

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZİFİKASYONLU BİR YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN
SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ**

BURAK İZGİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ALİ VOLKAN AKKAYA**

İSTANBUL, 2011

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GAZİFİKASYONLU BİR YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN
SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ**

BURAK İZGİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. ALİ VOLKAN AKKAYA**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAZİFİKASYONLU BİR YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN
SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ

Burak İZGİ tarafından hazırlanan tez çalışması/....../2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ali Volkan AKKAYA

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

...

Yıldız Teknik Üniversitesi

...

Yıldız Teknik Üniversitesi

...

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım süresince gösterdiği destek, ilgi ve sabırdan dolayı tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Volkan AKKAYA'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde maddi manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmemiş olan aileme sonsuz teşekkürler.

2011

Burak İZGİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2 BİR BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRICININ DENGE MODELİ, SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ.....	3
2.1 Literatür Özeti	3
2.2 Gazlaştırma ve Gazlaştırma Teknolojileri	5
2.3 Gazlaştırma.....	5
2.3.1 Gazlaştırıcılar.....	6
2.3.1.1 Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar	6
2.3.1.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar	9
2.3.1.3 Sürüklemeli Yatak Gazlaştırıcılar	11
2.4 Matematiksel Model	12
2.4.1 Biyokütle Kompozisyonu.....	13
2.4.2 Kütle Dengesi	13
2.4.3 Enerji Dengesi	16
2.4.4 Ekserji Dengesi	17
2.5 Modelin Doğrulanması	19
2.6 Parametrik Analiz Sonuçları	20

2.6.1	Nemin etkisi	21
2.6.2	Hava giriş sıcaklığının etkisi.....	24
2.6.3	İşletme basıncının etkisi.....	27
2.6.4	Gazlaştırma sıcaklığının etkisi	30
BÖLÜM 3 BİR KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN ELEKTROKİMYASAL MODELİ VE PERFORMANS ANALİZİ.....		34
3.1	Literatür Özeti	34
3.2	Matematiksel Model	35
3.2.1	Mikser	35
3.2.2	Reformer	38
3.2.3	KOYH	41
3.2.3.1	Nerst Potansiyeli	43
3.2.3.2	Ohmik Polarizasyon.....	44
3.2.3.3	Aktivasyon Polarizasyonu.....	44
3.2.3.4	Konsantrasyon Polarizasyonu	45
3.3	Modelin Doğrulanması	47
3.4	Performans Analizi Sonuçları	49
3.4.1	Hücre sıcaklığının etkisi.....	49
3.4.2	Akım yoğunluğunun etkisi.....	53
3.4.3	İşletme basıncının etkisi.....	56
BÖLÜM 4 ENTEGRE GAZLAŞTIRICI-KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN MODELİ VE PERFORMANS ANALİZİ.....		59
4.1	Literatür Özeti.....	59
4.2	Matematiksel Model	60
4.2.1	Yakıcı	60
4.2.2	Isı Değiştirici II	63
4.2.3	Kompresör II.....	64
4.2.4	Isı Değiştirici I	66
4.2.5	Kompresör I.....	68
4.3	Performans Analizi Sonuçları	70
4.3.1	Hücre sıcaklığının etkisi.....	71
4.3.2	Akım yoğunluğunun etkisi.....	74
4.3.3	Kompresör basınç oranının etkisi	76
4.3.4	Biyokütle nem oranının etkisi	79
BÖLÜM 5 SONUÇLAR		82
KAYNAKLAR		84
EK-A.....		87
ÖZGEÇMİŞ.....		105

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
E	Aktivasyon enerjisi
\dot{E}	Birim zamandaki enerji değeri
\dot{E}_k	Birim zamandaki ekserji değeri
e_{kim}	Kimyasal ekserji
F	Faraday sabiti
G	Gibbs enerjisi
\bar{h}	Molar entalpi
i	Akım
j	Akım yoğunluğu
j_o	Değişken akım yoğunluğu
j_L	Limit akım yoğunluğu
K	Kimyasal denge sabiti
M	Moleküler ağırlık
\dot{n}	Molar debi
n_e	Elektron sayısı
N	Hücre sayısı
P	Basınç
P_{rc}	Basınç oranı
\dot{Q}	Birim zamanda transfer edilen ısı
r	Ohmik direnç
r_{bk}	Buhar karbon oranı
R	Evrensel gaz sabiti
\bar{s}	Molar entropi
T	Sıcaklık
U_a	Hava kullanım faktörü
U_f	Yakıt kullanım faktörü
V_{akt}	Aktivasyon polarizasyonu
V	Hücre voltajı
V_{kon}	Konsantrasyon polarizasyonu
V_k	Voltaj kayıpları
V_N	Nerst potansiyeli
V_{ohm}	Ohmik polarizasyon

\dot{W}	Güç
x	Mol oranı
\dot{x}	Birim zamanda reaksiyona giren metanın mol sayısı
\dot{y}	Birim zamanda reaksiyona giren karbon monoksitin mol sayısı
\dot{z}	Birim zamanda reaksiyona giren karbon hidrojenin mol sayısı
β	Transfer katsayısı
δ	Akım akış yol mesafesi
ε	Isı değiştirici etkinlik katsayısı
ρ	Malzeme özdirenci
η_l	I. Kanun verimi
η_{ek}	Ekserji verimi

Alt indisler

o	Çevre şartları
an	Antot
ka	Katot
b	Biyokütle
C	Karbon
CH_4	Metan
CO	Karbon monoksit
CO_2	Karbon dioksit
$\ç$	Çıkan
D	Ekserji kaybı
ek	Ekserji
g	Giren
H	Hidrojen
H_2O	Su
ID	Isı değiştirici
K	Kompresör
M	Mikser
N	Azot
O	Oksijen
R	Reformer
t	Toplam
YO	Yakıcı
YH	Yakıt hücresi

Üst indisler

f	Fiziksel
k	Kimyasal

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım
DC	Doğrusal akım
EGZ	Egzoz
GAZ	Gazlaştırıcı
HHV	Üst ısı değeri
KOYH	Katı oksit yakıt hücresi
LHV	Alt ısı değeri

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Yukarı akışlı gazlaştırıcı..... 3
Şekil 2.2	Aşağı akışlı gazlaştırıcı 6
Şekil 2.3	Yatay akışlı gazlaştırıcı..... 8
Şekil 2.4	Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı 10
Şekil 2.5	Sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcı..... 14
Şekil 2.6	Sürüklemeli yatak gazlaştırıcı 14
Şekil 2.7	Gazlaştırıcının şematik görünümü 19
Şekil 2.8	Enerji ve ekserji veriminin biyokütle nem içeriğine göre değişimi 22
Şekil 2.9	Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin biyokütle nem içeriğine göre değişimi 23
Şekil 2.10	Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının biyokütle nem içeriğine göre değişimi 23
Şekil 2.11	Gaz kompozisyonunun biyokütle nem içeriğine göre değişimi 24
Şekil 2.12	Enerji ve ekserji veriminin gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi . 25
Şekil 2.13	Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi..... 26
Şekil 2.14	Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi 26
Şekil 2.15	Gaz kompozisyonunun gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi 27
Şekil 2.16	Enerji ve ekserji veriminin işletme basıncına göre değişimi 28
Şekil 2.17	Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin işletme basıncına göre değişimi 29
Şekil 2.18	Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının işletme basıncına göre değişimi 29
Şekil 2.19	Gaz kompozisyonunun işletme basıncına göre değişimi 30
Şekil 2.20	Enerji ve ekserji veriminin gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi 31
Şekil 2.21	Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi 32
Şekil 2.22	Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi..... 32
Şekil 2.23	Gaz kompozisyonunun gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi 33
Şekil 3.1	KOYH şematik görünümü 35
Şekil 3.2	Mikser 36
Şekil 3.3	Reformer 38
Şekil 3.4	KOYH 41
Şekil 3.5	I.Kanun ve ekserji veriminin hücre sıcaklığına göre değişimi 50
Şekil 3.6	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi 51
Şekil 3.7	Hücre voltajının hücre sıcaklığına göre değişimi..... 51

Şekil 3.8	Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların hücre sıcaklığına göre değişimi	52
Şekil 3.9	Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi	52
Şekil 3.10	I.Kanun ve ekserji veriminin akım yoğunluğuna göre değişimi	53
Şekil 3.11	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi	54
Şekil 3.12	Hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimi.....	54
Şekil 3.13	Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların akım yoğunluğuna göre değişimi	55
Şekil 3.14	Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi .	55
Şekil 3.15	I.Kanun ve ekserji veriminin işletme basıncına göre değişimi	56
Şekil 3.16	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının işletme basıncına göre değişimi.....	57
Şekil 3.17	Hücre voltajının işletme basıncına göre değişimi	57
Şekil 3.18	Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların işletme basıncına göre değişimi	58
Şekil 3.19	Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının işletme basıncına göre değişimi...	58
Şekil 4.1	Entegre Gazlaştırıcı-KOYH Sistemi'nin şematik görünümü.....	60
Şekil 4.2	Yakıcı	61
Şekil 4.3	Isı değiştirici II.....	63
Şekil 4.4	a kompresör, b kompresör için T-s diyagramı	65
Şekil 4.5	Isı değiştirici I.....	66
Şekil 4.6	a kompresör, b kompresör için T-s diyagramı	68
Şekil 4.7	I.Kanun ve ekserji veriminin hücre sıcaklığına göre değişimi	72
Şekil 4.8	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi	72
Şekil 4.9	Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin hücre sıcaklığına göre değişimi (biyokütle: çim).....	73
Şekil 4.10	Sistem bileşenlerinin hücre sıcaklığına göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim)	73
Şekil 4.11	I.Kanun ve ekserji veriminin akım yoğunluğuna göre değişimi	74
Şekil 4.12	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi	75
Şekil 4.13	Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin akım yoğunluğuna göre değişimi (biyokütle: çim).....	75
Şekil 4.14	Sistem bileşenlerinin akım yoğunluğuna göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim)	76
Şekil 4.15	I.Kanun ve ekserji veriminin kompresör basınç oranına göre değişimi	77
Şekil 4.16	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının kompresör basınç oranına göre değişimi	77
Şekil 4.17	Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin kompresör basınç oranına göre değişimi (biyokütle: çim).....	78
Şekil 4.18	Sistem bileşenlerinin kompresör basınç oranına göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim).....	78
Şekil 4.19	I.Kanun ve ekserji veriminin biyokütle nem oranına göre değişimi.....	79

Şekil 4.20	Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının biyokütle nem oranına göre değişimi	80
Şekil 4.21	Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin biyokütle nem oranına göre değişimi	80
Şekil 4.22	Sistem bileşenlerinin biyokütle nem oranına göre ekserji kaybı değişimleri ...	81

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Bazı gazların standart kimyasal ekserjileri 17
Çizelge 2.2	Biyokütle elementel analizi 20
Çizelge 2.3	Giriş parametreleri 20
Çizelge 2.4	Oluşturulan model ile diğer çalışmaların karşılaştırılması 20
Çizelge 2.5	Biyokütle içeriği 21
Çizelge 3.1	KOYH tasarım parametreleri 48
Çizelge 3.2	Giriş parametreleri 48
Çizelge 3.3	Simülasyon sonuçları ve literatürle karşılaştırılması 49
Çizelge 3.4	Yakıt kompozisyonları 49
Çizelge 4.1	Giriş verileri 70
Çizelge 4.2	Sistemden elde edilen sonuçlar 70
Çizelge 4.3	Sistem bileşenlerinin ekserji performansı sonuçları 71

GAZİFİKASYONLU BİR YAKIT HÜCRESESİ SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ

Burak İZGİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali Volkan AKKAYA

Bu çalışmada, bir yakıt hücresi sisteminin bir gazlaştırma sistemi ile entegresinden oluşan enerji üretim sistemi matematiksel olarak modellenerek, çeşitli işletme ve tasarım parametrelerinin sistemin performansına olan etkisi analiz edilmiştir. Entegre Gazlaştırıcı-KOYH sistemini oluşturan bileşenler ayrı ayrı ele alınarak, her bir bileşen için termodinamik, kimyasal ve elektrokimyasal proseslere dayalı olarak sıfır boyutlu denge modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda öncelikle KOYH’de yakıt olarak kullanılacak olan gaz karışımını üreten biyokütle gazlaştırıcı bileşeni modellenmiştir. Daha sonra yakıtı gazlaştırıcıdan elde edilen gaz karışımı olan KOYH’nin elektrokimyasal modeli oluşturulmuştur. Son olarak ısı değiştiriciler ve kompresörleri de içeren Entegre Gazlaştırıcı-KOYH sisteminin matematiksel modeli ortaya konmuştur.

Oluşturulan matematiksel model bir bilgisayar programında kodlanarak belirli şartlarda analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları literatürdeki deneysel ve teorik çalışmalarla karşılaştırılarak oluşturulan modelin doğruluğu gösterilmiştir.

Sistemden alınan net güç, I.kanun verimi, ekserji verimi, ekserji kaybı ve ekserji çıktısı performans kriterleri olarak dikkate alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gazlaştırma, katı oksit yakıt hücresi, performans analizi, ekserji, matematiksel model, entegre sistemler

**SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF AN INTEGRATED
GASIFICATION-FUEL CELL SYSTEM**

Burak IZGI

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ali Volkan AKKAYA

In this study, an energy production system developed from integration of a fuel cell system and a gasification system has been modeled. Effect of various operating and design parameters on system performance has been analyzed. Dealing with components separately which are composing Integrated gasifier-SOFC system, zero dimensional equilibrium model has been created which is based on thermodynamic, chemical and electrochemical processes for every component. In this context, biomass gasifier component which produces syngas that will be used as a fuel in SOFC has been modeled primarily. Then, electrochemical model of SOFC whose fuel is a gas mixture obtained by gasifier has been modeled. Lastly, mathematical model of integrated gasifier-KOYH system which also includes heat exchanger and compressors has been produced.

By encoding in a computer program, mathematical model has been analyzed under specific conditions. Accuracy of model has been demonstrated by comparing results of analysis with experimental and theoretic studies in literature.

Net power, first law efficiency, exergy efficiency, exergy destruction and exergy output have been considered as the performance criteria.

Key words: Gasification, SOFC, performance analysis, exergy, modeling, integrated systems

1.1 Literatür Özeti

Artan dünya nüfusu ve gelişen teknolojiyle birlikte enerji gereksinimlerinin artması, buna karşılık mevcut enerji kaynaklarının günden güne azalması, yeni kaynak arayışlarının yanı sıra eldeki bu kaynakları daha verimli kullanmayı ve daha verimli enerji dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı enerji üretim sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar son yıllarda oldukça önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Düşük emisyon değerleri, yüksek enerji dönüşüm verimleri ve farklı yakıtlarla çalışabilmeleri ile geniş bir kullanım alanına sahip olması beklenen yakıt hücresi sistemlerinin, enerji problemlerinin çözümünde önemli bir rol oynaması beklenmekte ve bu teknolojinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir [1],[2],[3].

Yakıt hücre sistemleri yakıtın kimyasal enerjisini elektrokimyasal olarak elektrik enerjisine direkt çeviren sistemlerdir [3]. Pek çok çeşidi olan yakıt hücrelerinin en yaygın olan tipleri arasında, proton değişim zarlı yakıt hücreleri, katı oksit yakıt hücreleri, fosforik asit yakıt hücreleri ve eriyik karbonatlı yakıt hücreleri sayılabilir. Bunlardan katı oksit yakıt hücreleri (KOYH) yüksek sıcaklıklarda çalışmaları sayesinde (800-1000 °C) konvansiyonel enerji üretim sistemleriyle (gaz ve buhar türbinleri gibi) entegre olarak çalışabilmektedir. Bu sayede yakıtın elektriğe dönüşüm verimi %70'lere kadar ulaşabilmektedir [4],[5],[6].

Enerji üretiminin sürdürülebilirliği açısından, verimli ve çevre dostu enerji üretim sistemlerinin yanında, enerji kaynağı olarak kullanılan yakıtın da yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevre dostu olması önem arz etmektedir. Biyokütle, sürdürülebilir ve çevre dostu olması nedeniyle gelecekte alternatif bir yakıt kaynağı olarak görülmektedir. Biyokütlenin, buhar türbinlerinde kullanılmak üzere buhar üretimi için yakılması konvansiyonel bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında, biyokütlenin gazlaştırılarak gaz türbinlerinde, yakıt hücrelerinde ve çeşitli hibrit enerji üretim sistemlerinde kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [1],[5],[7],[8].

Biyokütlenin yakıt olarak kullanıldığı gazlaştırıcı ve KOYH'den oluşan hibrit enerji üretim sistemlerinin gelecekte yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli bir yere sahip olacağı düşünülmektedir [7].

İlgili bölümlerde yapılan çalışmalara dair literatür özeti ayrıca verilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bir entegre Gazlaştırma-Katı Oksit Yakıt Hücresi (KOYH) sistemini matematiksel olarak modelleyerek çeşitli işletme şartları için performans analizi yapmak ve optimum çalışma şartlarını belirlemektir. Bu amaç kapsamında Gazlaştırma-KOYH sistemini oluşturan bileşenler tek tek ele alınarak matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra sistemi oluşturan bileşenler kademe kademe birleştirilerek tüm sistem için matematiksel bir model ortaya konmuş ve tüm sistem enerji ve ekserji performansı yönünden incelenmiştir. Oluşturulan matematiksel model EES (Engineering Equation Solver) programında kodlanarak analizler gerçekleştirilmiştir.

1.3 Hipotez

Gazlaştırma işlemiyle elde edilen gaz karışımının, katı oksit yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılmaya uygun olması, her iki sistemin çalışma sıcaklıklarının yakın olması gibi nedenlerle iki sistemin entegre olarak çalıştırılması mümkün olmaktadır. Gazlaştırma sistemlerinin yakıt hücresi sistemleriyle entegre olarak çalıştırılması durumunda entegre sistemin verimi, tek bir sistemden elde edilen verim değerinden daha yüksek olması beklenebilir.

BİR BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRICININ DENGE MODELİ, SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZİ

Biyokütle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir potansiyele sahiptir ve çeşitli termokimyasal (piroliz, gazlaştırma, hidroliz) ve/veya biyokimyasal (fotoliz, fermantasyon) işlemlerle yakıtı dönüştürülerek enerji üretim sistemlerinde kullanılabilir. Biyokütlenin yakıtı dönüştürülmesinde kullanılan önemli yöntemlerden birisi de gazlaştırmadır. Gazlaştırma işlemi genel olarak katı yakıtların kısmi oksidasyon ile gaz ürünlere dönüştürüldüğü termokimyasal bir süreçtir.

Bu bölümde gazlaştırma işlemi için, gaz kompozisyonunu belirlemek ve gazlaştırma işleminde kullanılan biyokütle içeriğinin ve hava gibi diğer giriş parametrelerinin gaz kompozisyonuna ve gazlaştırma verimine etkisini incelemek amacıyla, sıfır boyutlu bir termodinamik denge modeli oluşturulmuştur.

2.1 Literatür Özeti

Bu güne kadar biyokütle gazlaştırma işlemi ile ilgili yapılan modelleme çalışmaları daha çok, üretilen gaz kompozisyonunu, bu gazın ısı değerini ve prosesin verimini hesaplama ve bu çıktıları etkileyen parametreler üzerine olmuştur. Biyokütle gazlaştırma modelleri ile ilgili olarak daha ayrıntılı bilgi Arnavat vd. [9]'da bulunabilir.

Bu başlık altında biyokütle gazlaştırma işlemi ile ilgili olarak yapılan modelleme çalışmalarının bir özetine yer verilmiştir.

Zainal vd. [10] biyokütle olarak odunun kullanıldığı, aşağı akışlı bir gazlaştırıcı için termodinamik denge modeline dayalı bir çalışma yapmışlardır. Oluşturulan matematiksel model ile gaz kompozisyonu ve üretilen gazın ısı değeri hesaplanabilmektedir. Yapılan çalışmada ayrıca farklı biyokütle türleri için biyokütle içerisindeki nemin gaz kompozisyonuna ve üretilen gazın ısı değerine olan etkisi incelenmiştir.

Jayah vd. [11] aşağı akışlı gazlaştırıcı için piroliz ve gazlaştırma kısımlarından oluşan iki bölümlü bir matematiksel model ortaya koymuşlar ve modeli deneysel verilerle kalibre etmişlerdir. Oluşturulan model ile gazlaştırma bölümündeki sıcaklık profili, gaz kompozisyonu ve prosesin verimi hesaplanabilmektedir. Çalışmada ayrıca biyokütle boyutu, nem içeriği, giriş hava sıcaklığı, prosesteki ısı kaybı gibi parametrelerin gazlaştırma verimine olan etkisi de incelenmiştir.

Altafini vd. [12] bir odun gazlaştırıcısı için termodinamik denge modeline dayalı bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Çalışmada odun içerisindeki nemin gaz kompozisyonuna ve ısı değerine olan etkisi incelenmiştir.

Jarungthammachote ve Dutta [13] aşağı akışlı bir gazlaştırıcı için bir termodinamik denge modeli oluşturarak, biyokütle içerisindeki nem miktarının gaz kompozisyonuna, üretilen gazların ısı değerine, reaksiyon sıcaklığına ve prosesin ikinci yasa verimine etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada biyokütle içerisindeki nem miktarı düştükçe, üretilen gaz karışımı içerisindeki H₂, CH₄ ve CO₂ miktarının azaldığı, CO ve N₂ miktarının arttığı; üretilen gazın ısı değerinin, reaksiyon sıcaklığının ve ikinci yasa veriminin azaldığı belirtilmiştir.

Melgar vd. [14] gazlaştırma ürünlerinin kompozisyonunu belirlemeye yönelik olarak aşağı akışlı bir gazlaştırıcı için matematiksel bir model ortaya koymuşlar ve modeli deneysel veriler ile doğrulamışlardır. Oluşturulan model ile yakıt hava oranı ve biyokütle nem içeriğinin gaz kompozisyonuna ve proses karakteristiklerine olan etkisi incelenmiştir.

Ptasinski vd. [15] farklı biyokütle türlerinin gazlaştırma işlemindeki ekserji verimlerini karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada biyokütlenin kurutulmasıyla içerisindeki nem miktarının azaltılmasının ekserji verimini artırdığı belirtilmiştir.

Sharma [16] bir aşağı akışlı gazlaştırıcı için termodinamik denge modeli oluşturmuştur. Yapılan çalışmada biyokütle nem içeriği, basıncı, yakıt hava oranı ve hava giriş sıcaklığının üretilen gaz kompozisyonuna, gazlaştırma verimine, üretilen gazın ısıl değerine, gaz çıkış sıcaklığına olan etkisi incelenmiştir.

Karamarkovic vd. [17] farklı gazlaştırma sıcaklıklarının enerji ve ekserji verimlerine olan etkisini incelemek üzere termodinamik denge modeline dayalı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada ayrıca biyokütle içerisindeki nemin farklı basıncılar altında gerçekleşen gazlaştırma işleminde enerji ve ekserji verimlerine olan etkisi de gösterilmiştir.

Gautam vd. [18] yaptıkları çalışmada, birçok biyokütle rneği için termodinamik denge modelinden elde edilen gaz kompozisyonu verilerini regresyon analizinde kullanarak gazlaştırma ürünleri kompozisyonunu direkt olarak biyokütle elementel içeriğine göre hesaplamaya olanak tanıyan bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada, biyokütle içerisindeki nemin ve reaksiyon sıcaklığının gaz kompozisyonuna olan etkisi incelenmiştir.

2.2 Gazlaştırma ve Gazlaştırma Teknolojileri

Gazlaştırma; karbon içerikli her türlü yakıtın, kısmi oksidasyon ortamında kullanılabilir ısıl değere sahip gaz haline dönüştürüldüğü kimyasal bir procestir [19].

Gazlaştırma işlemi sonucunda; hidrojen, karbon monoksit, karbon dioksit ve su buharından oluşan gaz karışımı, az miktarda katı madde, kül ve yoğuşabilen bileşenler (yağ ve çeşitli hidrokarbon gazları) elde edilir. Reaksiyonlarda oksitleyici olarak su buharı, hava veya oksijen kullanılabilir. Gazlaştırma sonucu elde edilen gaz karışımı, çeşitli arındırma ve ayrıştırma işlemlerine tabi tutularak pek çok alanda kullanılabilir (rneğin: gc santrallerinde, gaz türbinlerinde, yakıt hücrelerinde, sentetik yakıt için ham madde olarak vb.) [9].

2.3 Gazlaştırma

Gazlaştırma kimyası oldukça karmaşık bir yapıya sahip olmakla birlikte, gazlaştırma işlemi genel olarak dört aşamadan oluşur. Bunlar: Kurutma, piroliz, oksidasyon ve indirgenme (redüksiyon) aşamalarıdır.

Kurutma aşamasında; biyokütlenin nemi azalır. Genelde biyokütlenin nem içeriği %5 - %35 arasında değişmektedir. Kurutma aşamasında bu oran, 100 – 200 °C sıcaklık aralığında yapılan kurutma işlemiyle %5 civarlarına kadar inmektedir. Piroliz; temel olarak biyokütlenin, havasız/oksijensiz ortamda sıcaklığın etkisiyle parçalanmasıdır. Bu aşamada biyokütle içerisindeki uçucu maddeler indirgenir. İndirgenme reaksiyonunun sonucu olarak biyokütle içerisindeki hidrokarbon gazları serbest kalır ve biyokütlenin kalan kısmı katı karbon parçacıklarına dönüşür. Ayrıca bu aşamada hidrokarbon gazları yeterince soğurlarsa yoğunlaşarak katran oluşturabilirler. Oksidasyon; katı karbon parçacıklarına dönüşmüş olan biyokütle ile hava içerisindeki oksijen arasında gerçekleşen reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda karbon dioksit, biyokütle içerisindeki hidrojenin dolayısıyla da su buharı oluşmaktadır. Karbon ve hidrojenin oksitlenmesi sonucunda büyük miktarda ısı açığa çıkmaktadır. Oksidasyon aşamasında eğer oksijen miktarı stokiometrik miktarın altında ise karbonun kısmi oksidasyonu sonucu karbon monoksit de oluşmaktadır. İndirgenme (redüksiyon) aşamasında; eksik oksijen ortamında 800 – 1000 °C sıcaklık aralığında birçok reaksiyon gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonların çoğu endotermik reaksiyonlardır [9].

2.3.1 Gazlaştırıcılar

Gazlaştırıcılar bir kaç şekilde sınıflandırılabilirler: Oksitleyici türüne göre; hava, oksijen ve buhar kullanılan gazlaştırıcılar; Isı kaynağına göre: Oto-termal ve direkt gazlaştırıcılar; Gazlaştırma basıncına göre: Atmosferik ve basınçlı gazlaştırıcılar; ve dizayn şekillerine göre: sabit yataklı, akışkan yataklı ve sürüklemeli yatak gazlaştırıcılar.

2.3.1.1 Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

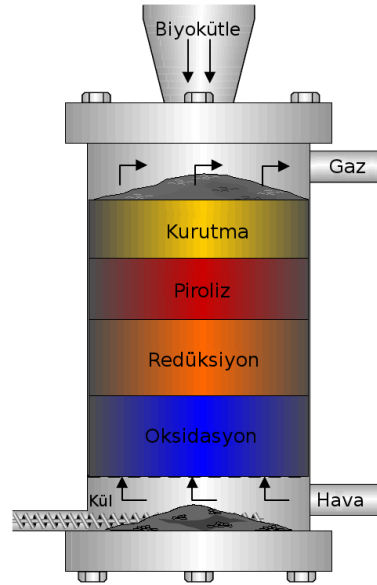
Sabit yataklı gazlaştırıcılar gazlaştırma işleminde kullanılan geleneksel gazlaştırıcılarıdır. Bu tip gazlaştırıcıların kurulumları ve işletmeleri görece basittir. Bu nedenle küçük ve orta ölçekli güç ve termal enerji kullanımları için uygundur. Bu tip gazlaştırıcılar yaklaşık olarak 1000 °C sıcaklıkta ve genel olarak atmosferik basınçta çalışırlar. Gazlaştırıcıya sağlanan havanın akış yönüne göre yukarı akışlı, aşağı akışlı ve yatay akışlı olarak sınıflandırılırlar [19],[20],[21].

Yukarı Akışlı Gazlaştırıcılar

Yukarı akışlı gazlaştırıcılarda yakıt gazlaştırıcının üst kısmından verilirken, hava/oksijen alt kısmından verilir ve üretilen gaz üst kısımdan alınır (Şekil 2.1).

Gazlaştırıcının en alt kısmında bulunan yanma bölgesinde kül ızgaranın alt kısmından uzaklaştırılırken yanma sonucu oluşan sıcak gazlar yukarı doğru hareket eder. Üst kısımlarda artan sıcaklıkla birlikte aşağıya doğru inen yakıt kurur, piroliz ve indirgeme bölgelerinden geçerken gaz bileşenlerine ayrılır. Oluşan gaz gazlaştırıcının üst kısmından dışarı alınırken yakıtın kalan kısmı yanma bölgesinde yanarak gazlaştırma işleminin devamı için gerekli ısıyı sağlar.

Bu tip gazlaştırıcılarda üretilen gazların çıkış sıcaklığı, gazların kurutma ve piroliz bölgelerinden geçerken ısı kaybetmesi nedeniyle düşüktür (200-300 °C). Bu nedenle prosesin enerji verimi yüksek olmakta fakat düşük gaz sıcaklığı nedeniyle yüksek katran içeriğine sahip gaz elde edilmektedir. Gazlaştırma bölgesinin sıcaklık kontrolü gazlaştırıcıya verilen hava/oksijen'e su buharı eklenmesiyle sağlanır [20].



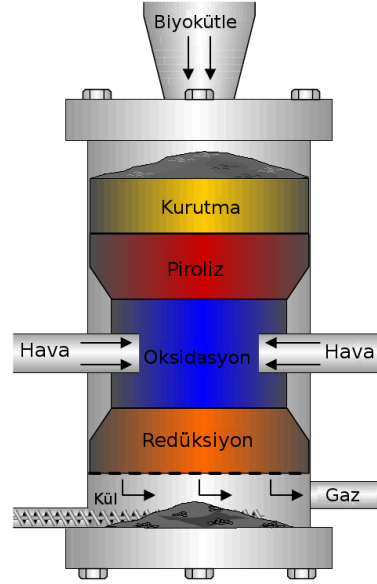
Şekil 2.1 Yukarı akışlı gazlaştırıcı [22]

Aşağı Akışlı Gazlaştırıcılar

Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda yakıt ve hava/oksijen gazlaştırıcıda aynı yönde hareket eder (Şekil 2.2). Üretilen gazlar sıcak bölgeden geçerek gazlaştırıcıyı terk ettiklerinden dolayı gazların çıkış sıcaklığı yüksektir (900-1000 °C). Ayrıca piroliz ve oksidasyon bölgelerinde oluşan gazlar gazlaştırıcının sıcak bölgesinden geçerken, içeriğindeki katran sıcaklığın

etkisiyle ayrışarak gaza dönüşür. Böylece üretilen gaz içerisindeki katran miktarı çok düşük seviyelerde kalır. Bu tip gazlaştırıcılarda üretilen gaz sıcaklığı yüksek olduğundan dolayı prosesin enerji verimi düşüktür [20],[21].

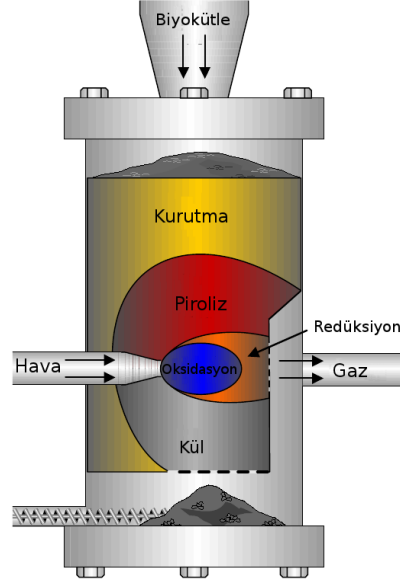
Aşağı akışlı tipteki gazlaştırıcılar yüksek kül oranına (>%5) ve yüksek nem oranına (>%20) sahip yakıtların gazlaştırılması için uygun değildir [23].



Şekil 2.2 Aşağı akışlı gazlaştırıcı [22]

Yatay Akışlı Gazlaştırıcılar

Yatay akışlı gazlaştırıcılarda yakıt gazlaştırıcının üst kısmından verilir. Yakıt yer çekiminin etkisiyle aşağıya doğru hareket ederken, hava gazlaştırıcıya yan kısımdan girerek yatay bir yol izler ve üretilen gaz havanın girdiği kısmın karşısından yatay yönde dışarı çıkar (Şekil 2.3). Bu tip gazlaştırıcıların tasarımları kolay olmakla birlikte, üretilen gazın ısı değeri düşüktür, gaz içerisindeki katran miktarı yüksektir [22].



Şekil 2.3 Yatay akışlı gazlaştırıcı [22]

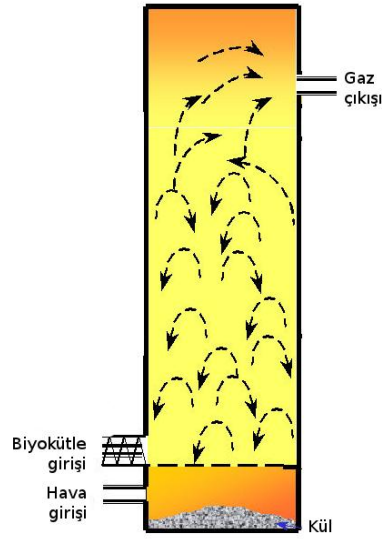
2.3.1.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar

Akışkan yatak gazlaştırıcılarda gazlaştırma işlemi yüksek hızlı hava ve katı partiküllerden oluşan (kum gibi) akışkan yatak içerisinde gerçekleşir. Gazlaştırılacak yakıtın hareket halindeki akışkan yatak içerisine gönderilmesi sayesinde yakıt ile hava karışımı çok iyi sağlanmaktadır. Böylece oksidasyon sonucu gazlaştırma bölgesinde üniform sıcaklık dağılımı elde edilmekte ve daha verimli bir gazlaştırma işlemi gerçekleşmektedir. Bu tip gazlaştırıcılar sabit yatak gazlaştırıcılara göre daha yüksek kapasiteli güç ve ısı enerjisi sistemlerinde kullanım için uygundur [19],[20],[21].

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar genel olarak kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcılar ve sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcılar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Kabarcıklı Akışkan Yatak Gazlaştırıcılar

Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcılar, alt kısmında bir ızgara bulunan ve ızgara arasından yüksek hızda havanın geçtiği, gazlaştırılacak yakıtın bu hava yatağına verildiği bir kanal şeklindedir (Şekil 2.4).

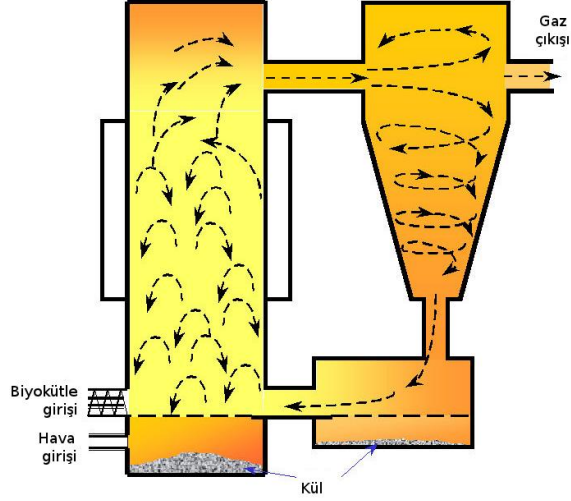


Şekil 2.4 Kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı [24]

Bu tip gazlaştırıcılarda, hava ile birlikte akışkan yatağı oluşturan katı parçacıklar (kum gibi) yatak sıcaklığını dengede tutar. Böylece yanma sonucu oluşan kül ergime sıcaklığı altında tutulurken, yatağın sıcaklığı tam yanma için gerekli olan değerde kalır. Yakıt yatağa beslendiğinde, organik maddelerin çoğu piroliz ve kısmi oksidasyona uğrayarak gazlaşır. Ekzotermik yanma, yatak sıcaklığını korur ve ilave yakıtın gazlaşması için gerekli olan ısıyı sağlar. Akışkan yatağın sıcaklığı yakıt/hava oranı ile kontrol altında tutulur (700-900 °C) [20],[21].

Sirkülasyonlu Akışkan Yatak Gazlaştırıcılar

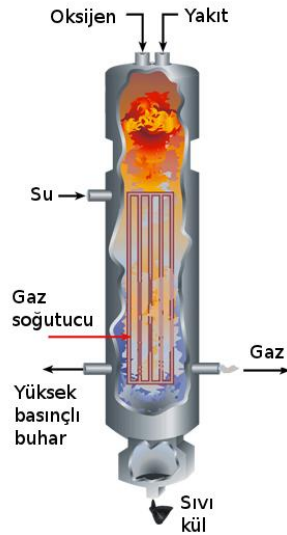
Sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcılarda yatak materyali, gazlaştırma kanalıyla bir siklon arasında sirküle eder (Şekil 2.5). Böylece yatak materyali ile birlikte sürüklenen gazlar siklondan geçerken külden ve katı yakıt partiküllerinden arınarak gazlaştırıcıdan çıkar. Kül siklonun alt tarafındaki ızgarada ayrılırken, yakıt partikülleri yatak materyali ile birlikte gazlaştırma kanalına geri döner [20].



Şekil 2.5 Sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcı [24]

2.3.1.3 Sürüklemeli Yatak Gazlaştırıcılar

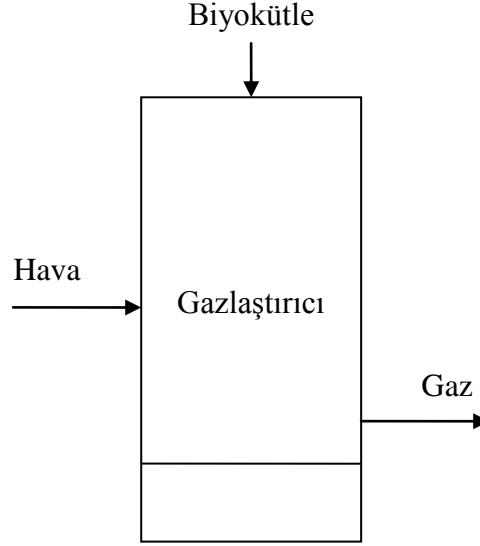
Sürüklemeli yatak gazlaştırıcılarda yakıt ve hava/oksijen gazlaştırıcıya aynı noktadan verilir (Şekil 2.6). Yakıtın gazlaştırıcıda kalma süresi çok kısadır (birkaç saniye). Bu nedenle iyi bir gazlaştırma elde edilebilmesi için sıcaklığın yüksek olması gerekir. Sıcaklığın yüksek olması nedeniyle sürüklemeli yatak gazlaştırıcılar külün erime sıcaklığından üstündeki sıcaklıklarda çalışır. Yüksek sıcaklık ihtiyacı aynı zamanda yüksek miktarda oksijen ihtiyacını da beraberinde getirir. Yakıt boyutunun $100 \mu\text{m}$ 'nin altında olması gerekir [19].



Şekil 2.6 Sürüklemeli yatak gazlaştırıcı [25]

2.4 Matematiksel Model

Aşağı akışlı gazlaştırıcı için oluşturulan matematiksel model, sıfır boyutlu termodinamik denge modeline dayanmaktadır. Göz önüne alınan gazlaştırıcının şematik görünümü Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7 Gazlaştırıcı

Model oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Gazlaştırıcı, sürekli akışlı açık bir kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.
- Gazlaştırıcıya sağlanan havanın %79 N₂ ve %21 O₂’den oluştuğu kabul edilmiştir.
- Gazlaştırma işlemi sonunda oluşan gazlar ideal gaz olarak kabul edilmiştir.
- Gazların sıcaklığı reaksiyon sıcaklığına eşit olarak alınmıştır.
- Gazlaştırma işleminin adyabatik olduğu kabul edilmiştir.
- Ölü hal sıcaklığı ve basıncı $T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_0=1\text{ atm}$ olarak alınmıştır.
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilmiştir.

Oluşturulan model ile gazlaştırma ürünleri kompozisyonu ve reaksiyon sıcaklığı gibi çıkış parametrelerinin hesaplanması; biyokütle elementel içeriği ve nem oranı,

gazlaştırma işleminde kullanılan hava miktarı ve sıcaklığı gibi giriş parametrelerinin çıkış parametrelerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Model oluşturulurken ilk olarak biyokütle içerisindeki karbon, hidrojen, oksijen ve azot elementlerinin ve biyokütle içerisindeki nemin kütleli oranları hesaplanmış, bu kütleli oranlardan yola çıkılarak biyokütlenin kimyasal formülü oluşturulmuştur. Oluşturulan kimyasal formül genel gazlaştırma denkleminde kullanılarak gazlaştırma işlemi için kütle dengesi ve kimyasal denge ifadeleri yazılmış ve böylece gazlaştırma ürünlerinin kompozisyonu belirlenmiştir. Ayrıca gazlaştırıcı için enerji dengesi kurularak gazlaştırma ürünlerinin sıcaklıkları hesaplanmıştır.

2.4.1 Biyokütle Kompozisyonu

Biyokütle elementel analizinden yola çıkılarak biyokütlenin kimyasal formülü $CH_xO_yN_z$ şeklinde yazılabilir. Formüldeki katsayıların, her bir elementin biyokütle içerisindeki kütleli oranı ile ilişkili olduğu göz önüne alınırsa x , y ve z değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14]:

$$x = \frac{HM_C}{CM_H}, \quad y = \frac{OM_C}{CM_O}, \quad z = \frac{NM_C}{CM_N} \quad (2.1)$$

Burada H , O , N ve C sırasıyla hidrojen, oksijen, azot ve karbonun biyokütle içerisindeki kütleli oranlarıdır ve biyokütle elementel analizi sonucu elde edilirler. M_H , M_O , M_N ve M_C ise sırasıyla hidrojen, oksijen, azot ve karbonun molar kütleleridir.

