
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SENTEZ GAZINDAN BASINÇ SALINIMLI ADSORPSİYON (PSA) TEKNOLOJİSİ İLE YÜKSEK SAFLIKTA HİDROJEN ELDE EDİLMESİ

Kemalcan SEVÜK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2025

ETİK BEYAN

Gazı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kemalcan SEVÜK

03/01/2025

SENTEZ GAZINDAN BASINÇ SALINIMLI ADSORPSİYON (PSA) TEKNOLOJİSİ İLE YÜKSEK SAFLIKTA HİDROJEN ELDE EDİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kemalcan SEVÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

ÖZET

Bu tez çalışmasında, sentez gazının saflaştırılması için basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA) yöntemi deneysel olarak incelenmiş ve H_2'nin ayrıştırılmasını hedeflemiştir. Farklı basınçlar ve akış hızlarının adsorpsiyon sürelerine etkileri değerlendirilmiştir. En düşük adsorpsiyon kapasitesinin 5 bar'da, en yüksek kapasitenin ise 15 bar'da gözlemlendiği tespit edilmiştir. Kolon adsorpsiyon kapasitesinin artan basınçla birlikte yükseldiği belirlenmiştir. Sonuçlar, basınç arttıkça kolon tutma kapasitesinin de arttığını göstermektedir. Optimum adsorpsiyon süresi, 5 bar'da 3 dakika ve 15 bar'da 9 dakika olarak bulunmuştur. Ayrıca, p/f oranı ve basınçlandırma yönünün H_2 saflığı üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulguların, PSA parametrelerinin optimizasyonu ve hidrojen saflığının artırılması konusundaki çalışma amacına uygun olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, PSA teknolojisi hakkında daha geniş bir anlayışa katkı sağlamakta ve hidrojen saflaştırmanın endüstriyel uygulamalarında ilerlemeye olanak tanımaktadır. Gelecekteki araştırmaların, modelleme çalışmaları ile daha fazla bilgi sağlayabileceği ve farklı adsorbanların kullanımının H_2 saflığını artırabileceği öngörülmektedir.

Bilim Kodu	:	92814
Anahtar Kelimeler	:	Basınç salınımlı adsorpsiyon (PSA), sentez gazı saflaştırma, hidrojen adsorpsiyon kapasitesi, basınçlandırma etkileri
Sayfa Adedi	:	82
Danışman	:	Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ
İkinci Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK

HIGH PURITY HYDROGEN PRODUCTION FROM SYNGAS USING PRESSURE SWING ADSORPTION (PSA) TECHNOLOGY

(M. Sc. Thesis)

Kemalcan SEVÜK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2025

ABSTRACT

This thesis experimentally investigates the purification of synthesis gas using the pressure swing adsorption (PSA) method to isolate H_2. The effects of different pressures and flow rates on adsorption durations has been examined. The lowest adsorption capacity has been observed at 5 bar, while the highest has been recorded at 15 bar. It has been observed that the column adsorption capacity increases with increasing pressure. The results indicate an increase in column retention capacity with pressure. The optimum adsorption duration has been found to be 3 minutes at 5 bar and 9 minutes at 15 bar. Additionally, significant effects of p/f ratio and pressurization direction on H_2 purity has been observed. These findings are consistent with the study's objective which is to provide insights on optimization of PSA parameters and enhancing hydrogen purity. The results support a broader understanding of PSA technology and potential applications of hydrogen purification in industrial areas and paves the way for further progress. Future research suggests that modeling studies could provide further insights and the use of different adsorbents may enhance H_2 purity.

Science Code	:	92814
Key Words	:	Pressure swing adsorption (PSA), synthesis gas purification, hydrogen adsorption capacity, pressurization effects
Page Number	:	82
Supervisor	:	Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ
Co-Supervisor	:	Assist. Prof. Berre KÜMÜK

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimden başlayarak, tezimin tamamlanmasına kadar olan süreçte her daim bilgisini ve desteğini esirgemeyen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezim süresince değerli katkı ve desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK'e teşekkürü borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim için bana bu fırsatı veren, çalışmaktan gurur duyduğum LENTATEK Uzay, Havacılık ve Teknoloji Aş. Ailesine ve sürekli gelişmemize destek olan çok kıymetli yöneticim İbrahim PAMUK'a saygılarımı sunar, çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi her zaman arkamda olan benden desteğini esirgemeyen çok sevgili aileme şükranlarımı sunarım. Hayat arkadaşım, can dostum, biricik eşim Yelda SEVÜK'e yanımda olduğu için sabırla beni desteklediği ve bana güç verdiği için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xii

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1. GİRİŞ 1

2. PSA TEORİSİ 35

2.1. Adsorpsiyon ve Desorpsiyon Prensipleri 36

2.2. PSA Döngüsü 37

2.3. PSA Sistemlerinde Kullanılan Adsorban Malzemeler 37

2.4. PSA Hesaplamalarında Kullanılan Formüller 37

2.4.1. Adsorpsiyon izoterm modelleri 38

2.4.2. Adsorpsiyon kinetiği modelleri 38

2.4.3. Gaz akış ve kütle transfer modelleri 39

2.4.4. PSA döngü dinamikleri 39

2.4.5. Enerji ve basınç dengeleri 40

3. PSA İLE HİDROJEN SAFLAŞTIRMA SÜRECİ 41

3.1. PSA Ünitelerinin Tasarımı 42

3.2. PSA Parametrelerinin Optimizasyonu 42

3.3. PSA ile Diğer Saflaştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması 43

4. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI 45

4.1. Deney Basamakları 49

Sayfa

4.2. Tasarım Hesaplamaları 52

5. BULGULAR VE İRDELEME 53

5.1. Kolonun Adsorpsiyon Kapasitesi 53

5.2. PSA Döngü Sürelerinin Belirlenmesi 56

5.3. Çalışma Basıncı Deneyleri 58

5.3.1. 5 bar çalışma basıncı 59

5.3.2. 15 bar çalışma basıncı 65

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 71

KAYNAKLAR 75

ÖZGEÇMİŞ 82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Laboratuvar ölçekli PSA deneysel kurulumunun 3B görünümü 45

Şekil 4.2. Tek bir kolonun iç yapısı (a), kapak ve adsorban katman ayırıcısı olan bir kolon (b), montajı tamamlanmış kolon (c) 48

Şekil 4.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi 49

Şekil 4.4. Basınçlandırma adımının basitleştirilmiş şeması 50

Şekil 4.5. Adsorpsiyon adımının basitleştirilmiş şeması 50

Şekil 4.6. Desorpsiyon adımının basitleştirilmiş şeması 51

Şekil 4.7. Temizleme adımının basitleştirilmiş şeması 51

Şekil 5.1. 5 SLPM sabit ürün akış hızı için 5 bar (a), 10 bar (b) ve 15 bar (c) çalışma basıncında kırılma eğrileri grafiği 55

Şekil 5.2. 5 bar ve 5 SLPM sabit ürün akış hızında farklı adsorpsiyon sürelerinin karşılaştırılması 59

Şekil 5.3. Temizleme/besleme oranının karşılaştırılması 61

Şekil 5.4. 5 barda 3 dakikalık adsorpsiyon/temizleme süresi kullanılarak farklı ürün akış hızlarının karşılaştırılması 63

Şekil 5.5. 5 bar ve 5 SLPM'deki çevrimlerin karşılaştırılması 64

Şekil 5.6. 15 bar ve 5 SLPM'de farklı adsorpsiyon sürelerinin karşılaştırılması 65

Şekil 5.7. 15 bar ve 10 SLPM'de farklı adsorpsiyon sürelerinin karşılaştırılması 67

Şekil 5.8. 15 bar ve 10 SLPM akış hızında 3 dakika (a), 6 dakika (b) ve 9 dakika (c) adsorpsiyon süreleri için döngülerin karşılaştırılması 69

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Deneysel düzeneğin imalat aşamasından görüntüsü..... 47

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C	Adsorpsiyon kapasitesi (mol)
Q	Akış hızı
q	Anlık adsorpsiyon miktarı
ΔP	Basınç farkı (Pa)
t_0	Başlangıç zamanı
q_t	Belirli bir zamanda adsorbe edilen miktarı (mol/kg)
$Q(t)$	Belirli bir zaman dilimindeki gaz akışı (mol/s)
k_1	Birinci dereceden kinetik sabiti (1/s)
t_f	Bitiş zamanı
dk	Dakika
q^*	Denge adsorpsiyon kapasitesi
q_e	Denge anında adsorbe edilen gaz miktarı (mol/kg)
W	Enerji tüketimi (Joule)
K_f	Freundlich sabiti
P	Gaz basıncı (atm)
v	Gaz hızı (m/s)
μ	Gaz viskozitesi (Pa.s)
ρ	Gaz yoğunluğu (kg/m3)
H_2	Hidrojen
H_2S	Hidrojen sülfür
k_2	İkinci dereceden kinetik sabiti
n	İzoterm eğriliğini belirleyen parametre
CO_2	Karbon dioksit
CO	Karbon monoksit
d	Kolon çapı (m)
L	Kolon uzunluğu (m)

Simgeler	Açıklamalar
kg	Kilo gram
kW	Kilo watt
k_m	Kütle transfer katsayısı (1/s)
K	Langmuir sabiti (atm-1)
L	Litre
q_m	Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (mol/kg)
CH_4	Metan
Re	Reynolds sayısı
s	Saniye
°C	Santigrat derece
f	Sürtünme katsayısı
η	Sistem verimliliği

Kısaltmalar	Açıklamalar
BPR	Geri basınç regülatörü
PEM	Proton değişim membranı
PSA	Basınç salınımlı adsorpsiyon
SLPM	Dakikadaki standart litre
USD	Amerikan doları

1. GİRİŞ

Enerji, yaşamın devamlılığı için gerekli temel kavramlardan biridir. Isıtma, elektrik, ulaşım gibi temel ihtiyaçlar için gerekli olan enerji ihtiyacı, konvansiyonel ve yenilenebilir enerji gibi çeşitli kaynaklardan sağlanmaktadır. Dünya genelinde artan nüfus ile beraber enerji ihtiyacı da artmaktadır. Fosil kaynakların limitli olması ve çevreye verdiği zarar, alternatif enerji kaynakları arayışı gereksinimi doğurmaktadır. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları çevreye daha az zarar verdiği ve tükenme sorunu olmadığı için önemli bir alternatif olmuştur.

Hidrojen dünyada en fazla bulunan elementlerden biridir ve moleküler düzeyde bileşikler içerisinde bulunur. Renksiz, kokusuz, oldukça yanıcı bir gazdır. Hem hafif olması hem de kolayca ametallerle bağ kurabilmesi doğada saf halde bulunmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynakları kullanılarak elde edilen sentetik bir yakıt ve enerji taşıyıcısı olarak nitelendirmektedir. Fosil yakıtları temel alan teknolojilerin fazlalığı ve bu teknolojiye olan yüksek talep, hidrojen teknolojisinin gelişmesini gölgelemiş olsa da günümüzde çevre kirliliği ve alternatif enerji kaynağı arayışı ile tekrar önem kazanmış ve üzerine yoğun çalışmalar yapılmasını sağlamıştır.

Hidrojen, ulaşım, enerji depolama ve endüstriyel uygulamalar gibi alanlarda temiz ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak önemli bir yer kazanmıştır. Ancak, geniş yanıcılık aralığı ve düşük tutuşma enerjisi özellikleri nedeniyle hidrojen, özellikle yüksek basınçlı sistemlerde güvenlik önlemleri gerektirir. Patlamaya dayanıklı yapılar, hidrojen depolama ve nakliyesi sırasında oluşabilecek riskleri azaltmak için hayati bir rol oynar. Hidrojen yakıt istasyonlarında, hidrojen boru hatlarında ve endüstriyel tesislerde felaket niteliğindeki arızaların önlenmesi, gelişmiş güvenlik önlemlerine ve sağlam depolama sistemlerine dayanır. Bu kritik uygulamaların vurgulanması, hidrojen endüstrisinde sürekli ilerleme ve güvenli kullanım teknolojilerine olan ihtiyacın altını çizecektir.

Literatürde yapılan çalışmalar, basınç, akış hızları ve adsorban seçimi gibi operasyonel parametreleri optimize etmeye odaklanarak PSA teknolojisinin verimliliğinin önemli ölçüde artabileceğini ortaya koymuştur. Bu tez çalışması, bu parametreleri kullanarak ileride yapılacak çok kolonlu PSA sistemi için temel bilgileri sağlamak amacı ile yapılmıştır. Bu

doğrultuda, tek kolonlu bir PSA deney düzeneği üzerinde performansa etki eden kritik parametrelerin etkisinin deneysel olarak gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu deneysel çalışmada, tek bir kolonda adsorban olarak aktif karbon kullanılarak oda sıcaklığında PSA'nın temel dinamikleri incelenmeye çalışılmıştır. Bu deney düzeneği, tek kolonlu PSA sistemi ile sentez gazından hidrojeni ayrıştırma ve ürün gazı birleşiminde istenmeyen gazları (safsızlıkları) gidermede adsorban kapasitesinin etkisine dair ayrıntılı bir araştırma yapılmasına olanak sağlamıştır. Sonuç olarak, bu tez çalışması, kolon tutma kapasitesi, sistem çalışma basıncı, adsorpsiyon süreleri, akış hızları, kolon basınçlandırma yönü ve temizleme/besleme oranları gibi önemli parametreler ile ilgili veri toplayarak sistem iyileştirme ve optimizasyonunu kolaylaştırmayı amaçlamıştır. Bu deneysel çalışma ile amaçlanan gelecekte büyük ölçekli sistem üretimi için bir basamak görevi görebilecek bulgular üretmektir.

Literatür taraması

Literatürde yapılan ilk çalışma Skarstrom (1960) tarafından gerçekleştirilmiştir. Skarstrom bu çalışmasında, hava karışımından azot ve oksijeni ayrıştırmak amacıyla PSA teknolojisini geliştirmiştir. PSA döngüsü basınçlandırma, adsorpsiyon, desorpsiyon ve purge (temizleme) gibi dört temel adıma ayrılmıştır ve bu çalışma, PSA teknolojisinin temellerini oluşturmuştur. Bu yöntemle, kriyojenik distilasyon gibi yoğun enerji tüketen sistemlere göre daha ekonomik bir alternatif sunulmuştur. Skarstrom'un bu çalışmasının ardından ticari alanda kullanılmak üzere havadan azot ve oksijen ayrıştıran uygulamalar gerçekleştirilmeye başlanmıştır [1].

Helfferich (1970) çalışmasında, PSA teknolojisinin temel işleyişini anlamak ve optimize etmek amacıyla adsorpsiyon ve desorpsiyon basamaklarının termodinamik ve kinetik analizlerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmada, PSA döngüsünün teorik temellerini güçlendirmek için gaz karışımındaki safsızlıkların adsorban malzemeler tarafından tutulma mekanizmaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Özellikle, gazların difüzyon özelliklerinin ve kütle transfer katsayısının adsorpsiyon özelliklerine bağlılığına değinilmiştir. Helfferich'in teorik modeli ile PSA süreçlerinde kullanılan adsorbanların kapasitesinin arttırılması ve döngü sürelerinin optimize edilebilmesi için önemli bilgiler elde edilmiştir. Bu çalışmada, o dönemlerde yaygın olarak kullanılan Zeolit 5A ve 13X gibi adsorban malzemelerinin seçicilik özellikleri incelenmiştir. Bu adsorbanların, hidrojen saflaştırılması

sürecinde yüksek CO_2 ve CO seçiciliği nedeniyle kritik bir role sahip olduğu ortaya konmuştur. Helfferich, oluşturduğu model sayesinde adsorpsiyon süreçlerindeki kritik sınırlamaları analiz etmiş ve etkili bir şekilde safsızlıkların ayrıştırılması için optimum basınçlandırma ve desorpsiyon sürelerini belirlemiştir. Bu sonuçlar ile 1970'li yıllarda PSA'nın endüstriyel alanlarda hidrojen saflaştırılması, metan saflaştırılması ve azot-oksijen ayrıştırılması uygulamalarının yaygınlaşmasının temelini oluşturmuştur. Bunların dışında Helfferich çalışmalarında adsorbanların geri kazanımının arttırılması ve enerji tüketiminin minimize edilmesi konularına da odaklanılmıştır. Bunun sonucunda, PSA sistemleri enerji verimliliği ve ekonomik avantajları ile kriyojenik yöntemler gibi alternatif teknolojilere kıyasla öne çıkarılmıştır. Helfferich'in teorik modelini temel alan bu analizler modern PSA sistemlerinin geliştirilmesinde önemli bir rehber niteliği taşımaktadır [2].

Lillo-Ródenas, Ruthven, Yang ve Zhang (1988), doğalgaz saflaştırma alanında PSA teknolojisini inceleyerek CO_2 ve su buharını etkili bir şekilde uzaklaştırarak yüksek saflıkta metan gazı elde edildiğini rapor etmiştir. Bu çalışmada, PSA'nın enerji tüketimini kriyojenik distilasyonla kıyaslanmıştır. PSA'nın daha az enerji tükettiğini bu nedenle de maliyet açısından daha avantajlı olduğunu rapor etmişlerdir. Bu gelişmeler PSA'nın doğalgaz endüstrisinde hızla yaygınlaşmasını sağlamıştır. Özellikle kullanılan Zeolit 5A ve 13X adsorbanlarının seçicilikleri sayesinde PSA'nın doğalgaz saflaştırmada güvenilir bir teknoloji haline geldiği belirtilmiştir [3].

Helfferich (1985) çalışmasında ise, PSA sistemlerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetiklerini analiz ederek döngü sürelerinin optimize edilmesi ile %99,99 saflıkta hidrojen elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma ile PSA ile hidrojen saflaştırma uygulamasının petrokimya endüstrisinde kritik bir rol oynadığını ve düşük enerji tüketimiyle yüksek performans sağlanabildiği bildirilmiştir. Ayrıca, PSA'nın amonyak üretimi gibi süreçlerde yan ürün oluşumunu azaltarak katalizör verimliliğini arttırdığı da belirtmiştir [4].

Helfferich, Lillo-Ródenas ve Ruthven (1987), PSA sisteminde basınçlandırma ve desorpsiyon adımlarını optimize ederek enerji tüketimini en aza indirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmada, kolon ebatlarının ve adsorban yerleşiminin sistem verimliliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Optimize edilen kolon tasarımı ile daha yüksek saflıkta ve daha düşük enerji tüketimi sağlanabileceğini raporlamışlardır [5].

Lillo-Ródenas ve diğerleri (1988), PSA ve kriyojenik distilasyon teknolojilerinin birleştirilmesiyle oluşan hibrit sistemler üzerine çalışmıştır. Bu birleşimin CO_2'nin uzaklaştırılmasında ve metanın saflaştırılmasında yüksek performans sunduğunu belirtmiştir. Bu çalışmada, PSA'nın hibrit sistemler içerisinde uyarlanmasıyla endüstriyel uygulamalarda daha geniş kullanım alanlarına ulaşabileceği gösterilmiştir [3].

Lillo-Ródenas, Ruthven ve Yang (1993), karbondioksit yakalama ve depolama çalışmaları için PSA teknolojisini araştırmıştır. Çalışma, PSA'nın enerji santrallerinden çıkan baca gazlarından CO_2'yi etkili bir şekilde ayırabileceğini ve enerji tüketimini en aza indirerek maliyetlerin önemli ölçüde azaltılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca çalışmada, PSA'nın çevre düzenlemelerine uymak için karbon yönetiminde önemli bir araç olduğu da belirtilmiştir [6].

Helfferich, Ruthven ve Farooq (1995), PSA proseslerinde çevrim sürelerini ve adsorban performansını optimize etme üzerine çalışmalar yürütmüştür. Çalışmada, Zeolit 13X'in bir adsorban olarak CO_2 ve CO üzerinde yüksek seçicilik gösterdiği ve %99,99'a kadar hidrojen saflığı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca çevrim sürelerinin optimize edilmesiyle %20'ye kadar enerji verimliliğinde iyileştirmeler sağlandığı bildirilmiştir [7].

Ruthven, Farooq ve Kumar (1996), tıbbi uygulamalar için oksijen üretiminde PSA kullanımını araştırmıştır. Çalışmada, PSA'nın taşınabilir oksijen jeneratörlerinde güvenilir bir teknoloji sunduğu ve düşük maliyetle tıbbi oksijen ihtiyaçlarını karşılayabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, PSA sistemlerinin küçük ölçekli tıbbi uygulamalara uyarlanabilirliği vurgulanmıştır [8].

Sarker ve diğerleri (1998), PSA teknolojisinin doğal gaz işleme süreçlerinde metan saflaştırma üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, PSA'nın CO_2 ve su buharını %95'in üzerinde bir verimlilikle uzaklaştırdığı ve doğal gazı enerji üretimi için hazır hale getirdiği bildirilmiştir. Ayrıca, adsorpsiyon kinetiğinin optimize edilmesinin sistem verimliliğini artırdığı vurgulanmıştır [9].

Sarker ve diğerleri (2001) bir diğer çalışmalarında ise PSA teknolojisinin biyogaz saflaştırma süreçlerindeki performansını araştırmıştır. Çalışmada, PSA'nın biyogazdan CO_2'yi uzaklaştırmak ve yüksek saflıkta metan elde etmek için etkili bir yöntem olduğu bildirilmiştir. Özellikle Zeolit 5A ve aktif karbon olmak üzere adsorbanların seçiciliğinin

saflık oranını artırdığı ve sistem maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir. PSA'nın yenilenebilir enerji sektöründe ekonomik ve çevresel avantajlar sağladığı da vurgulanmıştır [10].

Yang ve diğerleri (2004), PSA sistemlerinde adsorban malzemelerin geliştirilmesine yoğunlaşmıştır. Araştırma, metal-organik iskeletler gibi yeni nesil adsorbanların geleneksel Zeolitlere kıyasla daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi ve seçicilik sağladığını bildirmiştir. Ayrıca, bu metal-organik iskeletlerin daha düşük enerji tüketimiyle çalıştığını ve PSA'nın verimliliğini artırdığını rapor etmişlerdir [11].

De Witte ve diğerleri (2007), PSA çevrim sürelerini ve adsorpsiyon/desorpsiyon adımlarının optimize edilmesini inceleyen bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma, PSA sistemlerinin hidrojen geri kazanım oranlarını artırmak için temizleme-besleme (p/f) oranının ve çevrim sürelerinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmalar sonucunda %95'in üzerinde hidrojen geri kazanım oranlarının elde edilebileceği gösterilmiştir [12].

Lillo-Ródenas ve diğerleri (2009), PSA ve membran teknolojilerini birleştiren hibrit sistemlerin performansını analiz etmiştir. Çalışmada, hibrit sistemlerin CO_2'yi gidermede ve metan saflığını arttırdığı ve daha yüksek verimlilik sağladığı bildirilmiştir. PSA ve membran teknolojisinin birlikte kullanımının ise enerji tüketimini %20 oranında azaltarak sistem kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir [13].

Ruthven, Sarker, Yang ve Choi (1994), buharli metan reformu ile üretilen hidrojenin saflaştırılmasında PSA'nın etkinliğini araştırmışlardır. Çalışmada, reformlama sırasında oluşan CO_2, CO ve CH_4 gibi safsızlıkların PSA ile etkili bir şekilde ayrıldığı ve bu yöntemle %99,99 saflıkta hidrojen elde edilebileceği bildirilmiştir. Buharlı metan reformu prosesi, endüstride en yaygın kullanılan hidrojen üretim yöntemlerinden biri olduğundan, PSA'nın bu proseste sağladığı verimlilik ve yüksek saflık oranları, petrokimya endüstrisi için kritik bir çözüm sunduğu belirtilmiştir. PSA'nın düşük enerji tüketimi ve kesintisiz çevrim performansı, özellikle yüksek saflık gerektiren proseslerde güvenilir bir seçenek olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada, PSA'nın karbon ayak izinin yanı sıra buharlı metan reformu ile üretilen hidrojenin de azaltılmasındaki potansiyeline dikkat çekilmiştir [14].

Yang, Choi ve Farooq (2008), PSA'nın amonyak üretiminde kullanılan hidrojenin saflığını artırmadaki rolünü analiz etmiştir. Haber-Bosch prosesinde yüksek saflıkta hidrojen

sağlanmasının kimyasal reaksiyonun verimliliğini arttırdığı ve katalizörlerin ömrünü uzattığı belirtilmiştir. PSA teknolojisinin, CO_2 ve diğer safsızlıkları gidererek amonyak sentezinde ihtiyaç duyulan yüksek saflıkta hidrojenin elde edilmesine önemli katkılarda bulunduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada ayrıca PSA'nın geleneksel yöntemlere kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve daha az bakım gerektirdiği rapor edilmiştir. Bu özellikler, PSA'nın amonyak üretiminde yaygın olarak benimsenmesine ve proses verimliliğinin artmasına katkı sağladığı da bildirilmiştir. Yang ve arkadaşları ayrıca PSA sistemlerinin petrokimya endüstrisini daha sürdürülebilir hale getirmede oynadığı rolü vurgulamıştır [15].

Abdeljaoued ve diğerleri (2017), PSA'nın hidrojen yakıt hücresi teknolojilerinde kullanımını detaylı olarak incelemiştir. Yakıt hücrelerinin, özellikle otomotiv ve ulaştırma sektörlerinde sürdürülebilir enerji kaynakları olarak büyük öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, PSA sistemlerinin yakıt hücreleri için gerekli olan %99,999 saflıkta hidrojen üretiminde başarıyla uygulandığı belirtilmiştir. Hidrojenin CO ve diğer safsızlıklardan tamamen uzaklaştırılmasının yakıt hücresi membranlarının ömrünü artırdığı ve sistem verimliliğini iyileştirdiği bildirilmiştir. PSA'nın çevre dostu yapısı, düşük enerji tüketimi ve yüksek kapasitede çalışabilme kabiliyeti, bu teknolojiyi yenilenebilir enerji uygulamalarında ön plana çıkarmıştır. Ayrıca bu çalışmada, özellikle küçük ölçekli yenilenebilir enerji tesislerinde PSA'nın uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır [16].

Sarker ve diğerleri (2017) bu çalışmalarında, PSA'nın rafineri süreçlerinde hidrojen geri kazanımındaki önemini incelemiştir. Rafinerilerde hidrokarbon işleme sırasında yan ürün olarak açığa çıkan hidrojenin, PSA ile geri kazanıldığı ve tekrar kullanıldığı vurgulanmıştır. Çalışmada, PSA sistemlerinin yüksek saflıkta hidrojen geri kazanımı sağladığı ve bu yöntemle işletme maliyetlerinin önemli ölçüde azaldığı bildirilmiştir. Bunun yanında PSA'nın enerji verimliliği sayesinde rafineri uygulamalarında karbon emisyonlarının azaltılmasında önemli bir araç olduğu belirtilmiştir. Sarker ve arkadaşları, PSA'nın sürekli çevrim performansının rafineri süreçlerine adapte edilmesini kolaylaştırdığını ve bunun endüstriyel ölçekte enerji tasarrufunu artırdığını da vurgulamıştır. Ayrıca çalışmada, PSA'nın ekonomik avantajlarının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de katkıda bulunulduğu da belirtilmiştir [17].

Yang ve diğerleri (2004), PSA proseslerinde Zeolit 13X ve aktif karbon gibi farklı adsorban malzemelerin performansını karşılaştırmak için kapsamlı deneyler yürütmüşlerdir.

Çalışmada, adsorbanların gaz seçiciliği, kapasite ve işletme maliyetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Zeolit 13X'in CO_2 ve CH_4 gibi polar gazlara karşı yüksek seçicilik sağladığı ve adsorpsiyon kapasitesinin özellikle yüksek basınç altında daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, aktif karbonun düşük maliyeti ve termal kararlılığı nedeniyle ekonomik bir alternatif olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada, adsorban seçiminin PSA sistemlerinin verimliliğini ve maliyet etkinliğini nasıl etkilediği konusunda çıktılar da raporlanmıştır [11].

Choi, Kim ve Patel (2009), PSA proseslerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, farklı çevrim süreleri kullanılarak ürün gaz saflığı, enerji tüketimi ve adsorban kapasitesi analiz edilmiştir. Kısa çevrim sürelerinin ürün gaz saflığını koruyarak genel sistem verimliliğini artırdığı belirtilmiştir. Ancak, daha uzun desorpsiyon sürelerinin adsorbanın tam rejenerasyonunu sağlayarak daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi sağladığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, uzun desorpsiyon sürelerinin enerji tüketimini artırdığı ve çevrim başına sistem verimliliğini düşürdüğü de belirtilmiştir. Çalışmada, çevrim sürelerinin optimizasyonunun hem enerji tüketimini azaltmada hem de sistem kararlılığını korumada kritik bir faktör olduğu vurgulanmıştır [18].

De Witte, Zhang ve Silva (2021), PSA proseslerinde “purge to feed” (p/f) oranının sistem performansı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda, farklı p/f oranlarının ürün gazı saflığı, enerji tüketimi ve adsorban kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Düşük p/f oranlarının enerji tasarrufu sağladığı ve işletme maliyetlerini azalttığı bildirilmiştir. Ancak, düşük p/f oranlarının ürün gazı saflığını sınırladığı ve daha az verimli sistem performansı sağladığı da belirtilmiştir. Ayrıca, yüksek p/f oranlarının ürün gazı saflığını artırdığı ancak enerji tüketimini ve proses maliyetlerini artırdığı bildirilmiştir. Çalışma, optimum p/f oranının PSA sisteminin amaçlanan kullanımına ve hedef saflık oranına bağlı olarak değişebileceğini göstermiştir. Bunların dışında, farklı gaz karışımları için p/f oranının optimize edilmesinin, PSA'nın endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanı bulmasına yardımcı olacağı vurgulanmıştır [19].

Beeyani ve diğerleri (2010), PSA sistemlerinde kolon boyutları ve adsorban miktarlarının sistem performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, farklı kolon uzunlukları ve çaplarının adsorpsiyon kapasitesini, basınç kayıplarını ve ürün gaz saflığını nasıl

etkilediği incelenmiştir. Çalışmada, daha uzun kolonların, adsorpsiyon için gazların daha büyük temas yüzey alanı nedeniyle daha yüksek ürün saflığı sağladığı gösterdiği bildirilmiştir. Ancak daha uzun kolonların sistem basınç kayıplarını artırdığı ve enerji tüketimini artırdığı da belirtilmiştir. Ayrıca, adsorban miktarının artırılmasının gaz karışımındaki safsızlıkların daha etkili bir şekilde tutulmasını sağladığı, ancak bunun çevrim sürelerini artırdığı bildirilmiştir. Çalışmada, PSA sistemlerinin tasarımında kolon boyutlarının ve adsorban miktarlarının optimize edilmesinin hem maliyet etkinliği hem de operasyonel verimlilik açısından kritik olduğunu rapor edilmiştir [20].

