

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABARCIK KOLONDA AKIŞ REJİMİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan ŞAL

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Programı: Isı - Akışkan

Haziran 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABARCIK KOLONDA AKIŞ REJİMİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan ŞAL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06 Mayıs 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 10 Haziran 2011

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ahmet DURMAYAZ (İTÜ)

Prof. Dr. A. Feridun ÖZGÜÇ (İTÜ)

Haziran 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, kabarcık kolonlarda rejim geçişini etkileyen parametreler irdelenmiş ve 4 farklı gaz dağıtıcı için deneysel olarak gaz kesri eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen eğriler kullanılarak kabarcık kolonda akış rejimleri belirlenmiş ve rejim geçiş noktaları tespit edilmiştir. Plaka tipi ve geometrisinin rejim geçişi üzerindeki etkisi irdelenmiş ve gaz kesri için boyutsuz sayılar kullanılarak bir korelasyon elde edilmiştir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan, her fırsatta yardımını esirgemeyen değerli hocam Sn. Doç. Dr. Mustafa ÖZDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve destek olan TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü Müdür Yardımcısı Sn. Doç. Dr. Fehmi AKGÜN'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar öncesinde test sisteminin hazırlanması ile ilgili olarak desteklerini esirgemeyen Sn. Hüseyin ÇAMKERTEN, Sn. İmdat DENİZ ve Sn. Mevlüt ORANLI'ya teşekkür ederim.

Son olarak, tüm hayatım boyunca bu noktaya gelebilmem için bana destek olan, her attığım adımda yanımda olduklarını hem maddi hem manevi olarak hissettiren sevgili AİLEME şükranlarımı sunarım.

Haziran 2011

Sinan ŞAL

Makina Mühendisi

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Projenin Amacı.....	2
1.2. Tezin Amacı.....	2
2. FT PROSESİ	5
2.1. FT Teknolojisinin Tarihçesi.....	5
2.2. FT Prosesi.....	6
2.2.1.Düşük sıcaklık FT prosesleri.....	7
2.2.2.Yüksek sıcaklık FT prosesleri.....	9
3. KABARCIK KOLONLARIN HİDRODİNAMİĞİ	13
3.1. Akış Rejimleri.....	13
3.2. Gaz Kesri.....	14
3.2.1.Ortalama gaz hızının gaz kesrine etkisi.....	15
3.2.2.Sıvı özelliklerinin gaz kesrine etkisi.....	16
3.2.3.Çalışma koşullarının gaz kesrine etkisi.....	18
3.2.4.Kolon geometrisinin gaz kesrine etkisi.....	20
3.2.5.Gaz dağıtıcının gaz kesrine etkisi.....	22
4. KABARCIK KOLONLARDA REJİM GEÇİŞİ	25
4.1. Rejim Geçişinin Deneysel Olarak İncelenmesi.....	25
4.1.1.Görsel gözlemler.....	26
4.1.2.Hidrodinamik parametreler.....	26
4.1.3.Hidrodinamik ile ilgili zamana bağlı parametreler.....	28
4.1.4.İleri ölçüm teknikleri.....	29
4.2. Literatürde Bulunan Deneysel Çalışmalar.....	30
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
5.1. Test Sistemi.....	35
5.2. Gaz Kesrinin Belirlenmesi.....	42
5.3. Boyutsuz Sayılarla Analiz (Buckingham – π Teoremi).....	43
6. SONUÇLAR	47
6.1. Basınç Farkı Eğrileri.....	47
6.2. Gaz Kesri ve Sürüklenme Akısı Eğrileri.....	49
6.2.1.Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri.....	49
6.2.2.Örümcek tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri.....	57

6.2.3. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcı ve örümcek tipi gaz dağıtıcı için elde edilen sonuçların karşılaştırılması	58
6.3. Regresyon Analizi İle Korelasyon Bulma	60
7. ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

A_C	: Kolon kesit alanı, m ²
C_v	: Hacimsel katı yükleme oranı, %
d₀	: Dağıtıcı plaka delik çapı, m
d_p	: Katı partikül (katalizör) çapı, m
D_C	: Kolon çapı, m
D_S	: Örümcek tipi gaz dağıtıcı çapı, m
g	: Yerçekimi ivmesi, ms ⁻²
h	: Basınç ölçerler arasındaki mesafe, Denklem (8), m
H	: Kolon yüksekliği, m
j_{GL}	: Sürüklenme akısı, ms ⁻¹
k	: Bağımsız temel fiziksel büyüklük sayısı
n	: Fiziksel değişken sayısı
N	: Gaz dağıtıcı plaka delik sayısı
Nl	: Normal litre
p	: Boyutsuz sayı
P	: Basınç, Pa
r_p	: Gözenek yarıçapı, Denklem (3), m
Q_G	: Kolona beslenen gaz debisi, m ³ s ⁻¹
t	: Gaz dağıtıcı plaka kalınlığı, m
T	: Sıcaklık, K
U_G	: Ortalama gaz hızı, ms ⁻¹
V	: Hacim, m ³

Yunan harfleri

ρ	: Yoğunluk, kgm ⁻³
μ	: Dinamik viskozite, kgm ⁻¹ s ⁻¹
σ	: Yüzey gerilimi, Nm ⁻¹
ε	: Gaz kesri
Δ	: Fark

Alt simge

- G** : Gaz fazı
L : Sıvı fazı
f : İki faz, Denklem (8),
ort : Ortalama değer
mak : Maksimum değer
min : Minimum değer

Kısaltmalar

- BC** : Kabarcık kolon (Bubble Column)
CARPT : Bilgisayarlı otomatik radyoaktif parçacık takibi (Computer Automated Radioactive Particle Tracking)
CT : Bilgisayarlı tomografi (Computed Tomography)
DGD : Dinamik gaz kesilmesi (Dynamic Gas Disengagement)
ECT : Elektriksel sığa tomografisi (Electrical Capacitance Tomography)
ERT : Elektriksel direnç tomografisi (Electrical Resistance Tomography)
LDA : Lazer Doppler anemometresi (Laser Doppler Anemometry)
MFC : Kütle akış kontrolör (Mass Flow Controller)
PIV : Parçacık görüntü hız ölçümü (Particle Image Velocimetry)
PT : Basınç ölçer (Pressure Transmitter)
SAS : Sasol Advanced Synthol
SBC : Bulamaç faz kabarcık kolon (Slurry Bubble Column)
TC : Isılçift (Thermocouple)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Sabit yatak reaktör ile bulamaç faz reaktörün karşılaştırılması	9
Çizelge 4.1: Rejim geçişi ile ilgili literatürde bulunan deneysel çalışmalar.....	30
Çizelge 5.1: Test sisteminin boyutları	35
Çizelge 5.2: Test sisteminde kullanılan ölçüm cihazları ve özellikleri	38
Çizelge 5.3: Delikli plakalara ait tasarım bilgileri.....	38
Çizelge 5.4: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait tasarım bilgileri.....	41
Çizelge 6.1: Plaka 1 için rejim geçiş noktaları	50
Çizelge 6.2: Plaka 2 için rejim geçiş noktaları	52
Çizelge 6.3: Plaka 3 için rejim geçiş noktaları	53
Çizelge 6.4: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için rejim geçiş noktalarının karşılaştırılması	55
Çizelge 6.5: Örümcek tipi gaz dağıtıcı için rejim geçiş noktaları	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: FT prosesleri genel akım şeması [1].....	7
Şekil 2.2: Düşük sıcaklık FT reaktörleri [1,3]: (a) Çok tüplü sabit yatak reaktör; (b) Bulamaç faz reaktör	8
Şekil 2.3: Yüksek sıcaklık FT reaktörleri [3]: (a) Dolaşımli akışkan yataklı reaktör; (b) Sabit akışkan yataklı reaktör	11
Şekil 3.1: Ortalama gaz hızı ve kolon çapına bağlı olarak akış haritası [4,5]	14
Şekil 3.2: Gaz kesrini etkileyen parametreler	15
Şekil 3.3: Gaz kesrinin ortalama gaz hızı ile değişimi [15].....	16
Şekil 3.4: Viskozitenin gaz kesri üzerindeki etkisi [6].....	17
Şekil 3.5: Kolon basıncının gaz kesri üzerindeki etkisi [25].....	18
Şekil 3.6: Kolon basıncının viskoziteye bağlı olarak gaz kesri üzerindeki etkisi [26].....	19
Şekil 3.7: Titreşimin gaz kesri üzerindeki etkisi [27].....	20
Şekil 3.8: Gaz kesrinin kolon geometrisi ile değişimi [20]	21
Şekil 3.9: Sıvı yüksekliğinin gaz kesrine etkisi [38]	21
Şekil 3.10: Gaz dağıtıcı tipleri	22
Şekil 3.11: Ortalama gözenek çapının gaz kesri üzerindeki etkisi [6]	23
Şekil 4.1: İki boyutlu bir kabarcık kolonda akış rejimleri: (a) homojen akış; (b) heterojen akış	26
Şekil 4.2: Tipik gaz kesri eğrileri	27
Şekil 4.3: Sürüklenme akısı-gaz kesri eğrisi [40].....	27
Şekil 4.4: Tipik basınç sinyali eğrileri: (a) homojen akış; (b) heterojen akış.....	28
Şekil 5.1: Test sisteminin proses diyagramı	36
Şekil 5.2: Test sistemi.....	37
Şekil 5.3: Delikli plakalara ait imalat resimler	39
Şekil 5.4: Tasarlanan delikli plakalar (a) Plaka 1; (b) Plaka 2; (c) Plaka 3	40
Şekil 5.5: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait imalat resmi.....	41
Şekil 5.6: Tasarlanan örümcek tipi gaz dağıtıcı.....	42

Şekil 6.1: Basınç dalgalanması eğrileri.....	48
Şekil 6.2: Plaka 1 için gaz kesri eğrisi	49
Şekil 6.3: Plaka 1 için sürüklenme akısı eğrisi	50
Şekil 6.4: Plaka 2 için gaz kesri eğrisi	51
Şekil 6.5: Plaka 2 için sürüklenme akısı eğrisi	51
Şekil 6.6: Plaka 3 için gaz kesri eğrisi	52
Şekil 6.7: Plaka 3 için sürüklenme akısı eğrisi	53
Şekil 6.8: Delikli plakalar için elde edilen gaz kesri eğrileri.....	54
Şekil 6.9: Delikli plakalar için elde edilen sürüklenme akısı eğrileri.....	54
Şekil 6.10: Homojen rejim-geçiş bölgesi geçiş hızlarının plaka delik çapı ile değişimi	56
Şekil 6.11: Geçiş bölgesi-heterojen rejim geçiş hızlarının plaka delik çapı ile değişimi	56
Şekil 6.12: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait gaz kesri eğrisi	57
Şekil 6.13: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait sürüklenme akısı eğrisi	57
Şekil 6.14: Plaka 2 ve örümcek tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri eğrileri	59
Şekil 6.15: Plaka 2 ve örümcek tipi gaz dağıtıcılar için sürüklenme akısı eğrileri....	59
Şekil 6.16: Deneysel sonuçlar ile korelasyonun karşılaştırılması.....	60
Şekil 6.17: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesrinin Froude sayısı ile değişimi	61
Şekil 6.18: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesrinin Weber sayısı ile değişimi	62

ÖZET

KABARCIK KOLONDA AKIŞ REJİMİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Bulamaç (Slurry) faz kabarcık kolonlar çok fazlı reaktörler olarak kimya endüstrisinde oldukça fazla kullanılmaktadırlar. Oksidasyon ve hidrojenasyon reaksiyonları, Fischer – Tropsch (FT) sentezi ve metanol sentezi bu tarz reaktörlerin kullanıldığı uygulamalardan bir kaçıdır. Bulamaç faz kabarcık kolonların diğer çok fazlı reaktörlere üstünlükleri olarak: basit konstrüksiyonu, çok etkin kütle ve ısı transferleri, kolonda hareketli parça olmayışı ve düşük işletme maliyetleri sayılabilir.

Bulamaç faz kabarcık kolonların tasarımında ortalama gaz kesri, rejim geçiş hızları, sıvı hızı, kabarcık boyutları gibi hidrodinamik karakteristiklerin çok güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu karakteristikler sıvı, katı ve gaz faza ait özellikler, işletme koşulları (basınç ve sıcaklık) ve reaktör tasarım parametreleri (kolon çapı ve gaz dağıtıcı) gibi değişkenlerden etkilenmektedir.

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, gaz dağıtıcı plaka tipi ve geometrisinin hidrodinamik karakteristiklerden gaz kesri ve rejim geçiş hızları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar 33 cm iç çap değerine sahip pleksi malzemenin yapılmış silindirik bir kabarcık kolonda, akışkan çifti olarak hava/su ikilisi kullanılarak atmosferik şartlarda gerçekleştirilmiştir.

Kolon üzerine belirli aralıklarla yerleştirilen basınç ölçerler yardımıyla basınç farkı verisi elde edilmiş ve bu veriler kullanılarak gaz kesri eğrisi elde edilmiştir. Sürüklenme akısı yöntemi kullanılarak rejim geçiş hızları tespit edilmiştir.

İki farklı tipte, dört adet gaz dağıtıcı için rejim geçişinin gerçekleştiği noktalar belirlenmiştir. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılarda artan delik çapı için gaz kesri değerlerinin azaldığı ve rejim geçişlerinin daha düşük ortalama gaz hızlarında gerçekleştiği görülmüştür. Gaz dağıtıcı olarak delikli plaka yerine örümcek tipi dağıtıcı kullanılması halinde gaz kesri eğrileri arasında homojen akış rejiminde pek bir fark görülmezken heterojen (çalkantılı-türbülanslı) rejimde ciddi farklılıklar gözlemlenmiştir. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcı kullanılması durumunda gaz kesri değerleri % 30'lara kadar daha yüksek olmaktadır.

Test sistemi için yapılan boyut analizi sonucu deneylerde etkili olan boyutsuz sayılar belirlenmiş ve regresyon analizi yapılarak gaz kesrini boyutsuz sayılarla ifade eden bir korelasyon elde edilmiştir.

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FLOW REGIME IN A BUBBLE COLUMN

Slurry bubble columns (SBC) are widely used in the chemical industry as a multiphase reactor. Some applications include oxidation and hydrogenation reactions, Fischer-Tropsch (FT) synthesis, and methanol synthesis. The advantages of a SBC over other multiphase reactors are simple construction, good mass and heat transfer, absence of moving parts, and low operation costs.

The design of a SBC reactor requires a reliable prediction of the hydrodynamic characteristics such as: the overall gas hold-up, the regime transition velocity, the liquid velocity, the gas bubble diameters. These are influenced by the physical properties of the gas, the liquid, and the solid phases, the operating parameters (pressure and temperature), and the reactor design parameters (column diameter and gas distributor).

In this MSc thesis, the influence of gas distributor type and geometry on overall gas holdup and regime transition velocities are examined. Experiments were performed in a cylindrical plexiglass bubble column (BC) with an inner diameter of 33 cm under atmospheric conditions using air/water as the fluid pair.

The gas holdup was measured using pressure transmitters which are placed at the specified intervals on the bubble column. Drift flux method was used to identify the regime transition velocities.

Regime transition points were determined for two different type and for four pieces of gas distributors. The gas holdup and regime transition velocities decrease with increasing the hole diameter of perforated plate type gas distributor. When a spider type gas distributor is used instead of using a perforated plate type gas distributor, there is no difference between the gas holdup curves for homogeneous flow regime while significant differences observed in the heterogeneous flow regime. Up to 30% higher gas holdup values are obtained when the spider type gas distributor is used instead of using perforated plate type gas distributor.

Dimensional analysis was carried out to determine the effective dimensionless numbers. A correlation for gas holdup is obtained by using a regression analysis.

1. GİRİŞ

Çok fazlı reaktörler; gaz-sıvı, gaz-katı, sıvı-katı ve gaz-sıvı-katı gibi şekillerde kimya sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bulamaç faz kolonlar, karıştırmalı tank reaktörler, akışkan yatak reaktörler, sabit yatak reaktörler ve dolgu yatak reaktörler kullanılan çok fazlı reaktörlerden bazılarıdır.

Bulamaç faz kabarcık kolonların diğer konvansiyonel çok fazlı reaktörlere göre birçok avantajı bulunmaktadır. Yüksek ısı ve kütle transferi, kolonda hareketli parça bulunmayışı, düşük basınç düşümü ve daha iyi karışma karakteristiği bu tip reaktörlerin en kritik üstünlükleri iken, karmaşık hidrodinamiği ve modellemesinde yaşanan güçlükler dezavantaj oluşturmaktadır.

Oksidasyon, hidrojenasyon, fermantasyon, FT sentezi, metanol sentezi ve polimerizasyon bulamaç faz kabarcık kolonların önemli uygulamalarının bir kısmıdır.

Katalitik ve reaksiyon hızı yüksek olan ekzotermik proseslerde reaksiyon ısısının uzaklaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bulamaç faz kolonların sunmuş olduğu daha iyi karışma özelliği, yüksek ısı transferi ve rahat sıcaklık kontrolüne imkan sağlamaktadır. Böylece ortaya çıkan yüksek miktardaki reaksiyon ısısının uzaklaştırılması kolaylaşmaktadır.

Bulamaç faz kolonlarda görülen iki farklı akış rejimi, homojen rejim ve heterojen rejim, kolon hidrodinamiğini önemli ölçüde karakterize etmektedir. Homojen akış rejimi düşük ortalama gaz hızlarında görülen ve sıvı içerisinde homojen olarak yükselen küçük boyutlu kabarcıklar içeren akış rejimidir. Artan ortalama gaz hızları için akış rejimi homojenden heterojene geçmektedir. Heterojen rejimde; kolon merkezinde hızlı yükselen büyük boyutlu kabarcıklar ile kesit geneline dağılmış ve yavaş hareket eden küçük kabarcıklar görülmektedir.

Kolonun karmaşık hidrodinamiği modelleme ve ölçek büyütme konularında zorluklara neden olmaktadır.

Bulamaç faz kolonların tasarımı, proses çalışmaları (reaksiyon kinetiği, katalizör üretimi ve aktivasyon testleri), soğuk akış hidrodinamik testleri (kabarcık hidrodinamiği, kütle transferi, ısı transferi ve katı yükleme etkisi) ve uygun bir model kurulumunu gerektirir. Daha iyi bir bulamaç faz kolonun tasarlanması için söz konusu parametrelerin detaylı olarak araştırılması gerekmektedir.

1.1. Projenin Amacı

Bu tezde sunulan çalışma TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nde devam etmekte olan TÜBİTAK 1007 kapsamında desteklenen ve 108G043 no'lu "Biyokütle ve Kömür Karışımlarından Sıvı Yakıt Üretimi" isimli proje kapsamında kurulacak olan bulamaç faz kolonun tasarımına yönelik hidrodinamik veri sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Söz konusu projede kömür ve biyokütle karışımından üretilen sentez gazı sırası ile gaz temizleme ve şartlandırma işlemlerinden sonra FT sentezi ile sentetik sıvı yakıt üretilmek amacıyla kullanılmaktadır.

TARAL 1007 (*Kamu Kurumları Araştırma ve Geliştirme Projelerini Destekleme Programı*) kapsamında Elektrik İşleri Etüt İdaresi ile Türkiye Kömür İşletmeleri Genel Müdürlüğü tarafından desteklenen ve TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü'nün yöneticiliğini yaptığı söz konusu proje İstanbul Teknik Üniversitesi, Marmara Üniversitesi, UMDE Mühendislik, Müteahhitlik Tic. Ltd. Şti. ve HABAŞ Sınai ve Tıbbi Gazlar İstihsal Endüstrisi A.Ş. ile işbirliği içerisinde yürütülmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezde sunulan çalışmada esas olarak gaz dağıtıcı plaka tipi ve geometrisinin hidrodinamik karakteristiklerden gaz kesri ve rejim geçiş hızları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada esas olarak iki nokta üzerinde durulmuştur:

- gaz dağıtıcı plaka tipi ve geometrisinin rejim geçişi üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi,
- regresyon analizi ile gaz kesrini boyutsuz sayılarla ifade eden bir korelasyon elde edilmesi.

2. bölümde, FT sentezi hakkında bilgi verilmiştir. Prosesin tarihçesi ve uygulama alanına göre tercih edilen işletme koşullarından bahsedilmiştir. Ayrıca işletme koşullarına bağlı olarak kullanılan reaktör tipleri hakkında bilgi verilmiştir.

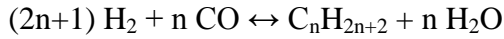
3. bölümde, kolon hidrodinamiğinin en önemli parametrelerinden biri olan gaz kesri hakkında bilgi verilmiştir. Gaz kesrini etkileyen parametrelerin ne olduğu ve etkileri ile ilgili geniş bir literatür bilgisi sunulmuştur.
4. bölümde, rejim geçişinin belirlenmesinde tercih edilen deneysel yöntemlerden bahsedilmiştir. Literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş ve yapılan çalışmalar ile ilgili bilgi verilmiştir.
5. bölümde, yapılan deneysel çalışma hakkında bilgi verilmiştir. Test sistemi ve gaz kesrinin belirlenmesinde kullanılan yöntemden bahsedilmiştir.
6. bölümde, sonuçlar kapsamlı bir şekilde verilmiştir. Her bir plaka tipi için elde edilen gaz kesri eğrilerine, rejim geçiş hızlarına ve regresyon analizi ile elde edilen ve boyutsuz sayılardan oluşan korelasyona yer verilmiştir.
7. bölümde ise öneriler bulunmaktadır.

2. FT PROSESİ

FT prosesi, hidrojen ile karbon monoksit içeren sentez gazının katalizörlü ortamda reaksiyona girerek hidrokarbon üretimi olarak ifade edilebilir.

FT prosesi incelendiğinde tek bir reaksiyon değil, katalizörün de cinsine bağlı olarak gerçekleşen ve birbirini tetikleyen bir reaksiyonlar zinciri olduğu görülür. Hedeflenen son ürün dikkate alınarak seçilen FT reaktörüne, kullanılan katalizöre ve dolayısıyla reaksiyon şartlarına bağlı olarak bir dizi reaksiyonlar sonucunda çok farklı miktar ve özelliklerde ürünler elde edilebilmektedir.

FT prosesinde hidrokarbonlar, CO ve H₂ karışımından üretilir ve prosesin kimyasal reaksiyonu



şeklinde gösterilebilir.

2.1. FT Teknolojisinin Tarihçesi

FT teknolojisinin tarihçesi oldukça eskiye dayanmaktadır. Bu konuda ilk çalışmalar prosese adını veren Franz Fischer ve Hans Tropsch tarafından Almanya'da Kömür Araştırma Merkezinde (Kaiser Wilhelm Institute for Coal Research in Mülheim) 1920'li yıllarda gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmalarda kömür bazlı gaz kullanarak hidrokarbon üretmeyi amaçlamışlardır.

İlk endüstriyel FT reaktörü 1935 yılında yapılmış olan atmosferik koşullarda çalışan sabit yatak reaktörüdür. Bu reaktör metal parçalarla bölümlere ayrılmış bir kutu halindeydi ve katalizör metal bölümlerle tüpler arasına doldurulmaktaydı. Burada FT sentezinden açığa çıkan ısıyı almak için su soğutma sistemi kullanıyordu.

Almanya'da Nazi hükümetinin işbaşına gelmesinden 3 yıl sonra petrolde bağımsızlık projesini başlatmıştır. Bu proje kapsamında 4 adet endüstriyel boyutta toplam kapasitesi 100000- 120000 metrik ton benzin, dizel, yağlayıcı ve diğer petrol ürünleri olan FT tesisi yapılmaya başlanmıştır.

İkinci Dünya savaşı sonrası ABD Birleşik Devletlerinde FT çalışmaları başlamıştır. Hidrokarbon Araştırma Merkezinde (Hydrocarbon Research) geliştirilen ve “Hydrocol” adı verilen proses ile erimiş demir katalizör ile akışkan yatak teknolojilerini içeren Yüksek Sıcaklık FT sentez yöntemiyle, 1951–1957 yılları arasında çalışmalar yapılmıştır.

Yüksek sıcaklık FT teknolojisi daha sonraları en yaygın uygulamasını Güney Afrika’da Mossel körfezinde benzin, dizel, LPG ve bazı oksijenli hidrokarbon ürünleri üretmek amacıyla kurulmuştur. Bu tesis 1993 yılında tam kapasiteyle çalışmaya başlamıştır. Ancak bu teknoloji Güney Afrika dışında çok geniş bir uygulama alanı bulamamıştır.

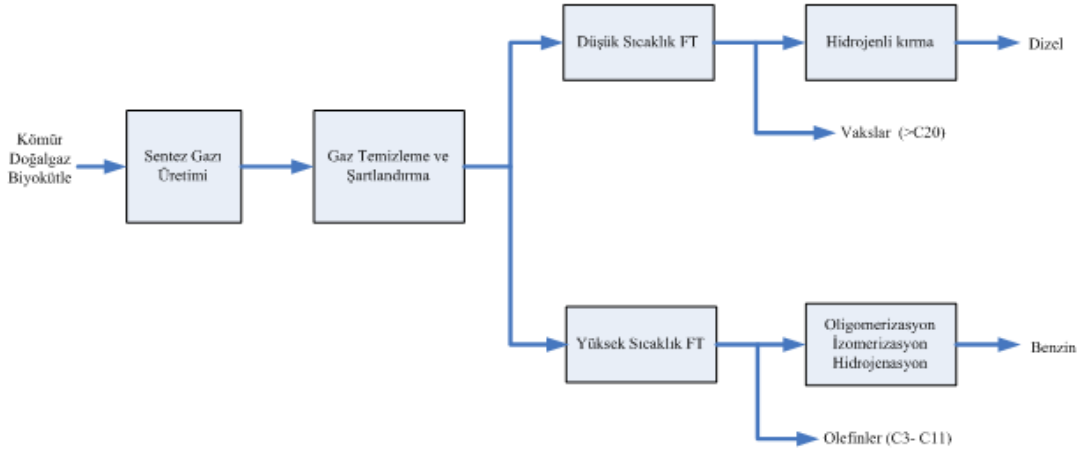
Hydrocol prosesinin bilinen problemlerini çözebilmek amacıyla 1995 yılında SASOL’da (South African Synthetic Oil Limited) Dolaşımli Akışkan Yatak Reaktör teknolojisi geliştirilmiştir. Sasol bu teknolojiyi kömürün ucuz ve çok olduğu Güney Afrika’da ham petrol kaynaklarına uzak bölgede uygulamaya koymuşlardır. Dolaşımli akışkan yataktaki başlangıç problemlerinden dolayı yeni geliştirilen teknolojinin lisans hakları Sasol’e verilmiştir ve prosese ‘Synthol’ adı verilmiştir.

