

## Atık biyokütle yakıtlarının aşağı akışlı reaktörde sentez gazı üretiminde kullanımının hesaplamalı akışkanlar dinamiğiyle incelenmesi

*A computational fluid dynamics investigation of the utilization of waste biomass fuels for syngas production in a downdraft reactor*

**Merdin DANIŞMAZ\*** 

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 40100, Kırşehir

• Geliş tarihi / Received: 28.11.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 19.08.2024

### Öz

Gazlaştırma teknolojilerinden biri olan biyokütle gazlaştırması, atık orman dışı odun ürünlerinin çevreci ve temiz enerji üretiminde kullanımı amacıyla geliştirilmekte olan teknolojilerden biridir ve bu alanda yaygın çalışma konuları arasındadır. Bu çalışmada, üç farklı biyokütlenin (Çam odunu, çam kozalağı, fındık kabuğu) aşağı akışlı bir reaktördeki gazlaştırma analiz ve simülasyonu yapıldı. Analiz ve hesaplamalarda Ansys-Fluent ticari yazılımının 2020 versiyonu kullanıldı. Küçük ölçekli bir gazlaştırma reaktörü modellenerek yakıt ve hava besleme koşulları belirlendi. Gazlaştırma için gerekli hava-yakıt oranının, stokiyometrik yanmadan farklılığını ortaya koymak için farklı eşdeğerlik oranlarıyla (0,15-0,35) analizler yapıldı. Reaktördeki gazın sıcaklık dağılımı ve üretilen sentez gazının içeriğine göre 0,20 eşdeğerlik oranı değerinin bu ölçekte bir gazlaştırıcı için uygun olduğu belirlendi. Reaktör içerisinde 900 °C'nin üzerinde sıcaklık değerlerine ulaşılarak sentez gazı içeriğindeki CO, H<sub>2</sub>O ve CH<sub>4</sub> yanıcılarının reaktör içerisindeki kontürleri gösterildi ve karışımdaki oranları belirlendi. Bulguların bilimsel literatürdeki değerlerle uyumlu sonuçlar içerdiği görüldü. Atık biyokütlelerin temiz enerji üretiminde kullanılabileceği ve ayrıca, HAD analiziyle yakıt ve kapasite özelinde gazlaştırma reaktörlerinin geliştirilmesinin mümkün olduğu ortaya kondu.

**Anahtar kelimeler:** Aşağı akışlı, Biyokütle, Gazifikasyon, HAD, Sentez gazı

### Abstract

Biomass gasification, one of the gasification technologies, is among the technologies being developed for environmentally friendly and clean energy production of waste non-forest wood products and is a common subject of study in this field. In this study, gasification of three different biomasses (pine wood, pinecone, and hazelnut shell) in a downdraft reactor was analyzed and simulated. Ansys-Fluent commercial software (version 2020) was used for the analysis and calculations. A small-scale gasification reactor was modeled, and fuel and air feed conditions were determined. The air-fuel ratio required for gasification was analyzed with different equivalence ratios (0,15-0,35) to demonstrate the difference from stoichiometric combustion. According to the reactor gas temperature distribution and the content of the synthesis gas produced, it was determined that the equivalence ratio of 0,20 is suitable for a gasifier of this scale. By reaching temperatures above 900 °C in the reactor, the contours of CO, H<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> combustibles in the synthesis gas content in the reactor were shown and its proportions in the mixture were determined. The results were found to be consistent with the values in scientific literature. It was revealed that waste biomass can be used in clean energy production, and it is possible to develop fuel and capacity specific gasification reactors with CFD analysis.

**Keywords:** Downdraft, Biomass, Gasification, CFD, Syngas

\*Merdin DANIŞMAZ; m.danisman@ahievran.edu.tr

## 1. Giriş

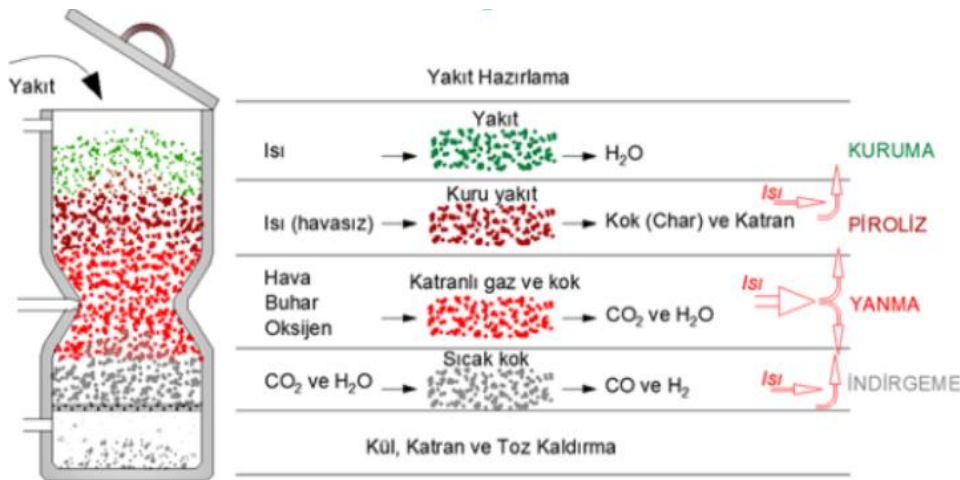
### 1. Introduction

Küresel ısınma ve iklim değişikliği kaygılarının bir sonucu olarak geleneksel fosil yakıtların kullanımı kısıtlanmakta veya alternatif enerji kaynaklarına yönelmeye teşvik edilmektedir. Biyokütlenin enerji üretiminde tercih edilmesi bu arayışların bir sonucu olarak cazip hale gelmiştir (Bridgwater vd., 2002; Ahrenfeldt vd., 2013). Ancak bu yönelimin çevreci ve kolay uygulanabilir olması karbon ayak izinin kontrolü bakımından önemlidir. Düşük ısıl değerindeki kömür ve atık biyokütlenin gazlaştırma (gazifikasyon) tekniğiyle yanıcı gaza dönüştürülmesi, yaygın ve kabul görmüş bir enerji dönüşüm prosesidir. Özellikle, biyokütle atıklarının enerji kaynağı olarak kullanımı, geri dönüştürülebilir malzemelerin kaynağında ayrıştırılmasını gerektirir. Proses, farklı enerji formlarına dönüşüm veya organik içeriğinin belirlenmesini içeren gelecek vaat eden uygulamalardan biridir. Odun dışı orman veya tarla ürünleri çoğunlukla atık olarak kalmakta veya doğrudan yakılarak ortadan kaldırılmaktadır. Çok az biyokütle geleneksel ısıtma ve pişirme uygulamalarında kullanılmaktadır (Ma vd., 2012).

Gazlaştırma yoluyla biyokütlenin sentez gazına, termal enerjiye veya dolaylı olarak elektrik enerjisine dönüştürülmesi mümkündür. Gazlaştırma, doğrudan yakmaya tercih edilir. Bunun nedeni, bu işlemin yanıcı gaz üretimine ve daha düşük kirletici salınımlarına neden olmasıdır. Gazlaştırma sonucunda elde edilen yanıcı gaz karışımları genellikle uygulama sıcaklığına bağlı olarak ürün gazı veya sentez gazı olarak adlandırılır. Sentez gazının içeriğinde, temel yanıcılar olarak metan ( $\text{CH}_4$ ), karbon monoksit ( $\text{CO}$ ) ve hidrojen ( $\text{H}_2$ ) bulunur. Üretilen gazın içeriği, gazın ısıl değerini ve dolayısıyla yakıt olarak kalitesini belirler (Demirbas, 2000). Sentez gazı üretiminde testere tozu (ince talaş) (Stancin vd., 2021), zirai mahsul atıkları (Zheng & Oiu, 2020), kurumuş çimen (Sibiya vd., 2021) ve ağaç yaprakları (de Vries vd., 2021) gibi pek çok biyokütle besleme yakıtı olarak kullanılır ve yanma değerleri sunulur. Üretilen gazın içeriğinin enerji üretiminde kullanılmak üzere yanma için yeterli ısıl değerinde olduğu ortaya konursa pek çok uygulama için önerilir.

Yakıcı olarak hava kullanıldığında, gazlaştırma işlemi sonucunda elde edilen sentez gazının alt ısıl değeri doğalgazdan (yaygın kullanılan gaz yakıt olarak) daha düşük olur. Bu değer genellikle  $4\text{-}6 \text{ MJ/N-m}^3$  arasında olmaktadır. Hava yerine doğrudan Oksijen kullanımıyla bu değeri artırmak mümkündür. Sentez gazının içten yanmalı motorlarda doğrudan yakıt olarak kullanımı veya güç üretim sistemlerinde değerlendirilmesi de mümkündür (Zhang, 2010). Yakıt yükleme ve proses akışına göre çeşitli türde reaktörler olmasına rağmen biyokütle gazlaştırması için çoğunlukla aşağı akışlı (Downdraft) gazlaştırıcılar tercih edilir. Bu doğrudan yakmaya benzeyen en kolay ve temel uygulamalardan biridir (Basu P., 2018).