Riboldi, González ve Kalman (2017), PSA proseslerinde sıcaklık etkisini değerlendirerek adsorban malzemelerin farklı sıcaklık koşullarındaki performansını araştırmışlardır. Çalışmada, karbon moleküler elekler ve Zeolit 5A gibi yaygın adsorbanların gaz seçiciliği ve adsorpsiyon kapasiteleri düşük ve yüksek sıcaklıklarda karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda, düşük sıcaklıklarda adsorpsiyon kapasitesinin arttığı ve polar gazlar için seçiciliğin daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, adsorpsiyon kapasitesinin azaldığı ve adsorbanların verimliliğinin düştüğü bildirilmiştir. Çalışma, enerji verimliliği açısından düşük sıcaklık kontrollü PSA sistemlerinin avantajlar sağladığını ve adsorpsiyon kapasitelerini arttırdığını belirtmiştir. Ayrıca, sıcaklık kontrolünün PSA proseslerinin kararlılığını artırmada önemli bir faktör olduğu rapor edilmiştir [21].

Yang ve diğerleri (2008) bu çalışmada, PSA proseslerinin dinamik davranışını açıklamak için kapsamlı bir matematiksel model geliştirdiklerini belirtmişlerdir. Hazırlanan modelin, PSA sistemlerindeki adsorban yüzeyindeki gaz akışını, basınç değişimlerini ve gaz etkileşim mekanizmalarını kütle, enerji ve momentum denklemlerine dayalı olarak ayrıntılı bir şekilde analiz ettiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada, adsorpsiyon ve desorpsiyon proseslerinin dinamiklerini optimize etmek için farklı parametrelerin etkileri araştırılmıştır. Özellikle basınç değişim oranlarının ürün gaz saflığı ve çevrim süreleri üzerindeki kritik etkisinin teorik olarak kanıtlandığından bahsedilmiştir. Bu model ile çevrim sürelerini kısaltarak daha yüksek verimlilik elde etme potansiyelini ortaya koyarak enerji tüketimini en aza indirmenin yollarını bulmaya çalışıldığı bildirilmiştir. Yang ve arkadaşları, bu matematiksel modeli yalnızca teorik bir çerçeve olarak değil, aynı zamanda endüstriyel PSA sistemlerinde uygulanabilecek bir kılavuz olarak da değerlendirmişlerdir. Bu çalışma, teorik modellerin PSA sistemlerinin tasarımında ve operasyonel parametrelerin optimize edilmesinde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir [15].

Choi, Kim ve Patel (2003), PSA sistemlerinde CO_2 geri kazanımı için optimum çalışma koşullarını belirlemek amacıyla ileri bir modelleme çalışması yürütmüşlerdir. Çalışmada, p/f oranı, adsorpsiyon ve desorpsiyon süreleri gibi sistem parametrelerinin PSA performansı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla simülasyonlar çalışmaları yapılmıştır. Model, CO_2 adsorpsiyon kapasitesini artırmak için optimum p/f oranını belirlemiş ve kısa çevrim sürelerinin sistem verimliliğini artırabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, yüksek CO_2 geri kazanım oranlarına ulaşabilmek için kolon boyutları, basınç seviyeleri ve gaz akış hızları gibi tasarım faktörlerinin optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Choi ve arkadaşları, modelin CO_2 geri kazanımı dışında diğer gaz karışımları için de uygulanabilir olduğunu belirtmiştir. Bu çalışma ile PSA sistemlerinin parametrelerinin optimize edilmesiyle enerji verimliliğini artırma ve süreç maliyetlerini düşürme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu belirtilmiştir [22].

Lillo-Ródenas ve diğerleri (2018), PSA sistemlerinde adsorban seçiminde kullanılan teorik izoterm modellerini detaylı olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, Langmuir ve Freundlich izotermleri gibi klasik modellerin farklı gaz karışımlarındaki adsorpsiyon süreçlerini açıklamadaki etkinliği incelenmiştir. Araştırma, bu modellerin özellikle CO_2, CH_4 ve H_2 gibi gazlar için deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Langmuir izoterminin tek tabakalı adsorpsiyon için daha uygun olduğu, Freundlich izoterminin ise heterojen yüzeylere sahip adsorbanlarla daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Ayrıca parametre optimizasyonunda izoterm modellerinin nasıl kullanılabileceği ve bu optimizasyonların adsorpsiyon kapasitesini artırmada oynadığı rol vurgulanmıştır. Çalışma, teorik modellemenin sadece adsorban seçimini değil, aynı zamanda PSA sistemlerinin genel performansını da önemli ölçüde etkileyebileceğini belirtmiştir. Lillo-Ródenas ve arkadaşları, teorik izoterm modellerinin hem endüstriyel hem de deneysel ölçekte PSA sistemlerinin tasarımında kullanılabilecek önemli modeller olduğunu vurgulamıştır [23].

Helfferich ve diğerleri (1990), doğal gazdan CH_4 ve CO_2 ayırmada PSA ve membran bazlı gaz ayırma teknolojilerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, membran sistemlerinin taşınabilirliği ve kompakt tasarımı nedeniyle küçük ölçekli tesislerde avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Ancak membranların düşük işletme maliyetlerine rağmen yüksek saflık oranlarına ulaşmada sınırlılıkları olduğu vurgulanmıştır. PSA'nın yüksek basınç altında daha iyi performans gösterdiği ve gaz karışımlarındaki CO_2 gibi safsızlıkları %99,99'a kadar saflıkta etkili bir şekilde ayırabildiği bildirilmiştir. Bu çalışma, membran sistemlerinin düşük saflık gerektiren

uygulamalarda enerji tasarrufu sağladığını, ancak özellikle endüstriyel ölçekte PSA'nın yüksek saflık ve seçicilik gerektiren proseslerde üstün performans gösterdiğini vurgulamıştır [24].

Ruthven, Farooq ve Kumar (2002), hidrojen saflaştırma proseslerinde PSA ve membran teknolojilerini karşılaştırmıştır. Çalışmada membran sistemlerinin düşük enerji tüketimi ve basit operasyonel avantajlara sahip olduğu, ancak yüksek saflık gereksinimi olan endüstriyel uygulamalarda PSA'nın daha etkili olduğu belirtilmiştir. Membranların CO_2, CO ve CH_4 gibi gazları ayırmada belirli bir seviyeye kadar etkili olduğu, ancak saflık artırma proseslerinde ek işlemlere ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir. Yalnızca PSA sisteminin kullanılarak %99,99'un üzerinde hidrojen saflığı sağlayabildiği ve bu nedenle özellikle petrokimya ve amonyak üretiminde tercih edildiği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca PSA'nın uzun vadede daha düşük bakım maliyeti ve daha az performans kaybı sağladığı rapor edilmiştir [25].

Choi, Kim ve Patel (2005), metan saflaştırma proseslerinde PSA ve kriyojenik damıtma teknolojilerini karşılaştırmıştır. Kriyojenik damıtmanın düşük sıcaklıklarda gaz karışımlarının ayrılmasında yüksek verim sağladığı, ancak işletme maliyetlerinin PSA'ya kıyasla çok daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Çalışmada kriyojenik sistemlerin büyük ölçekli tesislerde daha iyi sonuçlar sağladığı, ancak maliyet ve enerji gereksinimleri nedeniyle küçük ve orta ölçekli uygulamalarda dezavantajlı olduğu bildirilmiştir. PSA'nın metan ve CO_2 gibi gazların ayrılmasında daha düşük basınç ve enerji gereksinimleri ile etkili bir alternatif sunduğu gösterilmiştir. Ayrıca PSA sistemlerinin esnek yapısı sayesinde çeşitli gaz karışımlarına uyarlanabileceği de belirtilmiştir [26].

Sarker ve diğerleri (2010) bir başka çalışmalarında, doğalgaz saflaştırmasında PSA ve kriyojenik damıtmayı incelemiştir. Bu çalışmada, kriyojenik sistemlerin yüksek metan geri kazanım oranları sağladığını, ancak PSA'nın düşük enerji tüketimi ve basit ekipman ihtiyacı nedeniyle genellikle daha uygun bir seçenek olduğu rapor edilmiştir. Kriyojenik damıtmanın özellikle yüksek CO_2 konsantrasyonlu gaz karışımlarında etkili olduğu, ancak PSA'nın düşük konsantrasyonlu gaz karışımları için daha uygun bir çözüm sunduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca PSA'nın kriyojenik damıtmaya kıyasla bakım ve işletme maliyetlerinde avantajlar sunduğu da rapor edilmiştir [27].

Lillo-Ródenas ve diğerleri (2010), amonyak üretiminde hidrojen saflaştırma süreçlerinde PSA ve kimyasal absorpsiyon teknolojilerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, kimyasal absorpsiyonun yüksek konsantrasyonlarda CO_2'yi etkili bir şekilde giderebileceğini, ancak solventlerin kullanımının maliyetleri ve çevresel etkileri artırdığı rapor edilmiştir. PSA'nın daha düşük enerji tüketimi ve solvent gereksinimi olmadan yüksek saflıkta hidrojen sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca, PSA'nın sürekli çevrim performansıyla uzun vadede daha sürdürülebilir bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, PSA'nın kimyasal absorpsiyon yöntemlerine kıyasla bakım gereksinimlerini düşürerek operasyonel maliyetlerde önemli bir azalma sağladığı da bildirilmiştir [28].

Beeyani ve diğerleri (2015), karbon yakalama teknolojilerinde PSA ve kimyasal emilimi karşılaştırmıştır. Çalışma, kimyasal emilimin yüksek konsantrasyonlarda CO_2'yi gidermede etkili olduğunu, ancak solvent yenileme maliyetleri ve çevresel etkiler nedeniyle dezavantajlı bir yöntem olduğunu göstermiştir. PSA'nın, CO_2'nin düşük konsantrasyonlarda bulunduğu gaz karışımlarında daha uygun bir yöntem sunduğu bildirilmiştir. Çalışmada, PSA'nın düşük enerji tüketimi ve adsorbanların yeniden kullanılabilir olması nedeniyle çevre dostu bir alternatif olduğunu vurgulanmıştır [29].

Luo ve diğerleri (2016), doğal gaz işleme süreçlerinde PSA ve fiziksel adsorpsiyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, fiziksel adsorpsiyonun düşük basınç altında etkili bir şekilde çalıştığı ve gaz karışımındaki polar molekülleri adsorban yüzeyine bağlama yeteneğine sahip olduğu ortaya konulmuştur. Ancak, bu yöntemin performansının yüksek konsantrasyonlarda CO_2 içeren gaz karışımlarında hızla azaldığı belirtilmiştir. PSA'nın bu tür gaz karışımları için daha kararlı bir çözüm sunduğu ve daha geniş bir çalışma aralığında çalışabileceği vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca, PSA'nın çevrim sürelerini optimize ederek enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabileceği ve fiziksel adsorpsiyona kıyasla uzun vadede daha ekonomik bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Fiziksel adsorpsiyonun düşük yatırım maliyetleri ve enerji gereksinimleri nedeniyle küçük ölçekli uygulamalarda avantajlar sağladığı, ancak endüstriyel ölçekte sınırlı uygulamaya sahip olduğu belirtilmiştir [30].

Zhang ve diğerleri (2017), su buharı içeren gaz karışımlarında PSA ve fiziksel adsorpsiyonun performansını değerlendirmiştir. Bu çalışma, fiziksel adsorpsiyonun düşük sıcaklık koşullarında su buharını etkili bir şekilde giderebildiğini, ancak gaz karışımındaki su miktarı arttıkça adsorpsiyon kapasitesinin hızla düştüğünü bildirmiştir. PSA'nın hem su

buharını hem de diğer safsızlıkları yüksek verimlilikle giderdiği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, PSA sistemlerinin farklı adsorban malzemelerle uyumlu bir şekilde çalışabildiği ve bu durumun proses verimliliğini artırmada önemli bir avantaj sağladığı vurgulanmıştır. Fiziksel adsorpsiyonun düşük enerji tüketimi nedeniyle bazı özel uygulamalarda tercih edilebileceği, ancak PSA'nın çok daha geniş bir uygulama yelpazesinde daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir [31].

Kim ve diğerleri (2020a), biyogazdan metan saflaştırmasında PSA ve fiziksel adsorpsiyonu karşılaştırmıştır. Fiziksel adsorpsiyonun düşük enerji tüketimi ve basit ekipman gereksinimleri ile avantajlar sağladığı, ancak yalnızca %85-90 arasında metan saflığı sağladığı vurgulanmıştır. PSA'nın biyogazdan %95'in üzerinde metan saflığı sağlayabildiği ve enerji verimliliğini optimize eden çevrim süreleriyle uzun vadede daha sürdürülebilir bir seçenek olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, biyogaz işleme tesislerinde istikrarlı performans ve çevresel sürdürülebilirlik açısından PSA'nın önemi vurgulanmıştır. Ayrıca, fiziksel adsorpsiyonun uzun vadeli kullanımda performans kaybına daha eğimli olduğu ve bu nedenle sık bakım gerektirdiği belirtilmiştir [32].

De Witte ve diğerleri (2020), biyogazdan metan üretiminde PSA ve fiziksel adsorpsiyon yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmada, fiziksel adsorpsiyonun su buharı gibi polar bileşenleri ayırmada başarılı olduğu, ancak metan saflığını %95'in üzerine çıkarmada yetersiz kaldığı bildirilmiştir. PSA'nın özellikle biyogaz tesislerinde yüksek verimlilikte kullanılabildiği ve adsorban seçimi sayesinde çok yönlü bir çözüm sunduğu belirtilmiştir. Ayrıca PSA'nın çevrim sürelerini optimize ederek enerji tüketimini azaltabileceği belirtilmiştir [33].

Li ve diğerleri (2015), kriyojenik koşullar altında CO_2 ve O_2'nin ayrılmasında PSA ve vakum damıtımını karşılaştırmıştır. Çalışmada, vakum damıtmanın çok düşük sıcaklıklarda yüksek saflık gerektiren gaz ayırma işlemlerinde oldukça etkili olduğu rapor edilmiştir. Ancak bu yöntemin enerji tüketiminin yüksek olması ve karmaşık ekipman tasarımı nedeniyle yalnızca belirli uygulamalar için uygun olduğu bildirilmiştir. PSA'nın daha düşük enerji gereksinimleri ile çalıştığı ve daha geniş bir sıcaklık ve basınç aralığında istikrarlı performans sunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, vakum damıtmanın özellikle büyük ölçekli tesislerde kullanılabileceği, PSA'nın ise daha küçük ve orta ölçekli tesislerde pratik bir alternatif sağladığı vurgulanmıştır. PSA'nın düşük bakım maliyetleri ve operasyonel

esnekliğinin, bu yöntemi endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak tercih edilir hale getirdiği de vurgulamıştır [34].

Wang, Zhang, Liu ve Patel (2018), doğal gaz saflaştırmasında PSA ve vakum damıtma yöntemlerini karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, vakum damıtmanın yüksek metan geri kazanım oranı sağladığı, ancak bunun yüksek enerji tüketimi ve yüksek basınç gerektiren sistemlerle sağlanabileceği vurgulanmıştır. PSA'nın enerji tüketiminin daha düşük olması ve kompakt yapısı sayesinde daha geniş bir uygulama alanına sahip olduğu ifade edilmiştir. Özellikle orta ölçekli tesislerde PSA'nın ekonomik bir seçenek olduğu ve farklı gaz karışımlarıyla çalışabildiği belirtilmiştir. Ayrıca çalışmada, vakum damıtmanın yalnızca ultra yüksek saflık gerektiren durumlarda avantaj sağladığı, PSA'nın ise hem saflık hem de maliyet açısından daha dengeli bir çözüm sunduğu da bildirilmiştir [35].

Chen ve diğerleri (2021), hidrojen saflaştırmasında PSA ve vakum damıtma yöntemlerini ayrıntılı olarak karşılaştırmıştır. Çalışma, vakum damıtmanın %99,999'luk gibi oldukça yüksek hidrojen saflığına ulaşmada etkili olduğunu göstermiştir. Ancak, yüksek enerji gereksinimi nedeniyle bu yöntemin yalnızca büyük ölçekli ve kritik uygulamalar için uygun olduğu ifade edilmiştir. PSA'nın çok daha düşük maliyet ve enerji tüketimi ile %99,99 hidrojen saflığı sağlayabileceği bildirilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, PSA'nın kompakt tasarıma sahip olması ve çevre dostu yapısı sayesinde küçük ve orta ölçekli uygulamalarda daha geniş bir kullanım alanına sahip olduğu belirtilmiştir. PSA'nın daha az karmaşık ekipman gerektirdiği ve uzun vadede operasyonel maliyetlerin düşük olduğu vurgulanmıştır [36].

Yang ve diğerleri (2008), hidrojenin enerji depolama kapasitesini değerlendirerek, güneş ve rüzgar gibi kesintiye uğrayabilen yenilenebilir enerji kaynaklarının güvenilirliğini artırmadaki kritik rolünü ifade etmişlerdir. Araştırma, güneş ve rüzgar enerjisi üretimindeki dalgalanmaların enerji sistemlerinde istikrarsızlık yaratabileceğini, ancak hidrojenin bu dalgalanmaları dengeleme ve enerji tedarikinin sürekliliğini sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Hidrojenin elektrolizle depolanması, fazla yenilenebilir enerji üretiminin değerlendirilmesine ve ihtiyaç duyulduğunda enerji sistemine geri döndürülmesine olanak tanımıştır. Yang ve arkadaşları, hidrojenin enerji depolama kapasitesinin yalnızca enerji güvenliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda uzun vadeli enerji maliyetlerini de düşürebileceğini ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmada önemli

bir araç olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, bu tür enerji depolama sistemlerinin büyük ölçekli şebekelerde kullanılabilirliğini artırarak karbon ayak izinin önemli ölçüde azaltılabileceği belirtilmiştir [15].

Kim ve diğerleri (2020b), rafineri süreçlerinde ağır hidrokarbonları hafif ve temiz yakıtlara dönüştürmede hidrojenin oynadığı temel rolü ayrıntılı olarak analiz etmiştir. Çalışmada, hidrojenin çevre standartlarını karşılamak için kritik öneme sahip olan hidro desülfürizasyon süreçlerinde kükürt içeriğini %90'dan fazla azalttığı belirtilmiştir. Hidrokraking süreçlerinde karbon zincir uzunluklarının kırılmasıyla hidrojenin daha hafif yakıtlar elde edilmesine olanak sağladığı ve bu süreçlerin nihai ürün kalitesini önemli ölçüde artırdığı vurgulanmıştır. Ayrıca düşük kükürtlü yakıtların, fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan çevresel etkileri azaltmada önemli bir araç olduğu belirtilmiştir. Bu araştırma, rafinerilerdeki PSA sistemlerinin hidrojen geri kazanımında enerji verimliliğini artırarak çalışma maliyetleri düşürdüğünü ve bu süreçlerin karbon ayak izini azaltmada önemli bir rol oynadığını göstermiştir [37].

Xu ve diğerleri (2018), PSA gibi ileri teknolojilerin rafinerilerdeki hidrojen geri kazanım süreçleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada, geri kazanılan hidrojenin rafineri operasyonlarına yeniden entegre edilmesiyle enerji maliyetlerinin %30'a kadar azaltılabileceği belirtilmiştir. PSA'nın hem hidrojen geri kazanımında yüksek verimlilik sağladığı hem de çevresel etkileri en aza indirdiği vurgulanmıştır. Bu durumun, özellikle fosil yakıt işleme tesislerinde hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir avantaj sağladığı bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca PSA'nın esnek yapısı sayesinde farklı gaz karışımlarıyla çalışabildiği ve bu durumun rafineri operasyonlarında proses optimizasyonunu kolaylaştırdığı belirtilmiştir [38].

Choi, Kim ve Patel (2003), PSA sistemlerinde p/f oranının ürün gaz saflığı ve geri kazanım verimliliği üzerindeki etkilerini detaylı olarak araştırmışlardır. Çalışma, düşük p/f oranlarının enerji tüketimini azaltırken, adsorbanların tam olarak temizlenmesini engellediğini, bunun da bir sonraki çevrimde kirlilik birikimine yol açarak ürün saflığını azalttığını göstermiştir. Diğer yandan p/f oranının artırılmasıyla adsorbanların rejenerasyonu iyileştirilmiş ve kolondaki kirlilik birikimi azaltılmıştır. Ancak bu durumun daha fazla hidrojen kaybına yol açarak ürün verimliliğini azalttığı bildirilmiştir. Çalışmada, optimum p/f oranının hedef gaz saflığına, çevrim sürelerine ve sistemin enerji verimliliğine bağlı

olarak belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Choi ve ekibi, %0,4 civarında bir p/f oranının enerji maliyetlerini kontrol altında tutarken ürün saflığını en üst düzeye çıkarabileceğini belirtmişlerdir. Bu bulgular, p/f oranının PSA sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında enerji tüketimi ile ürün kalitesi arasındaki dengeyi sağlamada kritik bir parametre olduğunu göstermektedir [39].

Abdeljaoued, Chahbani ve Mendes (2017), hidrojen saflaştırma prosesleri üzerinde p/f oranının etkilerini deneysel olarak analiz etmiş ve bu parametrenin PSA performansını nasıl optimize edebileceğini incelemiştir. Çalışma, p/f oranının artırılmasının polar gazların, özellikle karbondioksitin adsorbandan daha etkili bir şekilde desorpsiyon edilmesini sağladığını göstermiştir. Ancak, yüksek p/f oranlarının enerji tüketimini artırdığı ve toplam sistem maliyetlerini yükselttiği belirtilmiştir. Çalışma, %0,4 ile %0,5 arasındaki bir p/f oranının hem adsorban rejenerasyonu hem de ürün gazı saflığı açısından ideal olduğunu göstermiştir. Bu aralıkta %99,99 saflıkta hidrojen elde etmenin mümkün olduğu ve enerji tüketimi makul bir seviyede tutmaya yardımcı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, p/f oranının çevrim kararlılığına etkisi araştırılmış ve optimum p/f oranı kullanıldığında PSA sistemlerinin uzun vadeli performansında bir iyileşme sağlandığı bildirilmiştir. Bu sonuçlar, p/f oranının hem ürün gazı saflığı üzerinde hem de ekonomik sürdürülebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [40].

Kalman ve diğerleri (2022), yüksek basınçlı PSA sistemlerinde farklı p/f oranlarının hidrojen saflığı ve geri kazanım oranı üzerindeki etkilerini detaylı olarak araştırmışlardır. Çalışma, p/f oranının artırılmasının adsorbanın daha etkili yenilenmesini sağladığını, böylece ürün gazındaki CO_2, CO ve CH_4 gibi safsızlıkları önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Çalışma, düşük p/f oranlarının enerji tüketimini azaltırken diğer taraftan adsorban yüzeyinde safsızlıkların birikmesine neden olarak uzun vadede sistem performansını düşürdüğünü göstermiştir. Bunun dışında, yüksek p/f oranlarının adsorbanın tamamen temizlenmesini sağladığı, ancak bu durumun enerji tüketimini artırdığı ve ekonomik verimliliği olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Kalman ve ekibi, %0,3 ile %0,5 arasındaki p/f oranlarının endüstriyel uygulamalar için uygun bir denge sunduğunu rapor etmiş hem yüksek ürün saflığı hem de optimum enerji kullanımı sağladığını bildirmiştir. Bu araştırmada, p/f oranının uygulama alanlarına göre belirlenmesi gerektiğini ve bu parametrenin hidrojen saflığı üzerindeki etkilerinin farklı gaz karışımları için değişkenlik gösterebileceğini ortaya koymuştur [41].

Kikkinides, Yang ve Ruthven (2015), hibrit PSA/membran sistemlerinde p/f oranının performans üzerindeki etkisini modellemiş ve optimize etmiştir. Çalışma, hibrit sistemlerde p/f oranının artırılmasının yalnızca PSA bölümündeki rejenerasyon verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda membran modüllerindeki gaz geçirgenlik dengesini de olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Çalışma, p/f oranının düşük tutulması durumunda adsorbanların tam olarak rejenerasyona uğrayamayacağını ve bunun da sonraki çevrimlerde safsızlık birikimine yol açacağını bildirmiştir. Fakat p/f oranının %0,5'in üzerine çıkarılmasının enerji tüketiminde hızlı bir artışa ve ekonomik verimlilikte bir düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. Kikkinides ve ekibi, %0,35 ile %0,45 arasındaki bir p/f oranının hem yüksek ürün gazı saflığı hem de enerji verimliliği sağladığını ve bu oranların hibrit sistemleri optimize etmek için ideal bir aralık sağladığını belirtmiştir. Bu çalışma, p/f oranının sadece PSA sistemlerinde değil, aynı zamanda hibrit teknolojilerinde de kritik bir parametre olduğunu göstermiştir [42].

Kumar, Patel ve Zhang (2019), PSA sistemlerinde farklı çalışma basınçlarının metan ve karbondioksit ayırma performansına olan etkilerini detaylı olarak incelemiştir. Çalışma, çalışma basıncının artırılmasının adsorban kapasitesini artırarak metan saflığını artırdığını, ancak aynı zamanda enerji tüketimini de artırdığını göstermiştir. Özellikle 5-8 bar aralığındaki basınçların hem enerji verimliliği hem de yüksek saflıkta metan elde edilmesi bakımından optimum sonuçlar sağladığı ifade edilmiştir. Fakat 8 bar'ın üzerindeki basınçların enerji maliyetlerini hızla arttığını ve sistemin ekonomik verimliliğinin düştüğü belirtilmiştir. Bu nedenle, istenen ürün saflığı ile enerji tüketimi arasındaki denge dikkate alınarak çalışma basıncının optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [43].

Li, Zhao ve Wang (2020), PSA sistemlerinde basınç değişimlerinin hidrojen saflaştırma prosesleri üzerindeki etkilerini detaylı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, yüksek basınçların kolondaki gaz moleküllerinin adsorbanın yüzeyle daha güçlü etkileşime girmesine neden olduğu ve bunun da adsorpsiyon kapasitesini artırdığı ifade edilmiştir. Özellikle 6 bar'ın üzerinde çalışan sistemlerin daha yüksek saflıkta hidrojen ürettiği, fakat bu basınç seviyelerinin desorpsiyon proseslerinde zorluklara yol açtığı belirtilmiştir. Yüksek basınçtan düşük basınca geçişteki yavaşlama, desorpsiyon süresini uzatarak toplam çevrim süresini artırmış ve bunun sonucunda sistemin operasyonel verimliliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu çalışmada, 4-6 bar aralığındaki çalışma basınçlarının hem adsorpsiyon kapasitesini artırdığı hem de desorpsiyon prosesini kolaylaştırdığı için dengeli bir

performans sağladığı görülmüştür. Li ve arkadaşları, PSA sistemlerinin tasarımında basınç değişim oranlarının ve aralıklarının dikkatlice optimize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca bu parametrelerin sadece enerji tüketimi üzerinde değil, aynı zamanda adsorbanın ömrü ve ürün gaz kalitesi üzerinde de kritik bir etkiye sahip olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmada, özellikle hidrojen saflaştırma uygulamalarında optimum basınç aralıklarının belirlenmesinin hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik bakımından önemli olduğu belirtilmiştir [44].

Martínez ve diğerleri (2021), PSA sistemlerindeki basınç salınımlarının oksijen ve azot ayırma prosesleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Çalışmada, düşük basınç farklarının oksijeni etkili bir şekilde ayırmayı zorlaştırdığı ve bu durumun istenmeyen safsızlıkların ürün gazında kalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Ancak, düşük basınç farklarının enerji tüketimini azalttığı ve işletme maliyetlerini düşürdüğü belirtilmiştir. Bunun yanında, yüksek basınç farklarının azotun daha etkili adsorpsiyonunu sağladığı ve ürün gazındaki oksijen saflığını artırdığı bildirilmiştir. Fakat, yüksek basınç farklarının enerji tüketimini önemli ölçüde artırdığı ve uzun vadeli performansını olumsuz etkileyerek adsorbanın ömrünü kısalttığını belirtilmiştir. Bu çalışma, 3-5 bar arasındaki bir basınç farkının oksijen ve azot ayırma proseslerinde hem enerji verimliliği hem de ürün gazı kalitesi açısından optimum sonuçlar sunduğunu göstermiştir. Martínez ve arkadaşları, özellikle kriyojenik sistemlere alternatif olarak PSA teknolojisinin tercih edildiği uygulamalarda, sistem performansını iyileştirmek için basınç salınımlarının optimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır. Bunun dışında, farklı gaz karışımları için bu parametrelerin yeniden değerlendirilmesinin sistemin esnekliğini ve verimliliğini artırmada faydalı olacağı belirtilmiştir [45].

Li ve diğerleri (2019), PSA sistemlerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin hidrojen saflaştırması üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, kısa süreli adsorpsiyon aşamasının gazların adsorban yüzeyine tam olarak yapışmasını engellediği ve bu nedenle CO_2, CO ve CH_4 gibi safsızlıkların ürün gazında kaldığı bildirilmiştir. Çalışmada, adsorpsiyon süresi gerekenden uzun tutulursa, istenen gazın da adsorplandığı ve bunun da geri kazanım oranını düşürdüğü gösterilmiştir. Desorpsiyon süresi açısından, yetersiz sürelerin adsorban yüzeyinde tortulara neden olduğu ve bunun da bir sonraki döngüde adsorpsiyon kapasitesini azalttığı belirtilmiştir. Bunun dışında, desorpsiyon süresinin gereğinden fazla uzatılmasının enerji tüketimini artırdığı ve sistemin ekonomik

verimliliğini düşürdüğü belirtilmiştir. Li ve arkadaşları, %99,99 saflıkta hidrojen elde etmek ve enerji tüketimini optimize etmek için adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin dengeli bir şekilde ayarlanması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada ayrıca, gaz karışımının bileşimine ve hedeflenen ürün saflığına göre bu parametrelerin esnek bir şekilde optimize edilmesinin PSA sistem performansını artıracağı ortaya konmuştur [46].

Martínez, González ve Silva (2020), PSA sistemlerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin metan ve karbondioksit ayırma prosesleri üzerindeki etkilerini inceleyerek modelleme çalışmaları yapmıştır. Çalışmada, uzun adsorpsiyon sürelerinin metanın etkili bir şekilde ayrılmasını sağladığı, ancak desorpsiyon süresi yetersiz olduğunda adsorban yüzeyinde karbondioksit birikmesine yol açtığı bildirilmiştir. Özellikle, yetersiz desorpsiyon süresinin kolonların tam olarak rejenerasyon yapamaması nedeniyle çevrim kararlılığını bozduğu ve bunun da uzun vadede sistem verimliliğini azalttığı belirtilmiştir. Bu çalışma, desorpsiyon süresinin optimize edilmesinin yalnızca adsorbanın rejenerasyonunu sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda bir sonraki çevrimde ürün gaz saflığını artırarak genel performansı da iyileştirdiğini göstermiştir. Martínez ve arkadaşları, gaz karışımının içeriğine, kolon tasarımına ve istenen ürün saflığına göre adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin ayarlanması gerektiğini vurgulamış ve bu parametrelerin optimizasyonu ile PSA sistemlerinin enerji tüketimini ve ekonomik verimliliğini artırmada önemli bir rol oynadığını belirtmiştir [47].

Kumar ve diğerleri (2018) PSA sistemlerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin oksijen ve azot ayırma prosesleri üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, kısa adsorpsiyon sürelerinin oksijenin adsorban yüzeye tam olarak tutunmasını engellediğini, bunun da ürün gazındaki azot kirliliğinin artmasına neden olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak ürün saflığının hedef seviyelere ulaşamadığı ve sistem performansının olumsuz etkilendiği bildirilmiştir. Uzun adsorpsiyon sürelerinin azotun adsorplanmasına, enerji tüketiminin artmasına ve geri kazanım oranının azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. Desorpsiyon süreleri açısından, yetersiz sürelerin adsorban yüzeyinde azot birikimine neden olduğu, çevrim kararlılığını bozduğu ve uzun desorpsiyon sürelerinin enerji tüketimini artırdığı, bunun da sistemin ekonomik performansını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Kumar ve ekibi, optimum adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin belirlenmesinin hem ürün gazı saflığını hem de PSA sistemlerinde ekonomik sürdürülebilirliği artırmak için kritik bir adım olduğunu ifade edilmiştir [48].