Dolaşımli akışkan yatak reaktörlerinin dünyadaki en geniş uygulaması FT teknolojisinin en geniş uygulamasının olduğu ülkede, Güney Afrika’dadır. Sasol bu reaktörleri daha verimli olan ‘Sasol Advanced Synthol’(SAS) adını verdikleri reaktörlerle değiştirmişlerdir. Bu reaktörlerin performansı Hydrocol akışkan yatak reaktörlerinkinden çok daha iyi olduğu söylenmektedir. SAS reaktörünün kapasitesi 2347 m³/gün’dür. Secunda’da bu reaktörlerden dört adet vardır, ayrıca 1290 m³/gün kapasitede beş reaktör daha vardır. Akışkan yatak sistemlerin bulamaç faz reaktörlerde kullanılmasının ilk uygulaması 1953 yılında Almanya’da demonstrasyon ölçekte gerçekleştirilmiştir. 1993 yılında ise ilk bulamaç faz reaktörün ticari uygulaması Sasolburg’ta yapılmıştır.

1950-1993 yılları arasında FT teknolojisinin adı Sasol’un tarihi gelişimiyle anılmaktadır.

2.2. FT Prosesi

Sıvı yakıt üretim sentezi olarak FT sentezi istenilen ürünlere göre farklı yöntemlere sahiptir. FT prosesleri genel akım şeması Şekil 2.1’de verilmiştir [1].



Şekil 2.1: FT prosesleri genel akım şeması [1]

Akım şemasında da görüldüğü gibi FT prosesleri ürün seçeneklerine bağlı olarak iki ana grupta toplanabilir:

- Düşük Sıcaklık FT Prosesleri
- Yüksek Sıcaklık FT Prosesleri

2.2.1. Düşük sıcaklık FT prosesleri

Düşük sıcaklık FT proseslerinde sentez gazı düşük sıcaklıklarda (180-250°C) büyük oranda ağır vaks hidrokarbonları içeren bir sıvı ürüne dönüşür. Bu sıvı ürün daha sonra özel vakslara rafine edilebildiği gibi hidrojenli kırma ile dizele, yağlama yağlarına ve naftaya dönüştürülebilmektedir. Düşük sıcaklık proseslerinin çalışma basıncı 10-45 bar arasında değişmektedir.

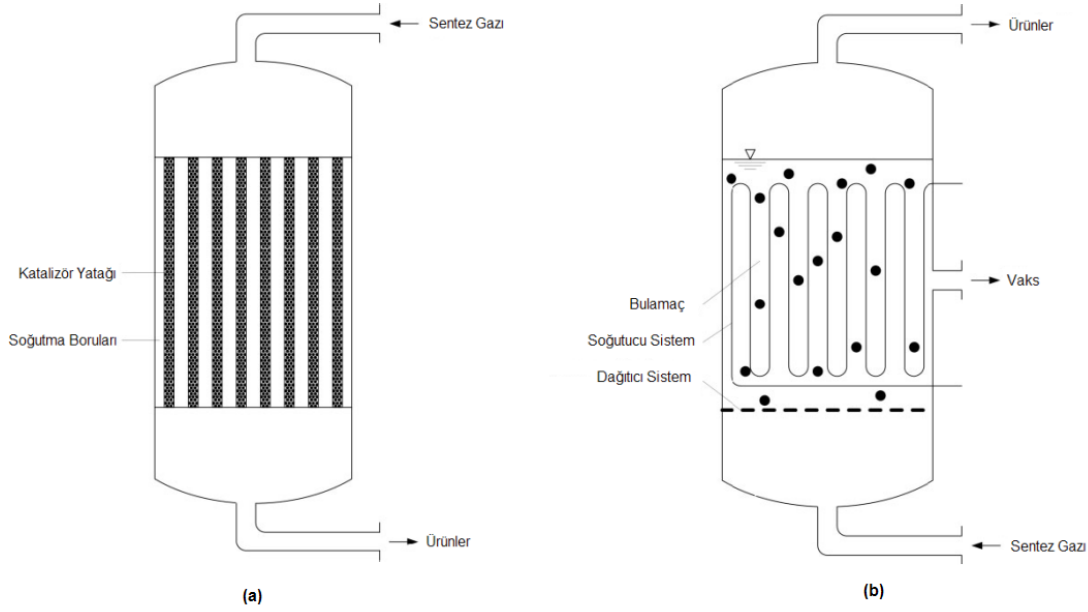
Düşük sıcaklık FT proseslerinde yaygın olarak Şekil 2.2a'da verilen çok tüplü sabit yatak reaktörü kullanılmaktadır. Reaktörün çalışma sıcaklığı 220-260°C ve çalışma basıncı 10-45 bar aralığındadır [1-3].

Çok tüplü sabit yatak reaktörlerin avantajı ürün ile katalizörlerin kolaylıkla ayrılabilmesidir. Ancak reaktör karmaşık bir yapıya sahiptir ve bundan dolayı boyutlandırmanın büyütülmesi mekanik açıdan zordur.

Reaktörün ilk yatırım maliyeti de yüksektir. Bunlara ek olarak reaktördeki yüksek basınç düşüşü olması da (3-7 bar) bir dezavantajdır [2].

Düşük sıcaklık FT prosesleri için tasarlanmış diğer bir reaktör ise Şekil 2.2b'de verilen düşük sıcaklık bulamaç faz reaktörüdür.

Reaktörde kullanılan sıvı genelde FT sentezi sırasında üretilen vaks ürünlerdir. Sentez gazı sıvı fazın içerisinde kabarcıklar oluşturur ve kabarcıklar sayesinde katalizör ile temas sağlanır.



Şekil 2.2: Düşük sıcaklık FT reaktörleri [1,3]: (a) Çok tüplü sabit yatak reaktör; (b) Bulamaç faz reaktör

Bu reaktörlerin en önemli avantajı reaksiyon ortamının çok iyi karıştırılması ve izotermal olarak çalıştırılabilmesidir. Reaktördeki sıcaklık ve konsantrasyon gradyanlarının radyal ve aksel yönde homojen olması, çok daha yüksek ortalama sıcaklıklarda çalışmasını ve sonucunda daha yüksek tepkime hızlarına ulaşmasını sağlamaktadır. Kullanılan katalizör miktarı tüplü sabit yatak reaktörlere göre daha düşük olmasına rağmen; sentez gazı ile katalizörün teması daha etkindir. Katalizör ile sentez gazının etkileşiminin daha iyi olması üretim hızını arttırır.

Bulamaç faz reaktörlerinin imalatı, tüplü sabit yatak reaktörlere göre daha kolaydır. Reaktör 25 bara kadar çalışabilmekte ve basınç kaybı 1 barı geçmemektedir.

Aynı boyutlardaki bir bulamaç faz reaktörü sabit yatak reaktörüyle karşılaştırıldığında, bulamaç faz reaktörünün üretim kapasitesi diğerine göre 5 kat daha fazladır [2,3]. Bulamaç faz reaktör ile sabit yatak reaktörün birbirlerine olan üstünlükleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Sabit yatak reaktör ile bulamaç faz reaktörün karşılaştırılması

	Sabit yatak reaktör	Bulamaç faz reaktör
Sıcaklık kontrolü	-	+
Isı transfer yüzeyi	-	
CH ₄ oluşumu	+	++
Reaksiyon karışımı	-	+
Esneklik	0	+
Basınç düşüşü	-	+
Karbon oluşumu	-	0
Katalizör etkisi	-	+
Katalizör gözenek difüzyonu	-	+
Katalizör değişimi	-	+
Katalizör yıpranması	+	-
Katı-sıvı ayrımı	+	-
Ölçek büyütme	+	-
Reaktör maliyeti	-	+

- : dezavantaj; + : avantaj; 0: nötr

2.2.2. Yüksek sıcaklık FT prosesleri

Yüksek sıcaklık FT proseslerinde sentez gazından hafif sentetik petrol ve olefinler elde edilmektedir. Elde edilen ürünler rafine edilerek çevre dostu benzin, dizel, çözücü ve olefinlere dönüştürülebilmektedir. Güney Afrika'da 1955'ten bu yana Synthol adı verilen ve 330-350°C ile 25 kg/cm²'da çalışan bir dönüşümlü akışkan yatak içeren proses kullanılmaktadır [2].

Yüksek sıcaklık FT proseslerinde Synthol reaktörü olarak bilinen dolaşımli akışkan yatak reaktörler kullanılarak benzin ve hafif olefinler üretilmektedir.

Reaktörün çalışma sıcaklığı 350°C ve çalışma basıncı 25 bardır. Taze sentez gazı ile geri beslenen gaz akımı birleşerek reaktörün alt kısmından beslenir.

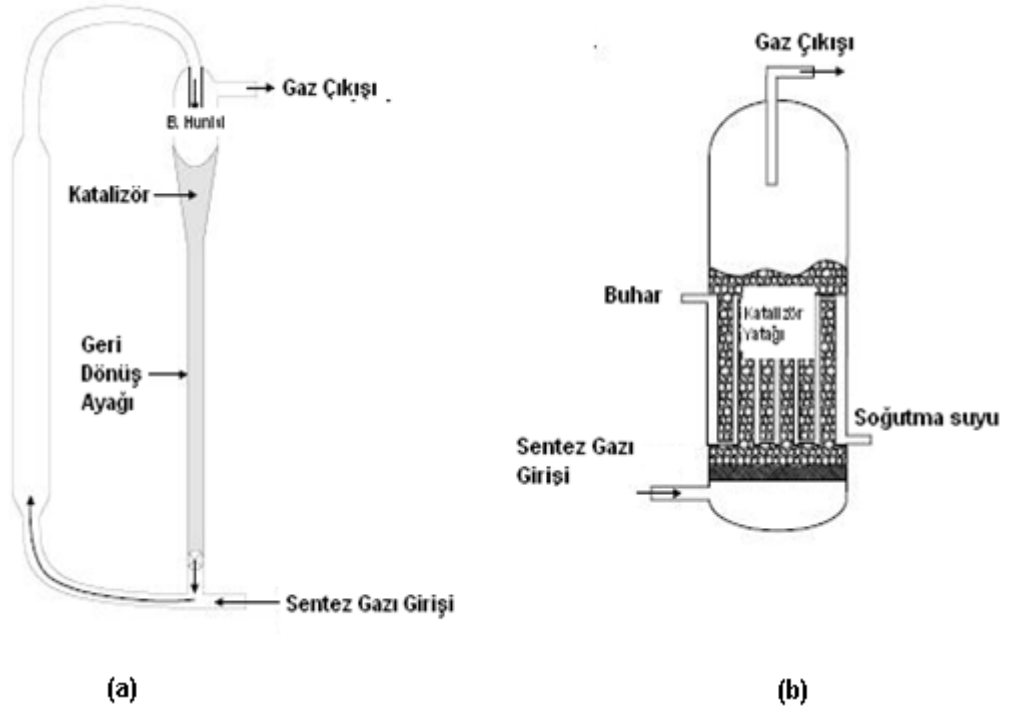
Gaz akımı geri dönüş ayağından gelen ve vanadan geçen katalizörleri reaktöre sürükler. Yüksek gaz hızı nedeniyle katalizör reaksiyon bölgesine taşınır. Tepkime bölgesindeki yüksek ısı, eşanjör yardımıyla uzaklaştırılır. Ürün gaz ile taşınan katalizör geniş çaplı katalizör haznesine geçer. Ürün gaz akımı siklondan geçerek reaktör sistemini terk eder.

Dolaşımli akışkan yatak reaktörlerinin başarılı birçok uygulaması bulunmakla birlikte, fiziksel olarak karmaşıklardır. Yüksek miktarda katalizörün dolaşımı nedeniyle reaktörün belirli bölgelerinde erozyon, oldukça yüksek basınç kayıpları ve sistemde yüksek sıcaklık gradyanleri görülmektedir. [2].

Şekil 2.3a'da verilen dolaşımli akışkan yataklı reaktörlerin işletimindeki zorluklardan dolayı, SASOL konvansiyonel akışkan yatak teknolojisinin tekrar incelenmesine karar vermiş ve sonucunda Şekil2.3b'de verilen sabit akışkan yataklı Sasol İleri Synthol reaktörü geliştirilmiştir. Sentez gazı reaktöre bir dağıtıcı plakadan geçerek beslenmektedir. Gaz akımı katalizör yatağından kabarcıklar halinde ilerlemektedir. Sentez sırasında oluşan ısı katalizör yatağına daldırılmış olan iç ısı değiştiriciler yardımıyla uzaklaştırılmaktadır. Ürün gaz ile birlikte dönüşmemiş gaz sistemi reaktörün içerisinde yer alan siklondan geçerek terk eder. Siklonun katalizörleri tutma kapasitesi çok yüksek olduğundan dönüşümlü akışkan yatakların sonrasında kullanılan yıkama kuleleri bu proseste gerekmemektedir. 40 bara kadar basınç altında çalışabilen reaktörün çalışma sıcaklığı 340°C'dir.

Aynı kapasiteye sahip bir dolaşımli akışkan yataklı reaktör ile kıyaslandığında Sasol İleri Syntholun avantajları aşağıda verilmiştir:

- İmalat açısından kolaylık
- Aynı üretim kapasitesi için yarı reaktör boyutu
- Yarı yarıya daha az yatırım maliyeti
- İşletme kolaylığı
- Düşük işletim ve bakım maliyetleri (Katalizörün geri besleme adımının bulunmamasından dolayı yaklaşık %15 daha az işletim maliyeti)
- Katalizör tüketiminde yaklaşık bir ton ürün başına %50 azalma
- Reaktörde daha az akışkanlaşma gerçekleşmesinden dolayı az erozyon ve katalizör aşınması
- Daha yüksek ısıl verim
- Reaktör boyunca daha az basınç düşüşü
- Reaktörde daha düşük sıcaklık gradyanleri



Şekil 2.3: Yüksek sıcaklık FT reaktörleri [3]: (a) Dolaşımli akışkan yataklı reaktör; (b) Sabit akışkan yataklı reaktör

3. KABARCİK KOLONLARIN HİDRODİNAMİĞİ

Kabarcık kolon sistemlerinin tasarımında hidrodinamik en önemli unsurların başında gelmektedir. Akış rejimi, gaz kesri ve gaz kabarcığı dinamiği hidrodinamiği etkileyen en önemli parametrelerdir.

3.1. Akış Rejimleri

Reaktör hidrodinamiği büyük ölçüde akış rejimine bağlıdır. Kolona beslenen gaz debisi ve kolon çapına bağlı olarak homojen (kabarcıklı) akış, heterojen (çalkantılı-türbülanslı) akış ve slug (birleşmiş iri habbeli) akış olmak üzere üç farklı akış rejimi gözlenmektedir [4].

Rejim geçişleri ile ilgili olarak tam sınırlar belli olmamakla beraber, Şekil 3.1’de hava/su ikilisi için kolon çapına göre ortalama gaz hızının fonksiyonu olarak akış rejimleri gösterilmiştir.

Ortalama gaz hızı; gaz debisinin kolon kesit alanına oranı olarak tanımlanmakta ve

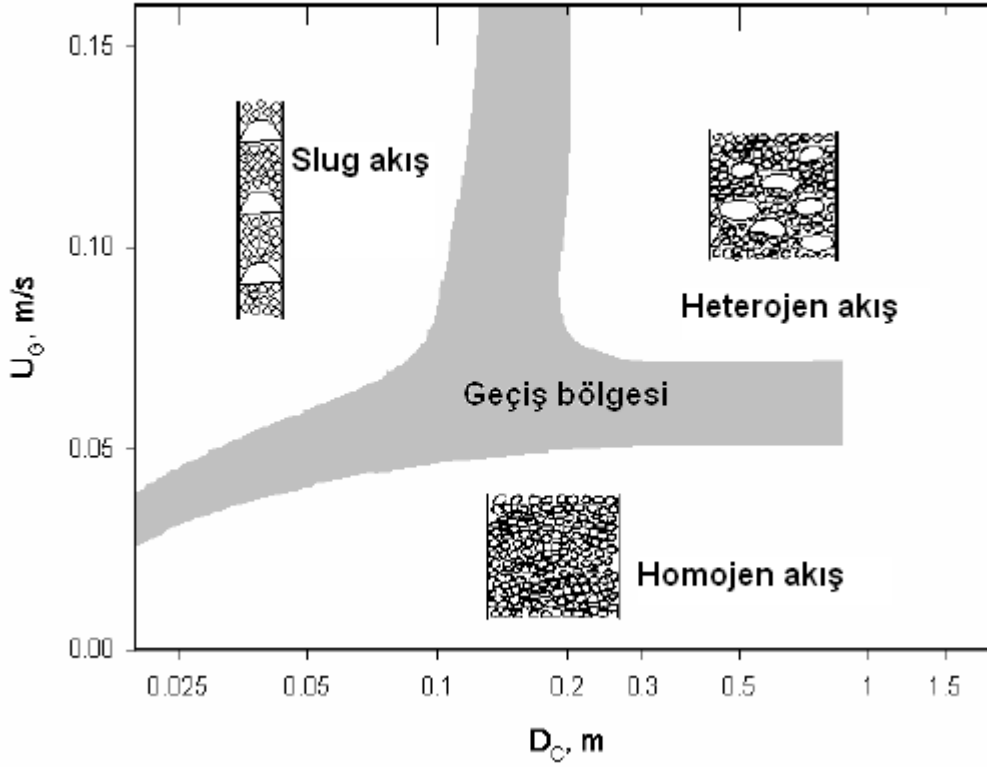
$$U_G = \frac{Q_G}{A_C} \quad (3.1)$$

ile verilmektedir.

Homojen rejimde; hemen hemen benzer boyutlarda küçük gaz kabarcıkları kolon içerisinde homojen bir dağılım gösterir. Gaz hızı 0,05 m/s hızın altındadır ve kabarcıklar arasındaki etkileşim çok azdır. Gaz hızı arttıkça, kabarcıklar arasındaki etkileşim artar ve hem kabarcık birleşmesi hem de kabarcık bölünmeleri meydana gelir. Daha büyük kabarcıklar oluşmaya başlar. Bu kabarcıkların hareketleri sıvı dolaşımı ve gerikarışmaya (backmixing) neden olur. Bu akış türüne çalkantılı-türbülanslı veya heterojen akış denir. Küçük çaplı kolonlarda; gaz hızı arttıkça kabarcıklarda görülen birleşme sonucu, çapı kolon çapını bulan büyüklüklerde kabarcıklar oluşabilir. Bu akış rejimine slug akış denir. 0,15 m çapa kadar olan kolonlarda görülen bu akış türünde kolonun duvar etkisi önemli rol oynamaktadır.

Ayrıca yüksek viskoziteye sahip akışkanlarda düşük gaz hızlarında da görülebilmektedir.

Rejim geçişleri farklı parametrelere bağlı olduğundan Şekil 3.1 'de gösterilen rejimler arası sınırlar kesin olmamakla beraber deneysel sisteme ve kullanılan ölçüm yöntemine bağlı olarak değişiklikler gösterebilir.



Şekil 3.1: Ortalama gaz hızı ve kolon çapına bağlı olarak akış haritası [4,5]

3.2. Gaz Kesri

Gaz kesri, kabarcık kolon sistemlerinin tasarımında taşınım olaylarını karakterize eden boyutsuz bir parametredir ve genellikle gaz kabarcıkları tarafından meydana gelen gaz fazın hacimsel kesri olarak tanımlanır. Bu nedenle kabarcık kolonların hidrodinamiğinde önemli bir rol oynar.

Gaz kesri

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V} \quad (3.2)$$

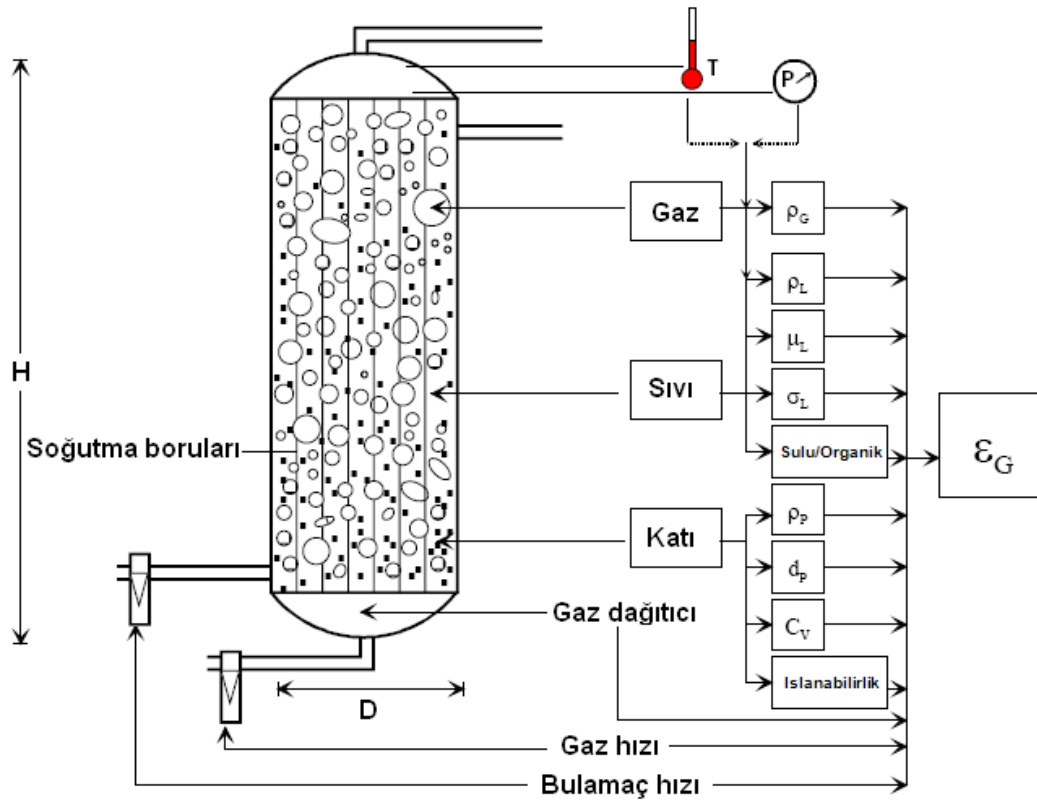
olarak tanımlanır. Burada V toplam hacim, V_G ise gaz hacmidir.

Ayrıca kütle transferi için gerekli olan gaz-sıvı arayüzeyini tanımladığı için en önemli tasarım parametresidir [7-9].

Ortalama gaz hızı, sıvı fazın fiziksel özellikleri, kolon boyutları, çalışma sıcaklığı, basıncı ve gaz dağıtıcının tasarımı gaz kesrine etki eden temel faktörlerdir [6,8].

Basınç düşüşü ölçümü, fiber optik problar, parçacık görüntü hız ölçümü (PIV), bilgisayarlı tomografi, γ radyasyonu, X-ray, lazer-Doppler anemometresi (LDA) gibi teknikler yerel gaz kesrini ölçmek için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır [9-14].

Gaz kesrini etkileyen parametreler Şekil 3.2’de sunulmuştur.



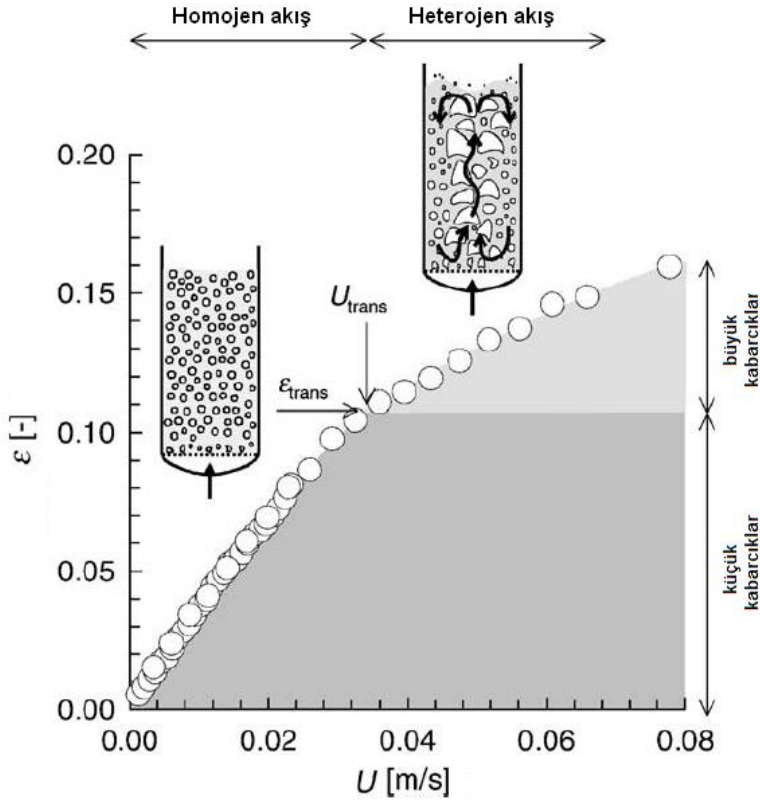
Şekil 3.2: Gaz kesrini etkileyen parametreler

3.2.1. Ortalama gaz hızının gaz kesrine etkisi

Literatürde bulunan çoğu çalışmada ortalama gaz hızının artmasının gaz kesrini arttırdığı görülmüştür [5,15-18]. Bu çalışmalarda incelenen sistemler birbirinden oldukça farklı olmasına rağmen, bu çalışmaların tümü ortalama gaz hızının gaz kesri üzerinde pozitif bir etkisi olduğu sonucuna varmıştır.