Biyokütle içerisindeki nem miktarı birim molar biyokütle için molar olarak aşağıdaki gibi yazılabilir [10]:

$$\dot{n}_{nem} = \frac{M_b m_w}{M_{H_2O}(1 - m_w)} \quad (2.2)$$

Burada M_b ve M_{H_2O} sırasıyla biyokütlenin ve biyokütle içerisindeki suyun molar kütleleri, m_w ise biyokütle içerisindeki nemin kütleli oranıdır.

2.4.2 Kütle Dengesi

Genel gazlaştırma denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{n}_b(CH_xO_yN_z + \dot{n}_{nem}H_2O) + \dot{n}_{hava}(0,21 \cdot O_2 + 0,79 \cdot N_2) \rightarrow \dot{n}_{H_2}H_2 + \dot{n}_{CO}CO + \dot{n}_{CO_2}CO_2 + \dot{n}_{H_2O}H_2O + \dot{n}_{CH_4}CH_4 + \dot{n}_{N_2}N_2 \quad (2.3)$$

6 Adet gazlaştırma ürününü belirleyebilmek için 6 adet denkleme ihtiyaç vardır. Bunlardan 4 tanesi gazlaştırma reaksiyonundan kütle dengesi yazılarak belirlenir (Denklem 2.4, 2.5, 2.6, 2.7).

$$\text{Karbon: } \dot{n}_{CO} + \dot{n}_{CO_2} + \dot{n}_{CH_4} - \dot{n}_b = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{Hidrojen: } 2\dot{n}_{H_2} + 2\dot{n}_{H_2O} + 4\dot{n}_{CH_4} - x\dot{n}_b - 2\dot{n}_b n_{nem} = 0 \quad (2.5)$$

$$\text{Oksijen: } \dot{n}_{CO} + 2\dot{n}_{CO_2} + \dot{n}_{H_2O} - \dot{n}_{nem} - 2 \cdot 0,21 \cdot \dot{n}_{hava} - y\dot{n}_b = 0 \quad (2.6)$$

$$\text{Azot: } 2\dot{n}_{N_2} - z\dot{n}_b - 2 \cdot 0,79 \cdot \dot{n}_{hava} = 0 \quad (2.7)$$

Kalan 2 denklem de gazlaştırma sırasında CO ile H_2O arasında gerçekleşen su-gaz denge reaksiyonu (Denklem 2.8) ve C ile H_2 arasında gerçekleşen metan denge reaksiyonu (Denklem 2.9) yardımıyla belirlenebilir.



Denge durumundaki gaz karışımının kompozisyonunu belirleyen bu iki reaksiyonun denge sabitleri K_1 ve K_2 sıcaklığın bir fonksiyonudur [26].

$$K_1 = e^{-(\Delta G_1 / R_u T)} \quad (2.10)$$

$$K_2 = e^{-(\Delta G_2 / R_u T)} \quad (2.11)$$

Burada T reaksiyon sıcaklığı, R_u evrensel gaz sabitidir. ΔG ise dikkate alınan reaksiyon için gibbs enerji fonksiyonundaki değişimdir ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$G_i = \bar{h}_i - T \cdot \bar{s}_i \quad (2.12)$$

$$\Delta G_1 = G_{H_2} + G_{CO_2} - G_{CO} - G_{H_2O} \quad (2.13)$$

$$\Delta G_2 = G_{CH_4} - 2G_{H_2} \quad (2.14)$$

Burada G_i , \bar{h}_i ve \bar{s}_i sırasıyla i bileşenin gibbs enerji fonksiyonu, entalpisi ve entropisidir.

Denge sabitleri K_1 ve K_2 , denge durumundaki gazların karışımdaki kısmi basınçlarından faydalanılarak da ifade edilebilir:

$$K_1 = \frac{(P_{CO_2})(P_{H_2})}{(P_{CO})(P_{H_2O})} \quad (2.15)$$

$$K_2 = \frac{(P_{CH_4})}{(P_{H_2})^2} \quad (2.16)$$

Denklem 2.15 ve 2.16'da P_i karışım içerisindeki i bileşenin kısmi basıncıdır. Kısmi basınçlar mol oranları cinsinden ifade edilerek K_1 ve K_2 denge sabitleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{top}} P \quad (2.17)$$

$$K_1 = \frac{(\dot{n}_{CO_2})(\dot{n}_{H_2})}{(\dot{n}_{CO})(\dot{n}_{H_2O})} \quad (2.18)$$

$$K_2 = \frac{(\dot{n}_{CH_4})(\dot{n}_{top})}{(\dot{n}_{H_2})^2} \frac{1}{P} \quad (2.19)$$

Burada \dot{n}_i karışım içerisindeki i bileşenin molar debisi, \dot{n}_{top} karışımın toplam molar debisi, P ise karışımın toplam basıncıdır.

Kütle dengesinden elde edilen Denklem 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 'ye K_1 ve K_2 denge sabitlerinden elde edilen Denklem 2.18 ve 2.19 'un da eklenmesiyle gazlaştırma ürünü kompozisyonunun belirlenebilmesi için gereken 6 adet denklem elde edilmiş olur.

Denge sabitleri K_1 ve K_2 değerlerinin hesaplanabilmesi için reaksiyon sıcaklığının bilinmesi gerekir. Reaksiyon sıcaklığı da gazlaştırıcı için enerji dengesi yazılarak belirlenebilir.

2.4.3 Enerji Dengesi

Gazlaştırıcı için genel enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_g - \sum_j (\dot{n}_j \bar{h}_j)_\xi = 0 \quad (2.20)$$

Burada \dot{n}_i ve \bar{h}_i sırasıyla reaksiyona giren i bileşenin molar debisi ve entalpisidir; \dot{n}_j ve \bar{h}_j ise reaksiyondan çıkan j bileşenin molar debisi ve entalpisidir.

Gazlaştırma sırasında iş etkileşiminin olmadığı göz önüne alınır ve sistemin adyabatik olduğu kabul edilirse enerji dengesi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\sum_i (\dot{n}_i \bar{h}_i)_g - \sum_j (\dot{n}_j \bar{h}_j)_\xi = 0 \quad (2.21)$$

Sisteme giren enerjinin hesaplanabilmesi için biyokütlenin entalpisii bilinmelidir. De Souza-Santos [40] 'e göre katı bir yakıtın oluşum entalpisii aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$h_{fb}^0 = \overline{LHV} + \sum_{k=\text{ürünler}} n_k \bar{h}_{f,k}^0 \quad (2.22)$$

Burada n_k tam yanma sonucu elde edilen ürünlerinin mol miktarları, $\bar{h}_{f,k}^0$ biyokütlenin tam yanması sonucu elde edilen ürünlerin oluşum entalpileri ve \overline{LHV} kJ/kmol olarak biyokütlenin alt ısıl değeridir.

Biyokütlenin alt ısıl değeri \overline{LHV} Channiwala ve Parikh [41] tarafından geliştirilen üst ısıl değer formülü yardımıyla hesaplanabilir (Denklemler 2.23).

$$\overline{HHV} = 1000(0.3491C + 1.1783H + 0.1005S - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211Kül) \quad (2.23)$$

$$\overline{LHV} = M_b(\overline{HHV} - 9m_H h_{fg}) \quad (2.24)$$

Buradaki \overline{HHV} kJ/kg olarak yakıtın üst ısıl değeri, C , H , S , O , N ve $Kül$ kuru biyokütle içerisindeki karbon, hidrojen, kükürt, oksijen, azot ve külün kütle oranlarıdır. M_b biyokütlenin molar kütlesi, m_H biyokütle içerisindeki hidrojenin kütle oranı, h_{fg} ise suyun buharlaşma entalpisidir.

Enerji verimi veya soğuk gaz verimi, gazlaştırma ürünlerinin enerjisi ile biyokütlenin enerjisi arasında bir ilişki kurularak tanımlanabilir. Gazlaştırıcıdan çıkan gazların 25 °C sıcaklıktaki enerjileri göz önüne alınarak soğuk gaz verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [14]:

$$\eta_e = \frac{\dot{E}_{gaz}}{\dot{E}_b} \quad (2.25)$$

Burada \dot{E}_{gaz} gazlaştırma ürünlerinin enerjisidir ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir [14]:

$$\dot{E}_{gaz} = \dot{n}_{CO}(\bar{h}_{f,CO}^0 - \bar{h}_{f,CO_2}^0) + \dot{n}_{H_2}(\bar{h}_{f,H_2}^0 - \bar{h}_{f,H_2O}^0) + \dot{n}_{CH_4}(\bar{h}_{f,CH_4}^0 - \bar{h}_{f,CO_2}^0 - \bar{h}_{f,H_2O}^0) \quad (2.26)$$

\dot{E}_b ise biyokütlenin enerjisidir ve biyokütlenin alt ısıl değeriyle ifade edilebilir:

$$\dot{E}_b = \dot{n}_b \overline{LHV} \quad (2.27)$$

2.4.4 Ekserji Dengesi

Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilirse her bir bileşenin ekserjisi kimyasal ve fiziksel ekserjilerin toplamı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Ek = Ek_k + Ek_f \quad (2.28)$$

Kotas, ideal gaz karışımlarının kimyasal ekserjisinin hesabı için aşağıdaki gibi bir eşitlik önermiştir [13]:

$$Ek_k = \sum_i (x_i \bar{\varepsilon}_{k,i} + \bar{R} T_o x_i \ln x_i) \quad (2.29)$$

Burada x_i i bileşenin gaz karışımı içerisindeki mol oranı, \bar{R} evrensel gaz sabiti, T_o ölü hal sıcaklığıdır. $\bar{\varepsilon}_{k,i}$ ise i bileşenin standart kimyasal ekserjisidir ve bazı gazlar için bu değerler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı gazların standart kimyasal ekserjileri [13]

Gaz	$\bar{\varepsilon}_{k,i}$ [kJ/kmol]
H ₂	238 490
CO	275 430
CO ₂	20 140
H ₂ O	11 710
CH ₄	836 510
N ₂	720

Gaz karışımı içerisindeki her bir bileşenin fiziksel ekserjisinin hesaplanabilmesi için aşağıdaki ifade kullanılabilir [26]:

$$Ek_f = (\bar{h} - \bar{h}_0) - T_o(\bar{s} - \bar{s}_0) \quad (2.30)$$

Burada \bar{h} ve \bar{s} herhangi bir sıcaklık ve basınçtaki entalpi ve entropiler, \bar{h}_0 ve \bar{s}_0 ise ölü hal durumundaki entalpi ve entropilerdir.

Eşitlik (2.31) ve (2.32)'den yola çıkarak gazlaştırma ürünlerinin ekserjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{E}k_{gaz} = \dot{E}k_{gaz,k} + \dot{E}k_{gaz,f} \quad (2.31)$$

$$\dot{E}k_{gaz,k} = \sum_i \dot{n}_{top} (x_i \bar{\epsilon}_{k,i} + \bar{R} T_o x_i \ln x_i) \quad (2.32)$$

$$\dot{E}k_{gaz,f} = \sum_i \dot{n}_i [\bar{h}_i - \bar{h}_{0,i} - T_o(\bar{s}_i - \bar{s}_{0,i})] \quad (2.33)$$

Hava, oksijen ve azottan oluşan bir gaz karışımı olarak ele alınırsa gazlaştırma işleminde kullanılan havanın ekserjisi aynı şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}k_h = \dot{E}k_{h,k} + \dot{E}k_{h,f} \quad (2.34)$$

$$\dot{E}k_{h,k} = \sum_i \dot{n}_{hava} (x_i \bar{\epsilon}_{k,i} + \bar{R} T_o x_i \ln x_i) \quad (2.35)$$

$$\dot{E}k_{h,f} = \sum_i \dot{n}_i [\bar{h}_i - \bar{h}_{0,i} - T_o(\bar{s}_i - \bar{s}_{0,i})] \quad (2.36)$$

Biyokütlenin ekserjisinin hesaplanabilmesi için Kotas'ın [27] önerdiği katı yakıtların ekserjisini hesaplamaya yönelik formül kullanılabilir [13]:

$$\dot{E}k_b = \dot{n}_b \varphi M_b (\overline{LHV} / M_b + m_w h_{fg}) \quad (2.37)$$

$$\varphi = \frac{1,0438 + 0,1882(H/C) - 0,2509(1 + 0,7256(H/C)) + 0,0383(N/C)}{1 - 0,3035(O/C)} \quad (2.38)$$

Burada m_w biyokütle içerisindeki nemim kütle oranı, h_{fg} kJ/kg olarak suyun buharlaşma entalpi, M_b biyokütlenin mol kütlesi, \overline{LHV} biyokütlenin alt ısı değeridir.

Her bir bileşenin ekserji değeri hesaplandığında gazlaştırıcı için ekserji kaybı, ekserji dengesinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{E}k_{D,gaz} = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W} + (\dot{E}k_b + \dot{E}k_h)_g - (\dot{E}k_{gaz})_ç \quad (2.39)$$

Çevre ile ısı ve güç alışverişi olmadığı kabul edildiğinde denklem yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}k_{D,gaz} = \dot{E}k_b + \dot{E}k_h - \dot{E}k_{gaz} \quad (2.40)$$

Gazlaştırma prosesi için giriş ve çıkış bileşenlerinin ekserjilerine göre bir ekserji verimi tanımlanabilir [14]:

$$\eta_{ek} = \frac{\dot{E}k_{gaz}}{\dot{E}k_b + \dot{E}k_h} \quad (2.41)$$

Burada $\dot{E}k_{gaz}$ gazlaştırma ürünlerinin ekserjisi, $\dot{E}k_b$ biyokütlenin ekserjisi, $\dot{E}k_h$ ise gazlaştırıcıya giren havanın ekserjisidir.

2.5 Modelin Doğrulanması

Oluşturulan matematiksel modelin doğruluğunu incelemek için oluşturulan matematiksel model, Jayah vd. [11] tarafından yapılan deneysel çalışma, Melgar vd. [14], Jarunthammachote vd. [13] ve Karamarkovic vd. [17] tarafından yapılan teorik çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan biyokütle elementel analizi ve giriş parametreleri Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3 'de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Biyokütle elementel analizi

Element	%
C	50,6
H	6,5
O	42
N	0,2
Nem	14
Kül	0,7

Çizelge 2.3 Giriş parametreleri

Parametre	Değer
Gazlaştırma sıcaklığı	1100 K
İşletme basıncı	1 bar
Giriş sıcaklığı	25 °C

Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3 'deki veriler kullanılarak, oluşturulan modelden elde edilen gazlaştırma ürünleri kompozisyonu, diğer çalışmalarla karşılaştırılması ve her bir çalışmayla olan hata oranları Çizelge 2.4 'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Oluşturulan model ile diğer çalışmaların karşılaştırılması

Gaz (%)	Jayah vd. [11]	Melgar vd. [14]	Jarungthammachote vd. [13]		Karamarkovic vd. [17]	Bu Çalışma
	Deneysel	Model	Basit Model	Geliştirilmiş Model	Model	
CO	18,9	19,2	18,51	18,52	16,55	16,91
H ₂	12,5	16,6	18,03	16,8	17,83	15,90
CO ₂	8,5	11	11,43	11,68	12,51	12,57
N ₂	59,1	53	51,92	51,94	53,10	53,62
CH ₄	1,2	0,2	0,11	1,06	~ 0	1,01
Hava/Yakıt oranı	2,29	2,3	2,68	2,58	2,33	2,73
RMS Hata	3,22	1,25	1,42	1,08	0,94	-
% Hata	5,54	2,11	2,69	2,05	1,61	-

Oluşturulan model sonuçlarının diğer çalışmalarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçların ortalama hata oranı % 3 'ü geçmemektedir. Bu sonuçlar modelin güvenilir olduğunu göstermektedir.

2.6 Parametrik Analiz Sonuçları

Çeşitli parametrelerin gazlaştırma sistemi performansına olan etkisi incelenmiştir. Analizlerde yakıt olarak üç farklı biyokütle kullanılmıştır. Yakıt olarak kullanılan biyokütlelerin içeriği Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Çizelge 2.5 Biyokütle içeriği [15]

Biyokütle	Kütlesel oran (%)						
	C	H	O	N	S	Kül	Nem
Odun	50,8	6,06	42,7	0,36	0,07	1,84	19,7
Saman	48,9	5,97	43,9	0,82	0,15	6,37	12,7
Çim	49,7	6	42,7	1,32	0,18	5,46	24,2

Biyokütle nemi (Nem), sisteme giren hava sıcaklığı ($T_{g,hava}$), işletme basıncı (P) ve gazlaştırma sıcaklığı (T_{gaz}) bağımsız değişkenler olarak seçilmiştir. Seçilen bağımsız değişkenlerin enerji ve ekserji verimi, üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisi, ekserji kaybı ve gaz kompozisyonuna olan etkisi incelenmiştir.

2.6.1 Nemin etkisi

Biyokütle içerisindeki nem miktarının enerji ve ekserji verimlerine olan etkisi Şekil 2.8'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi biyokütle içerisindeki nem miktarı arttıkça enerji ve ekserji verimleri azalmaktadır. Bunun nedeni biyokütle içerisindeki nem miktarı arttıkça gazlaştırma için harcanan enerjinin nemin buharlaşmasına giden kısmının artması dolayısıyla gereken reaksiyon sıcaklığını sağlamak için sisteme daha fazla hava verilmesi gerekliliği ve bunun sonucunda da gazlaştırma ürünleri içerisindeki kullanılabilir ısı değere sahip gazların (CO , H_2 , CH_4) miktarının azalmasıdır.

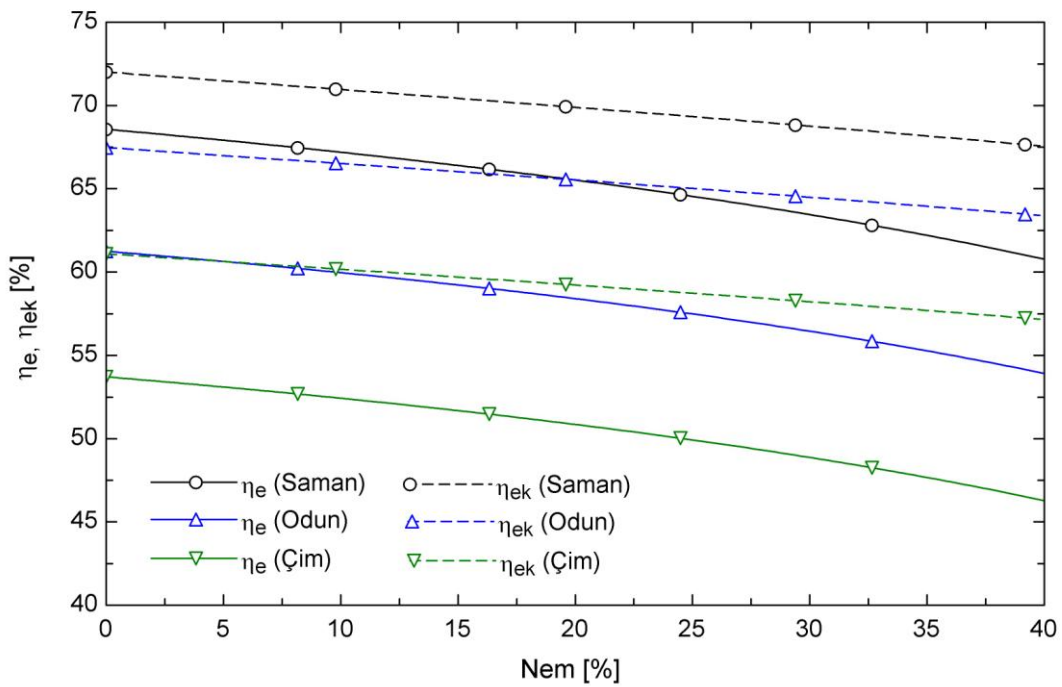
Enerji ve ekserji verimi yönünden bakıldığında gazlaştırma işleminde yakıt olarak saman, odun ve çim kullanılması halinde, saman en yüksek enerji ve ekserji verimini verirken, çim en düşük verim değerlerini vermektedir.

Gazlaştırma sonucu elde edilen gaz karışımının ısı değeri ve ekserjisinin biyokütle içerisindeki nem ile değişimi Şekil 2.9'da verilmiştir. Biyokütle içerisindeki nem miktarının artması üretilen gaz karışımının ekserjisinde önemli bir değişikliğe sebep olmazken, ısı değeri düşürmektedir.

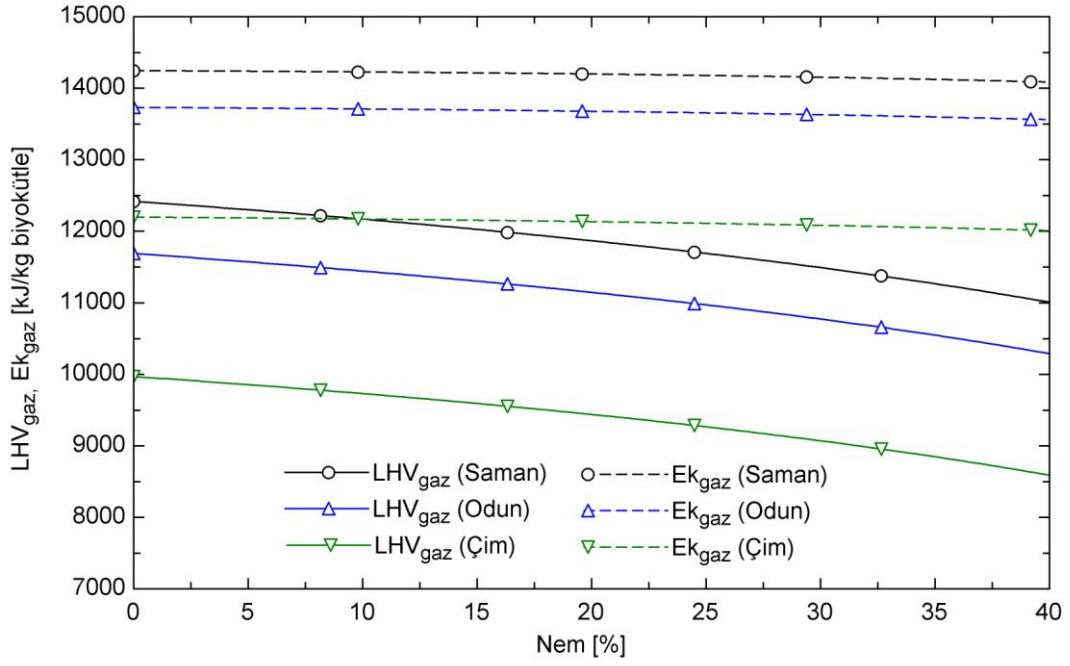
Şekil 2.10'da gazlaştırıcıda gerçekleşen ekserji kaybının biyokütle içerisindeki nem miktarı ile değişimi verilmiştir. Gazlaştırılan biyokütle içerisindeki nem miktarı arttıkça ekserji kaybı da artmaktadır. Yakıt olarak seçilen üç farklı biyokütle için ekserji kaybı değerlerine bakılacak olursa, en fazla ekserji kaybı gazlandırmada yakıt olarak çim

kullanılması halinde gerçekleşmektedir. Odun kullanılması halinde nispeten daha az ekserji kaybı oluşurken, en az ekserji kaybı saman kullanılması durumunda gerçekleşmektedir.

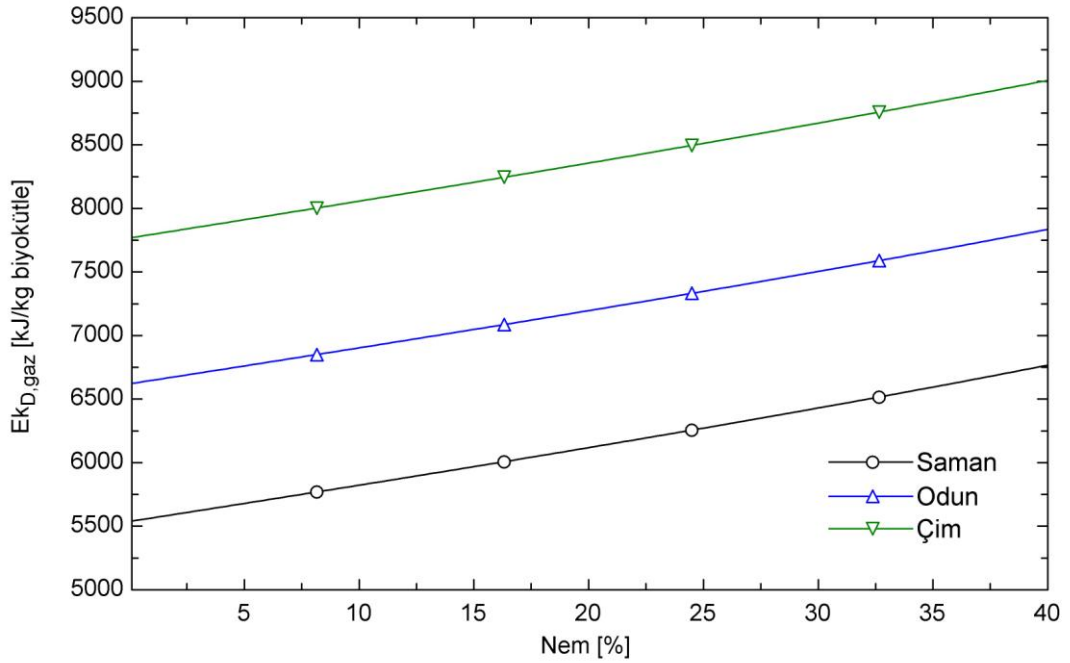
Biyokütle nem içeriğinin üretilen gaz kompozisyonuna olan etkisi Şekil 2.11'de verilmiştir. Biyokütle içerisindeki nem miktarı arttıkça gaz kompozisyonundaki H_2 miktarı artmaktadır. Bu durum, nem miktarının artmasıyla birlikte nemle gelen hidrojenin gazlaştırma ürünleri içerisindeki H_2 miktarının artmasını sağladığı şeklinde yorumlanabilir. Gazlaştırma ürünleri içerisinde oldukça az miktarda bulunan CH_4 artan nem ile bir miktar artmakla birlikte nem içeriğinden oldukça az etkilenmektedir. CO miktarı biyokütle nem içeriği arttıkça azalmakta, CO_2 miktarı ise artmaktadır. Bunun nedeni nem miktarı arttıkça nemle birlikte gelen oksijenin CO ile tepkimeye girerek CO_2 oluşturmasıdır. Gazlaştırma ürünleri içerisindeki N_2 miktarına nemin etkisi düşük seviyededir.



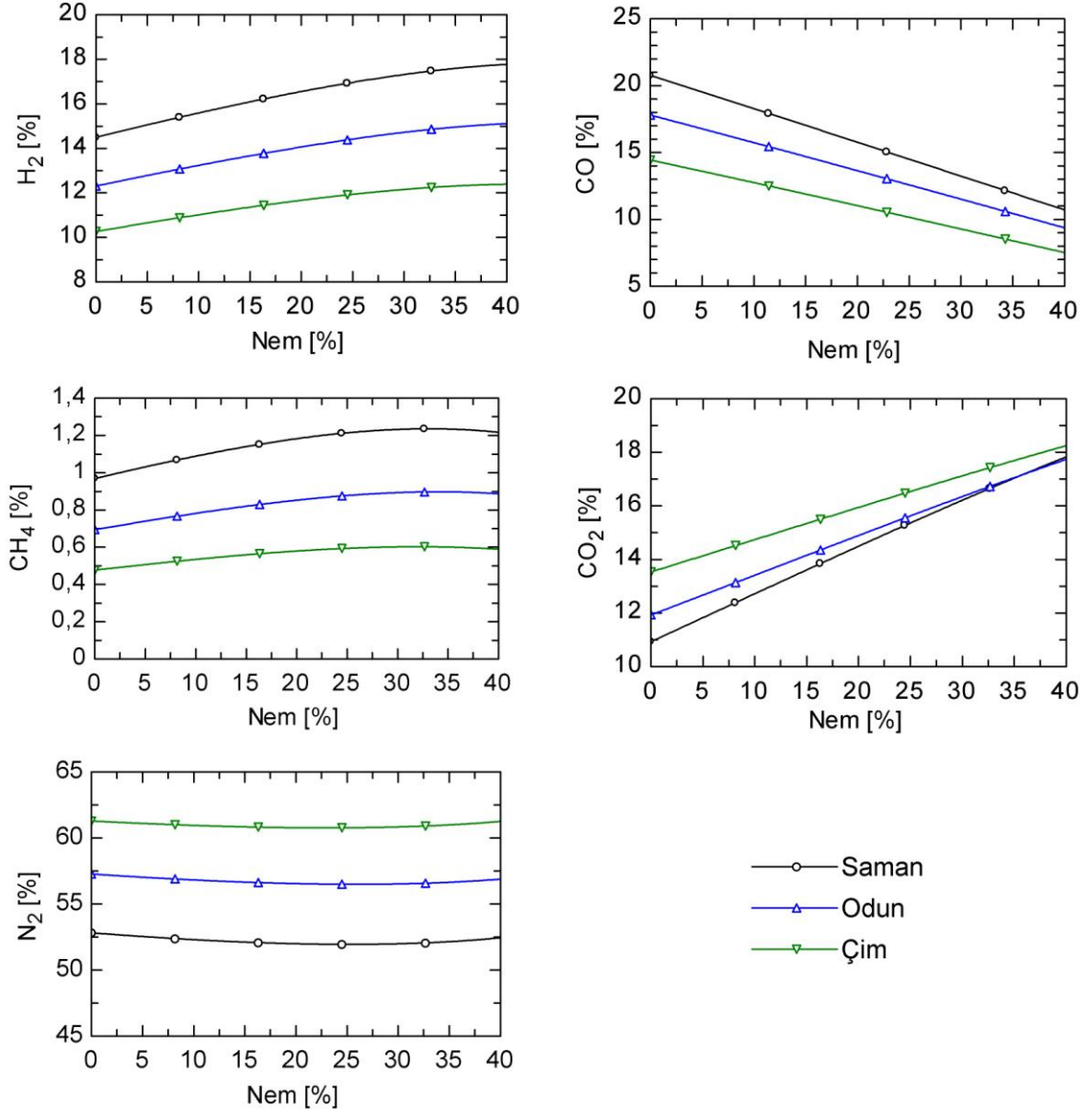
Şekil 2.8 Enerji ve ekserji veriminin biyokütle nem içeriğine göre değişimi



Şekil 2.9 Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin biyokütle nem içeriğine göre değişimi



Şekil 2.10 Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının biyokütle nem içeriğine göre değişimi



Şekil 2.11 Gaz kompozisyonunun biyokütle nem içeriğine göre değişimi

2.6.2 Hava giriş sıcaklığının etkisi

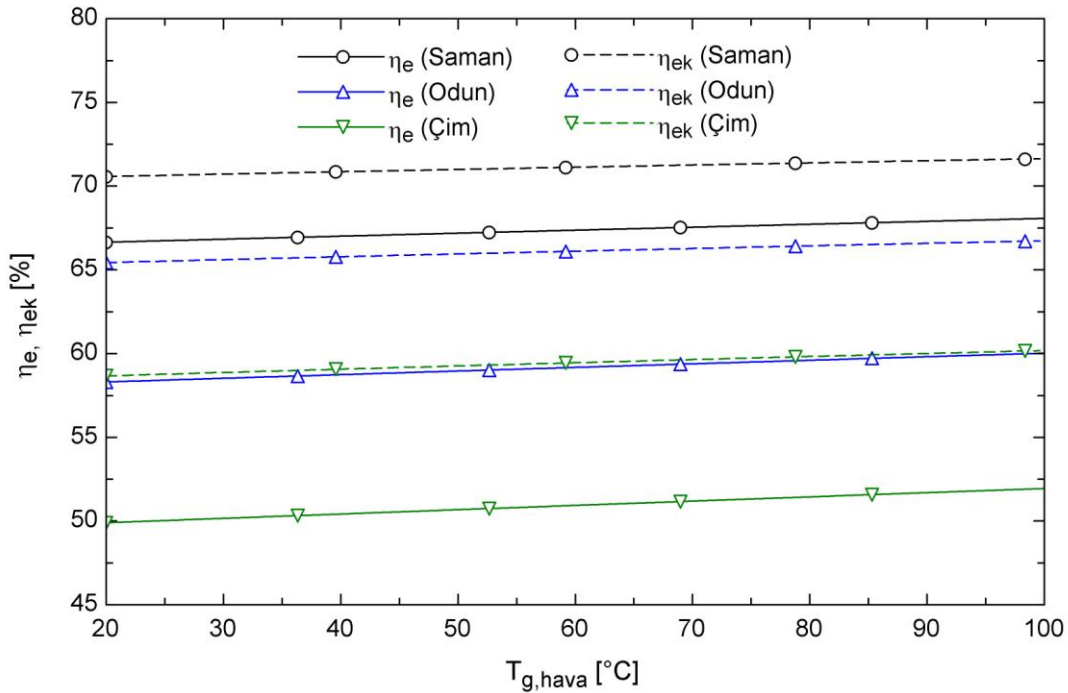
Gazlaştırma işleminde kullanılan havanın gazlaştırıcıya giriş sıcaklığının enerji ve ekserji verimleri üzerine olan etkisi Şekil 2.12’de verilmiştir. Hava giriş sıcaklığının enerji ve ekserji verimlerine olan etkisi oldukça düşük seviyededir. Şekilde görüldüğü gibi hava giriş sıcaklığının 20 °C’den 100 °C’ye çıkarılması enerji ve ekserji verimlerinde ortalama olarak % 1 civarında artış sağlamaktadır.

Şekil 2.13’de üretilen gaz karışımının ısı değeri ve ekserjisinin gazlaştırıcıya giren havanın sıcaklığıyla değişimi verilmiştir. Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin hava

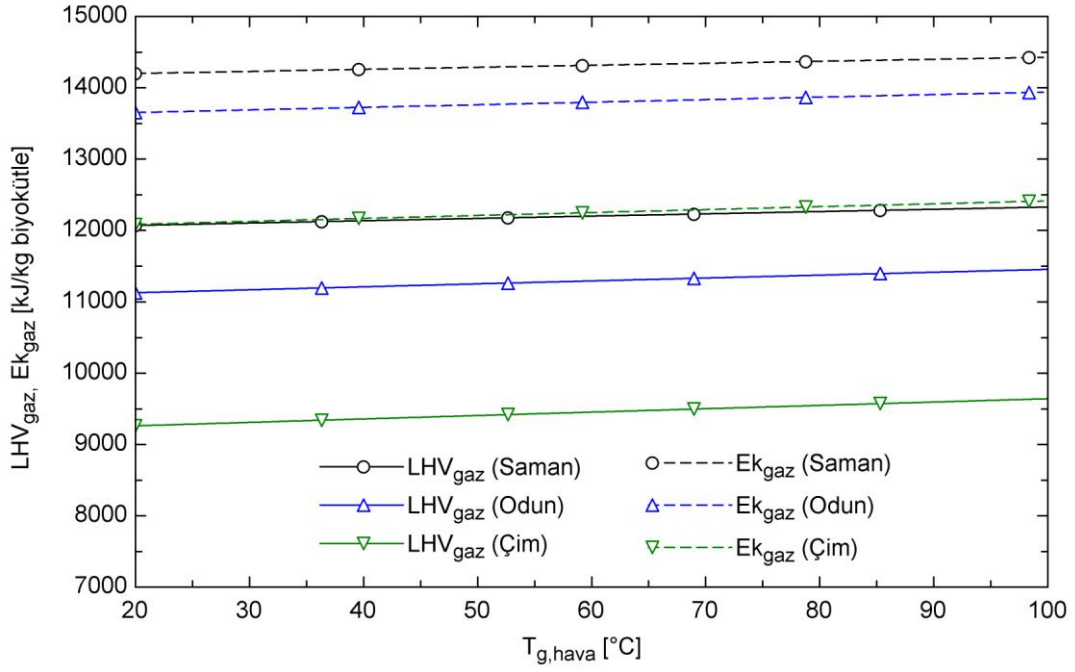
giriş sıcaklığından çok fazla etkilenmediği görülmektedir. Hava giriş sıcaklığında gerçekleşen 20 – 100 °C arasındaki artış, ısı değer ve ekserjide % 2 - % 3 civarlarında bir artış sağlamaktadır.

Gazlaştırıcıda gerçekleşen ekserji kaybının hava giriş sıcaklığıyla değişimi Şekil 2.14’de verilmiştir. Artan hava giriş sıcaklığıyla birlikte ekserji kaybı bir miktar azalmaktadır. Hava giriş sıcaklığının 20 °C’den 100 °C’ye çıkması ekserji kaybında % 2 - % 3 civarında bir azalmaya neden olmaktadır.

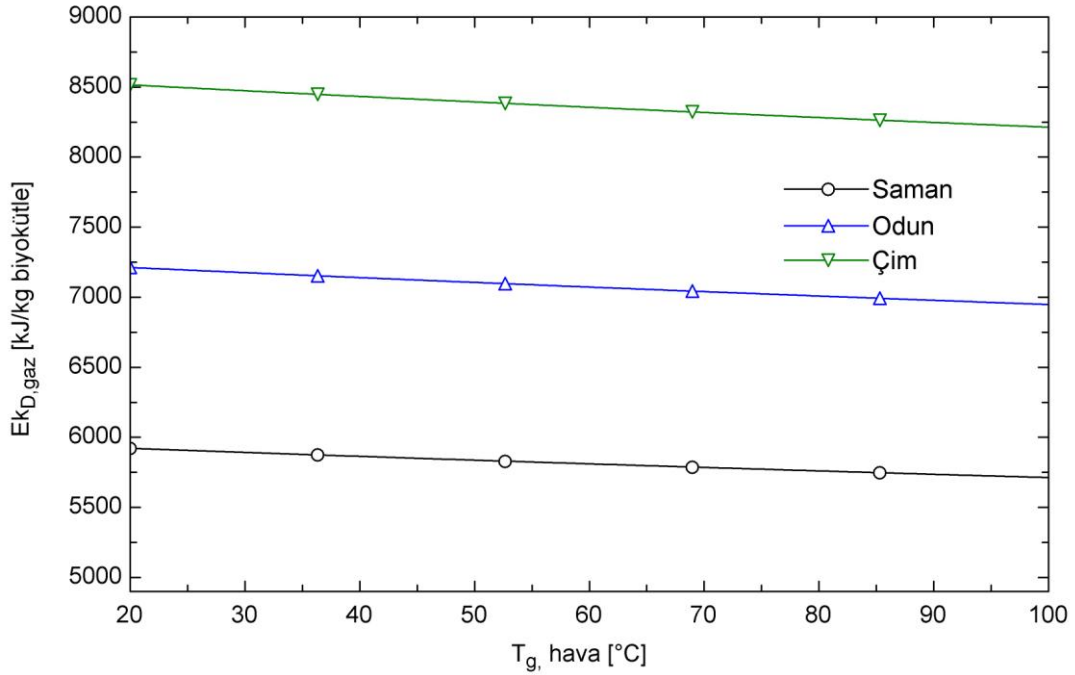
Şekil 2.15’de hava giriş sıcaklığının üretilen gaz kompozisyonuna olan etkisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hava giriş sıcaklığının gaz kompozisyonuna etkisi oldukça azdır. Artan hava sıcaklığıyla birlikte gaz karışımı içerisindeki H₂, CO ve CH₄ miktarı artarken, CO₂ ve N₂ miktarı azalmaktadır. Bunun nedeni gazlaştırma sıcaklığının gazlaştırıcıya giren hava miktarıyla ayarlanmasından kaynaklıdır. Hava giriş sıcaklığı arttığında gazlaştırma sıcaklığının sabit kalabilmesi için gazlaştırıcıya giren hava miktarının azalması gerekir. Giren hava miktarı azaldığında üretilen gaz karışımı içerisindeki eksik yanma ürünleri (H₂, CO ve CH₄) artarken, tam yanma ürünleri (CO₂) ve havayla birlikte giren N₂ miktarı azalır.



