 610 \text{ K} \quad V = 74 \text{ volt} \quad I = 11,16 \text{ amper}$$

EK-5 (Devam) Sistem hata analizi

$$T_{yatak} = 556 \text{ K} \quad D = 0,1 \text{ m} \quad L_{yüze\gamma} = 0,8 \text{ m}$$

E-680 üniversal girişli data logger (tarayıcı cihaz) doğruluk sınıfı $\pm \% 2,5$

(Isıl çiftlerin yerleştirilmesi, titreşim vb. etkiler ile oluşan kontak(temas) hataları ve yalıtımdan dolayı oluşan hatalar $\pm \% 2$ ilave edilmiştir)

Dijital multimetre doğruluk sınıfı ($>750 \text{ V}$) $\pm \% 1$

Dijital multimetre doğruluk sınıfı ($>200 \text{ A}$) $\pm \% 2$

Isıl çiftlerin kalibrasyonu sonucu doğruluk sınıfı $\pm \% 0,5$

Uzunluk ve çap ölçümleri doğruluk sınıfı $\pm \% 0,2$

Sistemin toplam belirsizlik hatası için;

$$\frac{w_h}{h} = \left[\left(\frac{w_v}{V} \right)^2 + \left(\frac{w_I}{I} \right)^2 + \left(\frac{w_{Td}}{T_{du \text{ var}}} \right)^2 + \left(\frac{w_{Ty}}{T_{yatak}} \right)^2 + \left(\frac{w_D}{D} \right)^2 + \left(\frac{w_L}{L_y} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ yazılabilir.}$$

$$\frac{w_h}{h} = \left[\left(\frac{0,74}{74} \right)^2 + \left(\frac{0,23}{11,16} \right)^2 + \left(\frac{18,30}{610} \right)^2 + \left(\frac{16,68}{556} \right)^2 + \left(\frac{0,0002}{0,1} \right)^2 + \left(\frac{0,0016}{0,8} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{w_h}{h} = \sqrt{0,0001 + 0,00043 + 0,0009 + 0,0009 + 0,000004 + 0,000004} = 0,0483 \text{ ise}$$

yani sistemin toplam belirsizlik hatası $\% 4,83$ ‘dur.

Maksimum hata oranı ise;

$$\frac{w_h}{h} = \left[\left(\frac{0,74}{74} \right) + \left(\frac{0,23}{11,16} \right) + \left(\frac{18,30}{610} \right) + \left(\frac{16,68}{556} \right) + \left(\frac{0,0002}{0,1} \right) + \left(\frac{0,0016}{0,8} \right) \right]$$

$$\frac{w_h}{h} = [(0,01) + (0,021) + (0,03) + (0,03) + (0,002) + (0,002)] = 0,095$$

sistemin maksimum toplam belirsizlik hatası $\% 9,5$ ‘dur.

EK -6 DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 1. Silis kumu ($d_p = 247\mu\text{m}$, $T_Y = 55\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	159,40	456,50	739,45	826,38	837,58	837,58
Re_p	20,18	30,27	35,73	40,36	49,60	60,11
Fr	1384,44	3114,99	4341,39	5537,76	8366,72	12287,49
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,27	3,15	8,15	13,70	21,70	28,70
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	64,49	69,92	77,22	78,72	78,71	80,71
T_o ($^\circ\text{C}$)	16,50	16,00	16,00	16,00	15,00	15,00

Çizelge 6. 2. Silis kumu ($d_p = 350\mu\text{m}$, $T_Y = 55\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	154,53	448,24	728,93	793,22	815,25	815,25
Re_p	28,59	42,89	50,63	57,18	70,29	85,18
Fr	977,02	2198,29	3063,78	3908,07	5904,51	8671,46
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,27	2,70	7,40	12,70	17,50	25,40
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	65,49	71,42	78,72	80,24	80,23	81,73
T_o ($^\circ\text{C}$)	16,50	15,00	16,00	16,00	15,00	15,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 3. Silis kumu ($d_p = 690\mu\text{m}$, $T_Y = 55\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	145,02	333,36	543,27	637,59	697,80	697,80
Re_p	72,30	108,45	128,03	144,60	177,73	215,39
Fr	386,39	869,38	1211,67	1545,57	2335,12	3429,39
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,17	2,25	7,12	11,80	18,40	23,70
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	69,49	75,49	82,83	84,83	84,80	84,80
T_o ($^\circ\text{C}$)	16,50	16,00	16,00	15,00	15,00	15,00