Gazlaştırma uygulaması, yakıtın tamamen yanması için gerekli olandan daha az oksijen sağlanarak biyokütle gibi organik yakıtların gaz bileşiklerine dönüştürülmesi aşamalarını içerir. Bu gaz üretim prosesindeki termokimyasal dönüşüm aşamaları, gaz akışı boyunca sırasıyla kurutma, piroliz ve oksidasyon ve indirgeme aşamalarını içerir (Şekil 1). Gaz reaktörünün ilk reaksiyon bölgesi olan kurutma (drying) bölgesinde reaktöre yüklenen hammadde alt bölgelerden gelen ısı ile ısınır ve kuruyarak nemden kurtulur.



Şekil 1. Downdraft gazlaştırma süreci (Danışmaz, 2017)

Figure 1. Downdraft gasification process (Danışmaz, 2017)

Piroliz bölgesi; mangal kömürü, kül ve uçuların olduğu kısımdır. Yalnızca piroliz içeren uygulamalarda bu kısımda oluşan gaz nadiren kullanılır. Kok ve katranın da oksijenle reaksiyona girmesiyle, katı kütleden yavaş yavaş kurtulunan bölge oksidasyon (oxidation) bölgesidir. Reaktörün en son kısmı ise, yanıcı gazların ve az miktarda külün reaktörden alındığı indirgeme (reduction) bölgesidir (Danışmaz, 2017; Demirtaş & Danışmaz, 2016). Bu kısımdan sonra, elde edilen gaz karışımının, siklon temizleyicilerde ilave işlemlere tabi tutulması başka bir uygulama olarak değerlendirilir. Oluşan katran ve kül için de farklı kimyasal değerlendirme süreçlerinin olduğu bilinmelidir.

Deneysel proseslerin yüksek maliyetli olması ve biyokütle çeşitliliğine göre standart gazlaştırma reaktörünün geliştirilmesinin zor ve uzun süre alması nedenleriyle, biyokütle gazlaştırma prosesleri için başlıca araştırma yöntemi olarak sayısal simülasyonlar ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılmaktadır. Bu sayede, uygun reaktör geliştirmek ve farklı biyoküteller için hızlı çözümleme sağlanması mümkün olmaktadır. Deneysel verilerle desteklenen bu modeller, optimum çalışma koşulları altındaki çeşitli parametrelerin bir gazlaştırıcının çalışması üzerindeki etkileri hakkında niteliksel bilgiler sağlayabilir. Bu nedenle daha fazla çalışmalarla zenginleştirilmesi gerekir. Gazlaştırıcıda yakıt olarak kömür kullanılması yaygındır. Örneğin, Patel ve arkadaşları, aşağı akışlı bir gazlaştırıcı kullanarak gazlaştırma etkilerini HAD analizi ile çalıştılar (Patel vd., 2013) ve üretilen sentez gazının içeriğini verdiler. Odun ve odun talaşlarının gazlaştırma performansı, farklı besleme havası koşullarında değerlendirilir (Simone vd., 2013; Sheth & Babu, 2009). Bu, talaşın değerlendirilmesinde alternatif çözümler sunar. Bir çalışmada (Cai vd., 2017), odun briketlerinin yakıt olarak kullanılmasının gazlaştırıcı performansını artırdığını belirten sayısal sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca, Gao ve arkadaşları (Gao vd., 2019), atık olarak düşündükleri pirinç kabuğunun simülasyon ve optimizasyonunu çalıştılar. Değişken Eşdeğerlik Oranlarında (ER) parametrik sonuçları verdiler. Optimal sonuç olarak %25,15 CO konsantrasyonu, 1.96 Nm<sup>3</sup>/kg gaz üretimi ve %65,34 gaz verimliliği gibi sayısal değerlere ulaşılar. Benzer bir çözüm yöntemiyle, Kumar ve Paul tarafından (Kumar & Paul, 2019) 20 kW kapasiteli bir gazlaştırıcıda farklı türdeki biyokütle atıklarının gazlaştırıcı sıcaklıklarına etkisi verildi. Pampas (miskantus) gibi tarla atığı sayılan biyokütlenin gazlaştırma değerlendirilmesi de deneysel ve nümerik olarak çalışıldı (Asadullah, 2014; Monteiro vd., 2017; Maya vd., 2021). Elde edilen sonuçlar, yakma sistemlerinde kullanıma uygun içerikte ve ısı değerinde sentez gazı üretilebileceğini ortaya koydu. Bu çalışmalarda kullanılan çözümleme yaklaşımı kullanılarak gazlaştırma sürecinin modellenmesi; katı ve gaz fazları arasındaki farklı reaksiyonları tanımlayan kütle, momentum ve enerji denklemlerinin iteratif sayısal çözümünü ortaya koymaktadır. Türbülanslı akış oluşturan karışımlar, doğrudan sayısal simülasyon (Direct Numerical Solution-DNS), geniş girdaplı simülasyon (Large Eddy Simulation-LES) ve Reynolds ortalama Navier-Stokes (Reynolds Average Navier-Stokes-RANS) denklemleri gibi yöntemlerle modellenenmekte ve çözümlenmektedir (Ruiz vd., 2013; Maya vd., 2021). HAD modelleri, uygulanmak istenen proje özelliklerine bağlı olarak en uygun konfigürasyonu belirlemek amacıyla herhangi bir ölçekte çeşitli konfigürasyonları ve çalışma koşullarını araştırmak için uygun maliyetli seçenekler olarak görünmektedir. Ayrıca, HAD'ın hem gazlaştırıcı hem de biyokütle modellenmesinde önemi büyüktür (Nimlos & Crowley, 2010). Aşağı akışlı gazlaştırıcıların modelleme çalışmalarının çoğu, gazlaştırma akışkanı olarak hava kullanan tek aşamalı beslemeli reaktörlere dayanmaktadır. Buhar, oksijen ve bunların ikisinin birlikte kullanımı da gazlaştırmada önemli iyileştirmelere yol açabilmektedir (Hosseini vd., 2012; Shayan vd., 2018). Farklı özelliklerde gazlaştırma ürünlerinin karşılaştırılması ve diğer parametrik koşullar üzerindeki etkilerine ilişkin çalışmalar literatürde oldukça azdır. Atıkların değerlendirilmesi, çevrenin temiz tutulması ve alternatif enerji teknolojilerinin gelişimi için daha fazla çalışmanın yapılması oldukça doğaldır.

Bu çalışmanın amacı, küçük ölçekli standart bir aşağı akışlı gazlaştırıcı için HAD modeli kullanarak çam odunu, çam kozalağı ve fındikkabuğunun gazlaştırmasıyla sentez gazı üretimini değerlendirmektir. Bu üç biyokütle; enerji için yüksek verimli alternatif biyokütellerin kullanılmasına yönelik artan ilgi nedeniyle seçilmiştir. Atık sayılmayan çam odunu, bir karşılaştırma yakıtı olarak ayrıca hesaba katılmıştır. Sonuçlar, farklı biyoküteller kullanılarak test edilen küçük ölçekli bir gazlaştırma reaktöründen elde edilen deneysel veya sayısal değerlerle karşılaştırılmış ve anlamlı bir değerlendirmenin yapıldığı görülmüştür. Sentez gazı içeriğindeki CO, CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> konsantrasyonlarını, düşük hesaplama maliyetiyle ve karmaşık kimyasal reaksiyon modellerine çok benzer sonuçlarla tahmin etmek için "Olası Yoğunluk Fonksiyonu" (Probability Density Function-PDF) olan üç boyutlu, kimyasal dengeli, ön karışimsız (Non-promixed) bir yanma modeli kullanılmaktadır. Yakıtın, elementel ve nihai analiz değerleri bu modele tanımlanabilmekte ve içeriğe uygun kimyasal reaksiyonlar, analize tanımlanabilmektedir. Model ayrıca, element bileşime, nem ve ısıtma değerine bağlı olarak farklı biyokütellerle ilgili olarak çok yönlülük sunmaktadır. Bu çalışma sözü edilen bu uyarlamaları içinde barındırmaktadır ve farklı pratikler için geliştirilmeye açıktır.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