Riboldi ve Bolland (2021), PSA sistemlerinde karbon yakalama ve depolama süreçlerinde adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin rolünü kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışma, karbondioksitin yüksek seçici adsorpsiyonunu sağlamak için uzun adsorpsiyon sürelerinin gerekli olduğunu, ancak bunun enerji maliyetlerini artırdığını ve sistemin ekonomik verimliliğini olumsuz etkilediği sonucunu vermiştir. Desorpsiyon sürelerinin yetersiz olduğu durumlarda adsorban yüzeyinde karbon birikmesine neden olduğunu ve bunun bir sonraki döngüde adsorpsiyon kapasitesini azalttığı ifade edilmiştir. Çalışmada, adsorpsiyon ve desorpsiyon sürelerinin dengeli bir şekilde optimize edilmesi ile %90'ın üzerinde bir karbon yakalama oranına ulaşılabileceği vurgulanmıştır. Riboldi ve ekibi, bu parametrelerin optimize edilmesinin sadece karbon yakalama ve depolama projelerinde çevresel faydaları artırmakla kalmayıp aynı zamanda ekonomik sürdürülebilirliği de desteklediğini belirtmiştir [49].

Zhang ve diğerleri (2021), PSA sistemlerinde metan saflaştırmasında p/f oranının etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Çalışmada, düşük p/f oranlarının enerji tüketimini azaltmada avantaj sağladığı, ancak adsorban yüzeyinde biriken safsızlıkların tamamen giderilemediği ve bu durumun ürün gazındaki saflığı olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Bu çalışmada, yetersiz p/f oranlarının uzun vadede adsorpsiyon kapasitesini sınırlandırdığı ve çevrim kararlılığını bozduğu ortaya konulmuştur. Bunun dışında, p/f oranının artırılmasının adsorbanın rejenerasyon sürecini iyileştirdiği ve safsızlıkların daha etkili bir şekilde giderilmesini sağladığı rapor edilmiştir. Yüksek p/f oranlarıyla %99,5 gibi yüksek metan saflığı değerlerine ulaşabileceği, ancak enerji tüketiminin aynı oranda artacağı vurgulanmıştır. Zhang ve arkadaşları, %0,4 ile %0,5 arasındaki p/f oranları ile hem yüksek ürün saflığı hem de optimum enerji tüketimi sağlanabileceği, dolayısıyla endüstriyel uygulamalar için uygun bir aralık sağladığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, p/f oranının gaz karışımının içeriğine ve kolon tasarımına bağlı olarak optimize edilmesi gerektiği ve bu optimizasyonun PSA performansını artırmada oldukça önemli bir rol oynadığı gösterilmiştir [50].

González ve diğerleri (2020), biyogaz arıtma proseslerinde p/f oranının PSA sistem performansı üzerindeki etkilerini detaylı olarak araştırmışlardır. Çalışmada, düşük p/f oranlarının enerji tüketimini azaltarak sistemin ekonomik verimliliğini artırdığı, ancak adsorban yüzeyin tam temizliğini sağlamadığı için uzun vadede performansı düşürdüğü bildirilmiştir. Özellikle yetersiz p/f oranlarının bir sonraki çevrimde adsorpsiyon

kapasitesinde azalmaya ve ürün gazındaki safsızlık içeriğinde artışa neden olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, yüksek p/f oranlarının adsorban rejenerasyonunu önemli ölçüde iyileştirdiği ve CO_2 gibi safsızlıkların kolonlardan daha etkili bir şekilde uzaklaştırılmasını sağladığı belirtilmiştir. Ancak yüksek p/f oranlarının enerji tüketiminde önemli bir artışa neden olduğu ve bunun da sistemin ekonomik verimliliğini olumsuz yönde etkilediği de vurgulanmıştır. González ve ekibi, %0,35 ile %0,45 arasındaki bir p/f oranının hem enerji tüketimini hem de biyogaz arıtma uygulamalarında ürün gazındaki yüksek saflığı optimize ettiğini belirtmiştir. Araştırmalar ayrıca, farklı biyogaz bileşimleri için p/f oranını dinamik olarak ayarlamanın PSA sistemlerinin performansını iyileştirmek için önemli bir uygulama olduğunu göstermiştir [51].

Kim ve diğerleri (2021), PSA sistemlerinde kullanılan Zeolit 13X'in performansını detaylı olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada, Zeolit 13X'in yüzey alanının fazla olması ve polar moleküllere karşı güçlü seçiciliği sayesinde CO_2 ve CH_4 ayırma işlemlerinde etkin bir şekilde çalıştığı ortaya konulmuştur. Çalışmada, Zeolit 13X'in düşük basınç koşullarında bile yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu ve bu özelliğinin PSA sistemlerinde enerji tasarrufu sunduğu ifade edilmiştir. Bunun yanında, Zeolit 13X'in gözenek boyutları sayesinde CO_2 moleküllerinin CH_4'den ayrılmasının kolaylaştığı ve ürün gazında %99,99'a kadar saflık sağladığı vurgulanmıştır. Rejenerasyon işlemlerinde de dayanıklı olan Zeolit 13X'in uzun çevrim ömrü nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edildiği belirtilmiştir. Kim ve arkadaşları, özellikle hidrojen ve biyogaz arıtma işlemlerinde performansı artırmak için Zeolit 13X'in önemli bir seçenek olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu çalışmada ayrıca, PSA sistemlerinin verimliliğinin, bu malzemenin farklı gaz karışımları ve uygulamaları için optimize edilmesi ile artacağı vurgulanmıştır [52].

Patel ve diğerleri (2020) aktif karbonun biyogaz arıtma proseslerindeki avantajlarını ve sınırlamalarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, CH_4 ve CO_2 adsorpsiyonunda aktif karbonun geniş yüzey alanının ve gözenek yapısının etkili olduğu vurgulanmıştır. Ancak aktif karbonun özellikle su buharı olmak üzere polar moleküllere karşı daha düşük seçiciliğe sahip olduğu bildirilmiştir. Çalışmada, aktif karbonun rejenerasyon sırasında enerji tüketimini azaltma kapasitesi sayesinde maliyet avantajı sağladığı belirtilmektedir. Aktif karbonun düşük sıcaklıklarda bile kararlı çalışması, biyogaz arıtma uygulamalarında kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. Patel ve ekibi, aktif karbonun biyogazın ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğini artırmada önemli bir rol oynadığını belirterek,

farklı adsorban tipleriyle kombinasyonunun bu avantajları daha da güçlendirebileceğini belirtmişlerdir. Özellikle aktif karbonu hibrit sistemlerde kullanarak sistem performansının artırılabileceği vurgulanmaktadır [53].

Martínez, Chen ve Zhang (2019), PSA sistemlerinde hibrit adsorbanların kullanımını analiz etmiş ve Zeolit 5A ile aktif karbon kombinasyonunun performansını karşılaştırmıştır. Çalışma, Zeolit 5A'nın özellikle CO_2 olmak üzere polar gazların seçici adsorpsiyonunda etkili olduğunu, aktif karbonun ise geniş yüzey alanı sayesinde CH_4 adsorpsiyonunu üstlendiğini göstermiştir. Hibrit adsorban kullanılan sistemlerde rejenerasyon sürelerinin kısaldığı, enerji tüketiminin azaldığı ve sistem performansının arttığı ifade edilmiştir. Çalışmada, hibrit sistemlerin gaz karışımlarının ayrılmasında her adsorbanın kendi avantajlı yönlerini diğer adsorbanlarla birleştirdiği ve böylece ürün gazında daha yüksek saflık sağladığı bildirilmiştir. Martínez ve ekibi, hibrit adsorbanların PSA sistemlerini endüstriyel uygulamalar için daha esnek ve daha ekonomik hale getirdiğini belirtmiştir. Bunların dışında, hibrit sistemlerin biyogaz ve hidrojen gibi gaz karışımlarında performansın optimize edilmesine olanak sağladığı vurgulanmıştır [54].

Chen, Liu ve Wang (2022), PSA sistemlerinde kullanılan zeolit tiplerini ve performanslarını detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışma, Zeolit 4A'nın düşük basınç koşulları altında etkili adsorpsiyon sağladığını, ancak kapasitesinin yüksek basınçlarda sınırlı olduğunu göstermiştir. Diğer taraftan, Zeolit 13X'in hem düşük hem de yüksek basınç koşulları altında yüksek performans sağladığı ve CO_2'nin seçici ayrılmasında üstün olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, Zeolit 13X'in uzun çevrim ömrü ve rejenerasyon kolaylığı nedeniyle endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olduğunu vurgulanmıştır. Çalışma ayrıca, farklı zeolit tiplerinin hibrit şekilde birlikte kullanımının PSA sistemlerinin performansını artırabileceğini ve enerji tüketimini dengeleyebileceğini göstermiştir. Chen ve ekibi, zeolit seçiminde gaz karışımının içeriğinin ve işletme koşullarının dikkate alınmasının sistem verimliliği için önemli bir rol oynadığını belirtmiştir [55].

Li, Zhao ve Zhang (2021), PSA sistemlerinde aktif karbonun hidrojen saflaştırma proseslerindeki performansını detaylı olarak incelemiştir. Bu çalışmada da aktif karbonun geniş yüzey alanı sayesinde CO_2 ve CH_4 gibi gazların etkili bir şekilde adsorbe edildiğine değinilmiştir. Çalışma, aktif karbonun düşük enerji tüketimi ile rejenerasyon proseslerinde yüksek verimlilik sağladığını göstermiştir. Fakat polar moleküllere özellikle su buharına

karşı düşük seçiciliğinin olması aktif karbonun performansını sınırlayan etkenlerden olmuştur. Li ve ekibi, aktif karbonun biyogaz ve hidrojen saflaştırma gibi uygulamalarda hem ekonomik hem de çevresel avantajlar sağladığını vurgulamış ve bu malzemenin endüstriyel proseslerde yaygın olarak kullanılma potansiyelini göz önüne sermiştir [56].

Wang, Park ve Lee (2020), PSA sistemlerinde biyogaz arıtma süreçlerinde aktif karbonun rolünü kapsamlı bir şekilde analiz etmiştir. Çalışma, aktif karbonun fiziksel yapısı sayesinde CO_2 ve CH_4 gibi gazların seçici adsorpsiyonunda etkili olduğunu göstermiştir. Aktif karbonun düşük basınçlarda düşük enerji tüketimiyle yüksek performans sunması, aktif karbonu biyogaz arıtma uygulamalarında uygun maliyetli bir seçenek olarak öne çıkarmıştır. Wang ve ekibi, çevresel sürdürülebilirliği de göz önüne alarak aktif karbonun biyogaz karışımına bağlı olarak optimize edilmesi durumunda ürün gaz saflığını artırabileceğini ve operasyonel maliyetleri düşürebileceğini belirtmiştir. Özellikle hibrit sistemlerde aktif karbonun zeolitlerle kombinasyonunun enerji tüketimini azaltabileceği ve saflık oranını artırabileceği vurgulanmıştır [57].

Chen, Patel ve Luo (2020), gaz akış yönünün PSA performansı üzerindeki etkilerini biyogaz arıtma uygulamaları üzerinde detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, tersine akış yönteminin, gazın kolon boyunca homojen bir şekilde ilerlemesi ve adsorbanın daha büyük bir kısmını yenilemesi nedeniyle adsorban rejenerasyonunu daha etkili hale getirdiği belirtilmiştir. Bu yöntemin kolonlardan CO_2'nin daha hızlı uzaklaştırılmasını sağladığı ve ürün gazındaki istenmeyen safsızlıkların oranını önemli ölçüde azalttığı bildirilmiştir. Ancak, karşı akım yönteminin sistemdeki basınç dalgalanmalarını artırdığı, bunun da kolondaki mekanik dayanıklılığı zorlayabileceği ve uzun vadede sistem bakım maliyetlerini artırabileceği belirtilmiştir. Çalışmada ayrıca, bu yöntemin enerji tüketimini artırarak operasyonel maliyetler üzerinde olumsuz etkilere sahip olabileceği vurgulanmıştır. Doğrudan akış yöntemi, daha düşük enerji tüketimi ile daha uzun vadeli operasyonel kararlılık sağlama avantajını sağlamıştır. Bu yöntem, gaz akışının basit bir şekilde yönlendirilmesiyle ve kolondaki basınç düşüşlerini en aza indirerek operasyonel karmaşıklığı azaltmıştır. Ancak bu yöntemin ters akış yöntemine kıyasla ürün gazı saflığını bir miktar azalttığı ve özellikle yüksek saflık gerektiren uygulamalarda sınırlayıcı olabileceği bildirilmiştir. Chen ve arkadaşları, gaz akış yönünün farklı gaz karışımlarına ve endüstriyel gereksinimlere bağlı olarak optimize edilmesi gerektiğini ve bu parametrenin doğrudan ürün kalitesini ve enerji verimliliğini etkilediğini belirtmiştir. Bunun yanında, gaz

akış yönünün değişken olarak enerji tüketimini azaltmak ve operasyonel maliyetleri optimize etmek için esnek bir şekilde ayarlanabilmesi gerektiğini önermişlerdir [58].

Ruthven ve Farooq (1990), PSA sistemlerinde karşı akım ve eş akım uygulamalarının performansını karşılaştırmış ve bu iki yöntemin avantaj ve sınırlamalarını ayrıntılı olarak tartışmışlardır. Çalışmada, karşı akım uygulamasının adsorban yüzeylerin daha etkili bir şekilde temizlenmesini sağladığı ve bunun da ürün gazının saflığını artırmada önemli bir avantaj sağladığı belirtilmiştir. Bu uygulamanın özellikle gaz moleküllerinin kolon boyunca daha eşit bir şekilde dağılmasını sağladığı ve adsorpsiyon kapasitesini artırdığı belirtilmiştir. Ancak, karşı akım uygulamasının kolonda daha fazla mekanik strese neden olduğu, sistem tasarımında daha karmaşık düzenlemeler gerektirdiği ve enerji tüketimini artırdığı belirtilmiştir. Eş akım yöntemi ise daha basit bir işletim sağlayarak sistemin kurulumu ve işletimi sırasında avantajlar sunmuştur. Gaz akışının adsorpsiyon ve desorpsiyon süreçlerinde daha az enerji gerektirdiği ve sistemin daha düşük basınç farklarıyla çalıştırılmasına olanak sağladığı belirtilmiştir. Ancak, eş akım yönteminin ürün gazındaki kirlilik içeriğini tamamen ortadan kaldıracak kadar etkili olmadığı ve bu nedenle yüksek saflık gerektiren uygulamalarda tercih edilmediği belirtilmiştir. Bu çalışmada, PSA sistemlerinde gaz akış yönü seçiminin uygulama ve işletme gereksinimlerine göre yapılması gerektiği, doğru bir seçimle hem enerji verimliliğinin hem de ürün gazı saflığının optimize edilebileceği ileri sürülmüştür [59].

Yang (1987), PSA sistemlerinde gaz akış yönünün basınç profili ve kütle transferi üzerindeki etkilerini detaylı olarak değerlendirmiştir. Bu çalışmada, alttan üste gaz akış yönünün, kolondaki gaz karışımının homojen ilerlemesini sağladığı ve adsorpsiyon basamaklarında daha dengeli bir basınç dağılımı oluşturduğu belirtilmiştir. Bu yöntem, gaz moleküllerinin adsorban yatağında daha verimli bir şekilde tutulmasını sağlayarak ve kütle transfer hızını artırmıştır. Bu yöntemin, özellikle yüksek akışlı gaz akışlarında basınç kayıplarını en aza indirdiği ve enerji tüketimini azalttığı belirtilmiştir. Ancak, alttan üste doğru akış yönünün, kolon tasarımını daha karmaşık hale getirdiği ve işletme maliyetlerini artırabileceği rapor edilmiştir. Bu yöntemin, kolondaki mekanik mukavemeti zorlayabileceği ve özellikle yüksek basınçlı sistemlerde rejenerasyon işlemlerinde daha uzun süreler gerektirebileceği belirtilmiştir. Yang, gaz akış yönü seçiminin sadece enerji tüketimi ve ürün gaz saflığı açısından değil, aynı zamanda kolon tasarımı, rejenerasyon süreleri ve işletme maliyetleri üzerindeki etkileri de dikkate alınarak yapılması gerektiğini ifade edilmiştir [60].

Li ve diğerleri (2017), PSA sistemlerinde metan ve karbondioksit ayırma prosesleri üzerinde sıcaklığın etkisini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışmada, düşük sıcaklıklarda karbondioksitin adsorpsiyon kapasitesinin önemli ölçüde arttığı rapor edilmiştir. Bu durum, düşük sıcaklıklarda karbondioksit moleküllerinin adsorban yüzeyine daha güçlü bağlanmasıyla gösterilmiştir. Fakat, bu etkinin metan molekülleri için sınırlı olduğu, çünkü metanın polar olmayan yapısının düşük sıcaklıklarda adsorpsiyon kapasitesini artırmada etkisiz olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıkların karbondioksitin desorpsiyon sürecini kolaylaştırırken adsorbanın rejenerasyon sürecini hızlandırdığı bildirilmiştir. Bu durum, enerji maliyetlerini düşürerek sistem performansını iyileştirmiştir. Bu çalışmada, optimum sıcaklık aralığının hem adsorpsiyon kapasitesini hem de rejenerasyon verimliliğini dengelemesi gerektiği ifade edilmiştir. Li ve ekibi, biyogaz uygulamalarında karbondioksit ve metan ayırma proseslerinde sıcaklık kontrolünün ürün gazı saflığı ve enerji tüketimi üzerindeki etkisinin dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışma, düşük sıcaklıklarda çalışan sistemlerin yüksek karbondioksit içeriğine sahip gaz karışımlarında daha etkili olduğunu, ancak enerji maliyetlerinin artabileceğini vurgulamıştır. Bu nedenle PSA sistemlerinde uygulama koşullarına göre sıcaklık optimizasyonunun hem maliyet hem de performans açısından önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır [61].

Zhang ve diğerleri (2018), PSA sistemlerinde hidrojen saflaştırması sürecinde sıcaklık değişimlerinin etkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmada, düşük sıcaklıkların hidrojeni safsızlıklardan ayırmada daha yüksek verimlilik sağladığı, bunun nedeninin adsorban yüzeyin düşük sıcaklıklarda CO_2 ve CH_4 gibi gaz moleküllerini daha güçlü bağlayabilmesi olduğu ifade edilmiştir. Ancak bu durum desorpsiyon proseslerinin enerji maliyetini artırmış ve rejenerasyon prosesinin uzamasına neden olmuştur. Buna karşılık, yüksek sıcaklıkların desorpsiyon proseslerini hızlandırdığı, böylece rejenerasyon periyodunu kısalttığı ve çevrim sürelerini optimize ettiği belirtilmiştir. Ancak bu sıcaklık artışının adsorpsiyon kapasitesinde hafif bir düşüşe neden olduğu ve ürün gaz saflığını olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Zhang ve ekibi, PSA sistemlerinde sıcaklık kontrolünün sağlanmasının, özellikle endüstriyel hidrojen saflaştırma proseslerinde enerji tüketimini ve ürün saflığını optimize etmede önemli bir etken olduğunu rapor etmiştir. Bu çalışma, farklı tipteki adsorbanların sıcaklık değişimlerine farklı tepki verdiğini, bu nedenle sıcaklık optimizasyonunun sadece gaz karışımının içeriğine göre değil, aynı zamanda kullanılan adsorban tipine göre de yapılması gerektiğini belirtmiştir. Zhang ve ekibi, hidrojen saflaştırmada sıcaklık aralığının 30°C ile 50°C arasında olduğu durumlarda hem adsorpsiyon

hem de desorpsiyon prosesleri için uygun bir denge sağladığını ve endüstriyel proseslerin enerji verimliliğini artırdığını vurgulamıştır [62].

Li ve diğerleri (2018), PSA sistemlerinde adsorban miktarı ve kolon boyutunun performansa olan etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, adsorban miktarı arttırıldığında gaz karışımlarındaki CO_2 ve CH_4 gibi safsızlıkların da etkili bir şekilde tutulduğu gözlenmiş, bunun da ürün gazının saflığını artırdığı belirtilmiştir. Fakat, adsorban miktarındaki aşırı artışın basınç düşüşlerine neden olduğu ve gaz akış hızını olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Kolon boyutları değerlendirildiği zaman, daha uzun kolonların gazların adsorpsiyon kapasitesini artırdığı, ancak desorpsiyon aşamasını uzatarak çevrim sürelerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Li ve arkadaşları, kolon çapı ve uzunluğunun dikkatlice ayarlanması gerektiğini ifade etmiştir. Özellikle kolon çapının dar olduğu uygulamaların daha yüksek basınçlarda çalışmaya uygun olduğu, ancak bunun enerji tüketimini artırabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, kolon boyutlarının ve adsorban miktarlarının gaz akış karakteristiklerine ve ürün gaz saflığına uygun olarak tasarlanmasının PSA sistemlerinin verimliliğini artırabileceği belirtilmiştir. Bunun dışında, hibrit kolon tasarımlarının farklı gaz karışımları için en elverişli sonuçları sağlayabileceği vurgulanmıştır [63].

Yamada ve diğerleri (2021), PSA sistemlerinde adsorban miktarı ve kolon boyutlarının ürün gaz saflığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, daha fazla adsorban kullanmanın özellikle CO_2 olmak üzere gazların daha etkili bir şekilde ayrılmasını sağladığı ve bunun da ürün gaz saflığını artırdığı ifade edilmiştir. Ancak, adsorban miktarının artmasıyla desorpsiyon aşamasının daha uzun sürdüğü ve bunun da çevrim sürelerini uzattığı belirtilmiştir. Kolon boyutları açısından, büyük çaplı kolonların daha yüksek akış hızlarında daha istikrarlı performans sağladığı, fakat kolon uzunluğunun artırılmasının enerji tüketimini de artırabileceği bildirilmiştir. Yamada ve ekibi, ürün gaz saflığını ve enerji verimliliğini optimize etmek için kolon tasarımının dikkatli bir şekilde yapılması gerektiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada, farklı endüstriyel uygulamalar için kolon geometrisini ve adsorban miktarını optimize etmenin, maliyetleri düşürmek ve PSA sistemlerinin performansını artırmak için önemli bir strateji olduğu belirtilmiştir [64].

Singh ve Gupta (2018), PSA sistemlerinde adsorban miktarının ve kolon çapının hidrojen saflaştırması üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışma, daha büyük çaplı kolonların gaz akış hızını artırarak proses verimliliğini artırdığını, ancak bunun adsorpsiyon kapasitesini

azalttığını göstermiştir. Daha yüksek adsorban yoğunluğunun daha etkili safsızlık tutmayı sağladığı, ancak basınç düşüşlerini artırdığı ve enerji maliyetlerini artırdığı belirtilmiştir. Singh ve Gupta, kolon çapı ve adsorban miktarının istenen ürün saflığı ve enerji verimliliği değerlerine göre elverişli hale getirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmalar, adsorban miktarının ve kolon boyutlarının PSA sistemlerinde gaz ayırma verimliliği ve enerji tüketiminde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir. Uygulama gereksinimlerine ve proses koşullarına bağlı olarak, sistem performansını ve ekonomisini artırmak için bu parametrelerin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi oldukça önemlidir [65].

Kumar, Zhang ve Silva (2016), PSA sistemlerinde farklı adsorban yoğunluklarının ve kolon boyutlarının metan ve karbondioksit ayrıştırılması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, adsorban miktarının artırılmasının karbondioksitin daha etkili tutulmasını sağladığı ve dolayısıyla metan saflığını artırdığı ifade edilmiştir. Fakat yüksek miktarda adsorban kullanımının basınç düşüşlerine ve enerji tüketiminin yükselmesine neden olduğu belirtilmiştir. Kolon ölçüleri bakımından, daha uzun kolonların gazların adsorpsiyon kapasitesini arttırırken desorpsiyon aşamalarını uzatarak çevrim sürelerini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Kumar ve ekibi, en uygun performans için adsorban miktarı ve kolon boyutlarının dikkatlice ayarlanması gerektiğini belirtmiştir [66].

Kumar, Patel ve Zhao (2017), PSA sistemlerinde çevrim süresi ve çevrim sayısının sistem verimliliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Bu çalışma, kısa çevrim sürelerinin adsorbanın rejenerasyonunu hızlandırdığını ve bunun da genel çevrim verimliliğini artırdığını göstermiştir. Kısa çevrim sürelerinin safsızlıkların daha hızlı giderilmesine olanak sağladığı, ancak aynı zamanda ürün gazı saflığını bir miktar azalttığı belirtilmiştir. Bunun sebebi, adsorpsiyon kapasitesinin kısa sürelerde tam olarak kullanılamaması ve gaz karışımındaki safsızlıkların kolonlardan tamamen ayrılamamasıdır. Ayrıca, kısa çevrim sürelerinin enerji tüketimini yükselterek operasyonel maliyetleri artırdığı bildirilmiştir. Uzun çevrim süreleri, adsorbanın tam kapasitede çalışmasına izin vererek ürün gazı saflığını arttırırken, rejenerasyon aşamasını yavaşlatmış ve toplam işlem süresini uzatmıştır. Kumar ve ekibi, çevrim sürelerinin ve çevrim sayısının gaz karışımının içeriğine, ürün gazının istenen saflığına ve sistemin enerji verimliliğine göre en uygun şekilde elverişli hale getirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, çevrim sayısının artırılmasının adsorban kapasitesinin uzun vadede kararlılığını etkileyebileceği ve aynı zamanda operasyonel verimliliği azaltabileceği belirtilmiştir. Bu çalışma, çevrim

parametrelerinin esnek bir şekilde ayarlanmasının, özellikle biyogaz ve hidrojen saflaştırma gibi endüstriyel uygulamalarda kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir [67].

Lin ve Zhang (2018), farklı çevrim sürelerinin ve çevrim sayılarının PSA sistemlerinde hidrojen saflaştırma performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak incelemişlerdir. Çalışmada, kısa çevrim sürelerinin gaz karışımlarındaki safsızlıkların hızla giderilmesini sağladığı, ancak artan çevrim sayılarının adsorban kapasitesinin daha hızlı düşmesine neden olduğu ifade edilmiştir. Kısa çevrim sürelerinin yüksek verimlilik sunduğunu fakat bu durumun sistem kararlılığını olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir. Uzun çevrim süreleri ise adsorban kapasitesini korumuş ve ürün gazındaki hidrojen saflığını artırmıştır. Ancak, bu durumun rejenerasyon süreçlerini uzattığı ve operasyonel hızı düşürdüğü ifade edilmiştir. Lin ve Zhang, çevrim parametrelerinin hem ürün gazı saflığını hem de enerji tüketimini ve sistem kararlılığını da etkilediğini vurgulamışlardır. Bu çalışmada, çevrim süreleri ve çevrim sayılarının optimize edilmesinin enerji tüketimini azaltırken yüksek ürün gazı saflığına ulaşılmasını sağladığı belirtilmiştir. Çalışmada, PSA sistemlerinin özellikle uzun vadede yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminde kullanılmasında bu parametrelerin önemine dikkat çekilmiştir [68].

Gao, Chen ve Zhang (2019), karbon yakalama uygulamalarındaki PSA sistemlerinde çevrim süreleri ve sayısının rolünü değerlendirmişlerdir. Bu çalışmada, kısa çevrim sürelerinin kolonlardan CO_2'nin hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasını sağladığı ve bunun da karbon geri kazanım oranını artırdığı ifade edilmiştir. Ancak, kısa çevrim sürelerinin enerji tüketimini artırdığı ve kolondaki basınç dengesizliklerini artırdığı belirtilmiştir. Bu durumun işletme maliyetlerini artırdığı ve kolon dayanıklılığını azalttığı belirtilmiştir. Uzun çevrim süreleri, kolondaki mekanik yükü azaltarak enerji tüketimini azaltmış ve operasyonel dayanıklılığını artırmıştır. Ancak bu durum rejenerasyon süreçlerini uzatmış, süreç hızını düşürmüş ve karbon yakalama uygulamalarının ekonomik verimliliğini olumsuz etkilemiştir. Gao ve ekibi, karbon yakalama sistemlerinde çevrim sürelerinin ve çevrim sayısının en uygun şekilde ayarlanmasının enerji tüketimini ve işletme maliyetlerini dengelemede kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır. Bu çalışma, optimum çevrim değerlerinin belirlenmesinin çevresel ve ekonomik faydaları artırabileceğini ve PSA sistemlerinin karbon yakalama uygulamalarında daha etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [69].

Witte, Zhang ve Patel (2021), PSA teknolojisinde çevrim süresi ile enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi incelemiş ve çevrim sürelerinin ürün gazı saflığına olan etkilerini analiz etmiştir. Bu çalışmada, kısa çevrim sürelerinin enerji tüketimini artırdığı ancak toplam verimliliği yükselttiği belirtilmiştir. Bu durumun rejenerasyon proseslerinin daha hızlı tamamlanması ve kolon kapasitesinin tam olarak kullanılmaması ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Özellikle yüksek saflık gerektiren uygulamalarda kısa döngü sürelerinin gazın tam olarak tutulmasını engellediği ve ürün gazında safsızlıkların kalmasına sebep olduğu vurgulanmıştır. Uzun çevrim sürelerinin adsorpsiyon ve desorpsiyon proseslerini dengeleyerek ürün gazı saflığını arttırmıştır. Fakat, bu durumun enerji maliyetlerini düşürürken toplam üretkenliği azalttığı bildirilmiştir. Witte ve ekibi, gaz karışımının özelliklerine, kullanılan adsorban türüne ve hedeflenen enerji tüketim seviyesine bağlı olarak optimum çevrim süresinin belirlenmesi gerektiğini vurgulamıştır. Çalışmada, farklı endüstriyel uygulamalarda PSA sistemlerinin esnek ve optimize edilmiş çevrim parametreleri ile kullanılmasının önemi vurgulanmıştır [70].

Li, Zhao ve Chen (2016), PSA sistemlerinde giriş gazı karışımı içerisindeki oranların adsorpsiyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, gaz karışımındaki CO_2 oranının artırılması ile adsorpsiyon kapasitesinin önemli ölçüde arttığını, ancak kolon rejenerasyonu sırasında daha fazla enerji gereksinimi yarattığını göstermiştir. Özellikle yüksek CO_2 içeriğine sahip gaz karışımlarında kolonda doygunluğun hızla gerçekleştiği ve bunun çevrim sürelerini kısalttığı belirtilmiştir. PSA sistemlerinde CH_4 oranının artırılmasının ürün gaz saflığını azalttığı ve desorpsiyon aşamasını uzattığı bildirilmiştir. Bu çalışmada, giriş gazı karışımının içeriğine bağlı olarak adsorban seçiminin ve çevrim sürelerinin ayarlanmasının kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Li ve ekibi, giriş gazı karışım oranlarına göre PSA sistemlerinin özelleştirilmesinin enerji verimliliğini ve ürün gaz saflığını artırabileceğini ifade edilmiştir. Çalışma, özellikle biyogaz uygulamalarında yüksek CO_2 ve CH_4 içeriğine sahip karışımların adsorban yüzeyinde farklı seçicilik oranları oluşturduğu sonuçunu vermiştir. Bu sebeple PSA sistemlerinin verimli çalışabilmesi için giriş gaz karışımının detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerektiği belirtilmektedir [71].