Çizelge 6. 4. Silis kumu ($d_p = 247\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	804,19	1361,95	1926,96	2434,01	2511,28	2511,28
Re_p	9,46	14,19	16,75	18,92	23,26	28,19
Fr	1384,44	3114,99	4341,39	5537,76	8366,72	12287,49
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,279	3,156	8,155	13,700	21,700	28,700
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	321,68	327,62	340,92	351,02	351,27	356,27
T_o ($^\circ\text{C}$)	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	14,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 5. Silis kumu ($d_p = 350\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	804,19	1305,21	1826,00	2320,38	2320,38	2357,95
Re_p	13,41	20,11	23,74	26,81	32,96	39,94
Fr	977,02	2198,29	3063,78	3908,07	5904,51	8671,46
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,240	2,97	7,80	13,20	21,20	28,00
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	322,58	329,65	343,47	374,29	352,98	359,86
T_o ($^\circ\text{C}$)	15,50	15,00	15,00	14,00	14,00	14,00

Çizelge 6. 6. Silis kumu ($d_p = 690\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	826,38	1277,29	1792,95	2209,46	2227,76	2227,76
Re_p	33,90	50,85	60,03	67,80	83,34	101,00
Fr	386,39	869,38	1211,67	1545,57	2335,12	3429,39
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,19	2,10	7,10	12,20	19,20	26,00
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	337,57	339,67	356,49	381,35	355,56	355,56
T_o ($^\circ\text{C}$)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 7. Çelik tozu ($d_p = 279\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşimli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
$M_H (\text{kg-H} / \text{h})$	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
$Q_{\text{elk}} (\text{W})$	918,13	1944,05	2770,73	3194,78	3238,85	3238,85
Re_p	10,69	16,03	18,93	21,37	26,27	31,84
Fr	1225,65	2757,71	3843,46	4902,60	7407,10	10878,18
$P_{z=0,6\text{m}} (\text{mbar})$	0,17	1,57	5,24	8,20	13,30	14,90
$T_{\text{ID}} (^\circ\text{C})$	317,36	333,24	351,17	361,32	359,54	364,11
$T_o (^\circ\text{C})$	14,00	14,00	14,00	13,00	13,00	13,00

Çizelge 6. 8. Çelik tozu ($d_p = 403\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşimli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
$M_H (\text{kg-H} / \text{h})$	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
$Q_{\text{elk}} (\text{W})$	894,74	1893,00	2709,72	3129,25	3172,86	3172,86
Re_p	15,44	23,16	27,34	30,87	37,95	45,99
Fr	848,53	1909,19	2660,85	3394,11	5127,99	7531,05
$P_{z=0,6\text{m}} (\text{mbar})$	0,14	1,40	5,10	8,00	12,90	14,50
$T_{\text{ID}} (^\circ\text{C})$	318,63	334,53	352,46	362,62	360,83	362,89
$T_o (^\circ\text{C})$	13,00	13,00	13,00	12,00	12,00	12,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 9. Çelik tozu ($d_p = 615\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	848,86	1826,00	2629,44	3085,94	3129,25	3350,33
Re_p	22,98	34,48	40,70	45,97	56,50	68,47
Fr	569,93	1282,34	1787,21	2279,71	3444,30	5058,35
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,12	1,20	4,80	7,80	12,70	14,10
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	319,66	335,57	353,51	363,64	361,92	356,79
T_o ($^\circ\text{C}$)	12,00	12,00	12,00	12,00	11,00	11,00

Çizelge 6. 10. Bakır tozu ($d_p = 299\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	941,82	2246,13	3440,88	3911,71	4208,70	4108,50
Re_p	11,45	17,18	20,28	22,91	28,16	34,12
Fr	1143,67	2573,25	3586,37	4574,67	6911,64	10150,54
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,14	1,20	3,25	5,40	8,40	9,70
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	310,10	326,63	345,97	352,60	345,39	345,65
T_o ($^\circ\text{C}$)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6 . 11. Bakır tozu ($d_p = 428\mu\text{m}$, $T_Y = 300^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	918,13	2173,09	3350,33	3815,13	4108,50	4009,50
Re_p	16,39	24,59	29,03	32,79	40,30	48,84
Fr	798,96	1797,67	2505,43	3195,85	4828,46	7091,15
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,13	1,12	3,10	5,10	8,30	9,40
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	311,12	327,67	347,02	353,66	346,45	345,71
T_o ($^\circ\text{C}$)	11,00	11,00	11,00	10,00	10,00	10,00