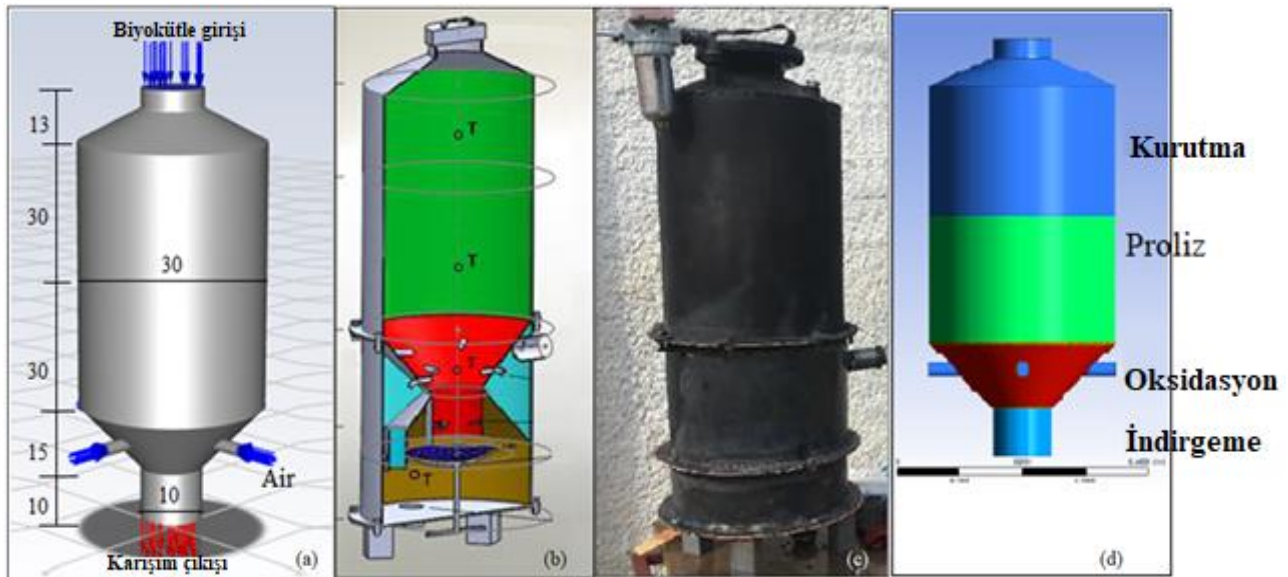
#### 2.1. Materyal ve geometri

##### 2.1. Material and geometry

Modellemeler için belirlenen ve uygulanan tasarımlar, pratikte uygulanabilir geometrik ölçülendirmelerden oluşmalıdır. Ancak karmaşık katı ve gaz akışı içeren analizler için temel kabullerin yapılması önemlidir. Sonlu elemanlar yöntemiyle çözümleme modellerinde, gazlaştırmanın karmaşık kimyasına kimyasal dengedeymiş gibi ve sabit difüzyon alev modeline kimyasal dengeye yakınmış gibi yaklaşılabılır (Inc, 2013).

Bu çalışmada, standart aşağı akışlı reaktörde gerçekleştirilen biyokütle gazlaştırma işlemi, farklı biyokütle türlerinin reaksiyon bölgesine girerek oksidasyon bölgesinden gelen havayla yakılması prensibini konu alır. Bu amaçla akış ve yanma işlemlerinin birlikte değerlendirilmesi yapıldı. Prosesin tamamı, karışimsız yanma yaklaşımına sahip bir denge modeli kullanılarak analiz edildi. Bu yaklaşım, kimyasal reaksiyonlarda atomik elementlerin korunduğu anlamına gelir. Buna karşılık karışım, içeriği korunmuş bir skaler değerlerdedir. Yanma, bir karıştırma problemi göz önünde bulundurularak basitleştirilir. Böylece, doğrusal olmayan ortalama reaksiyon hızlarının kaldırılmasıyla ilgili zorluklardan kaçınılmış olur. Ön karışimsız modelleme yaklaşımı, bir veya iki korunmuş skaler için taşıma denklemlerinin çözümünü içerir. Biyokütle konsantrasyonları, bir yaklaşım olarak tahmin edilen karışım fraksiyonu alanlarından türetilir. Kömür ve biyokütle içeriği temel olarak bu alanda tanımlanmıştır. Ancak analiz sonuçlarına göre yeniden düzenlenebilir. Termo-kimyasal hesaplamalar, bir olası yoğunluğa bağlı fonksiyon olan PDF ile hesaba katılan türbülans ve kimyasal etkileşimle eş zamanlı olarak önceden işlenir. Bu yöntem, çok sayıda ardışık denklemlerin çözümünü gerektirmediği için hesaplamalarda tercih edilir (Shen vd., 2019).

Şekil 2'de, modellenen gazlaştırıcıya ait temel yapısal özellikler görülmektedir. Reaktör, 30 cm çapında 105 cm yüksekliğindeki temel ölçülerdedir. Yükleme ve oksidasyon bölgeleri, akış yönüne göre gövdenin üçte biri çapına sırasıyla genişlemekte ve daralmaktadır (Şekil 2a). Şekil 2b, modelin kesit görünüşü ve Şekil 2c, düzeneğin önceden çalışılan (Danışmaz, 2017) deneysel görselidir. Modelleme ve analizler, bu deneysel uygulamaya bağlı kalınarak yapılmıştır. Giriş kısmında ayrıntılı olarak açıklanan gazlaştırma bölgeleri Şekil 2d'de verilmiştir.



**Şekil 2.** Gazlaştırıcı (reaktör) a) Geometri (ölçüler cm'dir) b) Kesit görünüş c) Deneysel düzenek d) Şematik  
**Figure 2.** Gasifier (reactor) a) Geometry (as cm) b) Sectional view c) Experimental setup d) Schematic

Yakıt reaktöre üst kısımdan belli bir kütleli akış oranında yüklenir. Yükleme hızı, sabit ve sürekli yükleme şeklinde sürdürülebilir. Besleme havası, oksidasyon bölgesine çevresel eşit dağılımlı 4 farklı merkezi konumdan girmektedir. Analizde, bu akışkan standart atmosfer havası olarak belirlendi. Besleme kanallarının geometrik özellikleri aynı olmakla birlikte tanımlanan besleme akış hızlarının da denktir. Bu kısımlarda da

koşullandırma yapılabilir. Gazlaştırma sonu üretilen tüm ürünler, indirgeme bölgesinde karışım basınç çıkışı olarak belirlenen çıkış kısmından tahliye edilir. Reaktör duvarları, kaymama sınır koşulunda ve dıştan yalıtımlı duvar olarak sisteme tanıtıldı. Çevre ortam ile olması muhtemel ısıl etkileşimler ihmal edildi.

Bu çalışmada kullanılan çam odunu, çam kozalağı ve fındikkabuğu olmak üzere 3 farklı biyokütle için yakıt içeriğini veren elementel analiz sonuçları Tablo 1’de verildi. Biyokütle gazlaştırmalarında Sülfür Oksit oluşumlarına genellikle rastlanmaz (Basu, 2010). Bu nedenle hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Gazlaştırma akışkanının içeriğinin üretilen sentez gazı oluşumuna önemli etkisi vardır. Analizde kullanılan besleme akışkanı 25 °C sıcaklık koşullarındaki atmosfer havasıdır. Pratik uygulamalarda genellikle iyi montajlanan reaktör için analiz ve hesaplamalarda da sızıntının olmadığı varsayıldı. Bir başka kabul ise hem besleme akışkanının hem de reaktör içindeki diğer akışların daimî ve sürekli akış koşullarında olmasıdır. Gazlaştırma testleri, başlangıçta bir tutuşturma işlemi ve kararlı bir gazlaştırma prosesinin başlangıcını içerir. Tam gazifikasyon ise bu işlemler tamamlandıktan sonra başlar. Analizlerde bu durum dikkate alınmıştır.

**Tablo 1.** Biyokütle yakıtların analiz değerleri

**Table 1.** Analysis values of biomass fuels

Yakıt tipi	% Ağırlık					Toplam	Ref.
	Karbon (C)	Hidrojen (H)	Oksijen (O)	Azot (N)	Sülfür (S)		
Çam odunu	47.18	5.27	43.12	0.37	<0.1	100	Türkoğlu & Gökoğlu, 2017
Çam kozalağı	42.62	5.56	51.01	0.76	0.05	100	Brebua vd., 2010
Fındık kabuğu	51.25	4.99	43.22	0.54	<0.1	100	Onay & Koçkar, 1998

## 2.2. Modelleme ve veri girişi

### 2.2. Modeling and data reduction

Bu çalışma için çözüm metodolojisi olarak karışimsız (non-premixed) yanma modeli seçildi. Bunun nedeni, besleme yakıtı ve yakıcı akışkanın farklı giriş koşullarına sahip olmasıdır. Kütle ve momentum korunumu denklemleri, sırasıyla Denklem (1) ve (2)’ye göre her akış için Ansys-Workbench yazılımının Fluent modülüyle çözdürüldü. Burada,  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu ve  $\vec{v}$  vektörel hızı ifade eder.  $S_m$  gaz fazına nüfuz eden reaksiyon parçacıklarının kütesidir. Denklem (3)’te verilen enerjinin korunumu, adyabatik olmayan ve ön karışimsız yanma modellerinde uygulanır. Genellikle, sonlu türde üretim oranları olduğunda eklenen viskoz yayılım (dissipasyon) ( $S_h$ ) ifadesi de bu denkleme dahil edilmiştir (Ahrenfeldt vd., 2013; Basu P., 2018).