Gaz kesrinin ortalama gaz hızı ile değişimi Şekil 3.3’te sunulmuştur. Şekil 3.3 incelendiğinde, ortalama gaz hızının gaz kesri üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir.

Değişimin lineere yakın olduğu ilk kısım homojen akış rejimi iken, ikinci kısımda ortalama gaz hızının etkisi azalmaktadır. Daha büyük gaz kabarcıklarının yükselme hızları daha yüksek olmaktadır. Bunun sonucunda kolon içerisindeki hareket süreleri daha kısa olmaktadır ve bu durum gaz kesrinin artış oranında azalmaya neden olmaktadır [19]. Artan ortalama gaz hızı sonucunda kolon içerisindeki akış homojenden heterojene geçiş yapmaktadır [6,7,20].



Şekil 3.3: Gaz kesrinin ortalama gaz hızı ile değişimi [15]

3.2.2. Sıvı özelliklerinin gaz kesrine etkisi

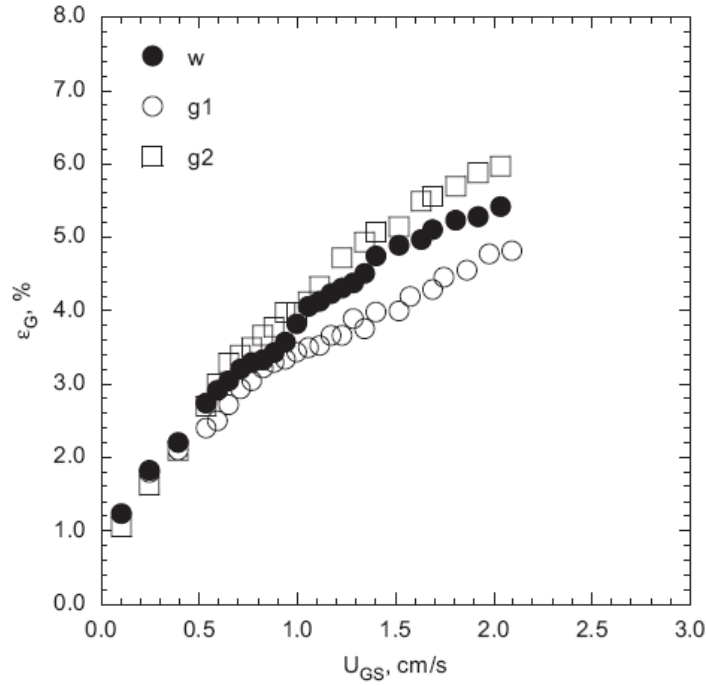
Kabarcık kolon sistemlerinde kullanılan sıvının viskozite, yoğunluk ve yüzey gerilmesi gibi fiziksel özelliklerinin gaz kesri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sıvı özellikleri; kabarcık oluşumu, birleşimi ve parçalanması gibi dinamik olguları etkilediğinden gaz kesri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır.

Literatürde bulunan çalışmalara göre sıvı faza ait viskozite değerinin artması, gaz kabarcıklarında birleşmeyi arttırdığından gaz kesrinin azalmasına neden olmaktadır [4,17,21].

Mouza ve arkadaşları 1,5 m boyunda ve 10 cm kenar uzunluğundaki karesel bir kolonda, 6 farklı sıvı ile yaptıkları deneylerde sıvı viskozitesinin artması sonucu

homojen-heterojen geçiş noktasının daha yüksek ortalama gaz hızlarına kaydığını tespit etmişlerdir [7].

Kazakis ve arkadaşlarının 1,5 m boyunda ve 9 cm iç çapında silindirik bir kolonda, 6 farklı sıvı ile yaptıkları deneylerde sıvı viskozitesinin homojen bölgedeki etkisinin çok az olduğu, bunun yanında heterojen akış bölgesinde çok daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır [6]. Bu çalışmanın sonucu Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Viskozitenin gaz kesri üzerindeki etkisi [6]

Yüzey gerilmesi gaz kesrini etkileyen bir diğer önemli sıvı özeliğidir. Yüzey gerilmesinin azalması daha fazla sayıda küçük gaz kabarcıklarının oluşmasına imkan verdiğinden gaz kesrinin artmasına neden olmaktadır [6,7].

Gaz kabarcığının oluşabilmesi için dağıtıcı plakanın altında bulunan gaz haznesinin basıncının dağıtıcı plakanın üzerindeki basıncı yenmesi gerekmektedir. Bu basıncı hidrostatik basıncı ve kılcal basıncın toplamıdır. Kılcal basıncı aşağıdaki eşitlik ile verilmektedir [22]:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_L}{r_p} \quad (3.3)$$

Sıvı faza ait viskozitenin azalması kılcal basıncın azalmasına neden olacaktır ve bunun sonucunda kabarcık oluşumuna gösterilen direnç azalacak ve daha fazla kabarcık oluşacaktır.

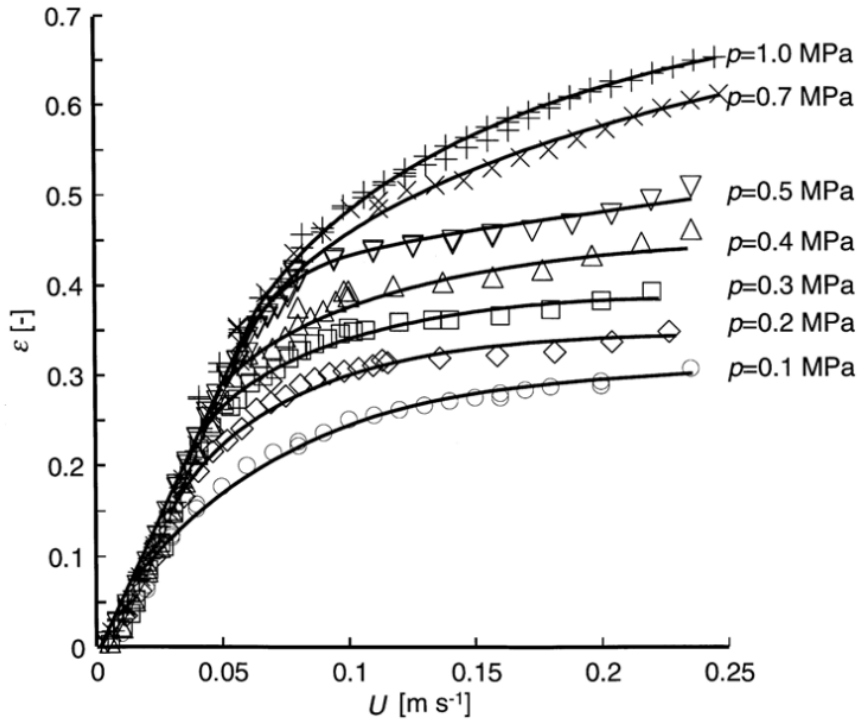
Yoğunluk, gaz kesri üzerinde önemli etkisi olan sıvı faz özelliklerinden bir tanesidir. Öztürk ve diğerlerinin 39 farklı sıvı ve sıvı karışımları ile yaptıkları çalışmada sıvı yoğunluğunun artmasının gaz kesrini arttırdığı sonucuna varılmıştır [23].

Wilkinson ve van Dierendonck tarafından yapılan çalışma sonucunda, sabit bir ortalama gaz hızında sıvı yoğunluğunun artırılmasının kabarcık boyutunda küçülmeye ve bunun sonucunda gaz kesrinin artmasına neden olduğu görülmüştür [24]. Bu çalışmanın önemli bir sonucu da sıvı yoğunluğundaki artışın kabarcık oluşmasından daha çok kabarcık parçalanmasını etkilediğinin görülmesidir.

3.2.3. Çalışma koşullarının gaz kesrine etkisi

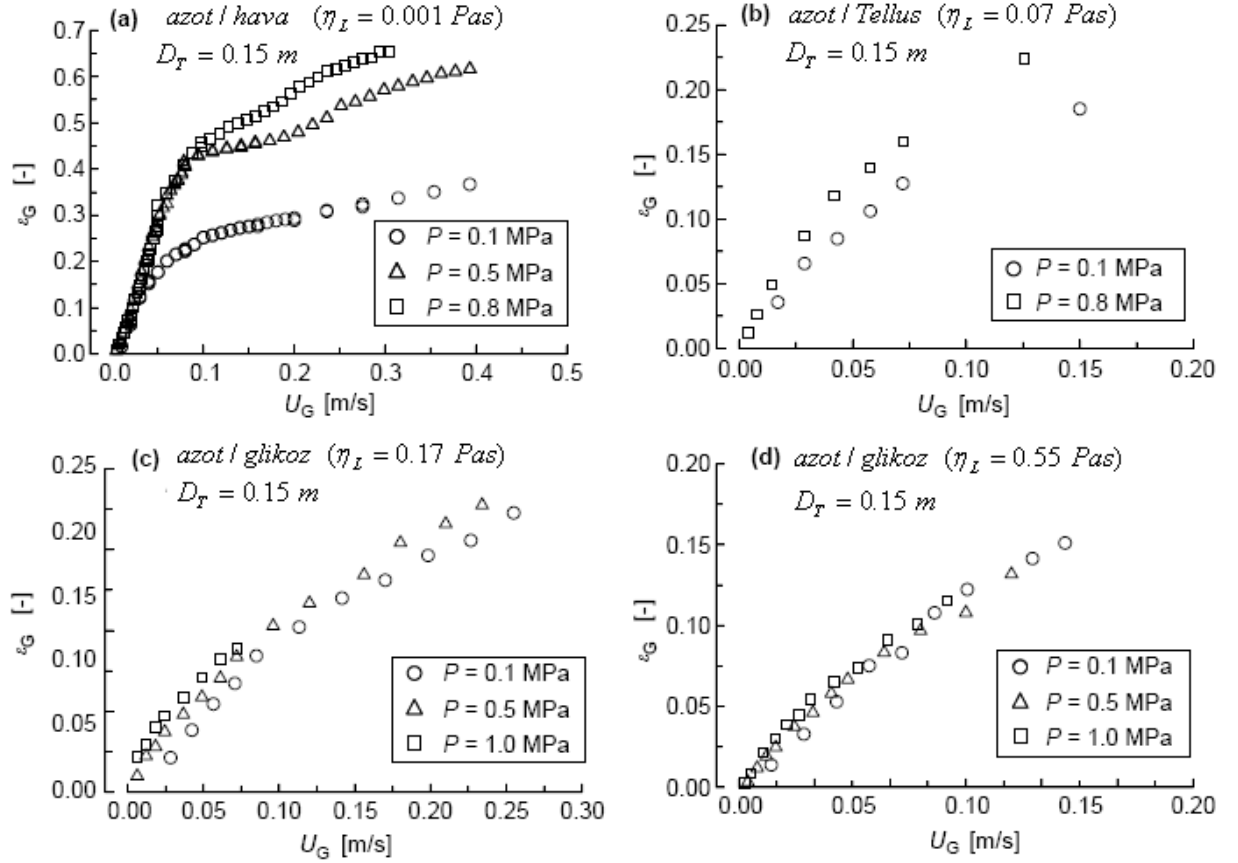
Kabarcık kolon sistemlerinde çalışma koşullarının gaz kesri üzerinde önemli bir etkisi vardır.

Letzel ve diğerlerinin 0,15 m çapındaki bir sistemde, azot/su iklisi için 0,1-1 MPa basınç aralığında yaptıkları deneyler sonucunda Şekil 3.5'te verilen grafik elde edilmiştir [25]. Şekil 3.5'te gaz kesri; basınç ve ortalama gaz hızının fonksiyonu olarak görülmektedir. Basıncın etkisi iki yönlüdür. Öncelikle rejim geçiş noktası gecikmiştir. İkincisi, artan sistem basıncı büyük gaz kabarcıklarının parçalanmasına neden olarak gaz kesrinin artmasını sağlamıştır.



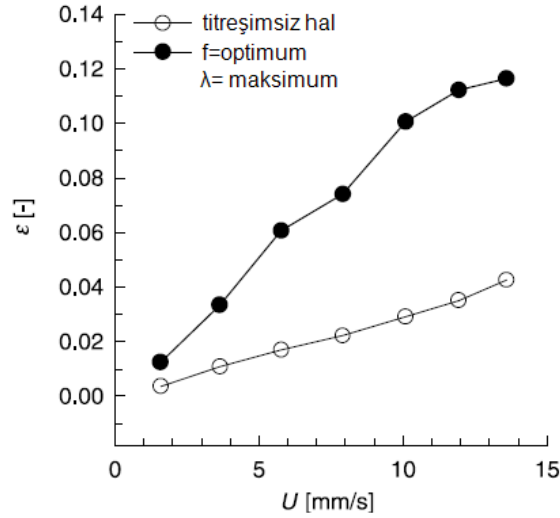
Şekil 3.5: Kolon basıncının gaz kesri üzerindeki etkisi [25]

Urseanu ve diğeri 1,22 m yüksekliğinde, 0,15 m çapındaki silindirik bir sistemde, farklı viskozitelere sahip karışımlar ile 0,1-1 MPa basınç aralığında deneyler yapmışlardır [26]. Basıncın artması gaz kesrinde artışa sebep olmuştur; fakat viskozite arttıkça basıncın gaz kesri üzerindeki etkisi azalmaktadır. Yapılan çalışmanın sonucu Şekil 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3.6: Kolon basıncının viskoziteye bağlı olarak gaz kesri üzerindeki etkisi [26]

Literatürde bulunan bazı çalışmalarda, sıvı fazın titreşimli olması halinde gaz kesrinin titreşimsiz duruma oranla 2 kata kadar artabildiği sonucuna varılmıştır [27-30]. Sıvı fazın titreşimli olması durumunda, gaz baloncukları parçalanmakta ve gaz ile sıvı temas alanı artmaktadır. Şekil 3.7'de titreşimin gaz kesri üzerindeki etkisi görülmektedir.



Şekil 3.7: Titreşimin gaz kesri üzerindeki etkisi [27]

3.2.4. Kolon geometrisinin gaz kesrine etkisi

Kabarcık kolon sistemlerinde kolon geometrisi gaz kesrini doğrudan etkilemektedir ve bu yüzden bu sistemlerin en önemli sorunu küçük deneysel sistemlerden elde edilen veriler ile ölçek büyütmenin zor olmasıdır [31,32].

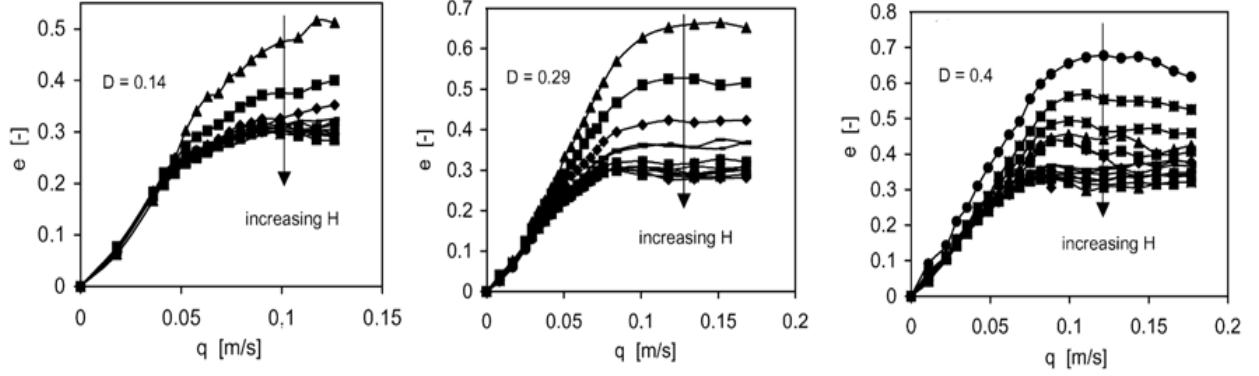
Bu sistemlerde kolon yüksekliğine bağlı olarak 3 farklı bölge tanımlanmaktadır: 1) dağıtıcının etkili olduğu bölge; 2) toplu (orta) bölge; 3) üst bölge.

Sisteme ait gaz kesri, bu üç bölgeye ait gaz kesirlerinin toplamı olmaktadır [33]. Yeteri kadar uzun kolonlarda birinci ve sonuncu bölgelerin etkileri çok az olmaktadır ve sistemin gaz kesri, ikinci bölgede ölçülen gaz kesrine yakın bir değerde olmaktadır.

Shah ve diğerlerinin yapmış oldukları çalışmada belli minimum değerlerin üzerindeki boyutlarda ($D_C=15$ cm, $H=3$ m, $H/D_C=5$) kolon geometrisinin gaz kesri üzerindeki etkisi yok sayılabilecek mertebede olmaktadır [34].

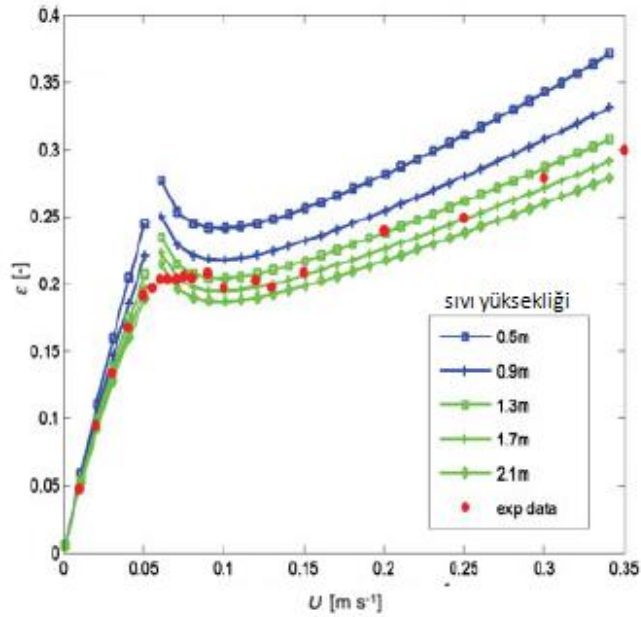
Krishna ve diğerleri tarafından geliştirilen iki faz modeline göre; gaz kesrinin küçük kabarcıklar ve büyük kabarcıklar için ayrı ayrı incelenmesi uygun olacaktır [35-37]. Küçük kabarcıklar için olan gaz kesrinin kolon çapından bağımsız olduğu saptanmıştır. Öte yandan, büyük kabarcıklar için olan gaz kesri kolon çapı arttıkça azalmaktadır. Sistem için gaz kesri bu iki kesrin toplamı olduğundan kolon çapı arttıkça toplam gaz kesri azalmaktadır. Ruzicka ve diğerleri çapları 0,14 m, 0,29 m ve 0,4 m değerlerinde, yükseklikleri 0,1 m ile 1,2 arasında değişen kolonlarda hava/su ikilisi için gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda kolon çapının, kolon

yükseklığının ve H/D_C oranının akışı etkilediğini saptamışlardır [20]. Yapılan çalışmada kolon çapının ve kolon yüksekliğinin etkilerinin yanında H/D_C oranının da gaz kesri üzerinde etkin bir parametre olduğunun üzerinde durulmuştur. Her üçünün artan değerleri için toplam gaz kesri azalmaktadır ve bu durum Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8: Gaz kesrinin kolon geometrisi ile değişimi [20]

Chilekar ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada 29 cm iç çapındaki bir sistemde kolon yüksekliği 0,5–2,1 metre aralığında değiştirilmiş ve sıvı yüksekliğinin gaz kesri üzerindeki etkisi incelenmiştir [38]. H/D_C oranının 4’ten düşük olduğu değerlerde sıvı yüksekliğindeki değişim çok daha etkili olmaktadır. Artan sıvı yüksekliği değerleri için gaz kesri azalmaktadır. Elde edilen sonuç Şekil 3.9’da sunulmuştur.

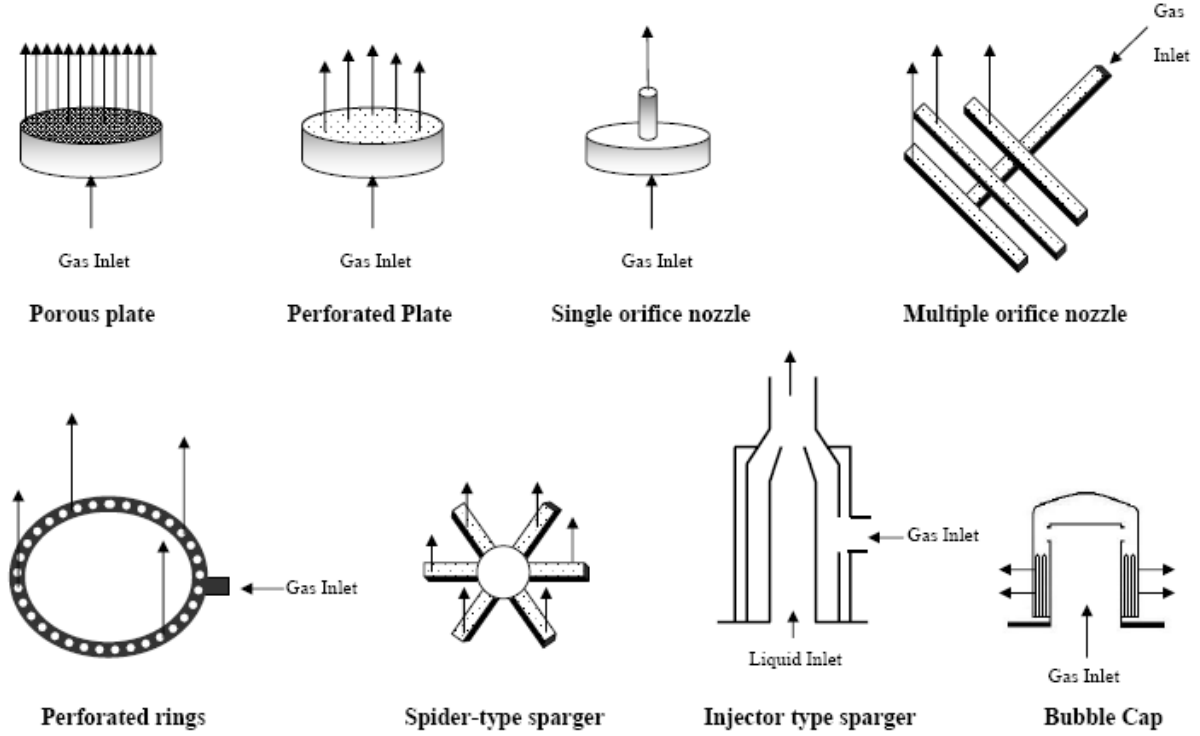


Şekil 3.9: Sıvı yüksekliğinin gaz kesrine etkisi [38]

3.2.5. Gaz dağıtıcının gaz kesrine etkisi

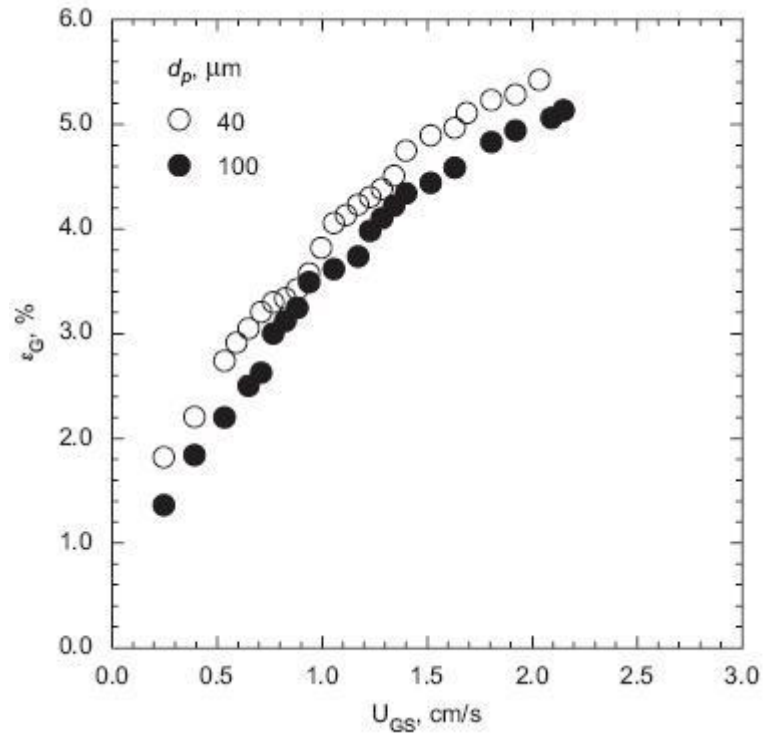
Gaz dağıtıcı, kolon tasarımının ve ölçek büyütmenin önemli basamaklarından biridir. Hem ölçek olarak hem de orifis sayıları bakımından birçok gaz dağıtıcı çeşidi vardır.

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi gözenekli plaka, delikli plaka, çoklu/ tek orifis nozül, delikli halka, örümcek tipi, enjektör tipi ve kabarcık kapak bulamaç faz ve kabarcık kolon sistemlerinde en çok kullanılan gaz dağıtıcılarıdır.



Şekil 3.10: Gaz dağıtıcı tipleri

Kazakis ve arkadaşlarının 1,5 m boyunda ve 9 cm iç çapında silindirik bir kolonda 40 ve 100 μm ortalama çap değerlerine sahip 2 farklı gözenekli plaka ile yaptıkları deneylerde, ortalama gözenek çapının gaz kesri üzerindeki etkisini incelemiştir. Ortalama çap değerinin artması durumunda gaz kesrinin azaldığı sonucuna varmışlardır [6]. Bu çalışmanın sonucu Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: Ortalama gözenek çapının gaz kesri üzerindeki etkisi [6]

4. KABARCİK KOLONLARDA REJİM GEÇİŞİ

Çeşitli akış rejimlerinin görülmesinden dolayı, hidrodinamik akış rejimlerinin sınırlarının belirlenmesi kabarcık kolon reaktörlerinin tasarımı ve ölçek büyütmesinde önemli bir yer tutmaktadır.