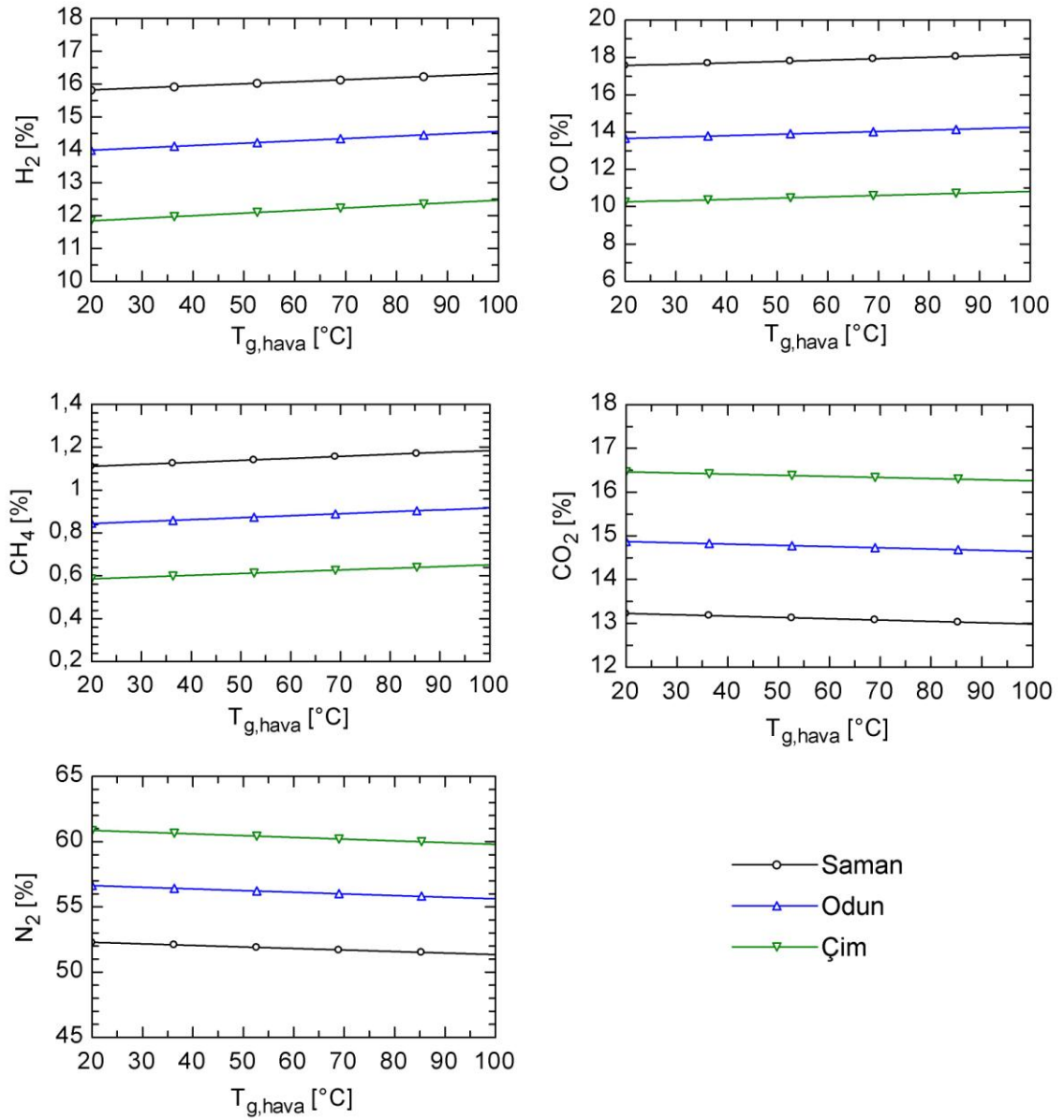
Şekil 2.12 Enerji ve ekserji veriminin gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.13 Üretilen gazın ısıl değeri ve ekserjisinin gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.14 Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.15 Gaz kompozisyonunun gazlaştırıcıya giren hava sıcaklığına göre değişimi

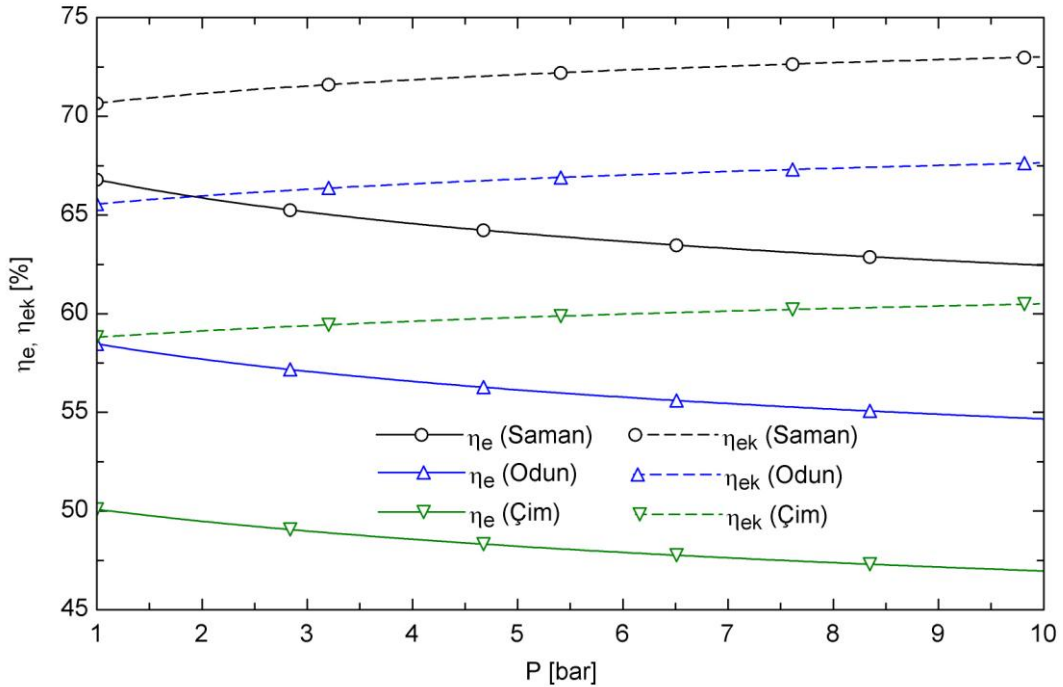
2.6.3 İşletme basıncının etkisi

Şekil 2.16'da enerji ve ekserji verimlerinin işletme basıncıyla değişimi verilmiştir. İşletme basıncı arttıkça enerji verimi azalırken ekserji verimi artmaktadır. Enerji veriminin artan basınç ile düşmesi, üretilen gaz karışımının ısı değerinin artan basınçla düşmesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 2.17). Ekserji veriminin artan basınç ile artması ise üretilen gazların ekserjisinin basınçla artmasından kaynaklanır (Şekil 2.17).

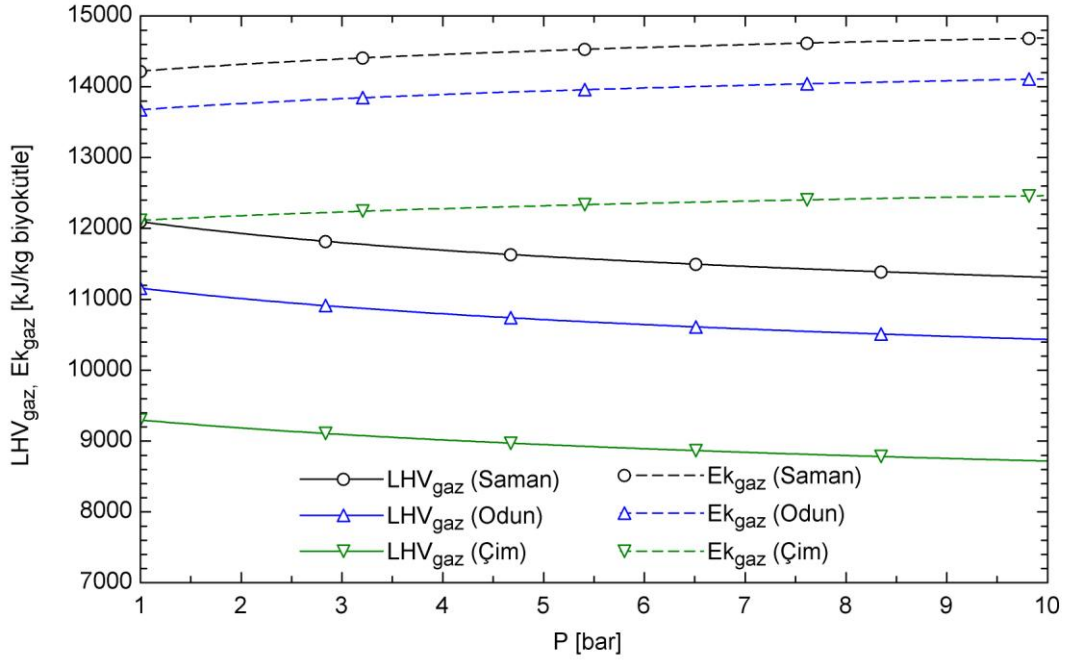
Üretilen gaz karışımının ısı değeri ve ekserjisinin işletme basıncıyla değişimi Şekil 2.17’de verilmiştir. Basınç arttıkça gaz karışımının ısı değeri azalırken ekserjisi artmaktadır. Isıl değerin düşmesi, üretilen gaz karışımı içerisindeki kullanılabilir ısı değere sahip gaz miktarının (H_2 , CO , CH_4) artan basınçla azalmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 2.19). Üretilen gaz karışımının ekserjisinin artması, fiziksel ekserjinin basınç ile artmasından kaynaklanır.

Şekil 2.18’de gazlaştırıcıda gerçekleşen ekserji kaybının basınç ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi işletme basıncının artması ekserji kaybını azaltmaktadır. Ekserji kaybındaki azalış, basıncın 1 bar’dan 10 bar’a artırılması durumunda saman için % 8, odun için % 6 ve çim için % 4 olmaktadır.

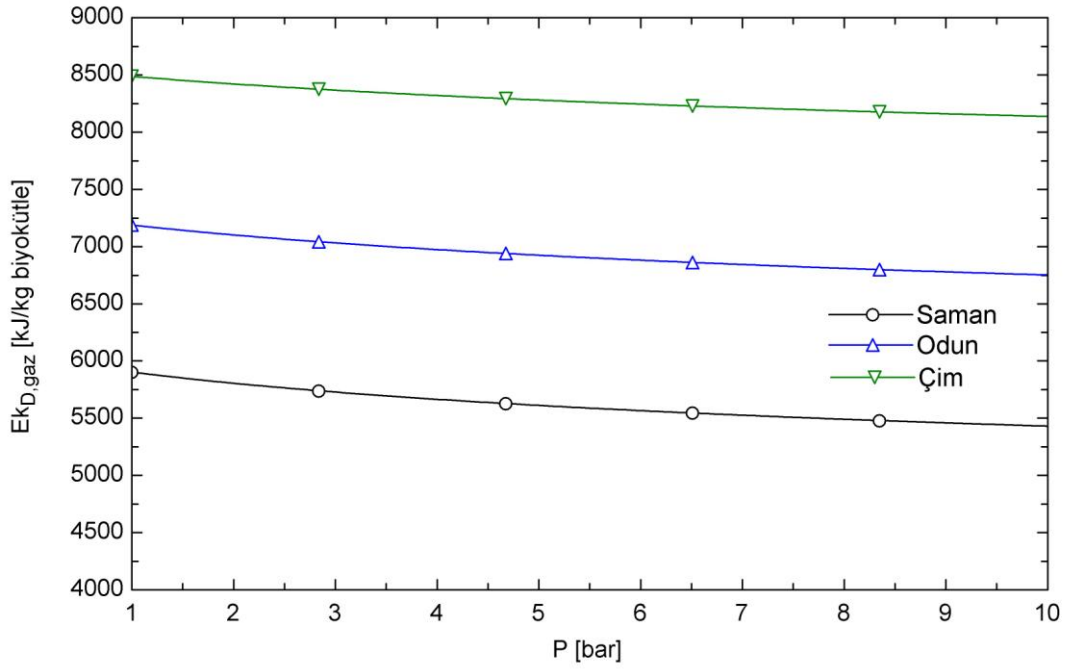
İşletme basıncının gaz kompozisyonu üzerindeki etkisi Şekil 2.19’da görülebilir. Şekilde görüldüğü gibi işletme basıncı arttıkça gaz karışımı içerisindeki H_2 ve CO miktarı azalmakta, CH_4 ve CO_2 miktarı artmakta, N_2 miktarı ise yaklaşık olarak aynı kalmaktadır.



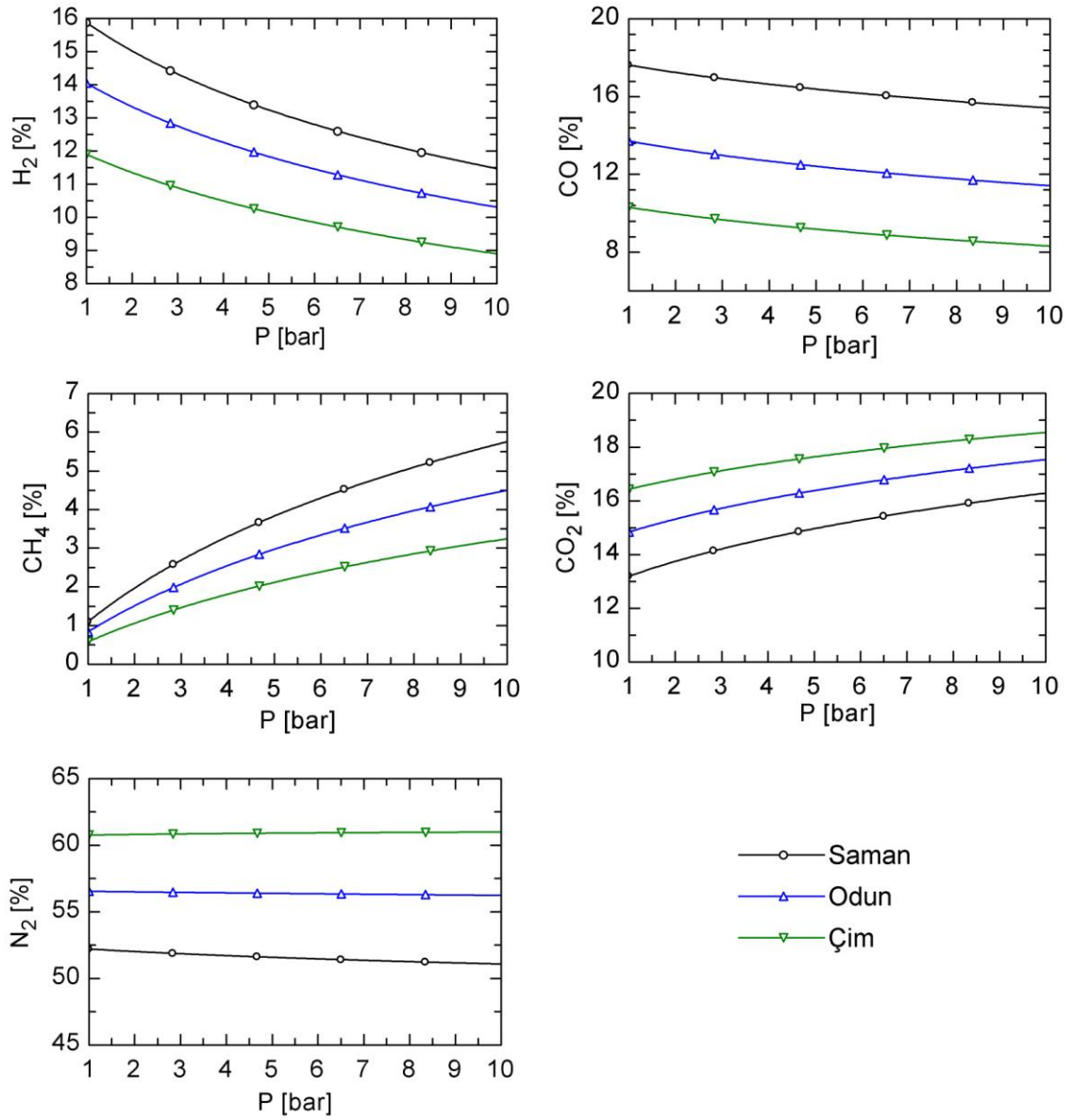
Şekil 2.16 Enerji ve ekserji veriminin işletme basıncına göre değişimi



Şekil 2.17 Üretilen gazın ısı değeri ve ekserjisinin işletme basıncına göre değişimi



Şekil 2.18 Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının işletme basıncına göre değişimi



Şekil 2.19 Gaz kompozisyonunun işletme basıncına göre değişimi

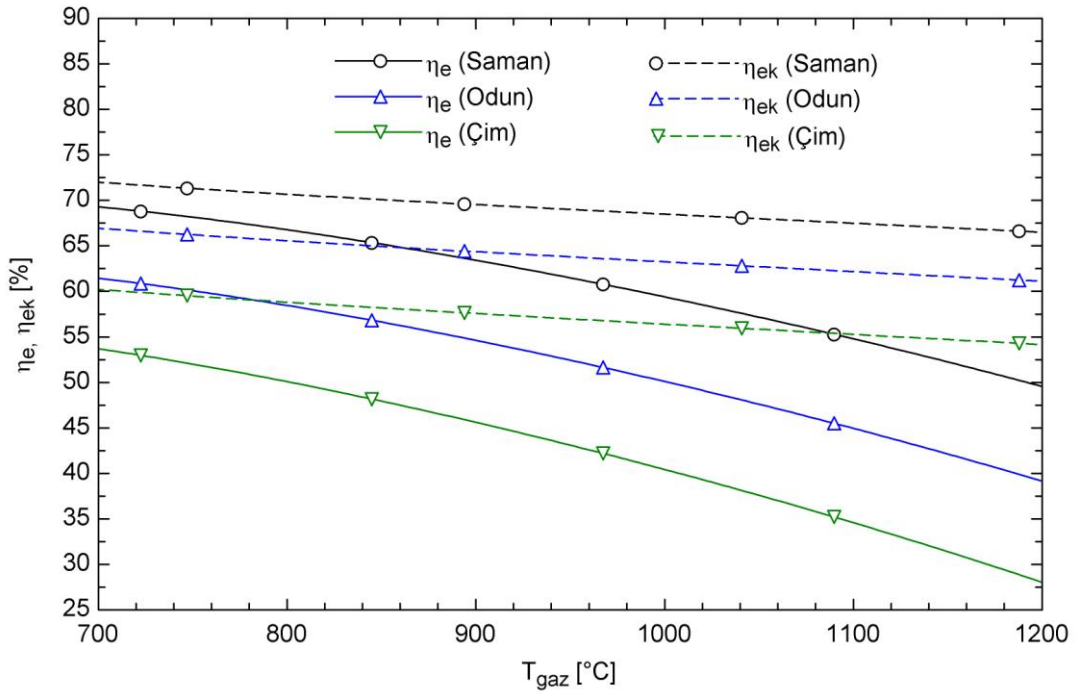
2.6.4 Gazlaştırma sıcaklığının etkisi

Enerji ve ekserji verimlerinin gazlaştırma sıcaklığı ile değişimi Şekil 2.20’de verilmiştir. Gazlaştırma sıcaklığı arttıkça verim değerleri düşmektedir. Bunun nedeni gazlaştırma sıcaklığı arttıkça üretilen gaz karışımının ısı değeri ve ekserjisinin azalmasıdır (Şekil 2.21). Sıcaklık 700 °C’den 1200 °C’ye kadar artırıldığında enerji ve ekserji verimleri sırasıyla saman için % 17, % 8; odun için % 38, % 12; çim için % 50, % 13 azalmıştır.

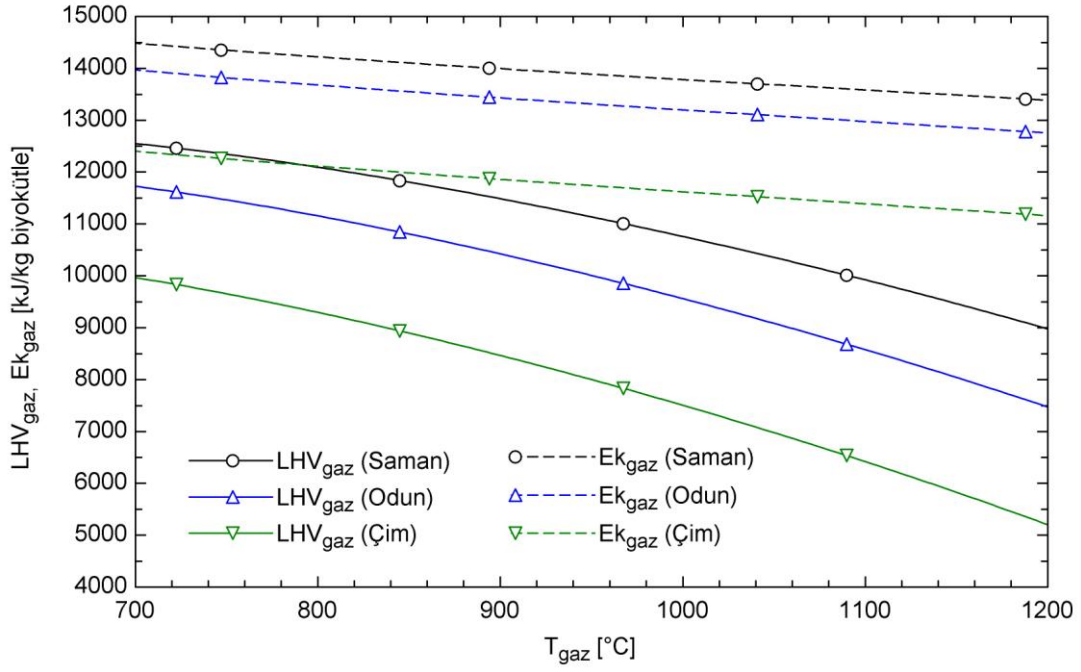
Şekil 2.21’de gazlaştırma sıcaklığının üretilen gaz karışımının ısı değeri ve ekserjisine olan etkisi görülmektedir. Artan gazlaştırma sıcaklığıyla ısı değeri ve ekserji azalmaktadır. Bunun nedeni gazlaştırma sıcaklığı arttıkça üretilen gaz karışımı içerisindeki kullanılabilir ısı değere sahip gazların (H_2 , CO , CH_4) miktarının azalmasıdır (Şekil 2.23).

Şekil 2.22’de gazlaştırıcıda gerçekleşen ekserji kaybının gazlaştırma sıcaklığı ile değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi gazlaştırma sıcaklığının artması ekserji kaybını artırmaktadır. Ekserji kaybındaki artış, gazlaştırma sıcaklığının $700\text{ }^\circ\text{C}$ ’den $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye artırılması durumunda saman için % 27, odun için % 24 ve çim için % 20 olmaktadır.

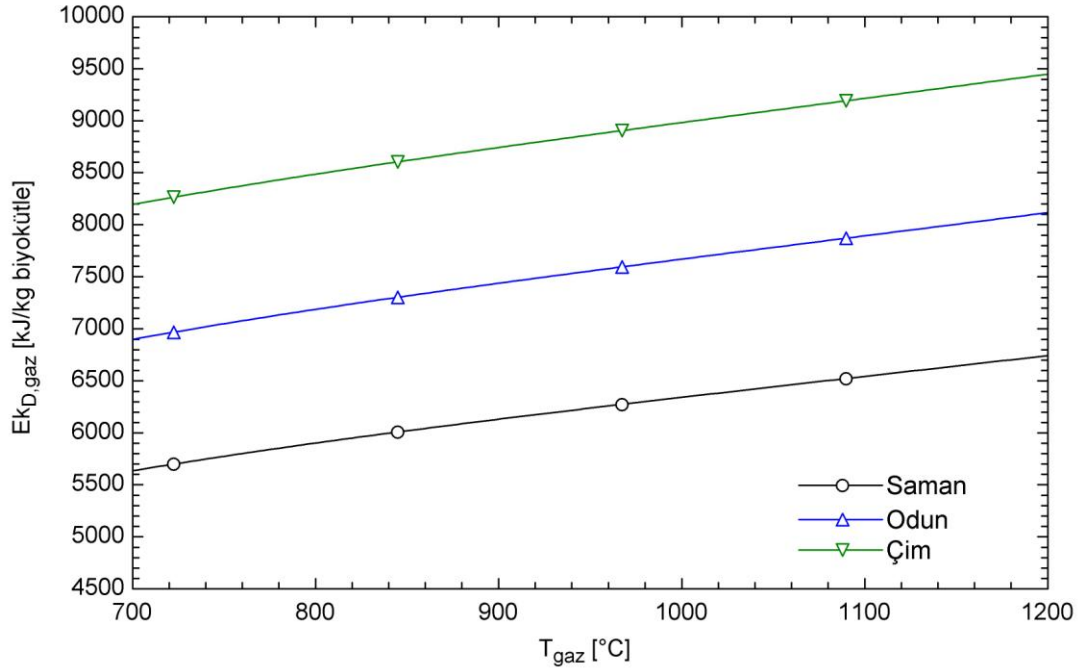
Gazlaştırma sıcaklığının gaz kompozisyonu üzerindeki etkisi Şekil 2.23’de görülebilir. Şekilde görüldüğü gibi gazlaştırma sıcaklığı arttıkça gaz karışımı içerisindeki H_2 , CO ve CH_4 miktarı azalmakta, CO_2 ve N_2 miktarı ise artmaktadır.



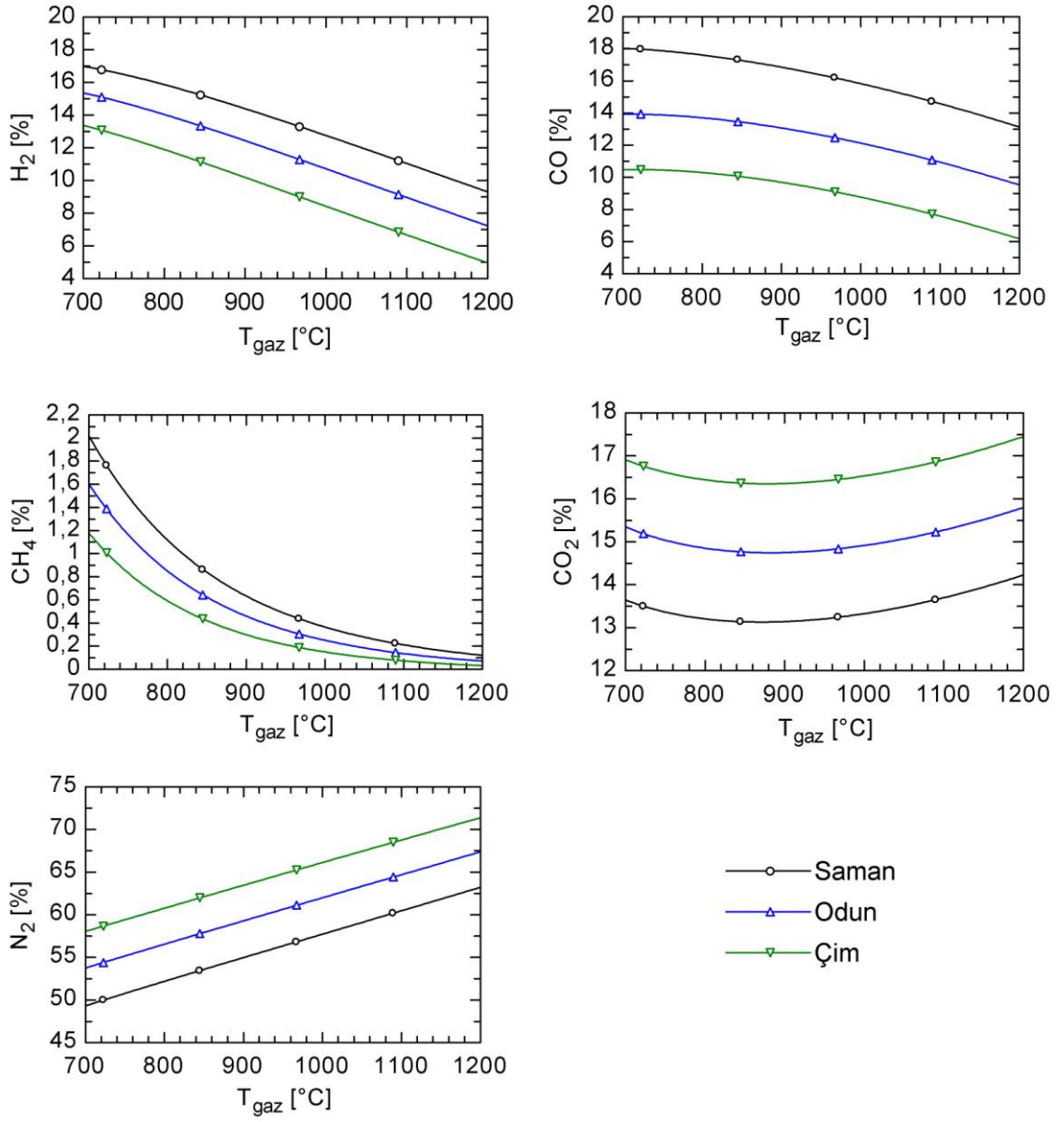
Şekil 2.20 Enerji ve ekserji veriminin gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.21 Üretilen gazın ısıl değeri ve ekserjisinin gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.22 Gazlaştırıcıdaki ekserji kaybının gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi



Şekil 2.23 Gaz kompozisyonunun gazlaştırma sıcaklığına göre değişimi

BİR KATI OKSİT YAKIT HÜCRESİNİN ELEKTROKİMYASAL MODELİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde reformasyonlu katı oksit yakıt hücresi (KOYH) için elektrokimyasal bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model ile KOYH'nin çeşitli giriş parametreleri için performansı değerlendirilmiştir.

3.1 Literatür Özeti

Chan vd. [4], KOYH için aktivasyon, ohmik ve konsantrasyon polarizasyonlarını hesaplamaya yönelik bir model oluşturmuşlardır. Çalışmada ayrıca anot, katot ve elektrolit kalınlıklarının hücre voltajına olan etkisini incelemişlerdir.

Chan vd. [28], yakıt olarak biri hidrojen diğeri metan kullanan iki KOYH için birer model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model ile akım yoğunluğu ve sıcaklığın polarizasyonlara ve sistemin performansına olan etkisini incelemişlerdir.

Campanari [29], yakıt olarak doğal gazın kullanıldığı dahili reformasyonlu ve dahili hava ön ısıtmalı bir tüpsel KOYH modülünün termodinamik modelini geliştirmiştir. Geliştirilen model ile anot ve katot çıkışlarındaki termodinamik özellikler, modül verimi ve modül içindeki ısı üretimi hesaplanabilmektedir. Yapılan çalışmada ayrıca akım yoğunluğu, yakıt kullanım faktörü, buhar-karbon oranı gibi çeşitli işletme şartlarının modül performansına etkileri incelenmiştir.

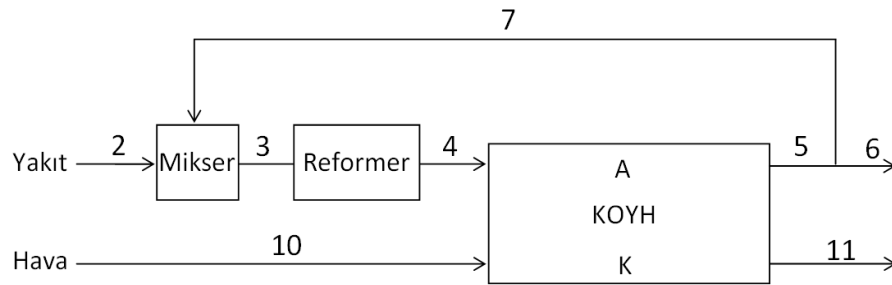
Hussain vd. [30], düzlemsel KOYH için sonlu hacimler metoduna dayalı matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Çeşitli tasarım parametrelerinin ve işletme şartlarının KOYH'nin performansına olan etkisini incelemişlerdir.

Colpan vd. [31], yakıt olarak gazlaştırma ile elde edilen gazın kullanıldığı dahili reformasyonlu KOYH'ni termodinamik olarak modellemişlerdir. Anot çıkışındaki gaz akışının geri beslemesini modele dahil ederek, geri besleme oranı ve yakıt kullanım oranının elde edilen güce ve sistemin verimine olan etkilerini incelemişlerdir.

Akkaya vd. [2], yakıtı metan olan tüpsel KOYH modülü için termodinamik bir model oluşturmuşlardır. Akım yoğunluğu, basınç ve yakıt kullanım oranı gibi işletme parametrelerinin KOYH modülünün performansını ekserji yönünden incelemişlerdir.

3.2 Matematiksel Model

Göz önüne alınan KOYH'nin şematik görünümü Şekil 3.1'de verilmiştir.



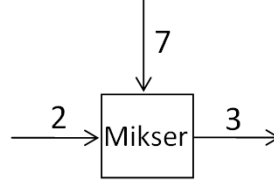
Şekil 3.1 KOYH şematik görünümü

Model oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Her bileşen sürekli akışlı açık bir kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.
- Sisteme sağlanan hava O_2 ve N_2 karışımından oluşmaktadır.
- Yakıt olarak biyokütle gazlaştırma prosesinden elde edilen ve CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O ve N_2 gazlarından oluşan gaz karışımı kullanılmıştır.

3.2.1 Mikser

Yüksek sıcaklıkta olması ve yüksek miktarda su buharı içermesi nedeniyle reformasyon için iyi bir kaynak olan anot çıkış gazı bir enjektör yardımıyla sisteme geri beslenir. Sisteme geri beslenen gaz karışımı taze yakıt ile mikserde karışır.



Şekil 3.2 Mikser

Belirli bir buhar karbon oranı ile anot çıkışından gelen gazın miktarı belirlenir. Buhar karbon oranı ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$r_{bk} = \frac{\dot{n}_{7,H_2O}}{\dot{n}_{3,CH_4} + \dot{n}_{3,CO}} \quad (3.1)$$

Reformerda karbon oluşumunun gerçekleşmemesi için buhar karbon oranının 1,8'den büyük olması gerekir [6].

Sisteme giren yakıt miktarı bilindiğinden dolayı mikser çıkışındaki gazların molar debileri kütle dengesinden hesaplanabilir:

$$\dot{n}_{3,CH_4} = \dot{n}_{2,CH_4} + \dot{n}_{7,CH_4} \quad (3.2)$$

$$\dot{n}_{3,CO} = \dot{n}_{2,CO} + \dot{n}_{7,CO} \quad (3.3)$$

$$\dot{n}_{3,CO_2} = \dot{n}_{2,CO_2} + \dot{n}_{7,CO_2} \quad (3.4)$$

$$\dot{n}_{3,H_2} = \dot{n}_{2,H_2} + \dot{n}_{7,H_2} \quad (3.5)$$

$$\dot{n}_{3,H_2O} = \dot{n}_{2,H_2O} + \dot{n}_{7,H_2O} \quad (3.6)$$

$$\dot{n}_{3,N_2} = \dot{n}_{2,N_2} + \dot{n}_{7,N_2} \quad (3.7)$$

Mikser için enerji dengesi yazılarak 3 noktasının entalpisi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_M - \dot{W}_M + \sum_i (\dot{n}_{2,i} \bar{h}_{2,i} + \dot{n}_{7,i} \bar{h}_{7,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{3,i} \bar{h}_{3,i})_\zeta = 0 \quad (3.8)$$

Sistemin adyabatik olduğu ve herhangi bir iş etkileşiminin olmadığı göz önüne alınırsa ısı ve güç terimleri ihmal edilerek entalpi değeri hesaplanır. 3 noktasındaki molar debiler ve bileşenler bilindiğinden iterasyonla T_3 sıcaklığı belirlenir.

Mikser bileşenin ekserji kaybını ve ekserji verimini hesaplayabilmek için her bir noktanın ekserji değerinin hesaplanması gerekir. Her bir noktanın ekserjisi o noktadaki fiziksel ve kimyasal ekserjilerin toplamına eşittir. Mikser bileşenin her bir noktası için ekserji ifadeleri aşağıda verilmiştir.

7 noktası: Gaz kompozisyonu H₂, CO, CO₂, H₂O ve N₂

$$\dot{E}k_7^f = \sum_i \dot{n}_{7,i} [\bar{h}_{7,i} - \bar{h}_{o7,i} - T_o (\bar{s}_{7,i} - \bar{s}_{o7,i})] \quad (3.9)$$

$$\dot{E}k_7^k = \sum_i \dot{n}_{7,i} \sum_i (x_{7,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{7,i} \ln(x_{7,i})) \quad (3.10)$$

2 noktası: Gaz kompozisyonu CH₄, H₂, CO, CO₂, H₂O ve N₂

$$\dot{E}k_2^f = \sum_i \dot{n}_{2,i} [\bar{h}_{2,i} - \bar{h}_{o2,i} - T_o (\bar{s}_{2,i} - \bar{s}_{o2,i})] \quad (3.11)$$

$$\dot{E}k_2^k = \sum_i \dot{n}_{2,i} \sum_i (x_{2,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{2,i} \ln(x_{2,i})) \quad (3.12)$$

3 noktası: Gaz kompozisyonu CH₄, H₂, CO, CO₂, H₂O ve N₂

$$\dot{E}k_3^f = \sum_i \dot{n}_{3,i} [\bar{h}_{3,i} - \bar{h}_{o3,i} - T_o (\bar{s}_{3,i} - \bar{s}_{o3,i})] \quad (3.13)$$

$$\dot{E}k_3^k = \sum_i \dot{n}_{3,i} \sum_i (x_{3,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{3,i} \ln(x_{3,i})) \quad (3.14)$$

Mikser için ekserji kaybı ifadesi ekserji dengesi yazılarak bulunabilir:

$$\dot{E}k_{D,M} = \dot{Q}_M \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_M + (\dot{E}k_2 + \dot{E}k_7)_g - (\dot{E}k_3)_\xi \quad (3.15)$$

Isı ve iş alış verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

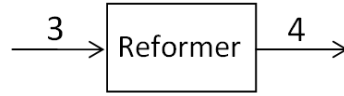
$$\dot{E}k_{D,M} = \dot{E}k_2 + \dot{E}k_7 - \dot{E}k_3 \quad (3.16)$$

Mikser için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta_{Ek,M} = \frac{\dot{E}k_3}{\dot{E}k_2 + \dot{E}k_7} \quad (3.17)$$

3.2.2 Reformler

Peters vd. (2000)'e göre reformasyonun sadece KOYH içerisinde dahili olarak gerçekleşmesi hem anotta karbon oluşumunun artmasına hem de reformasyon reaksiyonunun endotermik olması nedeniyle yüksek sıcaklık gerilimine neden olabilmekte ve hücrenin girişindeki sıcaklığı düşürerek elektrokimyasal performansı kötü yönde etkileyebilmektedir [6]. Bu olumsuzlukları önleyebilmek için KOYH girişine bir reformer eklenmiştir.



Şekil 3.3 Reformler

Reformasyon işleminde iki adet reaksiyon gerçekleşmektedir; metan reformasyonu ve karbon monoksit reformasyonu:



Bu iki reaksiyonun denge durumundaki gaz kompozisyonlarını denge sabitleri belirler ve metan reaksiyonu için K_r , karbon monoksit reaksiyonu için K_s olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilir [26]:

$$K_r = \exp(-\Delta G_r / \bar{R}T) \quad (3.20)$$

$$K_s = \exp(-\Delta G_s / \bar{R}T) \quad (3.21)$$

Burada T reaksiyon sıcaklığı (T_4' e eşit alınmıştır), ΔG ilgili reaksiyon için Gibbs enerji fonksiyonundaki değişimdir.

Denge sabitleri denge durumundaki gaz karışımının kısmi basınçları kullanılarak da yazılabilir:

$$K_r = \frac{(P_{4,H_2})^3 (P_{4,CO})}{(P_{4,CH_4}) (P_{4,H_2O})} \quad (3.22)$$

$$K_s = \frac{(P_{4,H_2})(P_{4,CO_2})}{(P_{4,CO})(P_{4,H_2O})} \quad (3.23)$$

Burada P_i reaksiyona giren i bileşenin kısmi basıncıdır. Bu kısmi basınçlar aynı zamanda karışımdaki gazların mol oranlarıyla da ifade edilebilir:

$$P_i = y_i P = \frac{n_i}{n_{top}} P \quad (3.24)$$

$$K_r = \frac{(\dot{n}_{4,H_2} / \dot{n}_{4,top})^3 (\dot{n}_{4,CO} / \dot{n}_{4,top})}{(\dot{n}_{4,CH_4} / \dot{n}_{4,top})(\dot{n}_{4,H_2O} / \dot{n}_{4,top})} P^2 \quad (3.25)$$

$$K_s = \frac{(\dot{n}_{4,H_2} / \dot{n}_{4,top})(\dot{n}_{4,CO_2} / \dot{n}_{4,top})}{(\dot{n}_{4,CO} / \dot{n}_{4,top})(\dot{n}_{4,H_2O} / \dot{n}_{4,top})} \quad (3.26)$$

Burada $\dot{n}_{4,top}$ toplam molar debi, P ise reformer çıkışındaki toplam basınçtır.

Metan reaksiyonunda tüketilen metanın molar debisi \dot{x}_r , karbon monoksit reaksiyonunda tüketilen karbon monoksitin molar debisi \dot{y}_r olmak üzere reformer için kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{n}_{4,CH_4} = \dot{n}_{3,CH_4} - \dot{x}_r \quad (3.27)$$

$$\dot{n}_{4,CO} = \dot{n}_{3,CO} + \dot{x}_r - \dot{y}_r \quad (3.28)$$

$$\dot{n}_{4,CO_2} = \dot{n}_{3,CO_2} + \dot{y}_r \quad (3.29)$$

$$\dot{n}_{4,H_2} = \dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r \quad (3.30)$$

$$\dot{n}_{4,H_2O} = \dot{n}_{3,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r \quad (3.31)$$

$$\dot{n}_{4,N_2} = \dot{n}_{3,N_2} \quad (3.32)$$

K_r ve K_s denge sabitleri, kütle dengesinden faydalanılarak yeniden düzenlenerek aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_r = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right)^3 \left(\frac{\dot{n}_{3,CO} + \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{3,CH_4} - \dot{x}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right) \left(\frac{\dot{n}_{3,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right)} P^2 \quad (3.33)$$

$$K_s = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{3,H_2} + 3\dot{x}_r + \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right) \left(\frac{\dot{n}_{3,CO_2} + \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{3,CO} + \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right) \left(\frac{\dot{n}_{3,H_2O} - \dot{x}_r - \dot{y}_r}{\dot{n}_{3,top} + 2\dot{x}_r} \right)} \quad (3.34)$$

Reformer çıkış sıcaklığını hesaplayabilmek için enerji dengesi, ısı ve güç alış verişi olmadığı göz önüne alınır aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sum_i (\dot{n}_{3,i} \bar{h}_{3,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{4,i} \bar{h}_{4,i})_c = 0 \quad (3.35)$$

Reformer bileşeninde K_r , K_s , \dot{x}_r , \dot{y}_r ve T_4 bilinmeyenlerine karşılık üretilen Denklem 3.20, 3.21, 3.33, 3.34 ve 3.35 kullanılarak çözümlenebilir ve kütle dengesi denklemleri kullanılarak reformer çıkışındaki gazların molar debileri bulunur.

