

Sentez Gazı Yanması ve Çevre Kirleticiler

Suat ÖZTÜRK*¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, UZEM, Zonguldak

Geliş tarihi: 31.07.2018

Kabul tarihi: 27.03.2019

Öz

Bu çalışmada, kömür, atık lastik ve zeytin küspesinden elde edilen sentez gazlarının yanma sonu ürünlerinden NO_x, SO_x ve CO'nin kütle kesitlerindeki değişimler, farklı işletme koşullarında hesaplamalı olarak incelenmiştir. Alevler laminar ve stokiometrik önkarışımıdır. Çalışmada kullanılan kimyasal kinetik mekanizma 74 reaksiyon ve 33 kimyasal bileşenden meydana gelmektedir. Kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları için maksimum NO_x değerleri sırasıyla 0,915, 0,875 ve 0,98 ekivalans oranlarında elde edilmiştir. NO_x, SO_x ve CO, reaktan giriş sıcaklığındaki artış ile birlikte artmaktadır. Tepkimeye giren maddelerin toplam kütledeki artış NO_x, SO_x ve CO'nin kütle kesitlerinde önemli bir değişime neden olmamaktadır. Yakma havasının nem oranındaki artış NO_x, SO_x ve CO kütle kesitlerini azaltmaktadır. Reaktanların giriş basıncındaki artış NO_x ve CO kütle kesitlerini düşürmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yanma, Sentez gazı, Reaksiyon mekanizması

Synthesis Gas Combustion and Environmental Pollutants

Abstract

In this study, the mass fractions of NO_x, SO_x and CO produced during combustion of synthesis gases obtained from coal, waste tyre and olive cake are computationally investigated under different operating conditions. The flames are laminar and stoichiometric premixed. The chemical kinetic mechanism used in the study consists of 74 reactions and 33 chemical species. Maximum NO_x for synthesis gases of coal, waste tyre and olive cake are found at equivalence ratios of 0.915, 0.875 and 0.98, respectively. NO_x, SO_x and CO increase with increasing reactant inlet temperature. Ascending inlet total mass amount does not cause any change in the mass fractions of NO_x, SO_x and CO. Rising humidity ratio of the burning air reduces the mass fractions of NO_x, SO_x and CO. Increment in the inlet pressure of reactants decreases the mass fractions of NO_x and CO.

Keywords: Combustion, Synthesis gas, Reaction mechanism

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Suat ÖZTÜRK, suatozturk@beun.edu.tr

1. GİRİŞ

Karbon temelli yakıtların azalması ve ülkelerin artan enerji ihtiyaçları, özellikle petrol ve doğal gaz fiyatlarında önlenemez bir yükselişe neden olmaktadır [1]. Ülkemizde yeteri miktarda petrol ve doğalgazın olmayışı hem büyük ölçüde dışa bağımlılık yaratmakta hem de satın alma için dışarıya ödenen meblağlar nedeniyle ülke ekonomisinde sorunlara sebep olmaktadır.

Türkiye’de, santrallerde elektrik üretimi ve konutlarda ısınma için yakıt olarak çokça kömür ve doğal gaz, taşıtlarda ise LPG ve petrolden elde edilen benzin ve mazot kullanılmaktadır. Karbon temelli bu yakıtlardan özellikle sıvı ve katı olanları, yanma sonu ürünleri bakımından çevre üzerinde daha olumsuz etkilere neden olduğu da bilinmektedir [2]. Ekonomik kaygılar, dışa bağımlılık ve çevre problemleri sentez gazının üretimi ve kullanımına dikkat çekmektedir [3].

Sentez gazı gazlaştırma yolu ile kömür, biyokütle, katı atıklar v.b. gibi materyallerden elde edilebilen bir yakıt türüdür [4]. Ayrıca, kısmi oksidasyon yolu ile doğal gazdan da üretilebilmektedir [5]. Sentez gazları hidrojen, karbon monoksit, metan, karbon dioksit, azot, su [6] ve kükürtlü bileşiklerden oluşmaktadır. Elektrik üretimi için doğal gazın yerine kullanılabilirdiği gibi yine kimyasal ve sıvı yakıtların üretiminde de temel girdi olabilirler [7]. Yüksek verim ve düşük emisyon değerleri hedefleyen ileri enerji santrallerinde de tercih edilirler [8].

