

**T.C.**  
**GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRMASININ GIBBS ENERJİ**  
**MİNİMİZASYONU İLE MODELLENMESİ**

**EMRE BERBER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZGÜN YÜCEL**

**TEMMUZ 2024**

**T.C.  
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜST EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BİYOKÜTLE GAZLAŞTIRMASININ GIBBS ENERJİ  
MİNİMİZASYONU İLE MODELLENMESİ**

**EMRE BERBER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ ÖZGÜN YÜCEL**

**TEMMUZ 2024**

**T.R.**  
**GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY**  
**GRADUATE SCHOOL**

**MODELING OF BIOMASS GASIFICATION WITH**  
**GIBBS ENERGY MINIMIZATION**

**EMRE BERBER**

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING**

**ADVISOR: ASSISTANT PROFESSOR ÖZGÜN YÜCEL**

**JULY 2024**

## YÜKSEKLİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 04/07/2024 tarih ve 2024/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24/07/2024 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emre BERBER'in tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Özgün YÜCEL

ÜYE

: Prof. Dr. Hasan SADIKOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. İrem FIRTINA ERTİŞ

### ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

Biyokütle gazlaştırması, sürdürülebilir enerji üretimi için önemli bir yöntemdir. Bu çalışmada, Aspen Plus kullanılarak bir biyokütle gazlaştırma modeli geliştirilmiş ve modelin doğru çalıştığı literatür verileri ile kontrol edilmiştir. İki farklı akademik çalışmadan alınan veriler kullanılarak, oluşturulan modeli performansı çeşitli yöntemlerle değerlendirilmiştir. Aspen Plus yazılımı kullanılarak bir biyokütle gazlaştırma modeli oluşturulmuştur. Model, bir önceki çalışmada kullanılan AspenTech modeli ile karşılaştırılarak validasyonu gerçekleştirilmiştir. Aspen Tech Getting Started Modeling Processes with Solids klavuzu ile validasyon yapılarak, kömür kurutma modeli oluşturulmuş ve Aspen Plus'ın sağladığı modellerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Kömür kurutma modeli, Aspen Tech'in klavuz verileri ile tutarlı sonuçlar göstermiştir. Literatürdeki veriler kullanılarak oluşturulan model çalıştırılmıştır. Fındık kabuğu ve çay yapraklarının kurutulması ile ilgili bulunan literatür verileri modele girilmiş ve alınan sonuçlar ile literatür verilerini karşılaştırmak için RMSE analizi yapılmıştır. Sonuçları kabul edilebilir standartlar arasındadır. Makale verileri ile oluşturulan biyokütle gazlaştırma modeli, makaledeki sonuçlar ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir bir uyum sağlamıştır. RMSE değerleri, modelin doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan etkili bir metrik olmuştur. Oluşturulan modelin doğru çalıştığını kanıtlamak adına iki farklı literatür verisi kullanılmıştır, sonuçları değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, Aspen Plus kullanarak biyokütle gazlaştırma modelinin doğruluğunu ve performansını değerlendirmiştir. Gelecekte, modelin daha fazla veri ve koşul altında test edilmesi ve iyileştirilmesi önerilmektedir. Yapılan duyarlılık analizleri sonucunda artan havanın  $H_2$  gazının azalmasını sağlarken  $CO_2$  gazının arttığını göstermiştir. Benzer şekilde sıcaklığın etkisinin gözlemlenmesi için yapılan duyarlılık analizinde ise artan sıcaklık ile birlikte  $H_2$  gazı artarken  $CO_2$  gazı azalmıştır. Özellikle hidrojen üretiminde, geleneksel olan suyun hidrolizi gibi yöntemler yerine gazlaştırma yöntemi kullanılarak üretim yapılması, maliyet, sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin azalmasında önemli rol oynayacaktır.

**Anahtar Kelimeler: Aspen Plus, Biyokütle Gazlaştırma, Fındık Kabuğu, Duyarlılık Analizi**

## ABSTRACT

Biomass gasification is an important method for sustainable energy production. In this study, a biomass gasification model was developed using Aspen Plus and validated against literature data to ensure its accuracy. Performance of the model was evaluated using data from two different academic studies. A biomass gasification model was created using Aspen Plus software. Validation was conducted by comparing the model with an AspenTech model used in previous research. Validation was performed using Aspen Tech's "Getting Started Modeling Processes with Solids" guide by creating a coal drying model and verifying it against models provided by Aspen Plus.

The coal drying model showed consistent results with Aspen Tech's guide data. The model created using literature data for drying hazelnut shells and tea leaves was executed, and an RMSE analysis was conducted to compare results with literature data. The results fell within acceptable standards. The biomass gasification model constructed using data from the article showed reasonable agreement with the results in the literature. RMSE values proved to be an effective metric for evaluating the model's accuracy. Two different sets of literature data were used to evaluate and assess the results, confirming the model's accuracy.

In conclusion, this study evaluated the accuracy and performance of a biomass gasification model using Aspen Plus. Future work should involve testing and refining the model under more data and conditions. Sensitivity analyses indicated that increasing air led to a decrease in H<sub>2</sub> gas while increasing CO<sub>2</sub> gas. Similarly, a sensitivity analysis on temperature showed an increase in H<sub>2</sub> gas with a decrease in CO<sub>2</sub> gas. Particularly in hydrogen production, using gasification instead of traditional methods like water electrolysis can play a significant role in reducing costs, enhancing sustainability, and decreasing carbon footprint.

**Keywords: Aspen Plus, Biomass Gasification, Hazelnut Shell, Sensitivity**

**Analysis**

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐmaya ve hayatıma katkılarından dolayı danıŐmanım Dr. Özgün YÜCEL'e derin bir Őükran borçluyum. Bilgi birikimi, yönlendirmeleri ve destekleri sayesinde bu çalışmanın her adımında bana rehberlik ettiği için minnettarım. Özel olarak, aileme sonsuz teŐekkürlerimi iletmeği istiyorum. Annem Sayime BERBER, babam Turhan BERBER, kardeŐim Ebrar BERBER, eŐim İrem BERBER ve kızım Ayliz BERBER, her zaman beni desteklediler, cesaret verdiler ve inançlarını hiçbir zaman yitirmediler. Onların sevgisi ve destekleri olmasaydı, bu tez çalıŐmasını tamamlamam mümkün olmazdı.

En içten teŐekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	1
2. Literatür İncelemesi	3
2.1 Biyokütlenin Enerji Potansiyeli	3
2.2 Gazlaştırma Teknolojileri	6
2.2.1 Sabit Yataklı Gazlaştırma	9
2.2.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırma	12
2.3 Kimya Mühendisliğinde Süreç Simülasyon Yazılımının Uygulamaları	15
2.4 Fındık Kabuğunun Yapısı ve Potansiyeli	16
3. Proses Modellemesi ve Dizayn	19
3.1 Aspen Plus Modelleme ve Simülasyon	19
3.2 Duyarlılık Analizi	22
3.2.1 Fındık Kabuğu Çalışmasından Alınan Verilerin Kullanımı	22
3.2.2 Çay Yapraklarının Kurutulması Çalışmasından Alınan Verilerin Kullanımı	24
4. Sonuçlar	26
4.1 Proses Validasyonu	26
4.2 Duyarlılık Analizi	33
4.2.1 Fındık Kabuğu	33
4.2.2 Çay Yaprakları	37
5. Tartışma	39
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	50
EKLER	51

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksit
C	: Karbon Grafit
CO	: Karbon monoksit
<sup>0</sup> C	: Celcius
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
CH <sub>4</sub>	: Metan
N <sub>2</sub>	: Azot
O <sub>2</sub>	: Oksijen
kg	: Kilogram
WGSR	: Su-Gaz Geçiş Reaksiyonu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Şekil 2.1:</b> Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliği	4
<b>Şekil 2.2:</b> Biyokütle kullanımıyla ilişkili doğal karbon döngüsü	7
<b>Şekil 2.3:</b> Biyokütle gazlaştırma sürecinin şematik gösterimi	8
<b>Şekil 2.4:</b> Gazlaştırma Kimyasının Şematik Gösterimi	. 9
<b>Şekil 2.5:</b> Yukarı Akışlı Reaktör	10
<b>Şekil 2.6:</b> Aşağı Akışlı Reaktör	11
<b>Şekil 2.7:</b> Çapraz Akışlı Reaktör	12
<b>Şekil 2.8:</b> Baloncuklu akışkan yataklı gazlaştırıcı ve dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırıcı	14
<b>Şekil 3.1:</b> Proses Dizaynı	19
<b>Şekil 4.1:</b> Fındık Kabuğu makalesinden alınan N <sub>2</sub> ve modellenen prosesten çıkan N <sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması	27
<b>Şekil 4.2:</b> Fındık Kabuğu makalesinden alınan H <sub>2</sub> ve modellenen prosesten çıkan H <sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması	28
<b>Şekil 4.3:</b> Fındık Kabuğu makalesinden alınan CO ve modellenen prosesten çıkan CO oranlarının karşılaştırılması	29
<b>Şekil 4.4:</b> Fındık Kabuğu makalesinden alınan CO <sub>2</sub> ve modellenen prosesten çıkan CO <sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması	29
<b>Şekil 4.11:</b> Karbon monoksit karbon dioksit denge ilişkisi	35
<b>Şekil 4.13:</b> Hava Akışının Etkisi -Duyarlılık Analizi hava değişimine karşı N <sub>2</sub> H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CO CH <sub>4</sub> gazlarının grafik gösterimi	37
<b>Şekil 4.14:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi -Duyarlılık Analizi sıcaklık değişimine karşı N <sub>2</sub> H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> CO CH <sub>4</sub> gazlarının grafik gösterimi	38
<b>A1.1:</b> Özellikler – Hesaplama Seçenekleri	51
<b>A1.2:</b> Özellikler-Bileşenler	51
<b>A1.3:</b> Özelliklerin Belirlenmesi – Yöntemler	52
<b>A1.4:</b> Simülasyon kurulumu	52
<b>A1.5:</b> Simülasyondaki Akışlar	53
<b>A1.6:</b> Akışlardaki Havanın Özellikleri	53
<b>A1.7:</b> Simülasyondaki Bloklar	54
<b>A1.8:</b> Hava Akışının Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	54
<b>A1.9:</b> Hava Akışının Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	55
<b>A1.10:</b> Hava Akışının Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	55
<b>A1.11:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	56
<b>A1.12:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	56
<b>A1.13:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları	57
<b>A1.14:</b> Hava Akışının Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları	57
<b>A1.15:</b> Hava Akışının Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları	58
<b>A1.16:</b> Hava Akışının Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları	58
<b>A1.17:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları	59
<b>A1.18:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi- Çay Yaprakları	59
<b>A1.19:</b> Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi- Çay Yaprakları	60

## TABLolar DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Tablo 3.1:</b> Aspen Plus'taki birim işlem bloklarının tanımları	21
<b>Tablo 3.2:</b> Literatürden alınan katı atıkların Proximate analizleri	23
<b>Tablo 3.3:</b> Literatürden alınan katı atıkların Ultimate analizleri	23
<b>Tablo 3.4:</b> Proses beslenen kütle, hava ve sıcaklık verileri	23
<b>Tablo 3.4:</b> (Devam) Proses beslenen kütle, hava ve sıcaklık verileri	24
<b>Tablo 3.5:</b> Literatürden alınan katı atıkların Proximate analizleri	25
<b>Tablo 3.6:</b> Literatürden alınan katı atıkların Ultimate analizleri	25
<b>Tablo 3.7:</b> Proses beslenen kütle, hava ve sıcaklık verileri	25
<b>Tablo 4.1:</b> Fındık Kabuğu çalışmasından alınan sonuçlar	28
<b>Tablo 4.2:</b> Proses beslenen Fındık Kabuğu makale verileri sonucunda alınan sentez gazı çıktıları	29
<b>Tablo 4.3:</b> Çay Yaprakları makalesinden alınan sonuçlar	32
<b>Tablo 4.4:</b> Proses beslenen Çay Yaprakları makale verileri sonucunda alınan sentez gazı çıktıları	32

# 1. GİRİŞ

Bu çalışmanın odak noktası, fındık kabuğu gibi yenilenebilir bir biyokütle kaynağının gazlaştırma sürecinde kullanılmasıdır. Fındık kabuğu, tarımsal yan ürünlerin bir parçası olarak bolluğu ve geniş bir biyokütle kaynağı olması nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu çalışma, fındık kabuğunun biyokütle gazlaştırması sürecindeki performansını ve bu sürecin modellenmesi ile ilgili önemli bir adımdır(Villarini vd., 2019a).

Aspen Plus gibi simülasyon yazılımları, biyokütle gazlaştırma süreçlerinin modellenmesi ve optimize edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (AlNouss vd., 2020; HajiHashemi vd., 2023; Niu vd., 2021; Tavares vd., 2020). Bu bağlamda, çalışmanın ilk adımı, Aspen Plus kullanılarak bir biyokütle gazlaştırma modelinin oluşturulması ve validasyonudur. Modelin oluşturulmasında fındık kabuğu bileşimi ve özellikleri dikkate alınmıştır.

Aspen Plus modelleme yaklaşımı kullanarak, Aspen Tech Klavuzunun yönlendirmeleriyle katı maddeler içeren süreçler modellenmiştir (Gnanapragasam vd., 2009). Oluşturulan model üzerinde modifikasyonlar yaparak çözülme, piroliz ve gazlaştırma süreçlerinin modellenmesi ve nihai ürünlerin ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) üretilmesi amaçlanmıştır. Literatürden alınan veriler ile modelin çalışma sonuçları doğrulanmıştır.

## 2.1 Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Dünya fındık üretiminin yaklaşık %70'ini karşılayan ülkemizde, fındık üretimi sonrasında büyük miktarda kabuk atığı ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu kabuklar genellikle ısı enerjisi üretimi için yakılmakta ve bazen daha yüksek ısı elde etmek amacıyla briketlenerek kullanılabilir. Ayrıca, fındık kabuklarının piroliz ve gazlaştırma proseslerine sokularak yüksek miktarda enerji elde etmek de mümkündür.

Fındık kabukları lignoselülozik maddelerdir ve bu nedenle doğrudan yakma veya gazlaştırma gibi termo-kimyasal süreçlerde karlı bir şekilde yakıt olarak kullanılabilirler. Özellikle gazlaştırma süreci, bu tür maddelerin uygulanabilirliğini

genişleten bir yakıt gazı üretir. Gazlaştırma, çoğunlukla CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> ve katran (gazlaştırma sırasında salınan kondenslenebilir hidrokarbonlar) içeren bir gaz karışımı olan sentez gazı üretmektedir.

Sentez gazının bileşimi, kullanılan biyokütlenin düşük ısıl değeri ve nem oranı, oksidan türü (hava, saf oksijen, buhar) ve teknolojiler ile eşdeğer oran, sıcaklık ve basınç gibi işletme koşullarına bağlıdır. Oksidan ajan olarak hava kullanımı, ısıl değeri açısından en düşük kaliteli sentez gazını (6 MJ/Nm<sup>3</sup>'ten az) üretmektedir. Oksijen kullanıldığında bu değer 9-10 MJ/Nm<sup>3</sup>'e, buhar kullanıldığında ise 17-18 MJ/Nm<sup>3</sup>'e kadar çıkmaktadır. Buhar, genellikle akışkan yataklı gazlaştırıcılarda kullanılan bir oksidan olup, yüksek hidrojen içeriğine sahip sentez gazı sağlamaktadır.

Sentez gazının bileşimi, partikül, katran ve kükürt bazlı bileşikler gibi diğer elementler dahil olmak üzere safsızlıkların varlığından da etkilenir ve bu nedenle sentez gazı kullanılmadan önce bir temizleme süreci gerektirmektedir. Yüksek ısıl değeri ve düşük partikül ile katran içeriğine sahip sentez gazı elde etmek çok önemlidir.

Bu tez, biyokütle gazlaştırmasının sürdürülebilir enerji üretimindeki rolünü vurgulamaktadır. Biyokütle atıklarının enerjiye dönüştürülmesi, fosil yakıtların azaltılmasına ve karbon ayak izinin düşürülmesine katkıda bulunur. Ülkemiz, dünya fındık, ceviz gibi kabuklu gıdaların üretiminde hacimsel olarak yüksek miktarlarda üretime sahip olması sebebiyle, bu tür gıdaların kabukları atık olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, yerel atıkların değerlendirilmesine ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlanmaktadır.

Bu tür biyokütle atıklarının enerjiye dönüştürülmesi süreçlerinin daha da geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması, ülkemizin enerji bağımsızlığına katkı sağlayacak ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyecektir. Ayrıca, sentez gazının temizlenmesi ve kullanımı konusunda daha ileri araştırmalar yapılması, enerji verimliliğini artıracak ve ekonomik faydalar sağlayacaktır.

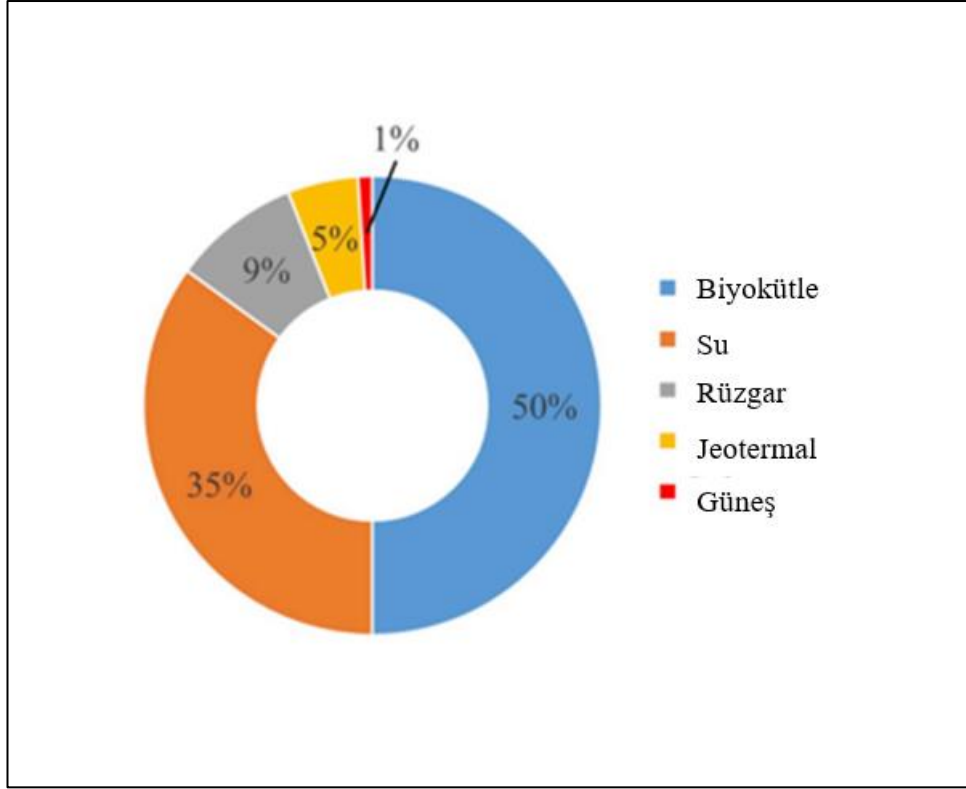
## 2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

### 2.1 Biyokütlenin Enerji Potansiyeli

Günümüzde, elektrik üretimi hala iki ana kaynağa dayanmaktadır: kömür, doğalgaz ve petrol gibi fosil yakıtlar ile nükleer enerji. Kömür dünya genelinde elektriğin yaklaşık %39,3'ünü üretmek için kullanılan en yaygın kaynaktır (**Downie, 2020**). Fosil yakıt üretiminin azalması, çevresel farkındalığın artması ve nükleer enerji kullanımındaki riskler, dünyayı daha sürdürülebilir, çevre dostu ve daha güvenli yeni alternatif enerjiler aramaya yönlendirmektedir. Son zamanlarda, biyokütle, güneş, rüzgâr ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının gelecekte elektrik üretiminde fosil yakıtlar ve nükleerin yerini alabileceği düşünülmektedir. 2040 yılına kadar enerji kullanımına ilişkin bazı çalışmalar, yenilenebilir enerji kullanımındaki artışın devam edeceğini, kömür ve nükleer enerji kullanımının ise durgun bir eğilimde olacağını veya hatta azalacağını göstermektedir (**Downie, 2020**). Bu nedenle, yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanmasının yakın gelecekte hızla artması beklenmektedir. Özellikle, fosil yakıtlar ve nükleer enerjinin yerini almak üzere küresel enerji karışımına katkısı giderek daha da gerekli hale gelmektedir (**Boehm vd., 2015; Ladanai & Vinterbäck, t.y.**). Biyokütle, güneş, rüzgâr, hidroelektrik, jeotermal ve okyanus dalga ve gelgitleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları sürekli olarak veya makul bir zaman diliminde yenilenebilir (**Ladanai & Vinterbäck, t.y.; Madadian vd., 2014**). Ancak, farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım yolları geleneksel olanlardan farklıdır. Özellikle, yenilenebilir enerji kırsal alanlarda geleneksel enerjiye ulaşmanın zor olduğu yerlerde yüksek potansiyele sahiptir.

Tüm yenilenebilir enerji kaynakları arasında, biyokütle en erişilebilir olanıdır. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, biyokütle yenilenebilir enerji kaynaklarının yaklaşık %50'sini oluşturur. Biyokütle, bitkiler, algler ve hayvanlardan elde edilen fosilleşmemiş ve biyolojik olarak parçalanabilir organik malzemelerdir. Kurutulmuş biyokütle, lignin, selüloz ve hemiselüloz ve proteinler, lipitler, basit şekerler ve nişastalar gibi az miktarda ekstraktlardan oluşur (**L. Zhang vd., 2010**). Selüloz genellikle odun ve çim biyokütlesinin toplam ağırlığının yaklaşık %38-50'sini oluşturur. Kolay ve bol

bulunabilirlik, geniş yayılım, yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik ile çok yönlülük, biyokütle enerji kaynağının ana özellikleridir. Ancak, biyokütlenin ısı değeri kömürden düşüktür ve katı bir malzeme olduğu için sıvı yakıtlardan daha zor taşınır (Madadian vd., 2014).



Şekil 2.1 Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliği(Situmorang vd., 2020).