Süreklilik;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Momentumun korunumu;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\hat{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Enerjinin korunumu;

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (3)$$

Burada,  $p$  basınç,  $k$  ısı iletkenlik,  $\hat{\tau}$  değişken kayma gerilimi ve  $\vec{F}$  vektörel formda ortaya çıkan diğer kuvvetleri temsil etmektedir. Işınm kaynağı terimleri ve transport denklemleri Denklem (3)’e dahil edilmiştir. Ayrıntılı değerlendirmeye literatürden ulaşılabilir (Maya vd., 2021).

Türbülanslı kimyasal etkileşim çözümü yapmak için PDF metodundaki reaksiyon kimyası, karışım fraksiyonu modeli kullanılarak belirlenir. Burada, denge model kullanılır ve kimyasal işlemlerin yeterince hızlı olduğu

kabul edilir. Bu durumda, akışkanın termo-kimyasal sürekliliği, karışım fraksiyonuyla (f) ilişkili olur. Gibbs serbest enerj kavramından belirlenen karışım fonksiyonu Denklem (4)'ten hesaplanır (Patel vd., 2013).

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,oks.}}{Z_{i,yakıt} - Z_{i,oks}} \quad (4)$$

Burada,  $Z_i$  ifadesi, i bileşenin kütleli fraksiyonu temsil eder. Yakıt ve oks alt indisleri ise sırasıyla biyokütle ve oksitleyici girişini ifade eder.

Tablo 2'de çözümlenme ayarlarına tanımlanan kimyasal reaksiyon bilgileri verilmiştir (Basu, 2010). Hava-katı karışımındaki başlangıç koşullarının nihai gaz ürünlerine dönüşüm aşamaları burada açıkça gösterilir. Analiz, bu oluşumları sırasıyla tamamlar ve düzenler. Bu reaksiyonlar, hesaplama ayarlarında tanımlanan akışkan ve katı içeriklere göre sisteme eklendi. Reaksiyon ısıları, gazlaştırma bölgelerindeki sıcaklıkların oluşumundan sorumludur. Bu yüzden, çözümlenme türetilen çıktılar doğrudan etkiler.

**Tablo 2.** Gazlaştırma reaksiyonları

*Table 2. Gasification reactions*

Reaksiyon No	Kimyasal reaksiyon	Reaksiyon prosesi	Reaksiyon ısısı (kJ/kmol)
Reaksiyon 1	$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$	Kısmi yanma	-111
Reaksiyon 2	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Tam yanma	-394
Reaksiyon 3	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	Boudouard gazlaştırması	+173
Reaksiyon 4	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Hidro gazlaştırma	+131
Reaksiyon 5	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	Su buharı gazlaştırması	-75
Reaksiyon 6	$CO + 1/2 O \rightarrow CO_2$	Karbonmonoksit yanması	-283
Reaksiyon 7	$H_2 + 1/2 O \rightarrow H_2O$	Hidrojen yanması	-242
Reaksiyon 8	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	Metan-su buharı reaksiyonu	+206
Reaksiyon 9	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	Su-gaz değişim reaksiyonu	-41

### 2.3. Simülasyon ayarları

#### 2.3. Simulation setup

Belirlenen geometrik ölçülerde 3 boyutlu olarak çizilen ve sonlu elemanlara ayrılan gazlaştırıcı modeli için basınç temelli çift (duble) hassasiyette çözümlenme ayarı yapıldı. Modelleme ve çözüm işlemi, Ansys Workbench 2020 R2 programı kullanılarak yapıldı. Viskoz model çözümlenme ayarları, k-ε-Realizable türbülans modelindeki standart duvar fonksiyonları çözümlenmesini içerecek şekilde belirlendi. Bu yaklaşım, akış rejiminin tam olarak kestirilemediği uygulamalar için çoklukla tercih nedenidir. Reaktör içindeki gaz türleri CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> ve C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> karışımı olarak modellenirken, sürekli faz kimyasal denge modellemesi için en uygun olan Euler-Euler yaklaşım yöntemi seçildi (Ansys, 2013; Blasi & Branca, 2013). Katı partiküller silindirik şekilde modellendi ve reaktör yatağında kademeli olarak ayrılan gözenekli bir ortam oluşturdu. Katı ve gaz fazlar için yönetim denklemleri (Tablo 2), bir dizi sonlu reaksiyon kinetiği ile kararlı durum ve türbülanslı akış koşulu altında sayısal olarak çözdürüldü. Böylece hareketli bir katı madde yatağı içindeki katı partiküller ve gazlar arasındaki etkileşim hesaba katılmış oldu. Radyasyon modeli, ayrık ordinatlar (DO) olarak ayarlandı. Yakıt türlerine göre oluşturulan PDF'ler ve yanma öncesi/sonrası ürünler sistemde ayrıca

tanımlandı. Karışimsız akıştaki hacimsel reaksiyonlar için olması gereken modeller, türlerin (Species) modellenmesi şeklindeki uyarlamayla kullanıldı. Karışım türlerinin belirlenmesi amacıyla, sonlu oranda Eddy dissipasyonlarına sahip yakıt/yanma düzenlemeleri kullanan yakıt türlerinin elementel ve nihai analiz sonuçları sisteme tanıtılarak hesaplatıldı (Coal calculator). Tüm bu uyarlamalar, alttan akışlı biyoküyle gazlaştırması için faydalı olduğu düşünülen genel ayarları oluşturur (Maya vd., 2021). Sınır koşulları olarak, yakıt ve ortam havası için giren kütleli debi koşulu ve karışım için çıkış basınç koşulu olarak belirlendi. Her iki giriş için de 25°C sabit sıcaklık koşulu vardır. 3 kg/h yakıt yüklemeye uygun olan toplamda 5 kg/h hava besleme akış oranı belirlendi. Duvar koşullarına, kaymasız koşul ve gazlaştırma bölgeleri için ayrı ayrı tanımlanan standart koşul verildi. Çözüm metodu SIMPLE ve tüm uzamsal ayrıklamalar ikinci dereceden seçilmiştir. Süreklilik koşulu için  $10^{-2}$  yakınsama koşulu girildi. Bu koşulun sağlanması sonucunda çözümlenme otomatik olarak sonlandırıldı. Analiz sonucunda, bu süreklilik koşulu için  $10^{-7}$  hassasiyetinde doğruluk sağlandığı görüldü. Diğer tüm yakınsamalar, koşuturma sayısına bakılmaksızın  $10^{-3}$  den daha düşük değerlerde tanımlanarak çözümlenmeler tamamlandı.

### 3. Bulgular ve tartışma

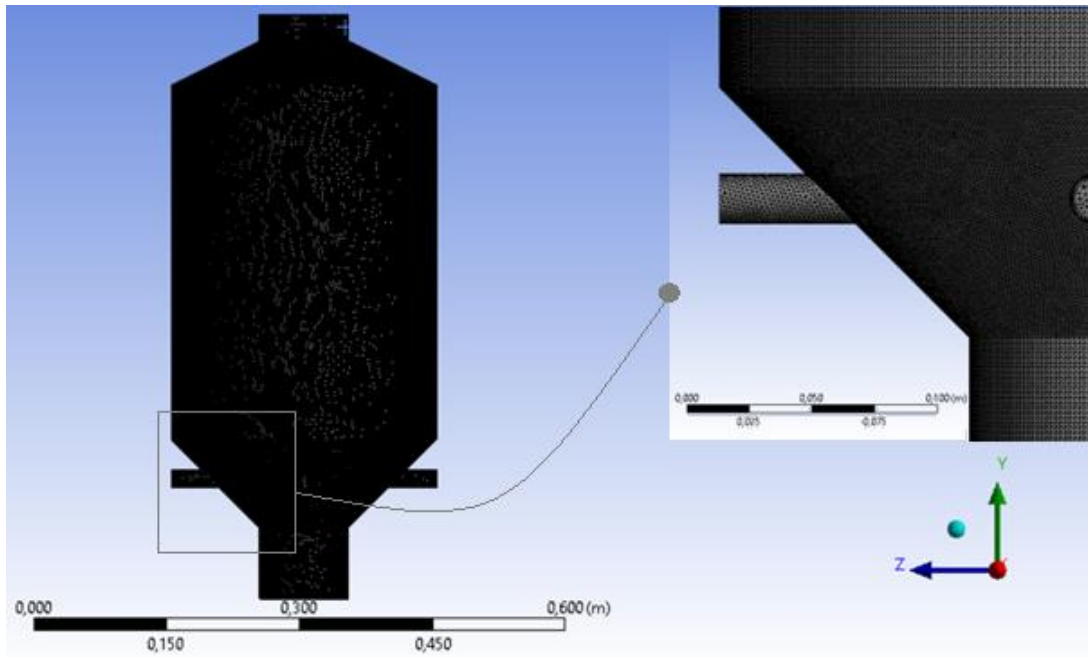
#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Ağ yapısından bağımsızlık testi

##### 3.1. Mesh independence test

Gazlaştırıcı modeli, katı, gaz ve karışımların birlikte bulunduğu 3 boyutlu bir domain üzerinde sonlu elemanlara ayrıldı (çözümüğü-mesh). Üretilen çözümüğü modeli Şekil 3'te verildi. Silindirik gövdelerdeki akış boyunca gerçekleşen duvar etkisini hassas olarak hesaba katmak için inflasyonlar eklendi. Oksidasyon bölgesine, geometri ve reaksiyon özellikleri dikkate alınarak daha yoğun tetrahedral yapıda çözümüğü uygulandı. Besleme kanalları için de aynı sonlu hacimler hassasiyeti uygulandı.