Doğal gazda olduğu gibi sentetik gazın yanma sonu ürünlerinde temel çevre kirleticisi azot oksitler (NO_x) olarak gözükmektedir [9]. Kirleticiler ve yanma sonunda ne kadar üredikleri, yakıtın miktarı, tip ve özelliklerine, yakma sistemine, sistem işletme yöntemlerine ve meteorolojiksel şartlara bağlıdır [10]. Bu kirleticilerden NO_x asit yağmurlarına, ozon bozulması ve foto-kimyasal sise neden olmaktadır [11] ve ağırlıklı olarak NO ’dan meydana gelmektedir. Kükürt oksitlerin (SO_x) önemli

kısmını oluşturan SO_2 gazı asit yağmurlarının oluşumunda önemli rol oynamakta [12], göz ve diğer organlar üzerinde olumsuz etkiler yaparak ölüme sebep olabilmektedir [13]. CO ise baş dönmesine, reflekslerin zayıflaması ve aşırı miktarda solunması durumunda zehirlenmeye yol açmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, farklı materyallerden elde edilen sentez gazlarının yanmaları sonucunda ortaya çıkan çevre kirleticilerden azot oksit, kükürt oksit ve karbon monoksit miktarlarının, farklı işletme şartlarında nasıl değişim gösterdiklerini incelemektir.

2. HESAPLAMALAR VE REAKSİYON MEKANİZMASI

Yanmanın gerçekleştiği bölgenin çok sıcak olması, reaksiyonların hızlı gerçekleşmesi ve reaksiyon alanının çok küçük olması gibi nedenlerden dolayı, gerçek yanma işleminde vuku bulan reaksiyonları bilmek ve gözlemlenmek mümkün değildir. Yanma olayı teoriksel olarak kinetik çözümle ile incelenebilir. Gerçek yanma olayının araştırılmasında, bir reaksiyon mekanizması içeren ve zaman bağımlı değişkenleri veren reaksiyon kinetiği önemli rol oynar [14]. Bu çalışmada, kinetik çözüm ile ürün mol ve kütle kesitlerinin hesaplanmasında CREK [15] adlı bir bilgisayar programı kullanılmıştır. CREK hız, basınç vb. gibi değişkenlere göre kütle ve momentum korunum denklemlerini çözerek, yanma sonu ürün konsantrasyonlarını denge ve kinetik durum için hesaplamaktadır [16]. Bu çalışmada, her bir veri noktası için ayrı ayrı koşum yapılarak yanma sonu ürünlerinin mol ve kütle kesitleri elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan reaksiyon mekanizması, 74 reaksiyon ve 33 kimyasal bileşenden oluşmaktadır [17,18]. Yakıt olarak kullanılan, kömür [19], atık lastik [20] ve zeytin küspesinden [9] elde edilen sentez gazlarının bileşimi Çizelge 1, reaksiyon mekanizması ve hız parametreleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 1. Sentez gazlarının hacimsel bileşenleri

Bileşenler	Kömür SG (%)	Atık Lastik SG (%)	Zeytin Küspesi SG (%)
CH ₄	0,5086	24	3,5625
H ₂	31,35	51,8	7,48
CO	37,64	16,9	16,42
CO ₂	11,14	7,3	9,6525
N ₂	1,543	0	59,72
H ₂ S	1,306	0	0
COS	0,0506	0	0
H ₂ O	16,46	0	0
O ₂	0	0	3,1525