Kabarcık kolon uygulamaları akış rejimlerine göre sınıflandırılabilirler. Bakteri ekimi, tek hücre proteini ekimi gibi biyolojik uygulamalar homojen akış altında gerçekleştirilirken FT sentezi ve metanol sentezi gibi son derece egzotermik olan uygulamalarda heterojen akış tercih edilir.

Kabarcık kolon sistemlerinde homojen akıştan heterojen akışa geçişin başlangıcı çok önemlidir. Rejim geçişi;

- ortalama gaz hızı,
- kolon çapı,
- gaz dağıtıcı tasarımı,
- sıvı ve gaz faz özellikleri,
- dağılım yüksekliği (H/D_C)

gibi birçok parametreye aynı anda bağlıdır [39,40].

Bu bölümde, rejim geçişinin deneysel olarak incelenmesinden, akış rejiminin belirlenmesinde kullanılan yöntemler ve literatürde bulunan bazı çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

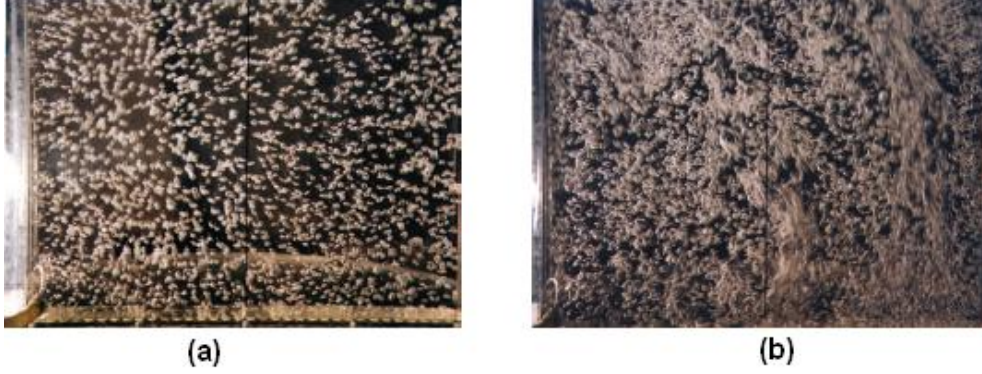
4.1. Rejim Geçişinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Bu bölümde, akış rejiminin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler hakkında bilgi verilmiştir. Rejim geçişinin belirlenmesinde kullanılan deneysel yöntemler aşağıda belirtilen ana gruplara ayrılabilir:

- Görsel gözlemler
- Hidrodinamik parametreler
- Hidrodinamik ile ilgili zamana bağlı parametreler
- İleri ölçüm teknikleri

4.1.1. Görsel gözlemler

Görsel gözlem, kabarcık kolonlarda akışı gözlemlemede kullanılan en basit yöntemdir; fakat geçiş hızını bu yöntemle kesin olarak belirlemek çok zordur. Bu yöntem sadece kolonun şeffaf olduğu durumlarda uygulanabilir. Şekil 4.1’de iki boyutlu bir kolonda gözlemlenen akış rejimlerine ait fotoğraf verilmiştir.



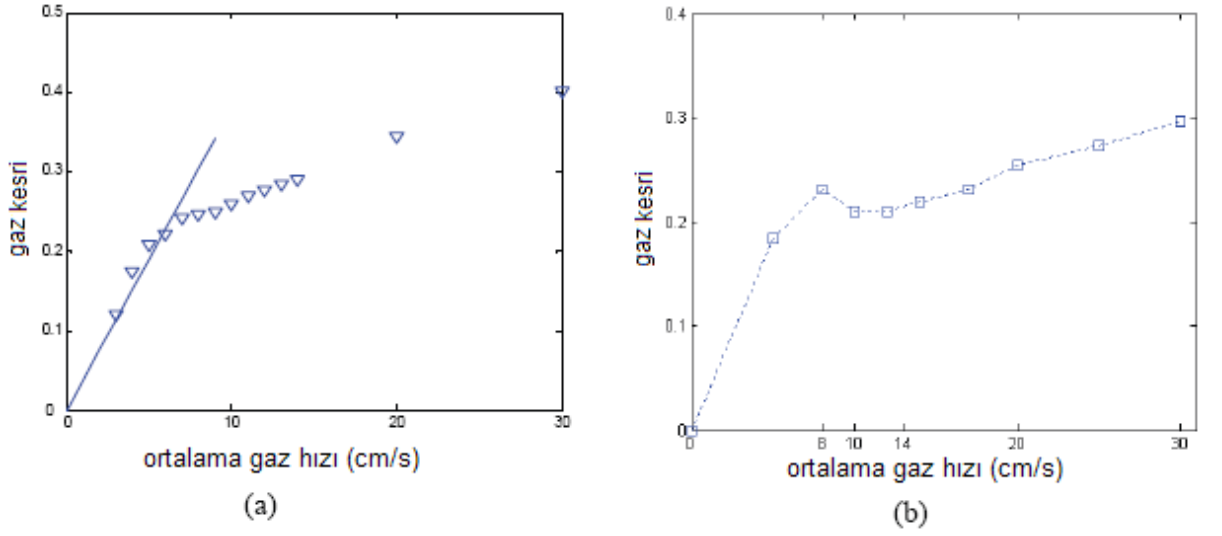
Şekil 4.1: İki boyutlu bir kabarcık kolonda akış rejimleri: (a) homojen akış; (b) heterojen akış

4.1.2. Hidrodinamik parametreler

Hidrodinamik parametreler akış rejimine göre değişiklik gösterdiklerinden dolayı rejim geçiş noktasını belirlenmesinde sıkça kullanılırlar. En çok kullanılan hidrodinamik parametre ise gaz kesridir. Gaz kesri ve ortalama gaz hızı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varepsilon_G \propto U^n \quad (4.1)$$

Ortalama gaz hızının artması, gaz kesrinin artmasına neden olur fakat aralarındaki ilişki Şekil 4.2a’da da görüldüğü gibi geniş bir hız aralığında değişmektedir [41]. Düşük ortalama gaz hızlarında gaz kesri ve ortalama gaz hızı arasındaki ilişki neredeyse lineer ($n \sim 0,8 - 1$) iken, yüksek gaz hızlarında gaz kabarcıkları arasındaki yoğun etkileşimden dolayı aralarındaki ilişki lineerlikten sapmaktadır ($n \sim 0,4 - 0,6$). Bundan dolayı, gaz kesri eğrisinde gözlemlenen eğim değişikliğinin olduğu nokta rejim geçiş noktası olarak tanımlanabilir. İşletme ve tasarım koşullarına bağlı olarak gaz kesri Şekil 4.2b’de de görüldüğü gibi S şeklinde bir eğri olabilir. Böyle durumlarda gaz kesrinin maksimum olduğu değere karşılık gelen ortalama gaz hızı, geçiş hızı olarak tanımlanabilir.

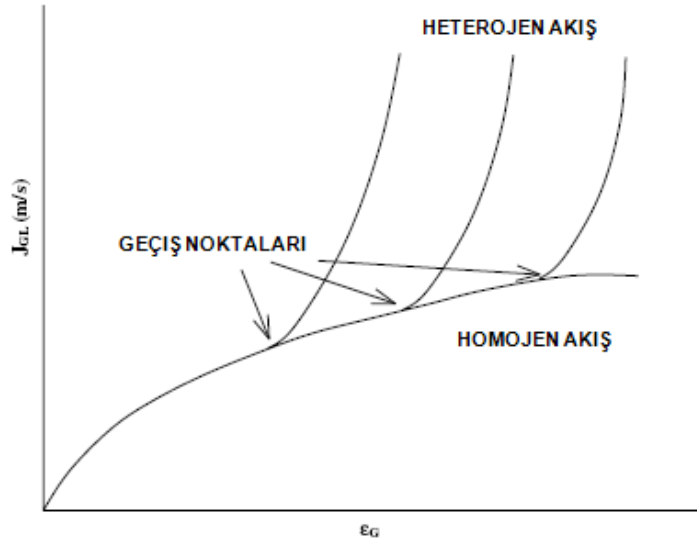


Şekil 4.2: Tipik gaz kesri eğrileri

Gaz kesri eğrisinin eğimindeki değişimin net olmadığı ya da gaz kesrinin maksimum değer almadığı bir eğride, geçiş noktasını belirlemek çok zordur. Böyle durumlarda Wallis tarafından önerilen sürüklenme akısı (hacimsel akı ya da karışımın ortalama hızında hareket eden bir yüzeyden geçen gaz akısı) yöntemi yaygın olarak kullanılır [42]. Sürüklenme akısı (drift flux):

$$j_{GL} = U_G(1 - \epsilon_G) \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Şekil 4.3'te tipik bir sürüklenme akısı–gaz kesri eğrisi görülmektedir. Eğrinin eğimindeki değişiklik, akışın homojenden heterojene geçtiğini gösterir. Sürüklenme akısı eğrisinde gözlemlenen eğim değişimi, gaz kesrinde gözlemlenen değişime oranla çok daha belirgindir.



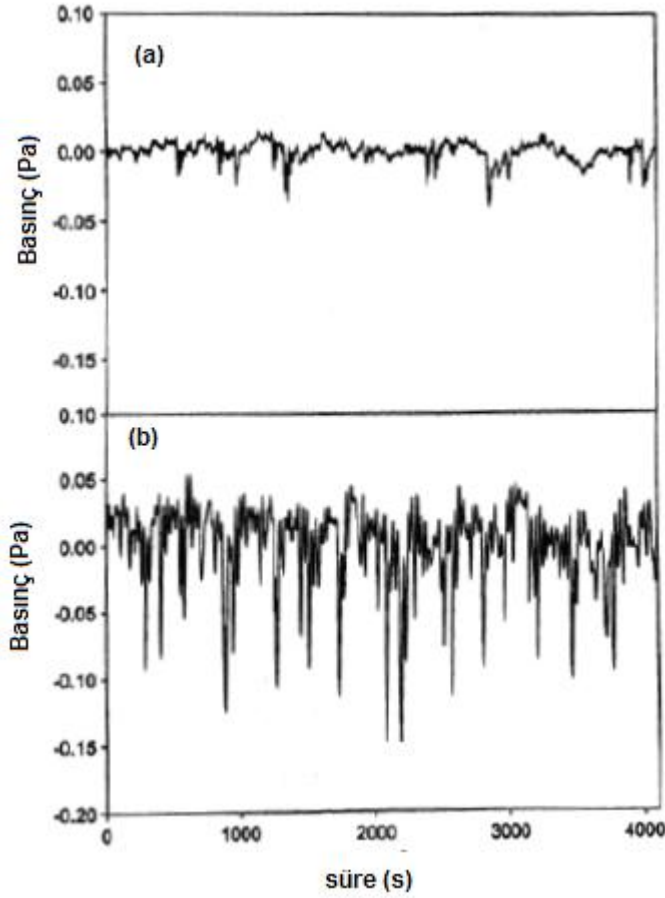
Şekil 4.3: Sürüklenme akısı-gaz kesri eğrisi [40]

4.1.3. Hidrodinamik ile ilgili zamana bağı parametreler

Literatürde bulunan çalışmalar incelendiğinde, kabarcık kolon reaktörlerinin anlık akış davranışını yakalamak için zamana bağı parametreleri inceleyen birçok çalışma olduğu açıkça görülmektedir. Bunlar:

- Basınç dalgalanmaları [43-45]
- Isı geçişi probu kullanılarak sıcaklıktaki dalgalanmaların belirlenmesi [46]
- İletkenlik probu kullanımı [47]
- Dirençli veya optik problemler kullanılarak yerel gaz kesrindeki dalgalanmaların belirlenmesi [48]
- Optik geçirgenlik probu kullanılarak yerel kabarcık frekansı ölçümü [49]
- Akustik prob kullanarak ses dalgalanmalarının belirlenmesi [50,51]

Homojen ve heterojen akış türleri için tipik basınç sinyali eğrileri Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4: Tipik basınç sinyali eğrileri: (a) homojen akış; (b) heterojen akış

Bu eğrilere ait dalgalanmaların yorumlanabilmesi ve akış rejiminin belirlenebilmesi için birçok zaman serisi analizi kullanılmaktadır. İstatistiksel analiz, otokorelasyon analizi, stokastik modelleme, spektral analizi, kaos analizi ve dalgacık analizi genellikle kullanılan analiz yöntemleridir. Kolon içerisindeki akış yapısı ile basınç sinyali arasındaki bağ basit değildir ve bu yüzden dalgalanmalara uygulanan zaman serisi analizlerinin çok dikkatli yapılması gerekmektedir.

4.1.4. İleri ölçüm teknikleri

Akış rejimi geçişinin belirlenmesinde çeşitli ileri görüntüleme ve hız ölçümü teknikleri kullanılabilir. Bunlar:

- Parçacık görüntü hız ölçümü (PIV) [52,53]
- Elektriksel sığa tomografisi (ECT) [54]
- Elektriksel direnç tomografisi (ERT) [55]
- Lazer-Doppler anemometresi (LDA) [56]
- Bilgisayarlı otomatik radyoaktif parçacık takibi (CARPT) [57]
- γ -ray bilgisayarlı tomografi (CT) [58]

Gelişmiş ölçüm tekniklerinin uygulanması nispeten zor olmasına rağmen, akış hakkında detaylı bilgi verirler. Bu tekniklerin ayrıntıları için listelenen kaynaklardan yararlanılabilir.

4.2. Literatürde Bulunan Deneysel Çalışmalar

Literatürde akış rejimi geçişi ile ilgili bulunan çalışmaların bir kısmı Çizelge 4.1’de özet halinde verilmiştir.

Çizelge 4.1: Rejim geçişi ile ilgili literatürde bulunan deneysel çalışmalar

Yazar	Sistem (akışkan çiftleri)	Kolon Boyutları (m)	Basınç ve Sıcaklık	Ölçüm Yöntemi	Açıklama
Grover, G. ve diğerleri [59]	Hava/su ve elektrolitli çözeltiler	0,1	1 bar, 298-353K	Sürüklenme akışı (Drift flux)	Çalışma sıcaklığının artması rejim geçiş hızının azalmasına neden olmuştur. Ayrıca elektrolitli çözeltilerin rejim geçiş hızının suya oranla daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.
Bukur, D. ve diğerleri [60]	N ₂ /Sasol vaks	0,051	1 bar, 503-553K	Sıvı yükselmesi (Bed expansion)	Düşük sıcaklık ve/veya delik çapları daha büyük olan delikli plaka kullanımının türbülanslı akışı desteklediği görülmüştür.
Krishna, R. ve diğerleri [61]	N ₂ , CO ₂ , Ar, He, SF ₆ /saf su, terpentim, n-bütanol, mono etilen glikol	0,16; 0,19	1-20 bar, 298K	Sıvı yükselmesi	Gaz yoğunluğunun geçiş hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Rejim geçişi için gaz yoğunluğunun da etkisini içeren bir model oluşturulmuştur.
Drahos, J., ve diğerleri [62]	Hava/Su	0,292	1 bar, 298K	Basınç dönüştürücü	Basınç verilerinin 3 farklı domainde yapılan istatistiksel analizi ile 3 farklı akış rejimi karakterize edilmiştir.
Krishna, R. ve Ellenberger, J. [63]	Hava, He, Ar ve SF ₆ /Su, parafinik yağ (A), parafinik yağ (B)	0,10; 0,19; 0,38; 0,63	1 bar, 298K	Dinamik gaz kesilmesi (DGD)	Gaz kesri büyük kabarcıklar ve küçük kabarcıklar için olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Büyük kabarcıklar için olan gaz kesrinin ortalama gaz hızının 0,1 m/s değerinin üzerindeki değerlerde sıvı özellikleri, gaz yoğunluğu ve gaz dağıtıcıdan etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

Yazar	Sistem (akışkan çiftleri)	Kolon Boyutları (m)	Basınç ve Sıcaklık	Ölçüm Yöntemi	Açıklama
Zhang ve diğerleri [64]	Hava/su	0,0826	1 bar, 298 K	İletkenlik probu	Kabarcık frekansı, ortalama kabarcık çapı ve belirli bir noktaya kadar (problar arası mesafe) gelmesi için geçen süre kullanılarak iki ve üç fazlı akış için akış haritaları elde edilmiştir.
Zahradnik, J., ve diğerleri [65]	Hava/Su, elektrolit çözeltiler, sakaroz çözeltileri, alkoller	0,14; 0,15; 0,29	1 bar, 298 K	Sıvı yükselmesi	Dağıtıcı plaka tipi ve geometrisinin rejim geçiş hızını büyük oranda etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca kolon çapı ve statik sıvı yüksekliğinin rejim geçiş hızı üzerindeki etkisi incelenmiştir.
Hyndman ve diğerleri [66]	Hava/Su	0,2	1 bar, 298 K	Basınç dönüştürücü ve Dinamik gaz kesilmesi	Basınç verisinde gözlemlenen dalgalanma ve gaz kesri eğrisi yardımıyla rejim geçişi incelenmiştir.
Lin, T., ve diğerleri [67]	N2/Paratherm	0,05	1-15.2 bar, 298-351 K	Fark basınç dönüştürücü	Basınç ve sıcaklığın geçiş hızı üzerindeki olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen değerlerin Wilkinson korelasyonu ile uyumlu olduğu görülmüştür.
Krishna, R. ve diğerleri [68]	Hava/Su, %0,1-1 ethanol içeren su	0,15	1 bar, 298 K	Dinamik gaz kesilmesi	Suya alkol eklenmesi halinde rejim geçişinin geciktiği sonucuna varılmıştır.
Jamialahmadi, M. ve diğerleri [69]	Hava/Su, izopropanol, sodyum sülfat	0,155	1 bar, 298 K	Sıvı yükselmesi	Orifis çapının artması rejim geçiş hızının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca statik sıvı yüksekliğinin artması (4 m) değerine kadar geçiş hızının azalmasına neden olmaktadır.
Urseanu, M.I. [39]	Hava/Su, tellus yağı, çeşitli etanol çözeltileri	0,1; 0,17; 0,19; 0,38; 0,63	1 bar, 298 K	Dinamik gaz kesilmesi	Kolon çapı arttıkça geçiş anındaki gaz kesri değeri artmaktadır. Surfactantlar rejim geçişini geciktirme eğilimi göstermektedir.

Yazar	Sistem (akışkan çiftleri)	Kolon Boyutları (m)	Basınç ve Sıcaklık	Ölçüm Yöntemi	Açıklama
Ruzicka, M. ve diğerleri [20]	Hava/Su	0,14; 0,29; 0,40	1 bar, 298 K	Sıvı yükselmesi ve Sürüklenme akısı	Kolon çapı ve kolon yüksekliğinin akışın homojen rejimdeki kararlılığını etkilediği ve rejim geçişini hızlandırdığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki farklı kararlılık teorisi ile uyum göstermiştir. Çalışmanın önemli sonuçlarından biri de H/D_C oranının tek başına çap ve yükseklik etkisini simüle edemediğidir.
Olmos, E. ve diğerleri [56]	Hava/Su	H=1,2; W=0,4; T=0,04	1 bar, 298 K	Lazer-Doppler anemometresi (LDA)	LDA ile elde edilen verilere farklı sinyal işleme teknikleri uygulanmış ve akış karakterize edilmiştir.
Ruzicka, M. ve diğerleri [70]	Hava/Su ve çeşitli gliserin çözeltileri	0,14	1 bar, 298 K	Sıvı yükselmesi ve Sürüklenme akısı	Viskozitesi 1-22 mPa.s değer aralığında olacak şekilde farklı sıvılar test edilmiş ve artan viskozite değerlerinin akışın homojen rejimdeki kararlılığını etkilediği ve rejim geçişini hızlandırdığı sonucuna varılmıştır.
Thorat ve Joshi [40]	Hava/Su, CMC ve NaCl çözeltileri	0,385	1 bar, 298 K	Sürüklenme akısı	Farklı konfigürasyonlarda 22 adet delikli plaka test edilmiş ve rejim geçişindeki farklılıklar gözlemlenmiştir.
Barghi, S. ve diğerleri [71]	Hava/Su/cam tanecikleri	0,15	1 bar, 298 K	Basınç dönüştürücü	2 fazlı ve 3 fazlı kolonlarda deneyler gerçekleştirilmiş ve basınç verisinin istatistiksel analizi yapılmıştır.
Shaikh ve Al-Dahhan [41]	Hava/Therminol LT	0,1615	1-10 bar, 298 K	Bilgisayarlı tomografi (CT)	Bilgisayarlı tomografi yöntemiyle elde edilen gaz kesri eğrisinin dikliği kullanılarak basıncın rejim geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yazar	Sistem (akışkan çiftleri)	Kolon Boyutları (m)	Basınç ve Sıcaklık	Ölçüm Yöntemi	Açıklama
Al-Masry ve diğerleri [50]	Hava/Su	0,15	1 bar, 298 K	Akustik prob	Akustik ölçümler ile kabarcık frekansı, boyutu ve dağılımı tahmin edilmiştir.
Wu ve diğerleri [72]	Hava/Su	0,15	1 bar, 298 K	Basınç dönüştürücü	Basınç eğrisindeki dalgalanmalara CCF ve Kaos analizleri uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ile gaz kesri kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.
Vandu [73]	Hava/Parafinik yağ (B)/silika	H=0,95; W=0,1; T=0,02	1 bar, 298 K	Yüksek hızlı video kamera	Katı yüklemesinin rejim geçişi üzerindeki etkisi incelenmiştir.
Akhtar, A. ve diğerleri [74]	Hava/Su	0,1; 0,2; 0,45	1 bar, 298 K	Optik prob	Optik problar yardımıyla lokal gaz kesri hesaplanmış ve $L/D > 5,5$ olması durumunda kolon hidrodinamiğinin gaz debisinden etkilenmediği sonucuna varılmıştır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneysel çalışmaların tamamı atmosferik basınçta ve ortam sıcaklığında ($22\pm 2^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmiş ve akışkan çifti olarak hava/su ikilisi kullanılmıştır. Deneysel esnasında ilk olarak kolon belirlenen yükseklikte su ile doldurulmuş ve kolona kontrollü bir şekilde hava gönderilmiştir. Kolonun alt kısmında bulunan haznenin basıncının, dağıtıcı plakanın üzerindeki basıncı yenmesiyle ilk kabarcıklar oluşmaya başlamaktadır.

5.1. Test Sistemi

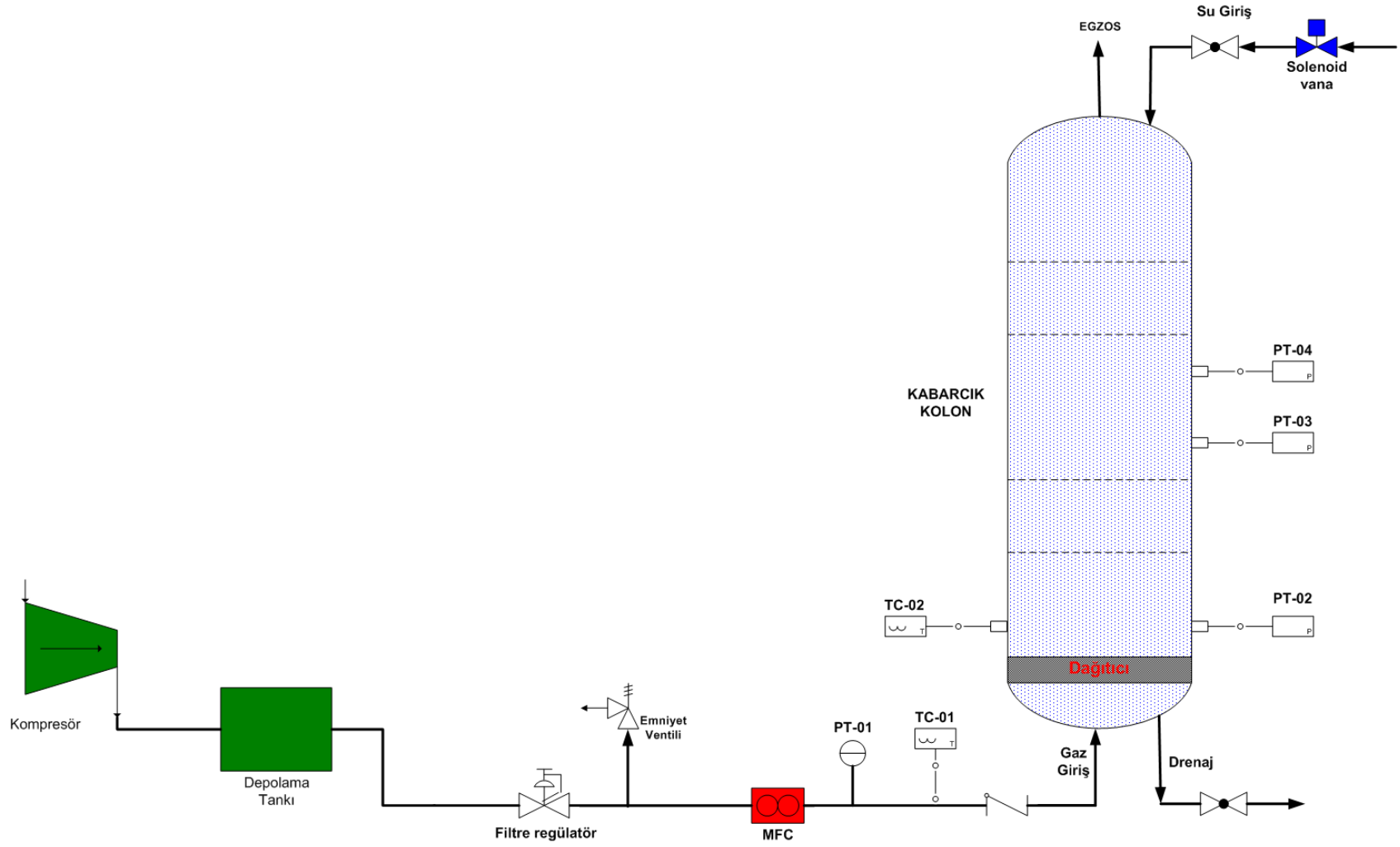
Akış alanı ve kabarcık hareketlerini gözlemleyebilmek amacıyla pleksi (camdan hafif, dayanıklı, şeffaf plastik) malzemeden yapılmış bir kabarcık kolon test sistemi tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Test sistemine ait boyutlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Test sisteminin boyutları

Dış çap [mm]	Cidar kalınlığı [mm]	Kolon yüksekliği [mm]
350	10	3000

Kolona istenilen debide hava gönderebilmek amacıyla çıkış basıncı maksimum 8 bar olan bir hava kompresörü kullanılmıştır. Kompresörden çıkan hava kimyasal filtrelerden geçtikten sonra filtre-regülatör (5 mikronluk filtre içermektedir) yardımıyla istenilen basınç değerine düşürülmektedir. Basıncı ayarlanan hava, kütle akış kontrolör (MFC) yardımıyla istenilen hacimsel debide kolona gönderilmektedir. Olası bir aksilik durumunda kolona yüksek basınçlı gaz girişini önlemek amacıyla filtre-regülatörden sonra hat üzerinde emniyet ventili bulunmaktadır. Bu emniyet ventili 5 bar basınca ayarlanmıştır ve hava basıncının 5 bar değerini aşması halinde havayı dış ortama atmaktadır. Kolon boyunca yerleştirilen diğer üç adet basınç ölçer (PT2, PT3 ve PT4) ile sürekli olarak zamana bağlı basınç ölçümü yapılmaktadır. Ayrıca kolon üzerinde bulunan ısı çifti (TC2) ile suyun sıcaklığı ölçülmektedir.