Yang, Lin ve Zhang (2018), PSA ile hidrojenin saflaştırılmasında kullanılan gaz karışımlarındaki CO_2, CO ve CH_4 oranlarının ürün gazı saflığına etkilerini gözlemlemiştir. Bu çalışma, gaz karışımındaki yüksek CO_2 oranının adsorpsiyon kapasitesini artırdığını ve

daha yüksek saflıkta hidrojen elde edilmesini sağladığını göstermiştir. Ancak bunun desorpsiyon sürecini daha zor hale getirdiği ve rejenerasyon sırasında daha fazla enerji gerektirdiği belirtilmiştir. CO ve CH_4 oranlarının artırılmasının, bu gazların adsorban yüzeyine daha zayıf bağlanması nedeniyle ürün gazındaki hidrojen saflığını azalttığı bildirilmiştir. Yang ve ekibi, farklı gaz karışımları için ideal çevrim sürelerinin ve adsorban tiplerinin belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışma, giriş gazı karışım oranlarına göre ayarlanan PSA düzeneklerinin esnek bir şekilde ayarlanması ile ürün gazı saflığı artırılırken enerji tüketimini optimize edebileceğini göstermektir [72].

Zhang, Liu ve Gao (2020), PSA düzenekleri ile hidrojen üretiminde kullanılan gaz karışımlarındaki azot, metan ve karbondioksit oranlarının PSA üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, gaz karışımında yüksek miktarda azot bulunmasının ürün gazında saflık kaybına ve çevrim sürelerinin uzamasına neden olduğu belirtilmiştir. Karbondioksit oranının artırılması ile adsorpsiyon kapasitesinin arttığı ve safsızlıkların daha etkili bir şekilde giderilmesini sağlamıştır. Fakat bu durumun desorpsiyon aşamasını daha zor hale getirdiği ve enerji tüketimini artırdığı belirtilmiştir. Giriş gazında metan oranının yüksek olduğu durumlarda ise ürün gazının saflığının azaldığı bu sebeple çevrim sürelerinin optimize edilmesi gerektiği bildirilmiştir. Zhang ve ekibi, PSA sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak ve ürün gazı saflığını optimize etmek için giriş gazı karışımındaki bileşen oranlarının dikkatli bir şekilde analiz edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Bunun dışında, gaz karışımlarındaki farklı bileşenlerin adsorpsiyon ve desorpsiyon aşamalarına olan etkilerinin modellenmesi gerektiği belirtilmiştir [73].

Zhao, Kim ve Wang (2017), PSA sistemlerinde basınçlandırma hızının ürün saflığı ve gaz adsorpsiyonu üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde analiz etmiştir. Bu çalışmada, basınçlandırmanın hızlı yapıldığı uygulamalarda kolondaki gaz moleküllerinin adsorban yüzeyi ile yeterli sürede etkileşime girmemesine neden olduğu ve bunun da adsorpsiyon kapasitesini azalttığı belirtilmiştir. Sonuç olarak, ürün gazında istenilen saflığa ulaşılamadığı ve kolon verimliliğinin azaldığı belirtilmiştir. Diğer yandan, basınçlandırmanın yavaş olduğu uygulamalarda gaz moleküllerinin adsorban yüzeyi ile daha iyi temas etmesini sağladığı ve bu sayede adsorpsiyon kapasitesini artırdığı bildirilmiştir. Ancak, basınçlandırmanın yavaş olmasının çevrim sürelerini uzattığı için toplam işlem hızını düşürdüğü ve enerji tüketimini artırdığı ifade edilmiştir. Zhao ve ekibi, PSA sistemlerinin performansını iyileştirmek için basınçlandırma hızının gaz karışımının içeriğine, elde

edilmek istenen ürün saflığına ve kullanılan adsorbanın türüne bağlı olarak optimize edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Çalışmada, bu parametrenin özellikle biyogaz ve hidrojen saflaştırma proseslerinde enerji tüketimi ve işletme maliyetleri üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir [74].

Park ve Lee (2018) ise PSA teknolojisinde desorpsiyon hızının hidrojen saflaştırma prosesleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, desorpsiyon aşamasının yüksek hızlarda gerçekleşmesinin adsorbanda biriken gaz moleküllerini daha hızlı uzaklaştırılmasını sağladığı, böylece kolonun bir sonraki döngüye daha kısa sürede hazır olacağı belirtilmiştir. Böylece toplam çevrim süresinin kısalması ve proses hızının artması sağlanmış olacaktır. Ancak, yüksek desorpsiyon hızlarında enerji tüketiminin arttığı ve bazı durumlarda adsorpsiyon kapasitesini düşürerek ürün gazındaki saflığı olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Diğer yandan, düşük desorpsiyon hızlarında enerji tüketiminin azalmasıyla daha kararlı bir gaz saflaştırma prosesi sağlandığı, ancak çevrim sürelerinin uzamasıyla proses verimliliğinin azaldığı belirtilmiştir. Park ve Lee, hem enerji verimliliğini hem de ürün kalitesini optimize etmek için desorpsiyon hızının gaz karışımının özelliklerine ve operasyonel hedeflere göre dikkatlice ayarlanması gerektiğini önermişlerdir. Bu çalışmada, özellikle yakıt hücreleri gibi yüksek saflıkta hidrojen gerektiren uygulamalarda desorpsiyon hızının önemi vurgulanmıştır [75].

Silva ve diğerleri (2019), PSA uygulamalarında basınçlandırma ve desorpsiyon hızlarının biyogazın saflaştırılması üzerindeki etkilerini detaylı olarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, basınçlandırmanın hızlı yapıldığı durumlarda CO_2 gibi polar özellikteki gazların kolon boyunca daha hızlı ilerlemesine neden olduğu ve bunun ürün gazındaki CH_4 saflığını azalttığı bildirilmiştir. Aynı zamanda basınçlandırmanın hızlı yapılması enerji tüketimini arttırırken adsorpsiyon kapasitesini de sınırladığı ifade edilmiştir. Yavaş basınçlandırma yapıldığında adsorban yüzey ile daha fazla etkileşime girdiği için ürün gazındaki metan saflığını artırmıştır. Ancak bu yöntem ile operasyon süreleri uzadığı için işlem hızını düşürmüş ve operasyonel verimliliği olumsuz etkilemiştir. Desorpsiyon hızı arttırıldığında kolonun rejenerasyon süresini hızlandırdığı ve toplam döngü süresini kısalttığı görülmüştür. Fakat bu durumun enerji tüketimini önemli ölçüde arttırdığı belirtilmiştir. Düşük desorpsiyon hızları, enerji maliyetlerini azaltmaktadır fakat adsorpsiyon sürelerini yavaşlatmış ve kolonda safsızlık birikmesine neden olmuştur. Silva ve ekibi, biyogaz arıtma proseslerinde hem enerji tüketimini azaltmak hem de ürün kalitesini artırmak için bu

parametrelerin gaz karışımı içeriğine ve ürün gazındaki hedef saflık oranına göre optimize edilmesinin kritik öneme sahip olduğunu vurgulamıştır [76].

Wang, Zhang ve Patel (2017), PSA sistemlerinde purge (temizleme) gazı miktarı ve safsızlığının çıkış gazına olan etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma, temizleme gazı miktarının artırılmasının adsorban yüzeyindeki safsızlıkları daha etkili bir şekilde temizlediğini ve bunun da ürün gazındaki saflığı artırdığını göstermiştir. Ancak daha yüksek miktarda kullanılacak purge gazının kolondaki gaz akışını artırarak enerji tüketimini de arttıracağı belirtilmiştir. Enerji verimliliği açısından daha düşük miktarda purge gazı kullanılmasının daha avantajlı olduğu belirtilmiştir. Fakat bu durum adsorbanın tam olarak temizlenememesine sebep olacağı için bir sonraki döngüde adsorpsiyon kapasitesinin azalacağı ve ürün gazındaki safsızlık oranının artacağı bildirilmiştir. Wang ve ekibi, purge gazı miktarının uygun değerlerde olmasının hem ekonomik hem de çevresel etkileri azaltmada önemli bir rol üstleneceğini vurgulamış ve bu miktarın farklı gaz karışımlarına göre revize edilmesi gerektiğini önermiştir. Bu çalışma, özellikle yoğun enerji gerektiren biyogaz saflaştırma ve hidrojen üretimi gibi proseslerde purge gazı miktarının optimize edilmesinin sistem performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir [77].

Zhang ve Li (2019), PSA sisteminin rejenerasyonu aşamasında purge gazı saflığının etkisini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışma, yüksek saflıkta purge gazının kullanıldığı durumlarda adsorban yüzeyindeki polar ve polar olmayan safsızlıkların daha etkili bir şekilde giderildiğini ve bunun da ürün gazının kalitesini artırdığını göstermiştir. Bunun yanında, yüksek saflıkta purge gazı sağlamanın işletme maliyetlerini arttıracağı ve özellikle büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda ekonomik açıdan dezavantaj sağlayacağı belirtilmiştir. Daha düşük saflıkta purge gazının kullanıldığı durumda enerji tüketiminin azaldığı, ancak adsorbanın yeterli ölçüde temizlenememesinden dolayı ürün gazındaki karbondioksit ve diğer istenmeyen safsızlıkların oranlarının artırdığı bildirilmiştir. Zhang ve Li, purge gazı saflığının ürün gazındaki istenen safsızlık miktarı ile enerji maliyetleri arasındaki dengeyi sağlamada önemli bir rol oynadığını vurgulamıştır. Bu çalışmada ayrıca purge gazının saflık derecesinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen hidrojen gibi çevre dostu uygulamalarda enerji verimliliğini artırmada önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir [78].

Hernandez ve diğerleri (2020), purge-to-feed (p/f) oranının PSA uygulamalarında ürün gazı safsızlığına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, yüksek p/f oranlarının adsorbanları daha etkili bir şekilde temizlediği ve çıkış gazında daha yüksek saflık elde edildiği belirtilmiştir. Ancak bu durumun hem enerji tüketimini arttırmış hem de ekonomik verimliliği azaltmıştır. Düşük p/f oranları uygulandığında ise enerji tüketimi azalmıştır. Bunun ürün gazındaki istenmeyen safsızlıkların artmasına neden olduğu ve gaz kalitesini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Hernandez ve ekibi, farklı gaz karışımları için p/f oranının optimize edilmesiyle enerji maliyetlerinin düşürüldüğünü ve ürün gazının safsızlığının korunabildiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında, yüksek p/f oranlarının karbon yakalama projelerinde atmosferi etkileyen emisyonların azaltılmasında önemli bir rol oynadığı ifade edilmiştir. Bu çalışmada, PSA sistemlerinin farklı uygulama alanlarına ve ihtiyaçlara göre esnek bir şekilde ayarlanmasının sürdürülebilir enerji çözümlerine katkı sağlayabileceği belirtilmiştir [79].

Kumar, Singh ve Gupta (2021), PSA sistemlerinde kullanılan purge gazı miktarının ve safsızlığının adsorpsiyon kapasitesine olan etkilerini detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, yüksek miktarda purge gazı kullanıldığında adsorbanın rejenerasyon aşamasını hızlandırırken daha istikrarlı bir adsorpsiyon kapasitesi sunduğu ve ürün gazında daha düşük safsızlık elde edilmesine olanak sağladığı belirtilmiştir. Ancak bu durumun özellikle büyük ölçekli uygulamalarda enerji tüketimini ve operasyonel maliyetleri artırdığı belirtilmiştir. Daha düşük miktarda purge gazının enerji maliyetlerini düşürdüğü, ancak adsorban yüzeyinde biriken gaz moleküllerinin tam olarak temizlenememesi nedeniyle bir sonraki çevrimde adsorpsiyon kapasitesini sınırlayabileceği bildirilmiştir. Kumar ve ekibi, purge gazı miktarı ve safsızlığının doğru belirlenmesinin, ürün gazı saflığını arttırmaya ve enerji tüketimini azaltmaya doğrudan etki edeceğini ifade etmiştir. Bu çalışmada, biyogaz arıtma ve hidrojen üretimi gibi uygulamalarda purge gazı saflığının ve miktarının optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir [80].

Silva ve diğerleri (2022), PSA sistemlerinde purge gazı miktarı ve safsızlığının biyogaz uygulamaları üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, yüksek saflıkta purge gazı kullanımının CO_2 ve H_2S safsızlıklarını içeren gaz karışımlarında adsorbanın rejenerasyonunu hızlandırdığı, ancak bunun enerji tüketimini artırdığı bildirilmiştir. Düşük saflıkta purge gazının enerji maliyetlerini düşürdüğü, fakat kolonda safsızlıkların birikmesine neden olduğu, bunun da bir sonraki çevrimde adsorpsiyon kapasitesini olumsuz

etkilediği rapor edilmiştir. Silva ve ekibi, purge gazının gaz karışımının içeriğine, istenen ürün gaz saflığına ve enerji verimliliği hedeflerine göre optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmada, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları ve biyogaz arıtma proseslerinin birlikte kullanıldığı uygulamalarda bu parametrelerin en doğru şekilde belirlenmesinin hem çevresel hem de ekonomik faydalar sağlayacağı belirtilmiştir [81].

Lee, Park ve Kim (2018), PSA uygulamalarında gaz akış hızının adsorpsiyon performansına olan etkisini detaylı bir şekilde değerlendirmişlerdir. Çalışma, gaz akış hızlarının fazla olduğu durumlarda kolondaki gaz moleküllerinin adsorban yüzeyi ile yeterli süre temas edememesine yol açtığı ve bunun da çıkış gazında safsızlığın artmasına sebep olduğunu göstermiştir. Akışın hızlı olması kolonun alt kısımlarındaki adsorpsiyon kapasitesini sınırladığı ve bunun da tüm kolon boyunca etkili bir adsorpsiyon elde etmeyi zorlaştırdığı belirtilmiştir. Diğer taraftan, düşük hızdaki gaz akışının adsorban yüzeyi ile gaz moleküllerinin daha uzun süre etkileşime girmesine izin verdiği ve bunun da ürün gazının safsızlığını azaltmayı sağladığı bildirilmiştir. Fakat, düşük akış hızlarında kolondaki basınç düşüşünün arttığı ve toplam operasyon süresinin uzadığı rapor edilmiştir. Lee ve ekibi, optimum akış hızının gaz karışımının içeriğine ve hedeflenen ürün saflığına bağlı olarak belirlenmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışma, sistem performansını iyileştirmede biyogaz saflaştırma ve hidrojen üretimi gibi yoğun enerji gerektiren uygulamalarda akış hızının optimize edilmesinin önemini vurgulamıştır [82].

Wang ve Chen (2020), gaz akış hızının PSA sistemlerinin rejenerasyon prosesleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada, yüksek akış hızlarında adsorban yüzeyinde biriken safsızlıkların kolonlardan daha hızlı uzaklaştırıldığı, bunun da çevrim sürelerini kısalttığı ve toplam proses hızını artırdığı gözlenmiştir. Ancak, akış hızlarının fazla olmasının enerji tüketimini de artırdığı ve adsorpsiyon kapasitesini sınırladığı ifade edilmiştir. Düşük akış hızları enerji tüketimini azaltmıştır, ancak kolondaki safsızlıklar tamamen giderilemediği için bir sonraki çevrimde ürün gazının kalitesinin düştüğü belirtilmiştir. Wang ve Chen, akış hızının optimize edilmesinin özellikle yüksek saflık gerektiren hidrojen saflaştırma proseslerindeki önemini vurgulamıştır. Bunun dışında, düşük akış hızlarının rejenerasyon süresini uzatmasının kolonun enerji verimliliğini olumsuz etkilediği bildirilmiştir. Bu çalışmada, akış hızının çıkış gazı safsızlığı, enerji tüketimi ve sistem kararlılığı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır [83].

Kumar, Zhao ve Zhang (2022), PSA sistemlerinde gaz akış hızının enerji tüketimi ve kolon kararlılığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma, gaz akış hızlarının fazla olmasının kolondaki basınç dengesini bozarak homojen bir basınç profili oluşturmayı ve gazların ayrıştırılmasını zorlaştırdığını belirtmiştir. Bunun da çıkış gazının safsızlık derecesini olumsuz etkilediğini rapor etmiştir. Buna karşın, düşük akış hızlarında gaz moleküllerinin adsorban yüzeyi ile daha uzun süre temas etmesinin ürün gazının saflığını artırdığı belirtilmiştir. Fakat düşük akış hızlarında kolondaki basınç farklarının yükselmesinin enerji tüketimini artırdığı belirtilmiştir. Kumar ve ekibi, PSA sistemlerinin uzun vadede operasyonel verimliliğini koruyabilmesi için akış hızının kolon tasarımına, adsorban seçimine ve hedeflenen ürün safsızlığına göre optimize edilmesinin önemini vurgulamıştır. Gaz akış hızının özellikle endüstriyel ölçekli hidrojen saflaştırma uygulamalarında dikkatlice belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [84].

2. PSA TEORİSİ

PSA teknolojisi 1960 yılında Charles W. Skarstrom tarafından patentlenmiştir (Patent No: US 2944627 A). Patentte iki kolonlu bir PSA sistemi yer almaktadır ve hava karışımından oksijen ile azotun ayrılması amacıyla kullanılmıştır. Skarstrom'un temel tasarımı geliştirilerek endüstriyel ölçekte kullanılabilir hale getirilmiştir. 1970'lerden itibaren hidrojen saflaştırma, oksijen üretimi karbondioksitten arındırma gibi birçok alanda PSA sistemi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. PSA teknolojisi geliştirilmeden önce adsorpsiyon ve desorpsiyon prensiplerine dayalı benzer gaz ayrıştırma yöntemleri kullanılmaktaydı. 1920'li yıllarda, zeolitler ve aktif karbon gibi malzemeler kullanılarak gazların seçici olarak adsorbe edilme kapasiteleri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda adsorpsiyon sürecine basınç ve sıcaklık gibi faktörlerin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmalarda bir PSA gibi döngüsel süreç yerine sabit basınç tercih edilmiştir.

1930'lar – Adsorpsiyon Teknolojisinin Gelişimi: 1930'larda adsorpsiyon teknolojisinin gelişmesiyle gaz ayrıştırma işlemlerinde, özellikle azot ve oksijenin ayrıştırılması gibi uygulamalarda adsorban kullanımı yaygınlaşmıştır. Adsorban kullanılan bu uygulamalarda genellikle sabit basınç altında çalışmalar yapılmıştır. Bu dönemde sıcaklık salınımlı adsorpsiyon (TSA) gibi sistemler de tercih edilmiştir. Bu teknoloji PSA'da olduğu gibi basınç değişimi yerine sıcaklık farkını kullanarak adsorpsiyon ve desorpsiyon döngüsünü gerçekleştirmektedir.

1940'lar ve 1950'ler – Zeolitlerin Keşfi ve Kullanımı: 1940 ve 1950'li yıllarda geliştirilen adsorban malzemeleri sayesinde gazların ayrıştırılması daha seçici yapılmaya başlanmıştır. Özellikle zeolitlerin keşfi, PSA teknolojisinin temelini oluşturan önemli bir gelişme olmuştur. Ancak, PSA döngüsü tam olarak formülleştirilememiştir.

PSA ile ilgili ilk bilimsel makale 1970'lerde Knaebel ve Ruthven tarafından hazırlanmıştır. Bu araştırma, PSA süreçleri, kinetik ve termodinamik modeller üzerinde detaylı analizler içermektedir. Ruthven DM, Farooq S ve Knaebel KS.'nin, "Pressure Swing Adsorption" adlı çalışması, daha kapsamlı bir kaynak olsa da PSA teknolojisinin gelişimini ayrıntılı olarak ele almaktadır [85].

PSA, gazların saflaştırılmasında ve ayrıştırılmasında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Basınç farkını kullanarak, çeşitli gaz bileşenlerinin adsorbanlar ile tutularak birbirinden ayrılmasını sağlar. Endüstriyel alanlarda hidrojen, oksijen ve azot gibi gazları saflaştırmada PSA tercih edilen bir teknolojidir.

2.1. Adsorpsiyon ve Desorpsiyon Prensipleri

PSA teknolojisi, adsorpsiyon ve desorpsiyon prensibini kullanarak gaz karışımlarından istenilen safsızlıkları ayırmak için kullanılır. PSA sistemleri, karışık gazı yüksek basınç altında adsorbanlara yönlendirme ve burada safsızlıkların adsorbe edilmesi ve daha sonra bu safsızlıkların düşük basınçta dışarı atılması (desorpsiyon) ilkesine göre çalışır. Adsorpsiyon işlemi, genellikle katı halde kullanılan adsorbanların Van der Waals kuvveti gibi moleküler bağ kuvvetleri ile belirli gaz moleküllerinin tutulmasıdır. PSA yönteminde adsorpsiyon ve tersi olan desorpsiyon işlemi basınç değişimi ile gerçekleşir. Yüksek basınçta adsorbanların gazları tutma kapasitesi artarken düşük basınçta bu gazlar serbest bırakılır. Bu nedenle adsorpsiyon kapasitesi uygulanan basınca göre değişmektedir.

Adsorpsiyon türleri (fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon)

Fiziksel Adsorpsiyon: PSA teknolojisinde yaygın olarak kullanılan adsorpsiyon türüdür. Adsorbanlar ve gaz moleküllerinin Van der Waals kuvvetleri ile birbirlerine bağlanmaları bu adsorpsiyona bir örnektir. Bağ kuvveti zayıftır ve genellikle fiziksel adsorpsiyonlar geri dönüşlüdür.

Kimyasal Adsorpsiyon: Adsorbanların yüzeyi ile gaz moleküllerinin kimyasal bağ ile bağlanmasıdır. Kimyasal adsorpsiyonda bağ yapısı güçlü olduğu için genellikle PSA gibi uygulamalarda tercih edilmez.

Safsızlıkların seçici bir şekilde adsorplanması PSA sisteminin başarısını belirler. Bu seçicilik, moleküllerin boyutlarına, kimyasal özelliklerine, adsorbanların gözenek ve yüzey yapısına bağlı olarak değişmektedir.

2.2. PSA Döngüsü

PSA'da basınç değişimlerinden faydalanarak 4 ana basamakta saflaştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu basamakların optimize edilmesi, sistem verimi ve saflık derecesinin ayarlanması açısından oldukça önemlidir. Bu aşamalar, adsorpsiyon, desorpsiyon, temizleme (purge) ve basınçlandırmadır. Adsorpsiyon aşamasında gaz karışımı yüksek basınç altında PSA kolonuna gönderilir. Burada, safsızlıkların adsorbanlar ile tutulması sağlanır. Desorpsiyon aşamasında, basınç düşürülerek adsorbanlar tarafından tutulan safsızlıkların bırakılması sağlanır. Yıkama işleminde ise bir inert gaz yardımıyla sistem safsızlıklardan temizlenir. Basınçlandırma işlemi ile sistem tekrar yüksek basınca getirilerek bir sonraki döngüye hazırlanmış olur.

2.3. PSA Sistemlerinde Kullanılan Adsorban Malzemeler

Adsorban seçimi PSA performansı açısından kritik önem taşımaktadır. Her adsorban malzemesinin farklı moleküllere seçiciliği vardır ve farklı adsorpsiyon kapasiteleri sunar. PSA sisteminde adsorban olarak genellikle zeolitler aktif karbon ve karbon moleküler elekler kullanılır. Her adsorban gözenek yapısına, yüzey alanına ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak adsorpsiyon performansı gösterirler. Zeolitler, gözenekli yapısı ve yüksek yüzey alanı yapısıyla polar molekülleri adsorplama konusunda oldukça etkilidir. Aktif karbon, özellikle karbondioksit gibi polar özelliğe sahip gazlar için yüksek adsorplama özelliğine sahiptir ve PSA sistemlerinde çok sık kullanılırlar. Karbon moleküler elekler ise moleküler boyut farklılıklarına göre safsızlıkları ayrıştırmada tercih edilir. Azot ve oksijen gazlarını tutma gibi uygulamalarda tercih edilir.

2.4. PSA Hesaplamalarında Kullanılan Formüller

PSA hesaplamalarında kullanılan formüller, sistem performansının değerlendirilmesinde ve optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Matematiksel modeller ve denklemler, basınç salınımlı adsorpsiyon sistemlerinde saflık, verimlilik, enerji tüketimi ve kütle transfer oranları gibi parametreleri belirlemek için kullanılır. Bu hesaplamalar, adsorpsiyon kapasitesinden gaz akış hızına, akış rejimlerinden enerji verimliliğine kadar çok çeşitli değişkenlerin analizine olanak tanımaktadır. Bu hesaplamalar, sistem tasarımında ve operasyonlarında optimum koşulların elde edilmesine katkıda bulunmaktadır.

2.4.1. Adsorpsiyon izoterm modelleri

PSA'da gaz molekülleri ile adsorban arasındaki etkileşimleri açıklamak için en çok tercih edilen izoterm modelleri Langmuir İzotermi ve Freundlich İzotermi'dir. Adsorpsiyon kapasitesinin ve verimliliğinin optimize edilmesinde en yaygın kullanılan modellerdir. Eş. 2.1'de verilen Langmuir İzoterm modeli adsorpsiyonun homojen bir yüzeyde gerçekleşerek her adsorpsiyon noktasının aynı enerjiye sahip olduğunu varsaymaktadır. Genellikle tek katmanlı adsorpsiyon uygulamaları için uygundur.

$$q_e = \frac{q_m KP}{1+KP} \tag{2.1}$$

Freundlich izoterm modeli ise heterojen yüzeylerdeki adsorpsiyonu tanımlamak için kullanılmaktadır. Eş. 2.2'de verilen bu eşitlik genellikle adsorpsiyonun çok katmanlı gerçekleştiğini varsaymaktadır.

$$q_e = K_f P^{1/n} \tag{2.2}$$

2.4.2. Adsorpsiyon kinetiği modelleri

PSA sürecinde adsorpsiyon hız mekanizmalarını açıklamak ve adsorpsiyon verimliliğini tahmin etmek için Pseudo kinetik modelleri kullanılmaktadır. Birinci dereceden Pseudo kinetik modeli Eş. 2.3'de olduğu gibi, adsorpsiyon hızının adsorban yüzeyindeki boş adsorpsiyon alanlarının sayısına bağlı olduğunu varsaymaktadır.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \tag{2.3}$$

İkinci dereceden Pseudo kinetik modeli ise adsorban yüzeyindeki boş alanların karesiyle adsorpsiyonun doğru orantılı olduğunu Eş. 2.4'deki eşitlikle açıklamaktadır.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \tag{2.4}$$

2.4.3. Gaz akış ve kütle transfer modelleri

Gazın PSA kolonundaki hareketi ve kütle transferini açıklamak için kullanılabilecek denklemlerdir. Eş. 2.5'de verilen lineer kütle transfer hızı modeli, adsorpsiyon sürecinde hızı belirleyen temel mekanizmanın adsorban üzerindeki konsantrasyon gradyanı olduğunu varsaymaktadır.

$$\frac{dq}{dt} = k_m(q^* - q) \tag{2.5}$$

Akış rejimi analiz modelinde, gazın kolon boyunca gerçekleştirdiği hareket yapısını anlamak için Eş. 2.6'da verilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{2.6}$$

2.4.4. PSA döngü dinamikleri

Adsorpsiyon kapasitesini hesaplamak için adsorpsiyon süresince bir kolonun giriş ve çıkışına geçen toplam gaz miktarını belirlemeyi sağlayan Eş. 2.7'de verilen integral kullanılmaktadır.

$$C = \int_{t_0}^{t_f} Q(t)dt \tag{2.7}$$

Çıkış gazındaki hidrojenin ne kadar saf olduğunu belirlemek için Eş. 2.8'de verilen formül kullanılmaktadır.

$$Saflık(\%) = \frac{H_2\ mol\ kesri}{Toplam\ gaz\ mol\ kesri} \times 100 \tag{2.8}$$

Sistem performansını değerlendirmede kritik bir parametre olan geri kazanım verimliliği, giriş gazındaki hidrojenin ne kadarının saflaştırılarak ürün gazında geri kazanıldığını Eş. 2.9'daki eşitlik ile hesaplamak mümkündür.

$$\eta = \frac{H_2\ çıkış\ akışı\ (mol/s)}{H_2\ giriş\ akışı\ (mol/s)} \times 100 \tag{2.9}$$

2.4.5. Enerji ve basınç dengeleri

Bir akışkanın sistem içinde akarken karşılaştığı sürtünme kaynaklı basınç kaybını hesaplamak için Eş. 2.10'da verilen Darcy-Weisbach denklemi kullanılmaktadır. Boru kullanılan sistemlerde enerji kaybını minimize ederek tasarımın verimliliğini arttırmada kritik bir öneme sahiptir.

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \tag{2.10}$$

Sistemdeki enerjiyi veya iş transferini hesaplamak için ise Eş. 2.11'den faydalanılmaktadır. Bu denklem özellikle enerji hesaplamalarında mühendislik tasarımları için kullanılan en temel araçlardandır. Verimlilik parametresinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi sistem enerji tüketimini optimize etmek konusunda faydalı olmaktadır.

$$W = \frac{\Delta P \cdot Q}{\eta} \tag{2.11}$$

3. PSA İLE HİDROJEN SAFLAŞTIRMA SÜRECİ

Hidrojenin kullanımı kadar üretim yöntemleri de önemli olmaktadır. Hidrojen hem fosil kaynaklardan hem de yenilenebilir kaynaklardan çeşitli yöntemler kullanılarak üretilebilir. Fosil yakıtlar kullanılarak hidrojen üretimi, hidrokarbon reformasyonu ve hidrokarbon pirolizi olarak iki ana yöntemle gerçekleştirilir. Yenilenebilir enerji temelli hidrojen üretimi ise biyokütle prosesi ve su ayrıştırma yöntemleridir.

Yanma sonrası egzoz gazlarının karbon emisyonuna sebep olması saflaştırılmış gazın atık kısmını etkilemektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanımında safsızlığı büyük önem taşımaktadır. Belirli bir safsızlık seviyesine ulaşmış hidrojen, etkili ve güvenilir bir enerji kaynağı olmaktadır. Hidrojenin saflığını etkileyen en önemli unsurlar karbon monoksit, karbon dioksit, metan, su buharı ve kükürt olarak sayılabilir. Hidrojenin kullanım alanlarına göre bu safsızlıklar çeşitli sorunlara yol açabilir. Yakıt hücrelerinde kullanılan hidrojenin saf olmaması durumunda katalizörler etkilenebilir, kimyasal reaksiyonlar sonucu korozyon oluşabilir ve bu durum yakıt pilinin ömrünü, verimini ve hücre performansını doğrudan etkiler. Rafinerilerde hidrojenleme işlemi ve amonyak üretimi gibi kimya endüstrisinde reaksiyon verimi çok önemlidir. Safsızlıklar reaksiyon verimini azaltırken aynı zamanda istenmeyen yan ürünlerin çıkmasına da sebep olur. Elektronik sistemlerde yarı iletkenlerin üretiminde hidrojen kullanılmaktadır. Üretimin kalitesi ve malzeme özelliklerinin olumsuz etkilenmemesi için hidrojenin yüksek saflıkta olması gerekmektedir.