Çizelge 2. Hız katsayıları ve reaksiyonlar. Hız katsayısı, $k=AT^B \exp(-C/T)$

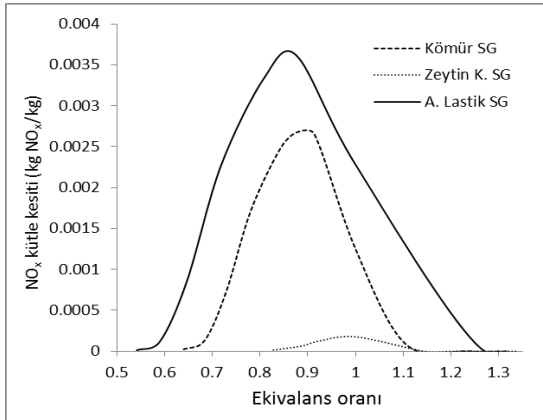
No	Reaksiyonlar						LogA	B	C (K)	Ref.
1	OH	H ₂		H ₂ O	H		9,041	1,300	1825,0	[17]
2	H	O ₂		OH	O		14,255	0,000	8450,0	[17]
3	O	H ₂		OH	H		5,255	2,500	3300,0	[17]
4	H	O ₂	M	H	O ₂	M	20,574	-1,720	0,0	[17]
5	H	HO ₂		OH	OH		14,342	0,000	710,0	[17]
6	H	HO ₂		O	H ₂ O		12,698	0,000	710,0	[17]
7	H	HO ₂		H ₂	O ₂		13,334	0,000	280,0	[17]
8	OH	HO ₂		H ₂ O	O ₂		13,255	0,000	0,0	[17]
9	O	HO ₂		OH	O ₂		13,301	0,000	0,0	[17]
10	H	H	M	H ₂		M	18,000	-1,000	0,0	[17]
11	H	OH	M	H ₂ O		M	22,204	-2,000	0,0	[17]
12	H	O	M	OH		M	16,792	-0,600	0,0	[17]
13	OH	OH		O	H ₂ O		12,760	0,000	390,0	[17]
14	OH	CO		CO ₂	H		7,176	1,300	-385,0	[17]
15	O	CO	M	CO ₂		M	15,732	0,000	2300,0	[17]
16	H	CO	M	CHO		M	14,698	0,000	755,0	[17]
17	CHO	O ₂		HO ₂	CO		13,518	-0,400	0,0	[17]
18	CHO	H		H ₂	CO		14,079	0,000	0,0	[17]
19	CHO	OH		CO	H ₂ O		14,000	0,000	0,0	[17]
20	CHO	O		OH	CO		13,477	0,000	0,0	[17]
21	CH ₂ O	H		CHO	H ₂		4,000	3,000	700,0	[17]
22	CH ₂ O	OH		CHO	H ₂ O		13,477	0,000	600,0	[17]
23	CH ₂ O	O		CHO	OH		13,255	0,000	1540,0	[17]
24	CH ₄	H		CH ₃	H ₂		4,342	3,000	4400,0	[17]
25	CH ₄	OH		CH ₃	H ₂ O		7,204	1,830	1400,0	[17]
26	CH ₄	O		CH ₃	OH		7,079	2,100	3840,0	[17]
27	CH ₃	O		CH ₃ O	H		13,845	0,000	0,0	[17]
28	CH ₃	O		CHO	H ₂		14,146	0,000	860,0	[17]
29	CH ₃	CHO		CH ₄	CO		12,000	0,000	0,0	[17]
30	CH ₃	HO ₂		CH ₄	O ₂		12,301	0,000	0,0	[17]
31	CH ₃	HO ₂		CH ₃ O	OH		12,301	0,000	0,0	[17]
32	CH ₃ O	H		CH ₂ O	H ₂		13,698	0,000	0,0	[17]

Çizelge 2. (Devam)