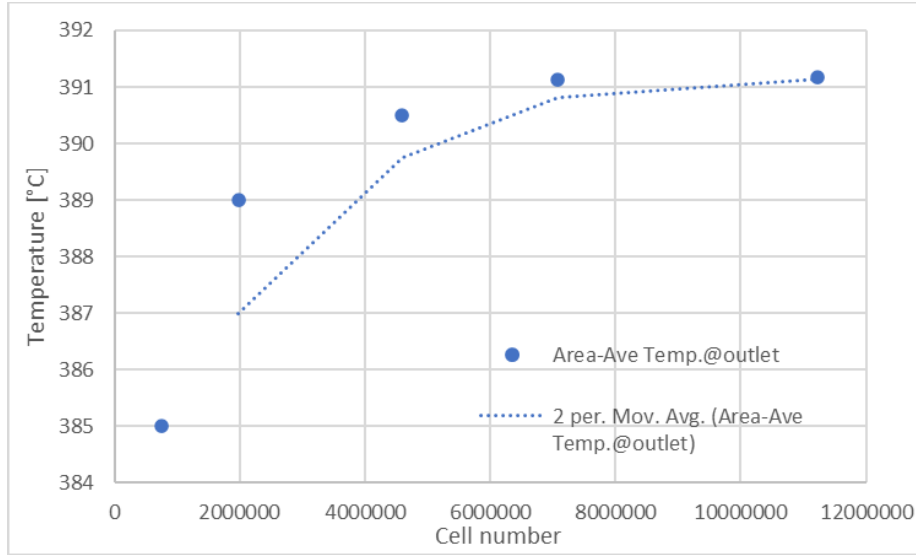
Uygulanan sonlu hacimler modeli sonrasında elde edilen sonuçların hücre sayısından önemli oranda etkilenmemesi gerekir. Bu nedenle ağ yapısından bağımsızlık testi uygulandı. Bu ağ bağımsızlık testi, reaktörün farklı düzlemlerindeki hız, basınç ve sıcaklık ölçümlerine dayanmaktadır. Bu çalışma için, nispeten az sayıda çözümüğünden en fazla çözümüğüna doğru 5 farklı hücre sayısında testler yapıldı. Değerlendirme kriteri olarak reaktör çıkışındaki ortalama sıcaklık (Yazılım kodlamasında Area-Ave Temp olarak belirtilmektedir) değeri dikkate alındı.



Şekil 3. Çözümüğü modeli

Figure 3. Mesh model

Maksimum hücre boyutuna göre ayarlanan bu 5 farklı hücre sayısındaki (751588, 1985652, 4596456, 7160804 ve 11235014) çözümleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verildi. İlk üç sonlu hacimler yapısından sonra sonuçlarda önemli bir değişiklik olmadığı görüldü. Yani, hücre sayısındaki (cell number) artışın sonuç sıcaklığına (Temperature) etkisi ihmal edilebilir düzeydedir (fark  $< \%0.5$ ). Ayrıca, fındikkabuğu için bulunan bu sonuçlar deneysel ölçümlerle de uyumludur (Danışmaz, 2017). Çözümleme için i7 işlemcili 10. Nesil 32 GB RAM özellikli bilgisayar kullanıldı. Son analiz 22 saatten fazla sürdüğü dikkate alındığında, zamandan ve bilgisayar hafızasından kazanmak için sonraki tüm çözümleme sonuçları 7160804 hücre sayısındaki model için üretildi.

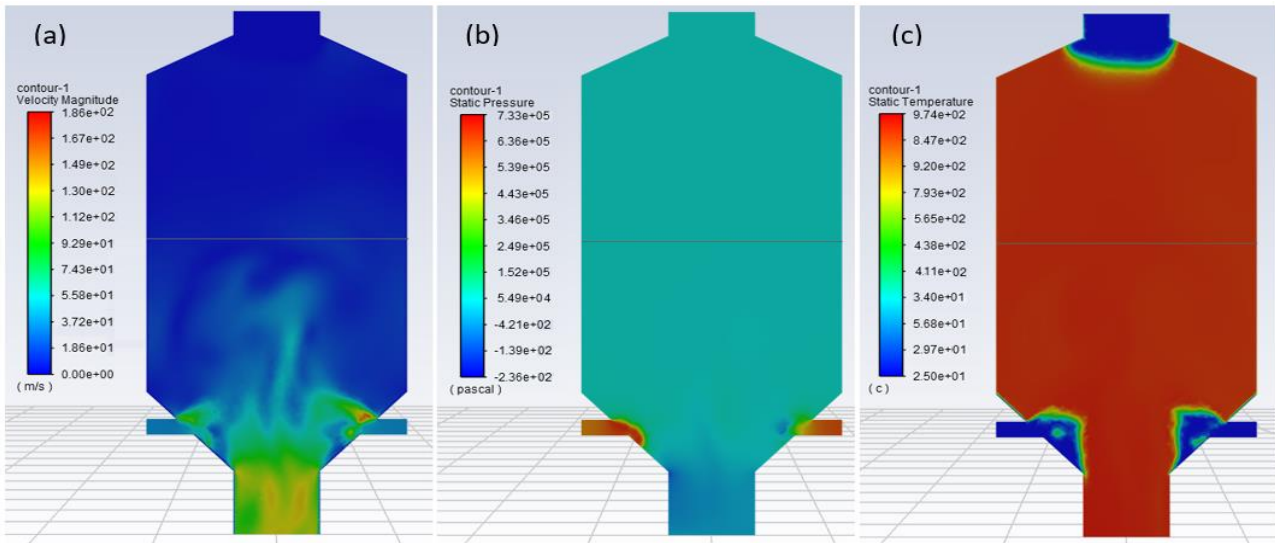


Şekil 4. Ağ yapısı etkisinin değerlendirilmesi  
Figure 4. Mesh independence test

### 3.2. Parametrik kontürler

#### 3.2. Parametric contours

Reaktör içerisindeki hız, basınç ve sıcaklık değişimleri, gazlaştırıcının amaca uygun olarak gaz üretmesinde en önemli operasyonel değişimleri belirtir. Özellikle sıcaklık değişimleri, gazlaştırıcının ana bölümlerini belirginleştirir ve işlemin uygun gazlaştırma koşullarında olduğunu gösterir. Temel gazlaştırma reaksiyonlarının endotermik olduğu unutulmamalıdır. Şekil 5'te, düşey orta düzlemde hız (a), basınç (b) ve sıcaklık (c) kontürleri verilmiştir.



Şekil 5. Akış bölgesi kontürleri a) Hız b) Basınç c) Sıcaklık  
Figure 5. Flow region contours a) Velocity b) Pressure c) Temperature