Çizelge 6.12. Bakır tozu ($d_p = 612\mu\text{m}$, $T_Y = 300^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	894,74	2101,26	3260,99	3719,76	3960,46	3960,46
Re_p	23,44	35,16	41,51	46,89	57,63	69,84
Fr	558,75	1257,19	1752,16	2235,01	3376,76	4959,17
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,12	0,97	2,60	5,00	7,90	9,00
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	313,13	329,71	349,07	355,71	347,73	346,73
T_o ($^\circ\text{C}$)	11,00	11,00	10,00	10,00	10,00	10,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 13. Alüminyum tozu ($d_p = 262\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
$M_H (\text{kg-H} / \text{h})$	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
$Q_{\text{elk}} (\text{W})$	918,13	2065,79	2894,78	2915,71	3532,63	3532,63
Re_p	10,04	15,05	17,77	20,07	24,67	29,90
Fr	1305,18	2936,65	4092,84	5220,71	7887,71	11584,01
$P_{z=0,6m} (\text{mbar})$	0,22	2,32	7,37	12,87	19,00	23,80
$T_{\text{ID}} (^\circ\text{C})$	312,93	329,54	347,06	347,05	348,58	351,57
$T_o (^\circ\text{C})$	11,00	11,00	10,00	10,00	10,00	10,00

Çizelge 6. 14. Alüminyum Tozu ($d_p = 432\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
$M_H (\text{kg-H} / \text{h})$	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
$Q_{\text{elk}} (\text{W})$	906,40	2013,17	2894,78	3440,88	3472,85	3472,85
Re_p	16,55	24,82	29,30	33,10	40,68	49,30
Fr	791,57	1781,02	2482,23	3166,26	4783,75	7025,49
$P_{z=0,6m} (\text{mbar})$	0,20	2,10	7,25	12,63	18,86	23,40
$T_{\text{ID}} (^\circ\text{C})$	313,82	330,46	350,76	360,14	350,42	352,61
$T_o (^\circ\text{C})$	11,00	11,00	11,00	11,00	10,00	10,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 15. Alüminyum Tozu ($d_p = 623\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	871,65	1961,21	2832,41	3350,33	3395,45	3395,45
Re_p	23,86	35,80	42,26	47,73	58,67	71,10
Fr	548,89	1234,99	1721,23	2195,55	3317,14	4871,61
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,19	1,90	7,12	12,35	18,70	22,10
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	315,14	331,79	352,10	361,49	351,76	351,76
T_o ($^\circ\text{C}$)	12,00	12,00	11,00	11,00	10,00	10,00

Çizelge 6. 16. Kum ($d_p = 284\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	1014,71	1222,36	1826,00	2357,95	2395,83	2395,83
Re_p	10,88	16,32	19,26	21,76	26,74	32,41
Fr	1204,07	2709,16	3775,79	4816,29	7276,69	10686,66
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,30	4,00	9,10	15,10	23,90	30,20
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	346,56	342,70	355,97	369,06	369,04	374,34
T_o ($^\circ\text{C}$)	11,00	10,00	11,00	11,00	11,00	10,00

EK -6 (Devam) DAY'ın hidrodinamik özellikleri

Çizelge 6. 17. Kum ($d_p = 390\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