Test sisteminin proses diyagramı ve fotoğrafı Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.1: Test sisteminin proses diyagramı



Şekil 5.2: Test sistemi

Test sisteminde ölçüm amacıyla kullanılan cihazlara ait özellikler Çizelge 5.2’ te verilmiştir.

Çizelge 5.2: Test sisteminde kullanılan ölçüm cihazları ve özellikleri

Sinyal	Sembol	Ölçülen büyüklük	Marka	Ölçüm aralığı	Doğruluk
PT1	P1	Basınç	Keller	0 - 6 bar	± 0,25 %
PT2	P2	Basınç	Keller	0 - 6 bar	± 0,25 %
PT3	P3	Basınç	Keller	0 - 6 bar	± 0,25 %
PT4	P4	Basınç	Keller	0 - 6 bar	± 0,25 %
TC1	T1	Sıcaklık	Ordell	-200 - 1200 °C	± 0,20 %
TC2	T2	Sıcaklık	Ordell	-200 - 1200 °C	± 0,20 %
MFC	-	Hacimsel debi	Brooks	0 - 750 NI/dk	± 0,20 %

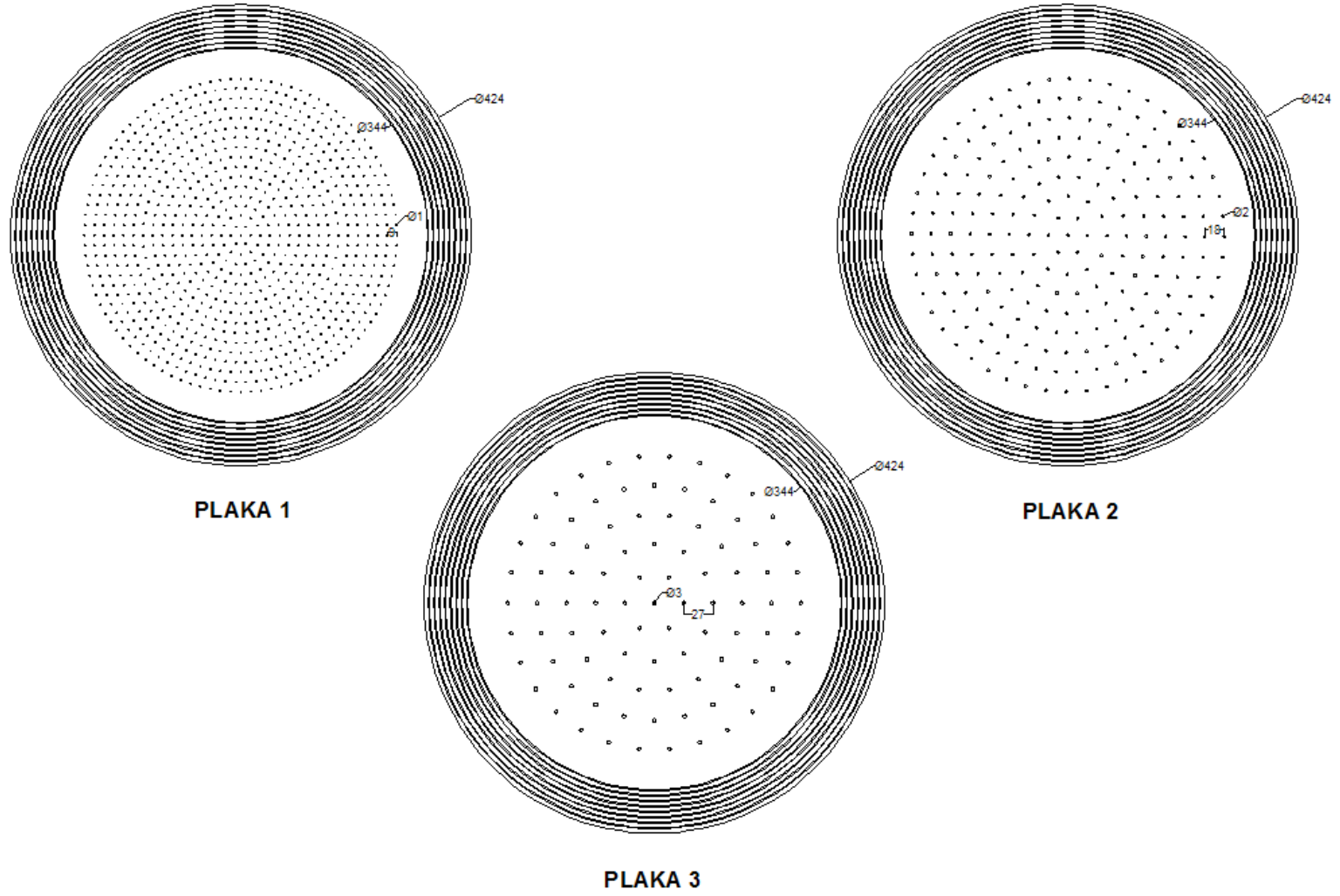
Deneyssel çalışmada gaz dağıtıcı olarak 3 adet delikli plaka ve 1 adet örümcek tipi dağıtıcı test edilmiştir. Delikli plaka tasarımında; delik çapı, delik sayısı, delikler arası mesafe, boşluk alanı oranı (free area), delik düzeni ve plaka kalınlığı gibi parametreler etkilidir [4,75-77].

Tasarlanan plakalarda delikler arası mesafe, boşluk alanı oranı, delik düzeni ve plaka kalınlığı sabit tutulurken; delik çapı ve delik sayısı değiştirilerek üç farklı plaka tasarlanmıştır. Plakalar tasarlanırken literatürde bulunan çalışmalar incelenmiş ve bunun sonucunda delik çapları 1 mm ile 3 mm arasında değişen üç adet dağıtıcının tasarlanmasının uygun olacağı düşünülmüştür. İlgili plakaların tasarım bilgileri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3: Delikli plakalara ait tasarım bilgileri

Plaka No	Delik çapı, d_0 , [mm]	Delik sayısı, N	Delikler arası mesafe, Δx , [mm]	Boşluk alanı oranı [%]	Delik düzeni	Plaka kalınlığı, t, [mm]
Plaka 1	1	817	9	0,98	Eşkenar üçgen	6
Plaka 2	2	217	18	1,08	Eşkenar üçgen	6
Plaka 3	3	91	27	1,10	Eşkenar üçgen	6

Delikli plakalara ait imalat resimleri ve fotoğraflar Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te sunulmuştur.



Şekil 5.3: Delikli plakalara ait imalat resimler



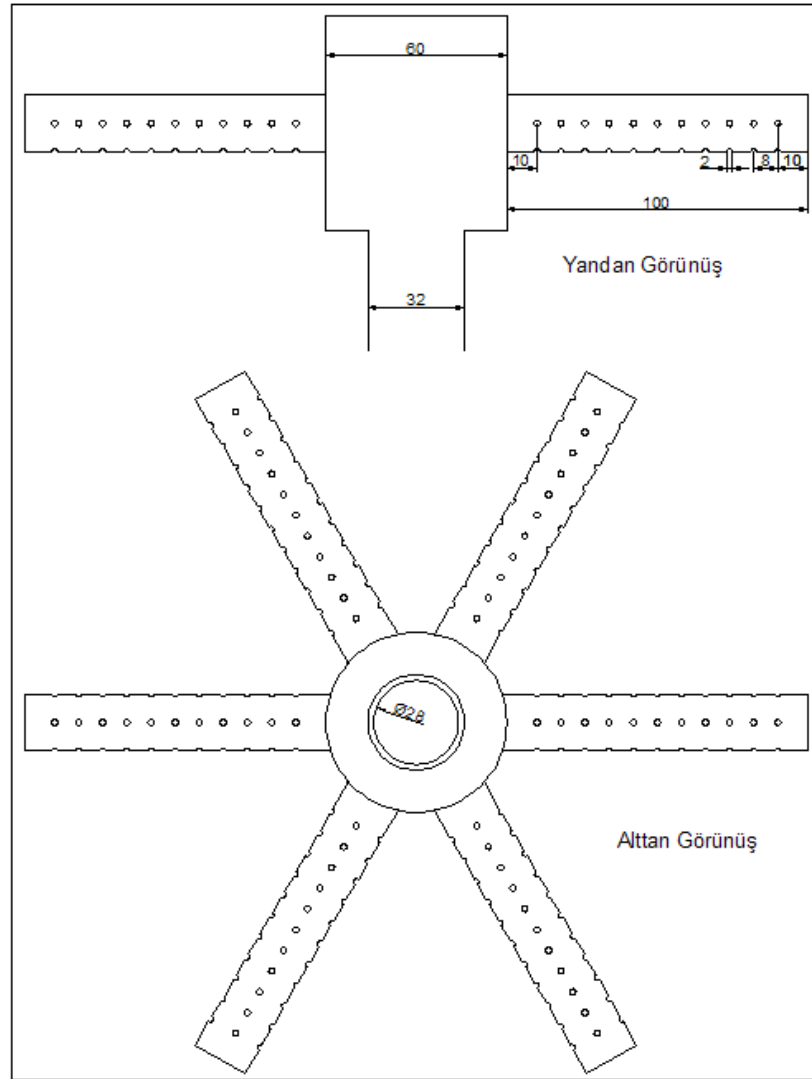
Şekil 5.4: Tasarlanan delikli plakalar (a) Plaka 1; (b) Plaka 2; (c) Plaka 3

Dağıtıcı plaka tipinin akış rejimi üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek amacıyla 1 adet örümcek tipi gaz dağıtıcı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım aşamasında; delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar ile kıyaslanmanın en uygun şartlarda yapılabilmesi için örümcek tipi gaz dağıtıcının delik çapı ve sayısı, delikli plakalardan en az bir tanesine çok yakın olacak şekilde tasarlanmıştır. Dağıtıcıya ait tasarım bilgileri Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Çizelge 5.4: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait tasarım bilgileri

Dağıtıcı çapı, D_s , [mm]	Delik çapı, d_0 , [mm]	Delikler arası mesafe, Δx , [mm]	Delik sayısı, N
260	2	8	198

Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait imalat resmi ve fotoğraf Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da sunulmuştur.



Şekil 5.5: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait imalat resmi



Şekil 5.6: Tasarlanan örümcek tipi gaz dağıtıcı

Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar alt hazne ile kolonu birleştiren flanş arasına sıkıştırılırken, örümcek tipi gaz dağıtıcının alt kısmında bulunan paralel dişler yardımıyla alt haznenin iç kısmında bulunan manşon ile bağlantısı sağlanmaktadır. Testler sırasında her iki tip dağıtıcının kolon içerisindeki yüksekliklerinin aynı olmasına dikkat edilmiştir.

5.2. Gaz Kesrinin Belirlenmesi

Gaz kesrinin deneysel olarak elde edilmesi amacıyla kolon üzerine belirli aralıklarla yerleştirilen basınç ölçerlerden yararlanılmıştır. PT2 numaralı basınç ölçer gaz dağıtıcı plakaların 20 cm üzerinde bulunmaktadır. PT3 ile PT2 numaralı basınç ölçerlerin arasındaki yükseklik farkı 90 cm iken, PT4 ile PT3 numaralı basınç ölçerlerin arasında ise 20 cm yükseklik farkı bulunmaktadır. Gaz kesrini elde etmek için iki farklı eşitlikten yararlanılmıştır. İlk olarak aşağıda verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$\varepsilon_G = \frac{(P4 - P2)_0 - (P4 - P2)_1}{(P4 - P2)_0} \quad (5.1)$$

Bu eşitlikte:

ε_G : gaz kesri (-)

$(P4-P2)_0$: kolona gaz girişi olmadan önceki ortalama basınç farkını

$(P4-P2)_1$: kolona gaz girişi esnasındaki ortalama basınç farkını

ifade etmektedir.

İkinci olarak, basınç ölçerler arasındaki basınç farkından ($\Delta P = P_4 - P_2$) yola çıkılarak gaz kesri belirlenmiştir.

Bunun için:

$$\frac{\Delta P}{\Delta h} = -\rho_f g \quad (5.2)$$

eşitliğinden yararlanılmıştır. Eşitlikte bulunan ρ_f , iki fazlı akışta karışım yoğunluğu olup, gaz kesri cinsinden

$$\rho_f = \varepsilon_G \rho_G + \varepsilon_L \rho_L = \varepsilon_G \rho_G + (1 - \varepsilon_G) \rho_L \quad (5.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Eşitlik (5.2) ve Eşitlik (5.4) kullanılarak, gaz kesri için

$$\varepsilon_G = \left(\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_G} \right) \times \left(1 - \frac{\Delta P}{g \Delta h \rho_L} \right) \quad (5.4)$$

eşitliği elde edilir.

$\rho_L \gg \rho_G$ olması durumunda:

$$\varepsilon_G = 1 - \frac{\Delta P}{g \Delta h \rho_L} \quad (5.5)$$

şeklini alır.

MFC yardımıyla kolona istenilen debide hava gönderilirken aynı anda sürekli olarak basınç ve sıcaklık verileri kaydedilmektedir. Kaydedilen basınç verisi ve yukarıda belirtilen Eşitlik (5.1) ve Eşitlik (5.4) kullanılarak gaz kesri hesaplanmaktadır.

5.3. Boyutsuz Sayılarla Analiz (Buckingham – n Teoremi)

Deneysel çalışmalar esnasında sıvı ve gaz fazları hep aynı kalmış ve 2 farklı tipte, 4 adet gaz dağıtıcı test edilmiştir. Akış rejiminin belirlenmesinde ve özellikle rejim geçişlerinin yaşandığı noktaların tespitinde etkin parametreleri ve bu parametrelerin etkilerinin nasıl olduğunu belirlemek çok önemlidir.

Gaz kesri üzerinde etkili olan parametre sayısı birden çok olduğundan dolayı deney sistemi için geçerli olabilecek boyutsuz sayıları belirlemek ve bu sayılardaki

değişimler ile sonuçları yorumlamak faydalı olacaktır. Bu sebeplerden dolayı deneysel çalışmada etkin olan boyutsuz sayıları belirlemek amacıyla Buckingham- π teoreminden yararlanılmıştır.

Teoreme göre belli sayıda fiziksel değişken (n) bulunuyorsa ve bu fiziksel büyüklükler belli sayıda bağımsız temel fiziksel büyüklük (k) ile ifade edilebiliyorsa, fiziksel olayı anlatabilecek ve $p=n-k$ kadar boyutsuz sayı içeren bir denklem mevcuttur.

- Testler sırasında karşılaşılan fiziksel değişkenler: V , V_G , D_C , d_0 , U_G , ρ_L , μ_L , σ_L , g

$$F(V, V_G, D_C, d_0, U_G, \rho_L, \mu_L, \sigma_L, g)=0 \quad (5.6)$$

- Bağımsız temel fiziksel büyüklükler (boyutlar): kütle, zaman ve uzunluk
- Boyutsuz sayı: $9-3=6$

Boyutsuz sayılar:

- $f_1 = V V_G^{-1} = \frac{V}{V_G} = \varepsilon \Rightarrow$ Gaz kesri (5.7)

- $f_2 = d_0^{-1} U_G^2 g^{-1} = \frac{U_G^2}{d_0 g} \Rightarrow$ Froude sayısı (5.8)

Atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranı olarak adlandırılır ve akışkan hareketi (kabarık hızı ve hareketi) üzerindeki yerçekimi etkisini incelemek amacıyla kullanılır.

- $f_3 = d_0^3 \rho_L^2 \mu_L^{-2} g = \frac{d_0^3 \rho_L^2 g}{\mu_L^2} \Rightarrow$ Archimedes sayısı (5.9)

Yerçekimi kuvvetinin viskoz kuvvetlere oranı olarak adlandırılır ve sıvı faz özelliklerini içermektedir.

- $f_4 = d_0^2 \rho_L \sigma_L^{-1} g = \frac{d_0^2 \rho_L g}{\sigma_L} \Rightarrow$ Eötvös sayısı (5.10)

Eötvös sayısı kabarcık şekillerini karakterize etmek için kullanılır. Kaldırma kuvvetinin yüzey gerilmesi kuvvetine oranı olarak tanımlanmaktadır. Yüksek Eötvös sayıları, sistemin yüzey geriliminden çok etkilenmediğini ifade ederken, düşük Eötvös sayıları (1'den düşük) ise yüzey geriliminin etkin olduğunu gösterir.

- $f_5 = D_C^4 U_G^2 \rho_L d_0^{-3} N^{-2} \sigma_L^{-1} = \frac{D_C^4 U_G^2 \rho_L}{d_0^3 N^2 \sigma_L} \Rightarrow \text{Weber sayısı} \quad (5.11)$

Weber sayısı iki fazlı akışlarda, akışkanlar arası arayüzün analizinde kullanılan önemli bir boyutsuz sayıdır. Akışkan ataletinin yüzey gerilimine oranıdır. Kabarcık oluşumunun analizinde tercih edilir.

- $f_6 = D_C^{-1} d_0^1 = \frac{d_0}{D_C} \quad (5.12)$

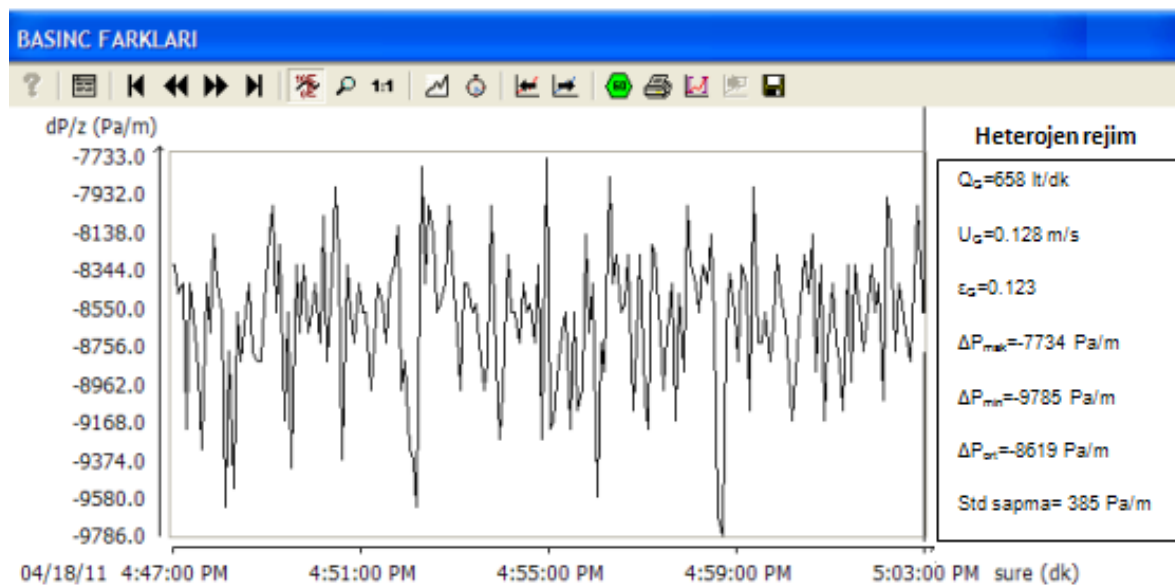
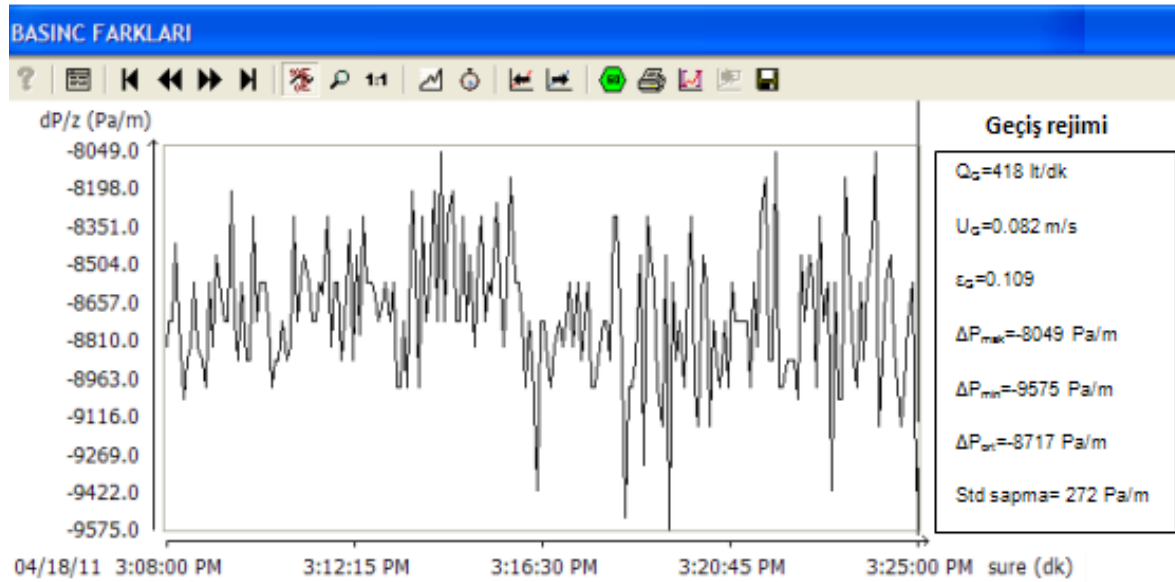
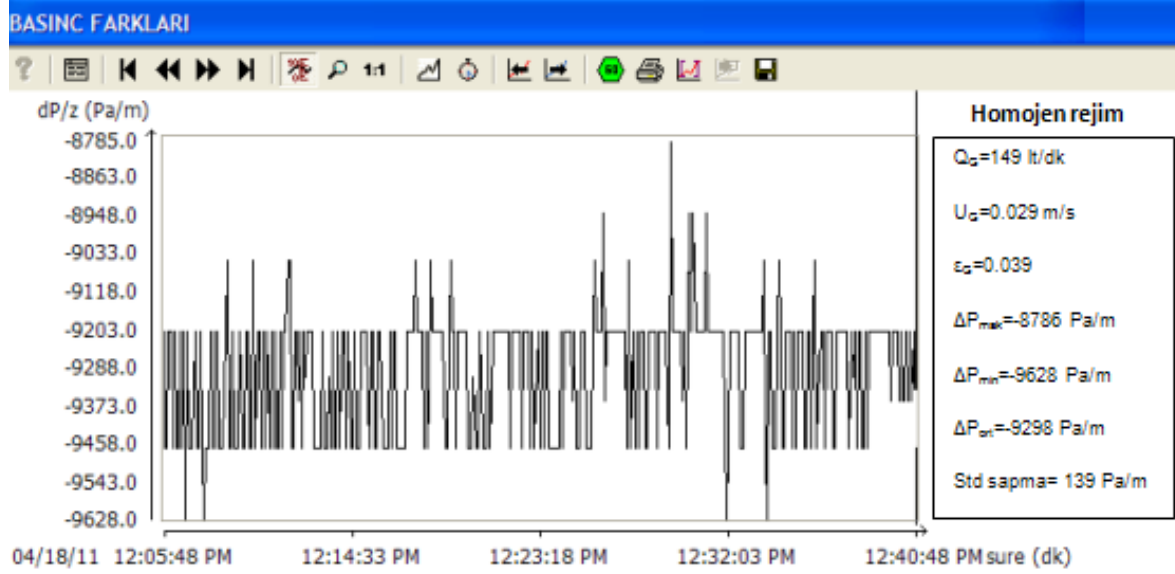
6. SONUÇLAR

Bu bölümde deneysel sonuçlara yer verilmiştir. İlk olarak elde edilen fark basınç eğrileri verilmiş ve akış rejimleri arasındaki farklar bu eğriler yardımıyla açıklanmıştır. İkinci kısımda gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri verilmiştir. Gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri yardımıyla rejim geçiş noktaları belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. En son olarak da deneysel sonuçlar kullanılarak regresyon analizi yapılmış ve elde edilen korelasyona yer verilmiştir.