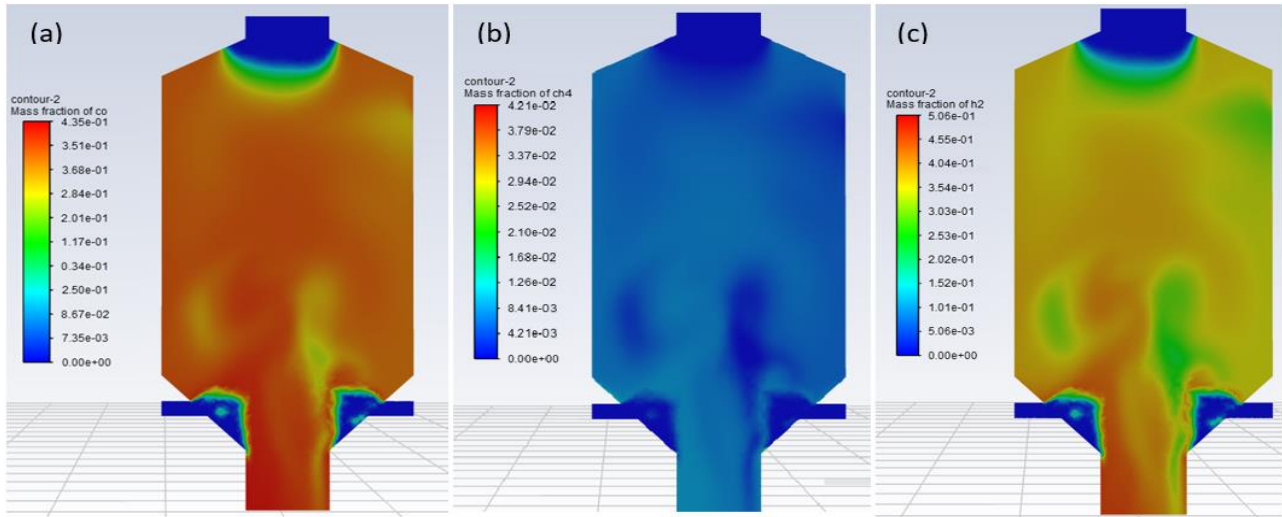


Hesaplamalar, hız-basınç ilişkisine bağlı yapıldığından oluşan kontürler birbiriyle ilişkili olmak durumundadır. Hava besleme kanallarında ve gazlaşmanın olduğu indirgeme bölgelerinde yüksek akış hızlarına rastlanır. Bu beklenen bir durumdur. Gazlaştırma sonucu oluşan gaz karışımı veya sentez gazı, indirgeme bölgesinden reaktörü terk etmektedir. Basınç ise bu akış hızı ile ters orantılı olarak gelişir. Bu durum kontürlerden görülmektedir. Ayrıca, sıcaklık kontürlerinden görüldüğü gibi parametrik değişimler, oksidasyon bölgesinden üretilmeye başlar ve reaktörün her yerine yayılır. Bu dağılım, gaz oluşumunda doğrudan etkilidir ve pratik olarak denk sayılabilecek uygulamalar için bile kısmen farklılık gösterebilir.

### 3.3. Hacimsel oranlar

#### 3.3. Volumetric fractions

Şekil 6a'dan görüldüğü gibi CO konsantrasyonları, ilk kurutma bölgesinde pratik olarak ihmal edilebilir düzeydedir. Bu bölgedeki düşük sıcaklıklar nedeniyle önemli ölçüde CO oluşumu beklenmez. Çoğunlukla piroliz bölgesinde oluşan bu gaz, toplam uçucu miktarının önemli bir kısmını oluşturur. Bu nedenle, indirgeme bölgesinde de yoğun olarak bulunur. Pratik uygulamalarda olduğu gibi, yeterli oksijen olmaması nedeniyle bu yanıcı gaz, oksidasyon bölgesinden geçerken yanmaz ve sentez gazının bir içeriği olarak üretilir. Simülasyon analizinde bu durum, böyle bir reaksiyon tanımlanmamak suretiyle geliştirilir. Yapılan deneysel ve simülasyon verileri bu olguyu doğrular (Cai vd., 2017; Maya vd., 2021).

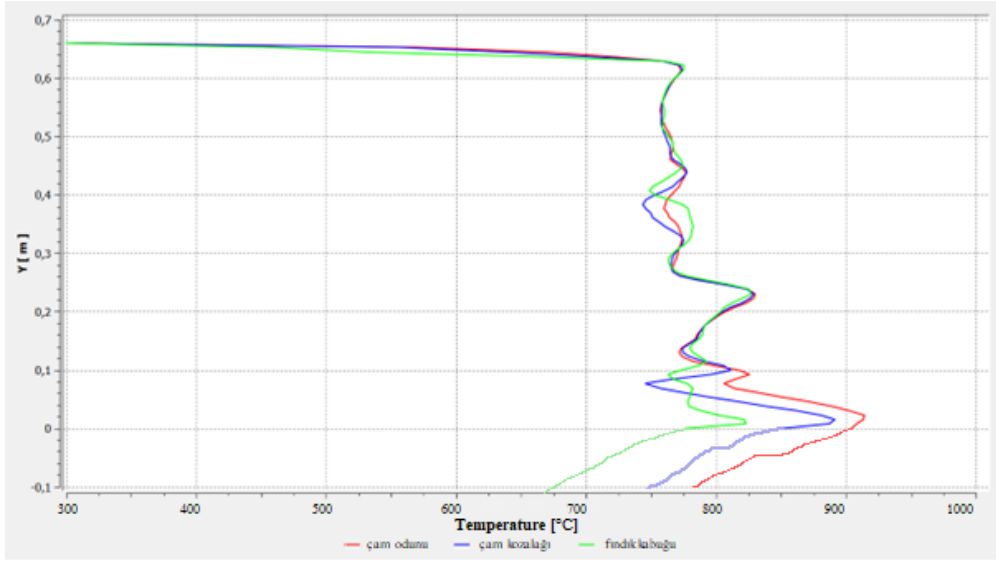


Şekil 6. Hacimsel fraksiyonlar a) H<sub>2</sub> b) CH<sub>4</sub> c) CO  
Figure 6. Volumetric fractions a) H<sub>2</sub> b) CH<sub>4</sub> c) CO

### 3.4. Biyokütle etkisi

#### 3.4. Biomass effect

Kullanılan yakıtın reaktör hacminde ortaya çıkardığı sıcaklık bölgelerinin bilinmesi nihai oluşumların değerlendirilmesi bakımından önemlidir. Çünkü bu oluşum, başka bütün koşullar aynı kalsa bile yakıt türüne ve yakıt besleme anındaki koşullandırılmasına göre değişebilir. Analizde bu durum, merkezi bir bölgede sıcaklık değişimini takip ederek incelendi. Reaktör merkezine yerleştirilmiş aksel bir çizgi boyunca hesaplanan sıcaklık değerleri Şekil 7'de verildi. Oksidasyon bölgesinin alt kısmı merkez olmak üzere tüm gazlaştırma bölgesi sıcaklıkları, bölgesel akış yoğunluklu maksimum sıcaklık değeri olarak hesaplandı. Buradan, tüm biyokütle türlerinin, gazlaştırma prosesi boyunca reaktörün her noktasında gazlaştırılabileceği anlaşılmaktadır. Bu değerlendirme, literatürde çalışılan benzer akış ve yakıt koşulları için benzer eğilimler gösterir (Maya vd., 2021; Ruiz vd., 2013; Pandey vd., 2021). Ancak üretilen gazın türü hakkında kesin bir kanaat oluşturmak pratikte pek mümkün değildir. Bununla birlikte, özellikle piroliz bölgesinde yüksek sıcaklıklara ulaşılması (<550 °C), işlemin kurutma çalışması (Demirtaş & Danışmaz, 2021) ve mangal kömürü oluşumundan ayrılacağı anlamına gelir. Test edilen üç farklı biyokütle için de bu koşulların yerine getirildiği ve sentez gazı üretimi için sıcaklık koşullarının birbirlerine yakın olacağı anlamı çıkarılabilir. Çam odununun oksidasyon bölgesinde nispeten daha yüksek sıcaklıkta olması, oksijenli yanmadaki tercih edilebilirliğiyle de izah edilebilir. Bu durum için reçine gibi ilave içerikler analizin konusu değildir ve çalışılmaya değer bir konudur.

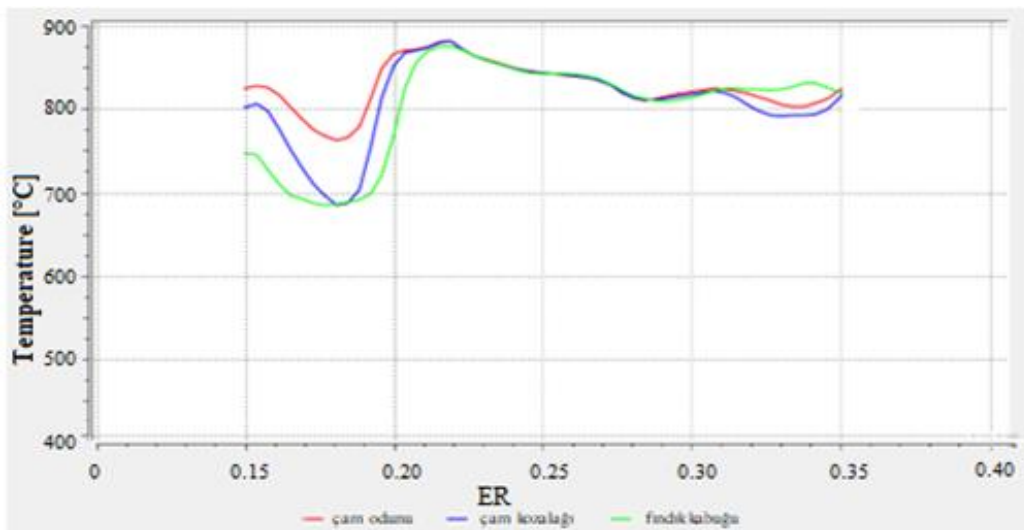


**Şekil 7.** Reaktör merkezindeki sıcaklık değişimi  
**Figure 7.** Temperature change at the reactor center

Reaktör içindeki sıcaklık dağılımı ve gaz oluşum bölgelerinin belirlenmesi, üretilen sentez gazın kalitesi hakkında önemli oranda bilgi verir. Bu genellikle yakıt-hava besleme koşullarına bağlıdır ve eşdeğerlik oranıyla ( $ER$ ) ifade edilir. Eşdeğerlik oranı, gerçek yakıt-hava karışımının stokiyometrik yakıt-hava karışımına oranıdır ve Denklem (5)'de verilmiştir.

$$ER = \frac{(hava/yakıt)_{gerçek}}{(hava/yakıt)_{stokiyometrik}} \quad (5)$$

Çalışılan bu üç farklı biyokütle yakıtının değişen eşdeğerlik oranlarındaki oksidasyon bölgesi sıcaklıkları Şekil 8'de verildi. Eşdeğerlik oranının artırılmasıyla belli bir eşik değerden sonra bu bölgedeki sıcaklık önce düşüş eğilimi gösterir ve sonrasında ise önemli bir değişiklik olmaz. Bu eşik değeri, analizdeki yakıt türlerine göre çok fazla değişiklik göstermedi. Hepsisi için yaklaşık 0,18 değerindedir. Analizde elde edilen bu eğilim Sheth ve Babu tarafından yapılan deneysel çalışma (Sheth & Babu, 2009) sonuçlarıyla uyumludur (İlgili çalışmada Şekil 4). Burada dikkat edilmesi gereken husus, gaz üretiminde sürekliliği sağlayacak  $ER$  değerinin doğru olarak belirlenmesidir. Bu değerin belirlenmesinde, uygulamadaki her parametrenin etkili olacağı bilinmelidir.