Özellikle, biyokütle kaynakları yaygındır ve birçok farklı türe ayrılabilir, bunlar arasında orman ürünleri, tarım ürünleri ve kalıntıları, özel enerji bitkileri, endüstriyel atıklar ve kalıntılar, hayvan kalıntıları, belediye katı atıkları ve kanalizasyon bulunmaktadır. Ormanlık alanlar ve kalıntılar, ağaçlar, çalılar, fundalıklar, çalılıklar, palmiyeler ve bambular odunsu biyokütle olarak sınıflandırılırken, tarım ürünleri ve kalıntıları, özel enerji bitkileri, endüstriyel atıklar ve kalıntılar, hayvan gübresi ve evsel atıklar odunsu olmayan biyokütle ve işlenmiş atık olarak sınıflandırılır (Situmorang vd., 2020). Biyokütle kaynakları arasında, tarım ürünleri ve kalıntıları ile endüstriyel ve evsel atıklar, her biri sırasıyla %27 ve %30 ile en çok üretilenlerdir (Ladanai & Vinterbäck, t.y.). Orman ürünleri sadece biyokütlenin yaklaşık %23'ünü üretse de, nispeten yüksek ısı değeri nedeniyle odunsu biyokütle en umut verici kaynaktır ve önemi ve talebi gelecekte önemli ölçüde artacaktır (Balat & Ayar, 2005). Dünya

genelinde orman biyokütlesinin birincil enerji arzının yaklaşık 56 kentilyon joule olduğu ve tüm biyokütle kaynaklarından elde edilen toplam yıllık birincil enerjinin %90'ını sağlayabileceği tahmin edilmektedir (**World Energy Resources | 2016, t.y.**).

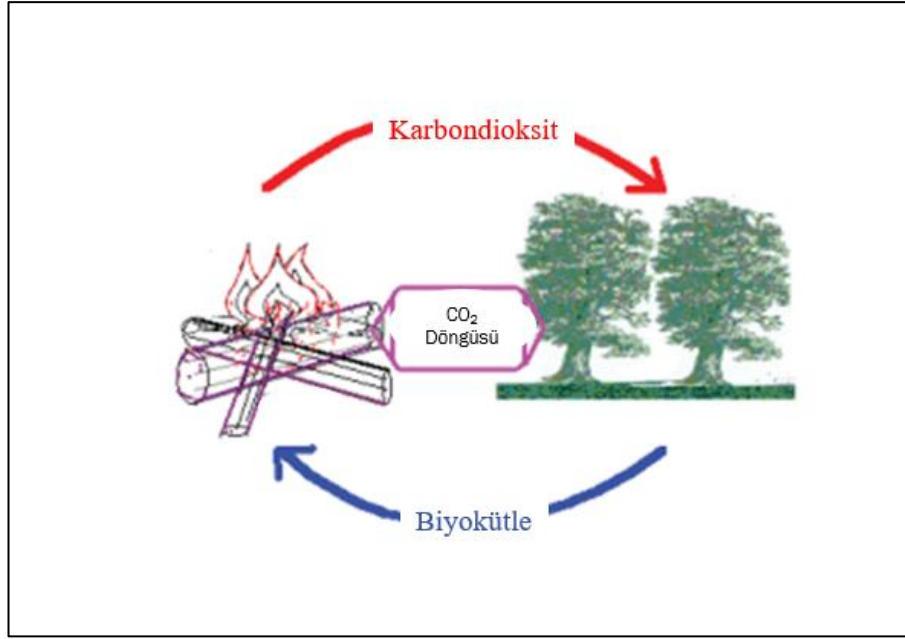
Daha da önemlisi, biyokütle gelecekte sürdürülebilirlik için yakıt arzını karşılayabilecek en büyük potansiyel alternatif olarak görülmektedir. Bu nedenle biyokütle; kömür, petrol ve doğalgazdan sonra 4. en büyük enerji kaynağı olarak sınıflandırılmıştır (**Ladanai & Vinterbäck, t.y.**) ve 2014 yılında dünya nihai enerji tüketiminin %14'ünü paylaşmaktadır (**World Energy Resources | 2016, t.y.**). Biyokütlenin, sanayileşmiş ülkelerde %3 ve gelişmekte olan ülkelerde %33 enerji tüketimini temsil ettiği bildirilmektedir (**Jin vd., 2009**). Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla, biyokütle enerjisi daha ucuzdur ve enerji daha ekonomik bir şekilde üretilebilir. Biyokütle üretimi, diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen toplam yıllık dünya enerji tüketiminden yaklaşık 8 kat daha fazladır ve şu anda 146 milyon metrik ton/yıl üretimle en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır, çoğunlukla yabani bitkilerin büyümesiyle (**Balat & Ayar, 2005; Ladanai & Vinterbäck, t.y.**). Ayrıca, biyokütle, ısı, elektrik üretimi, biyoyakıtlar ve biyokimyasallar üretimi (örneğin, çözücüler, yapıştırıcılar, plastikler, mürekkepler ve yağlayıcılar) gibi çeşitli sektörlerde kullanılabilir (**Pokharel vd., 2023**). Özellikle, biyokütle sıvı fosil yakıtları değiştirebilecek tek yenilenebilir enerji kaynağı olarak da kabul edilmektedir.

Biyokütleyi enerjiye dönüştürmenin iki ana yolu termokimyasal süreç ve biyokimyasal/ biyolojik süreçtir. Genel olarak, termokimyasal süreçler, kısa reaksiyon süresi ve yüksek dönüşüm verimliliği nedeniyle biyolojik süreçten daha verimlidir. Örneğin, lignin termokimyasal süreçle tamamen parçalanabilir, ancak biyolojik süreçle sadece kısmen parçalanır (**L. Zhang vd., 2010**). Termokimyasal süreçler arasında doğrudan yanma, torrefaksiyon, piroliz, gazlaştırma ve hidrotermal sıvılaştırma yer alır. Öte yandan, biyolojik süreçler üç ana yolu içerir: fermantasyon, aerobik ve anaerobik sindirim ve enzimatik veya asit hidrolizi (**Bhave vd., 2017**). Genel olarak, termokimyasal süreç, katı biyokütleyi ısı kullanarak gaz formunda enerjiye dönüştürürken, biyokimyasal süreç, mikroorganizmalar kullanarak diğer biyokütle formlarını gaz ve sıvı yakıtlar ve kimyasallara dönüştürmek için kullanılır (**Kundu vd., 2018**).

## 2.2 Gazlaştırma Teknolojileri

Gazlaştırma, karbon içeren hammaddeleri esas olarak CO ve H<sub>2</sub>'den oluşan bir yakıt gazına dönüştüren bir termokimyasal süreçtir. Gazlaştırmada hammadde, stokiyometrik miktardan daha az hava veya oksijen ve/veya buhar ile reaksiyona girer. Biyokütle buhar gazlaştırması, hidrojen açısından zengin gaz üretmek için temiz bir süreç olarak son zamanlarda büyük ilgi görmüştür; bu, buhar gazlaştırmanın benzersiz fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Endüstriyel olarak, gazlaştırma çoğunlukla kömürden elektrik üretimi için kullanılır ve bu süreçte elde edilen sentez gazı gaz türbinlerinde yakılır. Bütünleşmiş gazlaştırma kombine çevrimleri de gazlaştırma sürecini kullanarak kömürden elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Kömür gazlaştırmasının enerji alanında büyük potansiyele sahip olmasının nedeni, kömürün fazlalığı ve yüksek enerji içeriğidir; ancak, diğer yandan atmosferde sera gazlarının üretilmesi gibi ciddi sorunlar da bulunmaktadır. İkinci sorun ise fosil yakıtların (ham petrol, kömür vb.) büyük tüketimi nedeniyle sürekli tükenmesidir. Bu sorunlar nedeniyle, biyokütle gazlaştırması günümüzde odak noktası haline gelmektedir. Biyokütle bazlı yakıtlar, fosil olmayan, yenilenebilir ve karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) nötr olarak kabul edilir; çünkü biyokütle büyümesi sırasında atmosferden CO<sub>2</sub> alır ve yakıtın yanmasından sonra bitkiler tarafından tekrar kullanılır. Bu nedenle, biyokütleden üretilen yakıtın kullanımı sonrasında üretilen karbon dioksit atmosferde sera gazı olarak birikmez. Biyokütle kullanımıyla ilişkili doğal karbon döngüsü Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

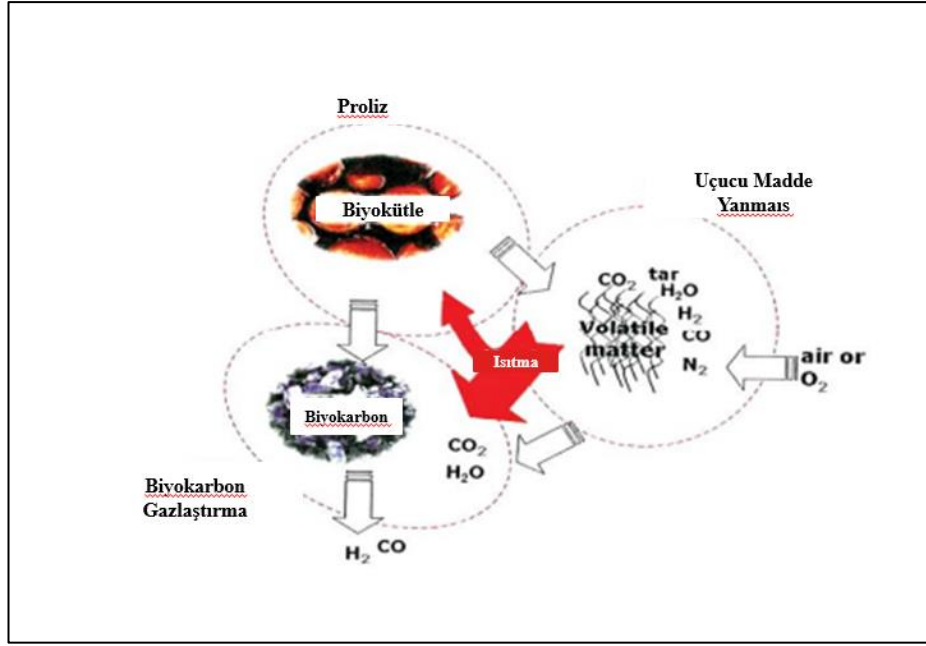


Şekil 2.2 Biyokütle kullanımıyla ilişkili doğal karbon döngüsü (Web 1).

Biyokütle, yenilenebilir bir enerji kaynağı ve karbon nötr bir yakıttır; ayrıca NO<sub>x</sub> ve SO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltma açısından da faydalar sağlar ve bu nedenle fosil yakıtların yerini alabilecek ana alternatiflerden biri olarak kabul edilir (Mathieu & Dubuisson, t.y.). Biyokütlenin faydalı ürünlere dönüştürülmesi için iki yol izlenebilir: biyolojik ve termokimyasal (Sansaniwal vd., 2017). Son yıllarda, termokimyasal yollar, özellikle gazlaştırma teknolojisi, daha fazla ilgi görmüştür (Widjaya vd., 2018).

Gazlaştırma reaktörünün türüne göre, gazlaştırma sabit yataklı gazlaştırma ve akışkan yataklı gazlaştırma olarak ikiye ayrılır (Niu vd., 2013a; Rupesh vd., 2016). Akışkanlaşmanın bir özelliği olarak, akışkan yataklı gazlaştırmada uçucu kül içeriği, sabit yataklı gazlaştırmadan her zaman daha yüksektir.

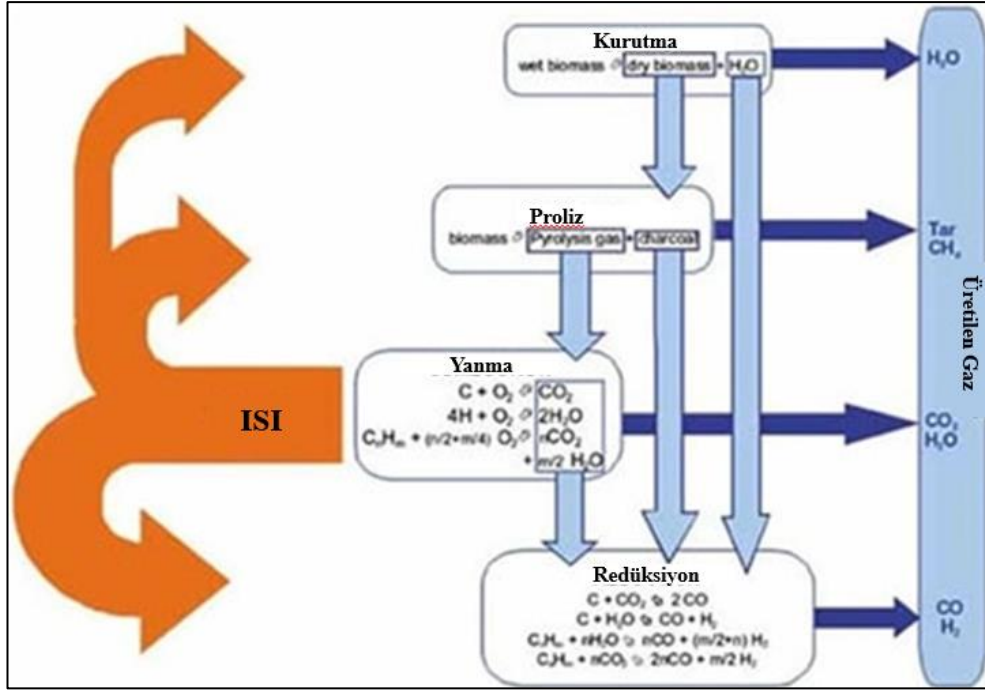
Sabit yataklı ve Akışkan yataklı gazlaştırmalarda gazlaştırma aşamaları ve üretilen sentez gazı içerikler aynıdır. Sentez gazı içeriği her iki tür gazlaştırmada H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ve diğer hidrokarbonlardan oluşur. Katı Atıklar: Kül ve yanmamış karbon kalıntıları.



**Şekil 2.3** Biyokütle gazlaştırma sürecinin şematik gösterimi (Camacho Ureña, t.y.).

Gazlaştırma aşamaları aşağıda belirtilmiştir:

- Kuruma: Yakıt ısındıkça içerisindeki nem buharlaşır. Bu adımda su/buhar çıkışı gözlemlenir.
- Piroliz: Yüksek sıcaklıkta organik maddeler gaz ve sıvı ürünlere ayrışır.
- Oksidasyon: Yakıtın bir kısmı yanarak gazlaştırma için gerekli enerjiyi sağlar.
- Redüksiyon: Karbon, su buharı ve karbondioksit ile reaksiyona girerek sentez gazı üretir.



Şekil 2.4 Gazlaştırma kimyasının şematik gösterimi (Web 3).

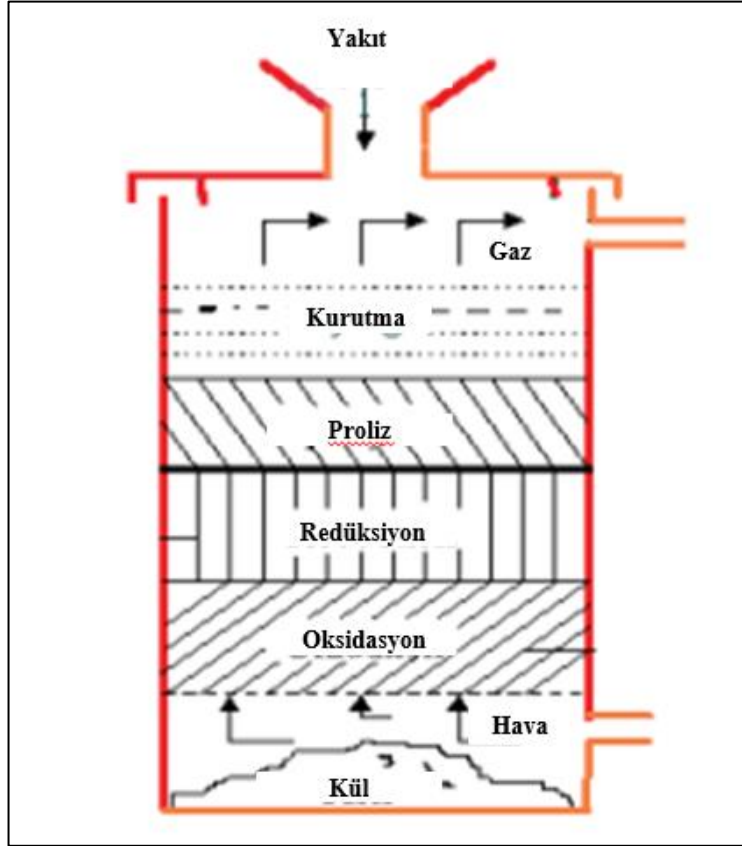
## 2.2.1 Sabit Yataklı Gazlaştırma

Sabit yataklı gazlaştırma, katı yakıtların (genellikle kömür, biyokütle veya organik atıklar) kontrollü bir ortamda kısmi yanma veya oksidasyonla gaz haline dönüştürülmesi sürecidir. Bu süreç, gazlaştırma reaktörleri kullanılarak gerçekleştirilir ve elde edilen gazlar, çeşitli enerji ve kimyasal uygulamalarda kullanılabilir. Sabit yataklı gazlaştırma reaktörleri genellikle dikey bir silindir şeklindedir ve reaktör sabit bir yatakta bulunan katı yakıtlarla doldurulur.

### a) Yukarı Akışlı (Updraft) Reaktör:

Üst yüklenmeli gazlaştırıcıda, besleme malzemesi yukarıdan, hava/gazlaştırma ortamı ise aşağıdan verilir ve bu, besleme malzemesi ile gazlaştırma ortamının akışının ters yönde olmasını sağlar. Gazlaştırma süreci sonucunda üretilen ürün gazı, gazlaştırıcının üst kısmından bir yerden çıkarılır. Üst yüklenmeli gazlaştırıcı, sıcak gazın yakıt yatağından geçip düşük sıcaklıkta gazlaştırıcıyı terk etmesi nedeniyle en yüksek verimliliğe ulaşır. Üst yüklenmeli gazlaştırıcıda üretilen ham gaz, aşırı miktarda katran içerir ve zayıf yükleme kapasitesine sahiptir (Marcantonio vd., 2019). Üst yüklenmeli

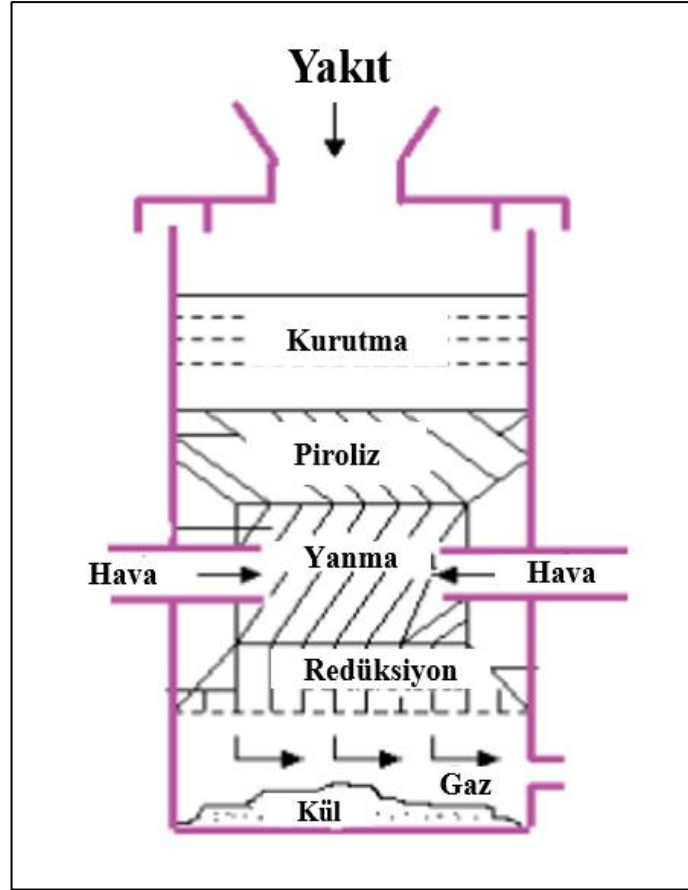
gazlaştırıcıda kurutma, piroliz, indirgeme ve oksidasyon ile ilgili farklı bölgeler aşağıda Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Yukarı akışlı reaktör (Web 2)

#### b) Aşağı Akışlı (Downdraft) Reaktör:

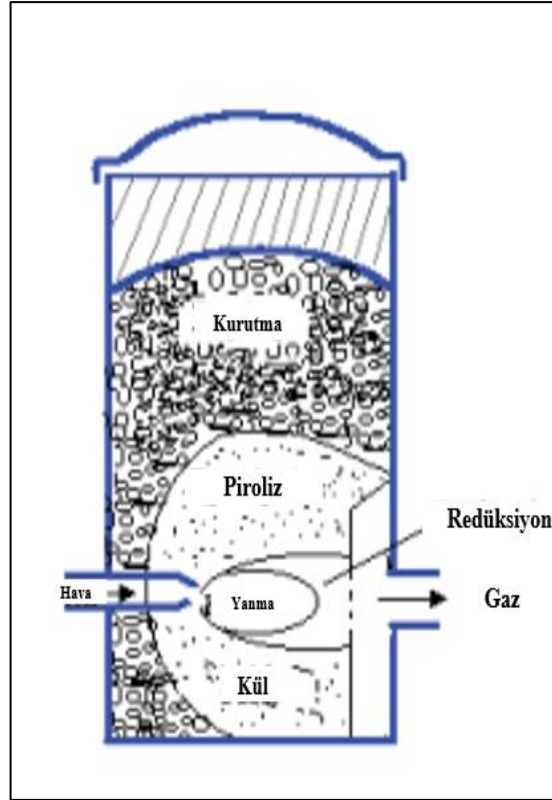
Aşağı akışlı gazlaştırıcıda, yakıt yukarıdan verilirken hava/gazlaştırma ortamı orta bölümden bir yerden verilir. Bu durumda Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, ürün gazı gazlaştırıcının alt (aşağı) bölümünden çıkarılır.



Şekil 2.5 Aşağı akışlı reaktör (Web 2).

### c) Çapraz Akışlı (Crossdraft) Reaktör:

Bu tür gazlaştırıcının yukarı akışlı ve aşağı akışlı gazlaştırıcılara göre bazı avantajları olmasına rağmen, hala çok yaygın ve ideal değildir. Bu tür gazlaştırıcının bazı dezavantajları da vardır, örneğin, tasarımın bir sonucu olarak yüksek çıkış gazı sıcaklığı ve yüksek gaz hızı. Şekil 2.7, çapraz akışlı hareketli yatak gazlaştırıcısının farklı bölümlerini göstermektedir.



**Şekil 2.6** Çapraz akışlı reaktör (Web 2).

Gazlaştırma süreci, biyokütle partikül boyutu, nem içeriği, gazlaştırma sıcaklığı ve eşdeğerlik oranı (biyokütle için kısmi oksidasyon için sağlanan hava ile stokiometrik hava arasındaki mol oranı) gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Choi vd., 2016; Susastriawan vd., 2017; Yin vd., 2012). Birçok çalışma, partikül boyutu değişiminin gazlaştırma performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Örneğin, (Yin vd., 2012), sabit yatak sisteminde şeftali budama artıklarının partikül boyutunun gazlaştırıcı performansına nasıl etki ettiğini incelemiş, küçük biyokütle partikülleri ile artan katran ve kül oluşumu ile basınç düşüşü sorunlarını belirtmişlerdir. (Patel vd., 2014), linyit kullanılarak sabit yatak aşağı akış reaktörlerinde partikül boyutunun etkilerini değerlendirmiş, küçük biyokütle partiküllerinin akış problemlerine neden olduğunu ve gaz ısı değerini düşürdüğünü sonuçlandırmışlardır.