Giriş ve çıkış noktalarındaki ekserji değerleri hesaplanarak, reformer bileşeni için ekserji kaybı ve ekserji verimi değerleri bulunabilir.

3 noktası: Mikser bileşeninde hesaplanmıştır.

4 noktası: Gaz kompozisyonu CH_4 , H_2 , CO , CO_2 , H_2O ve N_2

$$\dot{E}k_4^f = \sum_i \dot{n}_{4,i} \left[\bar{h}_{4,i} - \bar{h}_{o4,i} - T_o (\bar{s}_{4,i} - \bar{s}_{o4,i}) \right] \quad (3.36)$$

$$\dot{E}k_4^k = \sum_i \dot{n}_{4,i} \sum_i \left(x_{4,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{4,i} \ln(x_{4,i}) \right) \quad (3.37)$$

Reformer için ekserji kaybı ekserji dengesinden bulunabilir:

$$\dot{E}k_{D,R} = \dot{Q}_R \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_R + (\dot{E}k_3)_g - (\dot{E}k_4)_c \quad (3.38)$$

Reformerin adyabatik olduğu ve güç alış verişinin olmadığı göz önüne alınır ekserji kaybı ifadesi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

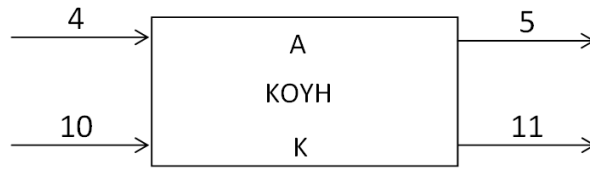
$$\dot{E}k_{D,R} = \dot{E}k_3 - \dot{E}k_4 \quad (3.39)$$

Reformerın ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta_{Ek,R} = \frac{\dot{E}k_4}{\dot{E}k_3} \quad (3.40)$$

3.2.3 KOYH

Reformerdan çıkan gaz karışımı KOYH'nin anot kısmına beslenir (4 noktası). Bu gaz karışımı içerisinde hala metan ve karbon monoksit bulunduğundan dolayı reformasyon tepkimeleri KOYH'de gerçekleşmeye devam eder.



Şekil 3.4 KOYH

Katot kısmı (10 noktası) hava ile beslenen KOYH'de gerçekleşen reaksiyonlar; metan ve karbon monoksit reformasyonu ile hidrojenin elektrokimyasal tepkimesidir:



KOYH'de işletme sıcaklığı yeterince yüksek olduğundan dolayı metanın tamamen reforme edildiği kabul edilmiştir.

KOYH'de gerçekleşen metan ve karbon monoksit reformasyon tepkimelerinin denge sabitleri K_{ir} ve K_{is} reformer bölümünde ifade edildiği şekilde Gibbs enerji fonksiyonlarından hesaplanır.

Metan reaksiyonunda tüketilen metanın molar debisi \dot{x}_{ir} , karbon monoksit reaksiyonunda tüketilen karbon monoksitin molar debisi \dot{y}_{ir} ve elektrokimyasal tepkimeden tüketilen hidrojenin molar debisi \dot{z} olmak üzere KOYH için kütle dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{n}_{5,CH_4} = \dot{n}_{4,CH_4} - \dot{x}_{ir} = 0 \quad (3.44)$$

$$\dot{n}_{5,CO} = \dot{n}_{4,CO} + \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir} \quad (3.45)$$

$$\dot{n}_{5,CO_2} = \dot{n}_{4,CO_2} + \dot{y}_{ir} \quad (3.46)$$

$$\dot{n}_{5,H_2} = \dot{n}_{4,H_2} + 3\dot{x}_{ir} + \dot{y}_{ir} - \dot{z} \quad (3.47)$$

$$\dot{n}_{5,H_2O} = \dot{n}_{4,H_2O} - \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir} + \dot{z} \quad (3.48)$$

$$\dot{n}_{5,N_2} = \dot{n}_{4,N_2} \quad (3.49)$$

$$\dot{n}_{11,O_2} = \dot{n}_{10,O_2} - \dot{z}/2 \quad (3.50)$$

$$\dot{n}_{11,N_2} = \dot{n}_{10,N_2} \quad (3.51)$$

Yakıt hücresine giren oksijen miktarı hava kullanım faktörüne bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{n}_{10,O_2} = \frac{\dot{z}}{2U_a} \quad (3.52)$$

Reaksiyonların denge sabitleri, reformer bölümünde olduğu gibi kütle dengesi denklemleri yardımıyla yeniden düzenlenebilir:

$$K_{ir} = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{4,H_2} + 3\dot{x}_{ir} + \dot{y}_{ir} - \dot{z}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right)^3 \left(\frac{\dot{n}_{4,CO} + \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{4,CH_4} - \dot{x}_{ir}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right) \left(\frac{\dot{n}_{4,H_2O} - \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir} + \dot{z}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right)} P^2 \quad (3.53)$$

$$K_{is} = \frac{\left(\frac{\dot{n}_{4,H_2} + 3\dot{x}_{ir} + \dot{y}_{ir} - \dot{z}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right) \left(\frac{\dot{n}_{4,CO_2} + \dot{y}_{ir}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right)}{\left(\frac{\dot{n}_{4,CO} + \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right) \left(\frac{\dot{n}_{4,H_2O} - \dot{x}_{ir} - \dot{y}_{ir} + \dot{z}}{\dot{n}_{4,top} + 2\dot{x}_{ir}} \right)} \quad (3.54)$$

Elektrokimyasal tepkimeye girecek hidrojenin miktarı, yakıt hücresinin anotuna giren metan, hidrojen ve karbon monoksitin hidrojen eşdeğerlerinin toplamı ve yakıt kullanım faktörüne bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [6]:

$$\dot{z} = U_f (4\dot{n}_{4,CH_4} + \dot{n}_{4,H_2} + \dot{n}_{4,CO}) \quad (3.55)$$

KOYH çıkış noktalarının kompozisyonu \dot{x}_{ir} , \dot{y}_{ir} ve \dot{z} 'in hesaplanmasından sonra molar kütle dengesinden bulunur.

Hücre voltajı, Nerst potansiyeli ve kayıpların hesaplanması ile bulunur.

3.2.3.1 Nerst Potansiyeli

Yakıt hücresi dış yük ile bağlantılı olmadığı durumda hücreden akım geçmez ve hücre voltajı açık çevrim voltajına eşit olur. Bir hücre için açık çevrim voltajı, elektrokimyasal reaksiyon için Nerst potansiyeline eşit olduğu kabul edilir [3], [32].

Nerst potansiyeli hücre çıkışındaki her bir gazın kısmi basıncı kullanılarak hesaplanabilmektedir. Akkaya [3] hücre voltajının hücrenin girişinden çıkışına doğru bir azalma gösterdiğini göz önüne alarak, Nerst potansiyelinin giriş ve çıkıştaki gazların kısmi basınçları kullanılarak hesaplanmasının daha uygun olacağını belirtmiş ve Nerst potansiyeli için aşağıdaki denklemleri önermiştir:

$$V_N = \frac{V_{N,g} + V_{N,\zeta}}{2} \quad (3.56)$$

$$V_{N,g} = -\frac{\Delta G^o}{n_e F} - \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{g,H_2O}}{P_{g,H_2} \sqrt{P_{g,O_2}}} \right) \quad (3.57)$$

$$V_{N,\zeta} = -\frac{\Delta G^o}{n_e F} - \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{\zeta,H_2O}}{P_{\zeta,H_2} \sqrt{P_{\zeta,O_2}}} \right) \quad (3.58)$$

burada ΔG^o Gibbs enerjisindeki değişim, n_e elektrokimyasal reaksiyona giren elektron sayısı, R evrensel gaz sabiti, F Faraday sabiti, T hücre sıcaklığı ve P gaz karışımındaki ilgili gazın kısmi basıncıdır.

Yakıt hücresi dış yük ile bağlantıya geçip akım üretmeye başladığında tersinmezliklerden dolayı hücre voltajı düşer. Bu tersinmezlikler genel olarak ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarını içerir ve bu polarizasyonlar voltaj kayıpları olarak düşünülebilir [33].

3.2.3.2 Ohmik Polarizasyon

Ohmik polarizasyon, hücreyi oluşturan bileşenlerin gösterdiği iç direnç ile ilgilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [3]:

$$V_{ohm} = i \sum_j r_j \quad (3.59)$$

$$r_j = \sum_j \frac{\rho_j \delta_j}{A} \quad (3.60)$$

$$\rho_j = \sum_j a_j \exp(b_k / T) \quad (3.61)$$

burada, i akım, r_j ilgili bileşenin ohmik direnci, δ_j ilgili bileşenin akımın akış yol uzunluğu, ρ_k ilgili bileşenin malzeme özdirencidir. a ve b bileşen malzemeleriyle ilgili katsayılarıdır.

3.2.3.3 Aktivasyon Polarizasyonu

Aktivasyon polarizasyonu, elektrokimyasal reaksiyonlar içeren kimyasal reaksiyonlarda, reaksiyona giren gaz bileşenleri tarafından aşılması gereken enerji bariyerlerini aşmak için gerekli ilave potansiyel olarak düşünülebilir ve aşağıdaki gibi yazılabilir [4], [33].

$$j = j_o \left[\exp\left(\frac{\beta n_e F V_{akt}}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{(1-\beta) n_e F V_{akt}}{RT}\right) \right] \quad (3.62)$$

burada, j akım yoğunluğu, j_o değişken akım yoğunluğu, β transfer katsayısıdır. Ni vd., [35]'e göre transfer katsayısı aktivasyon enerji bariyerini etkiler ve polarizasyondaki değişim oranı olarak tanımlanır. Bu değer yakıt hücresi uygulamaları için genellikle 0.5 olarak alınır. Değişken akım yoğunluğu, denge potansiyelindeki ileri ve geri yöndeki elektrot reaksiyon oranıdır. Formülize edilmesi oldukça karmaşık olan bu değer Nagata vd. [34] ve Campanari vd. [29]'a göre yarı ampirik formüller kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [3]:

$$j_{o,an} = \gamma_{an} \left(\frac{P_{H_2}}{P_o} \right) \left(\frac{P_{H_2O}}{P_o} \right) \exp\left(-\frac{E_{an}}{RT}\right) \quad (3.63)$$

$$j_{o,ka} = \gamma_{ka} \left(\frac{P_{O_2}}{P_o} \right)^m \exp \left(-\frac{E_{ka}}{RT} \right) \quad (3.64)$$

burada γ eksponansiyel bir katsayı, P_o çevre basıncı, E aktivasyon enerjisi, an ve ka sırasıyla anot ve katodu temsil eden alt indislerdir.

3.2.3.4 Konsantrasyon Polarizasyonu

Konsantrasyon polarizasyonu, yakıt ve hava kanallarındaki gazların konsantrasyonları ve difüzyonları ile ilgilidir. Chan vd., [4]'e göre konsantrasyon polarizasyonu aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [3]:

$$V_{kon} = V_{kon,an} + V_{kon,ka} \quad (3.65)$$

$$V_{kon,an} = \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{1 - j / j_{L,H_2}}{1 + j / j_{L,H_2O}} \right) \quad (3.66)$$

$$V_{kon,ka} = \frac{\bar{R}T}{n_e F} \ln \left(\frac{1}{1 - j / j_{L,O_2}} \right) \quad (3.67)$$

burada $j_{L,i}$ ilgili eletrottaki i gazının difüzyonu için limit akım yoğunluğudur. Limit akım yoğunluğu hesaplamalarıyla ilgili ayrıntılı bilgi için [6] 'ya bakılabilir.

Toplam voltaj kaybı, ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon polarizasyonlarının toplamı olarak yazılabilir:

$$V_k = V_{ohm} + V_{akt} + V_{kon} \quad (3.68)$$

Hücre voltajı kayıplar da göz önüne alınarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$V = V_N - V_k \quad (3.69)$$

Hücre akımı ise aşağıdaki gibi yazılır:

$$i = 2F\dot{z} \quad (3.70)$$

Tek bir hücrenin voltajı ve akımı bilindiğinde KOYH'nin gücü N hücre sayısı olmak üzere aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{W}_{YH} = NVi \quad (3.71)$$

KOYH için enerji dengesi yazılarak çıkış sıcaklığı hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{YH} - \dot{W}_{YH} + \sum_i (\dot{n}_{4,i} \bar{h}_{4,i} + \dot{n}_{10,i} \bar{h}_{10,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{5,i} \bar{h}_{5,i} + \dot{n}_{11,i} \bar{h}_{11,i})_c = 0 \quad (3.72)$$

Prosesin adyabatik olduğu göz önüne alınırsa enerji dengesi yeniden yazılabilir:

$$-\dot{W}_{YH} + \sum_i (\dot{n}_{4,i} \bar{h}_{4,i} + \dot{n}_{10,i} \bar{h}_{10,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{5,i} \bar{h}_{5,i} + \dot{n}_{11,i} \bar{h}_{11,i})_c = 0 \quad (3.73)$$

Her bir noktanın ekserjisi hesaplanarak KOYH için ekserji kaybı ve ekserji verimi hesaplanabilir.

4 noktası: Reformer bileşeninde hesaplanmıştır.

5 noktası: Gaz kompozisyonu H₂, CO, CO₂, H₂O ve N₂

$$\dot{E}k_5^f = \sum_i \dot{n}_{5,i} [\bar{h}_{5,i} - \bar{h}_{o5,i} - T_o (\bar{s}_{5,i} - \bar{s}_{o5,i})] \quad (3.74)$$

$$\dot{E}k_5^k = \sum_i \dot{n}_{5,i} \sum_i (x_{5,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{5,i} \ln(x_{5,i})) \quad (3.75)$$

10 noktası: Gaz kompozisyonu O₂ ve N₂

$$\dot{E}k_{10}^f = \sum_i \dot{n}_{10,i} [\bar{h}_{10,i} - \bar{h}_{o10,i} - T_o (\bar{s}_{10,i} - \bar{s}_{o10,i})] \quad (3.76)$$

$$\dot{E}k_{10}^k = 0 \quad (3.77)$$

Hava bileşenlerinin molar oranları değişmediğinden dolayı bu noktada kimyasal ekserji değeri sıfırdır.

11 noktası: Gaz kompozisyonu O₂ ve N₂

$$\dot{E}k_{11}^f = \sum_i \dot{n}_{11,i} [\bar{h}_{11,i} - \bar{h}_{o11,i} - T_o (\bar{s}_{11,i} - \bar{s}_{o11,i})] \quad (3.78)$$

$$\dot{E}k_{11}^k = \sum_i \dot{n}_{11,i} \sum_i (x_{11,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{11,i} \ln(x_{11,i})) \quad (3.79)$$

Tüm noktaların ekserji değerleri bilindiğinden ekserji kaybı, ekserji dengesinden bulunabilir:

$$\dot{E}k_{D,YH} = \dot{Q}_{YH} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) - \dot{W}_{YH} + (\dot{E}k_4 + \dot{E}k_{10})_g - (\dot{E}k_5 + \dot{E}k_{11})_c \quad (3.80)$$

Çevre ile ısı alış verişi olmadığı düşünülürse ekserji kaybı ifadesi aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{E}k_{D,YH} = \dot{E}k_4 + \dot{E}k_{10} - \dot{E}k_5 - \dot{E}k_{11} - \dot{W}_{YH} \quad (3.81)$$

Ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_{Ek,YH} = \frac{\dot{W}_{YH}}{(\dot{E}k_4 + \dot{E}k_{10}) - (\dot{E}k_5 + \dot{E}k_{11})} \quad (3.82)$$

Mikser ve reformer bileşenleriyle birlikte KOYH sisteminin I.Yasa verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{YH}}{\dot{n}_2 LHV_y} \quad (3.83)$$

Sistemin toplam ekserjisi yakıt hücrelerinden elde edilen güce eşit; ve ekserji verimi toplam ekserjinin yakıtın ekserjisine oranı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}k_t = \dot{W}_{YH} \quad (3.84)$$

$$\eta_{Ek} = \frac{\dot{E}k_t}{\dot{E}k_2} \quad (3.85)$$

Sistemin toplam ekserji kaybı her bileşenin ekserji kaybı ve çıkan gazların ekserjilerinin toplamı şeklinde yazılır:

$$\dot{E}k_{D,t} = \dot{E}k_{D,M} + \dot{E}k_{D,R} + \dot{E}k_{D,YH} + \dot{E}k_6 + \dot{E}k_{11} \quad (3.86)$$

3.3 Modelin Doğrulanması

Tüpsel KOYH için oluşturulan matematiksel model, literatürdeki çeşitli çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılan tasarım ve giriş parametreleri Çizelge 3.1 ve 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 KOYH tasarım parametreleri

Parametre		Değer				
Ohmik polarizasyon	a (Ωm)	Katot	Anot	Elektrolit	Arabağlantı	
		0,0000811	0,0000298	0,0000294	0,0012	
		b (K)	600	-1392	10350	4690
		δ (m)	0,0022	0,0001	0,00004	0,000085
Aktivasyon polarizasyonu	$E_{act,an}$ (kJ/kmol)	110000				
	$E_{act,ka}$ (kJ/kmol)	155000				
	γ_{an} (A/m ²)	7x10 ⁹				
	γ_{ka} (A/m ²)	7x10 ⁹				
Konsantrasyon polarizasyonu	$r_{por,an}$ (m)	1x10 ⁻⁶				
	$r_{por,an}$ (m)	1x10 ⁻⁶				
	ϵ_{an} (%)	30				
	ϵ_{ka} (%)	30				
	τ_{an}	3				
	τ_{ka}	3				

Çizelge 3.2 Giriş parametreleri

Parametre	Değer
Yakıt kompozisyonu (%)	100 CH ₄
İşletme sıcaklığı (°C)	1000
İşletme basıncı	1 bar
Ortalama akım yoğunluğu (A/m ²)	1800
Hücre yüzey alanı (m ²)	0,0834
Hücre sayısı	1152
Hava giriş sıcaklığı (°C)	600
Yakıt giriş sıcaklığı (°C)	400
Yakıt kullanım oranı (%)	67
Hava kullanım oranı (%)	18
Molar buhar-karbon oranı	2

Çizelge 3.1’de verilen giriş parametrelerine göre elde edilen sonuçlar ve literatürle karşılaştırılması Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Simülasyon sonuçları ve literatürle karşılaştırılması

Parametre	[36],[37]	[3]	Bu çalışma
Hücre voltajı (V)	0,682	0,678	0,670
Bürüt DC güç (kW)	118	117,2	116
Reformer çıkış sıcaklığı (°C)	550	550,5	545,5
Egzoz sıcaklığı (°C)	847	846,5	910
Bürüt DC elektrik verimi (%)	53,25	55,4	49,35
Bürüt AC elektrik verimi (%)	50	51,3	45,6

Karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında oluşturulan modelin KOYH sisteminin performansını başarılı bir şekilde simüle ettiği görülebilir.

3.4 Performans Analizi Sonuçları

KOYH sisteminin performans analizi için üç farklı biyokütlenin gazlaştırılması sonucu elde edilen üç farklı gaz karışımı yakıt olarak kullanılmıştır. Performans analizinde kullanılan yakıt kompozisyonu Çizelge 3.4’de verilmiştir. Kullanılan yakıt kompozisyonu dışındaki parametreler Çizelge 3.1 ve 3.2’de olduğu gibidir.

Çizelge 3.4 Yakıt kompozisyonları

Biyokütle	Yakıt kompozisyonu (%)					
	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂
Odun	0,74	11,95	12,96	12,23	12,76	49,35
Saman	1	15,79	11,85	14,23	10,27	46,86
Çim	0,49	8,69	13,91	10,04	15,45	51,41

Performans analizi yapılırken hücre sıcaklığı (T_h), akım yoğunluğu (j) ve işletme basıncı (P_2) bağımsız değişkenler olarak seçilmiş ve sistemin performansına olan etkisi incelenmiştir.

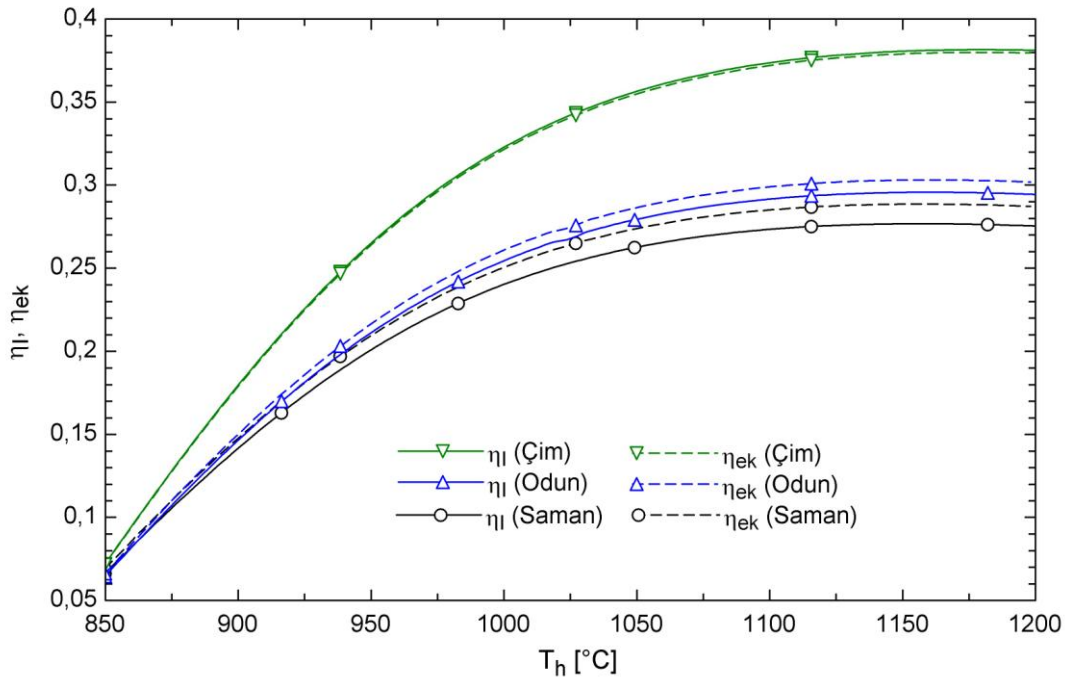
3.4.1 Hücre sıcaklığının etkisi

Hücre sıcaklığının I.Kanun ve ekserji verimlerine etkisi Şekil 3.5’de görülmektedir. Hücre sıcaklığının artması I. Kanun ve ekserji verimlerini artırmaktadır. Yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılan üç farklı gaz karışımının elde edildiği biyoküteller göz önüne alındığında I.Kanun ve ekserji verimleri bakımından çimin en yüksek verim değerlerini verdiği görülebilir. Daha sonra odun ve en düşük verim değerlerini saman vermektedir. Şekil 3.6’ya bakıldığında yakıt olarak kullanılan her üç gaz karışımı için de yakıt

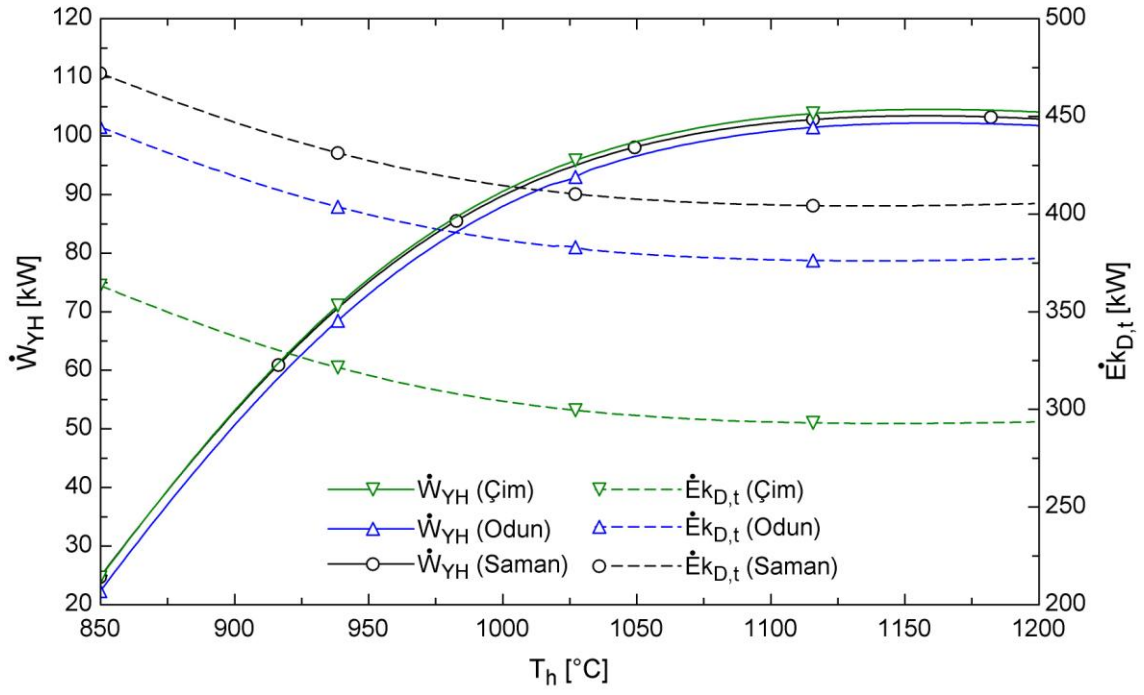
hücrelerinden elde edilen gücün birbirine yakın olduğu görülebilir. Çimden elde edilen gaz karışımının daha yüksek verim değerleri vermesi, çimin ısı değerinin ve ekserjisinin diğer iki biyokütleye göre düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.7’de hücre voltajının hücre sıcaklığıyla değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi düşük hücre sıcaklıklarında voltaj değeri düşmektedir. Bu da düşük sıcaklıklarda yakıt hücrelerinden alınan gücün ve elde edilen verimin neden düşük olduğunu açıklar.

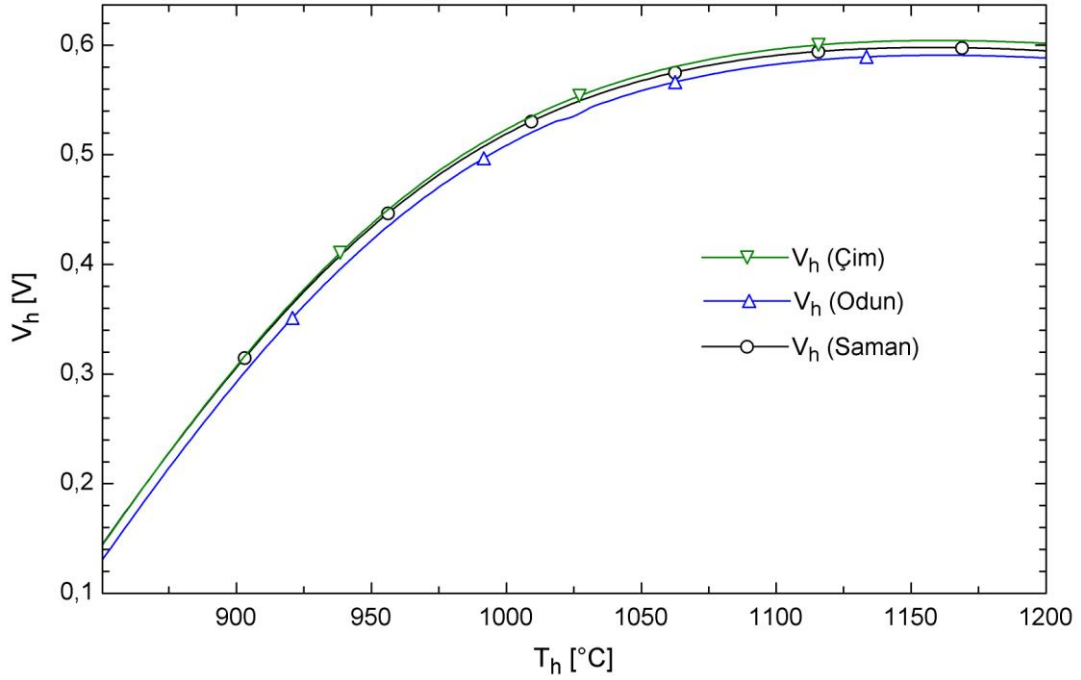
Düşük hücre sıcaklıklarında voltaj değerinin düşük olması, Şekil 3.9’da görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda voltaj kayıplarının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Voltaj kayıplarının büyük bir bölümünü aktivasyon kayıplarının oluşturduğu Şekil 3.8’de görülebilir.



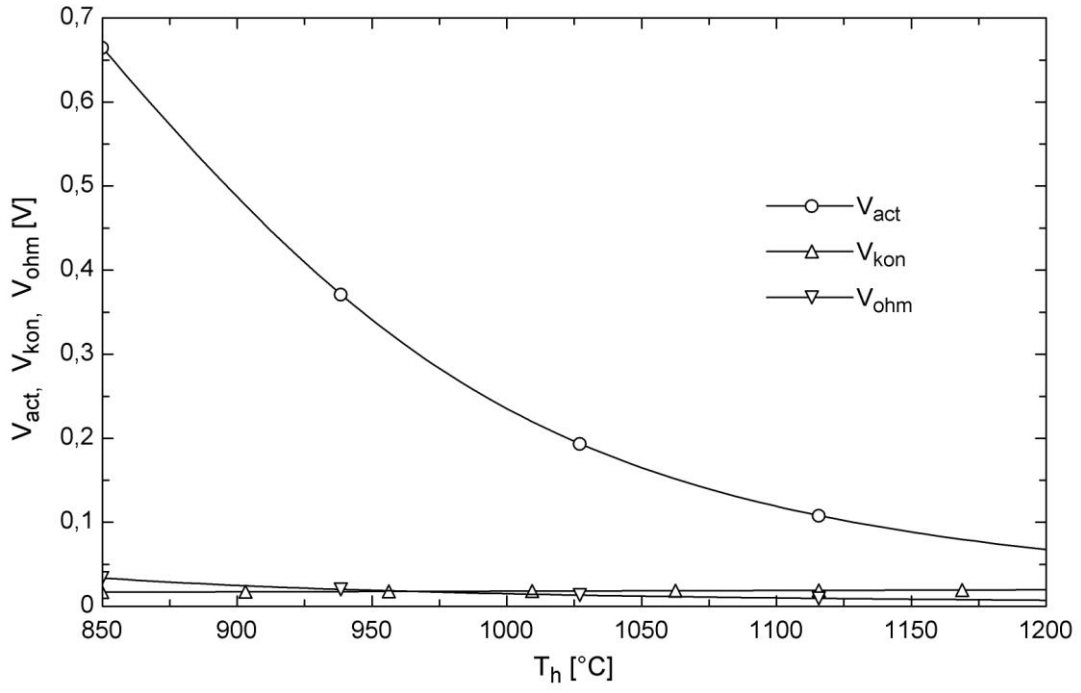
Şekil 3.5 I.Kanun ve ekserji veriminin hücre sıcaklığına göre değişimi



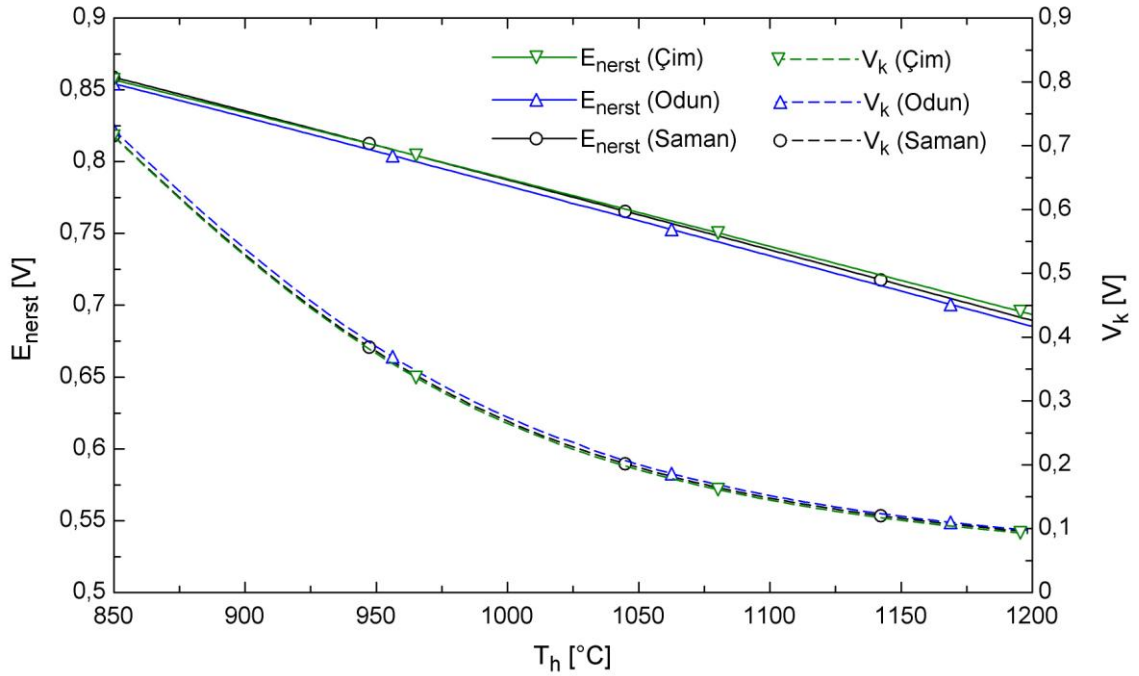
Şekil 3.6 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.7 Hücre voltajının hücre sıcaklığına göre değişimi



Şekil 3.8 Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların hücre sıcaklığına göre değişimi



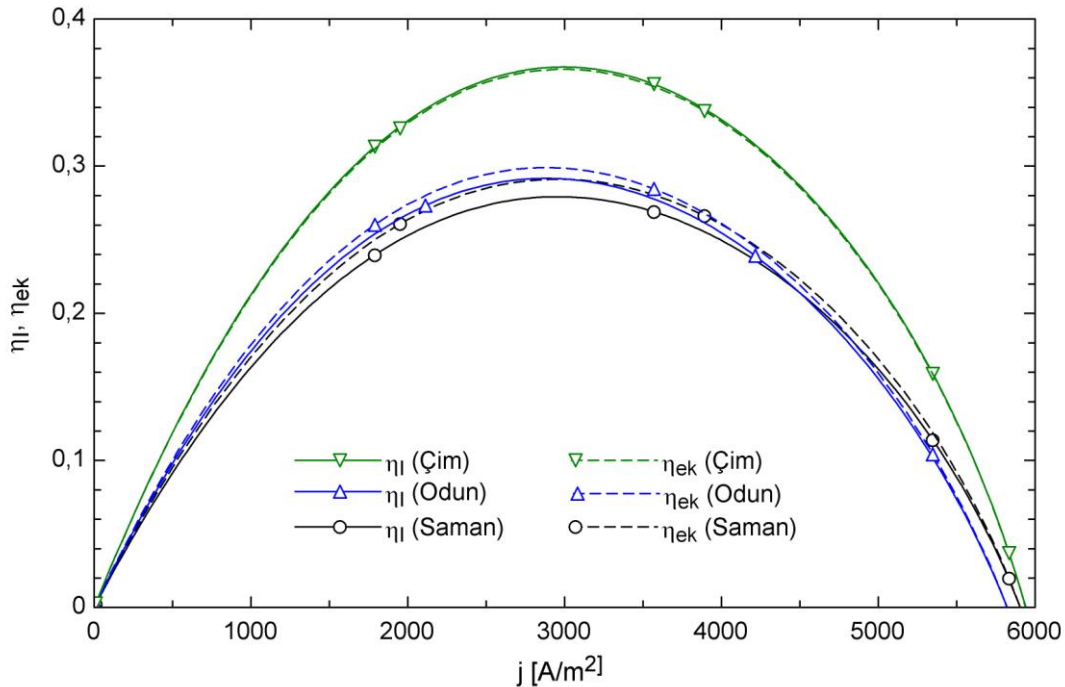
Şekil 3.9 Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi

3.4.2 Akım yoğunluğunun etkisi

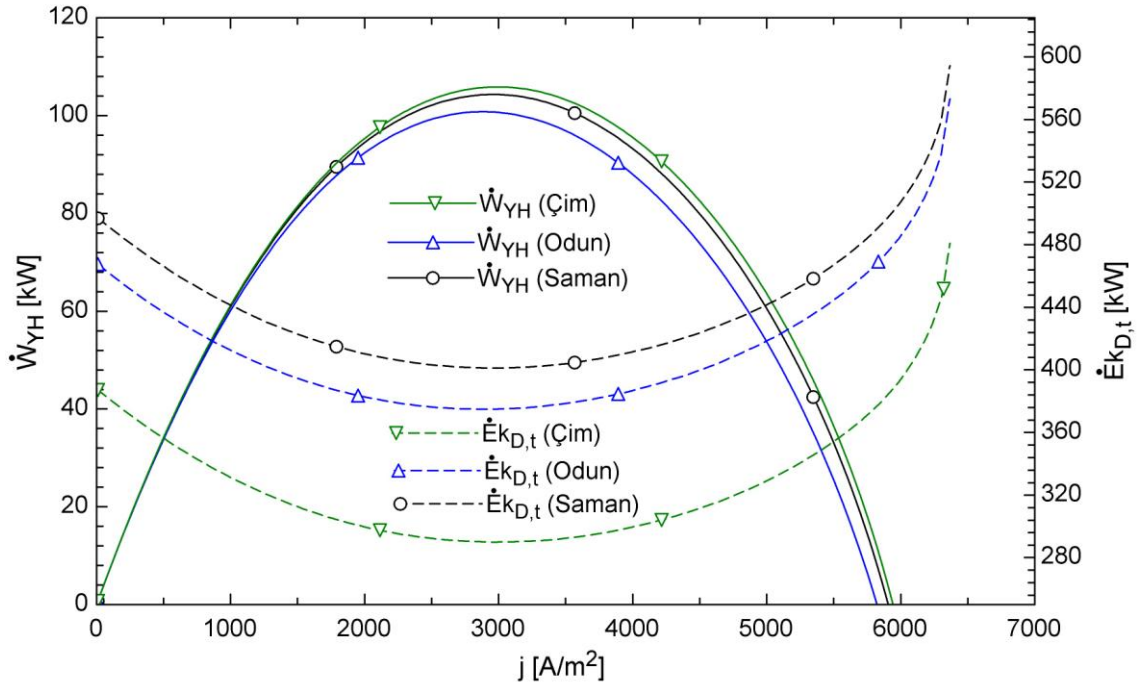
Akım yoğunluğunun I.Kanun ve ekserji verimlerine olan etkisi Şekil 3.10'da görülmektedir. Verim değerleri önce artmakta daha sonra azalarak limit akım yoğunluğu değerinde sıfır olmaktadır. Bunun nedeni Şekil 3.11'de görüldüğü gibi yakıt hücresinden alınan gücün benzer bir davranış göstermesidir. Yakıt hücresinden alınan güç belli bir değere kadar (yaklaşık 3000 A/m^2) artmakta daha sonra azalarak limit akım yoğunluğu değerinde sıfır olmaktadır.

Şekil 3.12'de akım yoğunluğu arttıkça hücre voltajının düştüğü görülmektedir. Hücre voltajının artan akım yoğunluğu ile düşmesi Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de görüldüğü gibi akım yoğunluğu artışının voltaj kayıplarını artırmasından kaynaklanmaktadır.