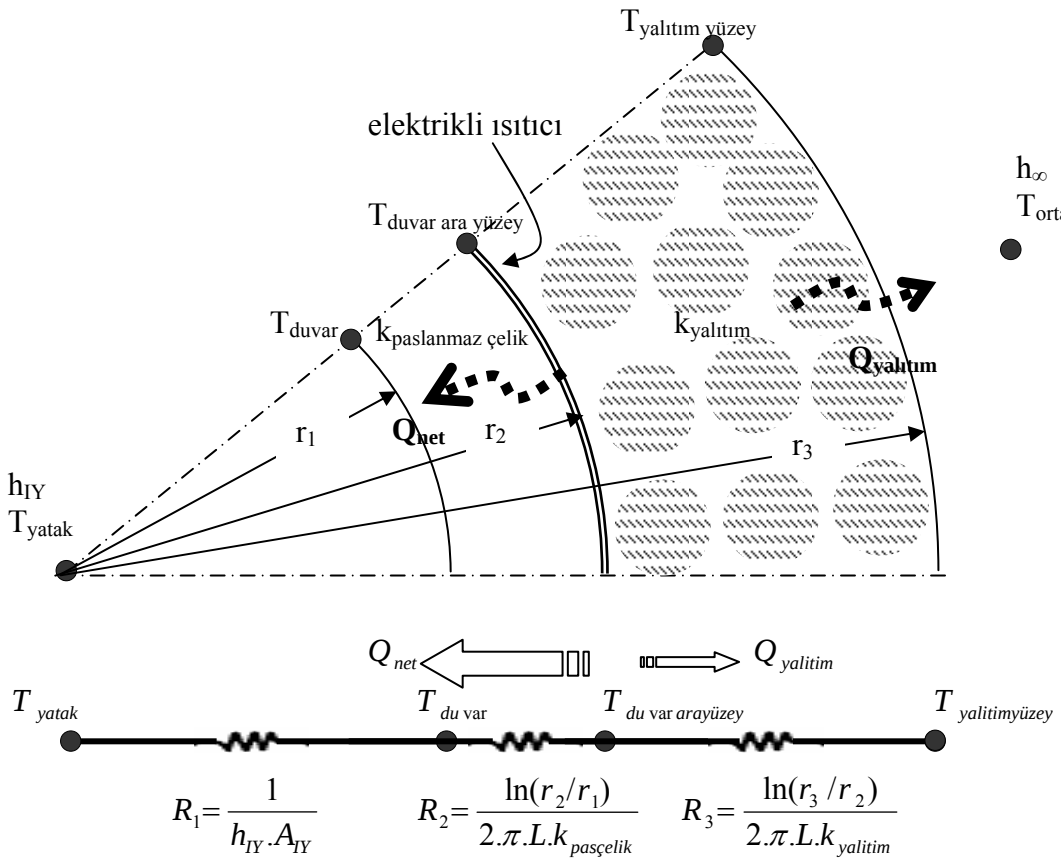
Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	965,82	1090,32	1695,61	2209,46	2209,46	2246,13
Re_p	14,94	22,41	26,46	29,88	36,73	44,51
Fr	876,81	1972,83	2749,55	3507,24	5298,92	7782,08
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,28	3,95	9,00	14,92	23,80	30,00
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	351,59	344,28	357,35	370,35	370,85	376,13
T_o ($^\circ\text{C}$)	11,00	10,00	10,00	10,00	9,00	9,00

Çizelge 6.18. Kum ($d_p = 677\mu\text{m}$, $T_Y = 300\text{ }^\circ\text{C}$) için dolaşımli akışkan yatağın hidrodinamik özellikleri

Deney No Parametre	I	II	III	IV	V	VI
M_H (kg-H / h)	28,80	43,20	51,00	57,60	70,80	85,80
Q_{elk} (W)	894,74	941,82	1449,33	1792,95	1859,35	1859,35
Re_p	34,71	52,06	61,46	69,41	85,32	103,39
Fr	377,44	849,23	1183,58	1509,74	2280,99	3349,90
$P_{z=0,6m}$ (mbar)	0,185	3,200	7,900	13,140	23,100	28,700
T_{ID} ($^\circ\text{C}$)	356,63	352,36	362,29	372,79	372,20	372,20
T_o ($^\circ\text{C}$)	11,00	11,00	11,00	11,00	10,00	10,00

EK – 7 Isıtılmış yüzey (duvar) ile yatak arasındaki ısı analoji modeli ve ilgili eşitlikler

Dolaşımlı akışkan yatak test sisteminde duvardan yatağa olan ısı transfer mekanizması ısıl devresinin şematik gösterimi Şekil 1. de verilmiştir.



Şekil 1. Dolaşımlı akışkan yatak test sistemi ısı transfer mekanizması ısıl devresi

Silindir duvar için Fourier ısı iletim kanunu Eş. 1 de verilmiştir.

$$Q = -k.A \frac{dT}{dr} \quad (\text{W}) \quad \text{ve} \quad A = 2.\pi.r.L \quad (1)$$

Transformatör(varyak) kontrollü kelepçeli ısıtıcılara verilen güç hesabı için;

$Q_{elk} = V(\text{Volt}) * I(\text{Amper})$ olmaktadır.