### 2.2.2 Akışkan Yataklı Gazlaştırma

Akışkan yataklı gazlaştırma, katı yakıtların (kömür, biyokütle, atık malzemeler vb.) gazlaştırma reaktöründe, ince taneli bir yatak malzemesi (genellikle kum veya kül) ile süspansiyon halinde tutulduğu ve gazlaştırıldığı bir süreçtir. Bu süreç, reaktördeki katı

yakıt parçacıklarının ve yatak malzemesinin yoğun bir gaz akımı ile süspansiyon haline getirilmesiyle gerçekleştirilir. Akışkan yataklı gazlaştırma, homojen sıcaklık dağılımı ve yüksek ısı transferi sayesinde verimli bir gazlaştırma süreci sağlar. Akışkan yataklı gazlaştırma reaktörleri dikey bir silindir şeklinde olup, alt kısımdan gaz (hava, oksijen veya buhar) verilir. Reaktör, ince taneli bir yatak malzemesi ve katı yakıt parçacıkları ile doldurulur.

### **a) Dolaşımli Akışkan Yatak (Circulating Fluidized Bed):**

Gaz akımı, yatak malzemesi ve yakıtı yüksek hızda süspansiyon halinde tutar ve bu malzemeler reaktörden çıkar. Çıkan malzemeler bir siklon veya filtre yardımıyla ayrılır ve yeniden reaktöre döner. En önemli avantajları yüksek gazlaştırma verimi ve daha düşük tar oluşumudur. Dezavantajları ise daha karmaşık sistem ve yüksek enerji tüketimidir.

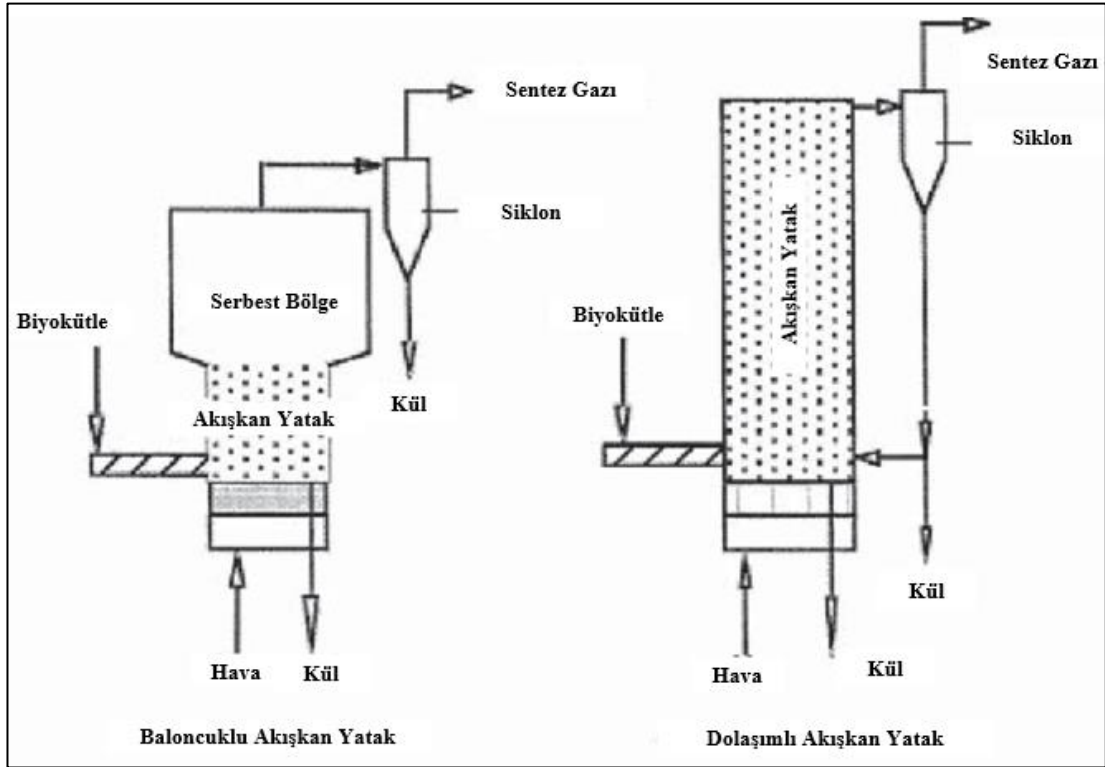
Tipik bir sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcısında, katı yakıt parçacıkları kontrollü miktarda gazlaştırma ortamı, örneğin oksijen, hava ve buhar veya bunların bir kombinasyonu ile temas ettirilir. Katı yakıt gazlaştırıcıda kurutma, piroliz, oksidasyon ve indirgeme gibi farklı aşamalardan geçer. Sirkülasyonlu akışkan yatak gazlaştırıcıda bu aşamaları ayrı ayrı ayırt etmek zordur çünkü yatak sürekli olarak hareket eder, sirküle eder ve akışkanlaşır. Şekil 2.8'de Dolaşımli akışkan yatak gazlaştırılmasının farklı bölümleri gösterilmektedir.

### **b) Baloncuklu Akışkan Yatak (Bubbling Fluidized Bed):**

Gaz akımı, yatak malzemesi ve yakıtı düşük hızda süspansiyon halinde tutar. Yatak malzemesi ve yakıt parçacıkları arasında baloncuklar oluşur. Homojen sıcaklık dağılımı, yüksek ısı transferi gibi avantajlarının yanı sıra tar oluşumu, gazın temizlenmesi gerekliliği gibi dezavantajları da olabilir.

İnce taneli bir malzemenin hareketli yatağına biyokütle veya yakıt eklenir ve hava alttan verilir. Tipik olarak, yatak sıcaklığı 800-950°C aralığındadır. Gazlaştırma ortamının varlığında biyokütle, sıcak yatakta gazlaştırılarak gaz bileşenleri ve kömür oluşturur. Sıcak yatak malzemesi ile temas, yüksek moleküler ağırlıklı bileşiklerin çatlayarak bir miktar katran içeren ürün gazı oluşmasına neden olur. Şekil 2.8'de

kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcı ve sirkülayonlu akışkan yatak gazlaştırıcının bazı karşılaştırmaları verilmiştir.



Şekil 2.7 Baloncuklu akışkan yataklı gazlaştırıcı ve dolaşımli akışkan yataklı gazlaştırıcı (Web 3).

(Y. Zhang vd., 2009), Aspen Plus simülatörü kullanarak biyokütlenin buhar gazlaştırması yoluyla metanol üretimini simüle etmek için kinetik bir model geliştirmiştir. (Nikoo & Mahinpey, 2008), bir kabarcıklı akışkan yatakta yatak hidrodinamiklerini ve reaksiyon kinetiklerini entegre ederek biyokütleden türetilmiş sentez gazı için bir model geliştirmiştir. (Tremel vd., 2013), küçük ölçekli sentetik doğal gaz üretmek için 550 kW termal girişe sahip dolaylı bir gazlaştırıcı için bir Aspen Plus modeli önermiştir. (Zheng vd., 2013), farklı yakıtlar, kurutucular ve gaz türbini sıkıştırma basıncının sürecin verimliliği üzerindeki etkisini incelemek için Aspen Plus süreci simülatörünü kullanmıştır. (Niu vd., 2013b), çift akışkan yataklı gazlaştırıcıda belediye katı atıklarının gazlaştırılması için detaylı bir Aspen Plus modeli geliştirmiştir.

## 2.3 Kimya Mühendisliğinde Süreç Simülasyon Yazılımının Uygulamaları

Biyokütle gazlaştırmadan üretilen sentez gazının kalitesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. (Tavares vd., 2020), buhar kullanarak kendi kendine ısıtmalı kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcıda şeftali çekirdeklerinin gazlaştırılması sırasında üretilen gazın bileşimindeki farklı parametrelerin etkisini incelemiştir. Gazlaştırma sıcaklığının 750°C'den 850°C'ye yükseltilmesi durumunda daha yüksek kalitede sentez gazı gözlemlenmiştir. Ancak, CO konsantrasyonunun azalması sonucunda alt ısı değerinde olumsuz bir etki tespit edilmiştir. Benzer bir etki, (Shehzad vd., 2016) tarafından, dolaşimli akışkan yatak gazlaştırıcıda belediye katı atıklarının gazlaştırılması sırasında biyokütlenin nem içeriğinde de gözlemlenmiştir.

(Pio vd., 2017), pilot ölçekli kabarcıklı akışkan yatak gazlaştırıcıda elde edilen deneysel verileri, biyokütle gazlaştırma ile ilgili literatürde bildirilen deneysel verilerle entegre etmişlerdir. Üretilen gazın kalitesi ve bileşimi ile süreç performans parametrelerinin yakıt türü, işletme koşulları ve reaktör tasarımına derinlemesine bağlı olduğunu gözlemlenmiştir. Örneğin, analiz edilen sonuçlarda, stokiyometrik oranın üretilen gazın bileşimi ve süreç performansı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu gözlemlenmiştir.

(N. D. Couto vd., 2017), Miscanthus'un hava ile O<sub>2</sub> (zenginleştirilmiş hava), buhar ve CO<sub>2</sub> karışımları ile gazlaştırılmasının etkisini ve üretilen sentez gazının bileşimi ve olası uygulamalarını karşılaştırmışlardır. Güç üretimi ve Fisher–Tropsch sentezi için hava–O<sub>2</sub> karışımlarının kullanılmasını önerirken, hava–buhar ve hava–CO<sub>2</sub> karışımlarının sırasıyla sentez gazındaki H<sub>2</sub> ve CO içeriğini artırdığını belirtmişlerdir.

Stokiyometrik termodinamik modeller, gazlaştırma sürecini tanımlamak için bir dizi ana kimyasal reaksiyonu kullanırken, stokiyometrik olmayan modeller, sistemin Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonu üzerine kuruludur (Puig-Arnavat vd., 2010a).

(George vd., 2016), biyokütle gazlaştırma için stokiyometrik bir modelle ilişkili sayısal yaklaşımı formüle etmişler, (Li vd., t.y.) ise pilot dolaşimli akışkan yatak kömür gazlaştırıcısının performansını öngörmek için stokiyometrik olmayan bir denge modeli önermişlerdir. Diğer yazarlar, odun yongaları, kağıt, pirinç kabuğu ve belediye atıkları (Zainal vd., t.y.) ve kaju fıstığı kabukları (Ramanan vd., 2008) gibi farklı biyoküteller kullanarak, alttan yukarıya gazlaştırıcıda denklik oranı, nem içeriği ve

reaksiyon sıcaklığının etkisini değerlendirmek için stokiyometrik modeller geliştirmişlerdir.

Biyokütle gazlaştırıcısında gerçekleşen kimyasal reaksiyonların sayısı ve karmaşıklığı, süreç simülatörlerinin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Aspen Plus, geniş bir özellik kütüphanesi ve belirli süreç operasyonlarını simüle etmek için operasyon blokları içeren ticari bir yazılımdır (**Puig-Arnavat vd., 2010b**). Gazlaştırma sürecinin her adımını bir blokta tanımlanabilir ve test edilebilir, ardından küresel sürece entegre edilebilir. Bu yazılım, biyokütle veya kül gibi konvansiyonel olmayan bileşenleri kullanabilme yeteneği gösterir (**Mitta vd., 2006**). Birçok yazar, biyokütlenin gazlaştırılmasını içeren süreçleri simüle etmek için bu aracı kullanmıştır. (**Pala vd., 2017**), Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonuna dayanan bir termodinamik model geliştirmişlerdir. Termodinamik özellikler, Boston–Mathias modifikasyonu ile Peng–Robinson durumu denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Model, 0.3 m çapındaki bir akışkan yatak gazlaştırıcıda elde edilen odun kalıntılarına ait deneysel verilerle doğrulanmıştır. (**Monir vd., 2018**), basınç ve sıcaklığın sentez gazı üretimi üzerindeki etkisini incelemek için bir simülasyon modeli tanımlamışlardır. Gazlaştırma süreci, Aspen Plus modelinde dört farklı blokla temsil edilen dört aşamaya bölünmüştür. Deneysel veriler, boş meyve demetleri ve kömür karışımı kullanılarak pilot ölçekli alttan yukarıya bir reaktörde elde edilmiştir. (**Dhanavath vd., 2018**), sabit yatak gazlaştırıcıda gazlaştırma ajanı olarak oksijen–buhar etkisini incelemek için biyokütle besleme maddesi olarak karanja pres tohum pastasını kullanmışlar ve deneysel verileri Aspen Plus ile geliştirilen bir denge modeli ile simüle etmişlerdir. Diğer çalışmalarda, buhar–biyokütle oranı, hava denklik oranı ve sıcaklık gibi süreç koşullarının bir fonksiyonu olarak çeşitli biyoküteller kullanılarak sentez gazı kalitesindeki değişiklikleri değerlendirmek için duyarlılık analizleri yapılmıştır (**Haugen vd., 2015; Villarini vd., 2019b**). (**Puig-Gamero vd., 2018**), çift odacıklı gazlaştırıcıda çam gazlaştırmasıyla elde edilen sentez gazından metanol üretimini incelemiştir. Buhar ve sıcaklığın gaz kalitesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Denge modeli, gazlaştırma adımından önce gaz ve kömürün ayrılmasını dikkate almıştır.

## 2.4 Fındık Kabuğunun Yapısı ve Potansiyeli

Ülkemizde dünya fındık üretiminin yaklaşık %70'ini karşıladığımız göz önüne alındığında, fındık üretimi sonrasında büyük miktarda kabuk atığı ortaya çıkmaktadır.

Bu kabuklar genellikle ısı enerjisi üretimi için yakılmakta ve bazen daha yüksek ısı elde etmek amacıyla briketlenerek kullanılabilir. Ancak her iki kullanım yöntemi de sonucunda, tarımsal atık olarak değerlendirilen kabukların yanması sonucu kül oluşmaktadır. Fındık kabuğu küllerinde bulunan yüksek miktardaki silis sayesinde, puzolanik özellik göstererek inşaat sektöründe özellikle beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılabilir.

Fındık, İtalya'da en önemli ve en çok araştırılan ürünlerden biridir ve özellikle (ama sadece) orta bölgelerde yetiştirilir. Roma, Avellino ve Napoli illeri en önemli fındık yetiştirme alanlarına sahip olmakla birlikte, Cuneo ve Messina'da da önemli bölgeler bulunmaktadır. Bu alanlar, İtalya'nın toplam fındık üretiminin yaklaşık %80'ini kapsar (**Bucini vd., t.y.; Franco vd., t.y.-a, t.y.-b; Papparatti & Speranza, t.y.**). Fındık kabukları, bir atık yan ürün olarak, şu anda (bazı durumlarda) ev tipi ısıtma sistemlerinde yakıt olarak kullanılmaktadır. Döngüsel ekonomi perspektifinden bakıldığında, bu kabuklar daha geniş ve verimli tesislerde daha iyi değerlendirilebilir.

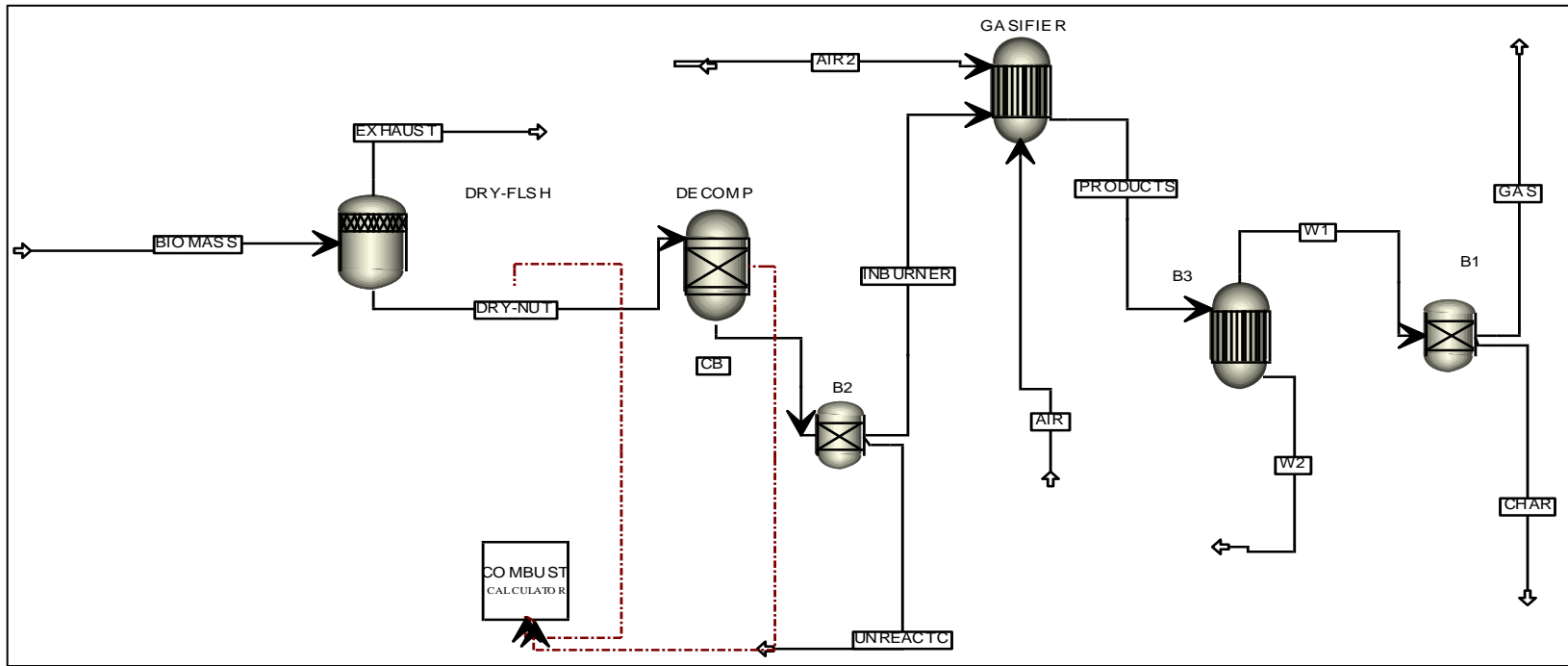
Fındık kabukları lignoselülozik maddelerdir; dolayısıyla doğrudan yakma veya gazlaştırma gibi termo-kimyasal süreçlerde karlı bir şekilde yakıt olarak kullanılabilirler. Özellikle gazlaştırma süreci, bu tür maddelerin uygulanabilirliğini genişleten bir yakıt gazı üretir. Gazlaştırma, çoğunlukla CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> ve katran (gazlaştırma sırasında salınan kondenslenebilir hidrokarbonlar) içeren bir gaz karışımı olan sentez gazı üretmektedir. Sentez gazının bileşimi, kullanılan biyokütlenin düşük ısı değeri ve nem oranı, oksidan türü (hava, saf oksijen, buhar) ve teknolojiler ile eşdeğer oran, sıcaklık ve basınç gibi işletme koşullarına bağlıdır. Oksidan ajan olarak hava kullanımı, ısı değeri açısından en düşük kaliteli sentez gazını (6 MJ/Nm<sup>3</sup>'ten az) üretmektedir. Oksijen kullanıldığında bu değer 9-10 MJ/Nm<sup>3</sup>'e, buhar kullanıldığında ise 17-18 MJ/Nm<sup>3</sup>'e kadar çıkmaktadır. Buhar, genellikle akışkan yataklı gazlaştırıcılarda kullanılan bir oksidan olup, yüksek hidrojen içeriğine sahip sentez gazı sağlamaktadır (**Mitta vd., 2006; Monir vd., 2018; Pala vd., 2017; Puig-Arnabat vd., 2010b**). Sentez gazının bileşimi, partikül, katran ve kükürt bazlı bileşikler gibi diğer elementler dahil olmak üzere safsızlıkların varlığından da etkilenir ve bu nedenle sentez gazı kullanılmadan önce bir temizleme süreci gerektirmektedir (**N. Couto vd., 2013; Dabai vd., 2014; Mckendry, t.y.-b, t.y.-a; Sisinni vd., 2013**). Bu nedenle, yüksek ısı değeri ve düşük partikül ile katran içeriğine sahip sentez gazı elde etmek çok önemlidir. (**Cerone & Zimbardi, 2018**),

badem ve fındıkların yukarı akışlı gazlaştırıcı ile gazlaştırılmasını ve 20-30 kg/saat biyokütle kapasitesiyle sentez gazı üretimini analiz etmişler. Deneysel verileri, eşdeğer oranların tam yanma ve su reaksiyonu ile ilişkisi olarak yüzey yanıt analizi ile değerlendirmişler. Sadece hava kullanarak eşdeğer oranı ( $O_2$ ) 0.24'te sentez gazındaki  $H_2$  oranı 0.33 iken, buhar ekleyerek eşdeğer oranı ( $H_2O$ ) 0.28'de bu oran 1.0 değerine ulaşmıştır.

### 3. PROSES MODELLEMESİ VE DİZAYN

#### 3.1 Aspen Plus Modelleme ve Simülasyon

Bu çalışmada Aspen Plus programı aşağıdaki gibi kullanılmıştır. Tüm sonuçları içeren işlem adımları sırası ile tanımlanmıştır.



Proses Dizaynı.

3.1

Şekil

Model, Aspen Tech'in kendi validasyon yöntemlerinden biri olan katı maddelerin gazlaştırılması yönergeleri ile tasarlanmıştır. Daha sonra üzerinde literatürdeki ultimate ve proxymate analiz sonuçları girilirken bazı düzenlemeler ve eklemeler yapılmıştır.

Proses verilerinin Aspen Plus programına girilirken elde edilen görüntüleri Ekler kısmında yer almaktadır.

A1.1'de prosesin oluşturulmasının ilk adımları olan özelliklerin belirlenmesinde hesaplama seçenekleri gösterilmiştir. Buhar fazındaki su bileşiminin minimumu 0.98, Ekserji referans çevre sıcaklığı 25 °C ve Ekserji referans çevre basıncı 1.01325 bar olarak seçilmiştir.

Bileşen türleri geleneksel, katı ve geleneksel olmayan olarak seçilmiştir. Geleneksel bileşenler Nitrojen (N<sub>2</sub>), Oksijen (O<sub>2</sub>), Su (H<sub>2</sub>O), Nitrojen-dioksit (NO<sub>2</sub>), Nitrik-oksit (NO), Kükürt (S), Kükürt-dioksit (SO<sub>2</sub>), Kükürt-trioksit (SO<sub>3</sub>), Hidrojen (H<sub>2</sub>), Klor (Cl<sub>2</sub>), Hidrojen klorür (HCl), Karbon-monoksit (CO), Karbon-dioksit (CO<sub>2</sub>), Metan (CH<sub>4</sub>) olarak seçilmiştir. Geleneksel olmayanlar kömür ve küldür. Katı olan ise Karbon-Grafit (C)'tir.






A1.3'te gösterildiği gibi yöntem filtresi COMMON olarak seçilmiştir ve temel yöntem İDEAL olarak belirlenmiştir.