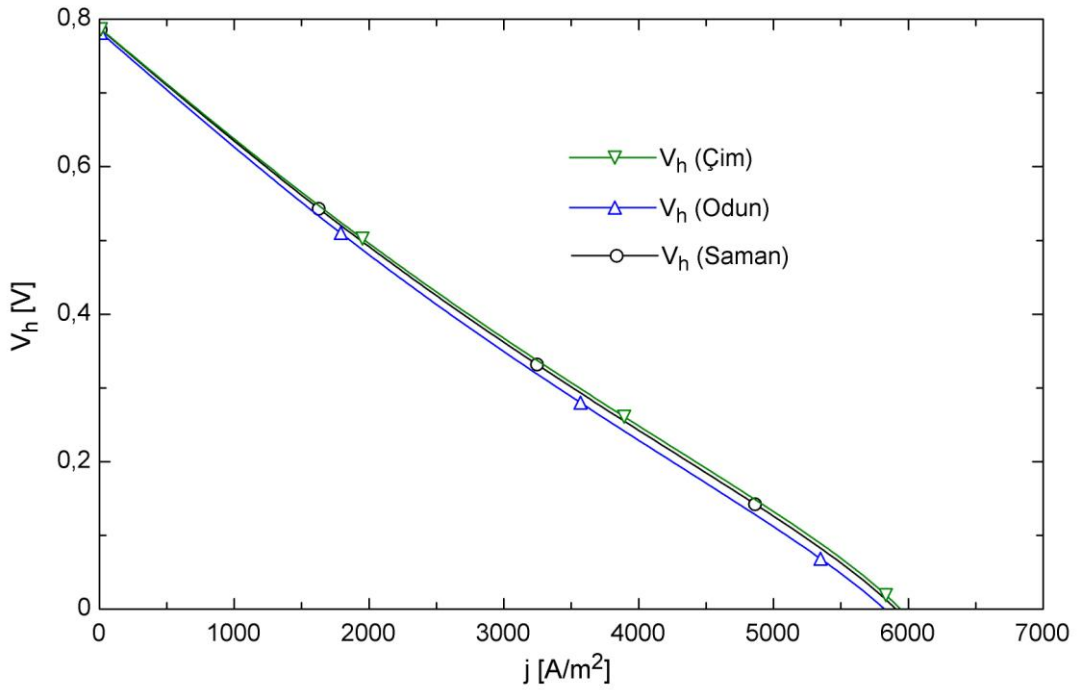
Güç ve verim eğrilerinin önce artıp belirli bir değerden sonra azalması, akım yoğunluğunun 3000 A/m^2 değerine kadar, gücü artırma etkisinin voltaj kayıplarının gücü düşürme etkisinden fazla olmasından; 3000 A/m^2 'den sonra ise voltaj kayıplarının gücü düşürme etkisinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



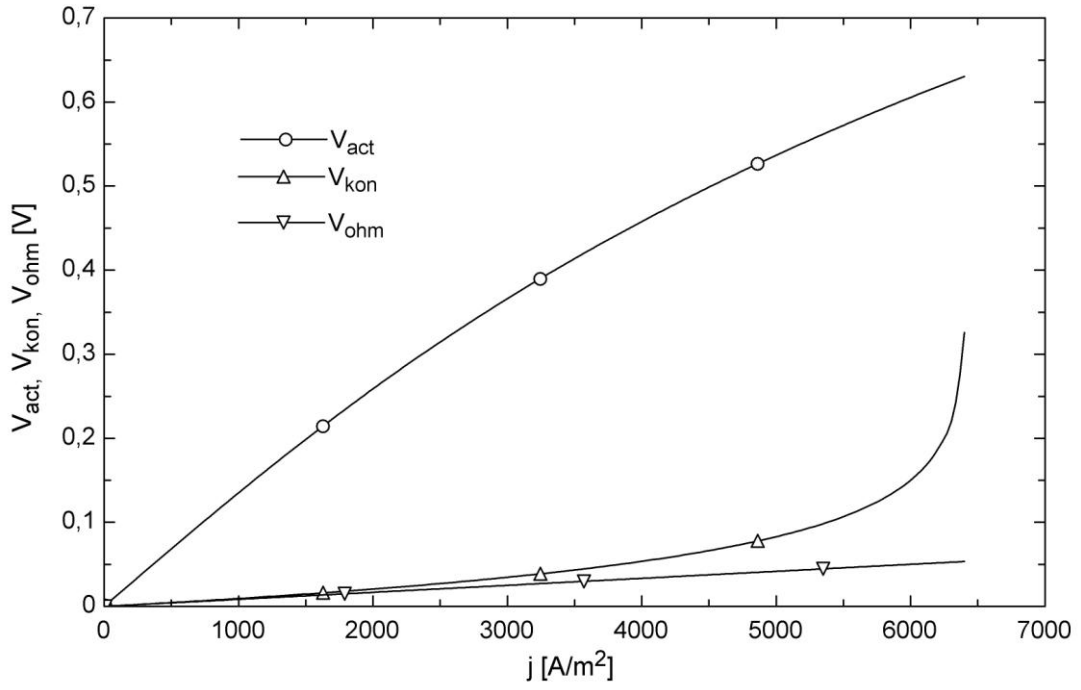
Şekil 3.10 I.Kanun ve ekserji veriminin akım yoğunluğuna göre değişimi



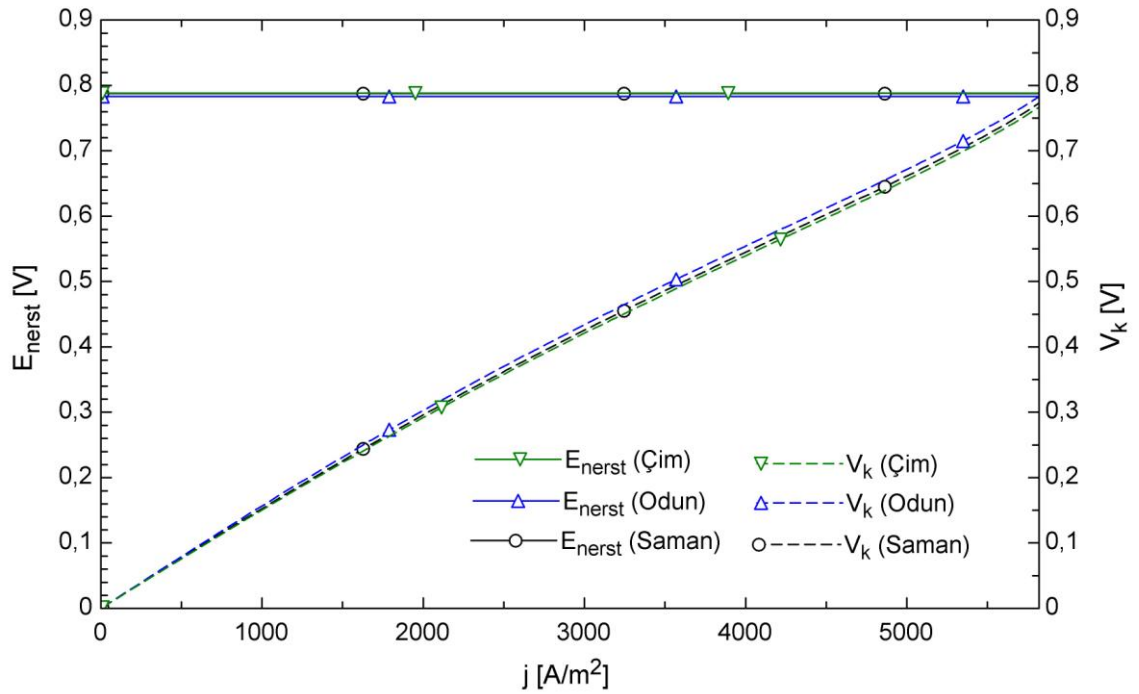
Şekil 3.11 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi



Şekil 3.12 Hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimi



Şekil 3.13 Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların akım yoğunluğuna göre değişimi

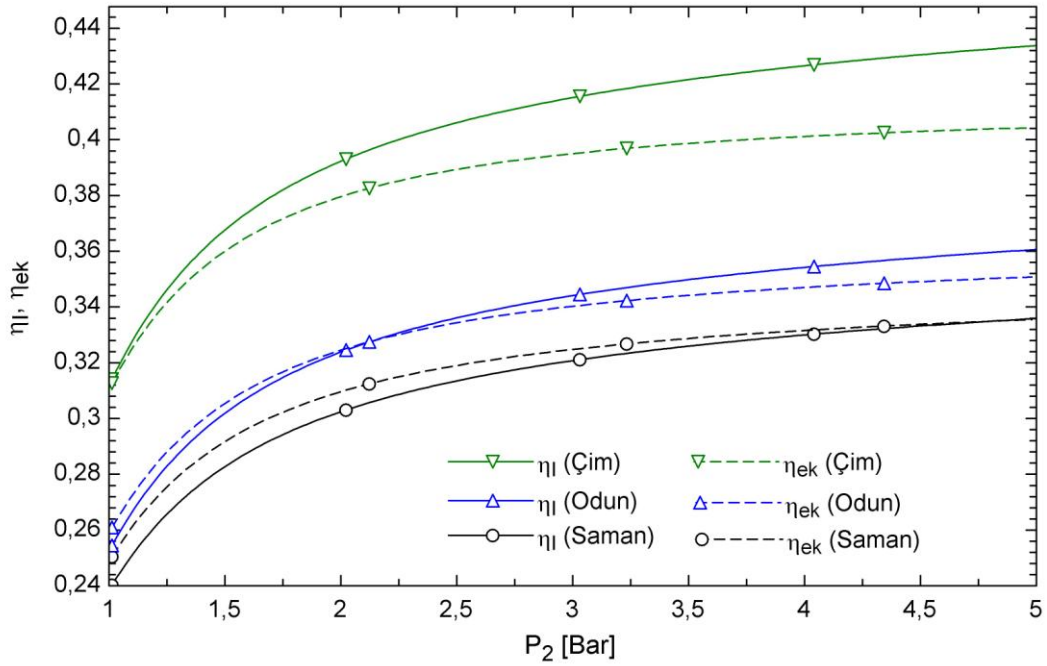


Şekil 3.14 Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi

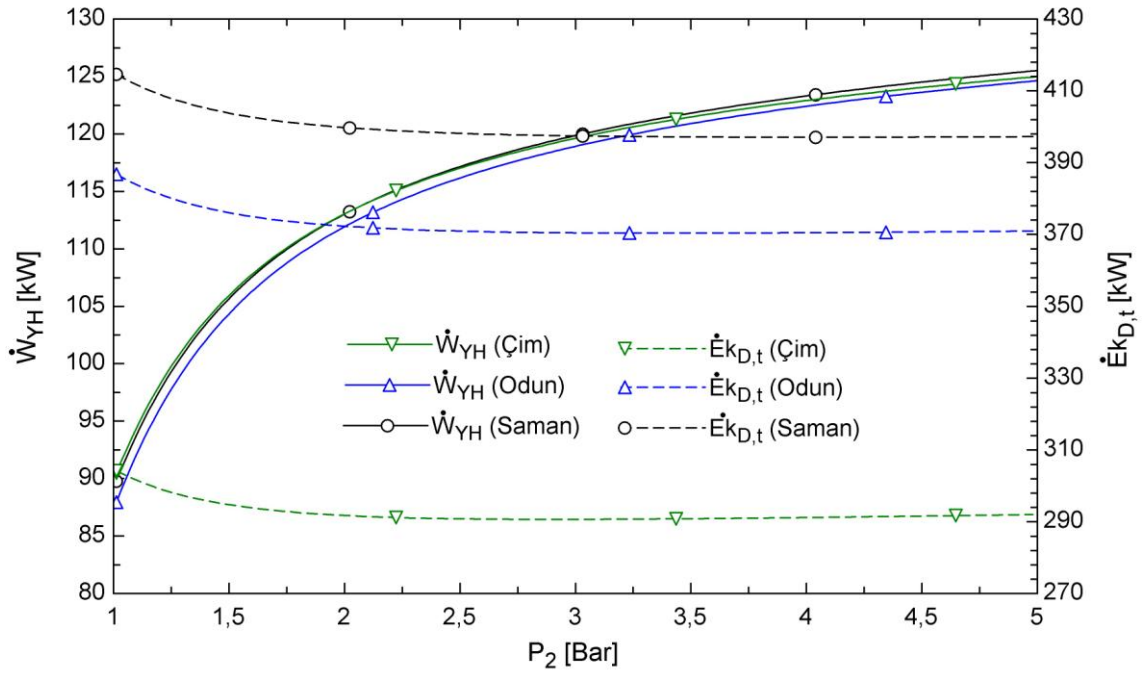
3.4.3 İşletme basıncının etkisi

I.Kanun ve ekserji verimlerinin işletme basıncıyla değişimi Şekil 3.15’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi işletme basıncının artması I.Kanun ve ekserji verimlerini artırmaktadır. Verim değerlerinin artması Şekil 3.16’da görüldüğü gibi basıncın artmasıyla yakıt hücresinden alınan gücün artmasından kaynaklanmaktadır.

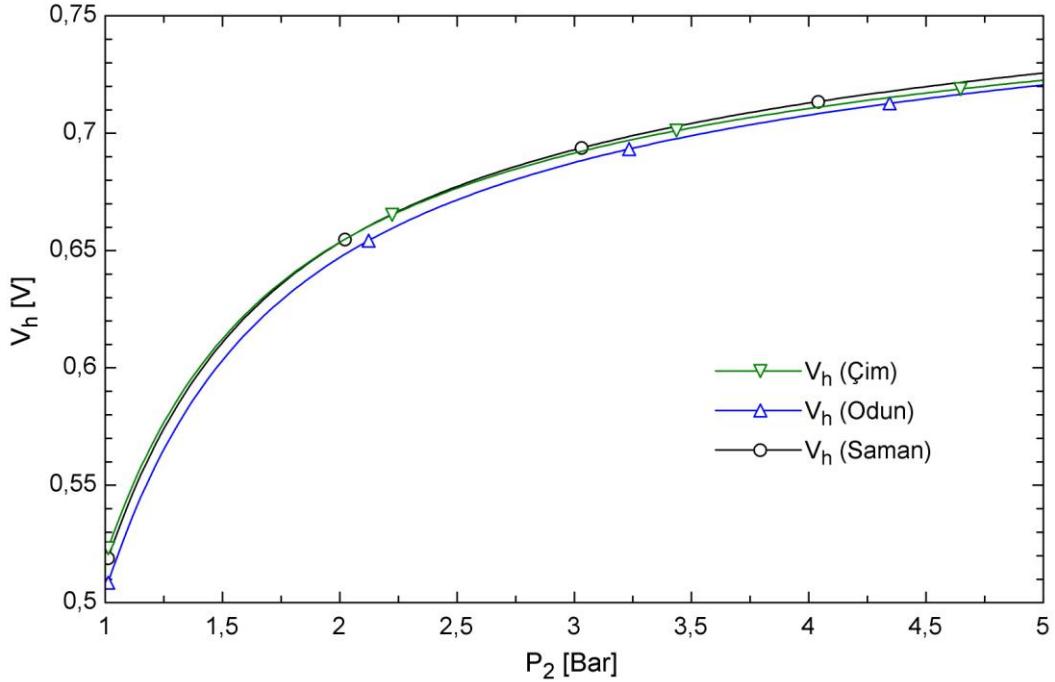
Şekil 3.17’de hücre voltajının işletme basıncıyla değişimi verilmiştir. İşletme basıncı arttıkça hücre voltajının arttığı görülmektedir. Şekil 3.18’de görüldüğü gibi basıncın artması hem voltaj kayıplarını düşürmekte (Şekil 3.17) hem de nerst potansiyelini artırmaktadır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak hücre voltajı artmakta dolayısıyla yakıt hücresinden alınan güç ve verim değerleri de artmaktadır.



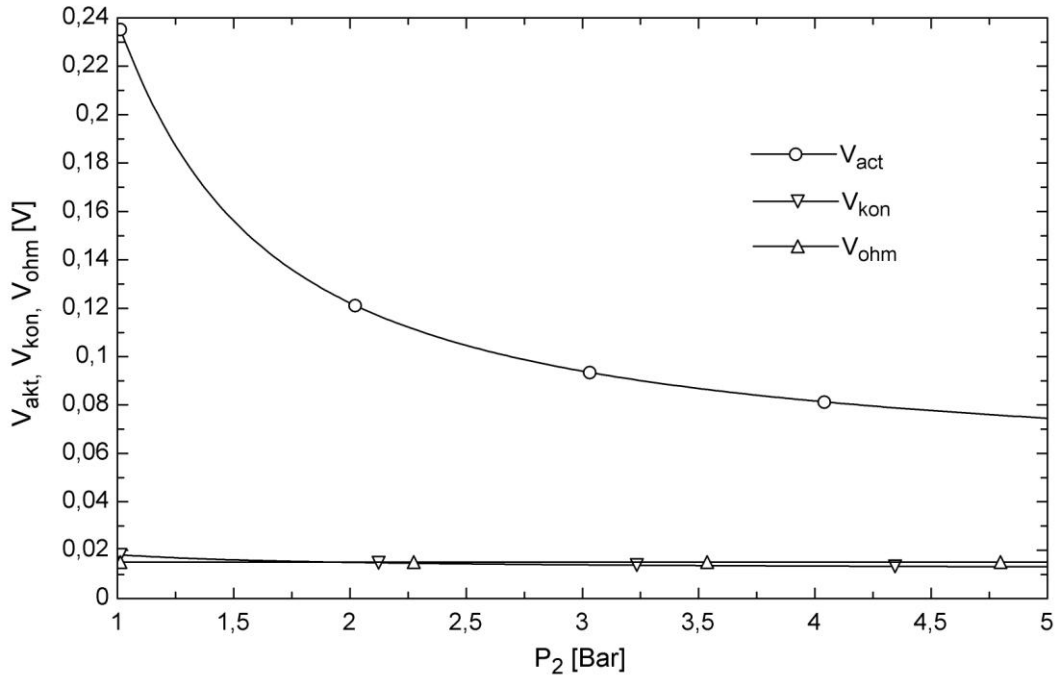
Şekil 3.15 I.Kanun ve ekserji veriminin işletme basıncına göre değişimi



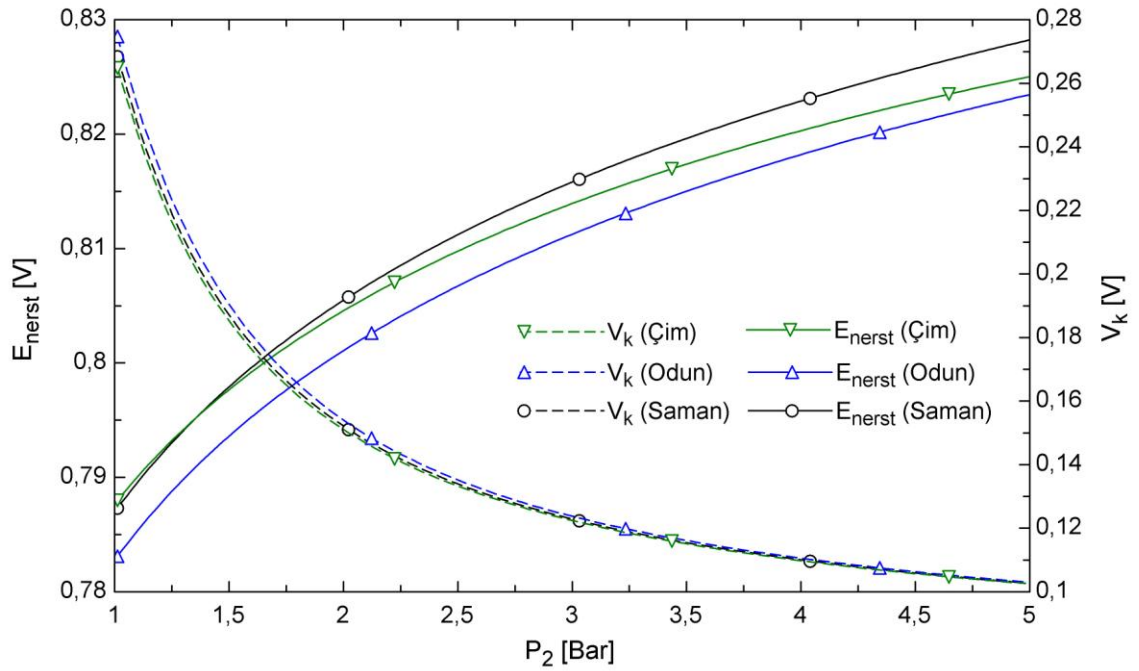
Şekil 3.16 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının işletme basıncına göre değişimi



Şekil 3.17 Hücre voltajının işletme basıncına göre değişimi



Şekil 3.18 Aktivasyon, konsantrasyon ve ohmik kayıpların işletme basıncına göre değişimi



Şekil 3.19 Nerst potansiyeli ve toplan voltaj kaybının işletme basıncına göre değişimi

ENTEĞRE GAZLAŞTIRICI-KATI OKSİT YAKIT HÜCREŞİ SİSTEMİNİN MODELİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, önceki bölümlerde geliştirilen gazlaştırıcı ve katı oksit yakıt hücresi modelleri birleştirilerek oluşturulan entegre Gazlaştırıcı-KOYH sistemi için bir model ortaya konmuştur. Oluşturulan model ile çeşitli işletme parametreleri için yeni sistemin performansı değerlendirilmiştir.

4.1 Literatür Özeti

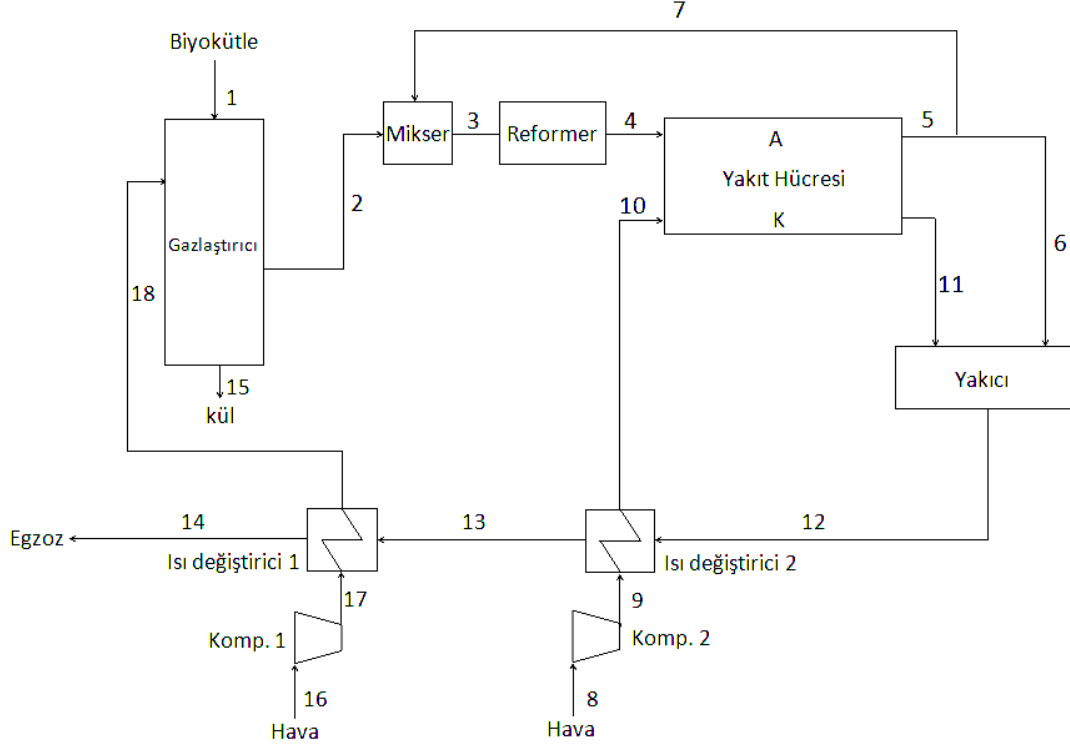
Cordiner vd. [1], biyokütle gazlaştırıcısı ve KOYH'den oluşan bir sistem için üç boyutlu hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanan bir model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model ile KOYH'nin performansına etki eden temel işletme şartlarını belirlemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır.

Athanasiou vd. [38], biyokütle gazlaştırıcısı ve KOYH'den oluşan entegre bir sistem için termodinamik model oluşturmuşlardır ve gazlaştırılan biyokütle içerisindeki hidrojen oranının sistemin performansına olan etkisini incelemişlerdir. Ayrıca gazlaştırıcı ve buhar türbininden oluşan sisteme KOYH eklenmesinin elektrik verimine olan etkisi ortaya konmuştur.

Colpan vd. [7], gazlaştırıcı ve katı oksit yakıt hücresinden oluşan bir sistemde gazlaştırıcıda kullanılan gazlaştırma ajanının (hava, oksijen, su buharı) sistemin performansına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, gazlaştırıcıda ajan olarak su buharı kullanılması durumunda en yüksek enerji ve ekserji veriminin elde edildiği belirtilmiştir.

4.2 Matematiksel Model

Göz önüne alınan entegre Gazlaştırıcı-KOYH Sistemi'nin şematik görünümü Şekil 4.1'de verilmiştir.



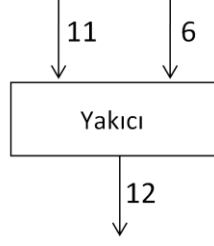
Şekil 4.1 Entegre Gazlaştırıcı-KOYH Sistemi'nin şematik görünümü

Model oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda sıralanmıştır:

- Her bileşen sürekli akışlı açık bir kontrol hacmi olarak ele alınmıştır.
- Sistemdeki gazlar ideal gaz olarak kabul edilmiştir.
- Sistem bileşenlerinin adyabatik olduğu kabul edilmiştir.

4.2.1 Yakıcı

Yakıt hücresinde anottan çıkan gaz karışımı (6 noktası) içerisindeki kullanılmayan H_2 ve CO , katottan çıkan (11 noktası) kullanılmayan hava ile yakıcıda birleşerek yanar. Yanma reaksiyonu sonucu ortaya çıkan ısı egzoz gazlarının sıcaklığını yükseltir.



Şekil 4.2 Yakıcı

Yakıcıda gerçekleşen H_2 ve CO için yanma reaksiyonlarına ait denklemler aşağıdaki gibidir:



Hidrojen reaksiyonunda tüketilen hidrojenin molar debisi \dot{z}_{yo} , karbon monoksit reaksiyonunda tüketilen karbon monoksitin molar debisi \dot{y}_{yo} olarak düşünüldüğünde, yakıcı için kütle dengesi yazılarak yakıcı çıkışındaki molar debi ve gaz bileşenleri belirlenebilir:

$$\dot{n}_{12,CO} = \dot{n}_{6,CO} - \dot{y}_{yo} \quad (4.3)$$

$$\dot{n}_{12,CO_2} = \dot{n}_{6,CO_2} + \dot{y}_{yo} \quad (4.4)$$

$$\dot{n}_{12,H_2} = \dot{n}_{6,H_2} - \dot{z}_{yo} \quad (4.5)$$

$$\dot{n}_{12,H_2O} = \dot{n}_{6,H_2O} + \dot{z}_{yo} \quad (4.6)$$

$$\dot{n}_{12,N_2} = \dot{n}_{11,O_2} - \frac{\dot{z}_{yo}}{2} - \frac{\dot{y}_{yo}}{2} \quad (4.7)$$

$$\dot{n}_{12,N_2} = \dot{n}_{6,N_2} + \dot{n}_{11,N_2} \quad (4.8)$$

\dot{z}_{yo} ve \dot{y}_{yo} değerleri yakıcının yanma verimine bağlı olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{z}_{yo} = \dot{n}_{6,H_2} \eta_{yo} \quad (4.9)$$

$$\dot{y}_{yo} = \dot{n}_{6,CO} \eta_{yo} \quad (4.10)$$

Yakıcı çıkışındaki entalpi ve sıcaklık değerini hesaplamak için enerji dengesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{Q}_{YO} - \dot{W}_{YO} + \sum_i (\dot{n}_{6,i} \bar{h}_{6,i} + \dot{n}_{11,i} \bar{h}_{11,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{12,i} \bar{h}_{12,i})_\zeta = 0 \quad (4.11)$$

Yanma odasında çevreyle iş ve ısı alış verişi olmadığı göz önüne alınırsa enerji dengesindeki iş ve ısı terimleri hesaba katılmayacaktır.

Yakıcı bileşenindeki ekserji kaybı ve ekserji verimi değerlerini hesaplamak için her bir noktadaki ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir.

11 Noktası: Bir önceki bölümde KOYH bileşeninin modelinde verilmiştir.

6 Noktası:

$$\dot{E}k_6^f = \sum_i \dot{n}_{6,i} [\bar{h}_{6,i} - \bar{h}_{o6,i} - T_o (\bar{s}_{6,i} - \bar{s}_{o6,i})] \quad (4.12)$$

$$\dot{E}k_6^k = \sum_i \dot{n}_{6,i} \sum_i (x_{6,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{6,i} \ln(x_{6,i})) \quad (4.13)$$

12 Noktası:

$$\dot{E}k_{12}^f = \sum_i \dot{n}_{12,i} [\bar{h}_{12,i} - \bar{h}_{o12,i} - T_o (\bar{s}_{12,i} - \bar{s}_{o12,i})] \quad (4.14)$$

$$\dot{E}k_{12}^k = \sum_i \dot{n}_{12,i} \sum_i (x_{12,i} \bar{e}_{kim,i} + \bar{R} T_o x_{12,i} \ln(x_{12,i})) \quad (4.15)$$

Yakıcının her noktasındaki ekserji değerleri bilindiğinde ekserji kaybı, ekserji dengesinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{E}k_{D,YO} = \dot{Q}_{YO} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) - \dot{W}_{YO} + (\dot{E}k_6 + \dot{E}k_{11})_g - (\dot{E}k_{12})_\zeta \quad (4.16)$$

Isı ve iş alış verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

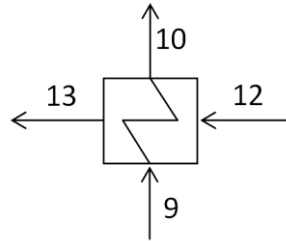
$$\dot{E}k_{D,YO} = \dot{E}k_6 + \dot{E}k_{11} - \dot{E}k_{12} \quad (4.17)$$

Yakıcı için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [6],[39]:

$$\eta_{Ek,YO} = \frac{\dot{E}k_{12}}{\dot{E}k_6 + \dot{E}k_{11}} \quad (4.18)$$

4.2.2 Isı Değiştirici II

KOYH'den çıkan sıcak gazların sahip olduğu enerjinin bir kısmını geri kazanmak ve KOYH girişi ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkını azaltarak termal gerilmeleri önlemek amacıyla, yakıt hücresine giren havayı ısıtmak üzere sisteme bir ısı değiştirici eklenmiştir.



Şekil 4.3 Isı değiştirici II

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi kompresörden çıkan soğuk hava ısı değiştiriciye 9 noktasında, yakıcıdan çıkan sıcak gazlar ise 12 noktasında girmektedir. Soğuk havanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı (10 noktası) ısı değiştiricinin etkinlik katsayısına bağlı olarak hesaplanabilir. Isı değiştiricinin etkinlik katsayısı ve havanın çıkış sıcaklığı ifadeleri Denklem 4.19 ve 4.20'de olduğu gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_{II} = \frac{T_{10} - T_9}{T_{12} - T_{13}} \quad (4.19)$$

$$T_{10} = T_9 + \varepsilon_{II} (T_{12} - T_{13}) \quad (4.20)$$

9 ve 10 noktalarının molar debileri ve gaz bileşenleri aynı olduğundan dolayı T_{10} sıcaklığı bilindiğinde 10 noktasındaki entalpi hesaplanır. 12 ve 9 noktalarındaki şartlar için ısı değiştiricide enerji dengesi yazılarak 13 noktasındaki entalpi değeri hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{ID,II} - \dot{W}_{ID,II} + \sum_i (\dot{n}_{9,i} \bar{h}_{9,i} + \dot{n}_{12,i} \bar{h}_{12,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{10,i} \bar{h}_{10,i} + \dot{n}_{13,i} \bar{h}_{13,i})_c = 0 \quad (4.21)$$

Isı değiştiricide çevreyle iş ve ısı alış verişi olmadığından dolayı iş ve ısı terimleri ihmal edilir. 13 noktasındaki entalpi değeri bulunduğu anda, 12 ve 13 noktalarındaki molar debi ve gaz bileşenleri aynı olduğundan dolayı T_{13} sıcaklığı iterasyonla bulunabilir.

Isı değiştirici için ekserji kaybı ve ekserji verimi değerlerinin hesaplanabilmesi için her bir noktadaki ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir.

12 Noktası: Yakıcı bileşenin modelinde verilmiştir.

10 Noktası: Bir önceki bölümde KOYH modelinde verilmiştir.

9 Noktası: Kompresörden çıkan havanın ısı değiştiriciye giriş noktasıdır. Kimyasal ekserji değeri 10 noktasına eşittir. Fiziksel ekserji değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}k_9^f = \sum_i \dot{n}_{9,i} [\bar{h}_{9,i} - \bar{h}_{o9,i} - T_o (\bar{s}_{9,i} - \bar{s}_{o9,i})] \quad (4.22)$$

13 Noktası: Kimyasal ekserji değeri 12 noktasına eşittir. Fiziksel ekserji değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}k_{13}^f = \sum_i \dot{n}_{13,i} [\bar{h}_{13,i} - \bar{h}_{o13,i} - T_o (\bar{s}_{13,i} - \bar{s}_{o13,i})] \quad (4.23)$$

Isı değiştiricinin her noktasındaki ekserji değerleri bilindiğinde ekserji kaybı, ekserji dengesinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{E}k_{D,DI} = \dot{Q}_{DI} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{DI} + (\dot{E}k_9 + \dot{E}k_{12})_g - (\dot{E}k_{10} + \dot{E}k_{13})_ç \quad (4.24)$$

Isı ve iş aliş verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

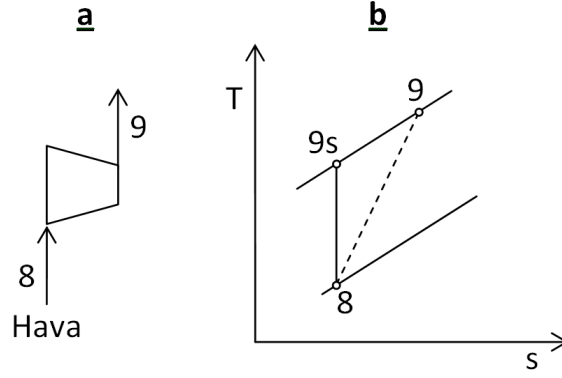
$$\dot{E}k_{D,DI} = \dot{E}k_9 + \dot{E}k_{12} - \dot{E}k_{10} - \dot{E}k_{13} \quad (4.25)$$

Isı değiştirici için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [6], [39]:

$$\eta_{Ek,DI} = \frac{\dot{E}k_{10} - \dot{E}k_9}{\dot{E}k_{12} - \dot{E}k_{13}} \quad (4.26)$$

4.2.3 Kompresör II

şekil 4.4'de kompresör-II ve kompresör-II'ye ait T-s diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.4 a kompresör, b kompresör için T-s diyagramı

Kompresörde izentropik sıkıştırma durumunda 8 ve 9s noktalarının entropileri eşit olacaktır:

$$\sum_i (\dot{n}_{8,i} \bar{s}_{8,i}) = \sum_i (\dot{n}_{9s,i} \bar{s}_{9s,i}) \quad (4.27)$$

Kompresör giriş basıncı ve sıcaklığı bilindiğinden ve kompresör çıkış basıncı basınç oranına bağlı olarak belirlenebildiğinden dolayı Denklem 4.27 yardımıyla T_{9s} sıcaklığı bulunabilir ve bu sıcaklığa karşılık gelen entalpi değeri hesaplanabilir. T_9 sıcaklığı ise kompresör izentropik verimi ifadesinden yararlanılarak hesaplanır:

$$\eta_K = \frac{\bar{h}_{9s} - \bar{h}_8}{\bar{h}_9 - \bar{h}_8} \quad (4.28)$$

$$\bar{h}_9 = \bar{h}_8 + \frac{\bar{h}_{9s} - \bar{h}_8}{\eta_K} \quad (4.29)$$

9 noktasındaki entalpi değeri kompresör izentropik veriminden bulunarak bu noktadaki entalpi değerine karşılık gelen T_9 sıcaklığı belirlenmiş olur.

Kompresörün ihtiyaç duyduğu güç, enerji dengesi yazılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{KII} - \dot{W}_{KII} + \sum_i (\dot{n}_{8,i} \bar{h}_{8,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{9,i} \bar{h}_{9,i})_ç = 0 \quad (4.30)$$

Kompresörde çevre ile ısı alış verişi olmadığı kabulü yapılırsa enerji dengesindeki ısı ifadesi dikkate alınmaz.

Kompresör için ekserji kaybı ve ekserji veriminin hesaplanabilmesi için her bir noktadaki ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir. 8 noktası çevre şartları olduğu için ekserjisi sıfırdır. 9 noktasının ekserjisi ise Isı değiştirici-II bileşeninde hesaplanmıştır.

Kompresör için ekserji kaybı ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}k_{D,KII} = \dot{Q}_{KII} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{KII} + (\dot{E}k_8)_g - (\dot{E}k_9)_\zeta \quad (4.31)$$

Isı alış verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden dzenlenebilir:

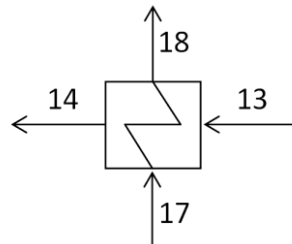
$$\dot{E}k_{D,KII} = -\dot{W}_{KII} + \dot{E}k_8 - \dot{E}k_9 \quad (4.32)$$

Kompresör için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [6], [39]:

$$\eta_{Ek,KII} = \frac{\dot{E}k_9 - \dot{E}k_8}{\dot{W}_{KII}} \quad (4.33)$$

4.2.4 Isı Değiştirici I

KOYH'den çıkan sıcak gazların sahip olduğu enerjinin bir kısmını geri kazanmak amacıyla, gazlaştırma işleminde kullanılan havayı ısıtmak üzere sisteme bir ısı değiştirici eklenmiştir.



Şekil 4.5 Isı değiştirici I

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi kompresörden çıkan soğuk hava ısı değiştiriciye 17 noktasında, KOYH'den çıkan sıcak gaz ise 13 noktasında girmektedir. Soğuk havanın ısı değiştiriciden çıkış sıcaklığı (18 noktası) ısı değiştiricinin etkinlik katsayısına bağlı olarak hesaplanabilir. Isı değiştiricinin etkinlik katsayısı ve havanın çıkış sıcaklığı ifadeleri Denklem 4.34 ve 4.35'de olduğu gibi yazılabilir:

$$\varepsilon_I = \frac{T_{18} - T_{17}}{T_{13} - T_{14}} \quad (4.34)$$

$$T_{18} = T_{17} + \varepsilon_I (T_{13} - T_{14}) \quad (4.35)$$

17 ve 18 noktalarının molar debileri ve gaz bileşenleri aynı olduğundan dolayı T_{18} sıcaklığı bilindiğinde 18 noktasındaki entalpi hesaplanır. 13 ve 17 noktalarındaki şartlar için ısı değiştiricide enerji dengesi yazılarak 14 noktasındaki entalpi değeri hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{ID,I} - \dot{W}_{ID,I} + \sum_i (\dot{n}_{13,i} \bar{h}_{13,i} + \dot{n}_{17,i} \bar{h}_{17,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{14,i} \bar{h}_{14,i} + \dot{n}_{18,i} \bar{h}_{18,i})_g = 0 \quad (4.36)$$

Isı değiştiricide çevreyle iş ve ısı alış verişi olmadığından dolayı iş ve ısı terimleri ihmal edilir. 14 noktasındaki entalpi değeri bulunduğu, 13 ve 14 noktalarındaki molar debi ve gaz bileşenleri aynı olduğundan dolayı T_{14} sıcaklığı iterasyonla bulunabilir.

Isı değiştirici için ekserji kaybı ve ekserji verimi değerlerinin hesaplanabilmesi için her bir noktadaki ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir.

13 Noktası: Isı değiştirici-II bileşeninin modelinde verilmiştir.

18 Noktası: Gazlaştırıcı bölümünde verilmiştir.

17 Noktası: Kompresörden çıkan havanın ısı değiştiriciye giriş noktasıdır. Kimyasal ekserji değeri 18 noktasına eşittir. Fiziksel ekserji değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}k_{17}^f = \sum_i \dot{n}_{17,i} [\bar{h}_{17,i} - \bar{h}_{o17,i} - T_o (\bar{s}_{17,i} - \bar{s}_{o17,i})] \quad (4.37)$$

14 Noktası: Kimyasal ekserji değeri 13 noktasına eşittir. Fiziksel ekserji değeri ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\dot{E}k_{14}^f = \sum_i \dot{n}_{14,i} [\bar{h}_{14,i} - \bar{h}_{o14,i} - T_o (\bar{s}_{14,i} - \bar{s}_{o14,i})] \quad (4.38)$$

Isı değiştiricinin her noktasındaki ekserji değerleri bilindiğinde ekserji kaybı, ekserji dengesinden aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{E}k_{D,ID,I} = \dot{Q}_{ID,I} \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) - \dot{W}_{ID,I} + (\dot{E}k_{13} + \dot{E}k_{17})_g - (\dot{E}k_{14} + \dot{E}k_{18})_g \quad (4.39)$$

Isı ve iş alış verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

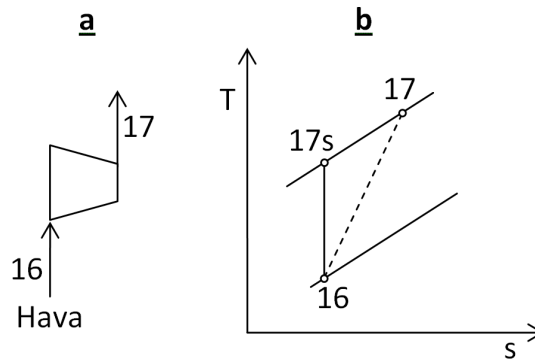
$$\dot{E}k_{D,IDI} = \dot{E}k_{13} + \dot{E}k_{17} - \dot{E}k_{14} - \dot{E}k_{18} \quad (4.40)$$

Isı değiştirici için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [6], [39]:

$$\eta_{Ek,IDI} = \frac{\dot{E}k_{18} - \dot{E}k_{17}}{\dot{E}k_{13} - \dot{E}k_{14}} \quad (4.41)$$

4.2.5 Kompresör I

Şekil 4.6'de kompresör-I ve kompresör-I'e ait T-s diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.6 a kompresör, b kompresör için T-s diyagramı

Kompresörde izentropik sıkıştırma durumunda 16 ve 17s noktalarının entropileri eşit olacaktır:

$$\sum_i (\dot{n}_{16,i} \bar{s}_{16,i}) = \sum_i (\dot{n}_{17s,i} \bar{s}_{17s,i}) \quad (4.42)$$

Kompresör giriş basıncı ve sıcaklığı bilindiğinden ve kompresör çıkış basıncı basınç oranına bağlı olarak belirlenebildiğinden dolayı Denklem 4.42 yardımıyla T_{17s} sıcaklığı bulunabilir ve bu sıcaklığa karşılık gelen entalpi değeri hesaplanabilir. T_{17} sıcaklığı ise kompresör izentropik verimi ifadesinden yararlanılarak hesaplanır:

$$\eta_K = \frac{\bar{h}_{17s} - \bar{h}_{16}}{\bar{h}_{17} - \bar{h}_{16}} \quad (4.43)$$

$$\bar{h}_{17} = \bar{h}_{16} + \frac{\bar{h}_{17s} - \bar{h}_{16}}{\eta_K} \quad (4.44)$$

17 noktasındaki entalpi değeri kompresör izentropik veriminden bulunarak bu noktadaki entalpi değerine karşılık gelen T_{17} sıcaklığı belirlenmiş olur.

Kompresörün ihtiyaç duyduğu güç, enerji dengesi yazılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\dot{Q}_{KI} - \dot{W}_{KI} + \sum_i (\dot{n}_{16,i} \bar{h}_{16,i})_g - \sum_i (\dot{n}_{17,i} \bar{h}_{17,i})_ç = 0 \quad (4.45)$$

Kompresörde çevre ile ısı alış verişi olmadığı kabulü yapılırsa enerji dengesindeki ısı ifadesi dikkate alınmaz.