6.1. Basınç Farkı Eğrileri

Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılardan Plaka 2 için gaz dağıtıcının 20 cm ve 130 cm üzerinde bulunan PT2 ve PT4 numaralı basınç ölçerlerden alınan basınç verisi kullanılarak Şekil 6.1'de verilen fark basınç eğrileri çizilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde:

- Homojen akış rejiminde oluşan kabarcıkların çapı diğer akış rejimlerinde oluşan kabarcık çaplarına oranla çok daha küçük olduğundan dolayı kolonda yükselirken meydana getirdikleri basınç dalgalanması çok daha düşük olmaktadır. (standart sapma=139 Pa/m)
- Geçiş bölgesinde çapı büyük olan kabarcıkların sayısı artmakta ve bu kabarcıkların meydana getirdiği basınç dalgalanması artmaktadır. (standart sapma=272 Pa/m) Ayrıca kolon içerisinde sıvı sirkülasyonu gözlemlenmiştir.
- Heterojen rejimde yüksek sıvı sirkülasyonu ve kabarcık çaplarının giderek artmasından dolayı basınç dalgalanmaları çok daha yüksek değerlere çıkmaktadır. (standart sapma=385 Pa/m)



Şekil 6.1: Basınc dalgalanması eğrileri

6.2. Gaz Kesri ve Sürüklenme Akısı Eğrileri

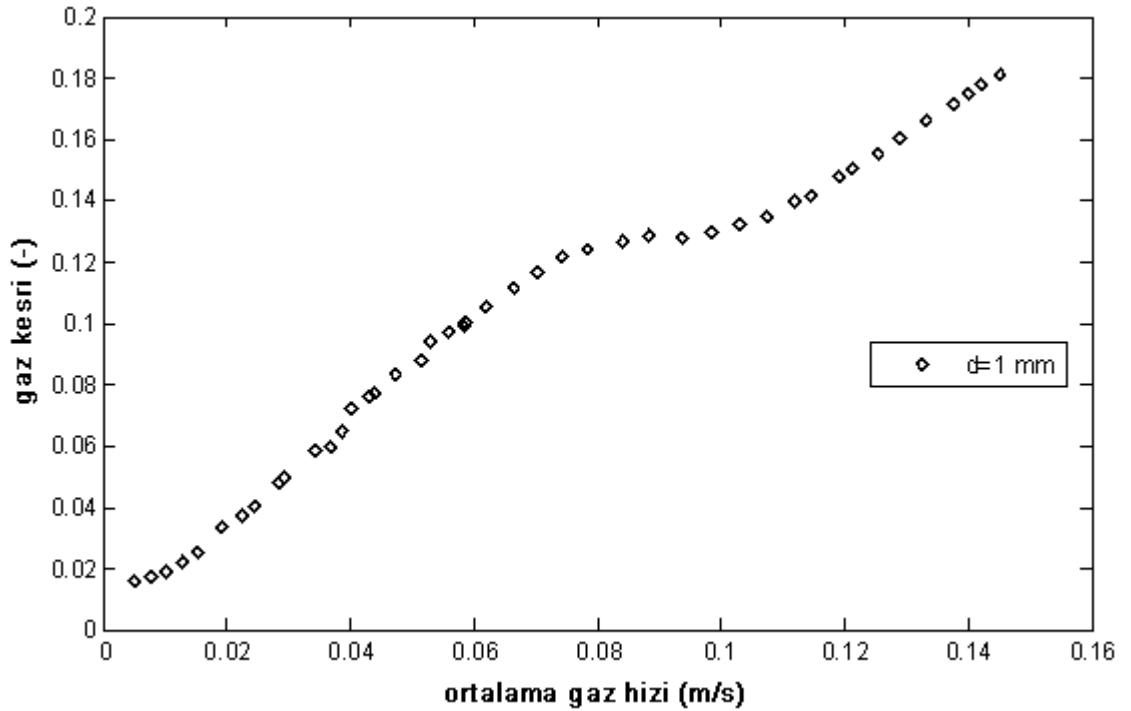
Bu kısımda deneysel çalışmalar sonucu her bir plaka için ayrı ayrı elde edilen gaz kesri eğrileri ve sürüklenme akısı eğrileri verilmiştir. Eğriler, delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar ve örümcek tipi gaz dağıtıcı için ayrı kısımlarda verilmiştir.

6.2.1. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri

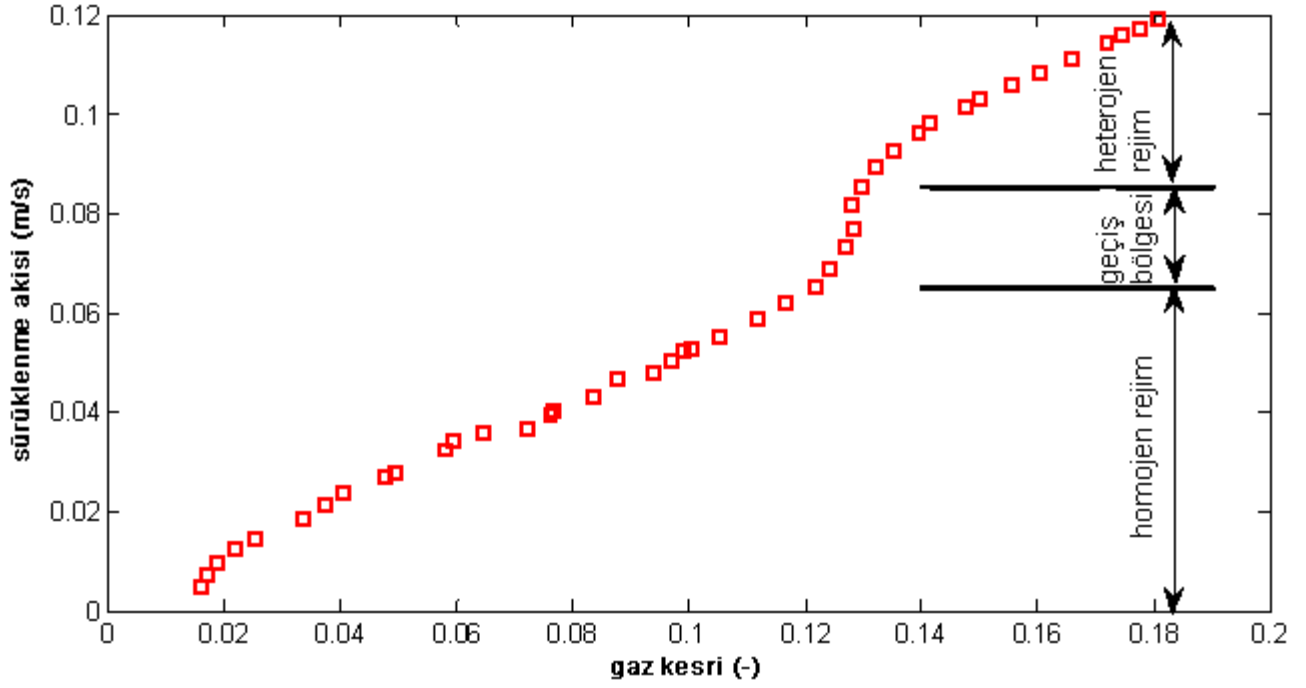
Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için deneysel olarak elde edilen gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrilerine incelenmiş ve bu eğriler yardımıyla rejim geçişlerinin meydana geldiği noktalar belirlenmiştir.

➤ Plaka 1:

Plaka 1 için elde edilen eğriler Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te sunulmuştur. Şekil 6.2'de verilen gaz kesri eğrisi ve Şekil 6.3'te verilen sürüklenme akısı eğrileri incelendiği takdirde akış rejimi için iki farklı geçiş noktası görülmektedir. Bu geçiş noktalarından birincisi akışın homojen rejimden geçiş bölgesine geçtiği noktayı, ikincisi ise geçiş bölgesinden heterojen rejime geçtiği noktayı temsil etmektedir.



Şekil 6.2: Plaka 1 için gaz kesri eğrisi



Şekil 6.3: Plaka 1 için sürüklenme akısı eğrisi

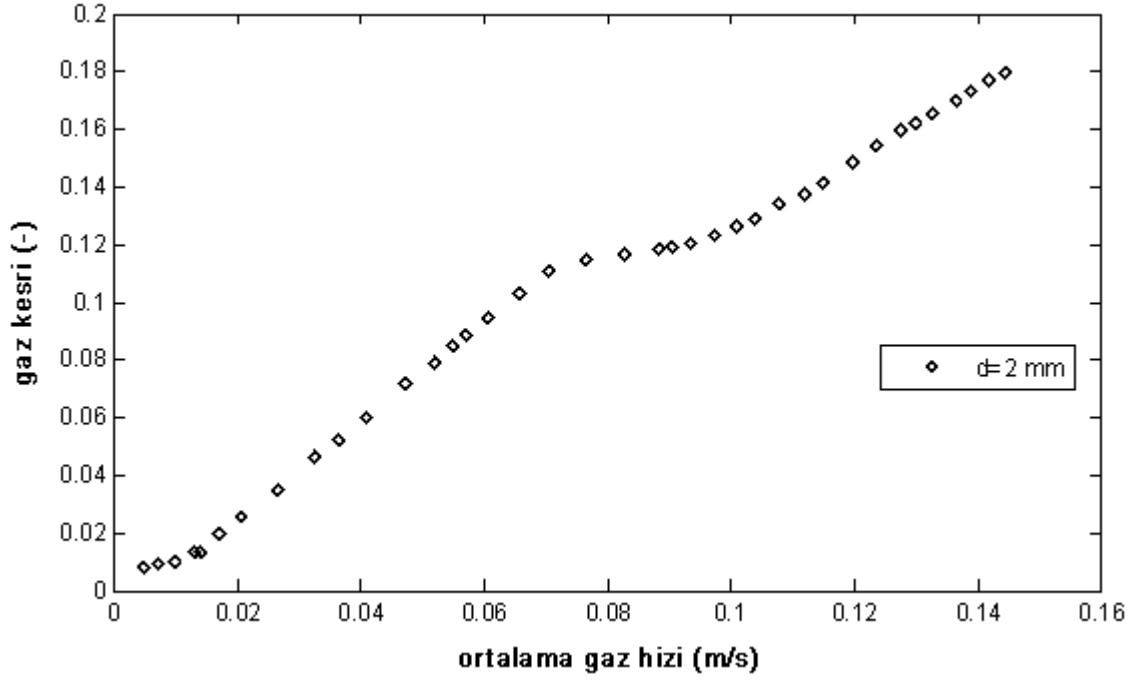
Rejim geçiş noktaları Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1: Plaka 1 için rejim geçiş noktaları

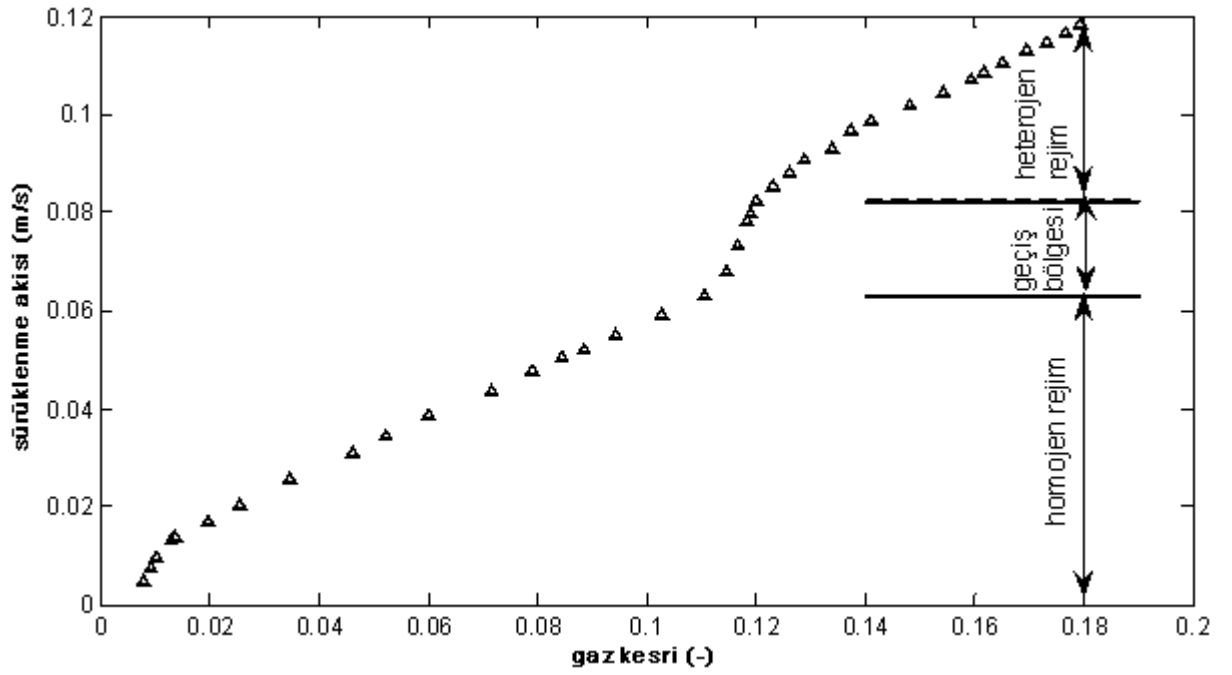
Geçiş Noktası 1			Geçiş Noktası 2		
$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$
0,1216	0,0652	0,0742	0,1297	0,0857	0,0985

➤ Plaka 2:

Plaka 2 için elde edilen eğriler Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’te sunulmuştur. Şekil 6.4’te verilen gaz kesri eğrisi ve Şekil 6.5’te verilen sürüklenme akısı eğrileri incelendiği takdirde akış rejimi için iki farklı geçiş noktası görülmektedir. Bu geçiş noktalarından birincisi akışın homojen rejimden geçiş bölgesine geçtiği noktayı, ikincisi ise geçiş bölgesinden heterojen rejime geçtiği noktayı temsil etmektedir.



Şekil 6.4: Plaka 2 için gaz kesri eğrisi



Şekil 6.5: Plaka 2 için sürüklenme akısı eğrisi

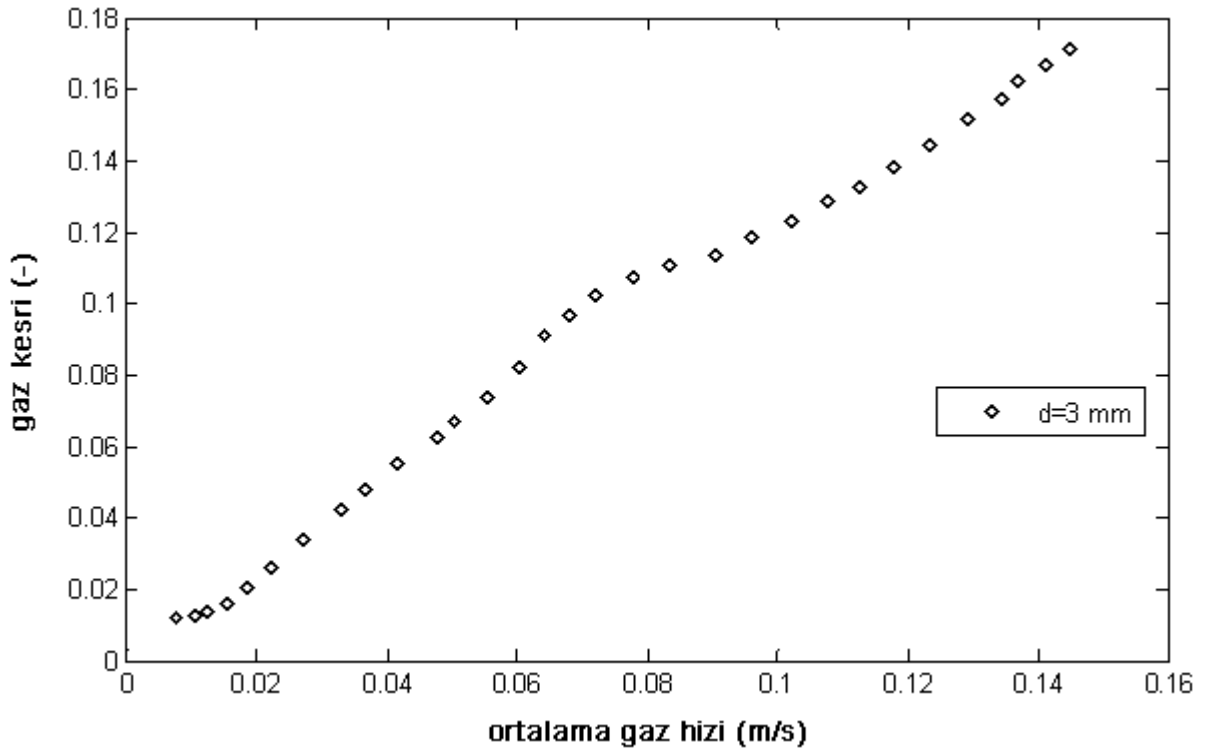
Rejim geçiş noktaları Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.2: Plaka 2 için rejim geçiş noktaları

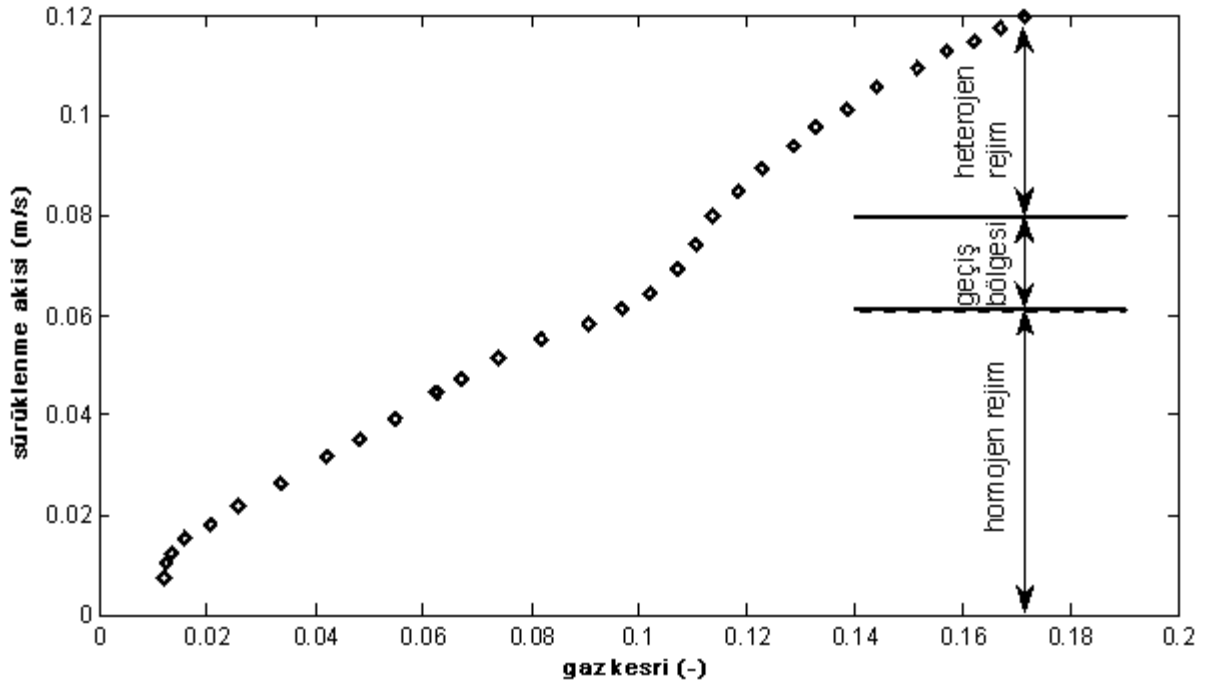
Geçiş Noktası 1			Geçiş Noktası 2		
$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$
0,1107	0,0629	0,0707	0,1203	0,0824	0,0937

➤ Plaka 3:

Plaka 3 için elde edilen eğriler Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de sunulmuştur. Şekil 6.6’da verilen gaz kesri eğrisi ve Şekil 6.7’de verilen sürüklenme akısı eğrileri incelendiği takdirde akış rejimi için iki farklı geçiş noktası görülmektedir. Bu geçiş noktalarından birincisi akışın homojen rejimden geçiş bölgesine geçtiği noktayı, ikincisi ise geçiş bölgesinden heterojen rejime geçtiği noktayı temsil etmektedir.



Şekil 6.6: Plaka 3 için gaz kesri eğrisi



Şekil 6.7: Plaka 3 için sürüklenme akısı eğrisi

Rejim geçiş noktaları Çizelge 6.3'te sunulmuştur.

Çizelge 6.3: Plaka 3 için rejim geçiş noktaları

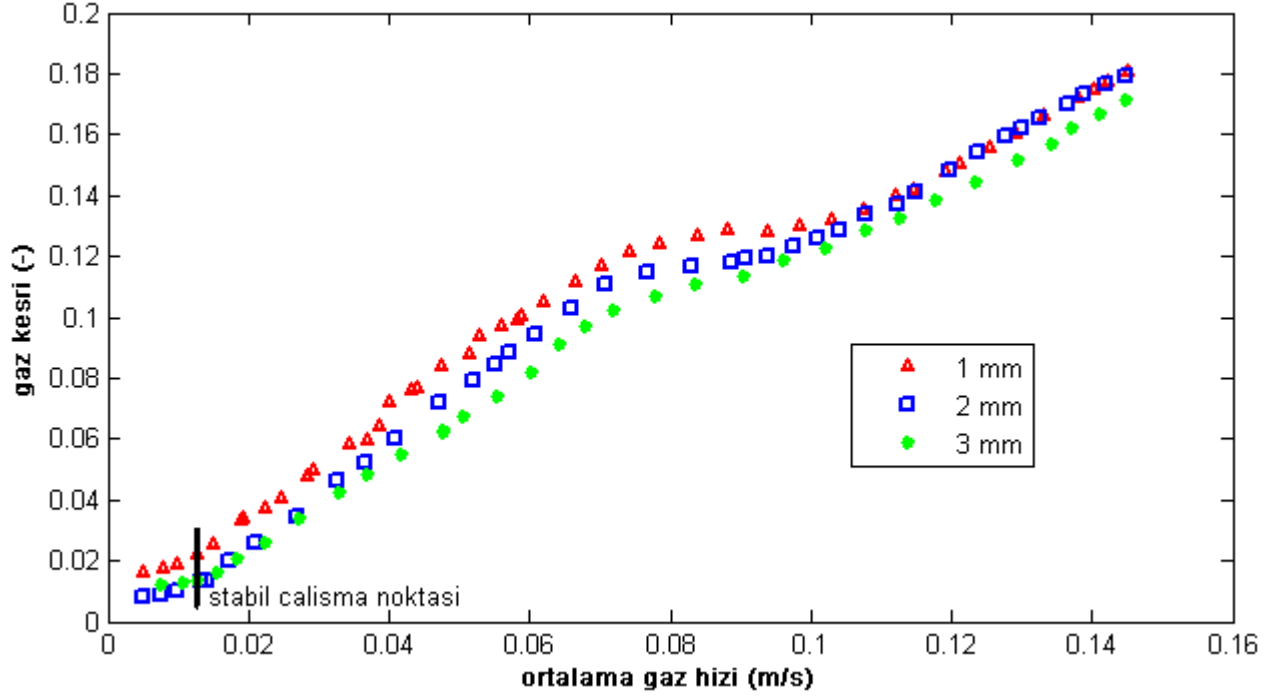
Geçiş Noktası 1			Geçiş Noktası 2		
$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$
0,0968	0,0614	0,0680	0,1138	0,0801	0,0904

Delikli plaka tipi gaz dağıtıcıların rejim geçiş noktaları üzerindeki etkilerini irdelemek amacıyla üç plaka için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da verilen eğriler elde edilmiştir. Şekil 6.8 incelendiğinde dağıtıcı plaka delik çapının artması durumunda gaz kesrinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca artan çap değerleri için geçiş rejimi daha kısa sürmektedir. Bu durum literatürde bulunan çalışmalar ile uyum göstermektedir [6,40,78,79].

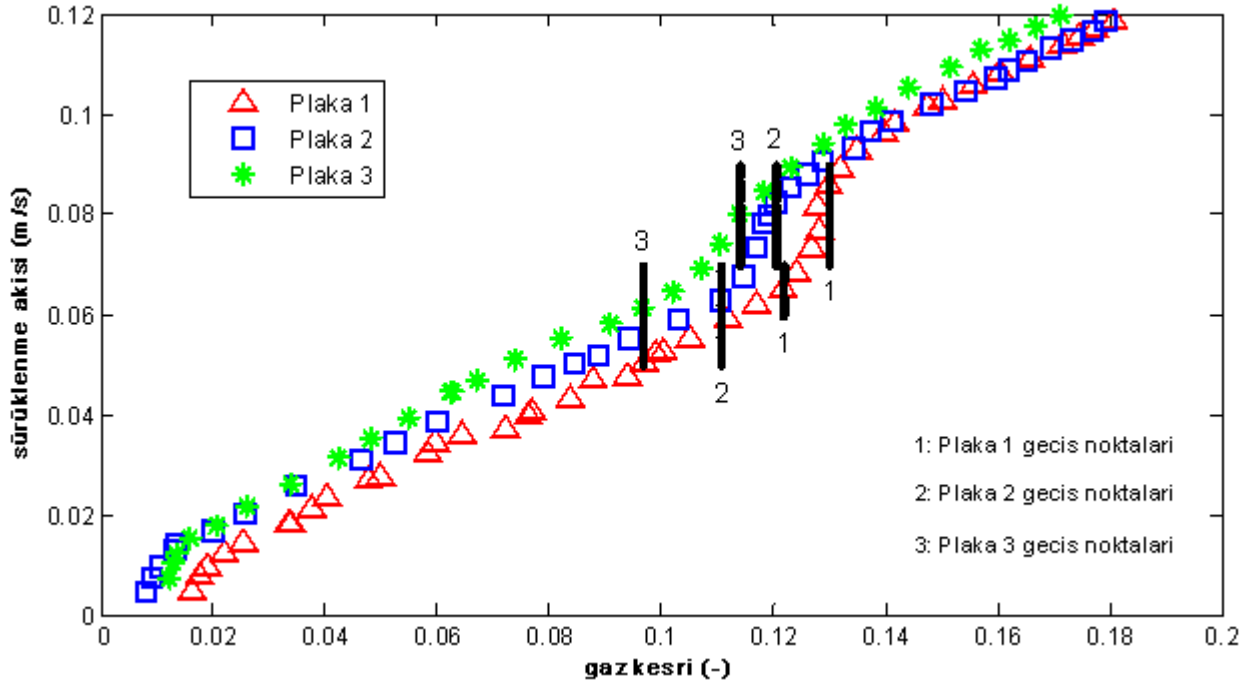
Aynı gaz kesri değerleri için delik çapı değerinin artması halinde homojen akış rejiminde ortalama gaz hızı artmakta, heterojen akış rejiminde pek değişmemektedir.