Simülasyon ayarları yapılmıştır. A1.4'te gösterildiği gibi, Global birim seti METCBAR, Giriş modu Steady-State, Akış sınıfı MCINCPSD, Akış tabanı Kütle, Ortam basıncı ise 1.01325 bar olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan model de başlangıç seçenekleri doldurulmuştur. Birim Seti olarak METCBAR seçilmiştir. Akış kütleli olarak belirlenmiş ve açık hava basıncı 1 bar olarak alınmıştır.

A1.5'te proses için tasarlanan akışlar yer almaktadır. Hava, sentez gazı oluşumu için olmazsa olmaz bir akıştır (**HajiHashemi vd., 2023a**). Air2 kullanımda değildir ancak ihtiyaç halinde kullanılmak amacıyla eklenmiştir. Biyokütle gazlaştırmak istediğimiz biyolojik atıkların; proxymate, ultimate ve sulfanal verilerini girdiğimiz alandır (**Zaman vd., 2020**). Diğer akışlar proses üzerinde olması gereken yolları belirtmektedir.

**Tablo 3.1.** Aspen Plus'taki birim işlem bloklarının tanımları.

Aspen Plus Blok Türü	Blok Kimliği (ID)	Açıklama
Flash2  DRY-FLSH	DRY FLASH	Seperatör-Kurumuş biyokütleyi nemli gazdan ani genleşme (flashing) ile ayırır.
RYield  DECOMP	DECOMP	Verim reaktörü-geleneksel olmayan biyokütleyi geleneksel biyokütleye dönüştürür.
Sep  B2	B1,B2	Separatör- biyokütle kaynaklı sentetik gazı nem, parçacıklar, katranlar ve asidik bileşenlerden ayırır
RGibbs  GASIFIER	GASIFIER	Gibbs serbest enerji reaktörü- gazifikasyon ve reformasyon reaksiyonlarını simüle eder
REQUIL  B3	DESULPH B3	REquil reaktörü, sorbentin H2S ile reaksiyonunu simüle eder

A1.6'da, flaş tipi sıcaklık ve basınç olarak seçilmiştir. Sıcaklık 25°C, basınç 1 bar olarak belirlenmiştir. Toplam akış tabanı kütle olup, toplam akış hızı 55.6 kg/saat'tir. N<sub>2</sub> değeri 0.79, O<sub>2</sub> değeri ise 0.21'dir.

A1.7'de proste olmas planlanan bloklar yer almaktadır. B1 Separatörü elde edilmesi istenen gazları belirlemek için seçilmiştir. B2 Separatörü C dağılımını optimize etmek için ayrışma oranı belirlemede rol almıştır (Al Amodi vd., 2013; Díaz González vd.,

2023; Rasid vd., 2020; Tavares vd., 2020). B3 Requil denge reaksiyonları oluşturmak ve oluşan reaksiyon ısılarını kontrol etmek için eklenmiştir (Cohce vd., 2011). Decompozition, deneysel verilerden elde edilen bileşenlerin modellenmiş bileşenlerle karşılaştırılmasını sağlamak ve bu modelin doğruluğunu değerlendirmek için seçilmiştir (Lan vd., 2018). Dry-Flash, Biyokütleyi ihtiyaç halinde kurutma işlemi için eklenmiştir ancak proste kurutmaya ihtiyaç duyulmamıştır (Marcantonio vd., 2019). Gasifier Reaktörü, biyokütlenin gazlaştırma işlemi simüle etmek için eklenen bir modüldür (Al Amoodi vd., 2013). Gazlaştırma, katı yakıtların yüksek sıcaklık ve basınç altında, oksijen veya buhar gibi bir gazla temas ettirilerek yakıtın gazlara dönüştürülmesi işlemidir (Hussain vd., 2018; Mehdi vd., 2023; Niu vd., 2021). (Jayah vd., 2003) çay kurutmak için yapmış olduğu deneysel veriler kullanılarak çalışma ile doğrulanmıştır.

## 3.2 Duyarlılık Analizi

### 3.2.1 Fındık Kabuğu Çalışmasından Alınan Verilerin Kullanımı

A1.8’de duyarlılık analizleri için girilen bazı veriler gösterilmiştir. Hava kg/saat olarak beslenmiştir. Hava beslemesinin duyarlılık analizlerinde etkisinin görülmesi için 0’ dan 50’ye kadar 5’in katları şeklinde artması için gerekli veriler girilmiştir.

Değişkenler (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) tanımlanmıştır. Her bir gaz fazı için; besleme tipi olarak mol fraksiyonu seçilmiştir. Fiziksel hallerinin gaz olduğu ve karışım şeklinde beslendiği belirtilmiştir. Hava değişiminin (kg/saat) sentez gazı üzerindeki N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve CH<sub>4</sub> oranlarının sonuçları gösterilmektedir.

Sıcaklık birimi °C olarak belirlenmiştir. Sıcaklık değişiminin duyarlılık analizlerinde etkisinin görülmesi için 800’den 1200’e kadar 50’nin katları şeklinde artması için gerekli veriler girilmiştir.

Değişkenler (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>) tanımlanmıştır. Her bir gaz fazı için; besleme tipi olarak mol fraksiyonu seçilmiştir. Fiziksel hallerinin gaz olduğu ve karışım şeklinde beslendiği belirtilmiştir.

Sıcaklık değişiminin (°C) sentez gazı üzerindeki N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO ve CH<sub>4</sub> oranlarının sonuçları gösterilmektedir.

**Tablo 3.2.** Literatürden alınan katı atıkların Proximate analizleri (Dogru vd., 2002).

<b>Proximate Analizi (%)</b>	
Moisture	12,450
Volatile matter	62,700
Fixed carbon	24,080
Ash	0,770

**Tablo 3.3.** Literatürden alınan katı atıkların Ultimate analizleri (Dogru vd., 2002).

<b>Ultimate Analizi (%)</b>	
Carbon	46,760
Hydrogen	5,760
Oxygen	45,830
Nitrogen	0,220
Sulphur	0,670

**Tablo 3.4.** Prosese beslenen kütle, hava ve sıcaklık verileri (Dogru vd., 2002).

<b>Beslenen Kütle (Kg)</b>	<b>Beslenen Hava (kg/hr)</b>	<b>Sıcaklık ( C )</b>
4,7	8,37	1217
3,19	5,72	873
4,48	8,38	1135
4,02	7,63	1009
4,06	7,76	1031
4,93	9,49	1117
5,4	10,53	1027
3,69	7,24	1027
2,64	5,22	845
1,73	3,67	827
2,15	4,58	838

Tablo 3.2, Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de gösterilen veriler Doğru ve arkadaşlarının yapmış oldukları Fındık Kabuklarının Aşağı Akışlı Gazlaştırıcıda gazlaştırılması çalışmasından alınmıştır (Dogru vd., 2002). Oluşturulan modelde yukarıdaki tablolarda verilen değerler uygulanarak RMSE ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar kısmında paylaşılarak değerlendirmeleri yapılacaktır.

Doğru ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada Proxymate analiz, nem içeriği, uçucu madde, kül ve sabit karbon miktarını belirlemişler. Ultimate analizinde, kuru fındık kabuğundaki karbon, hidrojen, oksijen, azot, kükürt ve kül içeriğini belirlemişler. Bu analizler, biyokütlenin gazlaştırma için uygunluğunu doğrudan göstermese de gazın brüt ısı değeri ve gazlaştırıcıdaki sıcaklık sınırlarını tahmin etmek için kullanmışlar.

Fındık kabuklarının Brüt kalorifik değerini deneysel olarak 17.36 MJ/kg olarak belirlemişler ve teorik olarak 18.08 MJ/kg olarak hesaplamışlar. Yakıtın nem içeriği, gazlaştırıcının işleyişini ve ürün gazının kalitesini büyük ölçüde etkilediğini gözlemlemişler. Aşağı akışlı sistemler için nem içeriği genellikle kuru bazda %40 olarak kabul edilirken, fındık kabuklarının nem içeriği yaklaşık %12'dir. Bu sonuçları, motor uygulamaları için uygun bir aralık olarak belirlemişler. Uçucu madde miktarının yüksek olması genellikle ürün gazında daha fazla katran bulunmasına neden olduğunu fark etmişler. Ancak fındık kabuklarının uçucu maddesi odun talaşından daha düşüktür, bu nedenle ürün gazında düşük katran içeriği gözlemlemişler. Ayrıca, fındık kabuklarının kül içeriği düşüktür ve bu nedenle gazlaştırıcıdan külün daha az sıklıkta ve kesintisiz olarak çıkarılmasının mümkün olacağını düşünmüşler (**Dogru vd., 2002**). Literatürden aldığımız bu veriler ışığında duyarlılık analizlerinde hava değişiminin sonuçlara etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Bunun için 25 kg/saat ve 75 kg/saat debileri arasında hava beslemesi yapılmıştır.

### **3.2.2 Çay Yapraklarının Kurutulması Çalışmasından Alınan Verilerin Kullanımı**

Hava kg/saat olarak beslenmiştir. Hava beslemesinin duyarlılık analizlerinde etkisinin görülmesi için 25'ten 75'e kadar 5'in katları şeklinde artması için gerekli veriler girilmiştir.

Değişkenler ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) tanımlanmıştır. Her bir gaz fazı için; besleme tipi olarak mol fraksiyonu seçilmiştir. Fiziksel hallerinin gaz olduğu ve karışım şeklinde beslendiği belirtilmiştir.

Duyarlılık analizlerinde sıcaklık değişiminin sonuçları alınmıştır. Bunun için 800 °C ve 1200 °C sıcaklıkları arasında proses çalıştırılmıştır.

Değişkenler ( $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) tanımlanmıştır. Her bir gaz fazı için; besleme tipi olarak mol fraksiyonu seçilmiştir. Fiziksel hallerinin gaz olduğu ve karışım şeklinde beslendiği belirtilmiştir.

**Tablo 3.5.** Literatürden alınan katı atıkların Proximate analizleri (Jayah vd., 2003).

<b>Proximate Analizi (%)</b>	
Volatile matter	80,1
Fixed carbon	19,2
Ash	0,7

**Tablo 3.6.** Literatürden alınan katı atıkların Ultimate analizleri (Jayah vd., 2003)

<b>Ultimate Analizi (%)</b>	
Carbon	50,6
Hydrogen	6,5
Oxygen	42
Nitrogen	0,2
Ash	0,7

**Tablo 3.7.** Prosese beslenen kütle, hava ve sıcaklık verileri (Jayah vd., 2003).

<b>No</b>	<b>Beslenen Kütle</b>	<b>Beslenen Hava</b>	<b>Sıcaklık</b>
1	18,5	38,0	500,0
2	16,0	35,0	500,0
3	14,7	35,0	500,0
4	16,0	31,0	480,0
5	15,2	32,0	420,0
6	14,0	32,0	400,0
7	14,7	27,0	380,0
8	13,8	28,0	400,0
9	12,5	30,0	390,0

Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7’de gösterilen veriler Jayah ve arkadaşlarının yapmış oldukları Aşağı Akışlı Gazlaştırıcıda çay yapraklarının gazlaştırılması (Jayah vd., 2003) çalışmasından alınmıştır. Oluşturulan modelde yukarıdaki tablolarda verilen değerler uygulanarak RMSE ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuçlar kısmında paylaşarak değerlendirmeleri yapılacaktır.

## 4. SONUÇLAR

### 4.1 Proses Validasyonu

Proses validasyonu yukarıda belirtildiği şekilde yapılmıştır. Tablo 3.4 ve Tablo 3.7’de verilen kütle, hava ve sıcaklık değerleri prosese girildiğinde sırası ile Tablo 4.2 ve Tablo 4.4’deki yüzdesel oranlarda sentez gazı sonuçları elde edilmiştir. Kök ortalama kare hatası (RMSE) değeri, belirli bir parametre düzeyinde model ve deneysel veri noktaları arasındaki ortalama varyasyonun ölçüsüdür. Makaleden alınan veriler ile procesten çıkan sonuçlardan RMSE değerleri hesaplanmıştır. Çalışmamızda hedefimiz RMSE hesaplamasının literatür verileri ile hesaplandığında 10’un altında olmasıdır. Öncelikle Fındık Kabuğu makalesinden alınan veriler tasarlanan prosese işlenmiştir. Moleküllerin karşılaştırmalarına göre Fındık Kabuğu makalesinden alınan veriler proceste çalışmıştır. Ancak RMSE değerleri 10’un altında kalmıştır. Dolayısı ile tasarlanan model farklı bir biyokütleyle ait veri setleri ile tekrar çalıştırılmak istenmiştir.

Çay yaprakları çalışmasından alınan sonuçlar doğrultusunda proses RMSE değerleri iyi çıkmıştır. Alınan veriler ışığında prosesin düzgün çalıştığı görülmüştür.

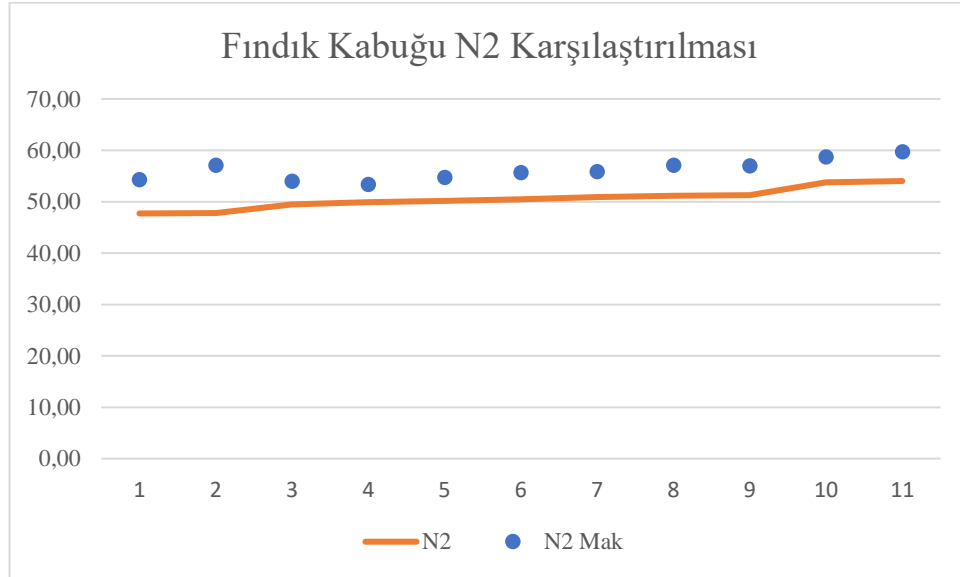
**Tablo 4.1.** Fındık kabuğu çalışmasından alınan sonuçlar(Doğru vd., 2002)

% N <sub>2</sub> Makale	%H <sub>2</sub> Makale	% CO Makale	% CO <sub>2</sub> Makale
54,24	13,83	18,41	11,12
57,05	14,77	14,41	11,42
53,95	11,86	19,89	11,25
53,33	13,13	20,66	9,52
54,71	12,67	19,63	10,02
55,65	11,33	18,99	11,09
55,83	11,11	18,56	11,22
57,07	14,12	16,8	9,93
56,96	14,77	12,08	13,02
58,67	14,77	8,56	16,33
59,67	14,62	8,92	13,92

**Tablo 4.2.** Prosesle beslenen Fındık Kabuğu makale verileri sonucunda alınan sentez gazı çıktıları.

% N <sub>2</sub>	% H <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>	RMSE
47,71	9,66	24,10	18,53	12,136
47,82	9,76	23,48	18,94	15,788
49,45	8,49	22,28	19,78	10,487
49,92	8,23	21,63	20,21	12,287
50,17	8,05	21,40	20,38	12,341
50,46	7,83	21,20	20,51	11,530
50,90	7,57	20,62	20,91	11,617
51,14	7,41	20,36	21,09	14,742
51,30	7,40	19,92	21,38	14,758
53,80	5,80	17,07	23,33	15,019
54,02	5,66	16,82	23,50	16,323

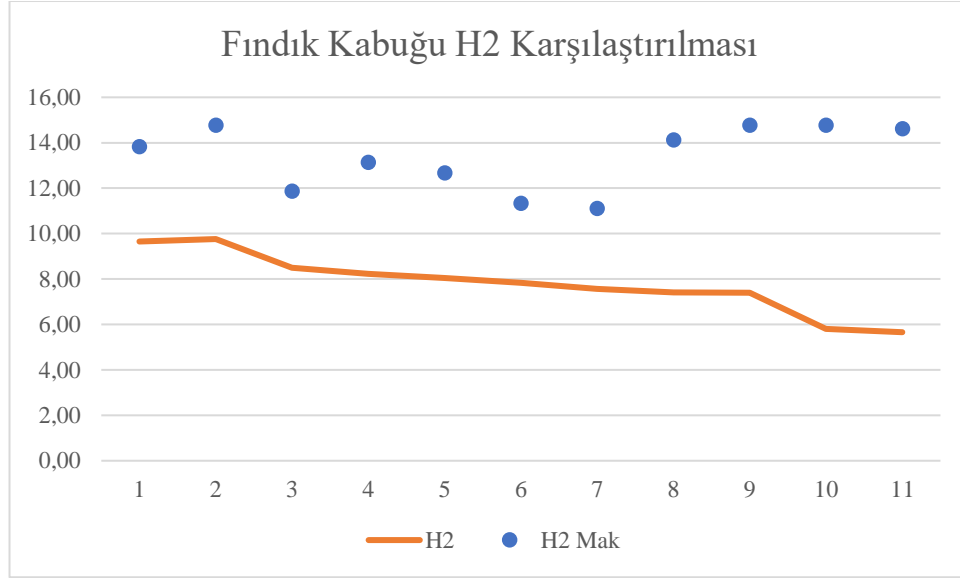
RMSE hesaplaması yapıldıktan sonra; prosesle sıcaklık, basınç değişimlerinin etkisi ve dönüşüm oranı değişimlerinin sonuçlara etkisi incelenmiştir. Proses şartları, B3 (Requil) reaktöründe; 1200 °C sıcaklık, 0,9 bar basınç ve Gazlaştırma reaktöründe; 800 °C sıcaklık, 1 bar basınca ayarlanmıştır. Dönüşüm oranı ise B2 separatöründe 0,2 olarak belirlenmiştir. En iyi RMSE sonuçları belirlenen bu proses şartları ile alınmıştır.



**Şekil 4.1** Fındık kabuğu makalesinden alınan N<sub>2</sub> ve modellenen prosesle çıkan N<sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması.

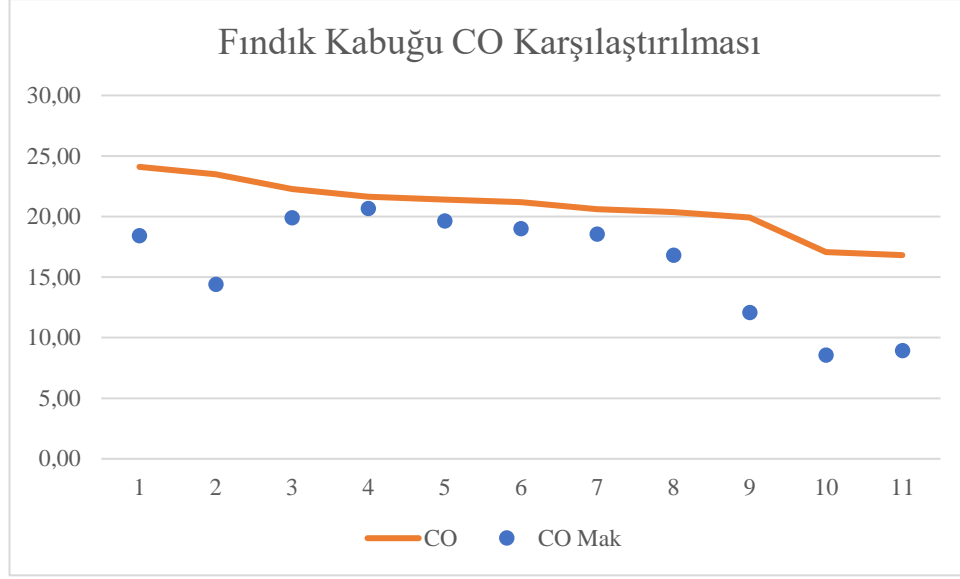
Doğru ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada N<sub>2</sub> değerini 50-60 arasında bulmuşlardır. Prosesle beslenen hava miktarı arttıkça N<sub>2</sub> değeri artmıştır. Havanın

içeriğinde bulunan  $N_2$ 'nin %79 olduğu düşünülürken bu oranın gazlaştırmanın doğasında olması normal karşılanmıştır. Bizim geliştirdiğimiz modelde de benzer şekilde hava miktarı arttıkça  $N_2$  değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Trend olarak birbirine benzer sonuçlar alınmıştır.

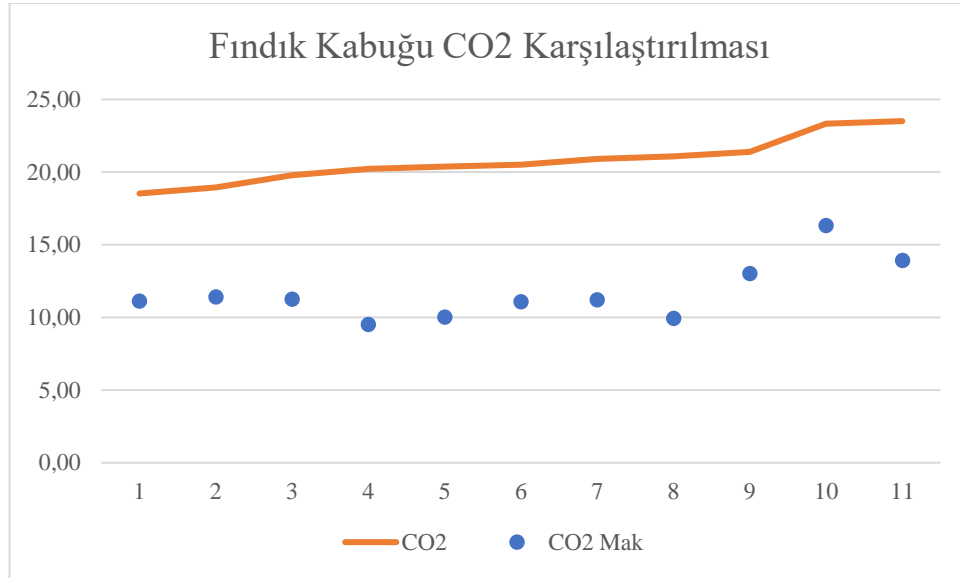


**Şekil 4.2** Fındık kabuğu makalesinden alınan  $H_2$  ve modellenen prosesten çıkan  $H_2$  oranlarının karşılaştırılması.

Literatürdeki verilerde  $H_2$  gazının bileşimi fındık kabukları için %10-15 aralığında değişmektedir. Literatürden alınan verilerde de benzer aralıkta sonuçlar vardır. Geliştirilen modelde ise  $H_2$  gazının bileşimi oldukça düşük kalmıştır. Dolayısı ile  $H_2$  verimi üzerine doğru bir karşılaştırma yapılamamıştır (Paparatti & Speranza, t.y.; Puig-Gamero vd., 2018).