Kompresör için ekserji kaybı ve ekserji veriminin hesaplanabilmesi için her bir noktadaki ekserji değerlerinin bilinmesi gerekir. 16 noktası çevre şartları olduğu için ekserjisi sıfırdır. 17 noktasının ekserjisi ise Isı değiştirici-I bileşeninde hesaplanmıştır.

Kompresör için ekserji kaybı ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{E}k_{D,KI} = \dot{Q}_{KI} \left(1 - \frac{T_o}{T} \right) - \dot{W}_{KI} + (\dot{E}k_{16})_g - (\dot{E}k_{17})_ç \quad (4.46)$$

Isı alış verişi olmadığından dolayı denklem sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\dot{E}k_{D,KI} = -\dot{W}_{KI} + \dot{E}k_{16} - \dot{E}k_{17} \quad (4.47)$$

Kompresör için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılabilir [6], [39]:

$$\eta_{Ek,KI} = \frac{\dot{E}k_{17} - \dot{E}k_{16}}{\dot{W}_{KI}} \quad (4.48)$$

Entegre Gazlaştırıcı-KOYH sistemi için net güç, I. Kanun verimi ve ekserji verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{W}_{NET} = \dot{W}_{YH} - \dot{W}_{KI} - \dot{W}_{KII} \quad (4.49)$$

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{NET}}{\dot{n}_b LHV_b} \quad (4.50)$$

$$\eta_{EK} = \frac{\dot{E}k_t}{\dot{E}k_b} \quad (4.51)$$

Burada, \dot{n}_b ve LHV_b gazlaştırıcıya giren biyokütlenin molar debisi ve ısıl değeri, $\dot{E}k_t$ sistemden elde edilen toplam ekserji (net güce eşittir), $\dot{E}k_b$ ise gazlaştırılan biyokütlenin ekserjisidir.

Sistemdeki ekserji kaybı her bir bileşenin ekserji kaybının ve egzoz gazının ekserjisinin toplamıyla bulunur:

$$\dot{E}k_{D,i} = \dot{E}k_{D,G} + \dot{E}k_{D,YH} + \dot{E}k_{D,YO} + \dot{E}k_{D,ID I} + \dot{E}k_{D,K I} + \dot{E}k_{D,ID II} + \dot{E}k_{D,K II} + \dot{E}_{14} \quad (4.52)$$

4.3 Performans Analizi Sonuçları

Performans analizi için sisteme yeni eklenen bileşenlere ait giriş verileri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Diğer bileşenlere ait giriş parametreleri önceki bölümlerde verilenlerle aynıdır.

Çizelge 4.1 Giriş verileri

Giriş verisi	Değer
Kompresör basınç oranları	1.12
Kompresör izentropik verimleri (%)	75
Isı değiştirici etkinlik katsayıları (%)	73

Üç farklı biyokütlenin yakıt olarak kullanıldığı sistemden elde edilen performans sonuçları ve sistem bileşenlerinin ekserji performansı sonuçları Çizelge 4.2 ve 4.3’de olduğu gibidir.

Çizelge 4.2 Sistemden elde edilen sonuçlar

Parametre	Biyokütle		
	Çim	Odun	Saman
Hücre voltajı (V)	0,60	0,59	0,57
KOYH DC gücü (kW)	104,20	102,30	100,2
KOYH AC gücü (kW)	96,40	94,61	92,67
Kompresör-I gücü (kW)	0,87	0,75	0,64
Kompresör-II gücü (kW)	3,76	4,57	5,21
Net güç (kW)	91,73	89,29	86,81
Toplam ekserji (kW)	91,73	89,29	86,81
Toplam ekserji kaybı (kW)	498,80	499,70	503,6
I.Kanun verimi (%)	17,44	16,84	16,66
Ekserji verimi (%)	15,72	15,41	15,01

Çizelge 4.3 Sistem bileşenlerinin ekserji performansı sonuçları

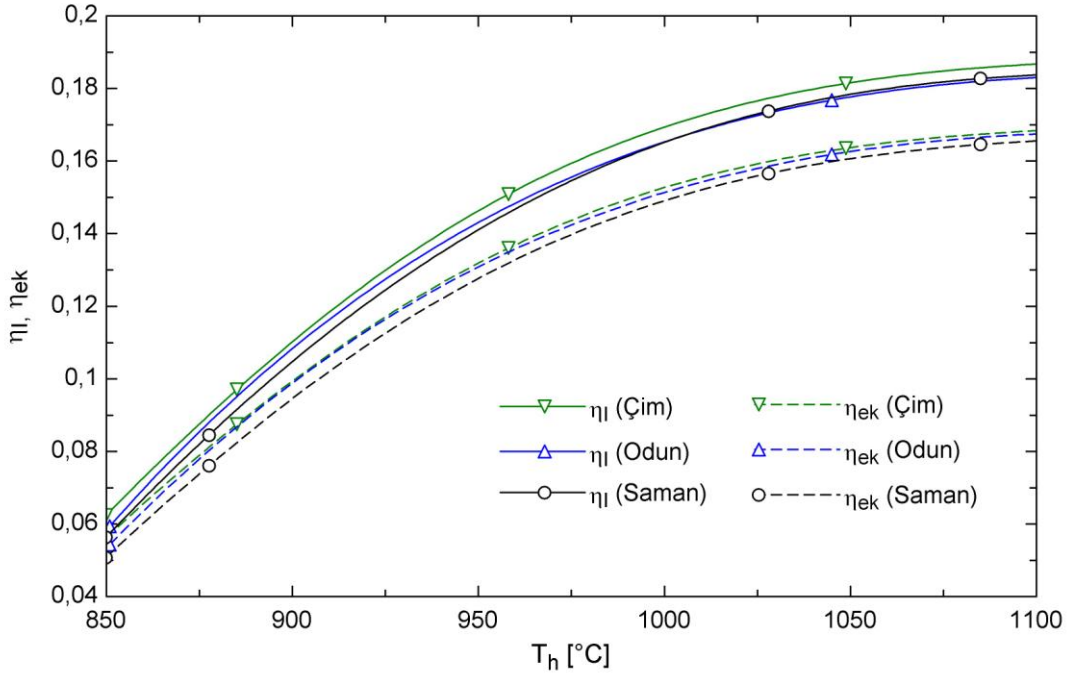
Bileşen	Çim			Odun			Saman		
	η_{ek} (%)	Ek_D (kW)	$Ek_{D,r}$ (%)	η_{ek} (%)	Ek_D (kW)	$Ek_{D,r}$ (%)	η_{ek} (%)	Ek_D (kW)	$Ek_{D,r}$ (%)
Gazlaştırıcı	65,78	205,4	41,39	71,30	170,3	34,15	75,21	146,3	29,06
Mikser	99,98	0,09	0,02	99,83	0,82	0,16	99,73	1,58	0,31
Reformer	99,93	0,27	0,05	99,90	0,51	0,10	99,88	0,71	0,14
KOYH	81,25	31,85	6,42	76,63	38,87	7,79	73,67	43,41	8,62
Yakıcı	95,22	22,13	4,46	96,08	21,57	4,33	96,63	21,09	4,19
Isı Değiştirici II	73,39	68,52	13,81	74,72	84,58	16,96	75,67	97,86	19,44
Kompresör II	75,79	0,91	0,18	75,79	1,17	0,23	75,79	1,26	0,25
Isı Değiştirici I	58,97	10,93	2,20	74,00	9,51	1,91	57,31	8,15	1,62
Kompresör I	75,79	0,21	0,04	75,79	0,18	0,04	75,79	0,16	0,03
Egzoz	-	155,9	31,42	-	171,2	34,33	-	182,9	36,33

Performans analizi yapılırken hücre sıcaklığı (T_h), akım yoğunluğu (j), işletme basıncı (P_2) ve biyoküle nem oranı (nem) bağımsız değişkenler olarak seçilmiş ve sistemin performansına olan etkisi incelenmiştir.

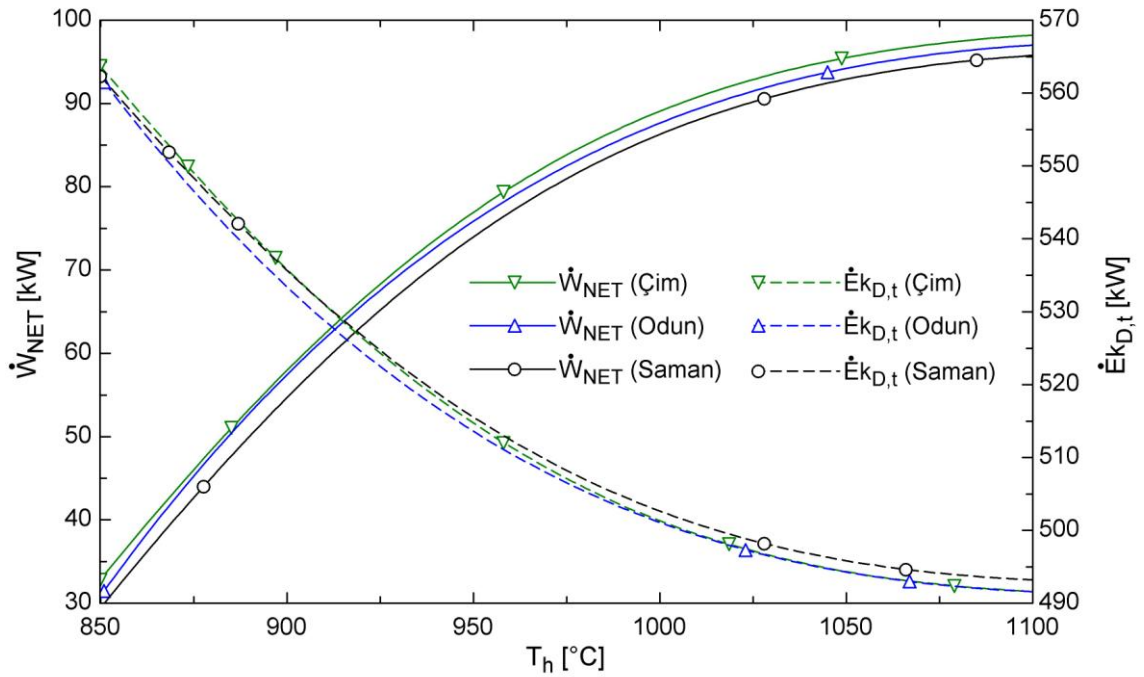
4.3.1 Hücre sıcaklığının etkisi

Şekil 4.7’de hücre sıcaklığının sistemin I.Kanun ve ekserji verimlerine olan etkisi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hücre sıcaklığı arttıkça I.Kanun ve ekserji verimleri artmaktadır. Bu durum hücre sıcaklığı artışının yakıt hücresinden alınan gücü artırması ve ekserji kayıplarını azaltmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.8, 4.10).

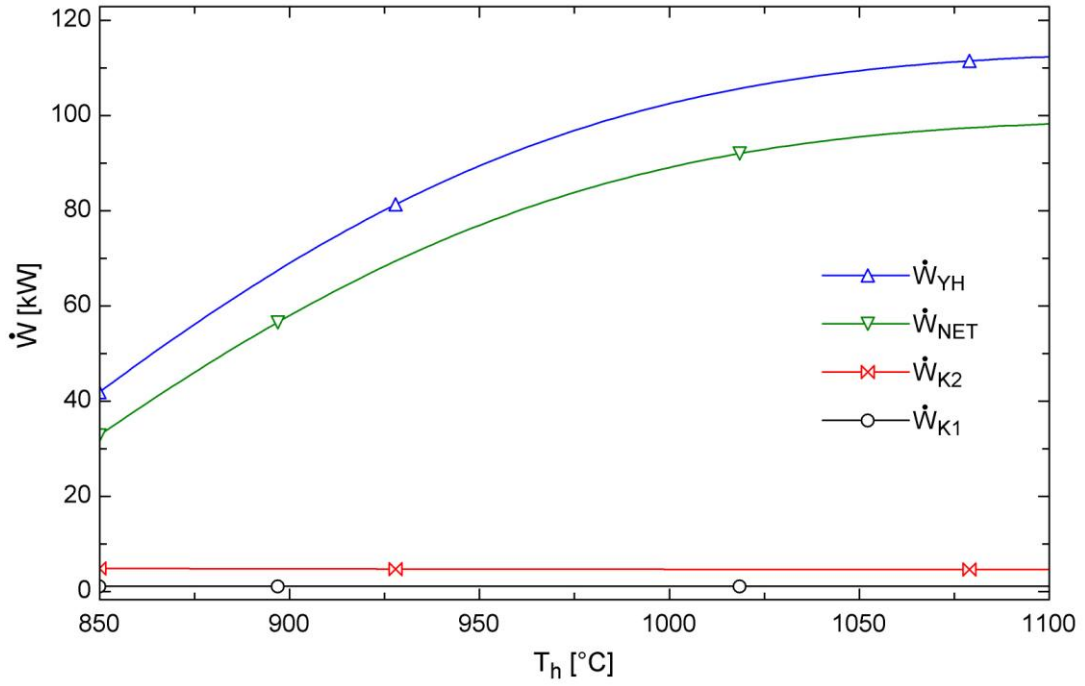
Kompresörlerin harcadığı güç Şekil 4.9’da görüldüğü gibi hücre sıcaklığından pek etkilenmezken, artan hücre sıcaklığıyla birlikte yakıt hücresinden alınan gücün artması sistemin net gücünü artırmaktadır.



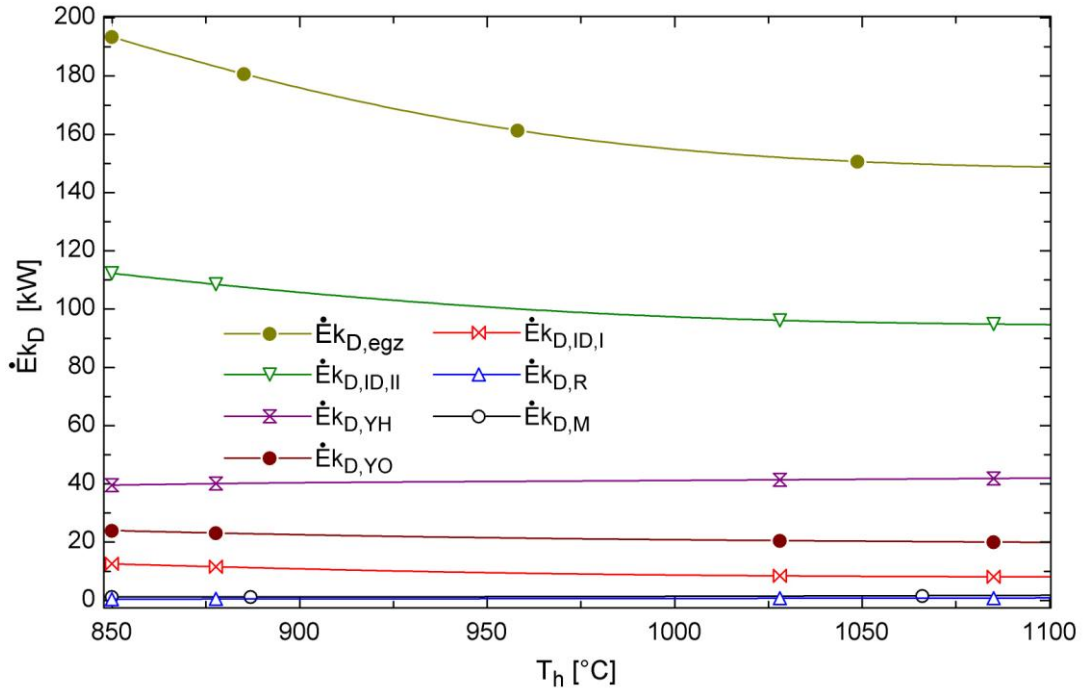
Şekil 4.7 I.Kanun ve ekserji veriminin hücre sıcaklığına göre değişimi



Şekil 4.8 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının hücre sıcaklığına göre değişimi



Şekil 4.9 Yakıt hüresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin hücre sıcaklığına göre değişimi (biyokütle: çim)



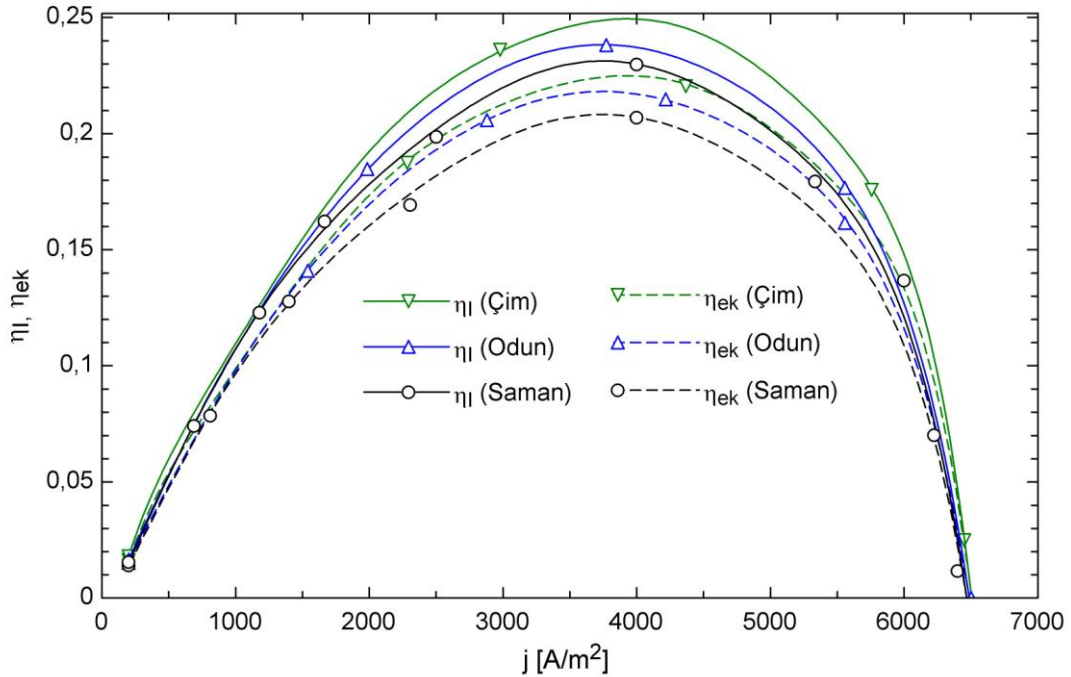
Şekil 4.10 Sistem bileşenlerinin hücre sıcaklığına göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim)

4.3.2 Akım yoğunluğunun etkisi

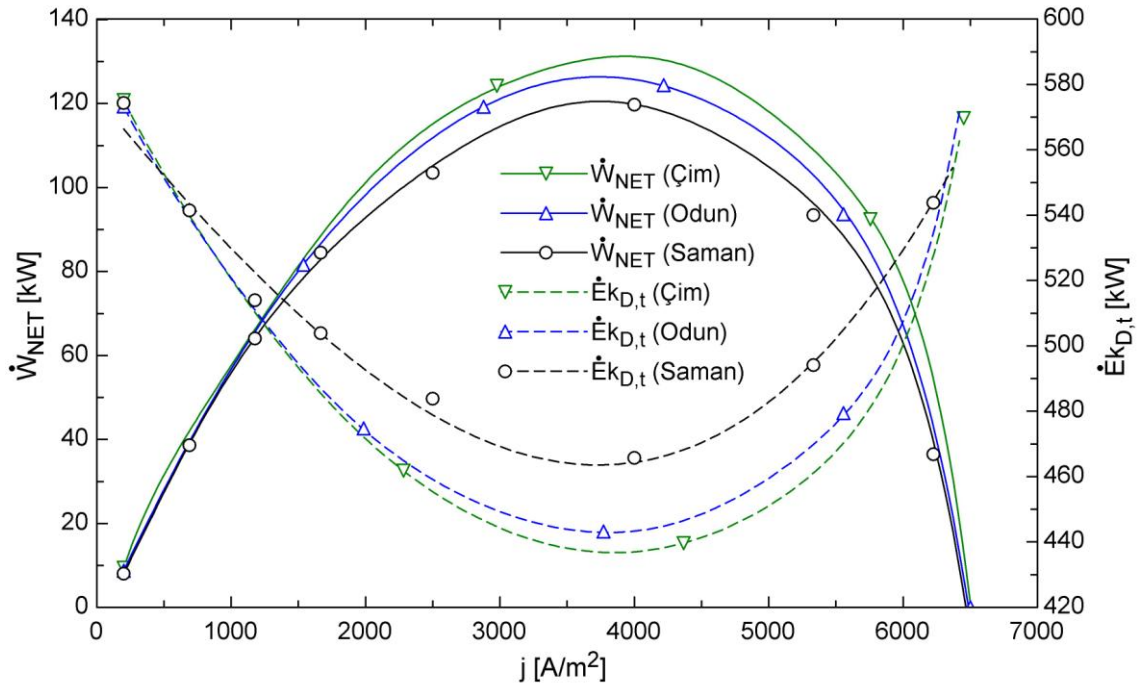
Akım yoğunluğunun, sistemin I.Kanun ve ekserji verimlerine etkisi Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi verim değerleri önce artmakta daha sonra azalarak limit akım yoğunluğu değerinde sıfır olmaktadır. Bunun nedeni yakıt hücresinden alınan gücün ve toplam ekserji kaybının benzer bir davranış göstermesidir (Şekil 4.12).

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi yakıt hücresinden alınan güç belli bir değere kadar (yaklaşık 4000 A/m²) artmakta daha sonra azalarak limit akım yoğunluğu değerinde sıfır olmaktadır. Toplam ekserji kaybı ise limit akım yoğunluğu değerine kadar azalmakta, limit akım yoğunluğundan sonra artmaktadır. Sistem bileşenlerinin akım yoğunluğuna göre ekserji kaybı değişimleri toplam ekserji kaybı ile benzer karakterdedir (Şekil 4.14).

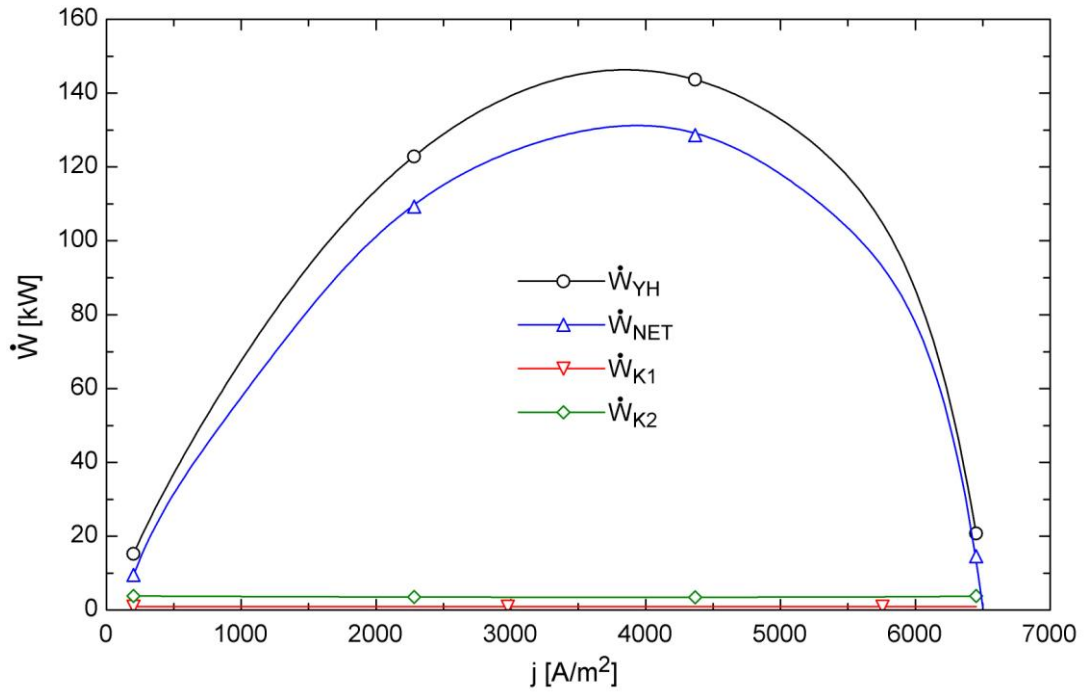
Kompresörlerin harcadığı güç, Şekil 4.13’de görüldüğü gibi akım yoğunluğundan etkilenmemekte, sistemin net gücü ise yakıt hücresinden alınan güç ile benzer bir davranış göstermektedir.



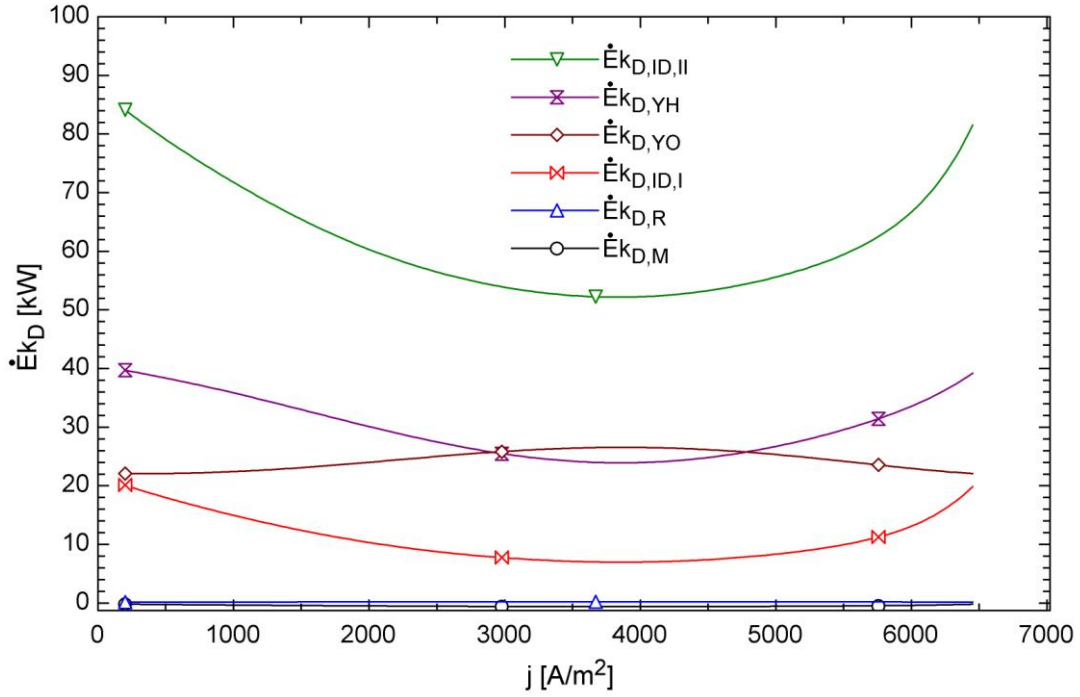
Şekil 4.11 I.Kanun ve ekserji veriminin akım yoğunluğuna göre değişimi



Şekil 4.12 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının akım yoğunluğuna göre değişimi



Şekil 4.13 Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin akım yoğunluğuna göre değişimi (biyokütle: çim)



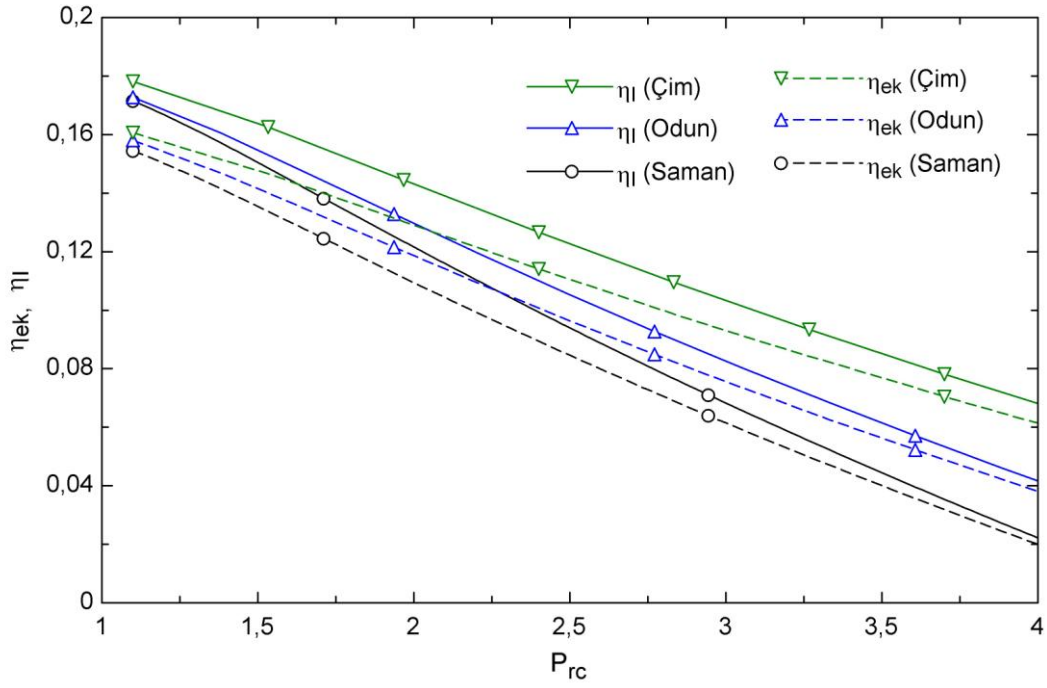
Şekil 4.14 Sistem bileşenlerinin akım yoğunluğuna göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim)

4.3.3 Kompresör basınç oranının etkisi

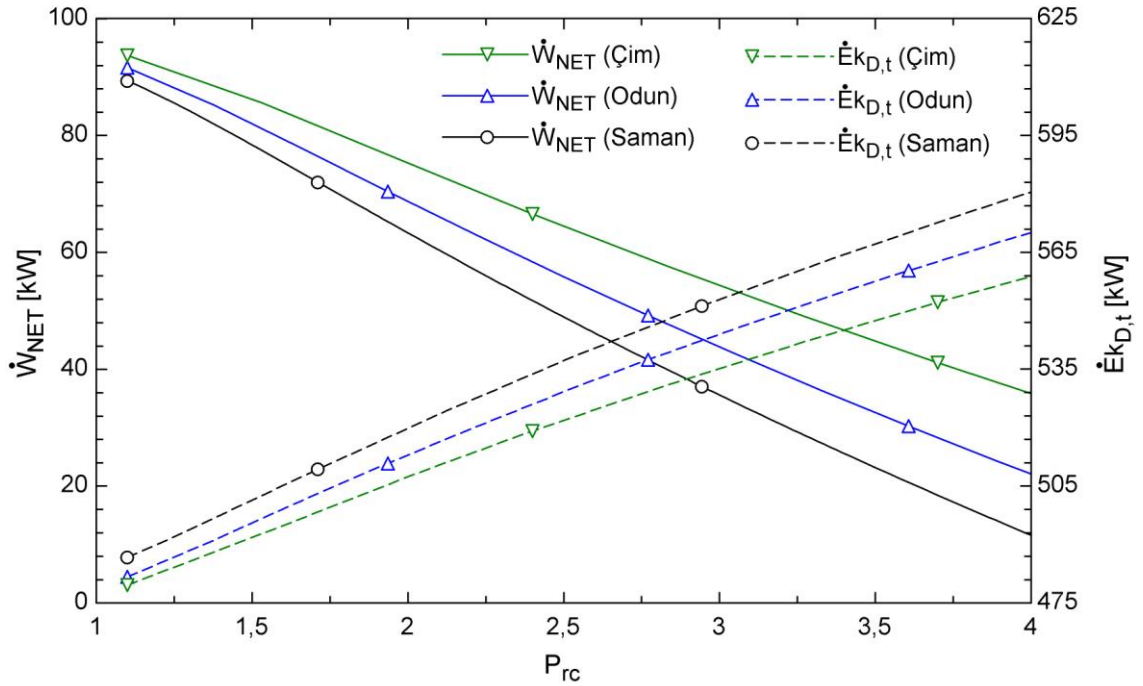
Kompresör basınç oranının sistemin I.Kanun ve ekserji verimlerine etkisi Şekil 4.15’de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi basınç oranının artması verim değerlerini düşürmektedir. Bu durum, basınç oranı artışının sistemin net gücünü düşürmesi bunun yanında toplam ekserji kaybını artırmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.16).

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi sistemin net gücünün düşmesi, basınç oranı arttıkça kompresörlerde harcanan güç artışının, yakıt hücresinden elde edilen güç artışından daha fazla olması nedeniyledir.

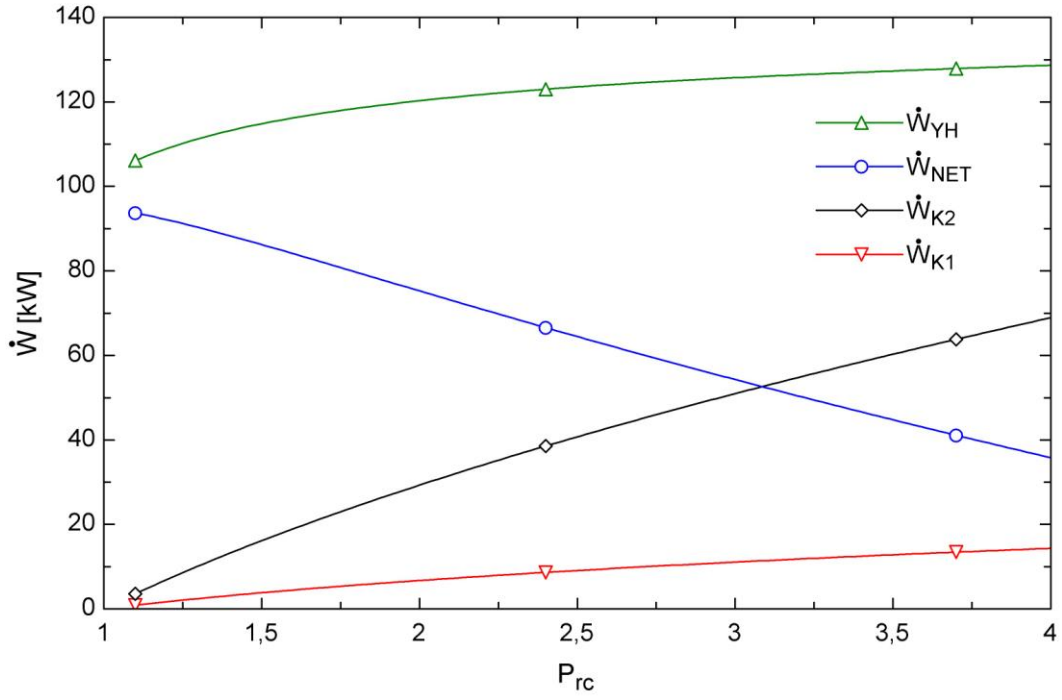
Sistem bileşenlerindeki ekserji kayıplarının kompresör basınç oranıyla değişimi Şekil 4.18’de görülmektedir. Basınç oranındaki artış ile beraber, Isı Değiştirici-2 bileşeninde gerçekleşen ekserji kaybı bir miktar azalırken egzoz gazlarından kaynaklanan ekserji kaybı artmakta, diğer bileşenlerde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Bunun yanında toplam ekserji kaybındaki en büyük payın egzoz gazlarından kaynaklandığı görülmektedir.



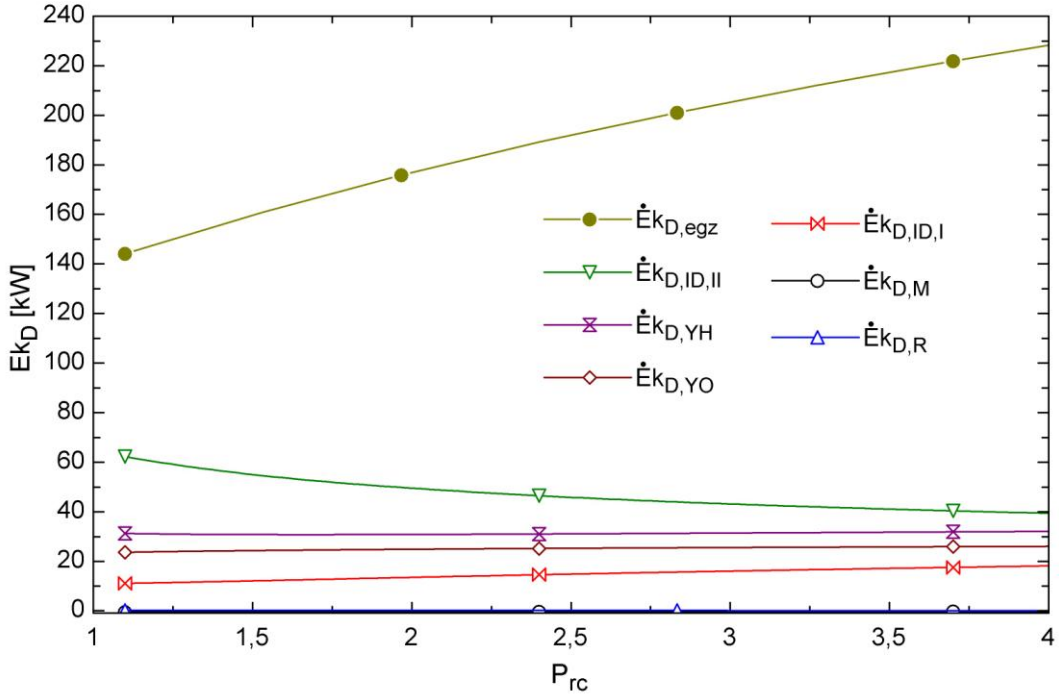
Şekil 4.15 I.Kanun ve ekserji veriminin kompresör basınç oranına göre değişimi



Şekil 4.16 Yakıt hücresinden elde edilen gücün ve toplam ekserji kaybının kompresör basınç oranına göre değişimi



Şekil 4.17 Yakıt hücresinden elde edilen gücün, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin kompresör basınç oranına göre değişimi (biyokütle: çim)



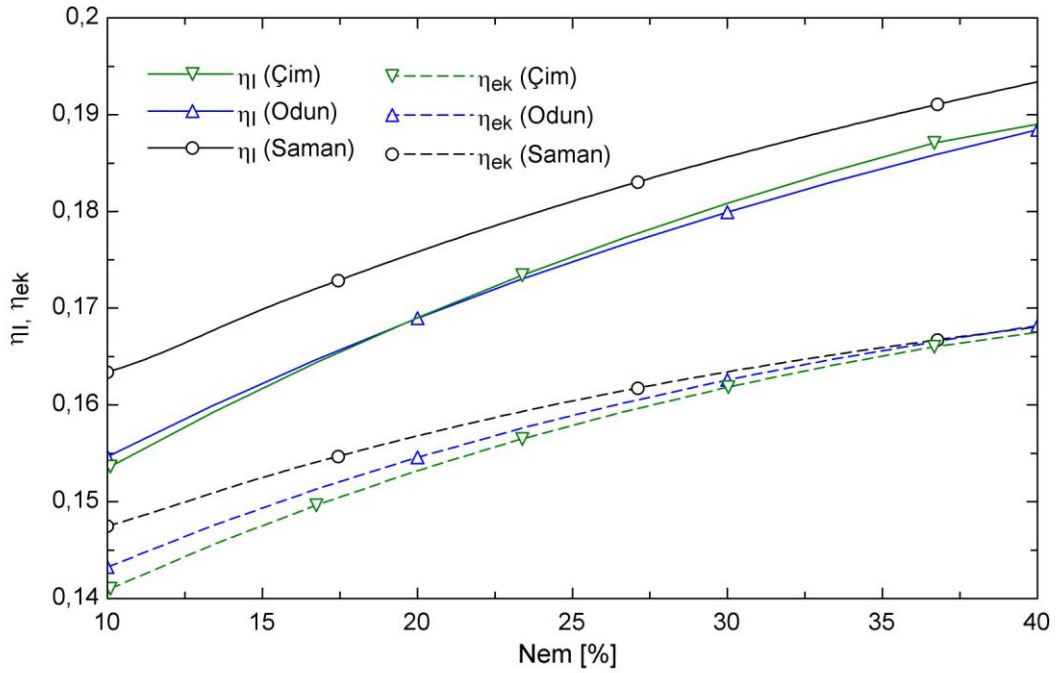
Şekil 4.18 Sistem bileşenlerinin kompresör basınç oranına göre ekserji kaybı değişimleri (biyokütle: çim)

4.3.4 Biyokütle nem oranının etkisi

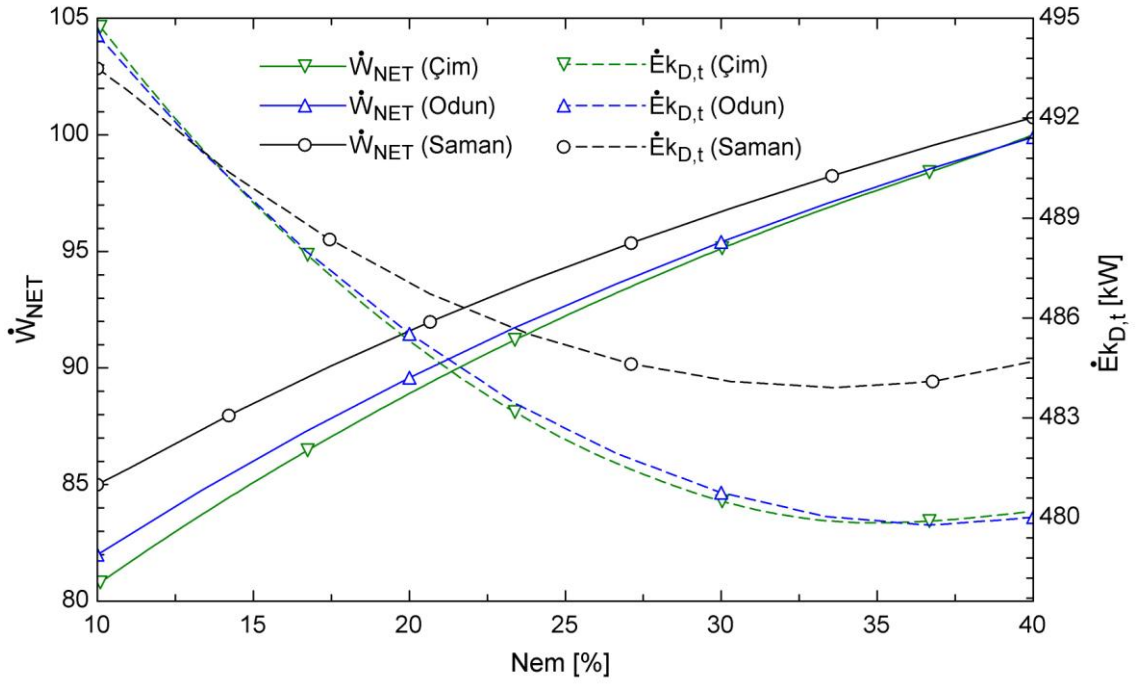
Biyokütle içerisindeki nem oranının sistemin I.Kanun ve ekserji verimlerine etkisi Şekil 4.19'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere biyokütle içerisindeki nem miktarının artması verim değerlerini artırmaktadır. Bu durum, nem miktarı arttıkça sistemden alınan net gücün artması ve ekserji kaybının azalmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.20, 4.22).