**Şekil 8.** Biyokütle türünün oksidasyon bölgesi sıcaklığına etkisi  
**Figure 8.** Effect of biomass type on oxidation zone temperature

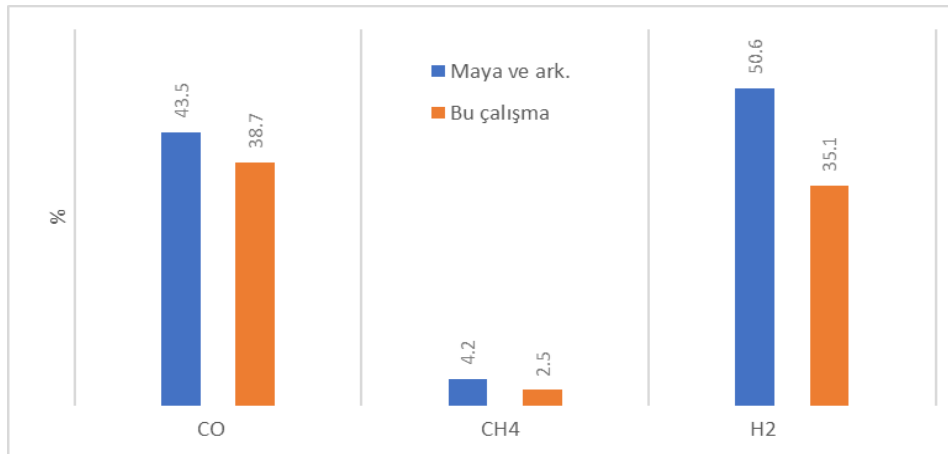
Birbirine yakın elementel ve nihai analiz sonuçlarına sahip olan çam odunu, çam kozalağı ve fındık kabuğuna ait oksidasyon bölgesi sıcaklıklarından uygun  $ER$ 'nin bu çalışma için 0.20 olduğu sonucu çıkarılabilir. Ve çam kozalağı ve fındık kabuğu gibi atık biyokütleler benzer gazlaştırma performansları gösterir. Her üç besleme yakıtı için sentez gazı içeriği ve yakıtta göre reaktör sıcaklıklı ortamlar elde edilir. Bu, odun dışı orman ürünlerinin atık olarak bırakılması gerektiğini açıklar. Veya çevresel dezavantajlı doğrudan yakma yerine gazlaştırma proseslerinde uygun yakıt olarak kullanılabilceği anlamına gelir. Yakıt içeriği veya boyutsal değişim söz konusu olduğunda aynı sonuca ulaşıp ulaşılamayacağı ayrı bir çalışma konusudur. Ancak ısı değeri farklı olsa bile yakılabilir sentez gazı üretilebileceği açıktır.

#### 4. Tartışma ve sonuçlar

##### 4. Discussion and conclusions

Gazlaştırma prosesi; girdi, çıktı ve sistemsel tasarımlar yönüyle oldukça kapsamlı bir çalışma alanıdır. Yakıt olarak atık biyokütle kullanımı bu alanı kısmen daraltmaktadır. Biyokütle gazlaştırması, içerik ve uygulama açısından kömür gazlaştırmasından ayrılır. Ancak bu, biyokütle için sabit bir proses ve uygulamanın varlığını göstermez. Biyokütle türü, besleme havası koşullandırması, gazlaştırıcının tür ve boyutları gibi pek çok etken uygulama sonuçlarını etkiler. Alttan akışlı ve küçük boyutlarda (10 kg/h'den az tüketim) gazlaştırıcılar için literatürde farklı nümerik modelleme ve çözüm metotları sunulmuştur. Yapılan çoğu karşılaştırma üretilen gazın kütsel veya hacimsel oranının verilmesi şeklindedir. Bu çalışmada elde edilen gaz içeriğinin, gazlaştırma prosesine uygun çıktılar verdiği önceki bölümde tartışıldı. Bu bölümde; üretilen başlıca yanıcı gazlar olan  $CO$ ,  $H_2$  ve  $CH_4$  için sentez gazı hacimsel içerik oranı, Maya ve arkadaşları (Maya vd., 2021) tarafından yapılan koşuturma sonuçlarıyla karşılaştırılır (Şekil 9). Maksimum hacimsel oran kriterinin hesaba katıldığı bu değerlendirmeye göre, üretilen sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görüldü. Uygulama koşullarına göre farklılık göstereceği açık olan bu sonuçların aynı düzenek için yapılan başka koşuturma ve testler için bile değişebileceği not edilmelidir. Ancak, sentez gazının temel içeriği ve hacimsel oran eğilimi aynı olması beklenir. Bu durum tüm koşuturmalar için sağlanmıştır. Biyokütle nem içeriği, besleme havası koşullandırması (doğrudan oksijenle besleme) ve gaz filtreleme işlemleri ayrıca çalışılmaya ihtiyaç duyan konular arasındadır. Bununla birlikte, sentez gazı üretimi için belirlenen biyokütlenin teknik, ekonomik ve çevresel değerlendirilmesinin AlNouss'un çalışmasında (AlNouss vd., 2020) tartışıldığı gibi her biyokütle ürünü için yapılması önerilir.

Orman dışı odun ürünlerinin termo-kimyasal özelliklerinin çoğunlukla birbirine yakın olduğu söylenebilir. Ancak karşılaştırma yapılan çalışmadaki biyokütlenin ne olduğu açıkça belirtilmemiştir. Bu durumda, içerik tanımları bir miktar farklılık gösterir. Elde edilen sonuçların tam bir doğrulukla elde edilmesi beklenmez. Örneğin, bu çalışma için elde edilen %35 oranındaki  $H_2$  oluşumu, verilen çalışmada gaz karışımının yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Çünkü, tüm değişkenlerin ve geometrinin birebir aynı olması ve sisteme tanımlanması mümkün ve anlamlı değildir.  $CO$  oluşumundaki yakın değerlerin çoğu biyokütle için benzer koşullarda sağlanabileceği düşünülür. Burada, içeriğin ve oransal dağılımın birbiri içinde tutarlı olması beklenir. Buradan, biyokütle türleri özelinde daha fazla deneysel ve nümerik çalışma yapılması gerektiği sonucuna varılabilir. Bu çalışmanın literatürdeki bu eksiklikleri karşılamaya yönelik olması bakımından da değerli olduğu söylenebilir.



Şekil 9. Uçucu gaz validasyonu  
Figure 9. Volatile gas validation

Gazlaştırma uygulamalarında üretilen gaz karışımı genellikle doğrudan yakma sistemlerine gönderilir. Gazlaştırma sisteminde, gaz karışımının içeriğini belirleyen ölçüm ve test düzeneklerinin bulunması beklenmez. Bu nedenle, karışım içerisindeki yanıcı gazların belirlenmesi için sistemden çekilen gazın analizörlere taşınması gerekir. Bu durum, karışım gazının içerik ölçümlerini (gazların moleküler yapısı gereği) önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, hidrojen gazının moleküler ağırlığının çok küçük olması numune torbalarıyla yapılan ölçümlerdeki oranını tartışmalı hale getirir. Bu yanılmaların üstesinden gelebilmek için karışım gazının doğrudan yanma performansının değerlendirilmesi başka bir yöntem olarak kullanılabilir.