**Şekil 4.3** Fındık kabuğu makalesinden alınan CO ve modellenen prosesten çıkan CO oranlarının karşılaştırılması.



**Şekil 4.4** Fındık kabuğu makalesinden alınan CO<sub>2</sub> ve modellenen prosesten çıkan CO<sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.1, 4.2, 4,3 4,4 ve 4.5'teki grafiklerde (Dogru vd., 2002) yapmış oldukları çalışmadan alınan sonuçlar ve geliştirilen prosesten alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında özellikle N<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları için makale verileri ile karşılaştırılmasında trend çizgilerinin birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar bizler için oluşturulan proses parametreleri ve yapısı açısından uygunluğunu göstermiştir. Ancak, hesaplanan RMSE değerleri incelendiğinde 10'un üzerinde olduğu görülmüştür. Bu sebeple farklı bir biyokütle türü olan Çay yapraklarının kurutulması ile ilgili çalışma verileri alınarak proses çalıştırılmıştır.

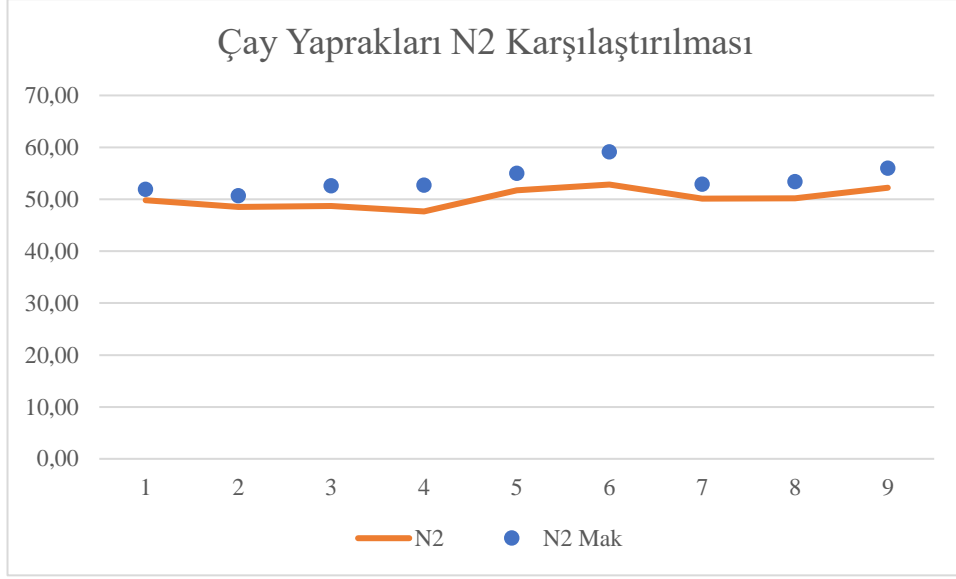
**Tablo 4.3.** Çay Yaprakları makalesinden alınan sonuçlar (**Jayah vd., 2003**)

<b>N<sub>2</sub> Makale</b>	<b>H<sub>2</sub> Makale</b>	<b>CO Makale</b>	<b>CO<sub>2</sub> Makale</b>
51,9	17,2	19,6	9,9
50,7	18,3	20,2	9,7
52,6	17,2	19,4	9,7
52,7	17	18,4	10,6
55	13,2	19,7	10,8
59,1	12,5	18,9	8,5
52,9	15,5	19,1	11,4
53,4	12,7	22,1	10,5
56	13	19,1	10,7

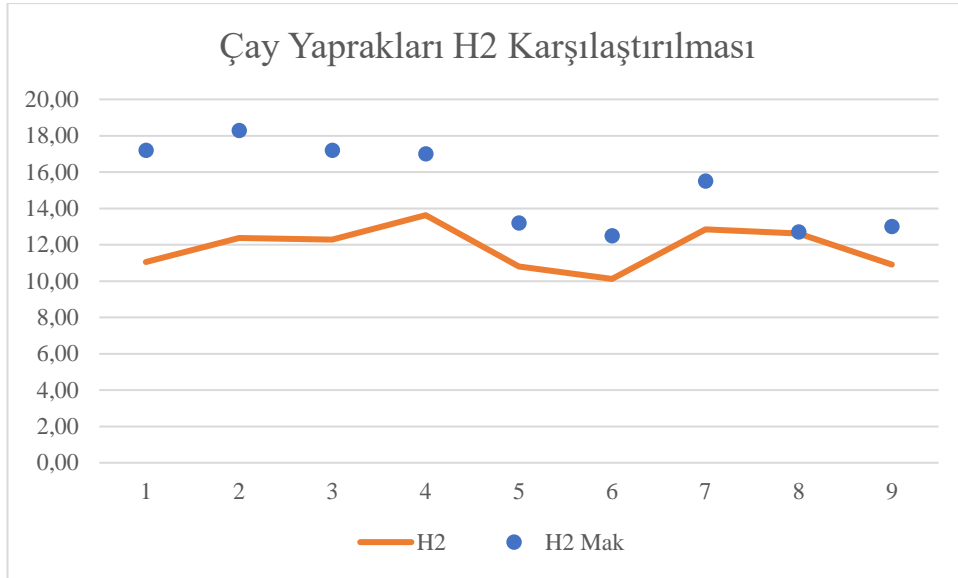
**Tablo 4.4.**Prosesle beslenen Çay Yaprakları makale verileri sonucunda alınan sentez gazı çıktıları.

<b>N<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>RMSE</b>
49,84	11,05	22,93	16,18	9,726
48,51	12,37	23,80	15,32	9,252
48,69	12,28	23,71	15,31	9,530
47,65	13,63	23,70	15,02	9,280
51,74	10,80	20,33	17,13	7,654
52,84	10,12	19,40	17,64	11,407
50,13	12,85	20,83	16,18	6,463
50,18	12,62	21,05	16,15	6,711
52,24	10,90	19,72	17,13	7,856

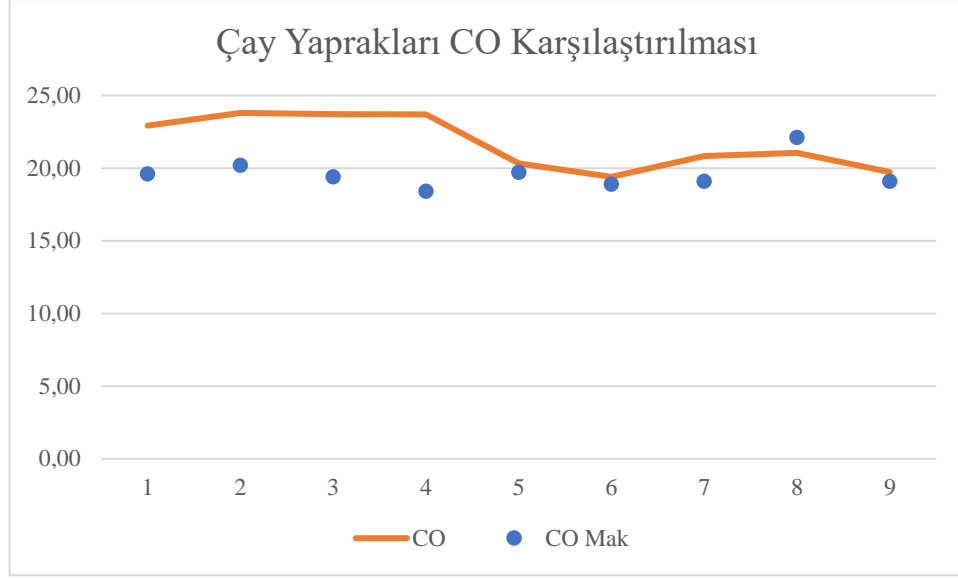
Fındık kabuğu ve Çay yaprakları çalışmalarından alınan çalışma sonuçları, validasyonu yapılırken modellediğimiz proses sentez gazı çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4.1 ve Tablo 4.3’de sırası ile (**Doğru vd., 2002**) ve (**Jayah vd., 2003**) yapmış oldukları çalışmalardan alınan sonuçlar gösterilmiştir. Tablo 4.2 ve Tablo 4.4’de ise yukarıdaki iki çalışmanın tasarlanan prosesle işlenen veri sonuçları gösterilmiştir. Prosesle gazlaştırma Gibbs reaktöründe gerçekleşmektedir. Metan gazının Gibbs enerjisi çok yüksek olması sebebi ile Metan gazı çıkışı gözlemlenememiştir. RMSE analizindeki farklılıklar CH<sub>4</sub> gazının oluşmamasından kaynaklı olabilir.



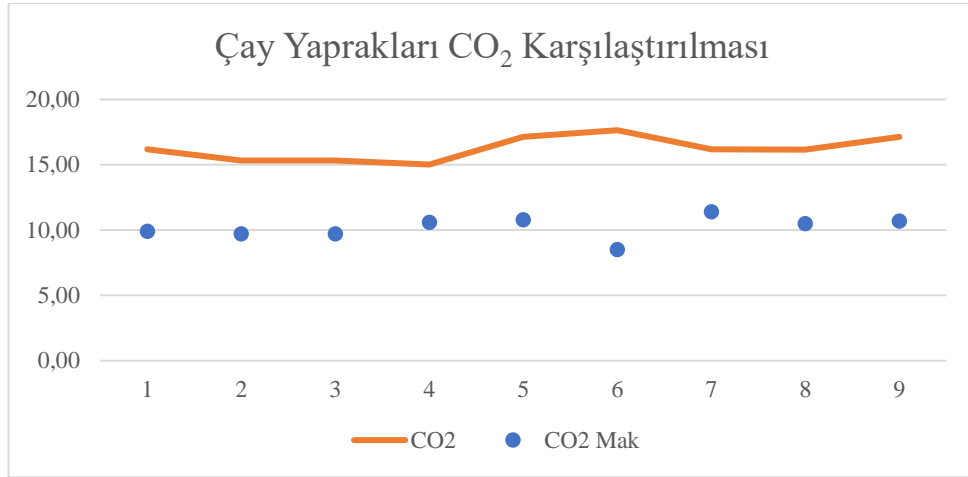
**Şekil 4.5** Çay yaprakları makalesinden alınan N<sub>2</sub> ve modellenen prosten çıkan N<sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması.



**Şekil 4.6** Çay yaprakları makalesinden alınan H<sub>2</sub> ve modellenen prosten çıkan H<sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması.



**Şekil 4.7** Çay yaprakları makalesinden alınan CO ve modellenen prosesten çıkan CO oranlarının karşılaştırılması.



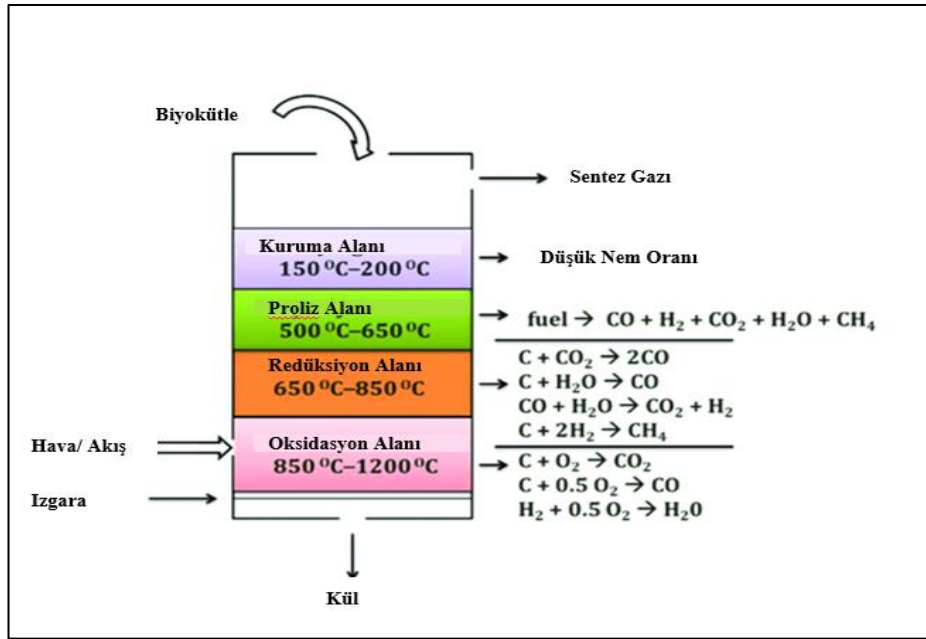
**Şekil 4.8** Çay yaprakları makalesinden alınan CO<sub>2</sub> ve modellenen prosesten çıkan CO<sub>2</sub> oranlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de, Jayah ve arkadaşlarının Sri Lanka bölgesinde yetiştirilen çay yapraklarının, aşağı akışlı reaktörde gazlaştırma sürecinden elde ettiği analiz sonuçları ile bu çalışmada geliştirilen süreçten elde edilen sonuçların karşılaştırmalı grafikleri gösterilmektedir. Doğru ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmadan alınan veriler ile yapılan karşılaştırmalar, Jayah ve arkadaşlarının çalışmalarından elde edilen veriler ile yapılan karşılaştırmalarla karşılaştırıldığında, Jayah ve arkadaşlarının çalışmalarından elde edilen sonuçların daha iyi olduğu ve trendlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

## 4.2 Duyarlılık Analizi

### 4.2.1 Fındık Kabuğu

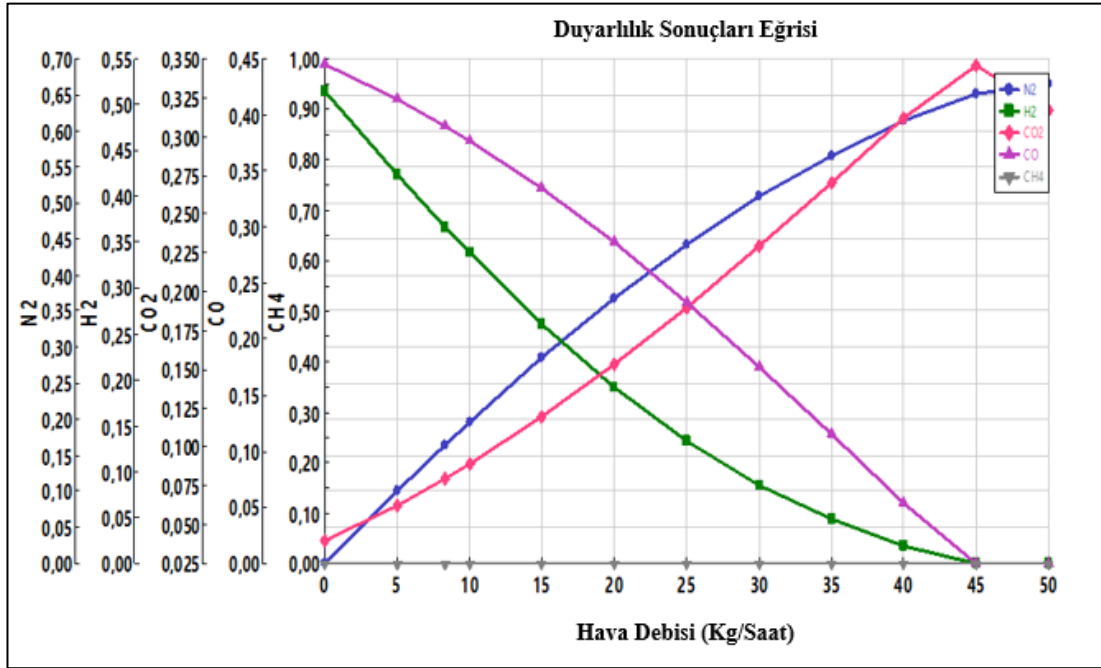
Prosesle beslenen hava miktarı arttığı zaman daha fazla oksijen beslenmiş olur, dolayısıyla serbest haldeki hidrojen ile oksijen bağ yaparak su oluşturmaya başlamaktadır ve doğal olarak hidrojen bitmektedir. N<sub>2</sub> gazının artması prosesle beslenen havanın artmasından dolayı olmaktadır. Bilindiği üzere N<sub>2</sub> gazı hava içerisinde %71 oranında bulunur ve inert bir gazdır. CO<sub>2</sub> gazının artması ortama beslenen fazla hava içerisindeki O<sub>2</sub>'den dolayıdır. Serbest haldeki C atomları fazla O<sub>2</sub> ile bağ yaparak CO<sub>2</sub> miktarını artırmaktadır. CO<sub>2</sub> ve CO arasında bir denge durumu söz konusudur. Dolayısıyla CO<sub>2</sub> artarken CO'nun azalması doğaldır.



Şekil 4.9 Gazlaştırma kimyası şematik gösterimi (Raza vd., 2021).

Şekil 4.10'de gösterildiği gibi artan hava değişimine karşı % Azot, Hidrojen, Karbondioksit, Karbonmonoksit, Metan (y-ekseni) ve Hava Akış Oranı (x-ekseni) sırasıyla çizilmiştir. Prosesle beslenen oksijenin artması ile CO molekülleri ile bağ yaparak CO<sub>2</sub> moleküllerini artırmıştır. Dolayısıyla ortamdaki Oksijen arttığında, karbonmonoksit azalır. Dhanavath ve arkadaşlarının (Dhanavath vd., 2018) yapmış olduğu Karanja Pres Tohumu Kekinin Oksijen-Buhar Gazlaştırılması çalışmasında benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Ortamdaki H<sub>2</sub> atomlarının azalmasının sebebi ise fazla O<sub>2</sub> ile su

oluşturmasıdır. Yani proseste, hava akışının artması ile hidrojen azalır ve ortama beslenen hava içeriği, %79'u azot olduğu için  $N_2$  artar.

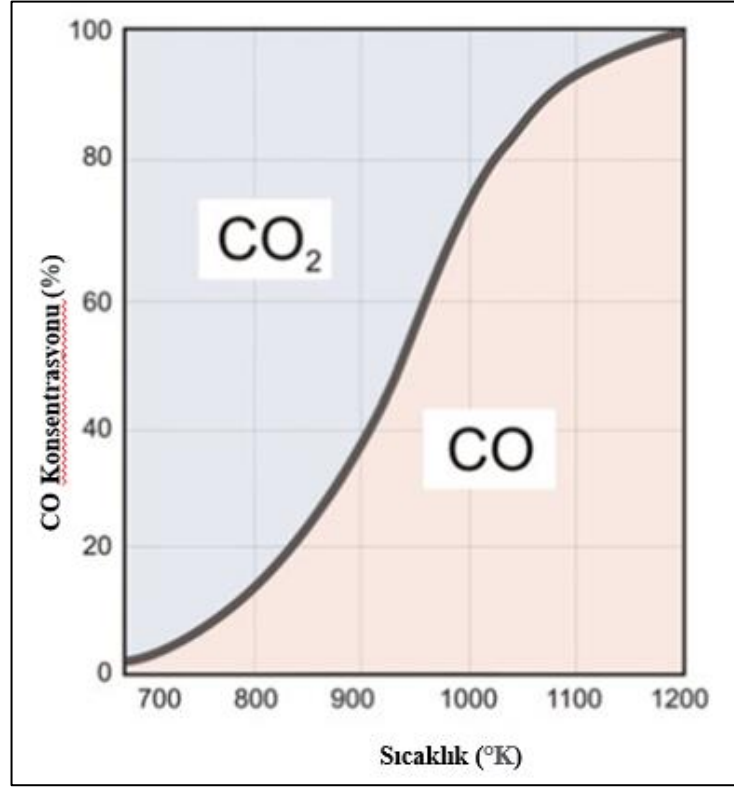


**Şekil 4.10** Hava akışının etkisi-duyarlılık analizi hava değişimine karşı  $N_2$   $H_2$   $CO_2$   $CO$   $CH_4$  gazlarının grafik gösterimi.

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, % Azot, Hidrojen, Karbondioksit, Karbonmonoksit, Metan (y-ekseni) ve Sıcaklık (x-ekseni) sırasıyla çizilmiştir. Sıcaklık arttığında; karbonmonoksit artar, hidrojen artar, azot azalır, ve karbondioksit azalır. Model doğrulaması için Literatürden alınan makaleler kullanılmıştır (**Dogru vd., 2002**). Duyarlılık analizlerinde tüm gazlarda  $950^\circ C$ 'ye kadar ivmeli artış gözlenirken, sonrasında artışın yavaşladığı gözlenmiştir.

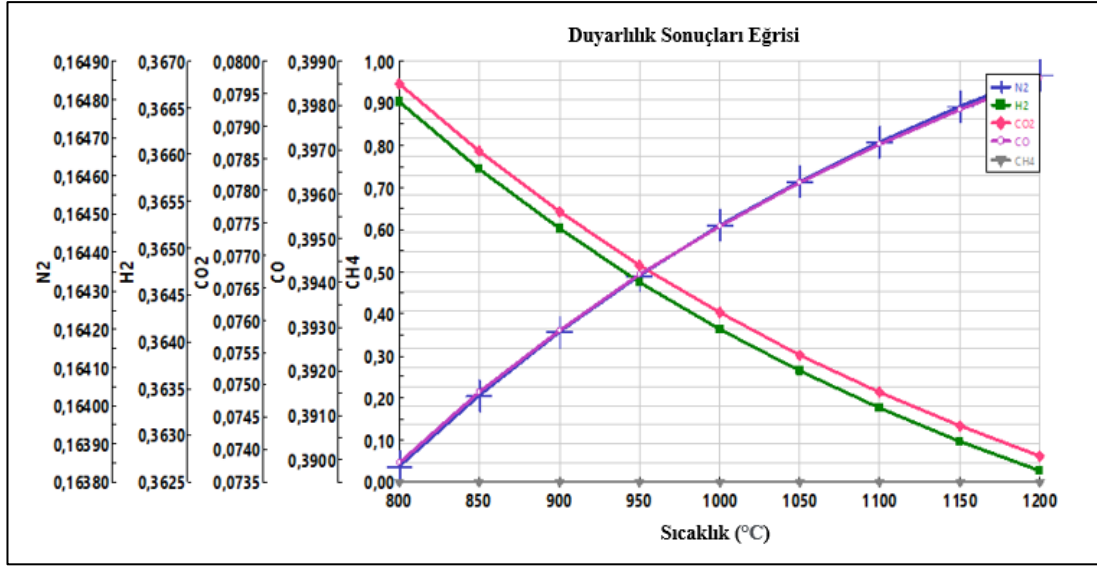
WGSR (Su-Gaz Geçiş Reaksiyonu), endüstriyel hidrojen üretiminde en önemli katalitik süreçlerden biri olmuştur. WGSR, karbon monoksit ile su buharı arasındaki, karbon dioksit ve hidrojen oluşturmak için gerçekleşen, orta derecede ekzotermik bir reaksiyondur. WGSR, yüksek saflıkta hidrojen elde etmek amacıyla sentez gazından karbon monoksiti uzaklaştırmak için kullanılır. Ekzotermik bir reaksiyon olduğunu göz önünde bulundurarak, daha yüksek CO dönüşümleri düşük sıcaklıklarda tercih edilir. Ancak, yüksek sıcaklıklar reaksiyon hızını artırır. Bu nedenle, ticari uygulamalarda, çeşitli endüstriyel uygulamalar için gerekli saflık seviyesine ulaşmak amacıyla, süreç iki aşamada gerçekleşir: yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık (**Baraj vd., 2021; Newsome, 1980**).