Günümüzde hidrojeni saflaştırmak için basınç salınımlı adsorpsiyon, katalitik prosesler ve elektroliz yöntemleri kullanılmaktadır. Saflaştırma işlemi sayesinde endüstriyel süreçlerin ekonomik ve verimli olması sağlanabilmektedir. Aynı zamanda saf hidrojen kullanımı ile zararlı emisyon ve istenmeyen yan ürün oluşumunun azalması, çevresel etkilerin azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. Alternatif enerji kaynağı arayışı ve sürdürülebilir enerji çözümleri açısından yüksek saflıkta hidrojen kritik bir bileşen olarak görülmektedir.

PSA sistemi karmaşık ekipmanlara gerek duymaz ve adsorbanlar tekrar tekrar kullanılabilir bu nedenle operasyonel maliyetleri düşüktür. Basınç değişimini kullanarak çalışan bir yöntem olduğu için diğer yöntemlere göre düşük enerji tüketimi sunmaktadır. Sistem, üretim kapasitesi ve saflık derecesi ihtiyacına göre kolayca ölçeklendirilebilir. Optimize edilmiş bir

PSA sistemi ile %99,99 derecesindeki yüksek saflıklara kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Otomatik sistemler kurulabilmesine elverişlidir ve insan müdahalesi minimum düzeyde tutulabilir.

3.1. PSA Ünitelerinin Tasarımı

PSA sistemleri tasarlanırken kolon boyutu, akış hızı, basınç ve sıcaklık gibi çeşitli parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu parametrelerin optimize edilmesi ile sistem performansı yüksek saflıkta hidrojen elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kolon boyutu, çap ve yüksekliğinin ayarlanması ile adsorban miktarını ve gazın kolon içerisindeki kalış süresini etkilemektedir. PSA sisteminin toplam kapasitesi ve verimi için oldukça önemlidir. Akış hızı, saflaştırılacak olan gazın kolon içerisindeki adsorbanla temas süresini belirlediğinden dolayı istenen saflık düzeyine ulaşmak için optimize edilmelidir. PSA sistemlerinde basınç arttıkça adsorpsiyon kapasitesi de artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda gazların moleküler hızlarının yavaşlaması, Van der Waals kuvvetlerinin etkisini arttırdığından, fiziksel adsorpsiyonun da artmasını sağlar.

3.2. PSA Parametrelerinin Optimizasyonu

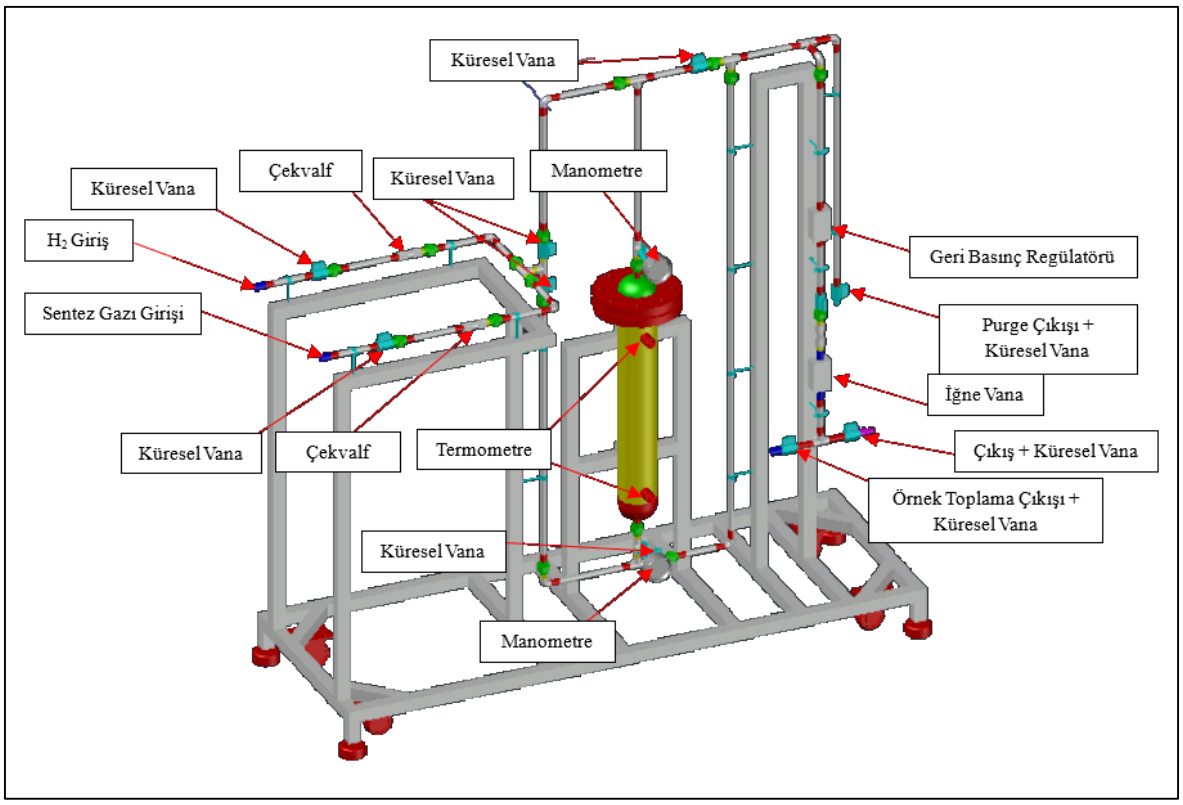
PSA sistemi döngü süresi, basınç farkı, purge-to-feed (p/f oranı) ve adsorban seçimi gibi parametrelere sahiptir. Bu parametrelerin optimizasyonu, sistem performansının ve yüksek hidrojen çıktısının elde edilmesi için gereklidir. Döngü süresinin optimize edilmesi sistemin devamlılığına ve verimine katkı sağlamaktadır. Basınçlandırma, adsorpsiyon, desorpsiyon ve purge aşamalarının her birinin tamamlandığı süreler belirlenir ve bir sonraki döngüye kayıpsız geçilebilmesi sağlanır. Basınç farkı, adsorpsiyon ve desorpsiyon aşamaları arasındaki farkı göstermektedir. Genellikle basınç değişiminin takip edilebilir olması ve doğru aşamalarda gerçekleşmesi otomasyon ile takip edilebilmektedir. PSA sisteminin temel parametrelerinden biri p/f oranıdır. Purge gazının, temizlenecek olan karışım gazına oranını ifade etmektedir. Bu oranın düşük olması sistemin tam olarak temizlenmemesine, yüksek olması ise hidrojen veya purge aşamasında kullanılan inert gazın kaybına neden olabilir. Enerji tüketimi ve ürün kaybı yaşamamak adına p/f oranı doğru ayarlanmalıdır. Ayrıştırılması istenilen safsızlıklar için doğru p/f oranının seçilmesi, saflık düzeyini olduğu gibi enerji tüketimini de etkilemektedir.

3.3. PSA ile Diğer Saflaştırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Hidrojen saflaştırma konusunda günümüzde çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, istenilen saflık derecesine, gaz karışımına ve uygulama alanlarına göre değişiklik göstermektedir. Membran bazlı saflaştırma işlemi elek prensibiyle hidrojen gibi küçük moleküllerin geçmesini sağlarken daha büyük molekülleri tutarak safsızlıkların ayrışmasını sağlar. Ancak bu yöntem ile PSA kadar yüksek saflıklar elde edilemeyebilir. Bu yöntem düşük enerji tüketimiyle öne çıkmaktadır. Kriyojenik ayırma işlemiyle gazlar soğutularak sıvı hale getirilir ve ayrışmaları sağlanır. Bu yöntem yüksek enerji tüketimi gerektirse de çok yüksek saflıklar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Kimyasal adsorpsiyon ile doğrudan belirli safsızlıkların adsorplanması sağlanabilmektedir ancak PSA sistemi gibi bir sürekliliği yoktur. Bu sistemler karşılaştırıldığında PSA, döngüsel özelliği, düşük enerji tüketimi ve yüksek saflık eldesi ile diğer sistemlere göre avantaj sağlamaktadır. Örneğin, 1 kW'lık PEM yakıt pili için gerekli olan hidrojen saflığını (%99,99) elde etme yöntemlerini kıyasladığımızda, PSA düşük enerji tüketimi (0,3-0,6 kWh/kg H_2) ve uygun işletme maliyetleri (1,5-2 USD/kg H_2) ile öne çıkmaktadır. PSA, %99,99 saflık sağlarken, geri kazanım oranı %70-85 arasında değişmektedir. Diğer taraftan, membran teknolojisi daha düşük enerji tüketimi (0,1-0,3 kWh/kg H_2) ile maliyet avantajı sunmasına rağmen, saflık seviyesi (%98,5-99,9) PSA kadar yüksek değildir ve geri kazanım oranı da %60-80 aralığında kalmaktadır. Kriyojenik distilasyon, ultra yüksek saflıkta (%99,99+) hidrojen sağlasa da, yüksek enerji tüketimi (1-2 kWh/kg H_2) ve işletme maliyetleri (4-5 USD/kg H_2) nedeniyle daha çok büyük ölçekli endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Kimyasal absorpsiyon yöntemi ise %99,5-99,9 saflık sağlayabilmesine rağmen, enerji tüketimi (0,8-1,5 kWh/kg H_2) ve düşük geri kazanım oranı (%50-70) gibi dezavantajlara sahiptir. Sonuç olarak, PSA sistemi, düşük enerji tüketimi, uygun maliyet ve yüksek saflık avantajlarıyla, özellikle küçük ölçekli hidrojen saflaştırma uygulamaları için en dengeli ve uygun seçenek olarak değerlendirilmektedir.

4. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI

Bu çalışmada kullanılan deneysel düzenek, Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi, giriş portlarından, tek bir adsorpsiyon kolonundan ve gaz akışını düzenlemek ve saflaştırılmış ürünleri toplamak için tasarlanmış bir çıkış hattından oluşmaktadır. Yapılan bu tasarım ile gaz akışlarının kolay bir şekilde kontrol edilmesi, sistem güvenilirliğinin sağlanması ve optimum deneysel koşulların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu deney düzeneği PSA sistemlerinin gereksinimlerini karşılamak üzere özel olarak tasarlanmıştır.



Şekil 4.1. Laboratuvar ölçekli PSA deneysel kurulumunun 3B görünümü

Sistem, her biri farklı amaçlara hizmet eden iki ayrı gaz giriş hattı içermektedir.

Sentez Gazı Giriş Hattı: Bu hat, besleme gazının kolona iletilmesini sağlayan hattır. Sentez gazı bileşimi, endüstriyel reformerlar tarafından üretilen tipik gaz bileşimlerini simüle eden %2 CO, %4 CH_4, %26 CO_2 ve %68 H_2'den oluşmaktadır.

Purge Gazı Giriş Hattı: İkinci hat, purge (temizleme) adımı sırasında saf hidrojen gazı beslemesi yapabilmek için oluşturulmuştur. Bu işlem, adsorbanın yenilenmesi ve sonraki döngüler için adsorban yatağının hazır hale getirilmesi için gereklidir. Her girişten hemen sonra yerleştirilen kontrol valfleri ile geri akışı önlemek ve sistem kararlılığını korumak amaçlanmıştır. Bu vanalar, istenen akış yönünü sağlamak ve gaz akışları arasında geçişi önlemek, operasyonel güvenliği ve verimliliği artırmak için kritik öneme sahiptir.

Akış yönünü kontrol etmek, PSA sistemlerinde önemli bir parametredir ve bu, deney düzeneğinde manuel olarak çalıştırılan küresel vanalar aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu vanalar, operatörün deney sırasında akış yollarını ayarlamasına ve farklı operasyonel adımlar arasında geçiş yapmasına olanak tanımaktadır. Bu tasarım, sistemin çeşitli deneysel koşullara uyum sağlamasını mümkün kılarak esneklik ve kolaylık sağlamaktadır. Sistemde gaz çıkışını ayarlamak için ise iki ayrı çıkış portu bulunmaktadır.

Ürün Toplama Hattı: Bu hat, saflaştırılmış ürün gazını toplamak için kullanılmaktadır. İstenen çalışma basıncını korumak ve ürün gazının akış hızını düzenlemek için bu hatta bir manuel geri basınç regülatörü (BPR) ve bir iğne vanası entegre edilmiştir. BPR, sistem çalışma basıncını önceden belirlenmiş bir seviyede sabitlemektedir. Çalışma basıncı PSA performansını etkileyen kritik bir faktördür; iğne vana ile gaz akış hızı üzerinde hassas kontrol sağlanması amaçlanmıştır.

Tahliye Hattı: Sistemdeki ikinci çıkış ise, numune toplanmadığında gazı sistemden güvenli bir şekilde boşaltmak için entegre edilmiştir. Bu, sistem içinde sürekli akış sağlar ve çalışma sırasında istenmeyen basınç oluşumunu engellemektedir.

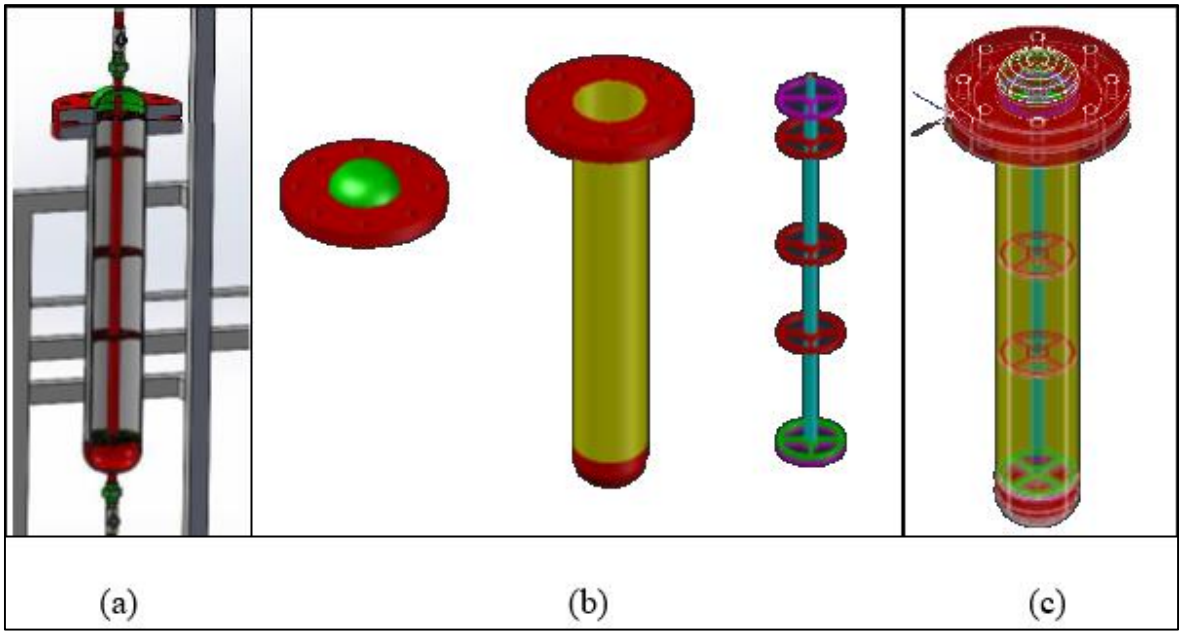
Bu hatlara ek olarak, temel parametrelerin takibini yapmak ve kontrol etmek için, adsorpsiyon kolonunun girişine ve çıkışına basınç ve sıcaklık göstergeleri yerleştirilmiştir. Bu cihazlar, sistem koşullarının gerçek zamanlı olarak gözlemlenmesini sağlayarak deney koşullarını optimize ve takip etmeye olanak tanımaktadır. Ek olarak, hidrojen gazı kullanım miktarını ve ürün akış hızını yüksek doğrulukla ölçmek için hidrojen gazı giriş hattına ve ürün çıkış hattına akış ölçerler bağlanmıştır. Bu ölçümler, sistem performansını değerlendirmek ve güvenilir deneysel sonuçlar sağlamak için kritik öneme sahiptir.

PSA sisteminin temel bileşeni olan adsorpsiyon kolonu ise 316 paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Paslanmaz çelik sınıfları arasında, 300 serisi (örneğin, 304 ve 316), üstün korozyon direnci ve agresif gazlarla uyumluluğu nedeniyle hidrojen uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [86-87]. Paslanmaz çelik, yüksek basınç altında mükemmel mekanik mukavemetinin yanı sıra hidrojen gevrekleşmesine karşı sergilediği düşük duyarlılık nedeniyle seçilmiştir. 316 paslanmaz çelik gibi yüksek kaliteli malzemenin kullanımı, özellikle yüksek basınçlı hidrojen ortamlarında korozyon ve mekanik arıza riskini en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Kolon, dişli bağlantılar kullanılarak monte edilmiş ve sızıntıları önlemek için bağlantı noktalarına Loctite sızdırmazlık maddesi uygulanmıştır. Resim 4.1'de görülebileceği gibi, deney düzeneği 316 paslanmaz çelikten yapılmış ve dişli bağlantılar kullanılarak birleştirilmiştir. Dişli bağlantılar ve Loctite sızdırmazlık, deney düzeneğinin dayanıklılığına ve güvenilirliğine katkıda bulunmaktadır. Böylece, gaz sızıntılarını önlemekte ve tutarlı performansa katkı sağlamaktadır. Bu montajlama yöntemi ile uzun süreli kullanım için sağlam ve sızdırmaz bir tasarım sağlanması hedeflenmiştir. Kolon, farklı deneysel koşullar altında test için farklı adsorbanların kolaylıkla yerleştirilmesini sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Resim 4.1. Deneysel düzeneğin imalat aşamasından görüntüsü

Deneylerden önce, kullanılan adsorbanlar nem ve safsızlıkları gidermek için 200°C'de 2 saat ön işleme tabi tutulmuştur. Bu çalışmada aktif karbonun performansı farklı çalışma şartları altında test edilmiştir. Ancak, bu çalışmada yalnızca aktif karbonla elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Aktif karbon, kolon içinde tek bir katman halinde yerleştirilmiş ve performansı sonuçlar kısmında verilen parametreler doğrultusunda değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2. Tek bir kolonun iç yapısı (a), kapak ve adsorban katman ayırıcısı olan bir kolon (b), montajı tamamlanmış kolon (c)

Deneyler için gereken sentez gazı ve saf hidrojen, sanayi tipi basınçlı silindirik tüplerden temin edilmiştir. Sentez gazı, endüstriyel reformerlardan tipik bir ürünün kompozisyonunu temsil ederken, temizleme işlemi sırasında kullanılan saf hidrojen yüksek temizlik sağlayarak adsorban malzemenin yenilenmesini kolaylaştırmaktır.

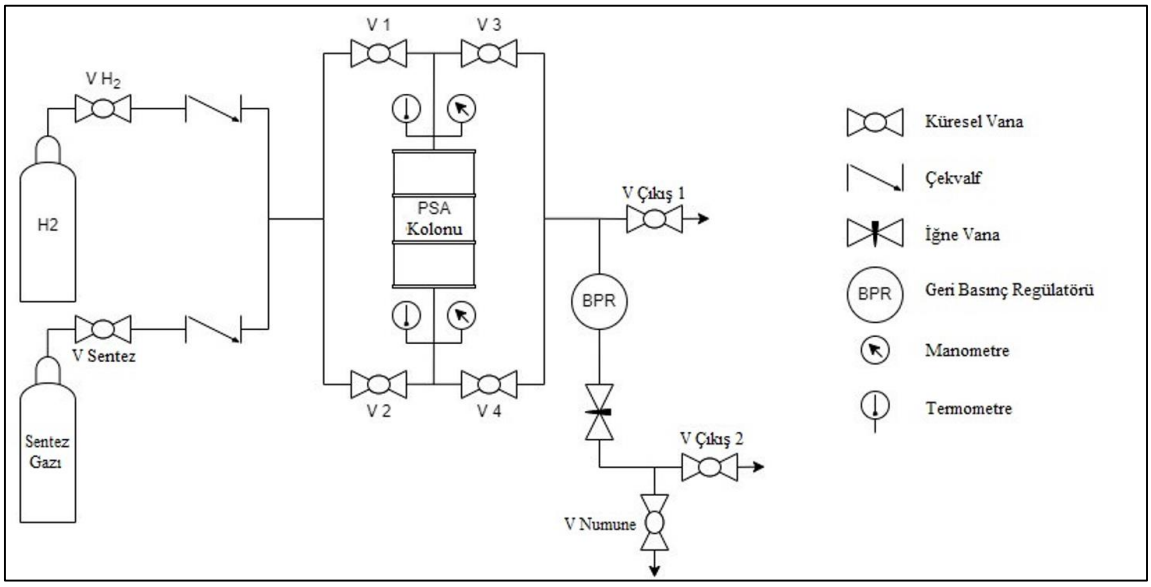
Deneysel kurulumun tasarımı ve imalatı nispeten yüksek basınçlarda çalışılması ve hidrojen gibi kolaylıkla sızma yapabilecek bir gaz ile çalışılması sebebi ile hassasiyet gösterilerek güvenlik önlemleri çerçevesinde tamamlanmıştır. Deney düzeneği sistem devreye alınmadan önce 40 bar basınca kadar basınç testine tabii tutulmuştur. Ayrıca her deney öncesinde ve deney süresince sistem basınçlandırıldıktan sonra gerekli dedektörler kullanılarak olası kaçak tespiti yapılmıştır. Sistemde ayrıca kontrol vanaları, akış ölçerler, basınç göstergeleri ve BPR gibi çok katmanlı güvenlik ve kontrol mekanizmaları içermektedir. Bu da deney düzeneğinin çeşitli deneysel yapılandırmaları ve adsorban malzemeleri test etmek için uygun

hale getirmektedir. Bu tasarım özellikleri yalnızca sistemin güvenilirliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda farklı çalışma koşulları altında PSA süreçlerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine de olanak tanımaktadır.

Kolonun iç yapısı farklı adsorbanları ayrı ayrı yerleştirebilmek için Şekil 4.2 (a)'da gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Şekil 4.2 (b)'de deney düzeneğinde bulunan kolon kapağı, kolon gövdesi, çubuk ve adsorban katman ayırıcı disklerini gösteren çizim bulunmaktadır. Rot çubuğu kolonun ortasına yerleştirilir ve bu şekilde her bir adsorbanın yüksekliğinin ayarlanabilmesi amaçlanmıştır. Genel prensip, somunları önceden belirlenmiş bir yüksekliğe yerleştirmek ve ayırma diskini yerleştirmektir. Şekil 4.2 (c)'de PSA kolonunun şeffaf bir görünümü verilmiştir. Kolonun kapağında ise sızıntıyı önlemek için kullanılan sızdırmazlık elemanının yerleştirileceği yuva yer almaktadır.

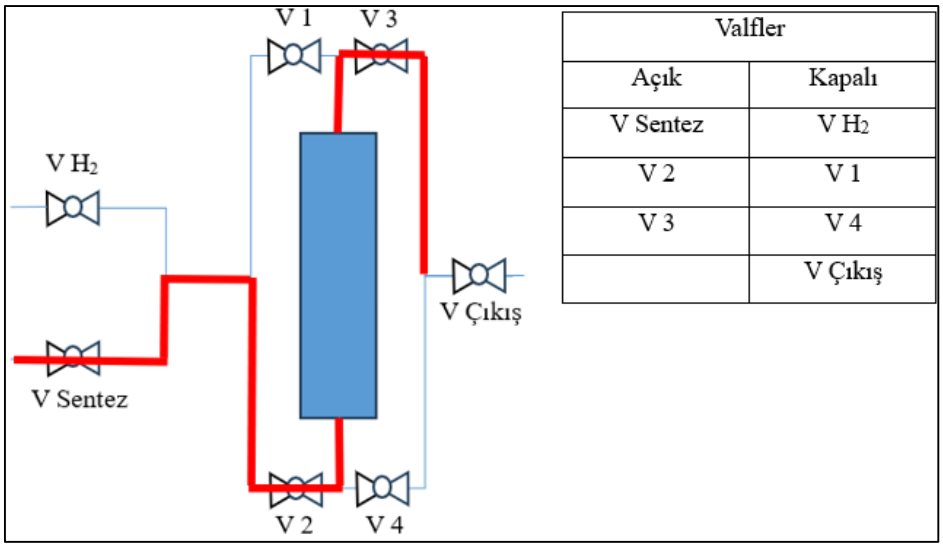
4.1. Deney Basamakları

Sistemin şematik görünümü Şekil 4.3. 'te verilmiştir. Bir deney döngüsü basınçlandırma, adsorpsiyon, desorpsiyon ve purge adımlarından oluşmaktadır. Her adım için ayrıntılı bilgi aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.3. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Adım 1 Basınçlandırma: Kolon, sentez gazı ile çalışma basıncına kadar basınçlandırmaktadır. Dahili basınçlandırma, önceden çalışma basıncı seviyesinde ayarlanmış bir BPR kullanılarak elde edilirken, akış, bir akış ölçer kullanılarak adsorpsiyon için istenen akış hızına göre ayarlanmaktadır.

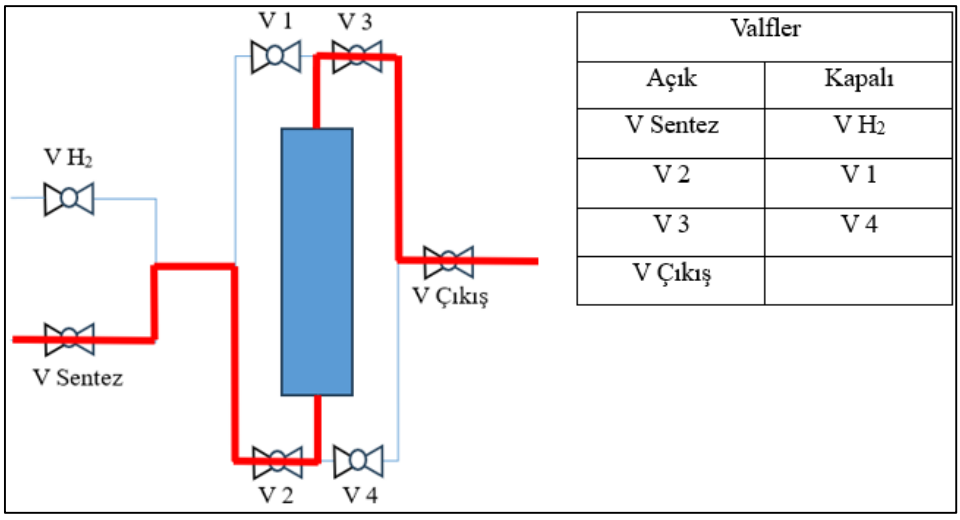


Valfler	
Açık	Kapalı
V Sentez	V H_2
V 2	V 1
V 3	V 4
	V Çıkış

Şekil 4.4. Basınçlandırma adımının basitleştirilmiş şeması

Şekil 4.4. 'te görüldüğü gibi V sentez gazı Vanası, V2 ve V3 açık konuma getirilerek aşağıdan yukarıya doğru akış sağlanmakta ve kolon basınçlandırılmaktadır.

Adım 2 Adsorpsiyon: Basınçlı kolon üzerinde sabit bir çıkış akış hızında, istenilen adsorpsiyon süresi boyunca akış sağlanmaktadır.

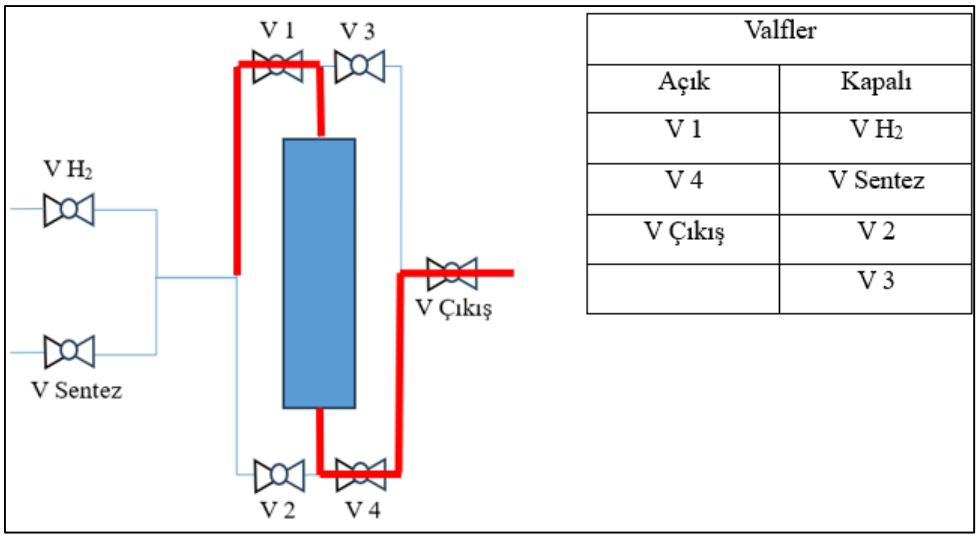


Valfler	
Açık	Kapalı
V Sentez	V H_2
V 2	V 1
V 3	V 4
V Çıkış	

Şekil 4.5. Adsorpsiyon adımının basitleştirilmiş şeması

Kolonun basınçlandırılmasından sonra çıkış vanası (V Çıkış) Şekil 4.5. 'teki gibi açılacak şekilde ayarlanmakta ve BPR ve iğne vana yardımıyla sabit bir debi elde edilmektedir.

Adım 3 Desorpsiyon: Kolondaki basıncın atmosfer basıncına düşürüldüğü adımdır.

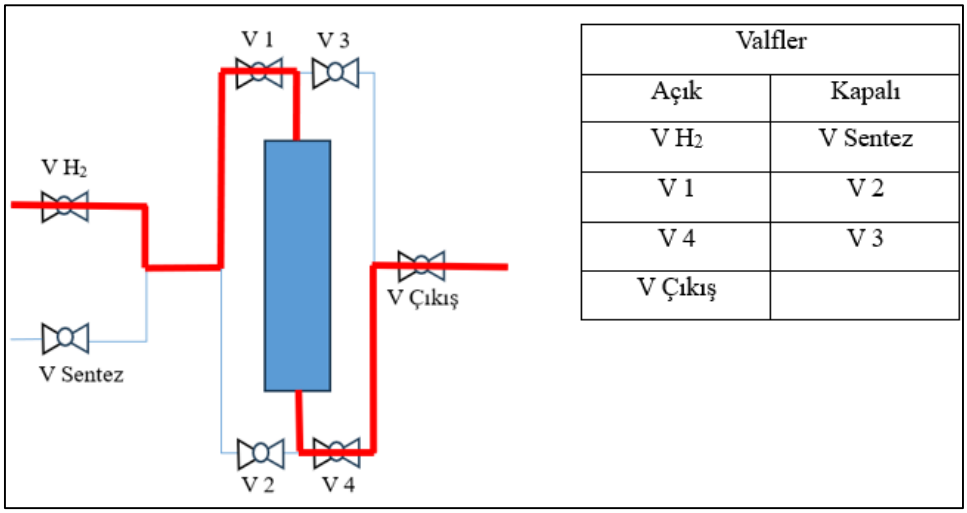


Valfler	
Açık	Kapalı
V 1	V H_2
V 4	V Sentez
V Çıkış	V 2
	V 3

Şekil 4.6. Desorpsiyon adımının basitleştirilmiş şeması

Desorpsiyon adımında, kolonda yukarıdan aşağıya doğru ters akış elde etmek için valf yönü değiştirilmektedir (Şekil 4.6.).