No	Reaksiyonlar						LogA	B	C (K)	Ref.
33	CH ₃ O	OH		CH ₂ O	H ₂ O		13,397	0,000	0,0	[17]
34	CH ₃ O	O		CH ₂ O	OH		13,397	0,000	0,0	[17]
35	CH ₃	CH ₃	M	C ₂ H ₆		M	14,447	-0,400	0,0	[17]
36	C ₂ H ₆	H		C ₂ H ₅	H ₂		2,740	3,500	2620,0	[17]
37	C ₂ H ₆	OH		C ₂ H ₅	H ₂ O		6,549	2,120	439,3	[17]
38	C ₂ H ₆	O		C ₂ H ₅	OH		7,953	1,920	2864,0	[17]
39	C ₂ H ₅	O ₂		C ₂ H ₄	HO ₂		12,301	0,000	2510,0	[17]
40	C ₂ H ₅	H		CH ₃	CH ₃		13,681	0,000	0,0	[17]
41	C ₂ H ₅	O		CH ₃	CH ₂ O		13,698	0,000	0,0	[17]
42	C ₂ H ₅	C ₂ H ₅		C ₂ H ₄	C ₂ H ₆		14,146	0,000	0,0	[17]
43	C ₂ H ₄	O		CH ₃	CHO		13,301	0,000	1300,0	[17]
44	C ₂ H ₄	OH		CH ₃	CH ₂ O		13,602	0,000	760,0	[17]
45	C ₂ H ₄	OH		C ₂ H ₃	H ₂ O		13,845	0,000	1516,0	[17]
46	C ₂ H ₄	H		C ₂ H ₃	H ₂		14,176	0,000	513,0	[17]
47	C ₂ H ₃	H		C ₂ H ₂	H ₂		13,301	0,000	0,0	[17]
48	C ₂ H ₃	O ₂		C ₂ H ₂	HO ₂		12,000	0,000	0,0	[17]
49	C ₂ H ₂	O		CH ₂	CO		8,612	1,500	854,0	[17]
50	CH ₂	O ₂		CO ₂	H ₂		14,000	0,000	1864,0	[17]
51	N ₂	O	M	N ₂ O		M	13,740	0,000	10770,0	[17]
52	N ₂ O	O		NO	NO		14,851	0,000	14100,0	[17]
53	N	O ₂		NO	O		9,806	1,000	3162,0	[17]
54	N ₂ O	H		N ₂	OH		13,880	0,000	7654,0	[17]
55	N ₂	O		N	NO		14,414	0,000	38390,0	[17]
56	N	OH		H	NO		11,799	0,500	0,0	[17]
57	NO	O	M	NO ₂		M	17,000	0,000	0,0	[17]
58	NO	HO ₂		NO ₂	OH		15,146	0,000	705,0	[17]
59	NO ₂	O		NO	O ₂		10,763	0,500	0,0	[17]
60	H ₂ S	O		SH	OH		7,875	1,750	1460,0	[18]
61	H ₂ S	OH		SH	H ₂ O		12,431	0,000	0,0	[18]
62	SH	O		H	SO		14,000	0,000	0,0	[18]
63	SH	OH		S	H ₂ O		13,000	0,000	0,0	[18]
64	O	COS		CO	SO		13,285	0,000	2328,6	[18]
65	O	COS		CO ₂	S		13,698	0,000	5530,4	[18]
66	S	OH		H	SO		13,602	0,000	0,0	[18]
67	S	O ₂		SO	O		6,716	1,810	-600,0	[18]
68	SO	NO ₂		SO ₂	NO		12,925	0,000	0,0	[18]
69	SO	O	M	SO ₂		M	13,505	0,000	0,0	[18]
70	SO	OH		SO ₂	H		17,032	-1,350	0,0	[18]
71	SO	O ₂		SO ₂	O		3,880	2,370	1500,0	[18]
72	SO ₃	O		SO ₂	O ₂		12,301	0,000	10000,0	[18]
73	SO ₂	O	M	SO ₃		M	10,963	0,000	1200,0	[18]
74	SO ₂	OH		SO ₃	H		2,690	2,690	12000,0	[18]

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

Sabit alınan toplam kütle miktarı, reaktanların giriş sıcaklığı, giriş basıncı ve nem oranı için ekivalans oranları değiştirilerek kömür, atık lastik ve zeytin küspesine ait sentez gazlarının yanmaları sonucunda ortaya çıkan NO_x 'in kütle kesitleri elde edilmiş ve değişimler Şekil 1'de verilmiştir. NO_x kütle kesitleri, kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları için sırasıyla 0.915, 0.875 ve 0.98 ekivalans oranlarında maksimuma ulaşmıştır.

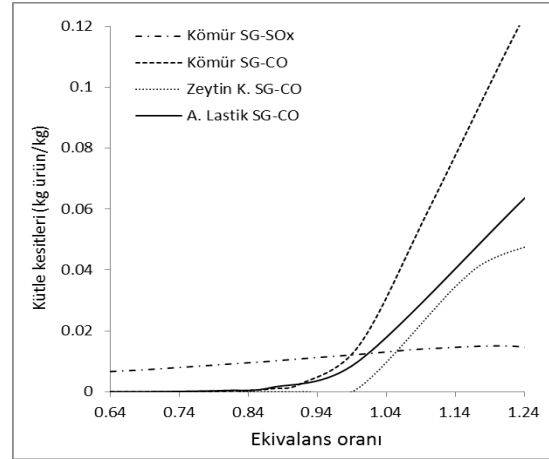


Şekil 1. Ekivalans oranına göre NO_x kütle kesitindeki değişim ($\text{Emv}=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $T_g=300 \text{ K}$, $w=0,014$, $P_g=1,0 \text{ Pa}$)

En yüksek NO_x en fazla hidrojen içeren Atık Lastik SG yanmasında görülmektedir ve onu Kömür ve Zeytin Küspesi SG NO_x 'leri takip etmektedir. Zeytin Küspesi SG yüksek miktarda azot içermesine rağmen diğer gazların yüksek metan ve hidrojen içeriği reaksiyon sıcaklığını yükseltmekte, yakma havasının da azot içermesinden dolayı, yükselen sıcaklıkta ısıl NO_x oluşumu artmaktadır.