EK – 7 (Devam) Isıtılmış yüzey (duvar) ile yatak arasındaki ısı analoji modeli ve ilgili eşitlikler

Isıl çiftler(NiCr-Ni - K tipi) ile ölçülmüş $T_{du\ var\ arayüzey}$ değeri ve infrared termometre ile ölçülmüş $T_{yalitimyüzey}$ değerleri Eş. 2 de yerine konursa yalıtımdan olan ısı kaybı ($Q_{yalitim}$) hesaplanabilir.

$$Q_{yalitim} = \frac{T_{du\ var\ arayüzey} - T_{yalitimyüzey}}{R_3} = \frac{T_{du\ var\ arayüzey} - T_{yalitimyüzey}}{\frac{\ln(r_3 / r_2)}{2.\pi.L.k_{yalitim}}} \quad (2)$$

Böylece sisteme verilen net elektrik gücü (Q_{net}) Eş. 3 den bulunabilir.

$$Q_{net} = Q_{elk} - Q_{yalitim} \quad (3)$$

Sisteme verilen net elektrik gücü miktarının bulunması ile Eş. 4 ve 5 den $T_{du\ var}$ (partikül temas yüzey sıcaklığı) hesaplanabilir.

$$Q_{net} = \frac{T_{du\ var\ arayüzey} - T_{du\ var}}{R_2} = \frac{T_{du\ var\ arayüzey} - T_{du\ var}}{\frac{\ln(r_2 / r_1)}{2.\pi.L.k_{pasçelik}}} \quad (4)$$

$$T_{du\ var} = T_{du\ var\ arayüzey} - \frac{Q_{net} \cdot \ln(r_2 / r_1)}{2.\pi.L.k_{pasçelik}} \quad (5)$$

Dolaşımli akışkan yatakta, ısıtma yüzeyinden yatağa taşınımı olan ısı tranfer katsayısı h_{IY} , Eş. 5 den bulunan ısıtılmış yüzey sıcaklığı $T_{du\ var}$, Eş. 4 den hesaplanan sisteme verilen net elektrik gücü Q_{net} ve ısıl çiftler ile ölçülen yatak sıcaklığı T_{yatak} değerleri ile aşağıda verilen Eş. 6 yardımıyla bulunabilir.

$$h_{IY} = \frac{Q_{net}}{2.\pi.r_1.L.(T_{du\ var} - T_{yatak})} \quad (6)$$

EK – 7 (Devam) Isıtılmış yüzey (duvar) ile yatak arasındaki ısı analoji modeli ve ilgili eşitlikler

Dolaşımlı akışkan yatak test sisteminde yataktan daldırılmış yüzeye olan ısı transferinin (h_{DY}) hesabı için ise Eş. 7 ve 8 kullanılmıştır.

$$Q_{su} = m_{su} \cdot c_{su} \cdot (T_{sucikis} - T_{sugiris}) \quad (7)$$

$$h_{DY} = \frac{Q_{su}}{2 \cdot \pi \cdot r_{tüp} \cdot L_{tüp} \cdot (T_{yatak} - T_{tüpyüzey})} \quad (8)$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERBAŞ, Oğuzhan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 28.11.1974 Kütahya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 231 19 40
 Faks : 0 (312) 231 19 40
 e-mail : oguzhanerbas@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Dumlupınar Üniv. /Makine Müh.Böl.	2001
Lisans	Dumlupınar Üniv. /Makine Müh.Böl.	1997
Lise	Aksaray Lisesi	1991

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1997-2003	Dumlupınar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2003-2007	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Yüksek Lisans Tez Konusu:

Erbaş O., 2001, “Kütahya’da Hava Kirliliğinin Azaltılmasına Yönelik Çözüm Önerileri ve Matematiksel Modelleme”,Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniv. Fen Bilimleri Enst., Kütahya

1) Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

Köse, R., Özgür, M.A., **Erbaş, O.**, Tuğcu, A., The Analysis of Wind Data and Wind Energy Potential in Kutahya, Turkey, Renewable & Sustainable Energy Review 2004;8(3):277-288.

II) Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Köse, R., **Erbaş, O.**, Bazı Meteorolojik Faktörlerin Kütahya'daki Hava Kirliliğine Etkisi, DPÜ Fen Bilimleri Dergisi, sayı 4, Eylül 2003, s: 255-270, Kütahya.
2. Köse, R., **Erbaş, O.**, Özgür, A., Assessment and Measurements Of SO₂ And PM Pollutants In Kutahya, Turkey”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(1-2) 161-170, 2006, Kayseri.