Adım 4 Temizleme: Adsorbanlar, önceden belirlenmiş sabit bir H_2 akışıyla bir sonraki döngü için temizlenmektedir.



Valfler	
Açık	Kapalı
V H_2	V Sentez
V 1	V 2
V 4	V 3
V Çıkış	

Şekil 4.7. Temizleme adımının basitleştirilmiş şeması

Temizleme adımında, sistem yukarıdan aşağıya doğru sürekli H_2 akışıyla temizlenir. Böylece, PSA sistemi bir sonraki döngüler için hazır hale getirilmektedir (Şekil 4.7.).

4.2. Tasarım Hesaplamaları

Kolon tasarım çalışmasının ilk aşamasında, 1 kW PEM yakıt hücresi için yaklaşık 10 L/dakika hidrojen tüketimi dikkate alınarak saflaştırılması planlanan hidrojen miktarı belirlenmiştir. PSA verimliliğinin %50 olduğu varsayılarak gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Saflaştırılması istenen sentez gazının ticari olmayan bir buharlı metanol reformerlama sistemi tarafından sağlanacağı varsayılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, bir buharlı metanol reformlama ürün gaz karışımının ortalama bileşimi %2 CO, %4 CH_4, %26 CO_2 ve %68 H_2 olarak belirlenmiştir. Bu gaz karışımı (sentez gazı) sanayi tipi sıkıştırılmış gaz tüpleri ile saflaştırmak üzere sisteme bağlanmıştır. Kolon çapını ve uzunluğunu belirlemek için aşağıda bahsi geçen literatürdeki birkaç farklı çalışma dikkate alınmıştır.

Xiao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmaya göre, ilk safsızlık olan CO'nun çıkış süresi ($t \approx 250$ s) olarak tanımlanan adsorpsiyon süresi kabul edilmiştir. Bu süre göz önünde bulundurularak bir döngü süresinde tutulan CO_2 ve CO miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca, aktif karbonun hacimsel yoğunluğu olan 0,482 g/cm^3 değeri üzerinden yatak hacmi hesabi yapılmıştır [88]. Bu çalışmaya ek olarak, Sarker ve diğerleri (çalışmalarında paylaştıkları izoterm eğrisinde, 10 atm basınç ve 293°K sıcaklıkta Zeolit 5A'nın adsorpsiyon kapasitesi yer almaktadır. Bu doğrultuda, Zeolit 5A'nın CO_2 adsorpsiyon kapasitesi, 9 bar ve 16°C'de 1250 saniye boyunca yaklaşık 4,5 mol CO_2/kg adsorban olarak hesaplanmıştır [89]. Bu değerlere dayanarak, adsorban miktarı 1200 g olarak, 250 saniyelik çevrim süresi boyunca tutulan CO ve CO_2 miktarı üzerinden ortalama bir değer olarak hesaplanmış ve yatak hacmi, hacimsel yoğunluk değeri kullanılarak belirlenmiştir. Bu miktarda adsorbanın yerleşimine uygun olacak şekilde kabuller yapılarak üretilen sistem için kolon çapı 82 mm ve uzunluk 540 mm olarak belirlenmiştir. Kolon et kalınlığı ise yapılan simülasyon sonucunda 4 mm olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler için basınç hatası %1, sıcaklık hatası %1, akış ölçüm hatası %2, operasyonel hata %2 ve hesaplama hatası %1 kabul edilmiştir. Bu doğrultuda toplam hata yüzdesi, Eş. 4.1'de verilen denklem ile yaklaşık %3,3 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam Hata} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2} = \sqrt{11} \approx 3{,}3\% \quad (4.1)$$

5. BULGULAR VE İRDELEME

Tez çalışmasının bu bölümünde, sentez gazının saflaştırılarak H_2 elde edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan adsorban olan aktif karbonun performansı incelenmiştir. Çalışma boyunca, aktif karbonun yüksek yüzey alanı ve gözenek yapısının avantajının kullanılarak sentez gazı içerisindeki CO, CO_2 ve CH_4'ün adsorplanma davranışları gözlemlenmiştir. Bu kapsamda, parametrik olarak yapılan çalışmalarla aktif karbonun çeşitli çalışma koşulları altındaki performansı değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı çalışma basınçları altında kolon tutma kapasiteleri, adsorpsiyon süreleri, purge/besleme oranı, basınçlandırma yönü ve farklı ürün debisi denemeleri yapılmıştır.

5.1. Kolonun Adsorpsiyon Kapasitesi

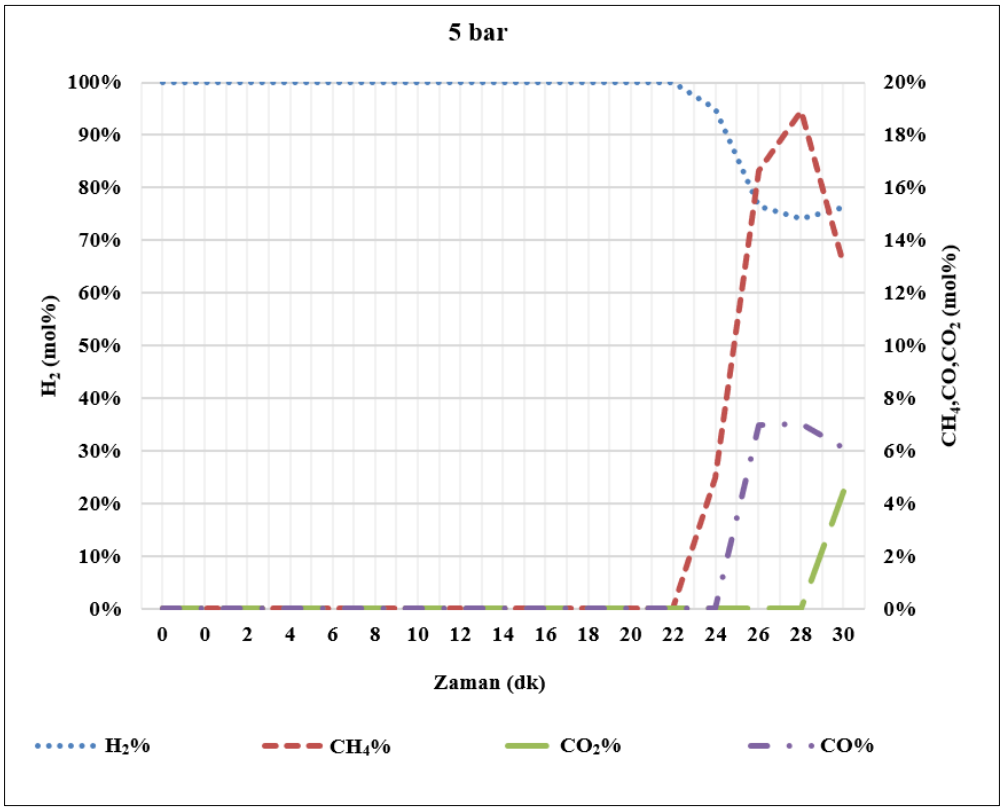
Kolonun safsızlık tutma kapasitesini belirleyebilmek amacıyla, 5, 10 ve 15 bar çalışma basınçlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler, 5 SLPM sabit ürün akış hızı elde edilmesi hedeflenerek tamamlanmıştır ve bu veriler doğrultusunda kırılma (breakthrough) eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler ile kolonun belirli basınç koşulları altında sentez gazındaki safsızlıkların ne kadar etkili bir şekilde tutulduğu hakkında bilgi elde edilmiştir.

5, 10 ve 15 bar için ilk olarak kolon istenilen çalışma basıncına kadar basınçlandırılmıştır. Ürün akışı 5 SLPM'e ayarlanmış ve 2 dk aralıklarla düzenli olarak alınan gaz numunelerinin analizleri gaz kromatografisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece, ürün gazı içeriği H_2, CO, CO_2 ve CH_4 için molar yüzde olarak belirlenmiştir. Her bir deneyden sonra kolon saf hidrojen ile tamamen rejenere edilerek bir sonraki deney için hazır hale getirilmiştir. Böylece, adsorbanın farklı basınç değerlerinde gösterdiği safsızlık tutma performansı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Her bir çalışma basıncı için deney, ürün gazı içerisinde safsızlıkların ilk kez gözlemlenene kadar geçen süreyi belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Safsızlığın ilk gözlemlendiği andan 10 dakika sonra sistem kapatılarak deney tamamlanmıştır. Geçen bu sürede alınan veriler adsorbanın doygunluk seviyesine ulaşana kadar ne kadar etkin bir şekilde çalıştığını ve çalışma basıncının tutma kapasitesi üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Şekil 5.1'de 5 SLPM sabit ürün akış hızında 5, 10 ve 15 bar çalışma basınçlarındaki tutma kapasiteleri

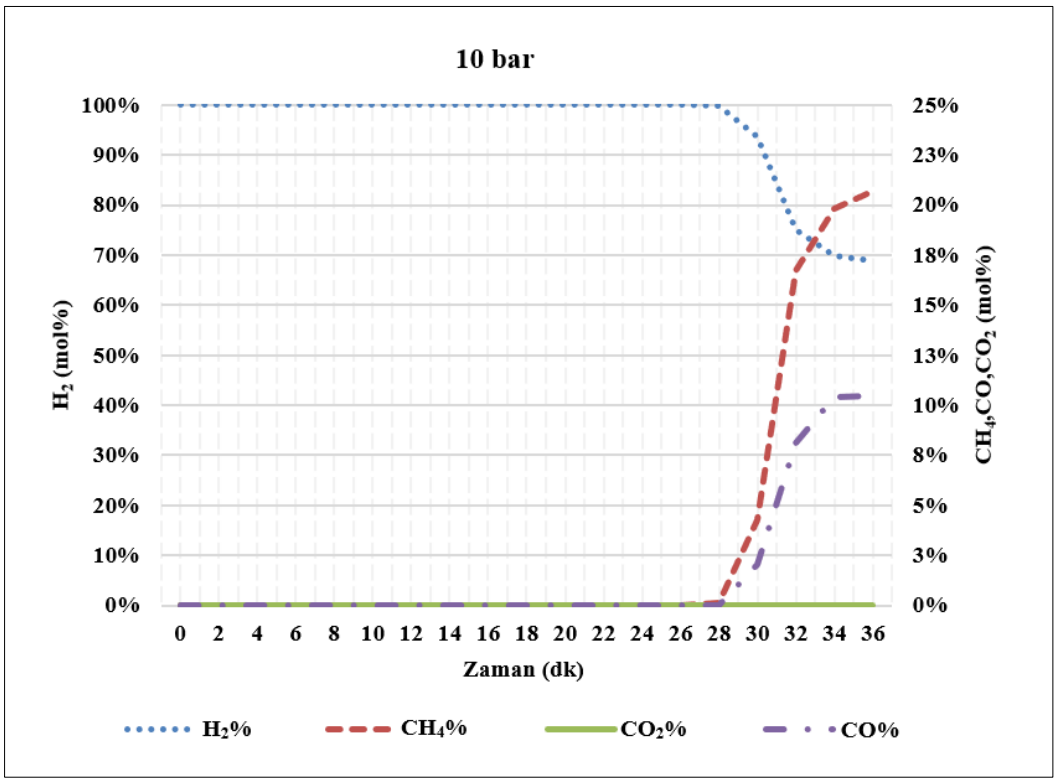
kırılma eğrileri grafiği ile detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, farklı çalışma basınçları ile birlikte değişen adsorpsiyon tutma kapasitesi açıkça görülmektedir. Sonuçlar, çalışma basıncındaki artış ile birlikte daha yüksek adsorplama kapasitelerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

5 bar basınç altında H_2 yaklaşık 22 dakika boyunca ürün gazında %100 olarak elde edilmiştir. Bu süre zarfında CO, CO_2 ve CH_4'ün etkili bir şekilde adsorplandığı görülmektedir. Ancak, 22. dakikadan itibaren H_2 oranında azalma gözlenmiş ve ayı zamanda ürün gazında CH_4 gözlemlenmiştir. 25. dakikaya kadar ise CH_4 oranının bu dakikadan sonra hızla %16 mol değerine ulaştığı görülmektedir. Takip eden sürelerde ise CO_2 ve CO daha düşük oranlarda gözlemlenmiştir. Bu durum, aktif karbonun CO_2 ve CO için daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

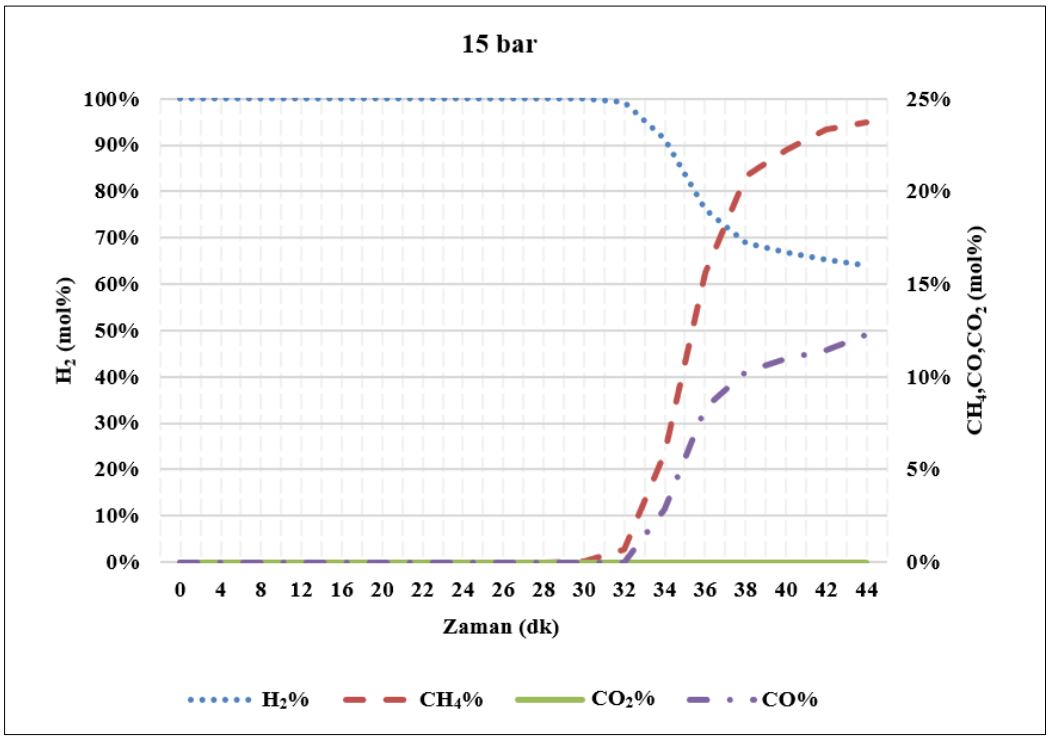


(a)

Şekil 5.1. 5 SLPM sabit ürün akış hızı için 5 bar (a), 10 bar (b) ve 15 bar (c) çalışma basıncında kırılma eğrileri grafiği



(b)



(c)

Şekil 5.2. (devam) 5 SLPM sabit ürün akış hızı için 5 bar (a), 10 bar (b) ve 15 bar (c) çalışma basıncında kırılma eğrileri grafiği

10 bar basınç altında ürün akışındaki H_2 oranı ~28 dk boyunca sabit kalmıştır. 5 bar'a kıyasla 6 dk daha uzun süre saf H_2 elde edilmiştir ve bu da basıncın artması ile beraber kolon kapasitesinin de arttığını göstermektedir. 5 bar basınçta olduğu gibi H_2'den sonra yine ilk olarak CH_4 gözlemlenmiştir ve %20 seviyelerine kısa süre içerisinde ulaşmıştır. CH_4'e kıyasla nispeten daha düşük CO oranı da yaklaşık aynı süreler içerisinde görülmüştür. Deneyin yapıldığı süre içerisinde CO_2 çıkışı gözlemlenmemiştir. Bu sonuç, CO_2'nin artan basınçla beraber daha güçlü bir şekilde adsorplandığını ortaya koymaktadır.

15 bar basınç altında ise ~30 dk boyunca sabit H_2 ürün akışı elde edilmiş ve bu süreden sonra H_2 oranında azalma tespit edilmiştir. Yine 10 bar'da olduğu gibi ilk olarak CH_4 ve CO çıkışı gözlemlenirken CO_2 çıkışı deney süresince gözlemlenmemiştir. Elde edilen bulgular, sabit sıcaklıkta basınç arttıkça gaz moleküllerinin yüzeyle daha fazla etkileşime girmesi ve termodinamik denge koşullarındaki değişiklikler nedeniyle adsorpsiyon miktarının artmasına neden olması, diğer bir deyişle Le Chatelier ilkesiyle açıklanmaktadır. Sistem basıncındaki artış, daha fazla molekülün adsorpsiyonu ile dengelenmektedir [90-92]. Her üç basınç değerinde de safsızlıkların ortaya çıkış sırasının CH_4, CO ve CO_2 olduğu görülmektedir. CO_2'nin aktif karbonda daha güçlü bir şekilde tutunması ise, aktif karbonun CO_2 için yüksek seçiciliğinden kaynaklanmaktadır. CO_2 moleküllerinin polaritesi ve aktif karbonun yüzey özellikleri bu gazın etkili bir şekilde adsorpsiyonunu sağlamaktadır.

5.2. PSA Döngü Sürelerinin Belirlenmesi

Tez çalışmasında kullanılan kolonunun safsızlıkları tutma kapasitelerinin belirlenmesinden sonra bu kapasitesinin ne kadarının bir döngü için kullanılması gerektiği sorusu önem kazanmaktadır. Literatür araştırmalarından da görüldüğü üzere PSA döngüleri elde edilen 22, 28 veya 30 dk gibi uzun döngü sürelerinden oluşmadığı görülmektedir. Ürün saflığının korunması ve sistem verimliliğinin arttırılması yönünden adsorpsiyon döngülerinin kırılma noktalarından önce tamamlanması kritik önem taşımaktadır. Kırılma süreleri süresince kullanılan adsorbanların verimliliği düşmekte ve ekonomik sürdürülebilirliği olumsuz etkilemektedir (Sircar, 2002: 93), (Ruthven, 1984: 94). Bunun yani sıra, PSA sistemleri genellikle kinetik kontrollü sistemlerdir. Kolon kapasitesinin tamamının kullanılmasının beklenmesi sistemin termodinamik dengeye yaklaşmasını gerektirmektedir. Bu da endüstriyel uygulamalarda uzun operasyon sürelerine neden olacağı için tercih edilmemektedir (Yang, 1997: 60). Uzun sürelere kıyasla kısa süreler hem zaman hem de

verimlilik açısından daha ilgi çekici bir opsiyon sunmaktadır. Kısa adsorpsiyon süreleri adsorbanın kimyasal ve fiziksel bütünlüğünü korumasına yardımcı olarak daha uzun ömürlü kullanıma olanak sağlamaktadır (Bae ve Lee, 2005: 95). Bu nedenlerle, kırılma sürelerine kıyasla daha kısa sürede seçilen adsorpsiyon süreleri hem teknik olarak hem de maddi olarak avantaj sağlamaktadır.

Bu doğrultuda yapılan literatür araştırmalarındaki kırılma sürelerine kıyasla seçilen adsorpsiyon oranları incelenmiştir. Lopes ve diğerleri (2011) çalışmalarında aktif karbon kullanarak H_2-CO_2 karışımı için kırılma eğrisi deneyleri yapmışlar ve bu süreyi 10 dk olarak belirlemişlerdir. Ancak, yüksek saflıkta hidrojen elde edebilmek için adsorpsiyon süresinin 2 dk olarak seçildiği belirtilmiştir [96]. Yine Lopes ve diğerleri (2012) yapmış oldukları başka bir çalışmada aynı gaz karışımı ile çalışarak hızlı döngülü vakum PSA yöntemi ile H_2 saflaştırma yapmışlardır. Bu çalışmalarında ise 8 dk kırılma süresi iken 1,5 dk adsorpsiyon süresi belirlediklerini rapor etmişlerdir [97]. Ribeiro ve diğerleri (2009) aktif karbon kullanarak H_2 saflaştırması üzerine yoğunlaştıkları bu çalışmada kırılma süresi yaklaşık 15 dk iken adsorpsiyon süresini 3 dk olarak seçmişlerdir [98]. Zakaria ve diğerleri (2020) çalışmasında sentez gazından H_2 saflaştırması üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada, kırılma süresinin 12 dk ve adsorpsiyon süresinin 2,5 dakika olduğu belirtilmiştir [99]. Bu doğrultuda yapılan bir diğer çalışma ise Baston-Neto ve diğerleri (2011) tarafından hidrojence zengin karışımlardan aktif karbon ve zeolit kullanarak CO_2 ayrıştırmasıdır. Burada rapor edilen süreler ise kırılma süresi için 9 dk adsorpsiyon süresi için ise 2 dk olarak seçilmiştir [100].

İncelenen tüm literatür araştırmalarında da açıkça görüldüğü gibi kolon tutma kapasitesinin ~%20 oranlık kullanımı adsorpsiyon döngü süresi olarak belirlenmiştir. Ayrıca, aktif karbonun temin edildiği firma ile yapılan görüşmelerde de önerilen değerin çalışma koşullarına bağlı olarak, kolon kapasitesinin minimum %15 maksimum %35 aralığında kullanılması gerektiği olmuştur. Bu nedenle, yapılan çalışmalar %10-40 kapasite kullanımı üzerinden hesaplanarak, deneylerde kullanılması gereken adsorpsiyon süreleri seçilmiştir.

5.3. Çalışma Basıncı Deneyleri

Kırılma eğrilerinden elde edilen sonuçlara göre, parametrik çalışmalar sırasıyla en düşük ve en yüksek tutma kapasiteleri olan 5 bar ve 15 bar'da yürütülmüştür. Başlangıçta, 5 bar çalışma basıncında, adsorpsiyon süresi, basınçlandırma yönü, temizleme/besleme oranı (p/f) ve ürün akış hızı incelenmiştir. Bu incelemelerden elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak adsorpsiyon süresi, akış hızı ve döngü denemeleri 15 bar için tamamlanmıştır.

Deneyler için 1 döngü daha önce bahsedilen döngü basamakları olan basınçlandırma, adsorpsiyon, desorpsiyon ve temizleme adımlarının tamamlanması anlamına gelmektedir. Gerçekleştirilen her deney için adsorpsiyon ve purge işlemlerinin sonunda gaz numuneleri alınmıştır. Alınan numunelerin molar yüzdeleri Agilent Technologies markasının 6890N modeli olan gaz kromatogramı ile belirlenmiştir. Her bir döngü basamakları arasında bekleme süresi olmaksızın tamamlanmıştır. PSA döngüsünün üçüncü aşaması olan desorpsiyon ise, her çalışma basıncı için basıncı yaklaşık 30 saniye içinde atmosferik seviyelere düşürerek tamamlanmıştır.

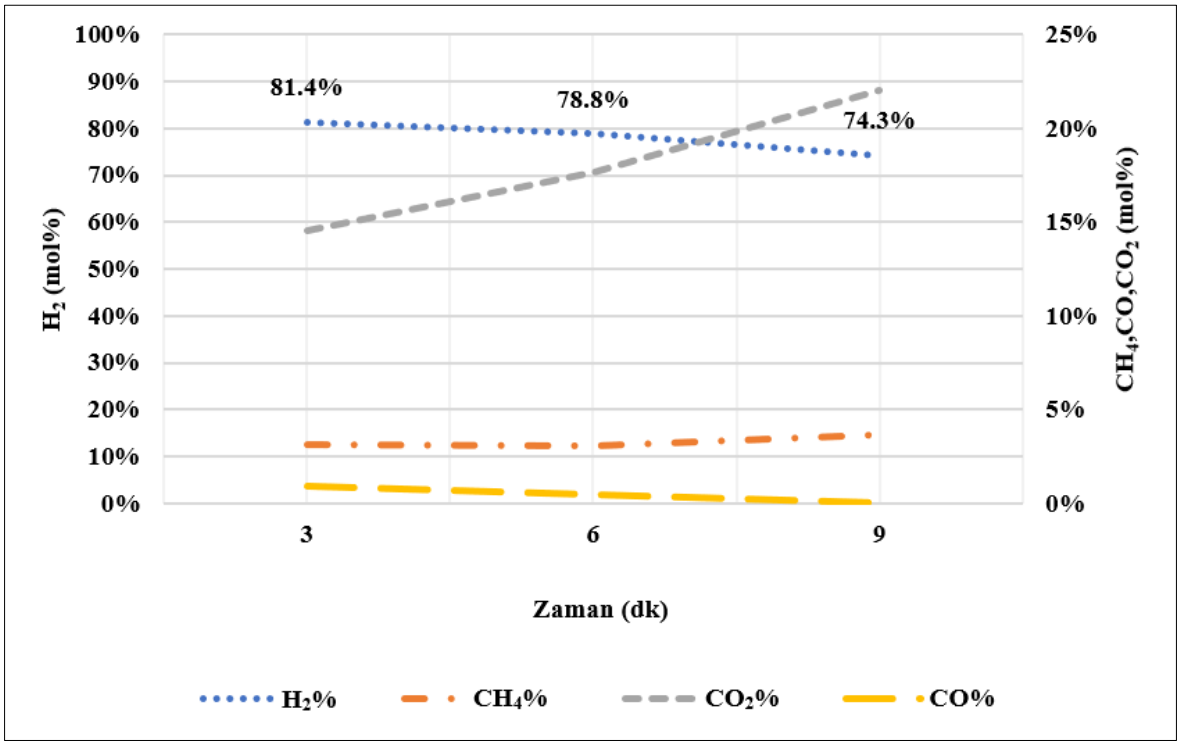
Deneyler için diğer bir önemli nokta ise adsorpsiyon ve temizleme süreleridir. Bu süreler literatürde yaygın olarak yapıldığı gibi eşit tutularak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, bir döngü için adsorpsiyon süresi 3 dk ise temizleme süresi de 3 dk olarak ayarlanmıştır. Buna ek olarak, 5 bar'da adsorpsiyon süresi etkisinin incelenmesi için literatürde yaygın olarak kullanılan 0,4 p/f oranı kullanılarak bir karşılaştırma yapılmıştır. Basınçlandırma yönü ise kolonun dikey pozisyonuna referansla aşağıdan yukarıya doğru seçilmiştir.

Deneyler tamamlandıktan sonra, optimum değerler seçilmiş ve bir sonraki deneyler için bu değerler kullanılarak çalışmaya devam edilmiştir. Ayrıca, her parametre testinden sonra, kolon saf hidrojenle tamamen rejenere edilmiş ve sonraki test için hazır hale getirilmiştir. Sistemin manuel olarak kontrol edilmesi sebebi ile oluşabilecek farklılıkların etkisini en aza indirebilmek adına her deney 3 kez yapılmıştır. Aşağıda sunulan sonuçlar ise bu üç deneysel datanın ortalaması olarak verilmiştir.

5.3.1. 5 bar çalışma basıncı

Adsorpsiyon süresi

Çalışma yapılan kolon için en optimum adsorpsiyon süresini belirlemek için 3, 6 ve 9 dk adsorpsiyon süreleri test edilmiştir. Deneyler için ilk olarak basınçlandırma adımı tamamlanmıştır. Daha sonra kolon basınçlı iken istenilen adsorpsiyon süresi boyunca 5 SLPM ürün akış hızı sağlanarak adsorpsiyon adımı tamamlanmıştır. Desorpsiyon ile kolon basıncı düşürüldükten sonra temizleme adımına geçilmiştir. Temizleme adımı süresi adsorpsiyon süreleri ile aynı uygulanmıştır. Yani, 3 dk adsorpsiyon-3 dk temizleme, 6 dk adsorpsiyon-6 dk temizleme, 9 dk adsorpsiyon-9 dk temizleme yapılmıştır. Her adsorpsiyon ve temizleme adımı sonunda ölçüm yapılmak üzere gaz numuneleri alınmıştır. Test edilen süreler için adsorpsiyon sonrası alınan gaz numuneleri kırılma süresi denemelerinden de tecrübe edildiği üzere %100 mol oranında H_2 içermekte olduğu görülmüştür. Şekil 5.2'de temizleme işleminden sonra alınan gaz numunelerinde ölçülen H_2, CO, CO_2 ve CH_4'ün molar yüzdelerini verilmiştir.



Şekil 5.3. 5 bar ve 5 SLPM sabit ürün akış hızında farklı adsorpsiyon sürelerinin karşılaştırılması

Artan adsorpsiyon ve temizleme süreleri ile birlikte H_2 yüzdesindeki azalma dikkat çekicidir. 3 dk denemesi için H_2 %81,40 iken, 6 dk için bu değer %78,76'a ve 9 dk için %73,31'e düştüğü gözlemlenmiştir. Artan adsorpsiyon süreleri ile birlikte adsorplanan safsızlık gazları (CO, CO_2, CH_4) miktarı da artmıştır. Fakat adsorplama süresi ile eşit tutulan temizleme süresi içerisinde en yüksek H_2 oranı 3 dk ile elde edilmiştir.

Sentez gazı içeriğinde H_2'den sonra en yüksek oranda bulunan CO_2'nin 3 dk için %16 olan mol yüzdesinin 9 dk için %22'ye ulaştığı görülmektedir. CH_4 oranında tüm adsorpsiyon süreleri için ciddi bir farklılık gözlemlenmemiştir. CO miktarının ise 3 dk için ~%1 civarında olduğu görülürken artan temizleme zamanı ile birlikte kolondan tamamen temizlenmiştir.