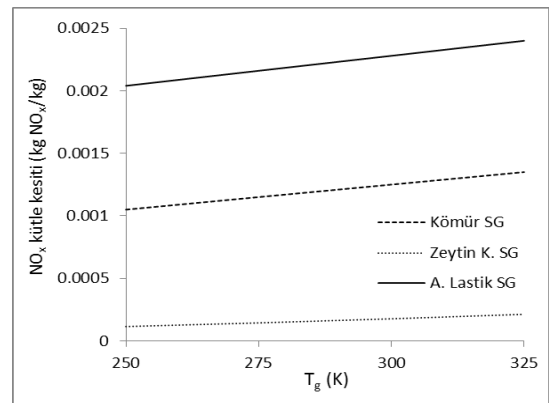
CO ve SO_x kütle kesitlerinin ekivalans oranı ile değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Ekivalans oranı arttıkça CO miktarları yükselmeye başlamış ve en yüksek değer Kömür SG'na ait olduğu saptanmıştır. Yüksek oranda CO ve CO_2 içeren sentez gazlarının yanma sonuç ürünlerinde de CO yüksek çıkmaktadır. Atık Lastik SG yanması sonucunda oluşan CO miktarının Zeytin K.

SG'ninkine göre daha yüksek çıkmasının sebebinin, Atık Lastik SG'nın daha yüksek oranda metan gazı içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ekivalans oranının atması ile karışımdaki yakıt miktarı da arttığı için yakıt kaynaklı SO_x salınımı da yükselmektedir.



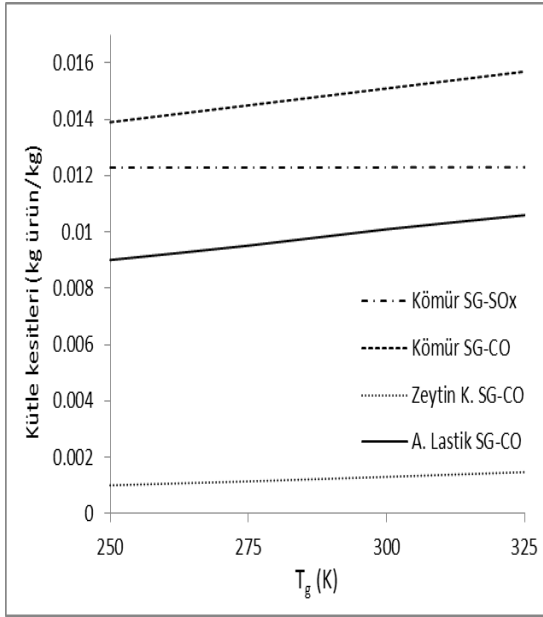
Şekil 2. Ekivalans oranına göre CO ve SO_x kütle kesitlerindeki değişim ($\text{Emv}=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $T_g=300,0 \text{ K}$, $w=0,014$, $P_g=1,0 \text{ Pa}$)

Reaktanların giriş sıcaklığındaki artış ile birlikte tüm gazların için yanma sonucunda NO_x emisyonlarının artmakta olduğu Şekil 3'te verilmiştir. 250 ile 325 K sıcaklıkları arasındaki değişim kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları için sırasıyla %22, %15, %46'dır.