Karbon monoksit (CO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>) arasındaki denge, genellikle aşağıdaki tepkimeye göre incelenir:



Şekil 4.5 Karbon monoksit karbon dioksit denge ilişkisi (Pernicka, 2013).

Bu tepkime, endüstride su-gaz değişim reaksiyonu (Water-Gas Shift Reaction) olarak bilinir. Bu reaksiyonun denge sabiti (K), sıcaklığa bağlı olarak değişir ve Le Chatelier prensibi'ne göre, sıcaklık arttıkça reaksiyonun ileri ve geri yönlerde nasıl hareket edeceği belirlenir (Lee vd., 2013; Mendes vd., 2010). Şekil 4.11'de gösterildiği gibi reaksiyon sıcaklığı 1000 K'lere çıkarsa %20 CO ve %80 CO<sub>2</sub> dengesi oluşabilmektedir.



Şekil 4.12 Sıcaklık değişiminin etkisi-duyarlılık analizi sıcaklık değişimine karşı N<sub>2</sub> H<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO CH<sub>4</sub> gazlarının grafik gösterimi.

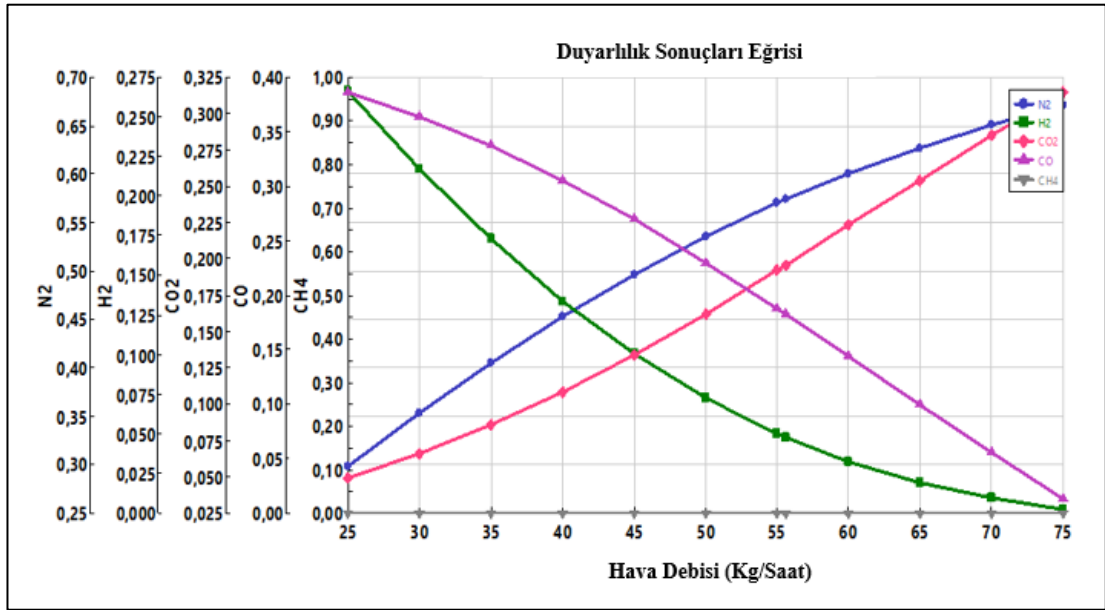
Sıcaklık arttıkça, bir yandan daha fazla yanabilir bileşen; ısı sağlamak için yanarken, diğer yandan daha yüksek sıcaklık büyük moleküler bileşiklerin küçük moleküler gazlara (H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub>) parçalanmasını ve yeniden oluşumunu teşvik etmiştir. Kombine etkiyle, H<sub>2</sub> içeriği hafif bir düşüş göstermiş, CO ise sürekli artmıştır. Bu, daha yüksek sıcaklıkta CO üretimini teşvik eden su-gaz değişim reaksiyonu (CO + H<sub>2</sub>O → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>) ile de ilişkili olabilir. Ayrıca, CO<sub>2</sub> içeriği sıcaklıkla çok az değişiklik göstermiştir. (Niu vd., 2021) yapmış oldukları çalışmada benzer sonuçlar bulmuşlardır. Ayrıca CO in artmasının sebebinin yukarıda bahsedilen su gaz geçiş reaksiyonunun denge halinden olabileceğini de tartışmışlardır.

Bu grafik, gazlaştırma sürecindeki kimyasal reaksiyonlarla açıklanabilir. Su-gaz , Boudouard ve buhar metan reforming endotermik reaksiyonlardır. Reaksiyonun dengesi, sıcaklık arttıkça reaktanlardan ürünlere doğru hareket eder. Sonuç olarak, char, CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O içeren reaksiyonlardan CO<sub>2</sub> tüketimi ve CO üretimi artacaktır. Ayrıca, buhar metan reforming reaksiyonu yoğunlaşarak CO üretimini artıracaktır. Diğer yandan, su-gaz kaydırma reaksiyonu ekzotermik reaksiyonlardır; sıcaklığın artması, süreci inhibe eder ve CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> üretimini azaltır. CO'nun H<sub>2</sub>O ile reaksiyona girerek H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> oluşturma eğiliminden dolayı, su-gaz kaydırma reaksiyonu gazlaştırma süreci boyunca nihai gaz kompozisyonunu düzenlemede en önemli reaksiyonlardan biri olarak tanımlanmıştır. (HajiHashemi vd., 2023b) yapmış olduğu

Pilot ölçekli bir biyokütle gazlaştırma sisteminde kombine ısı ve güç üretimi çalışmasında benzer sonuçlar elde edilmiştir.

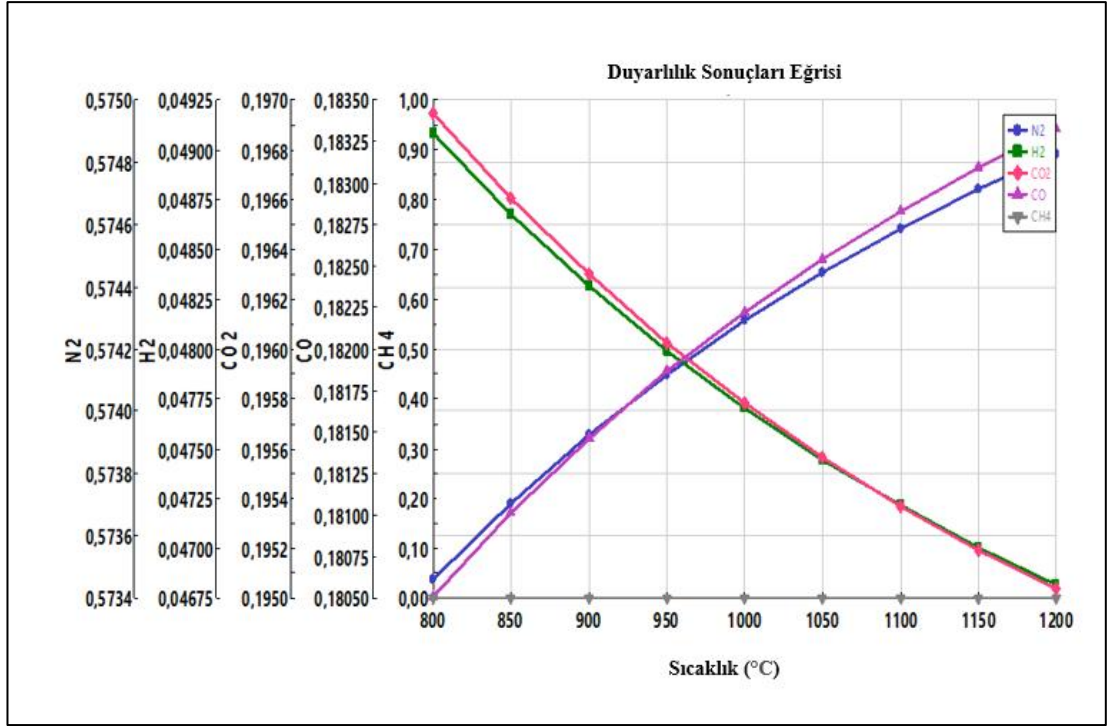
#### 4.2.2 Çay Yaprakları

(Jayah vd., 2003) yapmış oldukları çay yapraklarının aşağı akışlı bir reaktörde kurutulması çalışmasından alınan veriler ile yapılan duyarlılık analizi sonuçları incelenmiştir.



Şekil 4.63 Hava akışının etkisi-duyarlılık analizi hava değişimine karşı N<sub>2</sub> H<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO CH<sub>4</sub> gazlarının grafik gösterimi.

Şekil 4.13'te gösterildiği gibi artan hava değişimine karşı % Azot, Hidrojen, Karbondioksit, Karbonmonoksit, Metan (y-ekseni) ve Hava Akış Oranı (x-ekseni) sırasıyla çizilmiştir. Oksijen arttığında, karbonmonoksit azalır, hidrojen azalır ve karbondioksit, azot artar. (Jayah vd., 2003) çalışmasından alınan duyarlılık analiz sonuçları ile (Dogru vd., 2002) çalışmasından alınan duyarlılık analizi sonuçları benzerdir.



**Şekil 4.74** Sıcaklık değişiminin etkisi-duyarlılık analizi sıcaklık değişimine karşı N<sub>2</sub> H<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> CO CH<sub>4</sub> gazlarının grafik gösterimi.

Şekil 4.14'da gösterildiği gibi, % Azot, Hidrojen, Karbondioksit, Karbonmonoksit, Metan (y-ekseni) ve Sıcaklık (x-ekseni) sırasıyla çizilmiştir. Sıcaklık arttığında; azot artar, karbonmonoksit artar, hidrojen azalır ve karbondioksit azalır. Proseste kullanılan Gibbs reaktörü kullanılmıştır ve CH<sub>4</sub>'ün Gibbs enerjisi çok yüksektir. Dolayısı ile bu sıcaklıklarda CH<sub>4</sub> gazı oluşmamaktadır.

## 5. TARTIŞMA

Bu araştırmanın temel amacı, biyokütle olarak kullanılan fındık kabuğu atıklarının gazlaştırma potansiyelini incelemektir. Aspen Plus kullanarak gerçekleştirilen proses modelleme ve literatür verilerine dayalı validasyon yoluyla, biyokütle gazlaştırmasının verimliliği ve güvenilirliği hakkında derinlemesine bir anlayış geliştirilmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş çapta benimsenmesine katkıda bulunulması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen validasyon ve duyarlılık analizleri, modelin performansını ve önerilen gazlaştırma süreçlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmek için sağlam bir temel sunmuştur.

Aşağı akışlı bir gazlaştırıcıda biyokütle gazlaştırmasının sentez gazı ürün bileşimini simüle etmek ve tahmin etmek için Aspen Plus'a entegre edilmiştir. Modelde, gazlaştırıcının düzeni dikkate alınmış ve piroliz, oksidasyon ve indirgeme ardışık aşamalar olarak modellenmiştir. Pirolizin anında gerçekleştiği varsayılmış ve katran ve kömür oluşturmak için sıcaklığa bağlı ampirik ilişkilerin bir kombinasyonu ile modellenmiştir. Piroliz gazının bileşimini tanımlamak için bir RGibbs reaktörü kullanılırken, oksidasyon ve indirgeme iki ardışık Rquil reaktöründe modellenmiş ve kimyasal kinetik reaksiyonlar tarafından yönetilmiştir. Deneysel verilerle yapılan bir karşılaştırma, performansın ana türler açısından tatmin edici olduğunu, CH<sub>4</sub> tahmininde ise küçük bir sapma olduğunu ortaya koymaktadır.

Araştırmanın ilk aşamasında, Aspen Plus'ta biyokütle gazlaştırma için kapsamlı bir proses modeli geliştirilmiştir. Bu model, gerçek dünya koşullarını doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla mevcut literatür çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak kalibre edilmiştir (Dogru vd., 2002; Jayah vd., 2003). Modelin doğruluğu, simülasyon sonuçlarının literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırılmasıyla test edilmiş ve simüle edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki yakın uyum, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini vurgulamıştır.

Modelin doğruluğunu artırmak için ikinci bir biyokütle türü olan çay yaprakları kullanılmıştır. Yukarı akış reaktörü kullanılarak yapılan bir literatür çalışmasının verileriyle model yeniden kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Çay yaprakları için elde edilen deneysel sonuçların başarılı bir şekilde yeniden üretilmesi, modelin sağlamlığını ve farklı biyokütle türlerine uyum sağlama yeteneğini güçlendirmiştir.

Her iki biyokütle türü için de süreç verimliliğini ve çıktısını etkileyen anahtar parametreleri belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Fındık kabuğu atıkları için sıcaklık, basınç ve hava-yakıt oranı gibi parametreler sistematik olarak değiştirilmiştir. Bu analiz, sıcaklığın sentez gazı kompozisyonu ve genel enerji verimliliği üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Daha yüksek sıcaklıklar, sentez gazının ana bileşenleri olan hidrojen ve karbon monoksit üretimini artırarak sürecin termal verimliliğini yükseltmiştir.

Çay yaprakları için yapılan duyarlılık analizi de benzer sonuçlar vermiştir. Analizler, sıcaklık ve hava-yakıt oranının gazlaştırma sürecinin verimliliği üzerinde kritik etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, bu parametrelerin optimize edilmesinin gazlaştırma sürecinin verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini, katran oluşumunu azaltabileceğini ve sentez gazı verimini maksimize edebileceğini göstermiştir. Bu bilgiler, biyokütle gazlaştırmasının pratik uygulaması için operasyonel koşulların optimize edilmesine yönelik kılavuzlar sunmaktadır.

Araştırma, biyokütle gazlaştırmanın detaylı proses modellemesi ve simülasyonu için Aspen Plus'ın kullanılabilirliğini göstermektedir. Modelin iki farklı biyokütle ile başarılı bir şekilde doğrulanması, modelin çok yönlülüğünü ve daha geniş bir uygulama potansiyelini vurgulamaktadır. Bu güvenilir simülasyon aracı, biyokütle gazlaştırma teknolojisinin ilerlemesine katkıda bulunmakta ve sürdürülebilir bir enerji çözümü olarak benimsenmesini kolaylaştırmaktadır.

Fındık kabuğu atıkları ve çay yapraklarının gazlaştırma için kullanılması, atık yönetimi ve yenilenebilir enerji üretimi gibi iki önemli sorunu ele almaktadır. Bu biyokütle türleri, genellikle yetersiz değerlendirilen veya verimsiz şekilde bertaraf edilen bol miktarda tarımsal artıktır. Bu atıkları değerli sentez gazına dönüştürerek, araştırma kaynak verimliliğini ve çevresel sürdürülebilirliği teşvik etmektedir. Bu yaklaşım sadece atıkları azaltmakla kalmayıp, temiz enerji kaynaklarına geçiş çabalarıyla uyumlu alternatif bir enerji kaynağı sağlamaktadır.

Çalışmanın bulguları, önemli ekonomik ve çevresel sonuçlara sahiptir. Ekonomik açıdan, tarımsal artıkların verimli bir şekilde gazlaştırılması fosil yakıtlara bağımlılığı azaltabilir, enerji maliyetlerini düşürebilir ve çiftçiler ile sanayiler için yeni gelir akışları oluşturabilir. Çevresel olarak, bu süreç geleneksel enerji kaynaklarına daha temiz bir alternatif sunmakta, sera gazı emisyonlarını azaltmakta ve iklim değişikliğini

hafifletmektedir. Biyokütle gazlaştırmanın başarılı bir şekilde uygulanması, sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunabilir.

Araştırma umut verici sonuçlar vermiş olsa da sınırlamalarını kabul etmek ve gelecekteki çalışmalara yönelik yönlendirmeler sunmak önemlidir. Bir sınırlama, model doğrulaması için literatür verilerine dayanmasıdır, bu da gerçek dünya koşullarının değişkenliğini tam olarak yansıtmayabilir. Gelecekteki çalışmalar, modelin sağlamlığını artırmak için gerçek gazlaştırma düzenekleri ile deneysel doğrulamaları içermelidir. Ayrıca, çalışma iki belirli biyokütle türüne odaklanmıştır. Tarımsal artıklar, orman atıkları ve enerji bitkileri gibi daha geniş bir biyokütle yelpazesini içerecek şekilde kapsamın genişletilmesi, biyokütle gazlaştırmanın potansiyeli hakkında daha kapsamlı bir anlayış sağlayacaktır. Farklı biyokütle türlerinin ortak gazlaştırılmasını araştırmak, sinerjik etkileri ortaya çıkarabilir ve süreci daha da optimize edebilir.

Sonuç olarak, bu araştırma Aspen Plus kullanarak fındık kabuğu atıkları ve çay yapraklarının gazlaştırılması için bir proses modeli geliştirmiş ve doğrulamıştır. Bulgular, modelin güvenilirliğini ve gazlaştırma verimliliğini etkileyen kritik parametreleri vurgulamaktadır. Tarımsal artıkların değerli sentez gazına dönüştürülmesinin uygulanabilirliğini göstererek, bu çalışma yenilenebilir enerji teknolojilerinin ve sürdürülebilir atık yönetimi uygulamalarının ilerlemesine katkıda bulunmaktadır. Duyarlılık analizlerinden elde edilen bilgiler, gazlaştırma süreçlerinin optimize edilmesine yönelik pratik kılavuzlar sunmakta ve daha verimli ve sürdürülebilir enerji üretimi için yol açmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, daha fazla deneysel doğrulama ve çeşitli biyokütle türlerinin araştırılmasını içermelidir. Bu, biyokütle gazlaştırmanın sürdürülebilir bir enerji geleceğinin önemli bir bileşeni olarak potansiyelini tam olarak gerçekleştirmek için kritik öneme sahiptir.

## KAYNAKLAR

Al Amoodi, N., Kannan, P., Al Shoaibi, A., & Srinivasakannan, C. (2013). ASPEN PLUS SIMULATION OF POLYETHYLENE GASIFICATION UNDER EQUILIBRIUM CONDITIONS. *Chemical Engineering Communications*, 200(7), 977-992. <https://doi.org/10.1080/00986445.2012.715108>

AlNouss, A., Parthasarathy, P., Shahbaz, M., Al-Ansari, T., Mackey, H., & McKay, G. (2020). Techno-economic and sensitivity analysis of coconut coir pith-biomass gasification using ASPEN PLUS. *Applied Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114350>

Balat, M., & Ayar, G. (2005). Biomass energy in the world, use of biomass and potential trends. *Energy Sources*, 27(10), 931-940. <https://doi.org/10.1080/00908310490449045>

Baraj, E., Ciahotný, K., & Hlinčík, T. (2021). The water gas shift reaction: Catalysts and reaction mechanism. İçinde *Fuel* (C. 288). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119817>

Bhave, A., Taylor, R. H. S., Fennell, P., Livingston, W. R., Shah, N., Dowell, N. Mac, Dennis, J., Kraft, M., Pourkashanian, M., Insa, M., Jones, J., Burdett, N., Bauen, A., Beal, C., Smallbone, A., & Akroyd, J. (2017). Screening and techno-economic assessment of biomass-based power generation with CCS technologies to meet 2050 CO<sub>2</sub> targets. *Applied Energy*, 190, 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.120>

Boehm, R. F., Yang, H., & Yan, J. (2015). Introduction: Renewable Energy. İçinde *Handbook of Clean Energy Systems* (ss. 1-7). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces001>

Bucini, D., Balestra, G. M., Pucci, C., Paparatti, B., Speranza, S., Zolla, C. P., & Varvaro, L. (t.y.). *Bio-ethology of Anisandrus dispar F. and Its Possible Involvement in Dieback (Moria) Diseases of Hazelnut (Corylus avellana L.) Plants in Central Italy*.

Camacho Ureña, P. M. (t.y.). *Integration of ASOFC with Gasification for Polygeneration*.

Cerone, N., & Zimbardi, F. (2018). Gasification of Agroresidues for syngas production. *Energies*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/en11051280>

Choi, Y. K., Mun, T. Y., Cho, M. H., & Kim, J. S. (2016). Gasification of dried sewage sludge in a newly developed three-stage gasifier: Effect of each reactor temperature on the producer gas composition and impurity removal. *Energy*, 114, 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.166>

Cohce, M. K., Rosen, M. A., & Dincer, I. (2011). Efficiency evaluation of a biomass gasification-based hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11388-11398. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.033>

Couto, N. D., Silva, V. B., Monteiro, E., Rouboa, A., & Brito, P. (2017). An experimental and numerical study on the Miscanthus gasification by using a pilot scale gasifier. *Renewable Energy*, 109, 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.028>

Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E., & Bouziane, K. (2013). Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas. *Energy Procedia*, 36, 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>

Dabai, F., Paterson, N., Millan, M., Fennell, P., & Kandiyoti, R. (2014). Tar formation and destruction in a fixed bed reactor simulating downdraft gasification: Effect of reaction conditions on tar cracking products. *Energy and Fuels*, 28(3), 1970-1982. <https://doi.org/10.1021/ef402293m>

Dhanavath, K. N., Shah, K., Bhargava, S. K., Bankupalli, S., & Parthasarathy, R. (2018). Oxygen-steam gasification of karanja press seed cake: Fixed bed experiments, ASPEN Plus process model development and benchmarking with saw dust, rice husk and sunflower husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 3061-3069. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.046>

Díaz González, C. A., de Oliveira, D. C., Yepes, D. M., Pacheco, L. E., & Silva, E. E. (2023). Aspen Plus model of a downdraft gasifier for lignocellulosic biomass adjusted by Principal Component Analysis. *Energy Conversion and Management*, 296. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117570>

Dogru, M., Howarth, C. R., Akay, G., Keskinler, B., & Malik, A. A. (2002). Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Çinde Energy (C. 27)*. [www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy)

Downie, C. (2020). Strategies for Survival: The International Energy Agency's response to a new world. *Energy Policy*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111452>

Franco, S., Pancino, B., & Cristofori, V. (t.y.-a). *Hazelnut Production and Local Development in Italy*.

Franco, S., Pancino, B., & Cristofori, V. (t.y.-b). *Hazelnut Production and Local Development in Italy*.

George, J., Arun, P., & Muraleedharan, C. (2016). Stoichiometric Equilibrium Model Based Assessment of Hydrogen Generation through Biomass Gasification. *Procedia Technology*, 25, 982-989. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.194>

Gnanapragasam, N. V., Reddy, B. V., & Rosen, M. A. (2009). Hydrogen production from coal using coal direct chemical looping and syngas chemical looping combustion systems: Assessment of system operation and resource requirements.