Alternatif enerji üretimi yöntemlerinin geliştirilmesine önemli bir katkı da aşağı akışlı gazlaştırıcıda biyokütle gazlaştırılmasıyla sağlanmaktadır. Gazlaştırma yöntemi, eski bir metot olmasına rağmen belirli uygulamalarda kullanılmak üzere kontrollü sentez gazı üretimini kapsayan çalışmalar güncelliğini korumaktadır. Özellikle odun dışı orman ürünlerinin alternatif kullanımına hizmet eden ve elektrik üretimini de kapsayan içten yanmalı motorlar için ekonomik ve alternatif gaz üretimi popüler çalışma konuları arasındadır. Bu çalışmada, doğada çoğunlukla âtil halde bulunan veya çevreci olmayan yöntemlerle değerlendirilen çam kozalağı ve fındık kabuğu gibi iki biyokütle gazlaştırma performansı incelendi. Analiz ve hesaplamalarda karşılaştırma yakıtı olarak ayrıca çam odunu analize dahil edildi. Elde edilen sonuçlar, yakıtların kendi aralarında ve literatürde çalışılan başka biyokütle türleri için uyumlu çıktılar ürettiğini gösterdi. 900 °C'nin üzerinde reaktör sıcaklıklarına ulaşılarak yanma için uygun nitelikte sentez gazı üretimi simüle edildi. Yanıcı gazın içeriğindeki CO, CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> yanıcılarının reaktör içerisindeki oluşma dağılımı ve hacimsel içeriğe etkisi gösterildi. Gazlaştırma sürecinde etkili koşullandırma parametresi olan ER için bu çalışma özelinde en uygun değerin 0.20 olduğu bulundu. Bu çalışma ayrıca, âtil pek çok başka biyokütle belli gazlaştırma yöntemleriyle deneysel proseslere başlanmadan önce nümerik olarak analiz edilebileceğini gösterir. Çalışılan yakıtlar ve geometri açısından özgünlük içerir. Hava beslemesinin tek yerine 4 farklı kanaldan yapılması rol model olması açısından dikkate değerdir. Bireysel üretim ve kullanım için standart gazlaştırıcılar geliştirmek üzere farklı biyo atıkların gazlaştırma çalışmaları yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Düşük kalorili kömürlerin de bu yöntemle değerlendirilmesi anlamlıdır. Çalışma, tüm bu geliştirme süreçlerine katkı sunmaktadır.

#### **Yazar katkısı**

*Author contribution*

Çalışmanın, araştırma, metodoloji, analiz ve hesaplamaları gibi işlemlerin tamamı tek yazar tarafından yapılmıştır.

#### **Etik beyanı**

*Declaration of ethical code*

Bu çalışmada, “Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi” kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin “Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler” başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederim.

Bu makalenin yazarı, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

#### **Çıkar çatışması beyanı**

*Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

#### **Kaynaklar**

*References*

Ahrenfeldt, J., Thomsen, T. P., Henriksen, U., & Clausen, L. R. (2013). Biomass gasification cogeneration – a review of state of the art technology and near future perspectives. *Applied Thermal Engineering*, 50, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.040>, 1407-1417.

AlNouss, A., McKay, G., & Al-Ansari, T. (2020). A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study. *Energy Conversion and Management*, 208, 112612.

- Asadullah, M. (2014). Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: a comparative critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.132>, 118-132.
- Basu, P. (2010). Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. USA: Elsevier, Academic press.
- Basu, P. (2018). Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. Canada: Elsevier, Academic Press.
- Blasi, C. D., & Branca, C. (2013). Modeling a stratified downdraft wood gasifier with primary and secondary air entry. *Fuel*, 104, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.014>, 847-860.
- Brebua, M., Ucar, S., Vasile, C., & Yanik, J. (2010). Co-pyrolysis of pine cone with synthetic polymers. *Fuel*, 89(8), 1911-1918.
- Bridgwater, A., Toft, A., & Brammer, J. (2002). A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00010-7), 181-246.
- Cai, J., Wang, S., & Cao Kuang. (2017). Experimental and numerical investigations on gasification of biomass briquette in a sectional heating gasifier. *Energy Procedia*, 105, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.428>, 1234-1241.
- Danışmaz, M. (2017). *Synthesis gas production with gasification technique and use in gas burning systems*. [Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü].
- Demirbas, A. (2000). Biomass resources for energy and chemical industry. *Energy Edu Sci Technology*, 5, 21-45.
- Demirtaş, C., & Danışmaz, M. (2016). Gazifikasyon yöntemiyle sentez gazı üretimi ve gaz yakma sistemlerinde kullanımı. *International Journal of Nuclear and Radiation Science and Technology*, 1(2), 14-19.
- Demirtaş, C., & Danışmaz, M. (2021). Experimental investigation of the relationship between the core temperature of hazelnuts and ambient conditions in the drying process. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 7-1, <https://doi.org/10.22399/ijcesen.905196>, 29-34.
- de Vries, W., de Jong, A., Kros, J., & Spijker, J. (2021). The use of soil nutrient balances in deriving forest biomass harvesting guidelines specific to region, tree species and soil type in the Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 479, 118591.
- Gao, X., Xu, F., Bao, F., Tu, C., Zhang, Y., Wang, Y., & Li, B. (2019). Simulation and optimization of rice husk gasification using intrinsic reaction rate based CFD model. *Renewable Energy*, 139, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.108>, 611-620.
- Inc, A. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide*. ANSYS inc. (US).
- Hosseini M., Dincer I., & Rosen M. A. (2012), Steam and air fed biomass gasification: Comparisons based on energy and exergy, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, Issue 21, pp. 16446-16452, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.115>.
- Kumar, U., & Paul, M. C. (2019). CFD modelling of biomass gasification with a volatile break-up approach. *Chemical Engineering Science*, 195, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.09.038>, 413-422.
- Ma, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., Qu, Y., Zhou, J., & Qin, H. (2012). Design and experimental investigation of a 190 kWe biomass fixed bed gasification and polygeneration pilot plant using a double air stage downdraft approach. *Energy*, 46, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.008>, 140-147.
- Maya, D. M., Lora, E. E., Andrade, R. V., Ratner, A., & Angel, J. D. (2021). Biomass gasification using mixtures of air, saturated steam, and oxygen in a two-stage downdraft gasifier. Assessment using a CFD modeling approach. *Renewable Energy*, 177, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.051>, 1014-1030.
- Monteiro, E., Ismail, T. M., Ramos, A., M. Abd El-Salam, Brito, P., & Rouboa, A. (2017). Assessment of the miscanthus gasification in a semi-industrial gasifier using a CFD model. *Applied Thermal Engineering*, 123, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.128>, 448-457.

- Nimlos, M. R., & Crowley, M. F. (2010). *Computational Modeling in Lignocellulosic Biofuel Production*. USA: American Chemical Society, ISBN13: 9780841225718.
- Onay, Ö., & Koçkar, Ö. M. (1998). Fındık kabuklarından hızlı proliz yöntemiyle sentetik sıvı eldesi. *Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 11(1), 72-81.
- Pandey, B., Prajapati, Y. K., & Sheth, P. N. (2021). CFD Analysis of biomass gasification using downdraft gasifier. *Materials Proceedings*, 44(6), 4107-4111.
- Patel, K. D., Shah, N. K., & Patel, R. N. (2013). CFD Analysis of spatial distribution of various parameters in downdraft gasifier. *Procedia Engineering*, 51, 764-769, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.109>.
- Ruiz, J., Juárez, M., M.P. Morales, Muñoz, P., & Mendivil, M. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.021>, 174-183.
- Shayan E., Zare V., & Mirzaee I., Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents, *Energy Conversion and Management*, vol. 159, 30-41, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.096>.
- Shen, Y., Li, X., Yao, Z., Cui, X., & Wang, C.-H. (2019). CO<sub>2</sub> gasification of woody biomass: Experimental study from a lab-scale reactor to a small-scale autothermal gasifier. *Energy*, 170, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.176>, 497-506.
- Sheth, P. N., & Babu, B. (2009). Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier. *Bioresource Technology*, 100, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.024>, 3127-3133.
- Sibiya N.T., Oboirien B., Lanzini A., Gandiglio M., Ferrero D., Papurello D. & Bada S.O. (2021), Effect of different pre-treatment methods on gasification properties of grass biomass, *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 875-883, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.147>.
- Simone, M., Nicolella, C., & Tognotti, L. (2013). Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of woody residues. *Bioresource Technology*, 133, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.056>, 92-101.
- Stančín H., Šafář M., Růžičková J., Mikulčić H., Raclavská H., Wang X., & Duić, N. (2021), Co-pyrolysis and synergistic effect analysis of biomass sawdust and polystyrene mixtures for production of high-quality bio-oils, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 145, pp 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.023>.
- Türkoğlu, T. T., & Gököğlu, C. (2017). Kızılçam Ormanları Hasat Artıklarından Yapılan Odun Peletinin Yakıt Özelliklerinin Belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 58-63.
- Zhang, W. (2010), Automotive fuels from biomass via gasification, *Fuel Processing Technology*, vol. 91, Issue 8, 866-876, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.07.010>.
- Zheng Y. & Qiu F. (2020), Bioenergy in the Canadian Prairies: Assessment of accessible biomass from agricultural crop residues and identification of potential biorefinery sites, *Biomass and Bioenergy*, vol. 140, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105669>.