III)Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Aydın, Ö., Ceylan, N., Köse, R., **Erbaş, O.**, Otto Motorlarında Yakıt Sistemlerinin Optimizasyonunun Yanma Olayına Etkisinin İncelenmesi, 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, 17-18.07.2002, Ankara.
2. **Erbaş, O.**, Köse, R., Özgür, A., Aydın, Ö., Kütahya'da Hava Kirliliğinin Nedenleri ve Azaltılmasına Yönelik Çözüm Önerileri, 7. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, 17-18.07.2002, Ankara.
3. **Erbaş, O.**, Durmaz, A., Topal, H., Dağılmış Faz ve Partikül Kümeleşme Oluşumunun Dolaşım Akışkan Yatakta Isı Transferine Katkısı, Uluslararası 9. Yanma Sempozyumu, Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 16-17 kasım 2006, Kırıkkale.
4. **Erbaş, O.**, Yılmazoğlu, Z., Topal, H., Durmaz, A., The Evaluation Of The Air Pollution Problem Originating From Combustion During The EU Adaptation Process, Uluslararası 9. Yanma Sempozyumu, Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 16-17 kasım 2006, Kırıkkale.

IV) Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Köse, R., **Erbaş, O.**, Kütahya'da Hava Kirliliğine Yakma Sistemlerinin Etkisi ve Çözüm Yolları, IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, Balıkesir Üniversitesi, 11-13.09.2002, Balıkesir.
2. Özgür, A., Köse, R., **Erbaş, O.**, Tuğcu, A., Kütahya'da Seçilen Bir Konumda Rüzgar Verileriyle Elektrik Enerjisi Üretim Potansiyelinin Bulunması, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 16-18 Ekim 2002, İstanbul.
3. **Erbaş, O.**, Köse, R., Özgür, A., Tuğcu, A., Kütahya'da Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Kontrol Boyutu, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 16-18 Ekim 2002, İstanbul.
4. Tuğcu, A., Köse, R., **Erbaş, O.**, Özgür, A., Jeotermal Enerji İle Kent Isıtmasında Simav Örneği, IV. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 16-18 Ekim 2002, İstanbul.

5. **Erbaş,O.**, Köse, R., Özgür, A., Arslan, O., Kütahya’da İmisyon Davranışına Meteorolojik Faktörlerin Etki Süreci, I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 22-24 Mayıs 2003, Denizli.
6. Özgür,A.,Köse, R., **Erbaş, O.**, Tuğcu, A., Kütahya Kızılbayır Mevkiinde Rüzgar Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Çalışmaları, I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 22-24 Mayıs 2003, Denizli.
7. **Erbaş, O.**, Topal, H., Köse, R., Enerji – Çevre İlişkisinde Yakıt Seçiminin Önemi ve Kütahya Örneği, II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 26-28 Mayıs 2004, Kütahya.
8. Topal, H., **Erbaş, O.**, Köse, R., Durmaz, A., Kütahya’da Isınma Amaçlı Kullanılan Yakıtların Akışkan Yataklı Yakma Sisteminde Emisyon Davranışının İncelenmesi,II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 26-28 Mayıs 2004, Kütahya.
9. Topal, H., **Erbaş, O.**, Durmaz, A., Sobalardan Kaynaklanan Hava Kirliliği ve Alınabilecek Önlemlerin İncelenmesi, II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 26-28 Mayıs 2004, Kütahya.
10. **Erbaş, O.**, Topal, H., Durmaz, A., Akışkan Yataklı Sistemlerde Isı Transfer Mekanizmasının Analizi, III. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 24-26 Mayıs 2006, Muğla.
11. Topal, H., Büyükgüner,M., **Erbaş, O.**, Durmaz, A., Akışkan Yataklı Yakıcılarda Adsorbent Reaktivite İndeksinin Belirlenmesi, III. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 24-26 Mayıs 2006, Muğla.
12. Durmaz, A., Topal, H., **Erbaş, O.**, Düşük Kaliteli Linyitlerin Elektriğe Dönüşümünde Yanma Optimizasyonu ve Emisyon Kontrolü, III. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, 24-26 Mayıs 2006, Muğla.
13. **Erbaş,O.**, Rahim, M., Yılmazoğlu, Z., Köse, R., Özgür, A., Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of The Long-Range Transmission Of Air Pollutants In Europe (EMEP) and Turkey, 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs – 2 Haziran 2007, Kayseri.
14. Rahim, M., Yılmazoğlu, Z., **Erbaş,O.**, Durmaz, A., Kompresör Giriş Havaasının Soğutulmasıyla Kombine Çevrim Santralinin Performansının Artırılması, 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs – 2 Haziran 2007, Kayseri.
15. **Erbaş,O.**, Durmaz, A., Topal, H., Partikül Paketlerinin Akışkan Yatakta Isıtma Yüzeyine Temas Zamanı İle Isı Transfer Katsayısının Değişimi, 16. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, 30 Mayıs – 2 Haziran 2007, Kayseri.