Ayrıca Şekil 6.8'den de görüldüğü gibi tüm delikli plakalar için kolonun stabil olarak çalışabilmesi için 1,25 cm/s gibi bir ortalama gaz hızı gerektiği görülmektedir. Eşitlik 1 kullanılarak bu ortalama gaz hızınının 65 lt/dk gibi bir hava debisine karşılık geldiği görülmektedir.

Delikli plakalar için sürüklenme akısı eğrileri (Şekil 6.9) incelendiğinde, artan delik çapları için rejim geçiş noktalarının eğrinin sol tarafına kaydığı görülmektedir. Yani aynı sürüklenme akısı değeri için gaz kesri değerleri düşmekte, bu durum rejim geçiş hızlarının azalması ile açıklanabilir.



Şekil 6.8: Delikli plakalar için elde edilen gaz kesri eğrileri



Şekil 6.9: Delikli plakalar için elde edilen sürüklenme akısı eğrileri

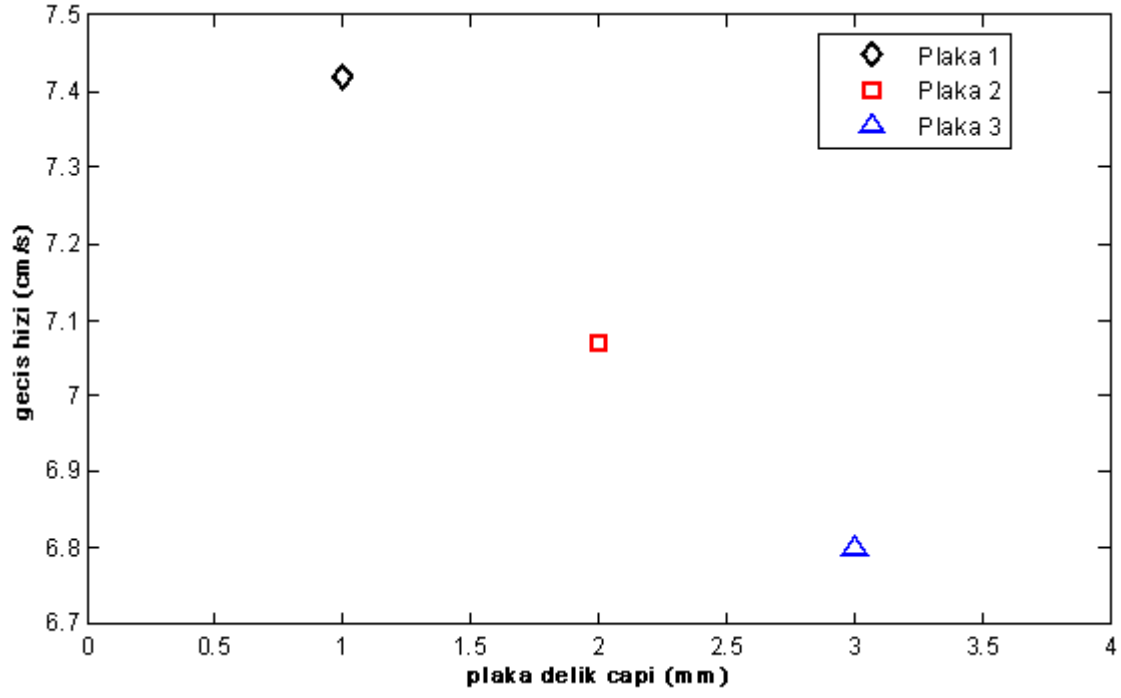
Delikli plakalara ait rejim geçiş noktaları izelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için rejim geçiş noktalarının karşılaştırılması

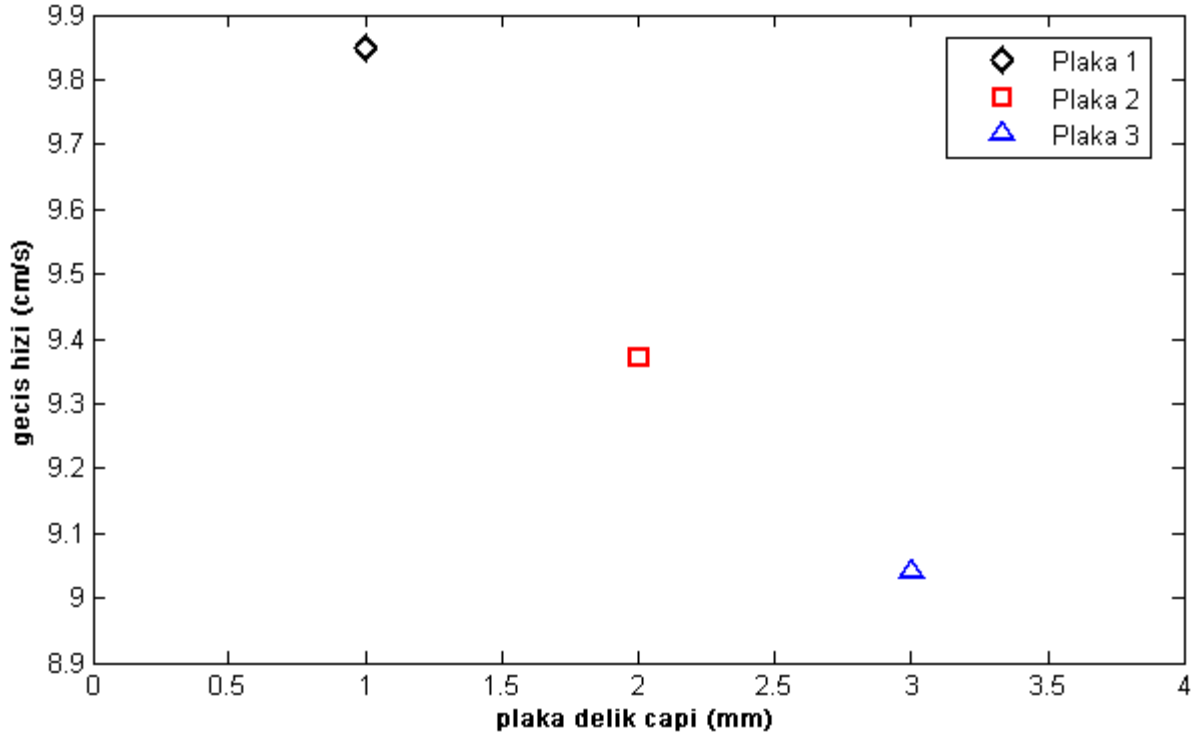
Plaka tipi	Geçiş Noktası 1			Geçiş Noktası 2		
	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$
Plaka 1 (d=1 mm)	0,1216	0,0652	0,0742	0,1297	0,0857	0,0985
Plaka 2 (d=2 mm)	0,1107	0,0629	0,0707	0,1203	0,0824	0,0937
Plaka 3 (d=3 mm)	0,0968	0,0614	0,0680	0,1138	0,0801	0,0904

Gaz dağıtıcı plaka çapının rejim geçiş hızları üzerindeki etkisini daha iyi görebilmek amacıyla izelge 6.4'te verilen değerler kullanılarak geçiş hızlarının çap değerleriyle değişimini gösteren eğriler çizilmiştir. Bu eğriler şekil 6.10 ve şekil 6.11'de sunulmuştur.

Çizelge 6.4, şekil 6.10 ve şekil 6.11 incelendiğinde artan delik çapı değerleri için her iki geçiş noktasında rejim geçiş hızları dūřmektedir. Deneyle esnasında, artan plaka delik çapları için oluşan ilk kabarcıkların ortalama çapının arttığı gözlemlenmiştir. Daha büyük çaplı kabarcıkların oluşması kabarcıklara etkileyen kaldırma kuvvetinin artmasına neden olmakta ve artan kaldırma kuvveti sonucu kabarcıklar daha hızlı hareket etmektedir. Bu durum kabarcıklar arası etkileşimin (birleşme ve parçalanmalar) diğer plakalara oranla daha dūřık hızlarda gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Birleřmeler sonucu oluşan büyük kabarcıklar sıvı sirkülasyonuna neden olmakta ve bunun sonucunda daha dūřık ortalama gaz hızlarında rejim geçişleri meydana gelmektedir. Bu durum literatürde bulunan diğer çalışmalar ile uyum göstermektedir [69,80].



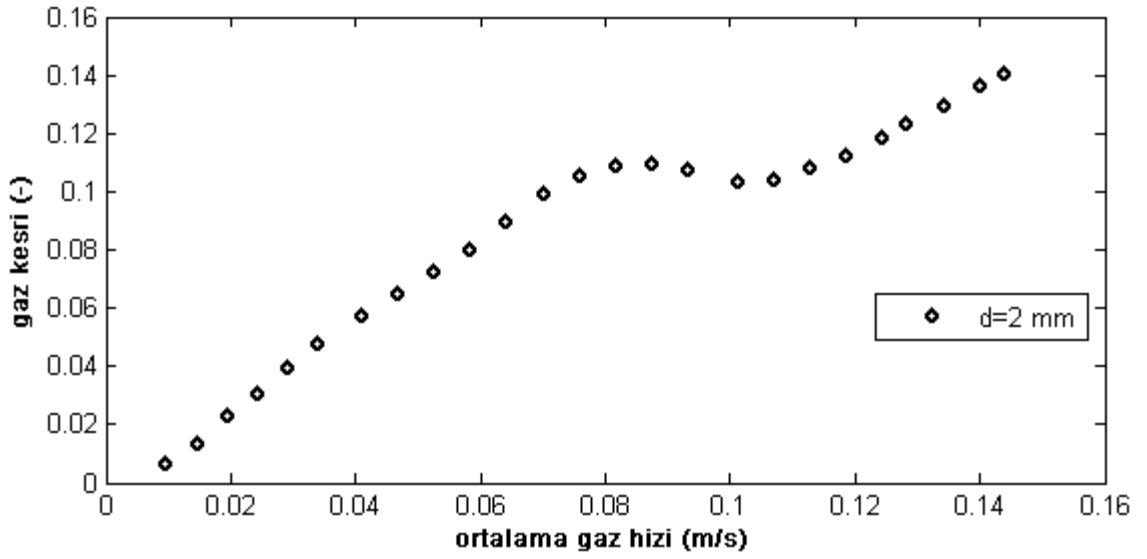
Şekil 6.10: Homojen rejim-geçiş bölgesi geçiş hızlarının plaka delik çapı ile değişimi



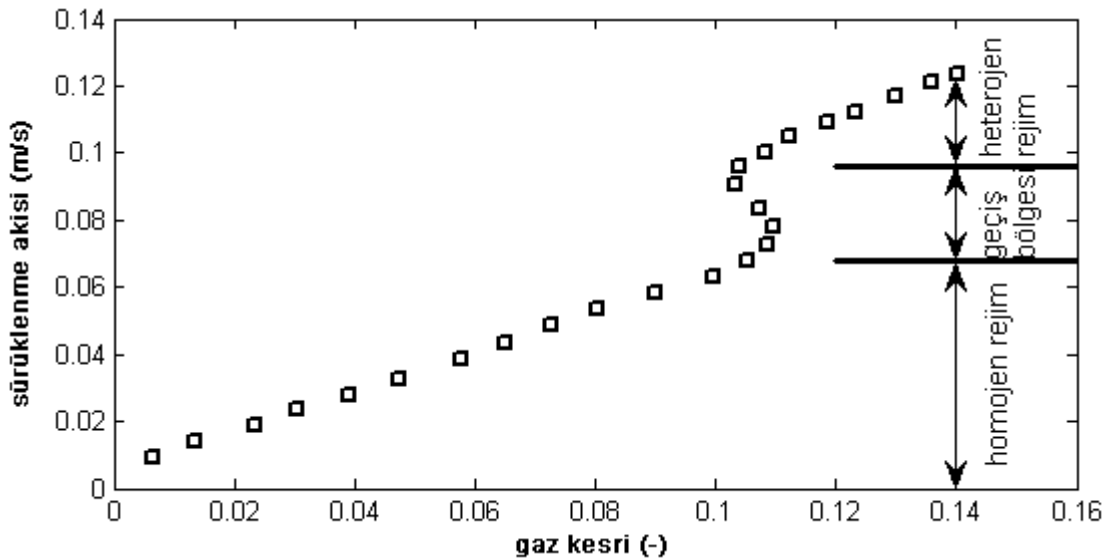
Şekil 6.11: Geçiş bölgesi-heterojen rejim geçiş hızlarının plaka delik çapı ile değişimi

6.2.2. Örümcek tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri

Örümcek tipi gaz dağıtıcı için deneysel olarak elde edilen gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrilerine incelenmiş ve bu eğriler yardımıyla rejim geçişlerinin meydana geldiği noktalar belirlenmiştir. Örümcek tipi gaz dağıtıcı için elde edilen eğriler Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te sunulmuştur. Şekil 6.12'de verilen gaz kesri eğrisi ve Şekil 6.13'te verilen sürüklenme akısı eğrileri incelendiği takdirde akış rejimi için iki farklı geçiş noktası görülmektedir. Bu geçiş noktalarından birincisi akışın homojen rejimden geçiş bölgesine geçtiği noktayı, ikincisi ise geçiş bölgesinden heterojen rejime geçtiği noktayı temsil etmektedir.



Şekil 6.12: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait gaz kesri eğrisi



Şekil 6.13: Örümcek tipi gaz dağıtıcıya ait sürüklenme akısı eğrisi

Rejim geçiş noktaları izelge 6.5'te sunulmuştur.

Çizelge 6.5: Örümcek tipi gaz dağıtıcı için rejim geçiş noktaları

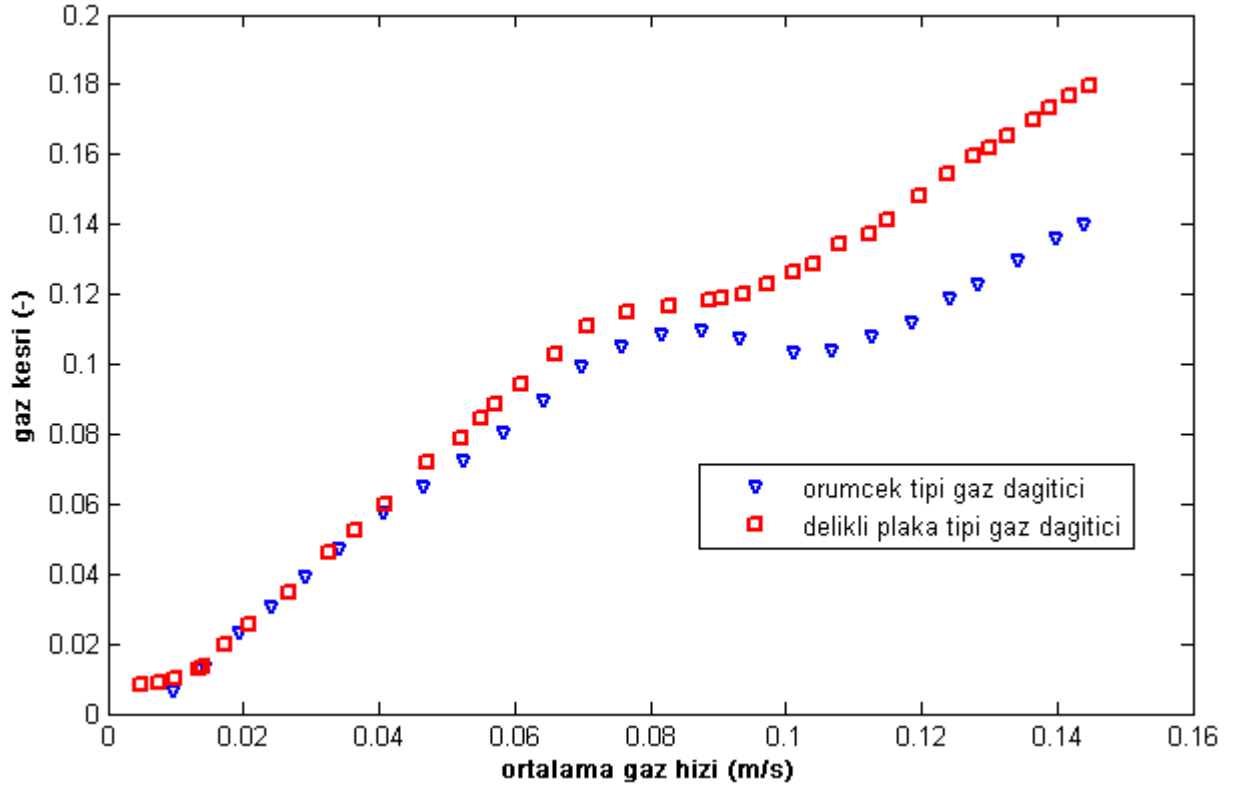
Geçiş Noktası 1			Geçiş Noktası 2		
$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$	$\epsilon_G (-)$	$j_G (m/s)$	$U_G (m/s)$
0,1053	0,0678	0,0757	0,1039	0,0958	0,1069

Örümcek tipi gaz dağıtıcı için elde edilen gaz kesri eğrisi incelendiğinde; delikli plakalarda kolonun stabil olarak çalışması için gerekli olan minimum hava debisi ihtiyacı örümcek tipi dağıtıcı kullanılması durumunda gerekmemektedir.

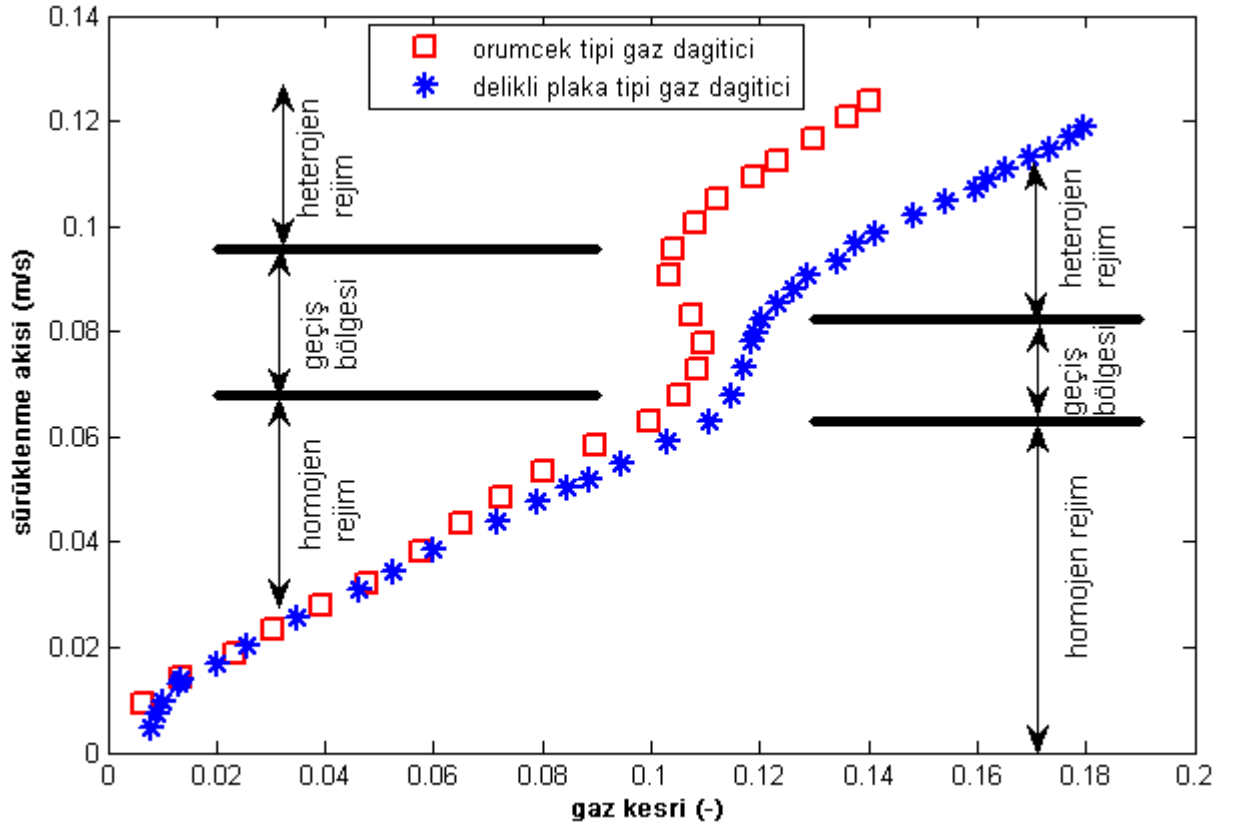
6.2.3. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcı ve örümcek tipi gaz dağıtıcı için elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılardan delik çapı 2 mm olan plaka ile örümcek tipi gaz dağıtıcı için elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her iki gaz dağıtıcı için elde edilen sonuçlar Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te sunulmuştur. Gaz kesri ve sürüklenme akısı eğrileri incelendiğinde:

- Geçiş bölgesinin örümcek tipi gaz dağıtıcı için çok daha belirgin olduğu görülmektedir.
- Heterojen rejime geçildikten sonra gaz kesri eğrileri arasında ciddi farklılıklar gözlemlenmektedir. Delikli plaka tipi gaz dağıtıcı kullanılması durumunda gaz kesri değerleri % 30'lara kadar daha yüksek olmaktadır.



Şekil 6.14: Plaka 2 ve örümcek tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesri eğrileri



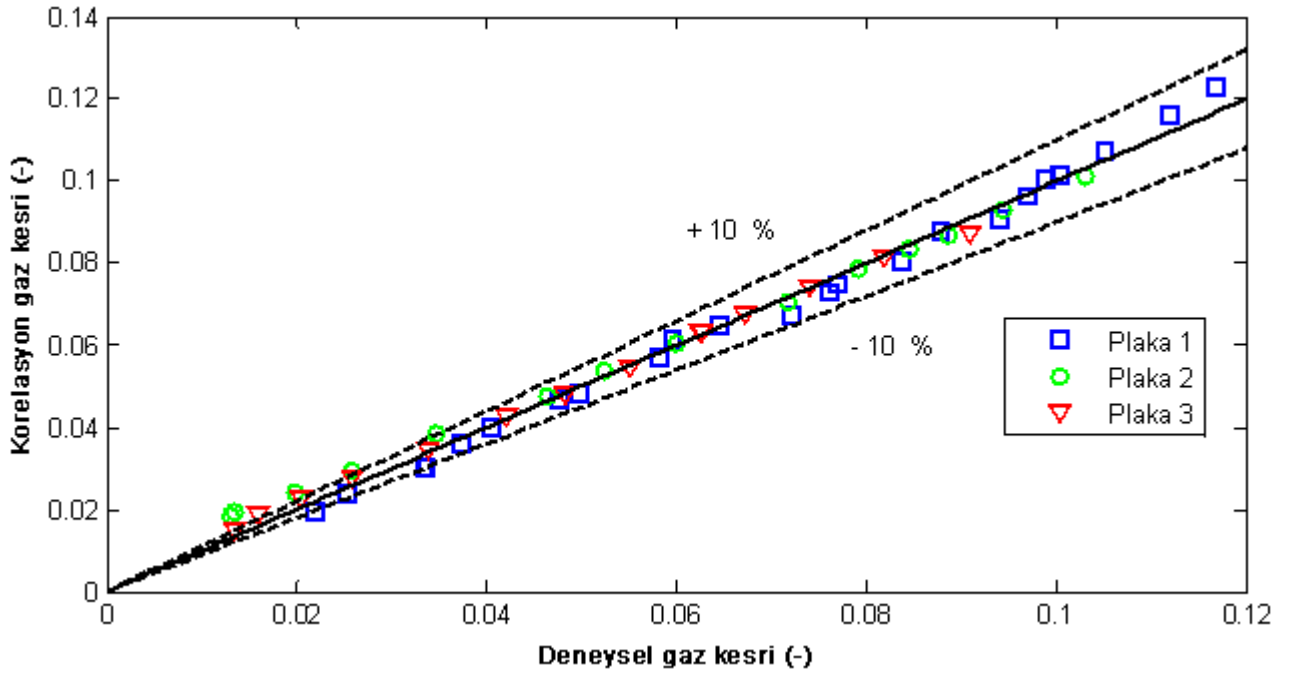
Şekil 6.15: Plaka 2 ve örümcek tipi gaz dağıtıcılar için sürüklenme akısı eğrileri

6.3. Regresyon Analizi İle Korelasyon Bulma

Bölüm 5.3.'te yapılan boyut analizi ile elde edilen boyutsuz sayılar kullanılarak (Froude sayısı, Eötvös sayısı, Weber sayısı, Archimedes sayısı ve d_0/D_C oranı) regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile elde edilen korelasyon aşağıda verilmiştir.