*International Journal of Hydrogen Energy*, 34(6), 2606-2615.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.036>

HajiHashemi, M. S., Mazhkoo, S., Dadfar, H., Livani, E., Naseri Varnosefaderani, A., Pourali, O., Najafi Nobar, S., & Dutta, A. (2023a). Combined heat and power production in a pilot-scale biomass gasification system: Experimental study and kinetic simulation using ASPEN Plus. *Energy*, 276.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127506>

HajiHashemi, M. S., Mazhkoo, S., Dadfar, H., Livani, E., Naseri Varnosefaderani, A., Pourali, O., Najafi Nobar, S., & Dutta, A. (2023b). Combined heat and power production in a pilot-scale biomass gasification system: Experimental study and kinetic simulation using ASPEN Plus. *Energy*, 276.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127506>

Haugen, H. H., Halvorsen, B. M., & Eikeland, M. S. (2015). Simulation of Gasification of Livestock Manure with Aspen Plus. *Proceedings of the 56th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 56), October, 7-9, 2015, Linköping University, Sweden*, 119, 271-277. <https://doi.org/10.3384/ecp15119271>

Hussain, M., Tufa, L. D., Yusup, S., & Zabiri, H. (2018). A kinetic-based simulation model of palm kernel shell steam gasification in a circulating fluidized bed using Aspen Plus®: A case study. *Biofuels*, 9(5), 635-646.  
<https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1461510>

Jayah, T. H., Aye, L., Fuller, R. J., & Stewart, D. F. (2003). Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 459-469.  
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00037-0)

Jin, H., Larson, E. D., & Celik, F. E. (2009). Performance and cost analysis of future, commercially mature gasification-based electric power generation from switchgrass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(2), 142-173.  
<https://doi.org/10.1002/bbb.138>

Kundu, K., Chatterjee, A., Bhattacharyya, T., Roy, M., & Kaur, A. (2018). Thermochemical Conversion of Biomass to Bioenergy: A Review. *Çinde Energy, Environment, and Sustainability* (ss. 235-268). Springer Nature.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_11)

Ladanai, S., & Vinterbäck, J. (t.y.). *Global Potential of Sustainable Biomass for Energy*.

Lan, W., Chen, G., Zhu, X., Wang, X., Liu, C., & Xu, B. (2018). Biomass gasification-gas turbine combustion for power generation system model based on ASPEN PLUS. *Science of the Total Environment*, 628-629, 1278-1286.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.159>

Lee, D. W., Lee, M. S., Lee, J. Y., Kim, S., Eom, H. J., Moon, D. J., & Lee, K. Y. (2013). The review of Cr-free Fe-based catalysts for high-temperature water-gas shift reactions. *Catalysis Today*, 210, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.12.012>

Li, X., Grace, J. R., Watkinson, A. P., Lim, C. J., & Edenler, A. E. (t.y.). *Equilibrium modeling of gasification: a free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier*. [www.elsevier.com/locate/fuel](http://www.elsevier.com/locate/fuel)

Madadian, E., Lefsrud, M., Lee, C. A. P., & Roy, Y. (2014). Green energy production: The potential of using biomass gasification. *Journal of Green Engineering*, 4(2), 101-116. <https://doi.org/10.13052/jge1904-4720.421>

Marcantonio, V., Bocci, E., & Monarca, D. (2019). Development of a chemical quasi-equilibrium model of biomass waste gasification in a fluidized-bed reactor by using Aspen plus. *Energies*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/en13010053>

Mathieu, P., & Dubuisson, R. (t.y.). *Performance analysis of a biomass gasifier*. <http://www.ulg.ac.be/genienuc/>.

Mckendry, P. (t.y.-a). *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies*.

Mckendry, P. (t.y.-b). *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*.

Mehdi, M., Ammar Taqvi, S. A., Shaikh, A. A., Khan, S., Naqvi, S. R., Shahbaz, M., & Juchelková, D. (2023). Aspen plus simulation model of municipal solid waste gasification of metropolitan city for syngas production. *Fuel*, 344. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128128>

Mendes, D., Mendes, A., Madeira, L. M., Iulianelli, A., Sousa, J. M., & Basile, A. (2010). The water-gas shift reaction: From conventional catalytic systems to Pd-based membrane reactors- A review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 5(1), 111-137. <https://doi.org/10.1002/apj.364>

Mitta, N. R., Ferrer-Nadal, S., Lazovic, A. M., Perales, J. F., Velo, E., & Puigjaner, L. (2006). *Modelling and Simulation of a Tyre Gasification Plant for Synthesis Gas Production*.

Monir, M. U., Abd Aziz, A., Kristanti, R. A., & Yousuf, A. (2018). Co-gasification of empty fruit bunch in a downdraft reactor: A pilot scale approach. *Bioresource Technology Reports*, 1, 39-49. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.02.001>

Newsome, D. S. (1980). The Water-Gas Shift Reaction. *Catalysis Reviews*, 21(2), 275-318. <https://doi.org/10.1080/03602458008067535>

Nikoo, M. B., & Mahinpey, N. (2008). Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1245-1254. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.020>

Niu, M., Huang, Y., Jin, B., & Wang, X. (2013a). Simulation of syngas production from municipal solid waste gasification in a bubbling fluidized bed using aspen plus. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(42), 14768-14775. <https://doi.org/10.1021/ie400026b>

Niu, M., Huang, Y., Jin, B., & Wang, X. (2013b). Simulation of syngas production from municipal solid waste gasification in a bubbling fluidized bed using aspen plus. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(42), 14768-14775. <https://doi.org/10.1021/ie400026b>

Niu, M., Xie, J., Liang, S., Liu, L., Wang, L., & Peng, Y. (2021). Simulation of a new biomass integrated gasification combined cycle (BIGCC) power generation system using Aspen Plus: Performance analysis and energetic assessment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(43), 22356-22367. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.076>

Pala, L. P. R., Wang, Q., Kolb, G., & Hessel, V. (2017). Steam gasification of biomass with subsequent syngas adjustment using shift reaction for syngas production: An Aspen Plus model. *Renewable Energy*, 101, 484-492. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.069>

Paparatti, B., & Speranza, S. (t.y.). *Biological Control of Hazelnut Weevil (Curculio nucum L., Coleoptera, Curculionidae) Using the Entomopathogenic Fungus Beauveria bassiana (Balsamo) Vuill. (Deuteromycotina, Hyphomycetes)*.

Patel, V. R., Upadhyay, D. S., & Patel, R. N. (2014). Gasification of lignite in a fixed bed reactor: Influence of particle size on performance of downdraft gasifier. *Energy*, 78, 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.017>

Pernicka, E. (2013). Provenance determination of archaeological metal objects. İçinde *Archaeometallurgy in Global Perspective: Methods and Syntheses* (ss. 239-268). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3_11)

Pio, D. T., Tarelho, L. A. C., & Matos, M. A. A. (2017). Characteristics of the gas produced during biomass direct gasification in an autothermal pilot-scale bubbling fluidized bed reactor. *Energy*, 120, 915-928. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.145>

Pokharel, R., Poudel, J., Dahal, R., & GC, S. (2023). Forest Biomass Feedstock Availability and Economic Contribution of Biopower Facilities in the Lake States Region. *Journal of Forestry*, 121(5-6), 393-407. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvad023>

Puig-Arnabat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2010a). Review and analysis of biomass gasification models. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 14, Sayı 9, ss. 2841-2851). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.030>

Puig-Arnabat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2010b). Review and analysis of biomass gasification models. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 14, Sayı 9, ss. 2841-2851). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.030>

Puig-Gamero, M., Argudo-Santamaria, J., Valverde, J. L., Sánchez, P., & Sanchez-Silva, L. (2018). Three integrated process simulation using aspen plus®: Pine gasification, syngas cleaning and methanol synthesis. *Energy Conversion and Management*, 177, 416-427. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.088>

- Ramanan, M. V., Lakshmanan, E., Sethumadhavan, R., & Renganarayanan, S. (2008). Modeling and experimental validation of cashew nut shell char gasification adopting chemical equilibrium approach. *Energy and Fuels*, 22(3), 2070-2078. <https://doi.org/10.1021/ef700467x>
- Rasid, A. R., Abdullah, I. H., Siaw, C. W., Zani, M. F., Mohd Shadzalli, Z. F., Abbas, A., & Abdul Manaf, N. (2020). Sensitivity analysis of small scale biomass gasification-based CHP system: A way forward for sustainable urban waste to energy technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012123>
- Raza, M., Inayat, A., & Abu-Jdayil, B. (2021). Crude glycerol as a potential feedstock for future energy via thermochemical conversion processes: A review. *Çinde Sustainability (Switzerland)* (C. 13, Sayı 22). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132212813>
- Rupesh, S., Muraleedharan, C., & Arun, P. (2016). ASPEN plus modelling of air-steam gasification of biomass with sorbent enabled CO<sub>2</sub> capture. *Resource-Efficient Technologies*, 2(2), 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.07.002>
- Sansaniwal, S. K., Pal, K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 72, ss. 363-384). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>
- Shehzad, A., Bashir, M. J. K., & Sethupathi, S. (2016). System analysis for synthesis gas (syngas) production in Pakistan from municipal solid waste gasification using a circulating fluidized bed gasifier. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 60, ss. 1302-1311). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.042>
- Sisinni, M., Carlo, A. Di, Bocci, E., Micangeli, A., & Naso, V. (2013). Hydrogen-rich gas production by sorption enhanced steam reforming of woodgas containing TAR over a commercial Ni catalyst and calcined dolomite as CO<sub>2</sub> sorbent. *Energies*, 6(7), 3167-3181. <https://doi.org/10.3390/en6073167>
- Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 117). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>
- Susastriawan, A. A. P., Saptoadi, H., & Purnomo. (2017). Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Çinde Renewable and Sustainable Energy Reviews* (C. 76, ss. 989-1003). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112>
- Tavares, R., Monteiro, E., Tabet, F., & Rouboa, A. (2020). Numerical investigation of optimum operating conditions for syngas and hydrogen production from biomass gasification using Aspen Plus. *Renewable Energy*, 146, 1309-1314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.051>

Tremel, A., Gaderer, M., & Spliethoff, H. (2013). Small-scale production of synthetic natural gas by allothermal biomass gasification. *International Journal of Energy Research*, 37(11), 1318-1330. <https://doi.org/10.1002/er.2933>

Üniversitesi Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, K., Kanca, A., & Makalesi, A. (2019). 43-54 Pamuk Atığı, Fındık Kabuğu ve Ceviz Kabuğu'nun Piroliz ve Oksidasyon Davranışlarının Kıyaslanması Comparison of Pyrolysis and Oxidation Behaviors of Cotton Waste, Hazelnut Shell, and Walnut Shell. İçinde *Fen Bil. Der (C. 2, Sayı 2)*. <http://dergipark.gov.tr/koufbd>

Villarini, M., Marcantonio, V., Colantoni, A., & Bocci, E. (2019a). Sensitivity analysis of different parameters on the performance of a CHP internal combustion engine system fed by a biomass waste gasifier. *Energies*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/en12040688>

Villarini, M., Marcantonio, V., Colantoni, A., & Bocci, E. (2019b). Sensitivity analysis of different parameters on the performance of a CHP internal combustion engine system fed by a biomass waste gasifier. *Energies*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/en12040688>

Web 1, (2024), <https://cturare.tripod.com/mas.htm>, (Erişim Tarihi: 14/06/2024).

Web 2, (2024), <https://cturare.tripod.com/gas.htm#up>, (Erişim Tarihi: 14/06/2024).

Web 3, (2024), <https://www.thesisat.org/biyo-gazlastirma-ve-surdurulebilir-gelecek.html>, (Erişim Tarihi: 14/06/2024).

Widjaya, E. R., Chen, G., Bowtell, L., & Hills, C. (2018). Gasification of non-woody biomass: A literature review. İçinde *Renewable and Sustainable Energy Reviews (C. 89, ss. 184-193)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.023>

*World Energy Resources / 2016*. (t.y.). [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)

Yin, R., Liu, R., Wu, J., Wu, X., Sun, C., & Wu, C. (2012). Influence of particle size on performance of a pilot-scale fixed-bed gasification system. *Bioresource Technology*, 119, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.085>

Zainal, Z. A., Ali, R., Lean, C. H., & Seetharamu, K. N. (t.y.). *Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials*. [www.elsevier.com/locate/enconman](http://www.elsevier.com/locate/enconman)

Zaman, S. A., Roy, D., & Ghosh, S. (2020). Process modeling and optimization for biomass steam-gasification employing response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105847>

Zhang, L., Xu, C. (Charles), & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.038>

Zhang, Y., Xiao, J., & Shen, L. (2009). Simulation of methanol production from biomass gasification in interconnected fluidized beds. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(11), 5351-5359. <https://doi.org/10.1021/ie801983z>

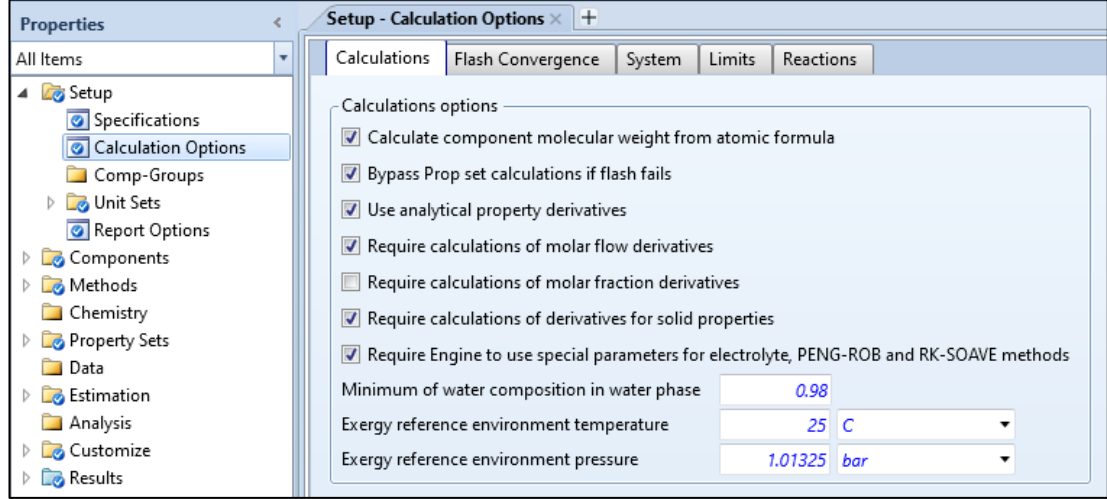
Zheng, H., Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2013). Aspen Plus simulation of biomass integrated gasification combined cycle systems at corn ethanol plants. *Biomass and Bioenergy*, 56, 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.04.032>

## ÖZGEÇMİŞ

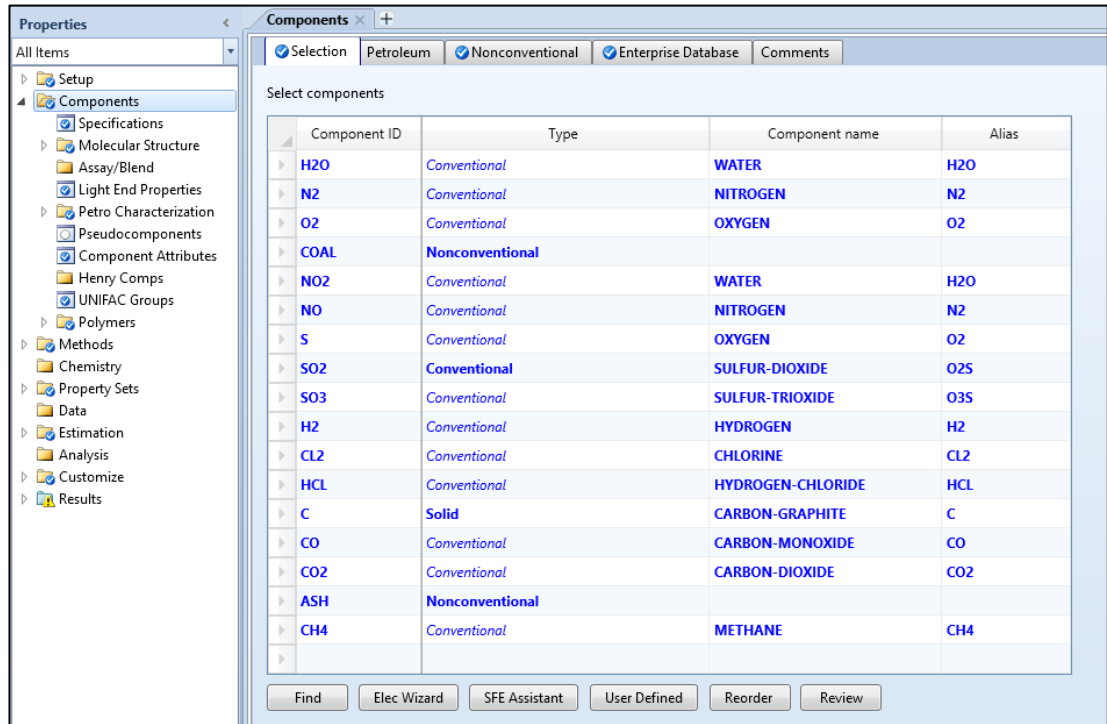
Emre BERER, Süleyman Demirel Üniversitesi Kimya Mühendisi bölümünden 2019 yılında mezun oldum. 2021 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimime başladım. Lisans eğitimim sırasında Petroyağ ve Gübretaş firmalarında staj yaptım. Lisans eğitimimi tamamladıktan sonra 02-2019 tarihinde Petroyağ şirketinde ARGE Uzmanı olarak işe başladım ve yaklaşık 2,5 yıl çalıştım. Hemen akabinde Coral Biyoteknoloji şirketinde Üretim Uzmanı olarak çalışmaya başladım ve halen aynı şirkette çalışma hayatıma devam etmekteyim.

# EKLER

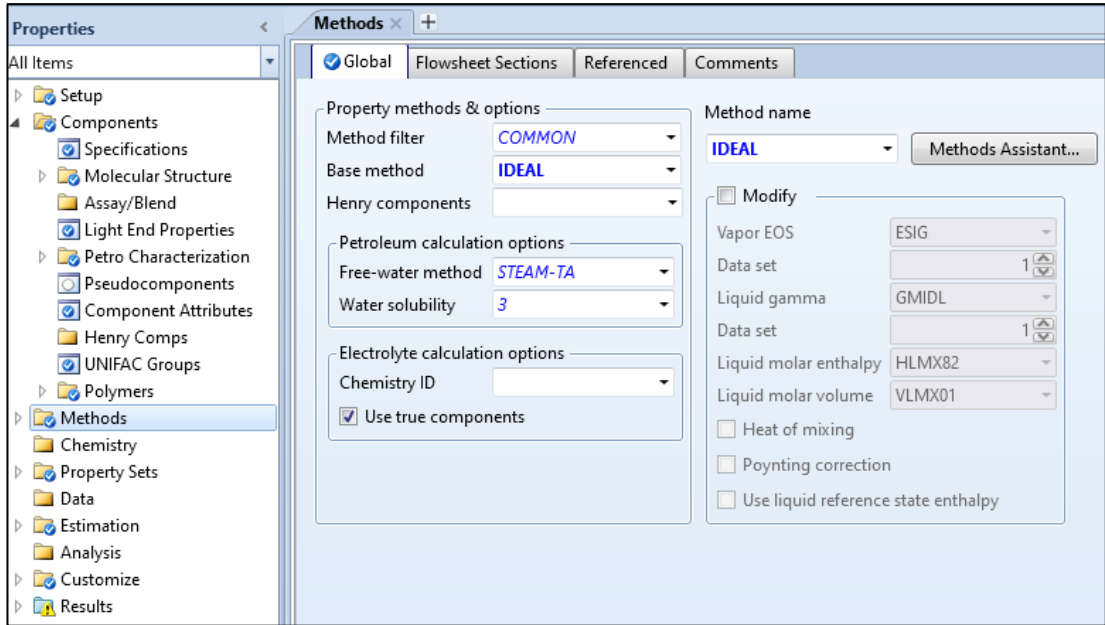
## Ek-A: Şekiller



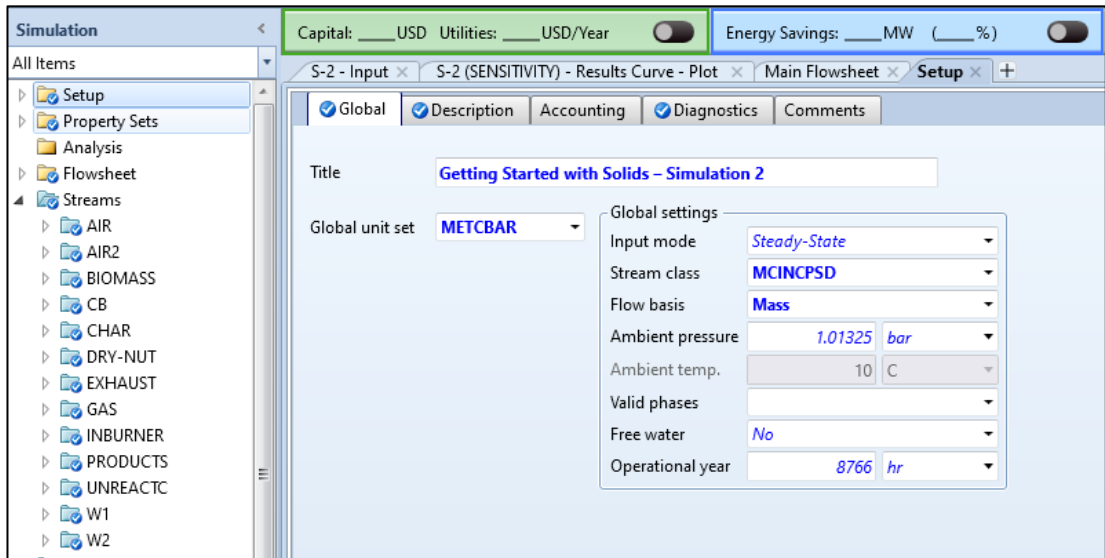
### A1.1 Özellikler – Hesaplama Seçenekleri.



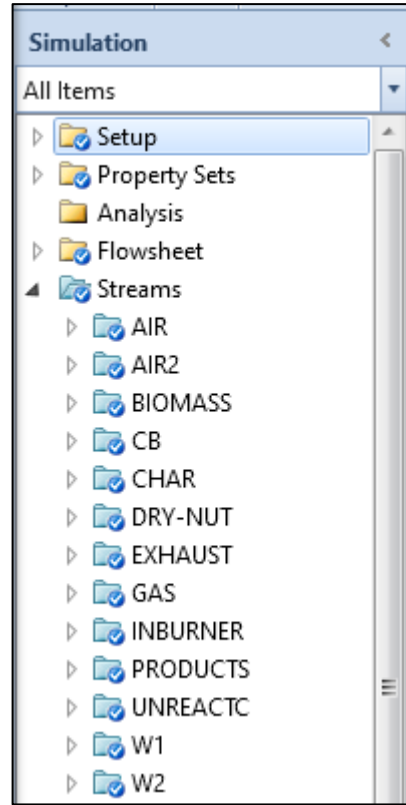
### A1.2 Özellikler-Bileşenler.