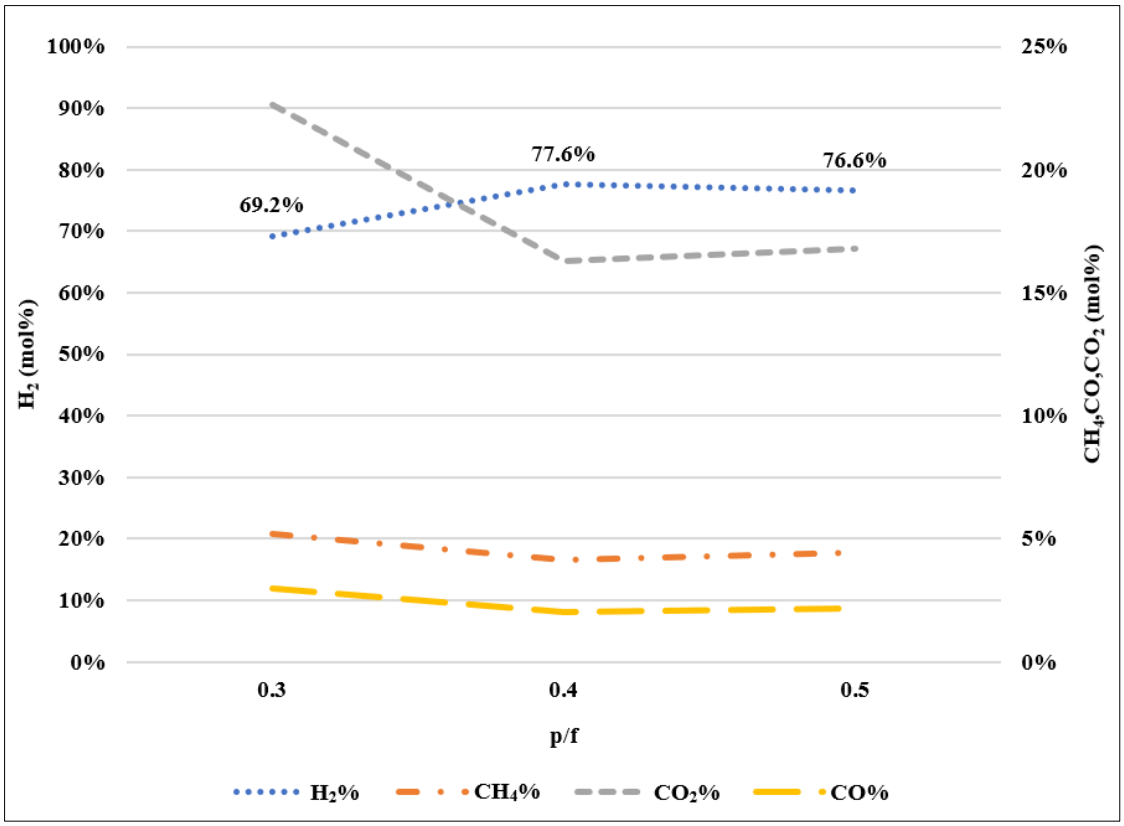
Elde edilen sonuçlara göre, 6 ve 9 dakikalık adsorpsiyon süreleri için temizleme işleminin 3 dakikalık adsorpsiyon sürelerine göre daha az etkili olduğu görülmektedir. Bu nedenle, temizleme adımından sonra en yüksek H_2 yüzdesini sağlayan 3 dakikalık adsorpsiyon süresi seçilmiş ve sonraki çalışmalar bu değer kullanılarak 5 bar'da gerçekleştirilmiştir.

Temizleme/Besleme oranı (p/f)

Temizleme/besleme oranı PSA sistemlerinde en önemli parametrelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. PSA sistemlerinde yapılan temizleme adimi kolonu bir sonraki döngüye hazırlayarak adsorban gözeneklerinde adsorplanmış safsızlıkların uzaklaştırılması için yapılmaktadır. Bu oran ürün olarak elde edilen saflaştırılmış H_2 gazının ne kadarlık bir miktarının temizleme adımında kullanılması gerektiğini ifade etmektedir. P/f oranının düşük olması kolonun yeterli oranda temizlenmesini engellemektedir. Bu da bir sonraki döngü için gazların istenilen oranda adsorplanmasına izin vermeyerek kolon tutma kapasitesini düşürmekte ve buna bağlı olarak ürün gazı saflığını etkilemektedir. P/f oranının yüksek olması ise gereksiz olarak fazla enerji harcanması ve ürün gazı geri kazanımını azaltması anlamına gelmektedir. Bu da ekonomik olarak verimli bir proses yürütülmesini engelleyen bir durum olmaktadır. Bu nedenle optimum p/f oranının belirlenmesi daha verimli ve ekonomik PSA sistemleri için kritik öneme sahiptir.

Bu doğrultuda, bu çalışma içerisinde optimum p/f oranının belirlenmesi için üç farklı oran incelenmiştir. 5 SLPM sabit ürün akış hızı için 0,3 oranı 1,5 SLPM, 0,4 2 SLPM ve 0,5 için 2,5 SLPM temizleme adımında beslenen saf H_2 akış hızını ifade etmektedir. Şekil 5.3'te

3 farklı p/f oranı için gaz olçum değerleri verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi 0,3 oranı ile %69 H_2 molar yüzdesi elde edilmiştir. Bu değerin 0.4 oranı için %78 ve 0,5 oranı için %77 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, düşük p/f oranının kolonu yeni bir döngü için hazırlamaya yeterli olmadığını açık bir şekilde göstermektedir. Bu da bir sonraki döngüde daha fazla safsızlığın ürün akışına etki edeceği ve ürün gazındaki H_2 oranının düşeceği sonucunu doğurmaktadır. 0,4 ve 0,5 oranında ise neredeyse aynı H_2 molar yüzdesi ~%78 elde edilmiştir. Temizleme adımında beslenen H_2 akış hızının artmasının kolonu 0,3 oranına kıyasla çok daha iyi temizlediği gözlemlenmiştir. Buna kıyasla, 0,4 ve 0,5 p/f değeri arasında temizleme miktarında ise kayda değer bir fark olmadığı da görülmektedir.



Şekil 5.4. Temizleme/besleme oranının karşılaştırılması

CO_2'nin 0,3 p/f için %20 seviyesinde olduğu gözlemlenirken 0,4 ve 0,5 değerleri için ~%15'e düştüğü görülmektedir. Benzer bir durumun CO ve CO_2 için de geçerli olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, seçilen p/f oranının kolonu bir sonraki döngüye hazırlamak ve daha yüksek H_2 saflığı elde edebilmek için etkili bir parametre olduğu yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır.

Düşük p/f oranlarının yeterli temizlemeyi sağlayamadığı görülmüştür. P/f oranı 0,4 ile 0,5 arasında performans açısından önemli bir fark olmaması sebebi ile daha az H_2 tüketimi gerekmesi ve geri kazanımın daha yüksek olduğu oran olan 0,4 p/f optimum değer olarak belirlenmiştir.

Basınçlandırma yönü

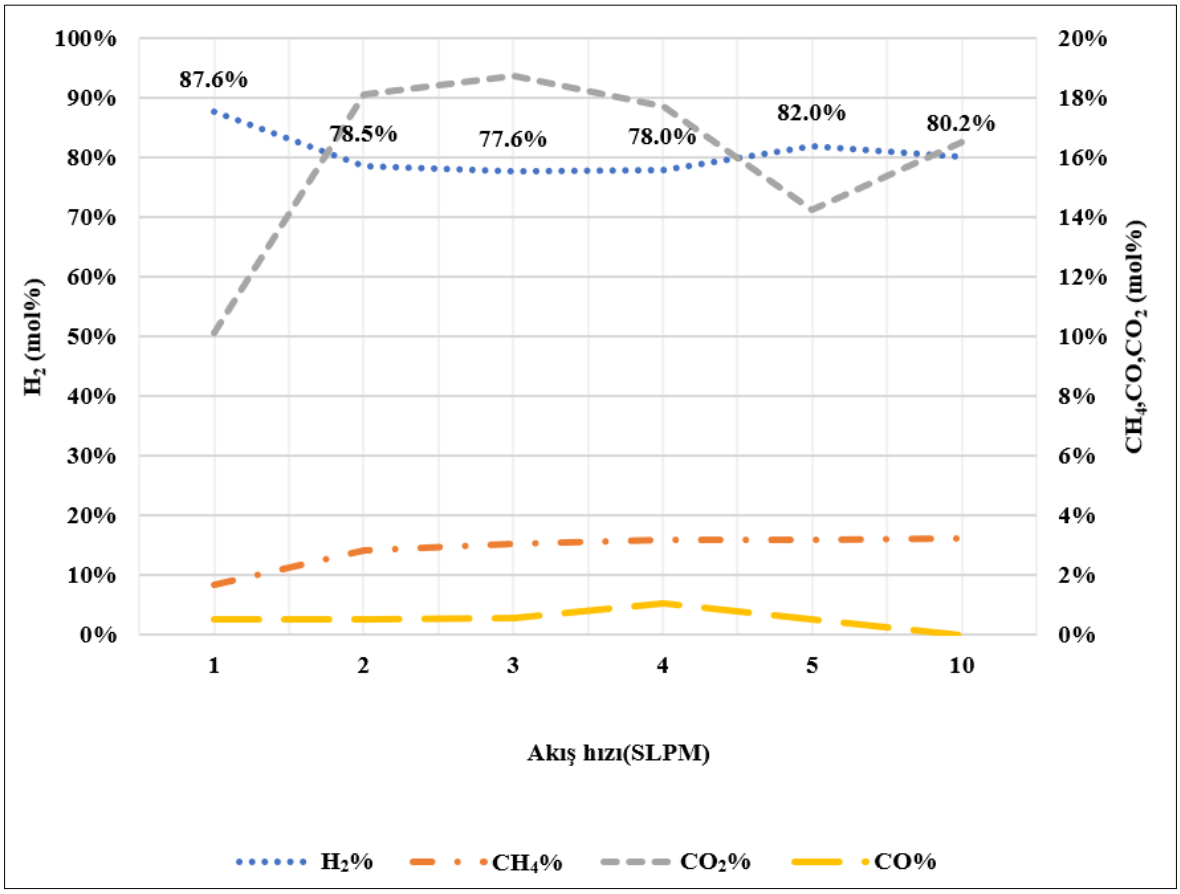
Basınçlandırma yönü denemesinden önce yapılan tüm deneylerde, sentez gazı dikey olarak yerleştirilmiş kolona aşağıdan yukarıya doğru beslenerek basınçlandırma yapılmıştır. Ayrıca, desorpsiyon ve temizleme yönü ise yukarıdan aşağıya yapılarak verimliliğin artırılması göz önünde bulundurulmuştur. Bu deneyde ise yön değiştirilerek yukarıdan aşağıya doğru basınçlandırma yapılmıştır. Daha önceki aşağıdan yukarıya denemelerinin tamamında adsorpsiyon süresi boyunca %100 H_2 ürün çıkışı sağlanırken yonun değişmesi ile birlikte bu oranın %87'e düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç da henüz temizleme adımına geçmeden kolonun veriminin düştüğü ve doğru basınçlandırma yönünün önemini göstermektedir. Aşağıdan yukarıya basınçlandırma yönü gaz akışını kolon boyunca homojen bir şekilde ilerlemesini sağlamış ve adsorban yüzeyleri daha efektif olarak kullanılmıştır. Ayrıca, yer çekimi ile birlikte CO_2 ve CH_4 gibi ağır gazlar kolonun alt kısmında etkin bir şekilde tutulmuştur. Basınçlandırma yönünün değişmesi ile birlikte bu ağır gazlar kolonun üst kısmında birikerek düzensiz bir dağılıma sebep olmuştur ve H_2 saflığında düşüş meydana gelmiştir. Basınçlandırma yönünün adsorpsiyon yönüyle aynı, temizleme ve desorpsiyon adımları ile zıt yönde olmasının kolonun tutma kapasitesinin daha etkili bir şekilde kullanması açısından önemli bir avantaj sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, sonraki çalışmalar için sentez gazı kolona aşağıdan yukarıya doğru beslenmiştir.

Farklı akış hızları

Farklı ürün akış hızları denemeleri için 5 bar'da 3 dk adsorpsiyon/temizleme, 0,4 p/f ve basınçlandırma yönü aşağıdan yukarıya tutularak 1, 2, 3, 4, 5 ve 10 SLPM akış hızları incelenmiştir. Şekil 5.4'te bu değerler için temizleme basamağından sonra alınan gaz numunelerinin molar yüzde kıyaslama grafiği verilmiştir.

Denemelere ilk olarak 1 ve 2 SLPM ile başlanmıştır. Temizleme basamağında 0,4 p/f oranı için 0,4 ve 0,8 SLPM H_2 beslemesi yapılmıştır, fakat akış hızının çok düşük olması nedeni

ile numune alma sırasında zorluk yaşanmıştır. Bu durum temizleme süresinin uzamasına ve elde edilen değerlerde sapmalar meydana gelmesine neden olmuştur. Bu sebep ile H_2'nin saflığı %87,63 ve 78,57 olarak gözlemlenmiş olsa da gerçek sistem performansını yansıtmamaktadır. 3 ve 4 SLPM akış hızlarında ise benzer H_2 yüzdesi elde edilmiştir. En yüksek H_2 yüzdesi ise %82 ile 5 SLPM akış ile elde edilmiştir. 10 SLPM akış hızında ise H_2 saflığın bir miktar düşme gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde optimum akış hızı 5 SLPM olarak belirlenmiştir.



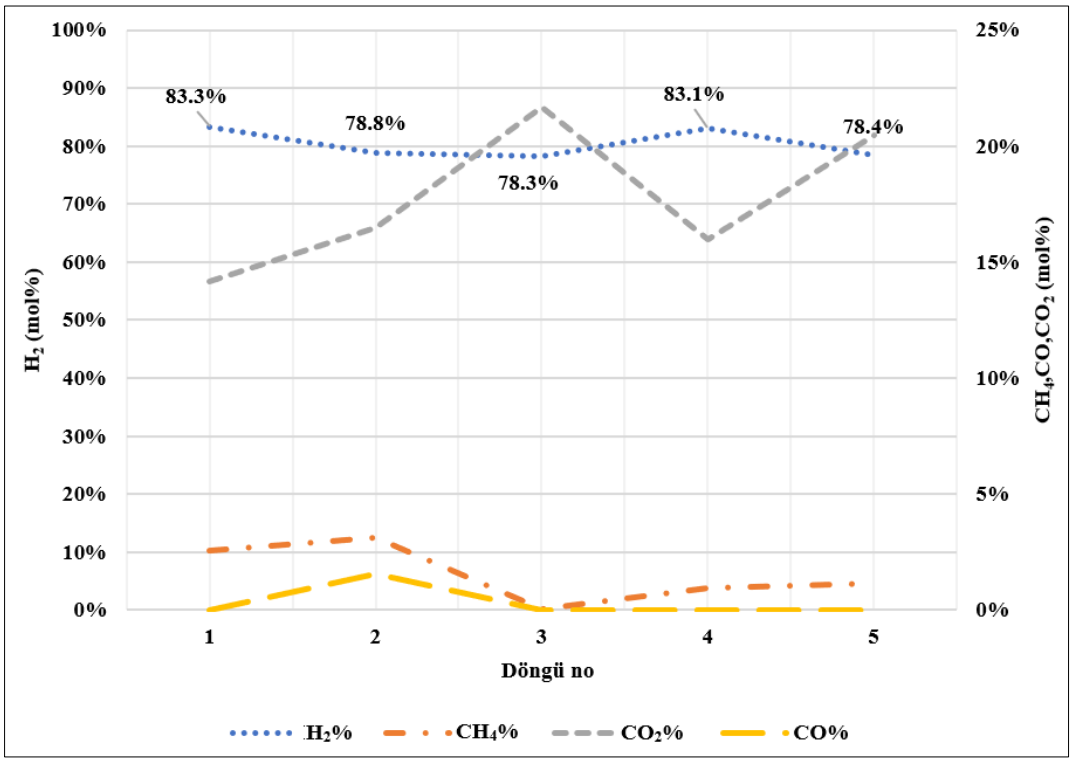
Şekil 5.5. 5 barda 3 dakikalık adsorpsiyon/temizleme süresi kullanılarak farklı ürün akış hızlarının karşılaştırılması

Döngü denemeleri

PSA sistemlerinde incelenen en önemli faktörlerden biri ise döngüsel sabit durum koşullarına ulaşmak için gereken döngü sayısının belirlenmesidir. Bu amaçla, döngü davranışının nasıl olduğunu anlayabilmek adına toplam kolon adsorpsiyon kapasitesine yakın olan 18 dakikalık adsorpsiyon ve temizleme süresi seçilmiştir. Daha önceki denemelerde yapılan kolonun tamamen rejen edilmesi basamağı atlanarak ardı ardına

döngüler yapılmıştır. Böylece, her döngü için basınçlandırma, adsorpsiyon, desorpsiyon ve temizleme adımları tamamlandıktan sonra hemen bir sonraki döngüye geçilmiştir.

Şekil 5.5'te her bir döngü sonrasında alınan numunelerdeki gaz mol yüzdeleri grafiği verilmiştir. Birinci döngüden sonra kolon içerisinde kalan safsızlıkların tamamen temizlenememesinden dolayı 2. döngü sonrasında alınan H_2 yüzdesinde düşüş meydana gelmiştir ve ~%83 olan H_2 oranı 2. ve 3. döngülerde birbirine çok yakın değerlerde ~%78 olarak gözlemlenmiştir. 4. döngüde her ne kadar bir yükselme gözlemlenerek 1. döngüde elde edilen değere yakın bir değer elde edilse de 5. döngüde bu değerin tekrar düşerek 2. ve 3. döngüye çok yakın bir değer elde edildiği görülmektedir. Döngü 4'te gözlemlenen %83 için deneysel bir hata payı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.6. 5 bar ve 5 SLPM'deki çevrimlerin karşılaştırılması

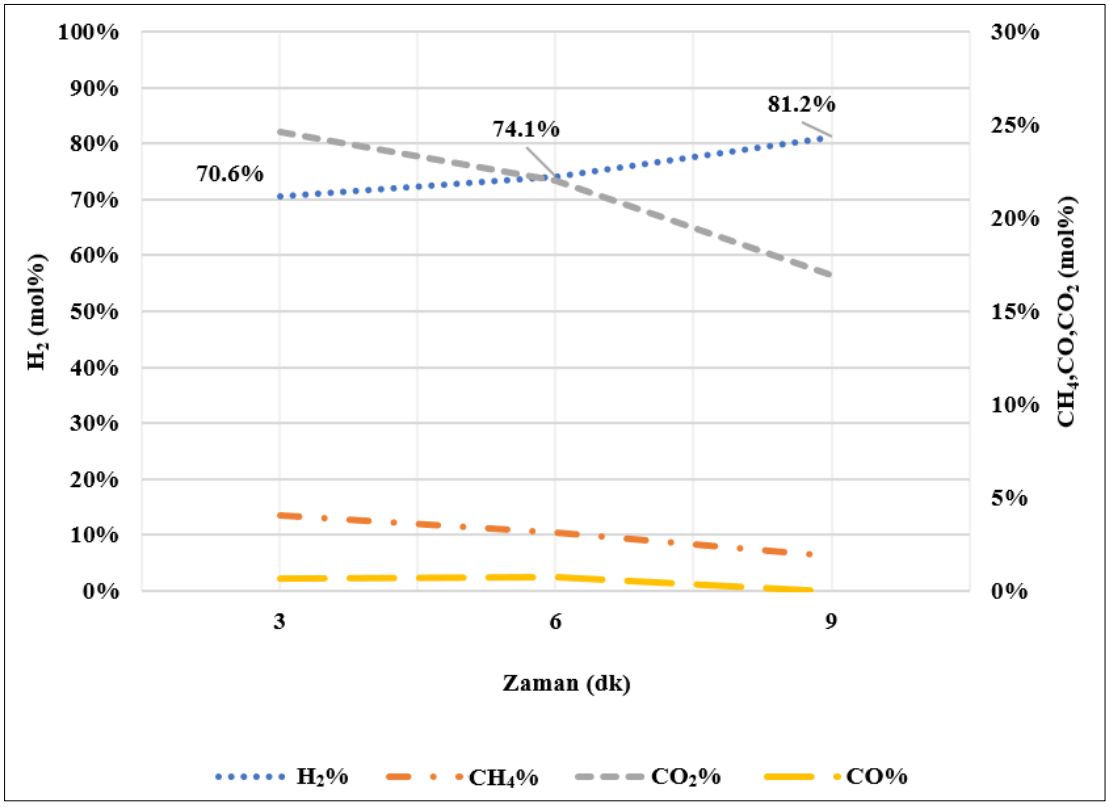
İlk döngüden sonra daha kararlı ölçümler elde edilmiş olsa da döngüsel kararlılığı gözlemlemek için döngü sayısını artırmak gerektiği açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra, sisteme sentez gazının sanayi tipi tüplerden sağlanması ekstra maliyet de getirmektedir. Elde edilen önemli deneysel bilgiler ile modelleme çalışmalarına zemin hazırlanmış ve ilerleyen çalışmalar için yönlendirme sağlayacak çok kritik kazanımlar elde edilmiştir.

5.3.2. 15 bar çalışma basıncı

5 bar çalışmalarına ek olarak 15 bar denemeleri yapılmış ve çalışma basıncındaki artışın adsorpsiyon süresi, akış hızı ve döngü denemelerine olan etkisi incelenmiştir. P/f oranı ve basınçlandırma yönü çalışma basıncı ile değişmeyecek parametreler olduğu için 5 bar'da elde edilen optimum değerler olan 0,4 p/f ve aşağıdan yukarıya basınçlandırma yönü sabit tutularak 15 bar çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Adsorpsiyon süresi

15 bar çalışma basıncı için deneyler 5 bar'da olduğu gibi 3, 6 ve 9 dakikalık adsorpsiyon/temizleme süreler için tamamlanmıştır. Şekil 5.6'da, bu 3 farklı adsorpsiyon süresi denemeleri için temizlemeden sonra ölçülen gaz molar yüzdeleri verilmiştir.



Şekil 5.7. 15 bar ve 5 SLPM'de farklı adsorpsiyon/temizleme sürelerinin karşılaştırılması

H_2 mol yüzdesi 3. dakikada %70,64, 6. dakikada %74,11 ve 9. dakikada %81,21 olarak ölçülmüştür. Yüksek basınçta safsızlıkların adsorplanma miktarının artması nedeniyle ve adsorpsiyon/temizleme süresinin uzaması ile kolon temizleme miktarında kayda değer bir

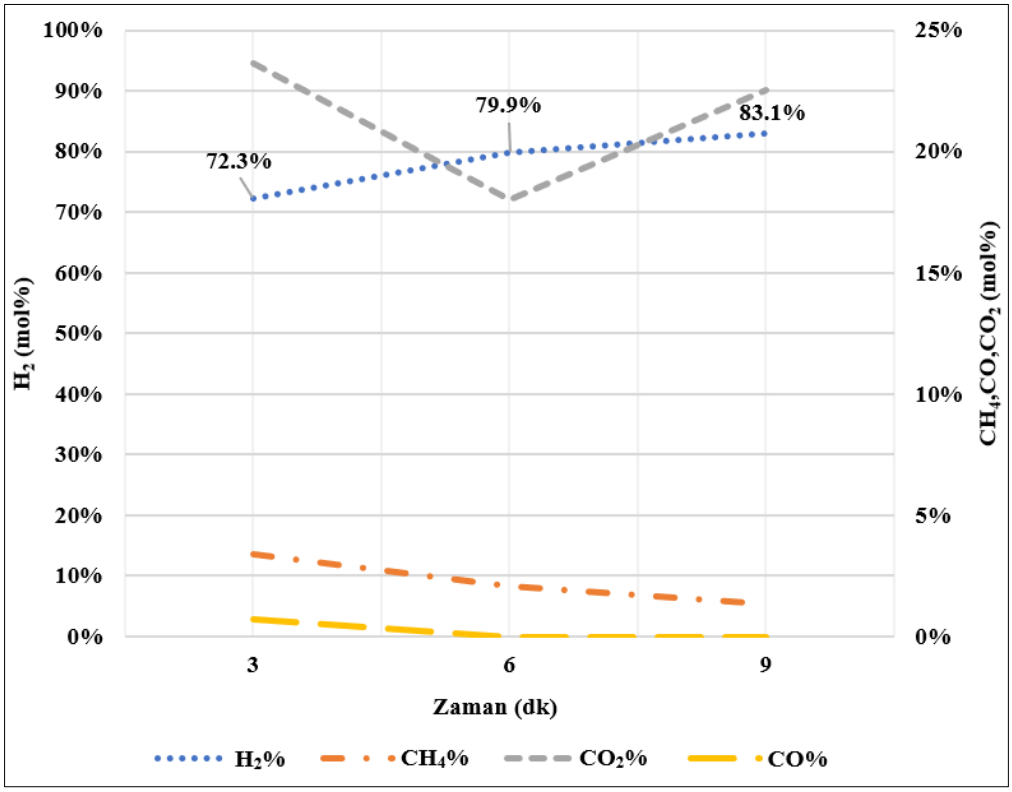
artış meydana gelmiştir. 3 ve 6 dk adsorplama/temizleme sürelerinin 9 dk süresine kıyasla yeterli kolon rejenerasyonu sağlamadığı ve bu süreler ile yapılacak döngü denemelerinde çok daha fazla safsızlık elde edilmesi öngörülmektedir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda 5 SLPM ürün akış hızı için 9 dk adsorpsiyon süresi optimum süre olarak belirlenmiştir.

Ayrıca 5 bar ve 15 bar çalışma basınçları için farklı adsorpsiyon süreleri denemelerinde açıkça görülmüştür ki kolon adsorpsiyon süresi basıncın bir fonksiyonu olarak önemli oranda değişmektedir. 5 bar çalışma basıncında artan adsorpsiyon süreleri ile birlikte yüzde H_2 oranında belirgin bir düşüş yaşanırken 15 barda belirgin bir artış elde edilmiştir. 5 bar'da %81 H_2 mol yüzdesi 3 dk adsorplama süresi ile elde edilirken 15 bar'da 9 dk'da elde edilmiştir. 15 barda CH_4 ve CO gibi ağır gazların daha etkin bir şekilde adsorplanması nedeni ile 3 ve 6 dk absorpsiyon sürelerinde 5 bar'a kıyasla daha düşük H_2 yüzdeleri elde edilmiştir.

Farklı akış hızları

5 bar deneylerinde 1, 2, 3, 4, 5 ve 10 SLPM akış hızlarının neden olduğu H_2 yüzdesindeki ihmal edilebilir fark ve önceki çalışmalardan 15 bar'da kolonun bilinen daha yüksek adsorpsiyon kapasitesi nedeniyle, 10 SLPM akış hızında 3, 6 ve 9 dakikalık adsorpsiyon/temizleme sürelerinin karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, 5 bar 3 dk adsorpsiyon süresi ile elde edilen maksimum H_2 saflığı 15 bar 9 dk ile elde edilmiştir. Bu nedenle bu akış hızı arttırılarak kolondaki etkisi incelenmek istemiştir. Bunun yanı sıra, adsorpsiyon sürelerinin belirlenmesinde bahsedildiği gibi kolon kapasitesinin belirli oranda kullanımı nedeni ile 10 SLPM'in üzerindeki akışlar için denemeler yapılmamıştır.

Şekil 5.8'de 10 SLPM akışta adsorpsiyon sürelerinin kıyaslaması verilmiştir. 10 SLPM akış hızının kullanılması, 0,4 p/f oranı nedeniyle temizleme için kullanılan H_2 miktarında orantılı bir artışa neden olmuştur. 5 bar denemelerinde farklı akış hızlarına sahip deneylerde, bu farkın daha istikrarlı bir şekilde devam ettiği görülmektedir. 15 bar'da, artan basıncın etkisiyle H_2 yüzdesindeki artış nispeten daha yüksektir ve her adsorpsiyon süresi için bu değişim ortalama %3 civarındadır. 3 dk süreye kıyasla 6 ve 9 dk adsorpsiyon sürelerinde daha etkin bir kolon temizlemesi sağlanılmıştır. 10 SLPM akış ile daha yüksek H_2 saflıkları elde edilmesi nedeni ile çevrim deneylerinin 10 SLPM akış hızında yapılmasına karar verilmiştir.

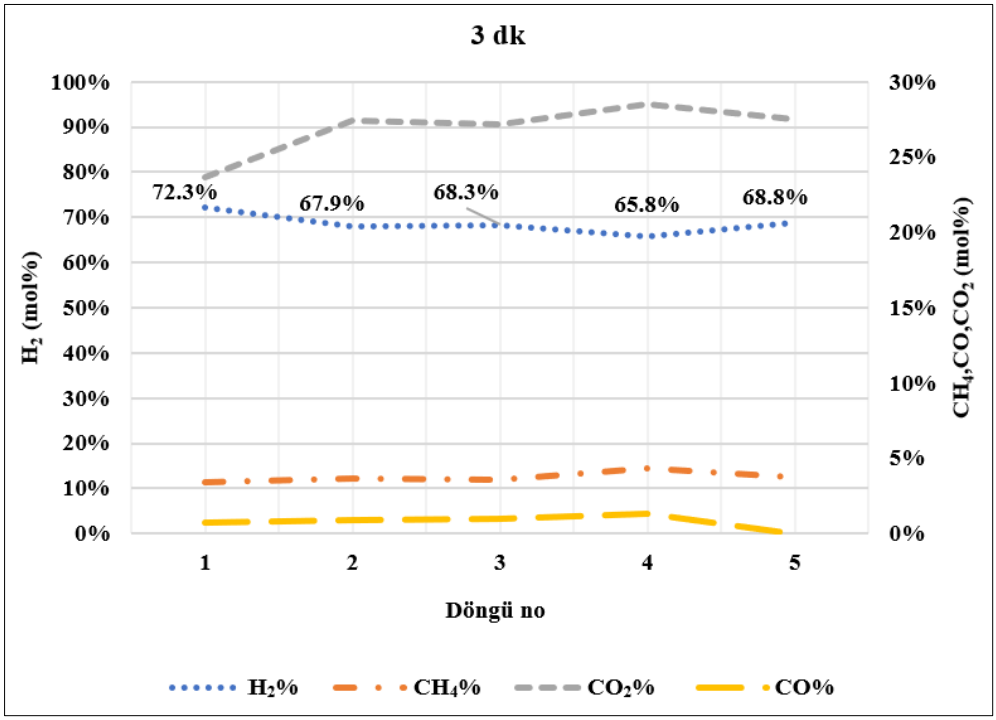


Şekil 5.8. 15 bar ve 10 SLPM'de farklı adsorpsiyon sürelerinin karşılaştırılması

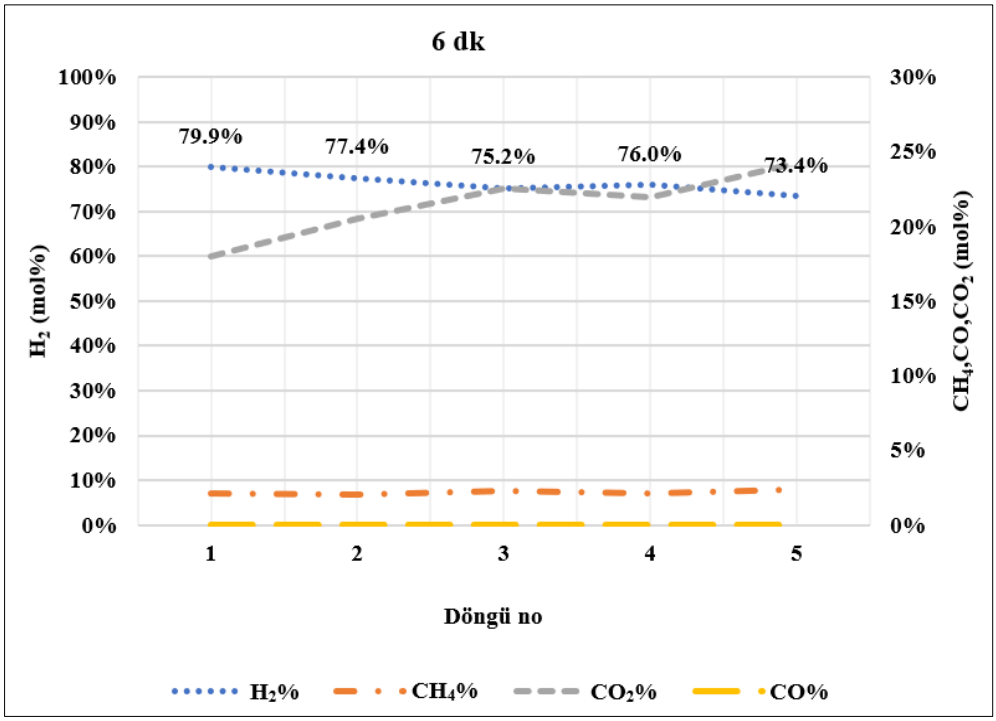
Döngü denemeleri

15 bar'da yapılan son deneyler, 3, 6 ve 9 dk adsorpsiyon süreleri için 5 döngüden sonra H_2 miktarındaki değişikliğin gözlenmesi ile tamamlanmıştır. Bu parametreye kadar, tüm incelemeler, temizlemeden sonra H_2 ölçümünde en yüksek değeri sağlayan deneysel koşullar seçilerek sürdürülmüştür. Ancak, bu parametre için, 3, 6 ve 9 dakikalık adsorpsiyon süreleri için 5 bar döngü denemelerinde olduğu gibi her bir döngü peş peşe yapılmıştır ve döngülerden sonra kolon rejenerasyonu yapılmadan bir sonraki döngü adımlarına geçilmiştir.