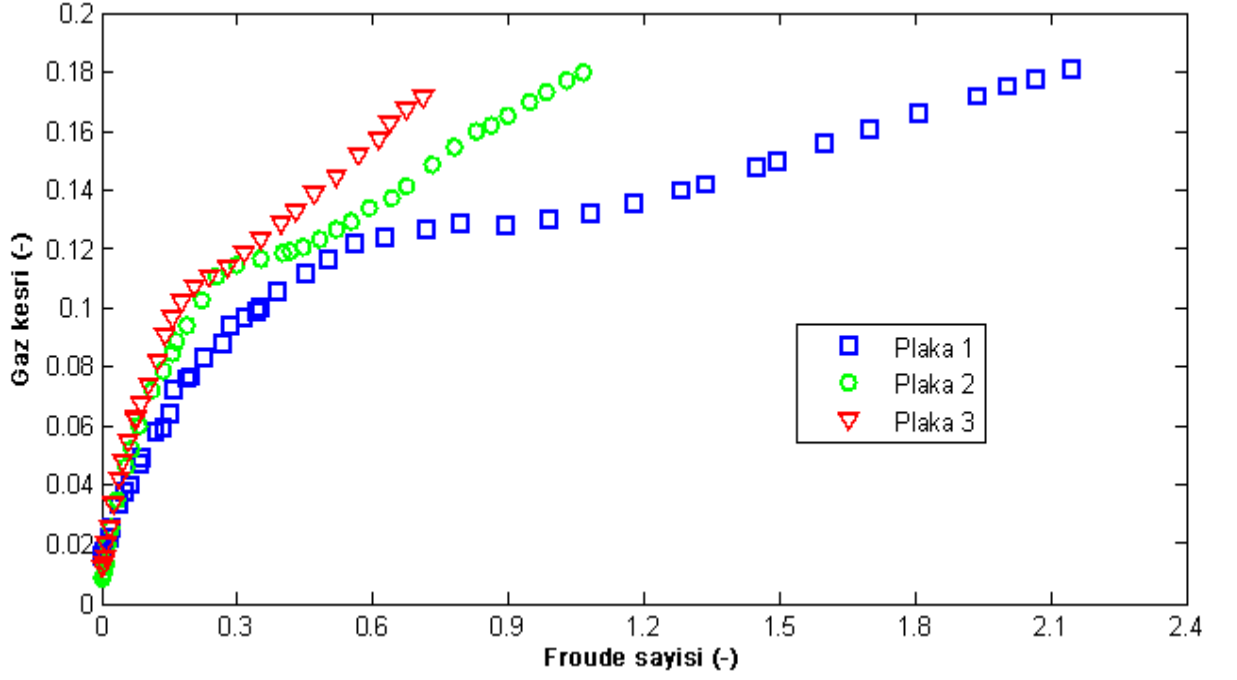
$$\varepsilon_G = 0.2278 \left[\frac{Fr^{0.7767} Ar^{0.3649} \left(\frac{d_0}{D_C} \right)^{0.4780}}{Eo^{0.3916} We^{0.2402}} \right] \quad (6.1)$$

DeneySEL sonuçlar ile elde edilen korelasyonun kıyaslaması Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16: DeneySEL sonuçlar ile korelasyonun karşılaştırılması

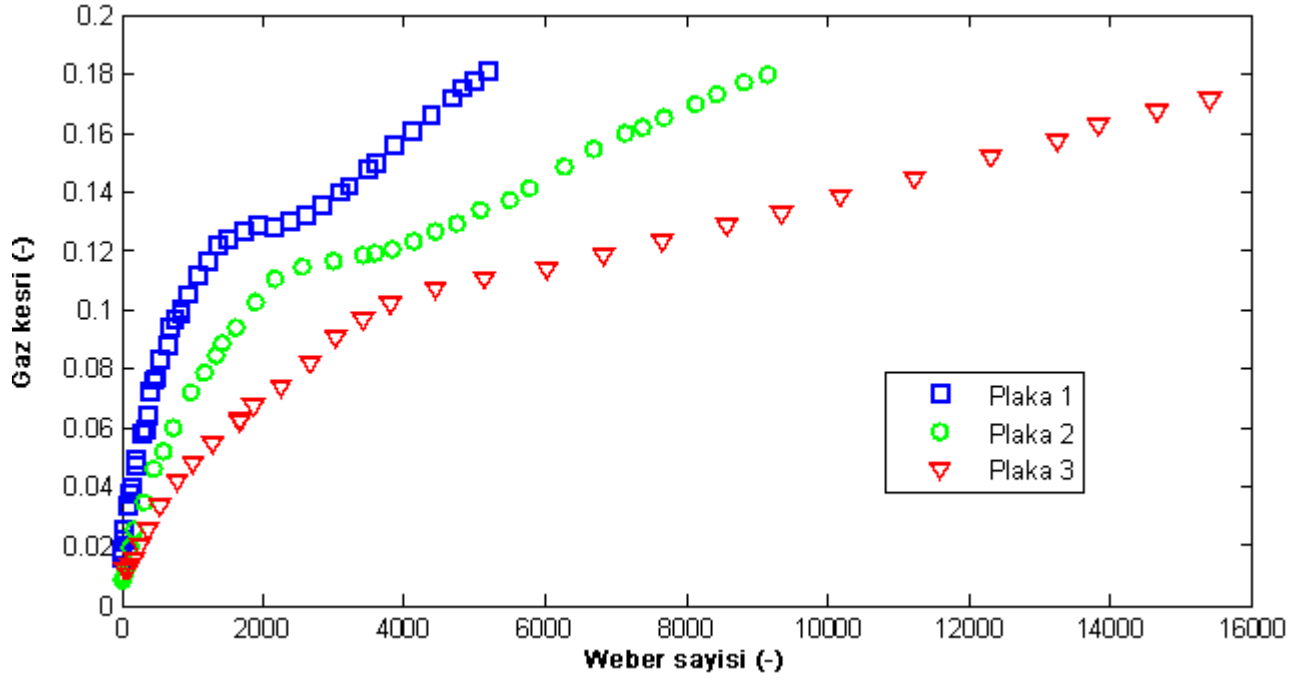
Şekil 6.16 incelendiğinde deneySEL sonuçlar ile korelasyon arasındaki uyum görülmektedir. Delikli plaka tipi gaz dağıtımlar için elde edilen gaz kesri eğrileri (Şekil 6.8) 6.2.1 numaralı kısımda incelenmiş ve eğriler arasındaki farklar açıklanmıştır. Bu kısımda Froude sayısı ve Weber sayılarının eğriler üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.17: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesrinin Froude sayısı ile değişimi

Şekil 6.17 incelendiğinde, gaz kesirleri arasında homojen rejimde ciddi bir fark görülmemektedir. Testler esnasında heterojen rejimde kabarcık birleşmelerinin daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Artan kabarcık çapları için yerçekimi kuvveti artmakta ve bu durum Froude sayısının azalmasına neden olmaktadır. Elde edilen korelasyona göre Froude sayısının azalması gaz kesrinin azalmasına sebep olmaktadır.

Aynı gaz kesri değerleri için delik çapı değerinin artması halinde homojen akış rejiminde ortalama gaz hızı artmakta, heterojen akış rejiminde pek değişmemektedir (Şekil 6.8). Homojen rejimde ortalama gaz hızlarının pozitif etkisi ile plaka delik çaplarının negatif etkisinin dengesi sonucu Froude sayısı pek değişiklik göstermemektedir. Heterojen akış rejiminde ortalama gaz hızlarının pek etkisi olmaması ve delik çapının negatif etkisi sonucu Froude sayıları arasında ciddi farklılıklar görülmektedir.



Şekil 6.18: Delikli plaka tipi gaz dağıtıcılar için gaz kesrinin Weber sayısı ile değişimi

Şekil 6.18 incelendiğinde, gaz kesri eğrileri arasında ciddi bir fark görülmektedir. Weber sayısının tanımı gereği plaka delik çapının artması (aynı zamanda delik sayısı azalmaktadır) Weber sayısının artmasına neden olmaktadır. Elde edilen korelasyona göre artan Weber sayıları için gaz kesri azalmaktadır.

Aynı delikli plaka için Weber sayısı sadece ortalama gaz hızı ile değişmektedir ve artan Weber sayıları için ortalama gaz hızı arttığından dolayı gaz kesri değerleri artmaktadır

7. ÖNERİLER

Bu çalışmanın devamı olarak aşağıdaki önerilerin yararlı olacağı düşünülmektedir:

- i.** Deneysel çalışmalarda iç çapı 33 cm ve cidar kalınlığı 1 cm olan bir kolon kullanılmıştır. Kolon çapının akış rejimi üzerindeki etkisini irdelemek ölçek büyütmede ve model kurma aşamalarında faydalı olacaktır.
- ii.** Yapılan deneysel çalışmaların tamamında akışkan çifti olarak hava/su ikilisi kullanılmıştır. Sıvı özelliklerinin etkisini inceleyebilmek amacıyla gliserin, kerosen vb farklı sıvılar kullanılarak çalışma yapmak faydalı olacaktır.
- iii.** İleride yapılacak çalışmalarda sisteme katı yüklemesi yapılarak üç fazlı akış için sonuçlar elde edilmelidir. (Sisteme yüklenecek katı parçacık çapı 5-150 µm arasında olması uygun olacaktır.)

KAYNAKLAR

- [1] **Guettel, R., Kunz, U., Turek, T.,** 2008: Reactors for Fischer – Tropsch synthesis. *Chemical Engineering & Technology*, 31, No. 5, 746–754
- [2] **Collot, A.G.,** 2004: Clean Fuels from Coal, IEA Clean Coal Centre, Londra, 27-31
- [3] **Spath, P. L., Dayton, D. C.,** 2003: Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, NREL/TP-510-34929
- [4] **Deckwer, W.D.,** 1991: *Bubble Colum Reactors*, Wiley, İngiltere
- [5] **Deckwer, W.D., Louisi, Y., Zaidi, A., Ralek, M.,** 1980: Hydrodynamic Properties of The Fischer-Tropsch Slurry Process. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 19, 699-708.
- [6] **Kazakis, N.A., Papadopoulos, I.D., Mouza, A.A.,** 2007: Bubble columns with fine pore sparger operating in the pseudo-homogeneous regime: Gas holdup prediction and a criterion for the transition to the heterogeneous regime. *Chemical Engineering Science*, 62, 3092-3103
- [7] **Mouza, A.A., Dalakoglou, G.K., Paras, S.V.,** 2005: Effect of liquid properties on the performance of bubble column reactors with fine pore spargers. *Chemical Engineering Science*, 60, 1465-1475
- [8] **Kantarci, N., Borak, F., Ülgen, K.O.,** 2005: Bubble column reactors, *Process Biochemistry*, 40, 2263-2283.
- [9] **Wu, Y., Ong, B.C., Al-Dahhan, M.H.,** 2001: Prediction of radial gas holdup profiles in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science*, 56, 1207-1210.
- [10] **Schweitzer, J-M., J. Bayle, J., T. Gauthier, T.,** 2001: Local gas hold-up measurements in fluidized bed and slurry bubble column. *Chemical Engineering Science*, 56, 1103-1110.
- [11] **Boyer, C., Duquenne, A.M., Wild, G.,** 2002: Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. *Chemical Engineering Science*, 57, 3185-3215

- [12] **Chaumat, H., Billet-Duquenne A.M., Augier, F., Mathieu, C., Delmas, H.,** 2007: On the reliability of an optical fibre probe in bubble column under industrial relevant operating conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31, 495-504
- [13] **Vázquez, C., Nombela, J.L., Sobrino, C., de Vega, M., J. Zubía, J., Montero, D. S.,** 2007: Plastic fiber-optic probes for characterizing fluidized beds in bubbling regime. *16th International Conference on Plastic Optical Fiber (POF)*, 202–205
- [14] **Chen, J., Gupta, P., Degaleesan, S., Al-Dahhan, M.H., Dudukovic, M.P., Toseland, B.A.,** 1998: Gas holdup distributions in large-diameter bubble columns measured by computed tomography. *Flow Measurement Instruments*, 9, 91–101.
- [15] **Sie, S.T., Krishna, R.,** 1999: Fundamentals and selection of advanced Fischer–Tropsch reactors. *Applied Catalysis A: General* 186, 55–70
- [16] **Hikita, H., Asai, S., Tanigawa, K., Segawa, K., Kitao, M.,** 1980: Gas hold-up in bubble columns, *Chemical Engineering Journal*, 20, 59-67.
- [17] **Li, H., Prakash, A.,** 2000: Influence of slurry concentrations on bubble population and their rise velocities in three-phase slurry bubble column, *Powder Technology*, 113, 158–167
- [18] **Krishna, R., De Stewart, J.W.A., Ellenberger, J., Martina ,G.B, Maretto, C.,** 1997: Gas holdup in slurry bubble columns: effect of column diameter and slurry concentrations, *AIChE J*, 43,311–316.
- [19] **Krishna, R., Van Baten, J.M., Urseanu, M.I., Ellenberger, J.,** 2001: A scale up strategy of bubble column slurry reactors, *Catalysis Today*, 66, 199-207
- [20] **Ruzicka, M.C., Drahos, J., Fialova, M., Thomas, N.H.,** 2001: Effect of bubble column dimensions on flow regime transition, *Chemical Engineering Science*, 56, 6117-6124
- [21] **Li, H., Prakash, A.,**1997: Heat transfer and hydrodynamics in a three-phase slurry bubble column , *Ind Eng Chem Res*, 36, 4688–4694.
- [22] **Loimer, T., Machu, G., Schafflinger, U.,** 2004: Inviscid bubble formation on porous plates and sieve plates, *Chemical Engineering Science*, 59, 809-818
- [23] **Öztürk, S.S., Schumpe, A., Deckwer, W.D.,** 1987: Organic liquids in a bubble column: holdups and mass transfer coefficients, *AIChE J*, 33, 1473–1480.
- [24] **Wilkinson, P.M., van Dierendonck, L.L,** 1990: Pressure and gas density effects on bubble break-up and gas hold-up in bubble columns, *Chemical Engineering Science*, 45, 2309-2315.

- [25] **Letzel, H.M., Schouten, J.C., van den Bleek, C.M., Krishna, R.**, 1999: Gas holdup and mass transfer in bubble column reactors operated at elevated pressure, *Chemical Engineering Science*, 54, 2237–2246.
- [26] **Urseanu, M.I., Guit, R.P.M., Stankiewicz, A., van Kranenburg, G., Lommen, J.H.G.M.**, 2003: Influence of operating pressure on the gas hold-up in bubble columns for high viscous media, *Chemical Engineering Science*, 58, 697-704
- [27] **Krishna, R., Ellenberger, J.**, 2002: Improving gas–liquid contacting in bubble columns by vibration excitement, *International Journal of Multiphase Flow*, 28, 1223–1234
- [28] **Ellenberger, J., Krishna, R.**, 2003: Shaken, not stirred, bubble column reactors: Enhancement of mass transfer by vibration excitement, *Chemical Engineering Science*, 58, 705-710
- [29] **Ellenberger, J., Krishna, R., van Baten, J.M.**, 2003: Intensification of bubble columns by vibration excitement, *Catalysis Today*, 79-80, 181-188
- [30] **Ellenberger, J., Krishna, R.**, 2002: Improving mass transfer in gas–liquid dispersions by vibration excitement, *Chemical Engineering Science*, 57, 4809-4815
- [31] **Krishna, R., van Baten, J.M.**, 2001: Scaling up bubble column reactor with the aid of CFD, *Trans IChemE*, 79, 283-309
- [32] **Steynberg, A., Dry, M.**, 2004: *Fischer-Tropsch Technology*, Elsevier
- [33] **Thorat, B.N., Kataria, K., Kulkarni, A.V., Joshi, J.B.**, 2001: Pressure drop studies in bubble columns, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40, 3675-3688.
- [34] **Shah, Y.T., Godbole, S.P., Deckwer, W.D.**, 1982: Design parameters estimations for bubble column reactors, *AIChE J*, 28, 353–379.
- [35] **Krishna, R., De Stewart, J.W.A., Ellenberger, J., Martina, G.B., Maretto, C.**, 1997: Gas holdup in slurry bubble columns: effect of column diameter and slurry concentrations, *AIChE J*, 43, 311–316.
- [36] **Krishna, R., De Stewart J.W.A., Hennephof D.D., Ellenberger J., Hoefsloot H.C.J.**, 1994: Influence of increased gas density on hydrodynamics of bubble column reactors, *AIChE J*, 40, 112–119.
- [37] **Krishna, R., Wilkinson, P.M., van Dierendonck, L.L.**, 1991: A model for gas holdup in bubble columns incorporating the influence of gas density on flow regime transitions, *Chemical Engineering Science*, 46, 2491–2496.

- [38] **Chilekar, V.P., Singh C., van der Schaaf, J., Kuster, B.F.M., Schouten, J.C.,** 2007: A gas hold-up model for slurry bubble columns *AIChE J*, 57, 1687-1702
- [39] **Urseanu, M.,** 2000: *Scaling up bubble column reactors*, Doktora tezi, Amsterdam Üniversitesi, Hollanda
- [40] **Thorat, B.N., Joshi, J.B.,** 2004: Regime transition in bubble columns: experimental and predictions, *Experimental and Thermal Fluid Science*, 28, 423-430
- [41] **Shaikh, A., Al-Dahhan, M.H.,** 2005: Characterization of the hydrodynamic flow regime in bubble columns via computed tomography, *Flow Measurement and Instrumentation*, 16, 91-98
- [42] **Wallis, G.B.,** 1969: *One dimensional two phase flow*, McGraw Hill, New York
- [43] **Drahos, J.; Zahradnik, J.; Puncochar, M.; Fialova, M.; Bradka, F.,** 1991: Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing*, 29(2), 107-115.
- [44] **Vial, C., Laine, R., Poncin, S., Midoux, N., Wild, G.,** 2001: Influence of gas distribution and regime transitions on liquid velocity and turbulence in a 3-D bubble column. *Chemical Engineering Science*, 56(3), 1085-1093.
- [45] **Park, S. H., Kim, S. D.,** 2003: Characterization of pressure signals in a bubble column by wavelet packet transform. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 20(1), 128-132.
- [46] **Thimmapuram, P. R., Rao, N. S., Saxena, S. C.,** 1992: Characterization of hydrodynamic regimes in a bubble column, *Chemical Engineering Science*, 47 (13-14), 3335-3362.
- [47] **Zhang, J.-P., Grace, J. R., Epstein, N., Lim, K. S.,** 1997: Flow regime identification in gas-liquid flow and three-phase fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 52(21/22), 3979-3992.
- [48] **Briens, L. A., Briens, C. L., Margaritis, A., Hay J.,** 1997: Minimum liquid fluidization velocity in gas-liquid-solid fluidized bed of low-density particles. *Chemical Engineering Science*, 52 (21-22), 4231-4238.
- [49] **Kikuchi, R., Yano, T., Tsutsumi, A., Yoshida, K., Punchochar, M., Drahos, J.,** 1997: Diagnosis of chaotic dynamics of bubble motion in a bubble column. *Chemical Engineering Science*, 52(21/22), 3741-3745.

- [50] **Al-Masry, W. A.; Ali, E. M.; Aqeel, Y. M.**, 2005: Determination of bubble characteristics in bubble columns using statistical analysis of acoustic sound measurements. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(A10), 1196 - 1207.
- [51] **Al-Masry, W. A, Ali, E. M.** 2007: Identification of hydrodynamic characteristics in bubble columns through analysis of acoustic sound measurements-Influence of the liquid phase properties. *Chemical Engineering and Processing*, 46 (2), 127-138.
- [52] **Chen, R. C., Reese, J., Fan, L.-S.**, 1994: Flow structure in a three-dimensional bubble column and three-phase fluidized bed. *AIChE Journal*, 40(7), 1093-1104.
- [53] **Lin, T. J., Reese, J., Hong, T., Fan, L. S.**, 1996: Quantitative analysis and computation of two-dimensional bubble columns. *AIChE Journal*, 42(2), 301-318.
- [54] **Bennett, M. A., West, R. M., Luke, S. P., Jia, X., Williams, R. A.**, 1999: Measurement and Analysis of Flows in Gas-Liquid Column Reactor, *Chemical Engineering Science*, 54, 5003 – 5012.
- [55] **Murugaian, V., Schaberg, H. I., and Wang, M.**, 2005: Effect of sparger geometry on the mechanism of flow pattern transition in a bubble column. *Proceedings of 4th World Congress on Industrial Process Tomography*, Aizu, Japan.
- [56] **Olmos, E., Gentric, C., Poncin, S., Midoux, N.**, 2003: Description of flow regime transitions in bubble columns via laser Doppler anemometry signals processing. *Chemical Engineering Science*, 58(9), 1731-1742.
- [57] **Nedelchev, S., Kumar, S. B., Dudukovic, M. P.**, 2003: Flow Regime Identification in a Bubble Column based on both Kolmogorov Entropy and Quality of Mixedness Derived from CARPT Data, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 81, 367 – 374.
- [58] **Shaikh, A., Al-Dahhan, M.**, 2005: Characterization of the hydrodynamic flow regime in bubble columns via computed tomography. *Flow Measurement and Instrumentation*, 16(2-3), 91-98.
- [59] **Grover, G. S., Rode, C. V., Chaudhari, R. V.**, 1986: Effect of temperature on flow regimes and gas hold-up in a bubble column. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(3), 501-504.

- [60] **Bukur, D. B., Petrovic, D., Daly, J. G.,** 1987: Flow regime transitions in a bubble column with a paraffin wax as the liquid medium. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 26(6), 1087-92.
- [61] **Krishna, R., Wilkinson, P. M., Van Dierendonck, L. L.,** 1991: A model for gas holdup in bubble columns incorporating the influence of gas density on flow regime transitions. *Chemical Engineering Science*, 46(10), 2491-2496.
- [62] **Drahos, J., Zahradnik, J., Puncochar, M., Fialova, M., Bradka, F.,** 1991: Effect of operating conditions on the characteristics of pressure fluctuations in a bubble column. *Chemical Engineering and Processing*, 29(2), 107-115.
- [63] **Krishna, R., & Ellenberger, J.,** 1996: Gas hold-up in bubble column reactors operating in the churn-turbulent flow regime. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 42, 2627-2634.
- [64] **Zhang, J. P., Grace, J. R., Epstein, N., Lim, K. S.,** 1997: Flow regime identification in gas-liquid flow and three-phase fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 52(21/22), 3979-3992.
- [65] **Zahradnik, J., Fialova, M., Ruzicka, M., Drahos, J., Kastanek, F., Thomas, N. H.,** 1997: Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. *Chemical Engineering Science*, 52 (21/22), 3811-3826.
- [66] **Hyndman, C. L., Larachi, F., Guy, C.,** 1996: Understanding gas-phase hydrodynamics in bubble columns: a convective model based on kinetic theory. *Chemical Engineering Science*, 52(1), 63-77.
- [67] **Lin, T. J., Tsuchiya, K., Fan, L. S.,** 1999: On the measurements of regime transition in high-pressure bubble columns. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, (1999), 77(2), 370-374.
- [68] **Krishna, R., Ellenberger, J., Maretto, C.,** 1999: Flow regime transition in bubble columns. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26(4), 467-475.
- [69] **Jamialahmadi, M., Muller-Steinhagen, H., Sarrafi, A., Smith, J. M.,** 2000: Studies of gas holdup in bubble column reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 23(10), 919-921.

- [70] **Ruzicka, M. C., Drahos, J., Mena, P. C., Teixeira, J. A.**, 2003: Effect of viscosity on homogeneous-heterogeneous flow regime transition in bubble columns. *Chemical Engineering Journal*, 96(1-3), 15-22.
- [71] **Barghi, S., Prakash, A., Margaritis, A., Bergougnou, M.A.**, 2004: Flow regime identification in a slurry bubble column from gas holdup and pressure fluctuations analysis. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82, 865-869
- [72] **Wu, J. J., Wang, D., Li, L. H., Zhou, J. T.**, 2005: Characterization of flow regimes in bubble columns through CCF analysis of pressure fluctuations. *Chemical Engineering & Technology*, 28(10), 1109-1113.
- [73] **Vandu, C.**, 2005: Hydrodynamics and mass transfer in multiphase reactors. *Doktora Tezi*, University of Amsterdam, Amsterdam, Hollanda.
- [74] **Akhtar, A., Tade, M. O., Pareek, V.**, 2009: Hydrodynamic investigation of bubble column reactors:effect of column configuration. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5, 626-636
- [75] **Thorat, B.N., Shevade, A.V., Bhilegaonkar, K.N., Aglawe, R.H., Parasu Veera, U., Thakre, S.S., Pandit, A.B., Sawant, S.B., Joshi, J.B.**, 1998: Effect of sparger design and height to diameter ratio on fractional gas hold-up in bubble columns. *Trans IChemE*, 76 (A),823-834
- [76] **Kulkarni, A.V.**, 2010: Design of a pipe/ring type of sparger for a bubble column reactor. *Chemical Engineering & Technology*, 33, 1015-1022
- [77] **Kulkarni, A.V., Badgandi, S.V., Joshi, J.B.**, 2009: Design of ring and spider type spargers for bubble column reactor: Experimental measurements and CFD simulation of flow and weeping. *Chemical Engineering Research and Design*, 87, 1612-1630
- [78] **Lin, T.J., Juang, R.C., Chen, Y.C., Chen, C.C.**, 2001: Predictions of flow transitions in a bubble column by chaotic time series analysis of pressure fluctuation signals. *Chemical Engineering Science*, 56, 1057-1065

- [79] **Moshtari, B., Babakhani, E.G., Moghaddas, J.S.**, 2009: Experimental study of gas hold-up and bubble behavior in gas-liquid bubble column. *Petroleum&Coal*, 51, 27-32
- [80] **Sarrafi, A., Jamialahmadi, M., Hans, M.S., Smith, J.M.**, 1999: Gas holdup in homogeneous and heterogeneous gas-liquid bubble column reactor. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 77, 11-21

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Sinan ŞAL

Doğum Yeri ve Tarihi: Darendede ; 13/07/1985

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 17 Haziran 2009 mezunu; İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü 09 Şubat 2010 mezunu.

Yayın Listesi:

▪ **Şal, S.,** Ergene, L.T., 2010: Rotor oluk geometrisinin asenkron motor performansına etkisinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO®) 2010*, 02-05 Aralık, Bursa