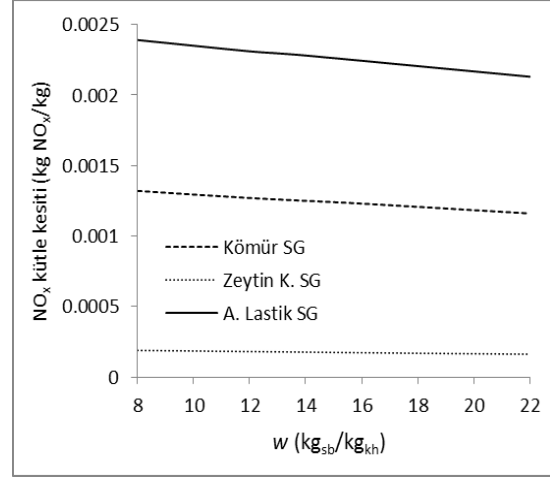
Şekil 3. Reaktan giriş sıcaklığına göre NO_x kütle kesitindeki değişim ($\text{Emv}=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $\text{EO}=1,0$, $w=0,014$, $P_g=1,0 \text{ Pa}$)

Giriş sıcaklığındaki artış ile birlikte yanma sonucu CO kütle kesitlerinin tüm gazlar için artış gösterdiği Şekil 4’de verilmektedir. 250 ile 325 K sıcaklıkları arasındaki değişim kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları için sırasıyla %11,45, %15, %31,8’dir. SO_x ise önemsenmeyecek miktarda bir artış göstermektedir.



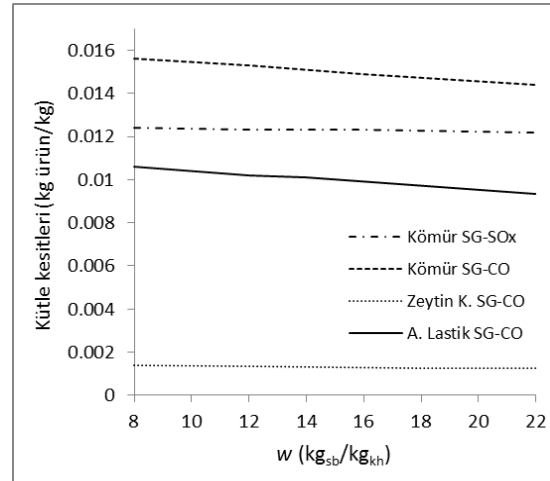
Şekil 4. Reaktan giriş sıcaklığına göre CO ve SO_x kütle kesitlerindeki değişim (Emv=1,0 kg/m³s, w=0,014, EO=1, P_g=1,0 Pa)

Yakma havası nem miktarındaki değişimin NO_x üzerindeki etkisi Şekil 5’te gösterilmiştir. Yanma işlemine buharın eklenmesi NO_x emisyonunu azalttığı bilinmektedir [21]. Yakma havasında nemin yükselmesi, nemin ısı tutma özelliği nedeni ile reaksiyon sıcaklığının düşmesine sebep olmakta, aynı zamanda da alevin oksijenle beslenmesini engellemektedir. Reaksiyon sıcaklığının düşmesi ısıl NO_x oluşumunun düşmesine neden olmaktadır. Nem oranının artması ile Kömür, Atık Lastik ve Zeytin Küspesi SG yanmaları sonucunda oluşan NO_x miktarlarında düşüş meydana gelmiş ve 8-22 aralığında azalma sırası ile %12,1, %10,9 ve %14,3 olarak gerçekleşmiştir.



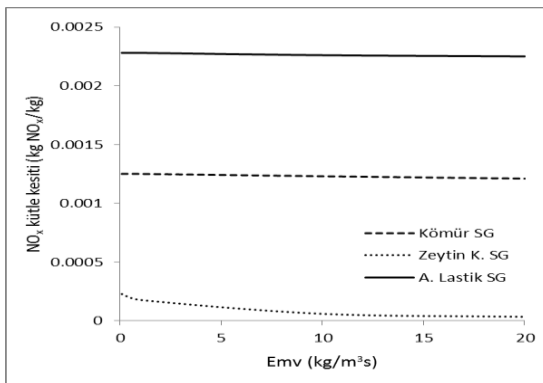
Şekil 5. Nem oranındaki değişime göre NO_x kütle kesitindeki değişim (Emv=1,0 kg/m³s, EO=1,0, T_g=300,0 K, P_g=1,0 Pa)

Şekil 6’da yakma havası nem oranındaki değişiminin, gazların yanmaları sonucunda oluşan CO ve SO_x miktarları üzerine etkisi verilmiştir. Kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları yanma sonucu CO kütle kesitlerinde 8-22 nem oranı aralığında ki azalma %7,7, %12 ve %10,2’dir. Aynı aralıkta kömür sentez gazı yanma sonucu ürünü SO_x kütle kesitindeki düşüş %1,7 olarak gerçekleşmiştir.