Kompresörlerin harcadığı güç, biyokütle nem miktarından etkilenmezken, nem miktarının artışı yakıt hücresinden alınan gücü artırmaktadır. Bunun sonucunda sistemin net gücü artmaktadır (Şekil 4.21).

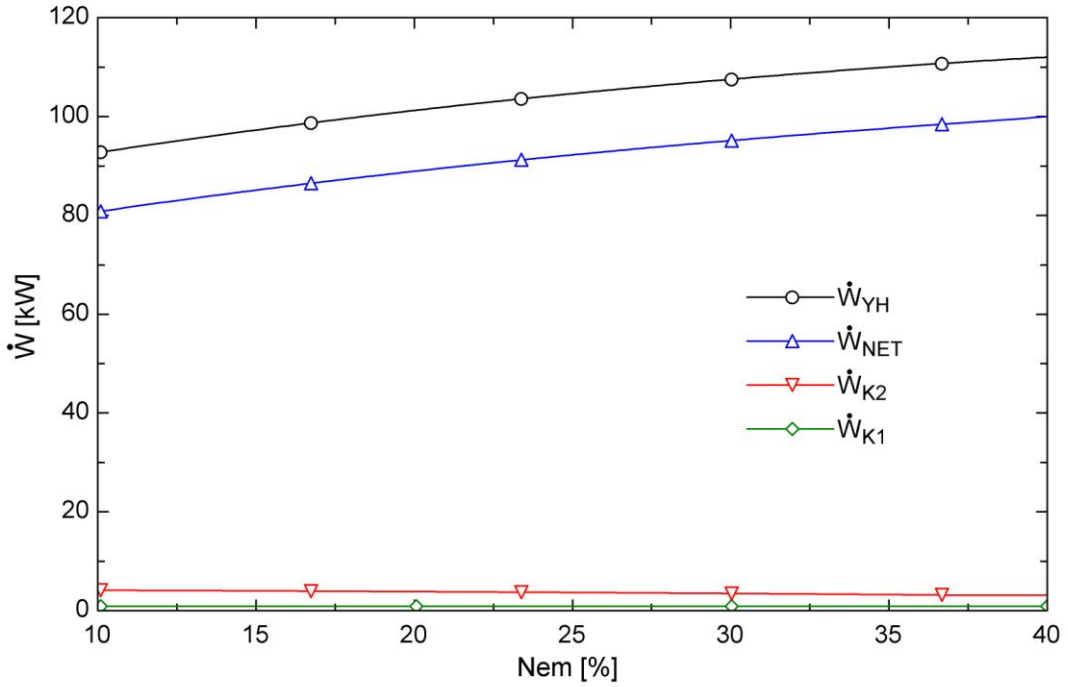
Biyokütle içerisindeki nem oranının sistemin performansını artırması, nem oranı arttıkça gazlaştırmacıda üretilen gaz karışımı içerisindeki hidrojen miktarının artmasıyla açıklanabilir (Şekil 2.11). KOYH'ne giren gaz karışımı içerisindeki hidrojen miktarının artması sistemden alınan gücü artırmakta dolayısıyla sistemin performansı artmaktadır.



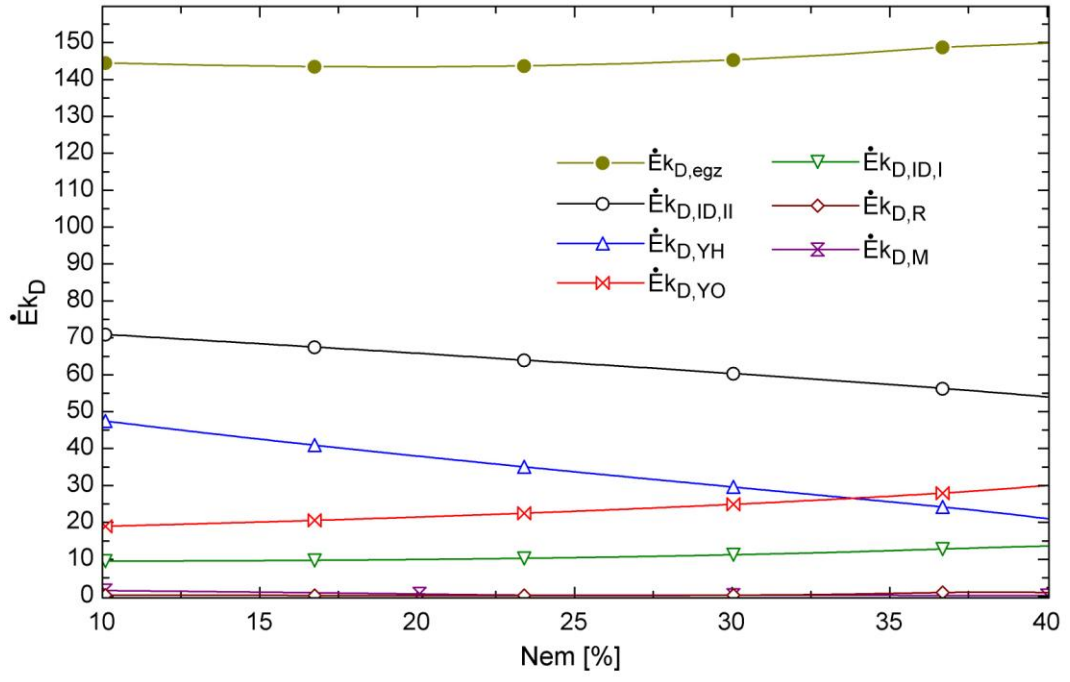
Şekil 4.19 I.Kanun ve ekserji veriminin biyokütle nem oranına göre değişimi



Şekil 4.20 Yakıt hücresinden elde edilen güç ve toplam ekserji kaybının biyokütle nem oranına göre değişimi



Şekil 4.21 Yakıt hücresinden elde edilen güç, sistemin net gücünün ve kompresör güçlerinin biyokütle nem oranına göre değişimi



Şekil 4.22 Sistem bileşenlerinin biyokütle nem oranına göre ekserji kaybı değişimleri

BÖLÜM 5

SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma ile entegre gazlaştırıcı-KOYH sistemi için bir matematiksel model oluşturularak sistemin performansı çeşitli işletme ve tasarım parametreleri açısından üç farklı biyokütle (saman, odun, çim) için incelenmiştir. Sistemi oluşturan bileşenler ayrı ayrı ele alınarak ilgili bölümde çeşitli performans kriterlerine göre analiz edilmiş ve sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar özet olarak tekrar vurgulanmıştır.

Gazlaştırıcı sisteminde biyokütle içerisindeki nem miktarının yüksek olması, enerji (soğuk gaz verimi) ve ekserji verimlerinin düşmesine sebep olduğu, ayrıca yüksek nem miktarının üretilen gaz karışımının ısıl değerini düşürdüğü ve ekserji kaybını artırdığı görülmüştür. Gazlaştırılan biyokütle açısından bakıldığında, enerji ve ekserji verimleri, üretilen gaz karışımının ısıl değeri ve ekserji kaybı açısından en iyi performans değerlerini samanın, en düşük performans değerlerini ise çimin verdiği anlaşılmıştır. Gazlaştırma işleminde kullanılan havanın sisteme giriş sıcaklığı, sistemin performansında önemli bir değişikliği sebep olmamakla birlikte, hava giriş sıcaklığının artması performans değerlerini bir miktar artırmıştır. Öyle ki hava giriş sıcaklığı 20 °C 'den 100 °C 'ye çıkarıldığında sistemin performans değerleri ortalama olarak % 2 - % 3 artmıştır. Gazlaştırma basıncının yüksek olmasının enerji verimini, üretilen gaz karışımının ısıl değerini ve ekserji kaybını düşürürken ekserji verimini artırdığı görülmüştür. Yüksek gazlaştırma sıcaklıklarında performans değerlerinin daha düşük olduğu anlaşılmıştır.

KOYH için bakıldığında; hücre işletme sıcaklığı arttıkça enerji ve ekserji verimleri ile KOYH' den alınan gücün yaklaşık 1100 °C'ye kadar arttığı daha sonra ise sabit kaldığı

görülmüştür. Akım yoğunluğunun 3000 A/m^2 olduğu noktada sistemden alınan güç ile enerji ve ekserji verimlerinin maksimum olduğu anlaşılmıştır. İşletme basıncının artması durumunda performans değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. KOYH'de yakıt olarak kullanılan gaz karışımının elde edildiği biyokütle açısından bakılacak olursa; en yüksek performans değerlerini çimin, en düşük performans değerlerini ise samanın verdiği görülmüştür.

Entegre Gazlaştırıcı-KOYH sisteminde en uygun işletme sıcaklığının yaklaşık $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ olduğu, performans açısından kompresör basınç oranının düşük değerlerde seçilmesi gerektiği, sistemden alınan maksimum gücün ve verimin akım yoğunluğunun 4000 A/m^2 civarlarında olması durumunda alınabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca biyokütle içerisindeki nem miktarının yüksek olmasının performansı olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

Sistemde yakıt olarak kullanılan biyokütlelerin, (saman, odun ve çim) sistemin performansı üzerinde yaklaşık olarak aynı oranda etkili olduğu görülmüştür. Sistemin performansı üzerinde biyokütle cinsinden ziyade biyokütle içerisindeki nem miktarının daha fazla etkili olması, gazlaştırma işleminde ajan olarak hava yerine buhar kullanılması durumunda sistem performansının daha yüksek olacağı öngörülebilir.

- [1] Cordiner S., Feola M., Mulone V. ve Romanelli F. (2007). "Analysis of a SOFC energy generation system fuelled with biomass reformat", *Applied Thermal Engineering*, 27:738-747.
- [2] Akkaya A.V., Şahin B. ve Erdem H.H. (2009). "Thermodynamic model for exergetic performance of a tubular SOFC module", *Renewable Energy*, 34:1863-1870.
- [3] Akkaya A.V., (2007). "Elektrochemical model for performance analysis of a tubular SOFC", *International Journal of Energy Research*, 31:79-98.
- [4] Chan S.H., Khor K.A. ve Xia Z.T., (2001), "A complete polarization model of a solid oxide fuel cell and its sensitivity to the change of cell component thickness", *Journal of Power Sources*, 93: 130-140.
- [5] Sulaiman F.A., Dincer I. ve Hamdullahpur F. (2010). "Exergy analysis of an interated solid oxide fuel cell and organic rankine cycle for cooling, heating and power production", *Journal of Power Sources*, 195:2346-2354.
- [6] Akkaya A.V., (2007). *Katı Oksit Yakıt Hücreli Enerji Üretim Sistemlerinin Alternatif Kriterlere Göre Performans Analizi*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Colpan C.O., Hamdullahpur F., Dincer I. ve Yoo Y., (2010). "Effect of gasification agent on the performance of solid oxide fuel cell and biomass gasification system", *International Journall of Hydrogen Energy*, 35:5001-5009.
- [8] Ptasinski K.J., (2007). "Thermodynamic efficiency of biomass gasification and biofuels conversion", 2:239-253.
- [9] Arnavat Maria P., Bruno Carles Joan ve Coronas Alberto (2010), "Review and analysis of biomass gasification models", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2841-2851
- [10] Zainal ZA., Ali R., Lean CH. ve Seetharamu KN., (2001), "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modelling for different biomass materials", *Energy Conversion & Management*, 42:1499-1515.
- [11] Jayah TH, Aye L, Fuller RJ. ve Stewart DF. (2003), "Computer simulation of adowndraft wood gasifer for tea drying" *Biomass Bioenergy*;25:459-69.

- [12] Altafini Carlos R., Wander Paulo R. ve Barreto Ronaldo M. (2003), "Prediction of the working parameters of a wood waste gasifier through an equilibrium model", *Energy Conversion & Management*, 44:2763-2777.
- [13] Jarungthammachote S. ve Dutta A. (2007), "Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier", *Energy*, 32:1660-1669.
- [14] Melgar A., Perez J.F., Laget H. ve Horillo A., (2007), "Thermochemical equilibrium modelling of gasifying process", *Energy Conversion & Management*, 48:59-67.
- [15] Ptasiniski K.J., Prins M.J. ve Pierik A., (2007). "Exergetic evaluation of biomass gasification", *Energy*, 32:568-574.
- [16] Sharma A.K., (2008). "Equilibrium modeling of global reduction reactions for a downdraft (biomass) gasifier", *Energy Conversion and Management*, 49:832-842.
- [17] Karamarkovic R. ve Karamarkovic V., (2010). "Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures", *Energy*, 35:537-549.
- [18] Guatam G., Adhikari S. ve Bhavnani S., (2010). "Estimation of biomass synthesis gas composition using equilibrium modeling", *Energy&Fuels*, 24:2692-2698.
- [19] Higan C. ve Burgt V. (2007), *Gasification*, Elsevier Science, USA.
- [20] McKendry P., (2002), "Energy production from biomass (part 3): gasification technologies", *Bioresource Thechnology*, 83:55-63.
- [21] Klein A., (2002). *Gasification:An Alternative Process for Energy Recovry and Disposal of Municipal Solid Waste*, M.Sc Thesis, Scholl of Engineering and Applied Science, Columbia.
- [22] Olofsson I., Nordin A. ve Sönderlind U., (2005), "Initial Review and Evaluation of Process Technologies and Systems Suitable for Cost-Efficient Medium-Scale Gasification for Biomass to Liquid Fuels", ISSN 1653-0551 ETPC Report 05-02, *Energy Technology & Thermal Process Chemistry*, University of Umeå, Sweden.
- [23] Olgun H., Doğru M. ve Howard C.R., (1999), "Katı atıkların enerji dönüşümünde kullanılması ve gazlaştırıcılar", IV.Ulusal tesisat mühendisliği kongresi, 4-7 Kasım 1999, İzmir.
- [24] Springvale, <http://www.springvale.biz/course%20notes/week11%20Biomass%20wood%20combustion1/week11.htm> 24.01.2011
- [25] NETL, <http://netl.doe.gov> 24.01.2011
- [26] Çengel ve Boles, (2008), *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik*, Güven Bilimsel, İzmir.
- [27] Kotas T.J, (1995), *The exergy method of thermal plant analysis*, Krieger Publishing Company, Malabar, USA.
- [28] Chan S.H., Low C.F. ve Ding O.L., (2002), "Energy and exergy analysis of simple solid oxide fuel cell power system", *Journal of Power Sources*, 103: 188-200.
- [29] Campanari S., (2001), "Thermodynamic model and parametric analysis of a tubular SOFC module", *Journal of Power Sources*, 92: 26-34.

- [30] Hussain M.M., Li X. ve Dincer I., (2006). "Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cell", *Journal of Power Sources*, 161:1012-1022.
- [31] Colpan C.O., Dincer I. ve Hamdullahpur F., (2007). "Thermodynamic modeling of direct internal reforming solid oxide fuel cells operating with syngas", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:787-795.
- [32] Noren D.A. ve Hoffman M.A., (2005), "Clarifying the Butler–Volmer equation and related approximations for calculating activation losses in solid oxide fuel cell models", *Journal of Power Sources*, 152: 175-181.
- [33] Costamagna P., Selimovic A., Borghi M.D. ve Agnew G., (2004), "Electrochemical model of the integrated planar solid oxide fuel cell (IP-SOFC)", *Chemical Engineering Journal*, 102(1):61-69.
- [34] Nagata S., Momma A., Kato T. ve Kasuga Y., (2001), "Numerical analysis of output characteristics of tubular SOFC with internal reformer", *Journal of Power Sources*, 101: 60-71.
- [35] Ni M., Leung M.,K.H. ve Leung D.Y.C., (2006), "An electrochemical model of a solid oxide steam electrolyzer for hydrogen production", *Chemical Engineering Technology*, 29(5): 636-642.
- [36] Cali M., Santarelli M.G.L. ve Leone P., (2007), "Design of experiments for fitting regression models on the tubular KOFC CHP 100 kWe: Screening test, response surface analysis and optimization", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32: 343-358.
- [37] Zang W., Croiset E., Douglas P.L., Fowler M.W. ve Entchev E., (2005), "Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlus™ unit operation models", *Energy Conversion and Management*, 46: 181-196.
- [38] Athanasiou C., Coutelieris F., Vakouftsi E., Skoulou V., Antonakou E., Marnellos G. ve Zabaniotu A., (2007). "From biomass to electricity through integrated gasification/SOFC system-optimization and energy balance", *International Journal of Hydrogen Energy*, 32:337-342.
- [39] Bejan, A.,Tsatsaronis, G. ve Moran, M., (1995), *Thermal Design and Optimization*, Wiley: New York.
- [40] De Souza-Santos M. (2004), *Solid fuels combustion and gasification. Modeling simulation and equipment operation*, Marcel Dekker Inc., New York.
- [41] Channiwala S.A. ve Parikh P.P. (2002), "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels", *Fuel*, 81:1051-1063.

EES KODLARI

```

Procedure rept (C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T; E18; n18;n18_O2; n18_N2;
n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2; yn7_H2;
yn7_H2O; yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d; r_sc; Prc;
P9; T9;E9;T17;P17;E17;P13;T13;E13; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act; V_conc;
V_ohm; T12;P12; E_Nerst; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo;E10;E12;
n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh;
eta_ek_yo; V_loss)

```

```

repeat

```

```

Call gas ( C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T : n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2;
n2_H2O; n2_N2; n18;n18_O2; n18_N2; E18; r_hy; r_yh; Ex_D; LHV_bm;eta_cg; eta_cg_%; eta_ex;
eta_ex_%; Ex_bm )

```

```

Call fcm (n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2;
yn7_H2; yn7_H2O; yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d;
r_sc : yn5_CO; yn5_CO2; yn5_H2; yn5_H2O; yn5_N2; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act;
V_conc; V_ohm; T12;P12; E_Nerst; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo;E10;E12;
n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh;
eta_ek_yo; V_loss)

```

```

Call komp_2(Prc;n10;n10_O2;n10_N2 : W_k2;T9;P9;E9;Edhk; eta_ek_k2)

```

```

Call
reku_2(P9;P12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T12;T9;n10;n10_N2;n10_
O2; E9; E10; E12 : T10d;T13;P13;E13;Edrekuh; eta_ek_rekuh)

```

```

Call komp_1(Prc;n18;n18_O2;n18_N2 : Wk_1;T17;P17;E17;Edk_1; eta_ek_k1)

```

```

CALL
reku_1(P17;P13;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T13;T17;n18;n18_N2;n1
8_O2; E17; E18; E13 : T18d;T14;P14;P18;Edreku1; eta_ek_reku1;E14)

```

```

dx1:=ABS(yn7_CO-yn5_CO)

```

```

yn7_CO:=yn5_CO
yn7_CO2:=yn5_CO2
yn7_H2:=yn5_H2

```

yn7_H2O:=yn5_H2O
yn7_N2:=yn5_N2

until (dx1<0,00001)
yn7i_CO:=yn7_CO
yn7i_CO2:=yn7_CO2
yn7i_H2:=yn7_H2
yn7i_H2O:=yn7_H2O
yn7i_N2:=yn7_N2

repeat

Call gas (C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T : n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2;
n2_H2O; n2_N2; n18;n18_O2; n18_N2; E18; r_hy; r_yh; Ex_D; LHV_bm;eta_cg; eta_cg_%; eta_ex;
eta_ex_%; Ex_bm)

Call fcm (n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2;
yn7_H2; yn7_H2O; yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d;
r_sc : yn5_CO; yn5_CO2; yn5_H2; yn5_H2O; yn5_N2; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act;
V_conc; V_ohm; T12;P12; E_Nerst; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo;E10;E12;
n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh;
eta_ek_yo; V_loss)

Call komp_2(Prc;n10;n10_O2;n10_N2 : W_k2;T9;P9;E9;Edhk; eta_ek_k2)

Call

reku_2(P9;P12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T12;T9;n10;n10_N2;n10_ O2; E9; E10; E12 : T10d;T13;P13;E13;Edrekuh; eta_ek_rekuh)

Call komp_1(Prc;n18;n18_O2;n18_N2 : Wk_1;T17;P17;E17;Edk_1; eta_ek_k1)

CALL

reku_1(P17;P13;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T13;T17;n18;n18_N2;n1 8_O2; E17; E18; E13 : T18d;T14;P14;P18;Edreku1; eta_ek_reku1;E14)

dx5:=ABS(T10-T10d)

T10=T10d

until (dx5<0,3)

T10i=T10

repeat

Call gas (C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T : n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2;
n2_H2O; n2_N2; n18;n18_O2; n18_N2; E18; r_hy; r_yh; Ex_D; LHV_bm;eta_cg; eta_cg_%; eta_ex;
eta_ex_%; Ex_bm)

Call fcm (n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2;
yn7_H2; yn7_H2O; yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d;
r_sc : yn5_CO; yn5_CO2; yn5_H2; yn5_H2O; yn5_N2; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act;
V_conc; V_ohm; T12;P12; E_Nerst; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo;E10;E12;
n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh;
eta_ek_yo; V_loss)

Call komp_2(Prc;n10;n10_O2;n10_N2 : W_k2;T9;P9;E9;Edhk; eta_ek_k2)

Call

reku_2(P9;P12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T12;T9;n10;n10_N2;n10_ O2; E9; E10; E12 : T10d;T13;P13;E13;Edrekuh; eta_ek_rekuh)

Call komp_1(Prc;n18;n18_O2;n18_N2 : Wk_1;T17;P17;E17;Edk_1; eta_ek_k1)

CALL

reku_1(P17;P13;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T13;T17;n18;n18_N2;n18_O2; E17; E18; E13 : T18d;T14;P14;P18;Edreku1; eta_ek_reku1;E14)

dx6:=ABS(T18-T18d)
T18=T18d
until (dx6<0,3)
T18i=T18
End rpt

"GAZLAŞTIRICI"

Tg=T18
Tg_c=Tg-T_zero#
T_ref=T_zero#+25 [K]
T_c=T-T_zero#
To=T_zero#+25 [K]
P=P18
R_u=R#
r_hy=(n_hava*M_hava)/(n_b*M_bm)
r_yh=1/r_hy
HHV_bm=(0,3491*C+1,1773*H+0,1005*S-0,1034*O-0,0151*N-0,0211*ash)*1000
LHV_bm=(HHV_bm-9*(m_f_H)*2442)*M_bm

n_t_CO2=1
2*n_t_H2O=2*n_t_nem+x
2*n_t_CO2+n_t_H2O=y+n_t_nem+2*m_t
2*n_t_N2=z+2*m_t*3,76
nem_y=nem*100

M_C=MolarMass(C)
M_H=MolarMass(H)
M_O=MolarMass(O)
M_N=MolarMass(N)
M_H2O=MolarMass(H2O)
M_hava=MolarMass(Air)
M_bm=M_C+x*M_H+y*M_O+z*M_N

x=(H*M_C)/(C*M_H)
y=(O*M_C)/(C*M_O)
z=(N*M_C)/(C*M_N)

m_f_C=M_C/M_bm
m_f_H=x*M_H/M_bm
m_f_O=y*M_O/M_bm
m_f_N=z*M_N/M_bm
n_nem=(M_bm*nem)/(M_H2O*(1-nem))
n_t_nem=(M_bm*nem_t)/(M_H2O*(1-nem_t))
n_top_pg=n_H2+n_CO+n_CO2+n_CH4+n_N2

pg_CO=(n_CO/n_top_pg)*100
pg_H2=(n_H2/n_top_pg)*100
pg_CO2=(n_CO2/n_top_pg)*100
pg_CH4=(n_CH4/n_top_pg)*100

$$pg_N2=(n_N2/n_top_pg)*100$$

$$pg_H2O=(n_H2O/n_top)*10$$

$$n_top=n_H2+n_CO+n_CO2+n_H2O+n_CH4+n_N2$$

$$n18=n_hava$$

$$n18_O2=n18*0,21$$

$$n18_N2=n18*0,79$$

$$n2_CH4=n_CH4$$

$$n2_CO=n_CO$$

$$n2_CO2=n_CO2$$

$$n2_H2=n_H2$$

$$n2_H2O=n_H2O$$

$$n2_N2=n_N2$$

$$E18=Ex_hava$$

$$"n_b*(CHxOyNz + n_nem* H2O) + n_hava*(0,21*O2+0,79*N2)----->n_H2*H2 + n_CO*CO + n_CO2*CO2 + n_H2O*H2O + n_CH4*CH4 + n_N2*N2"$$

$$n_CO+n_CO2+n_CH4-n_b=0$$

$$2*n_H2+2*n_H2O+4*n_CH4-n_b*x-2*n_nem*n_b=0$$

$$n_CO+2*n_CO2+n_H2O-n_nem*n_b-2*(n_hava*0,21)-n_b*y=0$$

$$2*n_N2-n_b*z-2*(n_hava*0,79)=0$$

$$P_CO=P*(n_CO/n_top)$$

$$P_H2=P*(n_H2/n_top)$$

$$P_CO2=P*(n_CO2/n_top)$$

$$P_CH4=P*(n_CH4/n_top)$$

$$P_N2=P*(n_N2/n_top)$$

$$P_H2O=P*(n_H2O/n_top)$$

$$h|0_f_H2=Enthalpy(H2;T=T_ref)$$

$$h|0_f_CO=Enthalpy(CO;T=T_ref)$$

$$h|0_f_CO2=Enthalpy(CO2;T=T_ref)$$

$$h|0_f_H2O=Enthalpy(H2O;T=T_ref)$$

$$h|0_f_CH4=Enthalpy(CH4;T=T_ref)$$

$$h|0_f_N2=Enthalpy(N2;T=T_ref)$$

$$h|0_f_O2=Enthalpy(O2;T=T_ref)$$

$$h|0_f_bm=LHV_bm+n_t_CO2*h|0_f_CO2+n_t_N2*h|0_f_N2+n_t_H2O*h|0_f_H2O$$

$$h_g_H2O= Enthalpy(H2O;T=Tg)$$

$$h_g_N2=Enthalpy(N2;T=Tg)$$

$$h_g_O2=Enthalpy(O2;T=Tg)$$

$$h_H2=Enthalpy(H2;T=T)$$

$$h_CO2=Enthalpy(CO2;T=T)$$

$$h_CO=Enthalpy(CO;T=T)$$

$$h_H2O=Enthalpy(H2O;T=T)$$

$$h_CH4=Enthalpy(CH4;T=T)$$

$$h_N2=Enthalpy(N2;T=T)$$

$$s_H2=Entropy(H2;T=T;P=P_H2)$$

$$s_CO2=Entropy(CO2;T=T;P=P_CO2)$$

$$s_CO=Entropy(CO;T=T;P=P_CO)$$

s_H2O=Entropy(H2O;T=T;P=P_H2O)
s_CH4=Entropy(CH4;T=T;P=P_CH4)

"su-gaz shift reaksiyonu"
"CO + H2O ----> CO2 + H2"
"Metan reaksiyonu"
"C + 2*H2 -----> CH4"

K_1=(n_CO2*n_H2)/(n_CO*n_H2O)
K_2=(n_CH4*n_top)/((n_H2)^2)*(1/P)
DELTA_G_1=-R_u*T*ln(K_1)
DELTA_G_2=-R_u*T*ln(K_2)

DELTA_G_1=(g|o_H2+g|o_CO2-g|o_CO-g|o_H2O)
DELTA_G_2=(g|o_CH4-2*g|o_H2)

g|o_H2=(h_H2-T*s_H2)
g|o_CO2=(h_CO2-T*s_CO2)
g|o_CO=(h_CO-T*s_CO)
g|o_H2O=(h_H2O-T*s_H2O)
g|o_CH4=(h_CH4-T*s_CH4)

h_gir=h_cik
h_gir=n_b*(h|o_f_bm)+n_nem*n_b*(h_g_H2O)+(n_hava*0,21)*(h_g_O2)+(n_hava*0,79)*(h_g_N2)
h_cik=n_H2*(h_H2)+n_CO*(h_CO)+n_CO2*(h_CO2)+n_H2O*(h_H2O)+n_CH4*(h_CH4)+n_N2*(h_N2)

R=R#
ek_O2=3970
ek_N2=720

h_hava=Enthalpy(O2;T=Tg)*0,21+Enthalpy(N2;T=Tg)*0,79
ho_hava=Enthalpy(O2;T=To)*0,21+Enthalpy(N2;T=To)*0,79
s_hava=Entropy(O2;T=Tg;P=P*0,21)*0,21+Entropy(N2;T=Tg;P=P*0,79)*0,79
so_hava=Entropy(O2;T=To;P=P*0,21)*0,21+Entropy(N2;T=To;P=P*0,79)*0,79
Ex_hava_f=n_hava*((h_hava-ho_hava-To*(s_hava-so_hava)))
Ex_hava_k=n_hava*((0,21*ek_O2+0,21*To*R*ln(0,21))+(0,79*ek_N2+0,79*To*R*ln(0,79)))
Ex_hava=Ex_hava_f+Ex_hava_k

Ex_bm=n_b*Phi_dry*((LHV_bm/M_bm)+nem*2442)*M_bm
Ex_bm_mass=Phi_dry*((LHV_bm/M_bm)+nem*2442)
Phi_dry=(1,0438+0,1882*(H/C)-0,2509*(1+0,7256*(H/C))+0,0383*(N/C))/(1-0,3035*(O/C))

y_H2=n_H2/n_top: y_H2O=n_H2O/n_top
y_CO=n_CO/n_top: y_CH4=n_CH4/n_top
y_CO2=n_CO2/n_top: y_N2=n_N2/n_top

ek_H2=238490: ek_H2O=11710
ek_CO= 275430: ek_CH4= 836510
ek_CO2=20140

h_pg=y_H2*(Enthalpy(H2;T=T))+y_CO*(Enthalpy(CO;T=T))+y_CO2*(Enthalpy(CO2;T=T))+y_H2O*(Enthalpy(H2O;T=T))+y_CH4*(Enthalpy(CH4;T=T))+y_N2*(Enthalpy(N2;T=T))

ho_pg=y_H2*(Enthalpy(H2;T=To))+y_CO*(Enthalpy(CO;T=To))+y_CO2*(Enthalpy(CO2;T=To))+y_H2O*(Enthalpy(H2O;T=To))+y_CH4*(Enthalpy(CH4;T=To))+y_N2*(Enthalpy(N2;T=To))

$$s_{pg}=y_{H2}*(Entropy(H2;T=T;P=P*y_{H2}))+y_{CO}*(Entropy(CO;T=T;P=P*y_{CO}))+y_{CO2}*(Entropy(CO2;T=T;P=P*y_{CO2}))+y_{H2O}*(Entropy(H2O;T=T;P=P*y_{H2O}))+y_{CH4}*(Entropy(CH4;T=T;P=P*y_{CH4}))+y_{N2}*(Entropy(N2;T=T;P=P*y_{N2}))$$

$$so_{pg}=y_{H2}*(Entropy(H2;T=To;P=P*y_{H2}))+y_{CO}*(Entropy(CO;T=To;P=P*y_{CO}))+y_{CO2}*(Entropy(CO2;T=To;P=P*y_{CO2}))+y_{H2O}*(Entropy(H2O;T=To;P=P*y_{H2O}))+y_{CH4}*(Entropy(CH4;T=To;P=P*y_{CH4}))+y_{N2}*(Entropy(N2;T=To;P=P*y_{N2}))$$

$$Ex_{pg_f}=n_{top}*(h_{pg}-h_{o_pg}-T_o*(s_{pg}-so_{pg}))$$

$$Ex_{pg_k}=n_{top}*((y_{H2}*ek_{H2}+y_{H2}*T_o*R*\ln(y_{H2}))+((y_{CO}*ek_{CO}+y_{CO}*T_o*R*\ln(y_{CO}))+((y_{CO2}*ek_{CO2}+y_{CO2}*T_o*R*\ln(y_{CO2}))+((y_{H2O}*ek_{H2O}+y_{H2O}*T_o*R*\ln(y_{H2O}))+((y_{CH4}*ek_{CH4}+y_{CH4}*T_o*R*\ln(y_{CH4}))+((y_{N2}*ek_{N2}+y_{N2}*T_o*R*\ln(y_{N2}))))))$$

$$Ex_{pg}=Ex_{pg_f}+Ex_{pg_k}$$

$$Ex_{pg_kg}=Ex_{pg}/M_{bm}$$

$$Ex_D=Ex_{bm}+Ex_{hava}-Ex_{pg}$$

$$Ex_D_{kg}=Ex_D/M_{bm}$$

$$eta_{cg}=E_{pg}/E_{bm}$$

$$E_{pg}=n_{CO}*(h_{0_f_CO}-h_{0_f_CO2})+n_{H2}*(h_{0_f_H2}-h_{0_f_H2O})+n_{CH4}*(h_{0_f_CH4}-h_{0_f_CO2}-h_{0_f_H2O})$$

$$E_{bm}=n_b*LHV_{bm}$$

$$LHV_{pg_kg}=n_b*E_{pg}/M_{bm}$$

$$eta_{ex}=Ex_{pg}/(Ex_{hava}+Ex_{bm})$$

$$eta_{cg}\% = 100*E_{pg}/E_{bm}$$

$$eta_{ex}\% = 100*Ex_{pg}/(Ex_{hava}+Ex_{bm})$$

End gas

“ KOYH (MIKSER-REFORMER-YH-YAKICI)”

SubProgram fcm (n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2; yn7_H2; yn7_H2O; yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d; r_sc : yn5_CO; yn5_CO2; yn5_H2; yn5_H2O; yn5_N2; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act; V_conc; V_ohm; T12;P12; E_Nerst ; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo; E10;E12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh; eta_ek_yo; V_loss)

" MIKSER"

n2=n2_CH4+n2_CO+n2_CO2+n2_H2+n2_H2O+n2_N2
 yn2_H2=n2_H2/n2
 yn2_H2O=n2_H2O/n2
 yn2_CO=n2_CO/n2
 yn2_CO2=n2_CO2/n2
 yn2_CH4=n2_CH4/n2
 yn2_N2=n2_N2/n2
 r_sc=n3_H2O/(n3_CH4+n3_CO)
 n7=n7_H2O/yn7_H2O
 n7_CO=n7*yn7_CO
 n7_CO2=n7*yn7_CO2
 n7_H2=n7*yn7_H2
 n7_N2=n7*yn7_N2
 n7_CH4=n7*yn7_CH4
 n3_CH4=n2_CH4 + n7_CH4
 n3_CO=n2_CO + n7_CO
 n3_CO2=n2_CO2 + n7_CO2

$$\begin{aligned}
n3_H2 &= n2_H2 + n7_H2 \\
n3_H2O &= n2_H2O + n7_H2O \\
n3_N2 &= n2_N2 + n7_N2 \\
n3 &= n3_CH4 + n3_CO + n3_CO2 + n3_H2 + n3_H2O + n3_N2 \\
yn3_H2 &= n3_H2/n3 \\
yn3_H2O &= n3_H2O/n3 \\
yn3_CO &= n3_CO/n3 \\
yn3_CO2 &= n3_CO2/n3 \\
yn3_CH4 &= n3_CH4/n3 \\
yn3_N2 &= n3_N2/n3
\end{aligned}$$

$$H7 = n7_CH4*(ENTHALPY(CH4;T=T7)) + n7_CO*(ENTHALPY(CO;T=T7)) + n7_CO2*(ENTHALPY(CO2;T=T7)) + n7_H2*(ENTHALPY(H2;T=T7)) + n7_H2O*(ENTHALPY(H2O;T=T7)) + n7_N2*(ENTHALPY(N2;T=T7))$$

$$H2 = n2_CH4*(ENTHALPY(CH4;T=T2)) + n2_CO*(ENTHALPY(CO;T=T2)) + n2_CO2*(ENTHALPY(CO2;T=T2)) + n2_H2*(ENTHALPY(H2;T=T2)) + n2_H2O*(ENTHALPY(H2O;T=T2)) + n2_N2*(ENTHALPY(N2;T=T2))$$

$$H3 = n3_CH4*(ENTHALPY(CH4;T=T3)) + n3_CO*(ENTHALPY(CO;T=T3)) + n3_CO2*(ENTHALPY(CO2;T=T3)) + n3_H2*(ENTHALPY(H2;T=T3)) + n3_H2O*(ENTHALPY(H2O;T=T3)) + n3_N2*(ENTHALPY(N2;T=T3))$$

$$H7 + H2 = H3$$

$$\begin{aligned}
ho7 &= yn7_CO*ENTHALPY(CO;T=To) + yn7_CO2*ENTHALPY(CO2;T=To) + yn7_H2*ENTHALPY(H2;T=To) + yn7_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To) + yn7_N2*ENTHALPY(N2;T=To) \\
h_7 &= yn7_CO*ENTHALPY(CO;T=T7) + yn7_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T7) + yn7_H2*ENTHALPY(H2;T=T7) + yn7_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T7) + yn7_N2*ENTHALPY(N2;T=T7) \\
so7 &= yn7_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn7_CO) + yn7_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=Po*yn7_CO2) + yn7_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn7_H2) + yn7_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn7_H2O) + yn7_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn7_N2) \\
s_7 &= yn7_CO*ENTROPY(CO;T=T7;P=P7*yn7_CO) + yn7_CO2*ENTROPY(CO2;T=T7;P=P7*yn7_CO2) + yn7_H2*ENTROPY(H2;T=T7;P=P7*yn7_H2) + yn7_H2O*ENTROPY(H2O;T=T7;P=P7*yn7_H2O) + yn7_N2*ENTROPY(N2;T=T7;P=P7*yn7_N2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E7f &= n7*(h_7 - ho7 - (To)*(s_7 - so7)) \\
E7k &= n7*(yn7_CO*es_CO + (To)*R*yn7_CO*ln(yn7_CO)) + (yn7_CO2*es_CO2 + (To)*R*yn7_CO2*ln(yn7_CO2)) + (yn7_H2*es_H2 + (To)*R*yn7_H2*ln(yn7_H2)) + (yn7_H2O*es_H2O + (To)*R*yn7_H2O*ln(yn7_H2O)) + (yn7_N2*es_N2 + (To)*R*yn7_N2*ln(yn7_N2))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E7 &= E7f + E7k \\
ho2 &= yn2_CH4*ENTHALPY(CH4;T=To) + yn2_CO*ENTHALPY(CO;T=To) + yn2_CO2*ENTHALPY(CO2;T=To) + yn2_H2*ENTHALPY(H2;T=To) + yn2_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To) + yn2_N2*ENTHALPY(N2;T=To) \\
h_2 &= yn2_CH4*ENTHALPY(CH4;T=T2) + yn2_CO*ENTHALPY(CO;T=T2) + yn2_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T2) + yn2_H2*ENTHALPY(H2;T=T2) + yn2_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T2) + yn2_N2*ENTHALPY(N2;T=T2) \\
so2 &= yn2_CH4*ENTROPY(CH4;T=To;P=Po*yn2_CH4) + yn2_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn2_CO) + yn2_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=Po*yn2_CO2) + yn2_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn2_H2) + yn2_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn2_H2O) + yn2_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn2_N2) \\
s_2 &= yn2_CH4*ENTROPY(CH4;T=T2;P=P2*yn2_CH4) + yn2_CO*ENTROPY(CO;T=T2;P=P2*yn2_CO) + yn2_CO2*ENTROPY(CO2;T=T2;P=P2*yn2_CO2) + yn2_H2*ENTROPY(H2;T=T2;P=P2*yn2_H2) + yn2_H2O*ENTROPY(H2O;T=T2;P=P2*yn2_H2O) + yn2_N2*ENTROPY(N2;T=T2;P=P2*yn2_N2) \\
E2f &= n2*(h_2 - ho2 - (To)*(s_2 - so2)) \\
E2k &= n2*((yn2_CH4*es_CH4 + (To)*R*yn2_CH4*ln(yn2_CH4)) + (yn2_CO*es_CO + (To)*R*yn2_CO*ln(yn2_CO)) + (yn2_CO2*es_CO2 + (To)*R*yn2_CO2*ln(yn2_CO2)) + (yn2_H2*es_H2 + (To)*R*yn2_H2*ln(yn2_H2))
\end{aligned}$$

$$+(yn2_H2O*es_H2O+(To)*R*yn2_H2O*\ln(yn2_H2O))+(yn2_N2*es_N2+(To)*R*yn2_N2*\ln(yn2_N2))$$

$$E2=E2f+E2k$$

$$ho3=yn3_CH4*ENTHALPY(CH4;T=To)+yn3_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn3_CO2*ENTHALPY(CO2;T=To)+yn3_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn3_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn3_N2*ENTHALPY(N2;T=To)$$

$$h_3=yn3_CH4*ENTHALPY(CH4;T=T3)+yn3_CO*ENTHALPY(CO;T=T3)+yn3_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T3)+yn3_H2*ENTHALPY(H2;T=T3)+yn3_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T3)+yn3_N2*ENTHALPY(N2;T=T3)$$

$$so3=yn3_CH4*ENTROPY(CH4;T=To;P=Po*yn3_CH4)+yn3_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn3_CO)+yn3_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=Po*yn3_CO2)+yn3_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn3_H2)+yn3_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn3_H2O)+yn3_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn3_N2)$$

$$s_3=yn3_CH4*ENTROPY(CH4;T=T3;P=P3*yn3_CH4)+yn3_CO*ENTROPY(CO;T=T3;P=P3*yn3_CO)+yn3_CO2*ENTROPY(CO2;T=T3;P=P3*yn3_CO2)+yn3_H2*ENTROPY(H2;T=T3;P=P3*yn3_H2)+yn3_H2O*ENTROPY(H2O;T=T3;P=P3*yn3_H2O)+yn3_N2*ENTROPY(N2;T=T3;P=P3*yn3_N2)$$

$$E3f=n3*(h_3-ho3-(To)*(s_3-so3))$$

$$E3k=n3*((yn3_CH4*es_CH4+(To)*R*yn3_CH4*\ln(yn3_CH4))+(yn3_CO*es_CO+(To)*R*yn3_CO*\ln(yn3_CO))+(yn3_CO2*es_CO2+(To)*R*yn3_CO2*\ln(yn3_CO2))+(yn3_H2*es_H2+(To)*R*yn3_H2*\ln(yn3_H2))+(yn3_H2O*es_H2O+(To)*R*yn3_H2O*\ln(yn3_H2O))+(yn3_N2*es_N2+(To)*R*yn3_N2*\ln(yn3_N2)))$$

$$E3=E3f+E3k$$

$$Edmx=E7+E2-E3$$

$$eta_ek_mx=E3/(E2+E7)$$

" PREREFORMING"

$$g_CH4 =ENTHALPY('CH4';T=T4) -(T4)*(Entropy ('CH4' ; T=T4; P=P4))$$

$$g_H2O =(ENTHALPY('H2O';T=T4) -(T4)*(Entropy ('H2O' ; T=T4; P= P4))$$

$$g_H2 =(ENTHALPY('H2';T=T4) -(T4)*(Entropy ('H2' ; T=T4; P= P4))$$

$$g_CO2 =(ENTHALPY('CO2';T=T4) -(T4)*(Entropy ('CO2' ; T=T4; P=P4))$$

$$g_CO =(ENTHALPY('CO';T=T4) -(T4)*(Entropy ('CO' ; T=T4; P= P4))$$

$$DELTA G|o_1r= 3*g_H2 + g_CO - g_CH4 - g_H2O$$

$$DELTA G|o_2r= g_H2 + g_CO2 - g_CO - g_H2O$$

$$Kr=\exp(-DELTA G|o_1r/(R*(T4)))$$

$$Ks=\exp(-DELTA G|o_2r/(R*(T4)))$$

$$Kr=(((n3_H2 +3*Xr + Yr)/(n3 +2*Xr))^3)*((n3_CO+Xr-Yr)/(n3 +2*Xr)) / (((n3_CH4-Xr)/(n3 +2*Xr))*((n3_H2O-Xr-Yr)/(n3 +2*Xr))*P3^2$$

$$Ks= (((n3_H2+3*Xr+Yr)/(n3 +2*Xr))*((n3_CO2+Yr)/(n3 +2*Xr)) / (((n3_CO+Xr-Yr)/(n3 +2*Xr))*((n3_H2O-Xr-Yr)/(n3 +2*Xr)))$$

$$n4_CH4= n3_CH4 - Xr$$

$$n4_CO= n3_CO +Xr - Yr$$

$$n4_CO2 = n3_CO2 + Yr$$

$$n4_H2 = n3_H2 + 3*Xr + Yr$$

$$n4_H2O = n3_H2O - Xr - Yr$$

$$n4_N2=n3_N2$$

$$n4=n4_CH4+ n4_CO + n4_CO2 + n4_H2 +n4_H2O+n4_N2$$

$$yn4_H2=n4_H2/n4$$

$$yn4_H2O=n4_H2O/n4$$

$$yn4_CO=n4_CO/n4$$

$$yn4_CO2=n4_CO2/n4$$

$$yn4_CH4=n4_CH4/n4$$

$$yn4_N2=n4_N2/n4$$

H4=H3
 Edpr=E3-E4
 eta_ek_pr=E4/E3

" YAKIT HUCRESI "

g5_H2O =(ENTHALPY('H2O';T=T5)) -(T5)*(Entropy ('H2O' ; T=T5; P= P5))
 g5_H2 =(ENTHALPY('H2';T=T5)) -(T5)*(Entropy ('H2' ; T=T5; P= P5))
 g5_CO2 =(ENTHALPY('CO2';T=T5)) -(T5)*(Entropy ('CO2' ; T=T5; P= P5))
 g5_CO =(ENTHALPY('CO';T=T5)) -(T5)*(Entropy ('CO' ; T=T5; P= P5))