Şekil 5.10'de 5 çevrim için ürün gazındaki H_2 yüzdeleri karşılaştırma grafikleri verilmiştir. 3 dakikalık adsorpsiyon süresinin diğer sürelere kıyasla daha düşük bir performans sergilediği açıkça görülmektedir. İlk döngüde elde edilen %72,25 H_2 saflığı 5. döngüde %68,78'e kadar düştüğü görülmektedir. CO_2 oranı ise 1. Döngüden sonra ~%25 civarında daha kararlı bir ilerleyiş sergilemiştir. CH_4 ve CO oranları ise düşük seviyelerde kalmıştır. 6 ve 9 dk denemelerinde tüm döngü adımlarından CO tamamen temizlenmişken 3 dk'da düşük oranda olsa da 5.döngüye kadar gözlemlenmiştir.

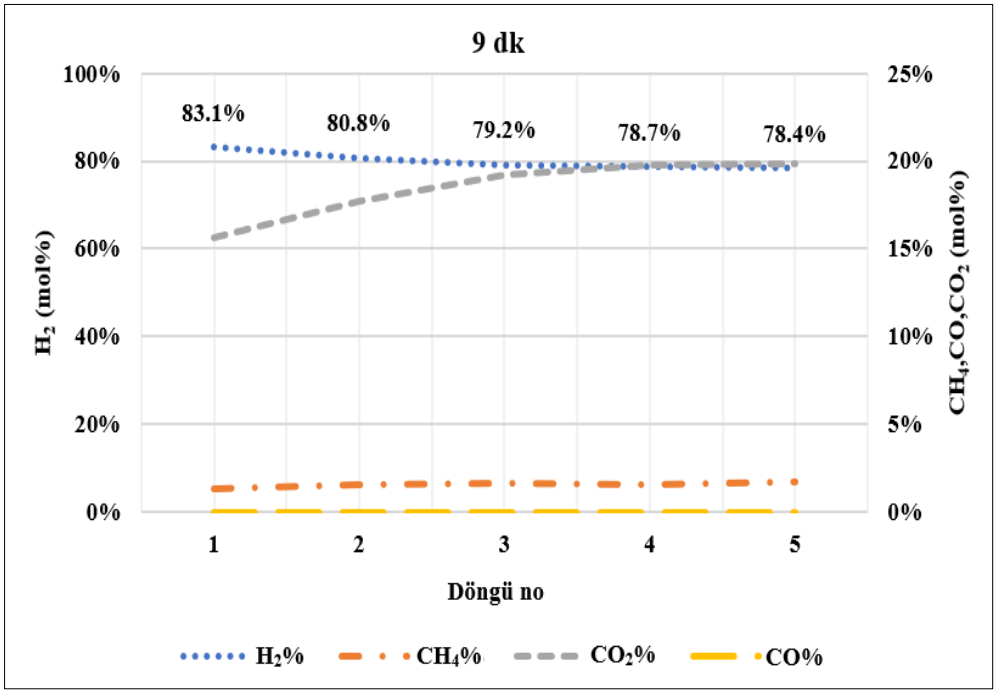


(a)



(b)

Şekil 5.9. 15 bar ve 10 SLPM akış hızında 3 dakika (a), 6 dakika (b) ve 9 dakika (c) adsorpsiyon süreleri için döngülerin karşılaştırılması



(c)

Şekil 5.10. (devam) 15 bar ve 10 SLPM akış hızında 3 dakika (a), 6 dakika (b) ve 9 dakika (c) adsorpsiyon süreleri için döngülerin karşılaştırılması

6 dk adsorpsiyon süresi ise 3 dk'ya kıyasla çok daha yüksek bir döngü performansı sergilemiştir. İlk döngü sonrasında %79,88 olarak ölçülen H_2 yüzdesi 5. döngüde %75'e düşmüştür. CO_2 oranı 1. ve 2. döngülerde daha keskin bir artış gösterirken 3., 4. ve 5. döngülerde daha düşük bir artış göstermiştir. CH_4 oranı ise 3 dk'ya kıyasla daha düşük seviyelerde gözlemlenmiştir. Son olarak gerçekleştirilen 9 dk adsorpsiyon süresi ise en yüksek H_2 saflığının elde edildiği adsorpsiyon süresi olmuştur. İlk döngüde elde edilen ~%83 H_2 molar yüzdesi 5. döngüde %78 seviyelerine düşmüştür. İlk 2 döngüden sonra ise çok daha kararlı H_2 yüzdeleri elde edilmiştir. CO_2 oranının da aynı şekilde 2. döngüden sonra kararlı bir halde sabit kaldığı görülmektedir. CH_4 oranı ise diğer sürelere kıyasla daha düşük oranlarda tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre 3 dk'nın kısa süreli adsorplama ve kısa süreli temizleme adımının kolonu 6 ve 9 dk kadar etkin bir şekilde temizleyemediği görülmüştür. 6 dk süre için ise kısmen daha iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da 9 dk adsorpsiyon süresi için çok daha yüksek H_2 yüzdesi ve döngüsel kararlılık elde edildiği net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, döngüsel kararlılık gösteren sonuçlar elde edilmesi ise kritik bir önem taşımaktadır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sentez gazından yüksek saflıkta hidrojen elde edilmesi amacı ile aktif karbon kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, sistem performansını etkileyen kritik parametreler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, aktif karbonun yüzey alanı ve gözenek yapısı sayesinde sentez gazı içerisinde bulunan CO, CO_2 ve CH_4 safsızlık gazlarının etkili bir şekilde adsorplandığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu çalışmada farklı çalışma basınçları, adsorpsiyon süreleri, temizleme/besleme (p/f) oranları, basınçlandırma yönleri ve ürün akış hızları sistematik olarak incelenerek optimum çalışma koşulları belirlenmiştir.

İlk olarak farklı çalışma basınçlarında kolon tutma kapasitelerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. Çalışma basıncının artışı ile kolon tutma kapasitesinin artışı belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. 5 bar çalışma basıncında 22 dakika boyunca %100 H_2 ürün akışı elde edilmiştir. Bu süre 10 bar'da 28 dakika ve 15 bar'da 30 dakika olarak belirlenmiştir. Yüksek basınç gaz moleküllerinin tutma eğilimini arttırarak daha yüksek adsorplanma kapasitesi elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuç, yüksek basınçlarda daha yüksek saflıkta hidrojen elde edilebileceğini ortaya koyarken diğer bir yandan da yüksek basınçlar sebebi ile enerji maliyetini arttıracağı ve ekipman seçimlerinin dikkatle yapılması gerektiğini de göstermektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalar hem 5 bar hem de 15 bar çalışma basınçlarında gerçekleştirilmiştir.

Farklı adsorpsiyon süreleri çalışmalarında, 5 bar çalışma basıncı için adsorpsiyon sürelerinin uzamasının daha düşük hidrojen yüzdelerine sebep olduğu görülmüştür. 3 dk adsorpsiyon süresi ile birlikte ~%81 hidrojen elde edilirken sürenin artması ile birlikte 6 dk için %78 ve 9 dk için %73 hidrojen yüzdeleri elde edilmiştir. Sürelerin uzaması ile beraber kolon kapasite kullanımının arttığı fakat buna kıyasla temizleme sürelerinin daha yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. 15 bar çalışma basıncında ise tam tersi bir durum gözlemlenmiş ve en düşük hidrojen oranı olan %70 3 dk ile elde edilirken 9 dk adsorpsiyon süresi ile en yüksek H_2 oranı %81 elde edilmiştir.

Ürün akış hızı çalışmalarında ilk olarak, 5 bar çalışma basıncında optimum adsorpsiyon süresi olan 3 dk sabit tutularak 1, 2, 3, 4, 5 ve 10 SLPM değerleri incelenmistir.1 ve 2 SLPM

çalışmalarında yetersiz temizleme akışı sebebi ile numune aliminin etkin bir şekilde sağlanamadığı görülmüştür. En yüksek hidrojen molar yüzdesi ise %82 ile 5 SLPM akışta elde edilmiştir ve bu değer optimum akış hızı olarak belirlenmiştir. 15 bar çalışmalarında ise 5 bar çalışmalarından elde edilen sonuçlar göz önünde bulundurularak 5 SLPM akışa ek olarak sadece 10 SLPM akış denemesi gerçekleştirilmiştir. Yüksek akış hızının kolon rejenerasyonuna katkı sağlayarak daha yüksek oranda kolon temizlemesi sağladığı gözlemlenerek 10 SLPM akış hızı ile %83 hidrojen molar yüzdesi elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalarda ilk kabul olarak basınçlandırma dikey olarak konumlandırılmış kolona aşağıdan yukarıya sentez gazı beslemesi yapılarak yapılmıştır. Bu denemelerde basınçlandırma yönü yukarıdan aşağıya doğru yapılmıştır. Diğer çalışmalarda adsorpsiyon süreleri boyunca %100 hidrojen saflığıyla üretim sağlanırken yukarıdan aşağıya basınçlandırmada ürün gazı hidrojen yüzdesinin %87'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, ağır gazlar olan CH_4 ve CO_2 kolonun alt kısmında etkin bir şekilde tutularak kolon kapasitesinin homojen bir şekilde tutulmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, temizleme adımı yönünün basınçlandırma yönüyle ters olması (yukarıdan aşağıya) daha etkin bir kolon rejenerasyonu sağlamıştır.

Tez çalışmasında incelenen bir diğer parametre ise hidrojen geri kazanımını ve sistem verimliliğini doğrudan etkileyecek olan temizleme/besleme oranının optimizasyonu olmuştur. 0,3, 0,4 ve 0,5 p/f oranları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. 0,3 besleme oranı, yeterli miktarda temizleme için hidrojen akışı sağlayamamış ve %69 hidrojen saflığı elde edilmiştir. 0,4 ve 0,5 p/f oranlarında ise ciddi bir artış gözlemlenerek hidrojen yüzdesi ~%78 olarak elde edilmiştir. Daha az hidrojen tüketimi ile daha yüksek geri kazanım sağlaması nedeni ile p/f oranı 0,4 olarak optimize edilmiştir.

Yapılan çalışmalara ek olarak son adımda, 5 ve 15 bar çalışma basınçları için döngü denemeleri yapılarak kolonun döngüsel kararlılığı gözlemlenmek istenmiştir. 5 bar çalışma basıncında kolon tutma kapasitesi 18 dk adsorpsiyon süresi ile 5 SLPM ürün akış hızında 5 döngü peş peşe yapılmıştır ve her döngüde adsorpsiyon sonrasında elde edilen hidrojen yüzdeleri kıyaslanmıştır. Bu çalışmalarda döngü sayısının artması ile hidrojen oranında düşüş gözlemlenmiş fakat 5 döngünün kararlılık seviyesine ulaşmak için yeterli olmadığı da gözlemlenmiştir. 5 bar çalışmalarından farklı olarak 15 bar çalışmalarında 3, 6 ve 9 dk için 10 SLPM optimum akış hızında döngü çalışmaları yapılmıştır. Her bir döngü süresinin 3 dk

uzaması ile 5. döngü sonunda elde edilen hidrojen yüzdelerinin %5 oranında değiştiği gözlemlenmiştir. 9 dk adsorpsiyon süresinde ise 2. döngüden sonra kararlı bir sonuç elde edilmiştir. İlk döngüde elde edilen %83 hidrojen saflığı %78'e düştüğü gözlemlenmiş fakat 3., 4. ve 5. döngülerde kararlı bir davranış sergileyerek %78 değerini koruduğu gözlemlenmiştir.

Tüm sonuçlar kıyaslandığında ise en yüksek hidrojen saflığının %83 molar yüzde ile 15 bar, 10 SLPM ürün akış hızı, 9 dk adsorpsiyon süresi, aşağıdan yukarıya basınçlandırma ve 0,4 p/f oranı kullanılarak elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu değerler ile gerçekleştirilen döngü çalışmalarında 2. döngü adımından sonra döngüsel kararlılığa erişilmiş ve %78 hidrojen oranının stabil kaldığı gözlemlenmiştir. 5 bar, 5 SLPM ürün akış hızı, 3 dk adsorpsiyon süresi, aşağıdan yukarıya basınçlandırma ve 0,4 p/f oranı ile de %81 hidrojen saflığı elde edilmiştir. Her iki sonucun da gösterdiği gibi çalışma basınçlarına bağlı olarak optimum değerlerin belirlendiği durumda yüksek hidrojen saflıkları elde edilebilmektedir ve PSA kolonlarının kendi şartları altında optimize edilmesi en önemli sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elde edilen bu sonuçlar ile PSA sistemlerinin optimize edilmesine ve endüstriyel uygulamalara uygulanması için önemli bilgiler sağlamıştır. Her ne kadar yapılan bu tez çalışmasında birçok parametre incelense de döngü sürelerini uzatmak gibi daha fazla durum incelemesi yapılabileceği de belirtilmelidir. Fakat sentez gazının tüplerden sağlanması deneysel maliyeti arttırmaktadır. Bu nedenle ilerleyen dönemlerde yapılacak modelleme çalışmalarına tez çalışmasından elde edilen veriler değerli bilgiler sağlayacak ve maliyet artışının önüne geçecektir. Bu çalışmalara ek olarak, farklı adsorban performanslarının değerlendirilerek katmanlı bir adsorban yatağının kullanılmasının da daha yüksek saflıkta hidrojen eldesine katkı sağlayacağı görülmektedir. Ayrıca, deney düzeneğini tüplerden bağımsız durumda çalıştırabilecek hale gelmesi için sentez gazının bir buharlı metanol reformerından elde edilmesi önemli bir avantaj sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Skarstrom, H. (1960). Adsorption processes for gas separation. *Industrial Chemistry Journal*, 3(2), 145-152.

2. Helfferich, F. (1970). Kinetics of gas adsorption in PSA systems. *Adsorption Science and Technology*, 5(1), 20-25.

3. Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M., Yang, R. T., Zhang, Y. (1988). Advanced PSA methodologies for CO_2 capture. *Industrial Chemistry Research*, 27(5), 345-356.

4. Helfferich, F. (1985). Advanced adsorption processes in chemical engineering. *Chemical Processes*, 10(3), 345-356.

5. Helfferich, F., Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M. (1987). PSA optimization studies on binary gas mixtures. *Separation and Purification Reviews*, 16(1), 78-85.

6. Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M., Yang, R. T. (1993). Kinetics of PSA cycles with advanced adsorbents. *Adsorption Science Journal*, 22(3), 110-120.

7. Helfferich, F., Ruthven, D. M., Farooq, S. (1995). Effect of adsorption time on gas separation efficiency in PSA systems. *Journal of Industrial Chemistry*, 14(2), 201-209.

8. Ruthven, D. M., Farooq, S., Kumar, A. (1996). Mathematical modeling of PSA systems for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 21(5), 451-461.

9. Sarker, M., Rahman, T., Ahmed, S., Khan, Z. (1998). Experimental and theoretical analysis of PSA systems for methane purification. *Chemical Engineering Research*, 34(1), 15-25.

10. Sarker, M., Rahman, T., Ahmed, S., Khan, Z., Malik, F. (2001). Optimization of PSA parameters for enhanced gas separation. *Adsorption and Purification Technology*, 45(3), 345-355.

11. Yang, R. T., Zhang, Y., Choi, D. Y., Patel, R. (2004). High-pressure PSA for CO_2 capture from flue gases. *Industrial Chemistry Research*, 28(6), 781-795.

12. De Witte, N., Denayer, J. F. M., Van Assche, T. R. C. (2007). Performance evaluation of PSA systems for hydrogen purification. *Separation and Purification Reviews*, 36(3), 215-229.

13. Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M., Yang, R. T. (2009). Adsorption capacity improvements in PSA processes for methane purification. *Journal of Chemical Engineering*, 25(4), 345-356.

14. Ruthven, D. M., Sarker, M., Yang, R. T., Choi, D. Y. (1994). PSA performance optimization in gas separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(2), 89-101.

15. Yang, R. T., Choi, D. Y., Farooq, S. (2008). Advanced PSA methodologies for CO_2 removal in hydrogen streams. *Separation Science and Technology*, 43(5), 451-467.

16. Abdeljaoued, A., Relvas, F., Mendes, A., Chahbani, M. H. (2017). PSA performance in hydrogen purification for fuel cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1578-1587.

17. Sarker, M., Rahman, T., Ahmed, S., Khan, Z. (2017). PSA parameters optimization for enhanced methane recovery. *Chemical Engineering Research*, 43(3), 201-215.

18. Choi, D. Y., Kim, S., Patel, R. (2009). PSA system efficiency analysis for CO_2 removal. *Separation Science Journal*, 21(4), 333-345.

19. De Witte, N., Zhang, Y., Silva, M. (2021). Hydrogen purification via PSA: A comparative study. *Separation and Purification Technology*, 48(2), 149-165.

20. Beeyani, A., Singh, K., Vyas, R., Kumar, S., Sharma, P. (2010). Parametric studies on PSA systems for oxygen enrichment. *Polish Journal of Chemical Technology*, 12(1), 55-62.

21. Riboldi, L., González, C., Kalman, E. (2017). PSA performance in carbon capture and storage applications. *Energy Procedia*, 114(1), 2390-2400.

22. Choi, D. Y., Kim, S., Patel, R. (2003). Optimization of PSA processes for gas separation. *Journal of Chemical Engineering*, 18(3), 245-255.

23. Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M., Yang, R. T., Zhang, Y. (2018). PSA technology advancements for methane purification. *Adsorption Journal*, 30(2), 101-115.

24. Helfferich, F., Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M. (1990). Adsorption dynamics in PSA processes. *Journal of Adsorption Science*, 12(4), 321-330.

25. Ruthven, D. M., Farooq, S., Kumar, A. (2002). Modeling and simulation of PSA systems for hydrogen separation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(8), 859-870.

26. Choi, D. Y., Kim, S., Patel, R. (2005). PSA process design for CO_2 removal in natural gas streams. *Separation and Purification Reviews*, 23(2), 345-360.

27. Sarker, M., Ahmed, S., Rahman, T., Khan, Z. (2010). PSA performance in methane purification systems. *Separation and Purification Technology*, 47(2), 123-136.

28. Lillo-Ródenas, M. A., Ruthven, D. M., Yang, R. T., Zhang, Y. (2010). Advances in PSA technology for CO_2 capture. *Adsorption Journal*, 26(4), 201-215.

29. Beeyani, A., Singh, K., Vyas, R., Kumar, S., Sharma, P. (2015). Performance evaluation of PSA systems for oxygen production. *Polish Journal of Chemical Technology*, 17(2), 65-75.

30. Luo, J., Zhang, Y., Kim, S., Patel, R. (2016). PSA processes for hydrogen recovery: A simulation study. *Chemical Engineering Science*, 142, 91-102.

31. Zhang, Y., Choi, D. Y., Farooq, S., Yang, R. T. (2017). Optimization of PSA cycles for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7615-7626.

32. Kim, S., Patel, R., Choi, D. Y., Zhang, Y. (2020). PSA systems for natural gas separation: An experimental approach. *Separation Science and Technology*, 55(8), 1159-1173.

33. De Witte, N., Silva, M., Denayer, J. F. M., Van Assche, T. R. C. (2020). PSA performance analysis for biogas upgrading. *Separation and Purification Technology*, 243, 1164-1178.

34. Li, X., Zhang, Y., Kim, S., Patel, R. (2015). Adsorption equilibrium studies in PSA systems for hydrogen purification. *Journal of Chemical Engineering*, 57(6), 345-358.

35. Wang, X., Zhang, Y., Liu, J., Patel, R. (2018). Comparative analysis of PSA and vacuum distillation for natural gas purification. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 50, 112-123.

36. Chen, L., Wang, Z., Yang, R. T., Liu, X. (2021). PSA performance for CO_2 capture in biogas streams. *Chemical Engineering Research and Design*, 169, 121-132.

37. Kim, S., Patel, R., Choi, D. Y., Zhang, Y. (2020). Comparative studies on PSA systems for gas separation. *Separation and Purification Technology*, 55(8), 981-993.

38. Xu, Y., Zhang, L., Yang, R. T., Kim, S. (2018). PSA system optimization for biogas applications. *Energy Procedia*, 151, 123-135.

39. Choi, D. Y., Kim, S., Patel, R. (2003). PSA process optimization for CO_2 removal. *Journal of Chemical Engineering*, 18(3), 245-255.

40. Abdeljaoued, A., Chahbani, M. H., Mendes, A. (2017). PSA performance in hydrogen purification for fuel cells. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1578-1587.

41. Kalman, E., González, C., Riboldi, L. (2022). PSA applications in biogas upgrading: A review. *Renewable Energy*, 183, 123-135.

42. Kikkinides, E. S., Yang, R. T., Ruthven, D. M. (2015). PSA modeling for gas separation: An overview. *Separation and Purification Technology*, 150, 251-265.

43. Kumar, S., Patel, R., Zhang, Y. (2019). PSA system improvements for hydrogen recovery: A simulation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(12), 567-579.

44. Li, X., Zhao, Y., Wang, Z. (2020). PSA system optimization for CO_2 capture: A simulation study. *Separation Science and Technology*, 55(8), 981-993.

45. Martínez, L., González, R., Silva, M., Zhang, Y., Patel, R. (2021). Advances in PSA systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*, 184, 312-324.

46. Li, X., Zhang, Y., Zhao, Y., Wang, Z. (2019). Adsorption dynamics in PSA systems for hydrogen purification. *Journal of Chemical Engineering*, 57(6), 245-256.

47. Martínez, L., González, R., Silva, M. (2020). PSA technology for biogas upgrading: A comprehensive review. *Renewable Energy*, 152, 123-138.

48. Kumar, S., Patel, R., Luo, J., Zhang, Y. (2018). PSA systems for methane purification: Experimental and modeling approaches. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(7), 4581-4592.

49. Riboldi, L., Bolland, O. (2021). PSA applications for CCS projects: A techno-economic assessment. *Separation and Purification Technology*, 275, 117764.

50. Zhang, Y., Liu, X., Choi, D. Y., Patel, R. (2021). PSA system advancements for high-purity hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(11), 11689-11699.

51. González, R., Silva, M., Martínez, L., Patel, R. (2020). PSA cycles for CO_2 removal in methane purification. *Energy Reports*, 6, 489-501.

52. Kim, S., Patel, R., Choi, D. Y., Zhang, Y. (2021). Performance evaluation of PSA systems for oxygen separation. *Journal of Chemical Engineering*, 78(9), 567-579.

53. Patel, R., Silva, M., Zhang, Y. (2020). PSA technology for energy storage applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109622.

54. Martínez, L., Chen, L., Zhang, Y. (2019). Optimization of PSA systems for CO_2 capture from flue gases. *Chemical Engineering Science*, 194, 163-174.

55. Chen, L., Liu, X., Wang, Z. (2022). PSA technology for renewable energy systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 252, 114648.

56. Li, X., Zhao, Y., Zhang, Y. (2021). PSA systems for hydrogen recovery: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(6), 3891-3903.

57. Wang, Z., Park, S., Lee, J. (2020). Advances in PSA systems for hydrogen and methane purification. *Energy Procedia*, 165, 267-278.

58. Chen, L., Patel, R., Luo, J. (2020). Comparative analysis of PSA systems for biogas applications. *Chemical Engineering Research and Design*, 161, 478-489.

59. Ruthven, D. M., Farooq, S. (1990). Adsorption and PSA cycles: Fundamental studies. *Adsorption Journal*, 7(4), 231-245.

60. Yang, R. T. (1987). Gas separation by adsorption processes. *Separation and Purification Reviews*, 12(3), 1-54.

61. Li, X., Zhao, Y., Wang, Z. (2017). PSA systems for hydrogen recovery: Insights into adsorption dynamics. *Journal of Chemical Engineering*, 63(7), 345-356.

62. Zhang, Y., Choi, D. Y., Patel, R. (2018). Advances in PSA systems for CO_2 capture in biogas applications. *Renewable Energy*, 128, 189-201.

63. Li, X., Gao, Y., Chen, L. (2018). The role of adsorbent type in PSA performance for hydrogen purification. *Separation and Purification Technology*, 195, 123-134.

64. Yamada, S., Kim, S., Zhang, Y. (2021). PSA technology for high-purity hydrogen production in renewable systems. *Energy Conversion and Management*, 251, 114624.

65. Singh, R., Gupta, A. (2018). PSA performance evaluation in industrial CO_2 separation processes. *Journal of Environmental Engineering*, 144(5), 567-578.

66. Kumar, S., Zhang, Y., Silva, M. (2016). Experimental studies on PSA cycles for methane purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(3), 2871-2881.

67. Kumar, S., Patel, R., Zhao, Y. (2017). Adsorption-based gas separation technologies: A PSA perspective. *Chemical Engineering Journal*, 327, 245-259.

68. Lin, J., Zhang, Y. (2018). PSA optimization for renewable energy storage applications. *Energy Procedia*, 152, 128-139.

69. Gao, Y., Chen, L., Zhang, Y. (2019). PSA performance under varying gas mixture compositions: A case study. *Energy Reports*, 5, 289-301.

70. Witte, S., Zhang, Y., Patel, R. (2021). Energy-efficient PSA cycles for hydrogen purification in renewable systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111781.

71. Li, X., Zhao, Y., Chen, L. (2016). PSA systems for biogas upgrading: An experimental study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(5), 456-468.

72. Yang, R. T., Lin, J., Zhang, Y. (2018). Advances in PSA technologies for carbon capture and hydrogen recovery. *Separation Science and Technology*, 53(9), 789-804.

73. Zhang, Y., Liu, X., Gao, Y. (2020). PSA cycles for CO_2 removal from gas mixtures: Modeling and optimization. *Chemical Engineering Science*, 215, 115432.

74. Zhao, Y., Kim, S., Wang, Z. (2017). PSA systems for CO_2 capture: Comparative analysis of adsorbent performance. *Separation and Purification Technology*, 176, 198-209.

75. Park, J., Lee, S. (2018). Advances in PSA applications for hydrogen recovery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 1256-1268.

76. Silva, M., Zhang, Y., González, R., Patel, R. (2019). PSA systems for biogas upgrading: Experimental and modeling approaches. *Renewable Energy*, 138, 245-258.

77. Wang, Z., Zhang, Y., Patel, R. (2017). Performance optimization of PSA cycles for high-purity hydrogen production. *Energy Procedia*, 120, 456-468.

78. Zhang, Y., Li, X. (2019). Experimental study on PSA systems for methane and carbon dioxide separation. *Journal of Chemical Engineering*, 59(3), 367-379.

79. Hernández, A., Silva, M., Zhang, Y., Patel, R. (2020). PSA technology for renewable energy systems: A critical review. *Energy Reports*, 6, 123-135.

80. Kumar, S., Singh, R., Gupta, A. (2021). Adsorption dynamics in PSA systems for carbon capture. *Journal of Environmental Engineering*, 147(6), 567-578.

81. Silva, M., González, R., Zhang, Y., Patel, R. (2022). Advances in PSA technology for renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112548.

82. Lee, S., Park, J., Kim, S. (2018). PSA performance in high-pressure applications for hydrogen purification. *Chemical Engineering Journal*, 341, 245-259.

83. Wang, Z., Chen, L. (2020). Comparative analysis of PSA systems for CO_2 and hydrogen separation. *Energy Conversion and Management*, 218, 113011.

84. Kumar, S., Zhao, Y., Zhang, Y. (2022). Advances in PSA cycles for renewable hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(8), 4781-4794.

85. Ruthven, D. M., Farooq, S., Knaebel, K. S. (1994). *Pressure Swing Adsorption* (1st ed.). New York, NY: Wiley, 21-70.

86. Fletcher, F. B., Leitch, H. R. (1974). Hydrogen embrittlement of austenitic stainless steels. *Metallurgical Transactions A*, 5(7), 1757–1765.

87. Gangloff, R. P. (1990). *Stress Corrosion Cracking: Theory and Practice* (A. J. Sedriks, Ed.). Houston: NACE International, 55-77.

88. Xiao, J., Peng, Y., Benard, P., Chahine, R. (2015). Thermal effects on breakthrough curves of pressure swing adsorption for hydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(9), 3706–3713.

89. Sarker, A. I., Aroonwilas, A., Veawab, A. (2017). Equilibrium and kinetic behaviour of CO_2 adsorption onto zeolites, carbon molecular sieve, and activated carbons. *Energy Procedia*, 114, 2450–2459.

90. Liu, Y., Shen, X., Ding, W., Hou, J. (2021). Adsorption of CO_2 and CH_4 on shale under high pressure: An experimental study and thermodynamic modeling. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 66(1), 185–194.

91. Khosravi, Z., Rajabzadeh, A., Bahrami, S. (2019). Adsorption behavior of carbon dioxide on chemically modified activated carbons: A study on equilibrium, kinetic, and thermodynamic properties. *Adsorption Science & Technology*, 37(1–2), 181–197.

92. Lillo-Ródenas, M. A., Fletcher, A. J., Thomas, K. M., Cazorla-Amorós, D., Linares-Solano, A. (2018). Competitive adsorption of a binary mixture of gases on activated carbon: Effects of surface chemistry. *Microporous and Mesoporous Materials*, 263, 169–179.

93. Sircar, S. (2002). Pressure swing adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(7), 1389–1392.

94. Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes* (1st ed.). New York, NY: Wiley-Interscience, 123–145.

95. Bae, T. J., Lee, C. H. (2005). Adsorption dynamics of gas mixtures in pressure swing adsorption processes. *AIChE Journal*, 51(9), 2541–2550.

96. Lopes, F. V. S., Loureiro, J. M., Rodrigues, A. E. (2011). Activated carbon for hydrogen purification by pressure swing adsorption. *Chemical Engineering Science*, 66(13), 3039–3049.

97. Lopes, F. V. S., Loureiro, J. M., Rodrigues, A. E. (2012). Fast cycling VPSA for hydrogen purification. *Separation and Purification Technology*, 98, 469–475.

98. Ribeiro, A. M., Santos, J. C., Rodrigues, A. E. (2009). Four beds pressure swing adsorption for hydrogen purification: Case study for humid gas. *Chemical Engineering Transactions*, 17, 199–204.

99. Zakaria, Z., Idris, Z., Hassan, N. A. (2020). Correlating parameters with hydrogen purity and recovery by PSA in hydrogen purification from syngas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(13), 7652–7661.

100. Baston-Neto, R. P., Barros, M. A. S. D., Grande, C. A. (2011). Adsorption of hydrogen mixtures containing carbon monoxide, carbon dioxide, and methane on activated carbons and zeolites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(5), 2848–2857.



Gazili olmak ayrıcalıktır