**A1.3 Özelliklerin Belirlenmesi – Yöntemler.**



**A1.4 Simülasyon kurulumu.**



**A1.5** Simülasyondaki Akışlar.

Component	Value
H2O	
N2	0.79
O2	0.21
NO2	
NO	
S	
SO2	
SO3	
H2	
CL2	
HCL	
C	
CO	
CO2	
CH4	
Total	1

**A1.6** Akışlardaki Havanın Özellikleri.

Simulation Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

S-2 - Input x S-2 (SENSITIVITY) - Results Curve - Plot x Main Flowsheet x B1 (Sep) x +

Specifications Feed Flash Outlet Flash Utility Comments

Outlet stream conditions  
 Outlet stream: GAS  
 Substream: MIXED

Component ID	Specification	Basis	Value	Units
H2O	Split fraction			
N2	Split fraction		1	
O2	Split fraction		1	
NO2	Split fraction			
NO	Split fraction			
S	Split fraction			
SO2	Split fraction		1	
SO3	Split fraction		1	
H2	Split fraction		1	
CL2	Split fraction			
HCL	Split fraction			
C	Split fraction			
CO	Split fraction		1	
CO2	Split fraction		1	
CH4	Split fraction			

A1.7 Simülasyondaki Bloklar.

Simulation Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x AIREFF x B3 (REquil) x Results Summary - Equipment x AIREFF (SENSITIVITY) - Results Curve - Plot x

Vary Define Tabulate Options Cases Fortran Declarations Comments

Active  Case study

Manipulated variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Active	Manipulated variable	Units
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Stream-Var Stream=AIR Substream=MIXED Variabl...	kg/hr

New Delete Copy Paste

Edit selected variable

Manipulated variable

Variable: 1  
 Type: Stream-Var  
 Stream: AIR  
 Substream: MIXED  
 Variable: MASS-FLOW  
 Units: kg/hr

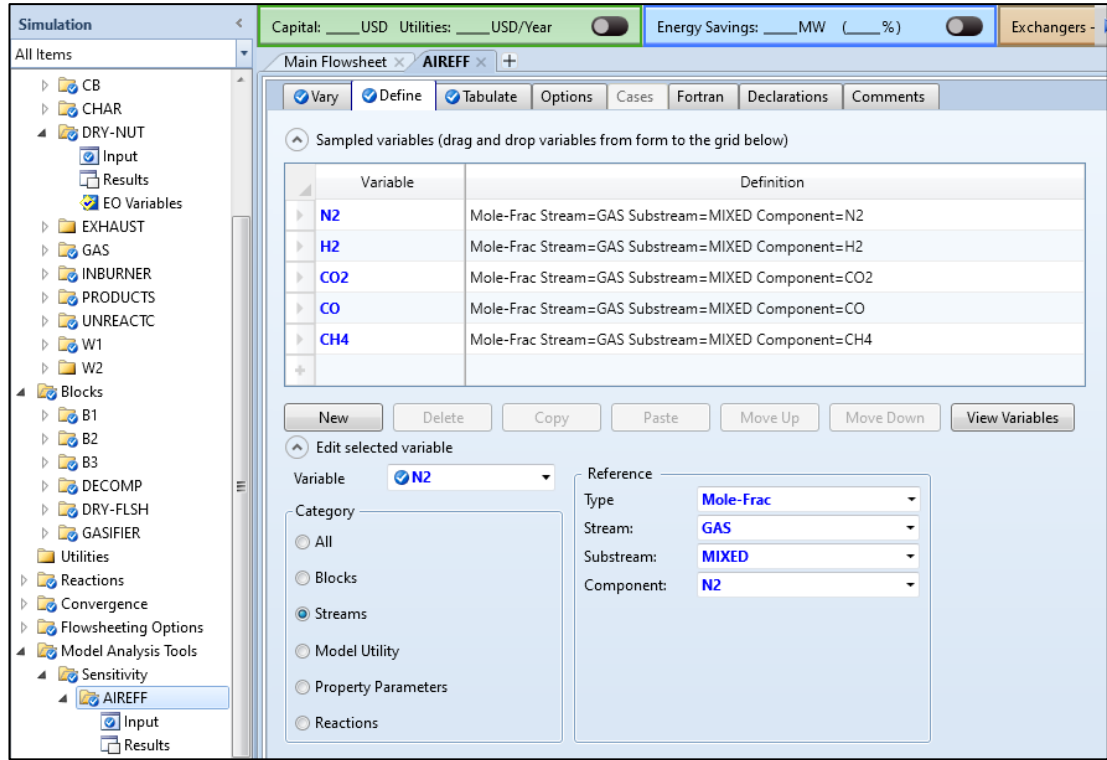
Manipulated variable limits

Equidistant  Logarithmic  List of values

Start point: 0 kg/hr  
 End point: 50 kg/hr  
 Number of points: 11  
 Increment: 5 kg/hr

Report labels

A1.8 Hava Akşının Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları.



**A1.9** Hava Akşının Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları.

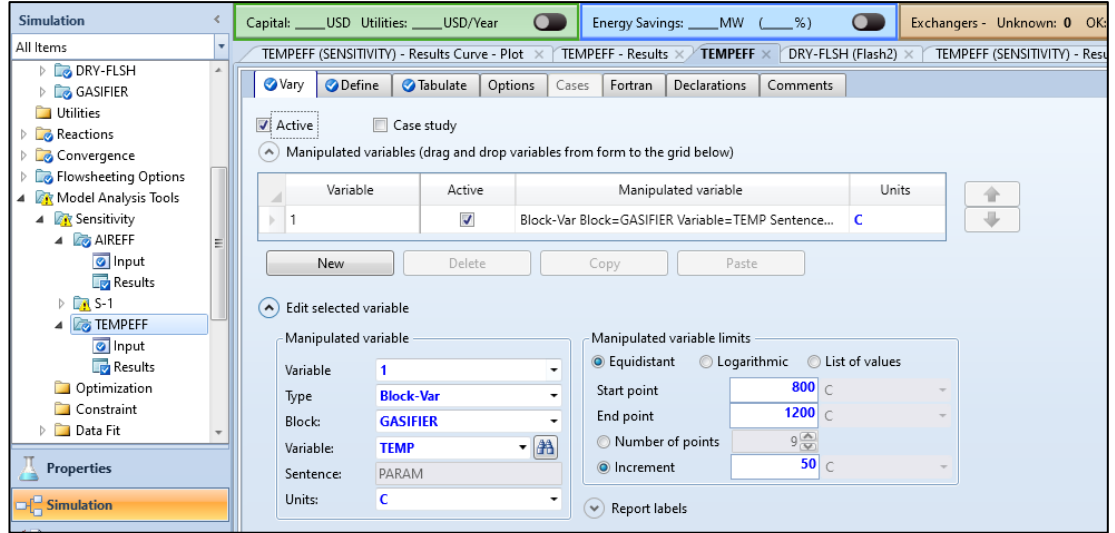
Simulation Capital: \_\_\_ USD Utilities: \_\_\_ USD/Year Energy Savings: \_\_\_ MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x AIREFF - Results x B3 (REquil) x Results Summary - Equipment x +

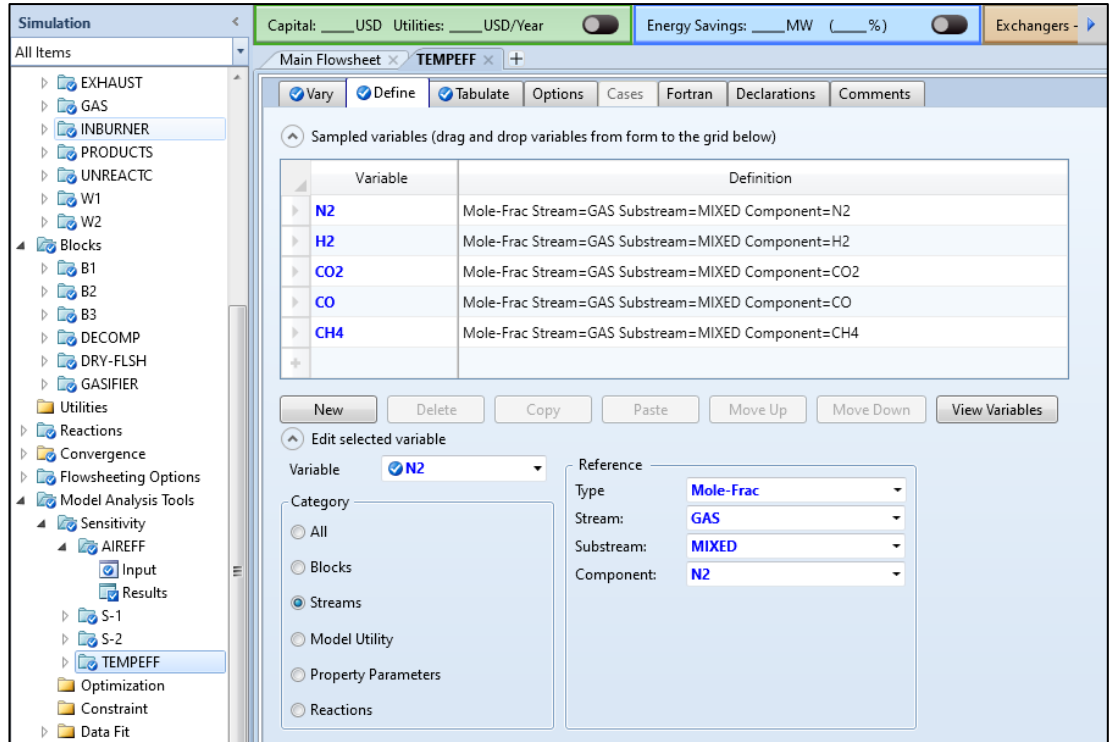
Summary Define Variable Status

Row/Case	Status	VARY 1 AIR MIXED TOTAL MA SSFLOW KG/HR	N2	H2	CO2	CO	CH4
1	OK	0	0,0007638...	0,514531	0,0393717	0,445333	0
2	OK	5	0,100386	0,423423	0,0625471	0,413644	0
3	OK	8,3	0,163836	0,36659	0,0796787	0,389895	0
4	OK	10	0,195679	0,338466	0,0890648	0,37679	0
5	OK	15	0,28539	0,261089	0,119188	0,334333	0
6	OK	20	0,368238	0,192605	0,152899	0,286258	0
7	OK	25	0,443088	0,134014	0,189864	0,233034	0
8	OK	30	0,50915	0,0857905	0,2294	0,175659	0
9	OK	35	0,56614	0,0477356	0,270536	0,115589	0
10	OK	40	0,614331	0,0190007	0,312149	0,0545196	0
11	OK	45	0,652099	8,19633e-...	0,346001	2,74011e-...	0
12	OK	50	0,663675	0	0,316955	0	0

**A1.10** Hava Akışının Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları



**A1.11** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları.



**A1.12** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları.

Simulation Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x TEMPEFF - Results x B3 (REquil) x Results Summary - Equipment x +

Summary Define Variable Status

Row/Case	Status	VARY 1 GASIFIER PARAM TEMP C	N2	H2	CO2	CO	CH4
1	OK	300	0,321294	0,257833	0,195172	0,225701	0
2	OK	330	0,309696	0,266612	0,188202	0,23549	0
3	OK	360	0,299323	0,274536	0,182113	0,244028	0
4	OK	390	0,28964	0,282014	0,17659	0,251756	0
5	OK	420	0,280042	0,289476	0,171215	0,259267	0
6	OK	450	0,269851	0,297372	0,165454	0,267323	0
7	OK	480	0,258377	0,306116	0,158676	0,276831	0
8	OK	510	0,245031	0,316003	0,150224	0,288742	0
9	OK	540	0,22951	0,327072	0,139536	0,303882	0
10	OK	570	0,211967	0,339007	0,126305	0,322721	0
11	OK	600	0,193087	0,351137	0,110635	0,34514	0
12	OK	800	0,163841	0,366572	0,0796517	0,389936	0

**A1.13** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Fındık Kabukları.

Simulation Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x AIREFF x +

Vary Define Tabulate Options Cases Fortran Declarations Comments

Active  Case study

Manipulated variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Active	Manipulated variable	Units
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Stream-Var Stream=AIR Substream=MIXED Variabl...	kg/hr

New Delete Copy Paste

Edit selected variable

Manipulated variable

Variable: 1  
Type: Stream-Var  
Stream: AIR  
Substream: MIXED  
Variable: MASS-FLOW  
Units: kg/hr

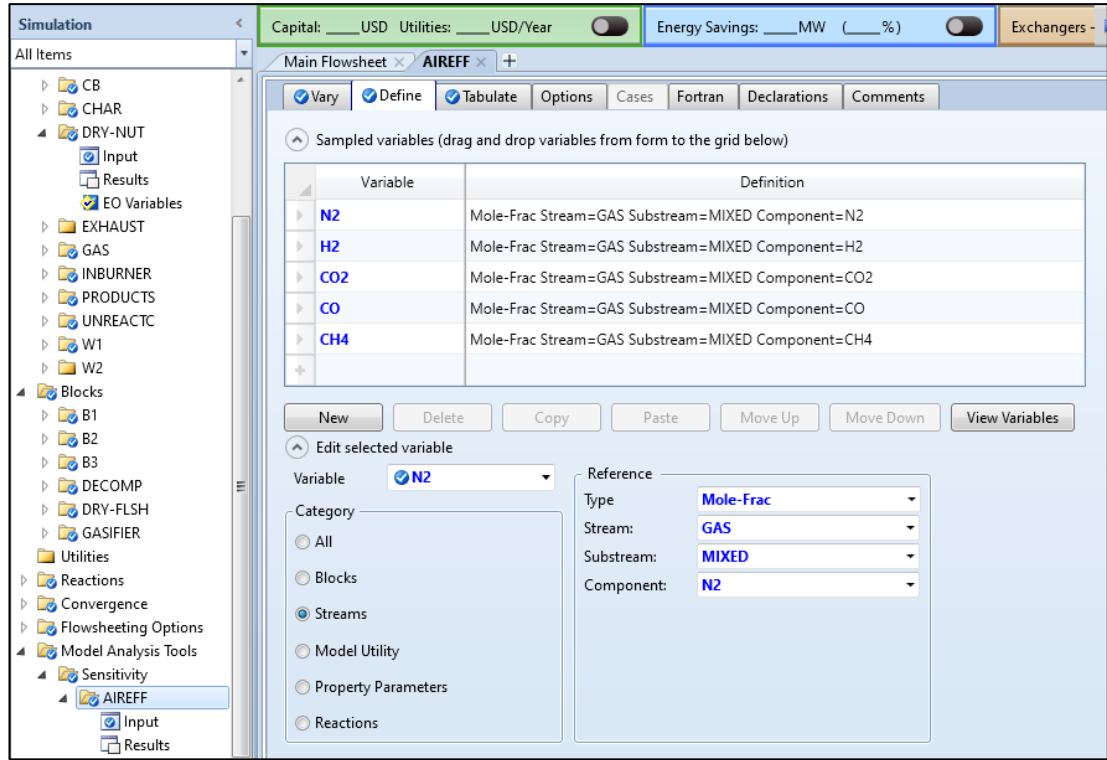
Manipulated variable limits

Equidistant  Logarithmic  List of values

Start point: 25 kg/hr  
End point: 75 kg/hr  
Number of points: 11  
 Increment: 5 kg/hr

Report labels

**A1.14** Hava Akşının Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları



**A1.15** Hava Akışının Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları.

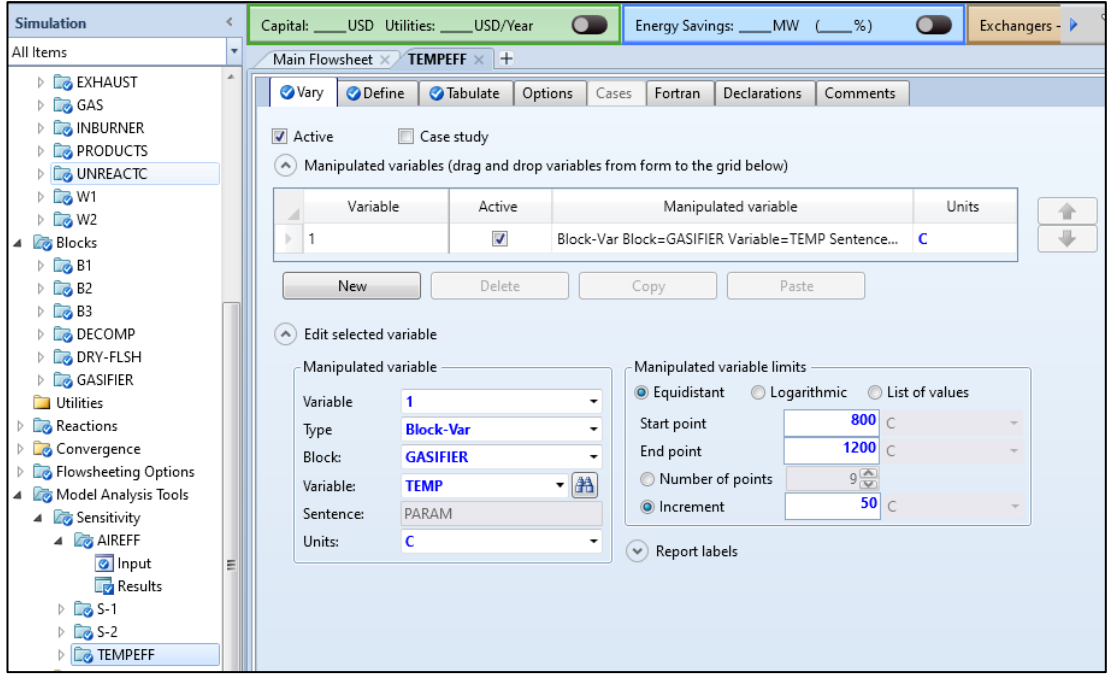
Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x AIREFF - Results x +

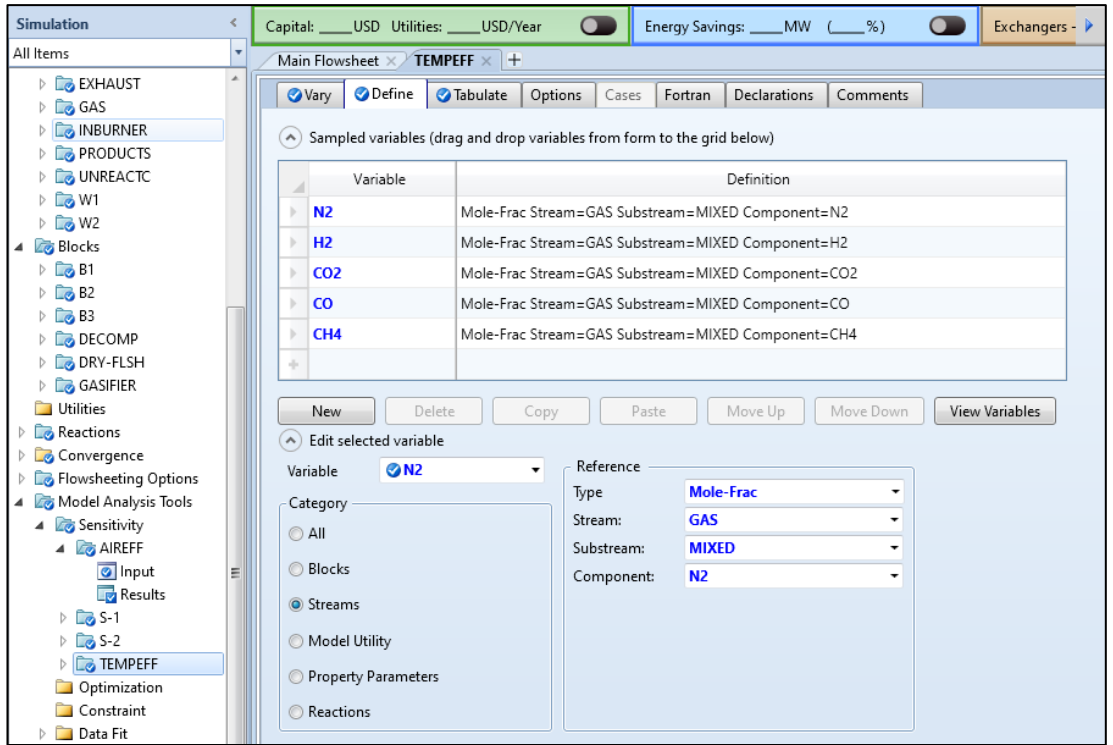
Summary Define Variable Status

Row/Case	Status	VARY 1 AIR MIXED TOTAL MA SSFLOW KG/HR	N2	H2	CO2	CO	CH4
1	OK	25	0,298153	0,265858	0,0493681	0,386621	0
2	OK	30	0,352789	0,217168	0,0660488	0,363994	0
3	OK	35	0,404451	0,172865	0,0856834	0,337	0
4	OK	40	0,452478	0,133684	0,108393	0,305445	0
5	OK	45	0,496321	0,100126	0,134037	0,269516	0
6	OK	50	0,535648	0,0723323	0,162174	0,229845	0
7	OK	55	0,570417	0,0500353	0,192109	0,187439	0
8	OK	55,6	0,574292	0,047703	0,195783	0,182222	0
9	OK	60	0,600856	0,0326325	0,223024	0,143488	0
10	OK	65	0,627385	0,0193382	0,254131	0,099146	0
11	OK	70	0,65051	0,00933787	0,28478	0,055373	0
12	OK	75	0,670742	0,00189285	0,314495	0,0128698	0

**A1.16** Hava Akışının Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları



**A1.17** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Veri Girişi Duyarlılık Analizi-Çay Yaprakları.



**A1.18** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sentez Gazı Özelliklerinin Tanımlanması Duyarlılık Analizi- Çay Yaprakları.

Simulation Capital: \_\_\_USD Utilities: \_\_\_USD/Year Energy Savings: \_\_\_MW (\_\_\_%) Exchangers -

Main Flowsheet x TEMPEFF - Results x +

Summary Define Variable Status

Row/Case	Status	VARY 1 GASIFIER PARAM TEMP C	N2	H2	CO2	CO	CH4
1	OK	800	0,57346	0,0490812	0,196947	0,180511	0
2	OK	850	0,573705	0,0486758	0,196605	0,181015	0
3	OK	900	0,573923	0,0483141	0,196299	0,181464	0
4	OK	950	0,574118	0,0479914	0,196027	0,181864	0
5	OK	1000	0,574292	0,047703	0,195783	0,182222	0
6	OK	1050	0,574447	0,047445	0,195565	0,182543	0
7	OK	1100	0,574587	0,0472136	0,19537	0,18283	0
8	OK	1150	0,574712	0,0470056	0,195194	0,183088	0
9	OK	1200	0,574825	0,0468182	0,195036	0,183321	0

**A1.19** Sıcaklık Değişiminin Etkisi Sonuçlar Duyarlılık Analizi- Çay Yaprakları.