DELTA_go_2ir= g5_H2 + g5_CO2 - g5_CO - g5_H2O
 Kis=exp(-DELTA_go_2ir/(R*(T5)))
 Kis= (((n4_H2+3*Xir+Yir -Z)/(n4 +2*Xir))*((n4_CO2+Yir)/(n4 +2*Xir))) / (((n4_CO+Xir-Yir)/(n4 +2*Xir))*((n4_H2O-Xir-Yir +Z)/(n4 +2*Xir)))
 Z= Uf* (n4_H2 + 4*n4_CH4+ n4_CO)
 Xir=n4_CH4
 n5_CH4= n4_CH4 - Xir
 n5_CO= n4_CO +Xir - Yir
 n5_CO2 = n4_CO2 + Yir
 n5_H2 = n4_H2 + 3*Xir + Yir - Z
 n5_H2O = n4_H2O - Xir - Yir + Z
 n5_N2=n4_N2
 n5=n5_CH4+ n5_CO + n5_CO2 + n5_H2 +n5_H2O+n5_N2
 yn5_CO=n5_CO/n5
 yn5_CO2=n5_CO2/n5
 yn5_H2=n5_H2/n5
 yn5_H2O=n5_H2O/n5
 yn5_N2=n5_N2/n5

F=F# : n_e=2 : P|o =1,013 : n=1 : beta = 0,5

h5_H2O = (Enthalpy ('H2O' ; T =Tc))
 h5_H2 = (Enthalpy ('H2' ; T =Tc))
 h5_O2 = (Enthalpy('O2' ; T =Tc))

s5_H2O = (Entropy ('H2O' ; T=Tc; P= P|o))
 s5_O2 = (Entropy ('O2' ; T=Tc; P= P|o))
 s5_H2 = (Entropy ('H2' ; T=Tc; P= P|o))

go_H2O = h5_H2O - (Tc) * s5_H2O
 go_O2 = h5_O2 - (Tc) * s5_O2
 go_H2 = h5_H2 - (Tc) * s5_H2

DELTA_go = go_H2O - go_H2 - 0,5 * go_O2
 E|o = -DELTA_go / (n_e * F)
 I_c = i_d * A|

K_p1= (yn4_H2O / (yn4_H2 * sqrt(yn10_O2))) * sqrt(1 / P4)
 K_p2= (yn5_H2O / (yn5_H2 * sqrt(yn11_O2))) * sqrt(1 / P5)
 K_p=(K_p1+K_p2)/2

E_Nerst = E|o - ((R * (Tc)) / (n_e * F)) * ln(K_p)

n10_O2= Z/ (2 * U_a)
 n10_N2=n10_O2*3,76

$n11_O2 = n10_O2 - z / 2$
 $n11_N2 = n10_N2$
 $n11 = n11_O2 + n11_N2$
 $yn11_O2 = n11_O2 / n11$
 $yn11_N2 = n11_N2 / n11$
 $n10 = n10_O2 + n10_N2$
 $yn10_O2 = n10_O2 / n10$
 $yn10_N2 = n10_N2 / n10$

$V = E_Nerst - V_loss$

$Wyh = V * I_c$
 $Wyh_ac = Wyh * 0,925$
 $eta_ac_yh = (Wyh_ac) / (n2_CH4 * lhv_CH4 + n2_CO * lhv_CO + n2_H2 * lhv_H2)$
 $lhv_CH4 = 890360$ [kJ/kmol]
 $lhv_CO = 282990$ [kJ/kmol]
 $lhv_H2 = 285840$ [kJ/kmol]

$T7 = T5$
 $H5 = n5_CH4 * (ENTHALPY('CH4'; T=T5)) + n5_CO * (ENTHALPY('CO'; T=T5)) + n5_CO2 * (ENTHALPY('CO2'; T=T5)) + n5_H2 * (ENTHALPY('H2'; T=T5)) + n5_H2O * (ENTHALPY('H2O'; T=T5)) + n5_N2 * (ENTHALPY('N2'; T=T5))$
 $H11 = n11_N2 * (ENTHALPY('N2'; T=T11)) + n11_O2 * (ENTHALPY('O2'; T=T11))$
 $H10 = n10_N2 * (ENTHALPY('N2'; T=T10)) + n10_O2 * (ENTHALPY('O2'; T=T10))$
 $H4 + H10 = H5 + H11 + Wyh$
 $H4 = n4_CH4 * (ENTHALPY('CH4'; T=T4)) + n4_CO * (ENTHALPY('CO'; T=T4)) + n4_CO2 * (ENTHALPY('CO2'; T=T4)) + n4_H2 * (ENTHALPY('H2'; T=T4)) + n4_H2O * (ENTHALPY('H2O'; T=T4)) + n4_N2 * (ENTHALPY('N2'; T=T4))$

$R = R\# : es_O2 = 3970 : es_N2 = 720 : es_H2 = 238490 : es_H2O = 11710 : es_CO = 275430 :$
 $es_CO2 = 20140 : es_CH4 = 836510$

$ho10 = yn10_N2 * ENTHALPY(N2; T=To) + yn10_O2 * ENTHALPY(O2; T=To)$
 $h_10 = yn10_N2 * ENTHALPY(N2; T=T10) + yn10_O2 * ENTHALPY(O2; T=T10)$
 $s_10 = yn10_N2 * ENTROPY(N2; T=T10; P=P10 * yn10_N2) + yn10_O2 * ENTROPY(O2; T=T10; P=P10 * yn10_O2)$
 $so10 = yn10_N2 * ENTROPY(N2; T=To; P=Po * yn10_N2) + yn10_O2 * ENTROPY(O2; T=To; P=Po * yn10_O2)$
 $E10f = n10 * (h_10 - ho10 - (To) * (s_10 - so10))$
 $E10k = n10 * ((yn10_O2 * es_O2 + (To) * R * yn10_O2 * ln(yn10_O2)) + (yn10_N2 * es_N2 + (To) * R * yn10_N2 * ln(yn10_N2)))$
 $E10 = E10f + E10k$

$ho4 = yn4_CH4 * ENTHALPY(CH4; T=To) + yn4_CO * ENTHALPY(CO; T=To) + yn4_CO2 * ENTHALPY(CO2; T=To) + yn4_H2 * ENTHALPY(H2; T=To) + yn4_H2O * ENTHALPY(H2O; T=To) + yn4_N2 * ENTHALPY(N2; T=To)$
 $h_4 = yn4_CH4 * ENTHALPY(CH4; T=T4) + yn4_CO * ENTHALPY(CO; T=T4) + yn4_CO2 * ENTHALPY(CO2; T=T4) + yn4_H2 * ENTHALPY(H2; T=T4) + yn4_H2O * ENTHALPY(H2O; T=T4) + yn4_N2 * ENTHALPY(N2; T=T4)$
 $so4 = yn4_CH4 * ENTROPY(CH4; T=To; P=Po * yn4_CH4) + yn4_CO * ENTROPY(CO; T=To; P=Po * yn4_CO) + yn4_CO2 * ENTROPY(CO2; T=To; P=Po * yn4_CO2) + yn4_H2 * ENTROPY(H2; T=To; P=Po * yn4_H2) + yn4_H2O * ENTROPY(H2O; T=To; P=Po * yn4_H2O) + yn4_N2 * ENTROPY(N2; T=To; P=Po * yn4_N2)$
 $s_4 = yn4_CH4 * ENTROPY(CH4; T=T4; P=P4 * yn4_CH4) + yn4_CO * ENTROPY(CO; T=T4; P=P4 * yn4_CO) + yn4_CO2 * ENTROPY(CO2; T=T4; P=P4 * yn4_CO2) + yn4_H2 * ENTROPY(H2; T=T4; P=P4 * yn4_H2) + yn4_H2O * ENTROPY(H2O; T=T4; P=P4 * yn4_H2O) + yn4_N2 * ENTROPY(N2; T=T4; P=P4 * yn4_N2)$

$E4f = n4 * (h_4 - ho4 - (To) * (s_4 - so4))$

$$E4k=n4*((yn4_CH4*es_CH4+(To)*R*yn4_CH4*\ln(yn4_CH4))+(yn4_CO*es_CO+(To)*R*yn4_CO*\ln(yn4_CO))+(yn4_CO2*es_CO2+(To)*R*yn4_CO2*\ln(yn4_CO2))+(yn4_H2*es_H2+(To)*R*yn4_H2*\ln(yn4_H2))+(yn4_H2O*es_H2O+(To)*R*yn4_H2O*\ln(yn4_H2O))+(yn4_N2*es_N2+(To)*R*yn4_N2*\ln(yn4_N2)))$$

$$E4=E4f+E4k$$

$$ho11=yn11_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn11_O2*ENTHALPY(O2;T=To)$$

$$so11=yn11_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn11_N2)+yn11_O2*ENTROPY(O2;T=To;P=Po*yn11_O2)$$

$$h_11=yn11_N2*ENTHALPY(N2;T=T11)+yn11_O2*ENTHALPY(O2;T=T11)$$

$$s_11=yn11_N2*ENTROPY(N2;T=T11;P=P11*yn11_N2)+yn11_O2*ENTROPY(O2;T=T11;P=P11*yn11_O2)$$

$$E11f=n11*(h_11-ho11-(To)*(s_11-so11))$$

$$E11k=n11*((yn11_O2*es_O2+(To)*R*yn11_O2*\ln(yn11_O2))+(yn11_N2*es_N2+(To)*R*yn11_N2*\ln(yn11_N2)))$$

$$E11=E11f+E11k$$

$$ho5= yn5_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn5_CO2*$$

$$ENTHALPY(CO2;T=To)+yn5_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn5_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn5_N2*ENTHALPY(N2;T=To)$$

$$h_5= yn5_CO*ENTHALPY(CO;T=T5)+yn5_CO2*$$

$$ENTHALPY(CO2;T=T5)+yn5_H2*ENTHALPY(H2;T=T5)+yn5_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T5)+yn5_N2*ENTHALPY(N2;T=T5)$$

$$so5=yn5_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn5_CO)+yn5_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=Po*yn5_CO2)+yn5_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn5_H2)+yn5_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn5_H2O)+yn5_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn5_N2)$$

$$s_5=yn5_CO*ENTROPY(CO;T=T5;P=P5*yn5_CO)+yn5_CO2*ENTROPY(CO2;T=T5;P=P5*yn5_CO2)+yn5_H2*ENTROPY(H2;T=T5;P=P5*yn5_H2)+yn5_H2O*ENTROPY(H2O;T=T5;P=P5*yn5_H2O)+yn5_N2*ENTROPY(N2;T=T5;P=P5*yn5_N2)$$

$$E5f=n5*(h_5-ho5-(To)*(s_5-so5))$$

$$E5k=n5*((yn5_CO*es_CO+(To)*R*yn5_CO*\ln(yn5_CO))+(yn5_CO2*es_CO2+(To)*R*yn5_CO2*\ln(yn5_CO2))+(yn5_H2*es_H2+(To)*R*yn5_H2*\ln(yn5_H2))+(yn5_H2O*es_H2O+(To)*R*yn5_H2O*\ln(yn5_H2O))+(yn5_N2*es_N2+(To)*R*yn5_N2*\ln(yn5_N2)))$$

$$E5=E5f+E5k$$

$$Edyh=E4+E10-E11-E5-Wyh_ac$$

$$eta_ek_yh=Wyh/(E4+E10-E11-E5)$$

"YANMA ODASI"

$$zc=n6_H2*0,99$$

$$yc=n6_CO*0,99$$

$$P6=P5$$

$$P12=P11*(1-0,03)$$

$$n6_H2=n5_H2-n7_H2$$

$$n6_H2O=n5_H2O-n7_H2O$$

$$n6_CO=n5_CO-n7_CO$$

$$n6_CO2=n5_CO2-n7_CO2$$

$$n6_N2=n5_N2-n7_N2$$

$$n6=n6_H2+n6_H2O+n6_CO+n6_CO2+n6_N2$$

$$yn6_H2=n6_H2/n6$$

$$yn6_H2O=n6_H2O/n6$$

$$yn6_CO=n6_CO/n6$$

$$yn6_CO2=n6_CO2/n6$$

$$yn6_N2=n6_N2/n6$$

$n12_H2=n6_H2 - zc$
 $n12_H2O =n6_H2O +zc$
 $n12_CO =n6_CO -yc$
 $n12_CO2 =n6_CO2 + yc$
 $n12_O2=n11_O2 -zc/2 - yc/2$
 $n12_N2=n11_N2+n6_N2$
 $n12=n12_H2+n12_H2O+n12_CO+n12_CO2+n12_O2+n12_N2$
 $yn12_H2=n12_H2/n12$
 $yn12_H2O=n12_H2O/n12$
 $yn12_CO=n12_CO/n12$
 $yn12_CO2=n12_CO2/n12$
 $yn12_O2=n12_O2/n12$
 $yn12_N2=n12_N2/n12$

$T6=T5$

$H6=n6_CO*(ENTHALPY('CO';T=T6))+n6_CO2*$
 $(ENTHALPY('CO2';T=T6))+n6_H2*(ENTHALPY('H2';T=T6))+n6_H2O*(ENTHALPY('H2O';T=T6))+$
 $n6_N2*(ENTHALPY('N2';T=T6))$
 $H12=n12_CO*(ENTHALPY('CO';T=T12))+n12_CO2*$
 $(ENTHALPY('CO2';T=T12))+n12_H2*(ENTHALPY('H2';T=T12))+n12_H2O*(ENTHALPY('H2O';T=$
 $T12))+n12_N2*(ENTHALPY('N2';T=T12))+n12_O2*(ENTHALPY('O2';T=T12))$
 $H11+H6=H12$

$ho6=yn6_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn6_CO2*$
 $ENTHALPY(CO2;T=To)+yn6_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn6_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn6_N2*ENTHALPY(N2;T=To)$

$h_6=yn6_CO*ENTHALPY(CO;T=T6)+yn6_CO2*$
 $ENTHALPY(CO2;T=T6)+yn6_H2*ENTHALPY(H2;T=T6)+yn6_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T6)+yn6_N2*ENTHALPY(N2;T=T6)$

$so6=yn6_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn6_CO)+yn6_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=Po*y$
 $n6_CO2)+yn6_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn6_H2)+yn6_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn6$
 $_H2O)+yn6_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn6_N2)$

$s_6=yn6_CO*ENTROPY(CO;T=T6;P=P6*yn6_CO)+yn6_CO2*ENTROPY(CO2;T=T6;P=P6*y$
 $n6_CO2)+yn6_H2*ENTROPY(H2;T=T6;P=P6*yn6_H2)+yn6_H2O*ENTROPY(H2O;T=T6;P=P6*yn6$
 $_H2O)+yn6_N2*ENTROPY(N2;T=T6;P=P6*yn6_N2)$

$E6f=n6*(h_6-ho6-(To))*(s_6-so6)$

$E6k=n6*((yn6_CO*es_CO+(To)*R*yn6_CO*ln(yn6_CO))+yn6_CO2*es_CO2+(To)*R*yn6_CO2*ln($
 $yn6_CO2))+yn6_H2*es_H2+(To)*R*yn6_H2*ln(yn6_H2))$
 $+(yn6_H2O*es_H2O+(To)*R*yn6_H2O*ln(yn6_H2O))+yn6_N2*es_N2+(To)*R*yn6_N2*ln(yn6_N2$
 $))$

$E6=E6f+E6k$

$ho12=yn12_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn12_CO2*$
 $ENTHALPY(CO2;T=To)+yn12_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn12_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn$
 $12_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn12_O2*ENTHALPY(O2;T=To)$

$h_12=yn12_CO*ENTHALPY(CO;T=T12)+yn12_CO2*$
 $ENTHALPY(CO2;T=T12)+yn12_H2*ENTHALPY(H2;T=T12)+yn12_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T12)$
 $+yn12_N2*ENTHALPY(N2;T=T12)+yn12_O2*ENTHALPY(O2;T=T12)$

$so12=yn12_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn12_CO)+yn12_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;P=$
 $Po*yn12_CO2)+yn12_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn12_H2)+yn12_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;$
 $P=Po*yn12_H2O)+yn12_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn12_N2)+yn12_O2*ENTROPY(O2;T=To;P$
 $=Po*yn12_O2)$

$s_12=yn12_CO*ENTROPY(CO;T=T12;P=P12*yn12_CO)+yn12_CO2*ENTROPY(CO2;T=T12$
 $;P=P12*yn12_CO2)+yn12_H2*ENTROPY(H2;T=T12;P=P12*yn12_H2)+yn12_H2O*ENTROPY(H2O;$
 $T=T12;P=P12*yn12_H2O)+yn12_N2*ENTROPY(N2;T=T12;P=P12*yn12_N2)+yn12_O2*ENTROPY(O$
 $2;T=T12;P=P12*yn12_O2)$

$E12f=n12*(h_12-ho12-(To))*(s_12-so12)$

```

E12k=n12*((yn12_CO*es_CO+(To)*R*yn12_CO*ln(yn12_CO)))+(yn12_CO2*es_CO2+(To)*R*yn12_CO2*ln(yn12_CO2)))+(yn12_H2*es_H2+(To)*R*yn12_H2*ln(yn12_H2))
+(yn12_H2O*es_H2O+(To)*R*yn12_H2O*ln(yn12_H2O)))+(yn12_N2*es_N2+(To)*R*yn12_N2*ln(yn12_N2)))+(yn12_O2*es_O2+(To)*R*yn12_O2*ln(yn12_O2))
E12=E12f+E12k
Edyo=E11+E6-E12
eta_ek_yo=E12/(E11+E6)
End fcm

```

"KOMPRESOR 2"

```

SUBPROGRAM komp_2(Prc;n10;n10_O2;n10_N2 : W_k2;T9;P9;E9;Edhk; eta_ek_k2)

```

```

T8=T_zero#+25
n8=n10
n8_O2=n10_O2
n8_N2 =n10_N2
n9=n8
n9_O2=n8_O2
n9_N2 =n8_N2
yn9_N2 =n9_N2/n9
yn8_N2 =n8_N2/n8
yn9_O2 =n9_O2/n9
yn8_O2 =n8_O2/n8
P8=Po#
P9=P8*Prc
h8=yn8_N2*ENTHALPY(N2;T=T8)+yn8_O2*ENTHALPY(O2;T=T8)
s8=yn8_N2*ENTROPY(N2;T=T8;P=P8*yn8_N2)+yn8_O2*ENTROPY(O2;T=T8;P=P8*yn8_O2)
s9s=yn9_N2*ENTROPY(N2;T=T9s;P=P9*yn9_N2)+yn9_O2*ENTROPY(O2;T=T9s;P=P9*yn9_O2)
s8=s9s
cis1=0,75
h91=yn9_N2*ENTHALPY(N2;T=T9s)+yn9_O2*ENTHALPY(O2;T=T9s)
h9=h8+(1/cis1)*(h91-h8)
h9=h92
h92=yn9_N2*ENTHALPY(N2;T=T9)+yn9_O2*ENTHALPY(O2;T=T9)
s9=yn9_N2*ENTROPY(N2;T=T9;P=P9*yn9_N2)+yn9_O2*ENTROPY(O2;T=T9;P=P9*yn9_O2)
W_k2=n8*(h9-h8)

To =T_zero#+25 :Po =Po#: es_O2 =3970 : es_N2=720 : R =R#
ho8 =yn8_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn8_O2*ENTHALPY(O2;T=To)
so8=yn8_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn8_N2)+yn8_O2*ENTROPY(O2;T=To;P=Po*yn8_O2)
E8f =n8*(h8-ho8-(To)*(s8-so8))
E8k=n8*((yn8_O2*es_O2+(To)*R*yn8_O2*ln(yn8_O2)))+(yn8_N2*es_N2+(To)*R*yn8_N2*ln(yn8_N2))
E8 =E8f+E8k
ho9=ho8 : so9=so8
E9f =n9*(h9-ho9-(To)*(s9-so9))
E9k=n9*((yn9_O2*es_O2+(To)*R*yn9_O2*ln(yn9_O2)))+(yn9_N2*es_N2+(To)*R*yn9_N2*ln(yn9_N2))

E9 =E9f+E9k
Edhk =E8+W_k2-E9
eta_ek_k2 =(E9-E8)/W_k2
EXPhk=W_k2/Edhk
End komp_2

```

"REKUPERATOR 2 "

SUBPROGRAM

reku_2(P9;P12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T12;T9;n10;n10_N2;n10_O2; E9; E10; E12 : T10d;T13;P13;E13;Edrekuh;eta_ek_rekuh)

n9=n10

n9_O2=n10_O2

n9_N2 =n10_N2

yn9_N2 =n9_N2/n9

yn9_O2 =n9_O2/n9

yn10_O2=yn9_O2

yn10_N2=yn9_N2

yn12_H2=n12_H2/n12

yn12_H2O=n12_H2O/n12

yn12_N2=n12_N2/n12

yn12_O2=n12_O2/n12

yn12_CO2=n12_CO2/n12

yn12_CO=n12_CO/n12

n12=n12_H2+n12_H2O+n12_N2+n12_O2+n12_CO+n12_CO2

yn12_H2=yn13_H2

yn12_H2O=yn13_H2O

yn12_N2=yn13_N2

yn12_O2=yn13_O2

yn12_CO2=yn13_CO2

yn12_CO=yn13_CO

n13=n12

h10d=yn10_N2*ENTHALPY(N2;T=T10d)+yn10_O2*ENTHALPY(O2;T=T10d)

h9=yn9_N2*ENTHALPY(N2;T=T9)+yn9_O2*ENTHALPY(O2;T=T9)

h12=yn12_N2*ENTHALPY(N2;T=T12)+yn12_O2*ENTHALPY(O2;T=T12)+yn12_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T12)

+yn12_H2*ENTHALPY(H2;T=T12)+yn12_CO*ENTHALPY(CO;T=T12)+yn12_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T12)

h13=yn13_N2*ENTHALPY(N2;T=T13)+yn13_O2*ENTHALPY(O2;T=T13)+yn13_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T13)

+yn13_H2*ENTHALPY(H2;T=T13)+yn13_CO*ENTHALPY(CO;T=T13)+yn13_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T13)

n9*h9+n12*h12=n10*h10d+n13*h13

eta_reku=0,74

T10d=T9+eta_reku*(T12- T9)

Po=1,013 : To=T_zero#+25 : es_O2=3970 : es_N2=720 : es_H2=238490 : es_H2O=11710

: es_CO= 275430

es_CO2=20140 : R =R#

P13=P12*(1-0,01)

ho13=yn13_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn13_CO2*

ENTHALPY(CO2;T=To)+yn13_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn13_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn13_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn13_O2*ENTHALPY(O2;T=To)

so13=yn13_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn13_CO)+yn13_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;

P=Po*yn13_CO2)+yn13_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn13_H2)+yn13_H2O*ENTROPY(H2O;T=To;P=Po*yn13_H2O)+yn13_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn13_N2)+yn13_O2*ENTROPY(O2;T=To;P=Po*yn13_O2)

s_13=yn13_CO*ENTROPY(CO;T=T13;P=P13*yn13_CO)+yn13_CO2*ENTROPY(CO2;T=

T13;P=P13*yn13_CO2)+yn13_H2*ENTROPY(H2;T=T13;P=P13*yn13_H2)+yn13_H2O*ENTROPY(H2O;T=T13;P=P13*yn13_H2O)+yn13_N2*ENTROPY(N2;T=T13;P=P13*yn13_N2)+yn13_O2*ENTROPY(O2;T=T13;P=P13*yn13_O2)

E13f=n13*(h13-ho13-(To)*(s_13-so13))

```

E13k=(n13)*((yn13_CO*es_CO+(To)*R*yn13_CO*ln(yn13_CO))+
(yn13_CO2*es_CO2+(To)*R*yn13_CO2*ln(yn13_CO2))+
(yn13_H2*es_H2+(To)*R*yn13_H2*ln(yn13_H2))+
(yn13_H2O*es_H2O+(To)*R*yn13_H2O*ln(yn13_H2O))+
(yn13_N2*es_N2+(To)*R*yn13_N2*ln(yn13_N2))
+(yn13_O2*es_O2+(To)*R*yn13_O2*ln(yn13_O2)) )

```

```

E13=E13f+E13k

```

```

Edrekuh=E12+E9-E10-E13

```

```

eta_ek_rekuh=(E10-E9)/(E12-E13)

```

```

end reku_h

```

```

"KOMPRESOR 1"

```

```

SUBPROGRAM komp_1(Prc;n18;n18_O2;n18_N2 : Wk_1;T17;P17;E17;Edk_1;eta_ek_k1)

```

```

T16=T_zero#+25

```

```

n16=n18

```

```

n16_O2=n18_O2

```

```

n16_N2 =n18_N2

```

```

n17=n16

```

```

n17_O2=n16_O2

```

```

n17_N2 =n16_N2

```

```

yn17_N2 =n17_N2/n17

```

```

yn16_N2 =n16_N2/n16

```

```

yn17_O2 =n17_O2/n17

```

```

yn16_O2 =n16_O2/n16

```

```

P16=Po#

```

```

P17=P16*Prc

```

```

h16=yn16_N2*ENTHALPY(N2;T=T16)+yn16_O2*ENTHALPY(O2;T=T16)

```

```

s16=yn16_N2*ENTROPY(N2;T=T16;P=P16*yn16_N2)+yn16_O2*ENTROPY(O2;T=T16;

```

```

P=P16*yn16_O2)

```

```

s17s=yn17_N2*ENTROPY(N2;T=T17s;P=P17*yn17_N2)+yn17_O2*ENTROPY(O2;T=T17s;P=
P17*yn17_O2)

```

```

s16=s17s

```

```

cis1=0,75

```

```

h171=yn17_N2*ENTHALPY(N2;T=T17s)+yn17_O2*ENTHALPY(O2;T=T17s)

```

```

h17=h16+(1/cis1)*(h171-h16)

```

```

h17=h172

```

```

h172=yn17_N2*ENTHALPY(N2;T=T17)+yn17_O2*ENTHALPY(O2;T=T17)

```

```

s17=yn17_N2*ENTROPY(N2;T=T17;P=P17*yn17_N2)+yn17_O2*ENTROPY(O2;T=T17;P=P17*
yn17_O2)

```

```

Wk_1=n16*(h17-h16)

```

```

To =T_zero#+25 :Po =Po# : es_O2 =3970 : es_N2=720 : R =R#

```

```

ho16 =yn16_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn16_O2*ENTHALPY(O2;T=To)

```

```

so16=yn16_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn16_N2)+yn16_O2*ENTROPY(O2;T=To;P=Po*yn1
6_O2)

```

```

E16f =n16*(h16-ho16-(To)*(s16-so16))

```

```

E16k=n16*((yn16_O2*es_O2+(To)*R*yn16_O2*ln(yn16_O2))+
(yn16_N2*es_N2+(To)*R*yn16_N2*ln(yn16_N2)))

```

```

E16 =E16f+E16k

```

```

ho17=ho16 : so17=so16

```

```

E17f =n17*(h17-ho17-(To)*(s17-so17))

```

```

E17k=n17*((yn17_O2*es_O2+(To)*R*yn17_O2*ln(yn17_O2))+
(yn17_N2*es_N2+(To)*R*yn17_N2*ln(yn17_N2)))

```

```

E17 =E17f+E17k

```

```

Edk_1 =E16+Wk_1-E17

```

```

eta_ek_k1 =(E17-E16)/Wk_1

```

```

EXPk_1=Wk_1/Edk_1

```

End komp_1

"REKUPERATOR 1 "

SUBPROGRAM

reku_1(P17;P13;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T13;T17;n18;n18_N2;n18_O2; E17; E18; E13 : T18d;T14;P14;P18;Edreku1; eta_ek_reku1;E14)

n17=n18

n17_O2=n18_O2

n17_N2 =n18_N2

yn17_N2 =n17_N2/n17

yn17_O2 =n17_O2/n17

yn18_O2=yn17_O2

yn18_N2=yn17_N2

n13_H2=n12_H2

n13_H2O=n12_H2O

n13_N2=n12_N2

n13_O2=n12_O2

n13_CO2=n12_CO2

n13_CO=n12_CO

yn13_H2=n13_H2/n13

yn13_H2O=n13_H2O/n13

yn13_N2=n13_N2/n13

yn13_O2=n13_O2/n13

yn13_CO2=n13_CO2/n13

yn13_CO=n13_CO/n13

n13=n13_H2+n13_H2O+n13_N2+n13_O2+n13_CO+n13_CO2

yn13_H2=yn14_H2

yn13_H2O=yn14_H2O

yn13_N2=yn14_N2

yn13_O2=yn14_O2

yn13_CO2=yn14_CO2

yn13_CO=yn14_CO

n13=n14

h18d=yn18_N2*ENTHALPY(N2;T=T18d)+yn18_O2*ENTHALPY(O2;T=T18d)

h17=yn17_N2*ENTHALPY(N2;T=T17)+yn17_O2*ENTHALPY(O2;T=T17)

h13=yn13_N2*ENTHALPY(N2;T=T13)+yn13_O2*ENTHALPY(O2;T=T13)+yn13_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T13)

+yn13_H2*ENTHALPY(H2;T=T13)+yn13_CO*ENTHALPY(CO;T=T13)+yn13_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T13)

h14=yn14_N2*ENTHALPY(N2;T=T14)+yn14_O2*ENTHALPY(O2;T=T14)+yn14_H2O*ENTHALPY(H2O;T=T14)

+yn14_H2*ENTHALPY(H2;T=T14)+yn14_CO*ENTHALPY(CO;T=T14)+yn14_CO2*ENTHALPY(CO2;T=T14)

n17*h17+n13*h13=n18*h18d+n14*h14

eta_reku=0,74

T18d=T17+eta_reku*(T13- T17)

Po=1,013 : To=T_zero#+25 : es_O2=3970 : es_N2=720 : es_H2=238490 : es_H2O=11710 : es_CO= 275430

es_CO2=20140 : R =R#

P14=P13*(1-0,01)

ho14=yn14_CO*ENTHALPY(CO;T=To)+yn14_CO2*

ENTHALPY(CO2;T=To)+yn14_H2*ENTHALPY(H2;T=To)+yn14_H2O*ENTHALPY(H2O;T=To)+yn14_N2*ENTHALPY(N2;T=To)+yn14_O2*ENTHALPY(O2;T=To)

```

so14=yn14_CO*ENTROPY(CO;T=To;P=Po*yn14_CO)+yn14_CO2*ENTROPY(CO2;T=To;
P=Po*yn14_CO2)+yn14_H2*ENTROPY(H2;T=To;P=Po*yn14_H2)+yn14_H2O*ENTROPY(H2O;
T=To;P=Po*yn14_H2O)+yn14_N2*ENTROPY(N2;T=To;P=Po*yn14_N2)+yn14_O2*ENTROPY(
O2;T=To;P=Po*yn14_O2)

```

```

s_14=yn14_CO*ENTROPY(CO;T=T14;P=P14*yn14_CO)+yn14_CO2*ENTROPY(CO2;T=
T14;P=P14*yn14_CO2)+yn14_H2*ENTROPY(H2;T=T14;P=P14*yn14_H2)+yn14_H2O*ENTRO
PY(H2O;T=T14;P=P14*yn14_H2O)+yn14_N2*ENTROPY(N2;T=T14;P=P14*yn14_N2)+yn14_O
2*ENTROPY(O2;T=T14;P=P14*yn14_O2)

```

```

E14f=n14*(h14-ho14-(To)*(s_14-so14))

```

```

E14k=(n14)*((yn14_CO*es_CO+(To)*R*yn14_CO*ln(yn14_CO))+yn14_CO2*es_CO2+(To)*R
*yn14_CO2*ln(yn14_CO2))+yn14_H2*es_H2+(To)*R*yn14_H2*ln(yn14_H2))
+(yn14_H2O*es_H2O+(To)*R*yn14_H2O*ln(yn14_H2O))+yn14_N2*es_N2+(To)*R*yn14_N2
*ln(yn13_N2)) +(yn14_O2*es_O2+(To)*R*yn14_O2*ln(yn14_O2)) )

```

```

E14=E14f+E14k

```

```

P18=P17*(1-0,01)

```

```

Edreku1=E13+E17-E18-E14

```

```

eta_ek_reku1=(E18-E17)/(E13-E14)

```

```

end reku_1

```

```

CALL

```

```

reku_1(P17;P13;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T13;T17;n18;n18_N2;n1
8_O2; E17; E18; E13 : T18d;T14;P14;P18;Edreku1;eta_ek_reku1;E14)

```

```

Call komp_1(Prc;n18;n18_O2;n18_N2 : Wk_1;T17;P17;E17;Edk_1; eta_ek_k1)

```

```

Call komp_2(Prc;n10;n10_O2;n10_N2 : W_k2;T9;P9;E9;Edhk; eta_ek_k2)

```

```

Call gas ( C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T : n2_CH4; n2_CO; n2_CO2; n2_H2;
n2_H2O; n2_N2; n18;n18_O2; n18_N2; E18; r_hy; r_yh; Ex_D; LHV_bm;eta_cg; eta_cg_%; eta_ex;
eta_ex_%; Ex_bm )

```

```

Call rept (C; H; O; N; S; ash; nem; nem_t; T18;P18; n_b; T; E18; n18;n18_O2; n18_N2; n2_CH4;
n2_CO; n2_CO2; n2_H2; n2_H2O; n2_N2; yn7_CH4; yn7_CO; yn7_CO2; yn7_H2; yn7_H2O;
yn7_N2; Tc; To; T2; T5; T10; Po; P2; P3; P4; P5; P7; P10; P11; Uf; U_a; Al; i_d; r_sc ;

```

```

Prc;T9;P9;E9;T17;P17;E17;P13;T13;E13 ; n10;n10_O2;n10_N2; T4; Wyh; V; V_act; V_conc;
V_ohm; T12;P12; E_Nerst ; Edmx; Edpr; Edyh; Edyo; E10;E12;

```

```

n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2; eta_ek_mx; eta_ek_pr; eta_ek_yh;

```

```

eta_ek_yo; V_loss)

```

```

Call

```

```

reku_2(P9;P12;n12_H2;n12_H2O;n12_N2;n12_O2;n12_CO;n12_CO2;T12;T9;n10;n10_N2;n10_
O2; E9; E10; E12 : T10d;T13;P13;E13;Edrekuh; eta_ek_rekuh)

```

```

W_dc=Wyh

```

```

W_ac=Wyh*0,925

```

```

W_s=W_ac-Wk_1-W_k2

```

```

eta_I_s=W_s/(n_b*LHV_bm)

```

```

eta_ek_s=W_s/Ex_bm

```

```

Edtop=Ex_D+Edmx+Edpr+Edyh+Edyo+Edhk+Edrekuh+Edk_1+Edreku1+E14

```

```

T18=T_zero#+489 [K]

```

```

n_b=100/(3600*23,62) [kmol/s]

```

```

T=T_zero#+800 [K]

```

```

" saman(M=24,46), odun (M=23,62), çim(M=24,1)"

```

```

C= 48,9 {50,8} {49,7}

```

```

H= 5,97 {6,06} {6}

```

```

O= 43,9 {42,7} {42,7}

```

```

N= 0,82 {0,36} {1,32}

```

```

S= 0,15 {0,07} {0,18}

```

```
ash= 6,37 {1,84} { 5,46}  
nem_t=0,127 {0,197} {0,242}  
nem= {0} 0,127 {0,197} { 0,242}  
nem%=nem*100
```

```
Uf = 0,67  
U_a=0,18  
Al=96,1  
i_d=1800  
yn7_CH4= 0 : yn7_CO=0,04 : yn7_CO2=0,21 : yn7_H2=0,04 : yn7_H2O= 0,21: yn7_N2=0,4837  
Prc=1,1  
r_sc=2  
Tc=T_zero#+1000  
To=T_zero#+25  
T2=T-90  
T5=Tc-90  
T10=T_zero#+900  
T4_C=T4-T_zero#  
Po=Po#  
P2=P18*(1-0,02)  
P3=P2  
P4=P3  
P7=P5  
P10=P9*(1-0,01)  
P5=P4*(1-0,02)  
P11=P10*(1-0,02)  
Tc_C=Tc-T_zero#  
T2_C=T2-T_zero#  
E_nerst_v=E_Nerst*1000  
V_ohm_v=V_ohm*1000  
V_act_v=V_act*1000  
V_conc_v=V_conc*1000  
V_loss_v=V_loss*1000  
V_v=V*1000
```

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: : Burak İZGİ
Doğum Tarihi ve Yeri: : 23.07.1986 - Suluova/Amasya
Yabancı Dili: : İngilizce
E-posta: : izgiburak@gmail.com
Web: : bizgi.org

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makina Mühendisliği	Atatürk Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Suluova Lisesi (YDA)	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009	Bozok Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. SUBAŞI A., İZGİ B., ŞAHİN B., KAYMAZ İ., (2011). "Delikli silindirik kanatlara sahip bir ısı alıcının optimum tasarım parametrelerinin yanıt yüzey yöntemi yardımıyla belirlenmesi", Anadolu Enerji Sempozyumu, 22-24 Haziran 2011, Elazığ.