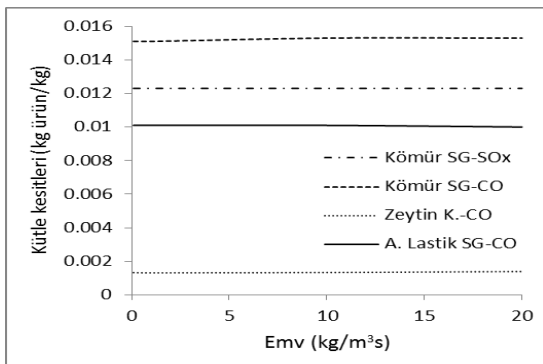
Şekil 6. Nem oranındaki değişime göre CO ve SO_x kütle kesitlerindeki değişim (Emv=1,0 kg/m³s, EO=1,0, T_g=300,0 K, P_g=1,0 Pa)

Şekil 7’de reaktanların toplam kütle miktarındaki artışın, tüm gazlar için yanma sonu NO_x kütle kesitlerinde azalmaya sebep olmakla birlikte önemli bir etkiye sahip olmadığı gösterilmektedir. Emv artışı, yanma odasında bazı reaktantların tümüyle yanamamasından dolayı reaksiyon sıcaklığında düşmeye neden olmakta, dolayısı ile ısıl NO_x oluşumu azaldığından toplamda NO_x salınımında az miktarda bir düşüşün olduğu düşünülmektedir.



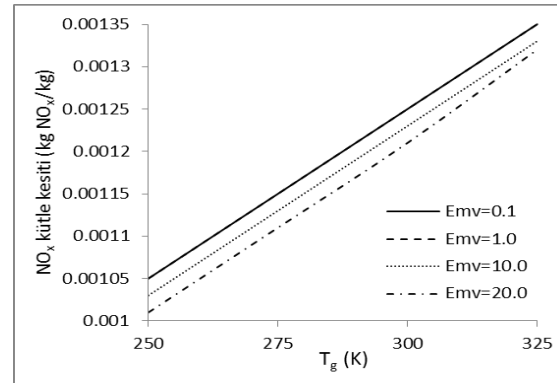
Şekil 7. Reaktan toplam giriş kütlesine göre NO_x kütle kesitindeki değişim ($\text{EO}=1,0$, $T_g=300,0$ K, $w=0,014$, $P_g=1,0$ Pa)

Şekil 8’den, giriş kütlesindeki artış yanma sonu SO_x miktarına etki etmemekle beraber CO miktarlarında tüm gazlar için önemsenmeyecek bir miktarda artışa sebep olduğu saptanmıştır.



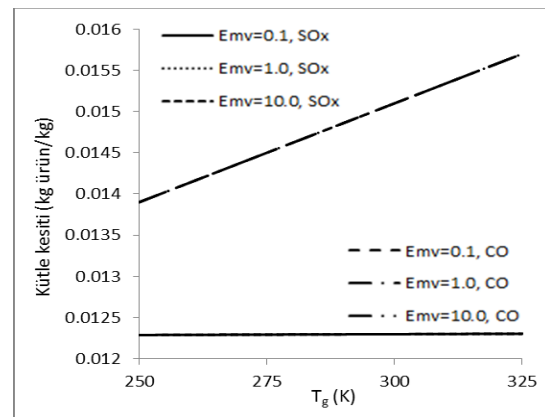
Şekil 8. Reaktan toplam giriş kütlesine göre CO ve SO_x kütle kesitlerindeki değişim ($\text{EO}=1,0$, $T_g=300,0$ K, $w=0,014$, $P_g=1,0$ Pa)

Farklı Emv değerlerinde giriş sıcaklığının NO_x üzerine etkisi kömürden elde edilen sentez gazı için Şekil 9’da verilmiştir. NO_x kütle kesiti, yükselen reaktan giriş sıcaklığında, artan reaktan giriş kütlesi ile azalmaktadır. $0,1-10$ $\text{kg/m}^3\text{s}$ arasında %1,5’lik bir azalma görülmektedir. $0,1$ ve $1,0$ $\text{kg/m}^3\text{s}$ reaktan giriş kütlelerinde aynı NO_x değerleri elde edilmiştir.



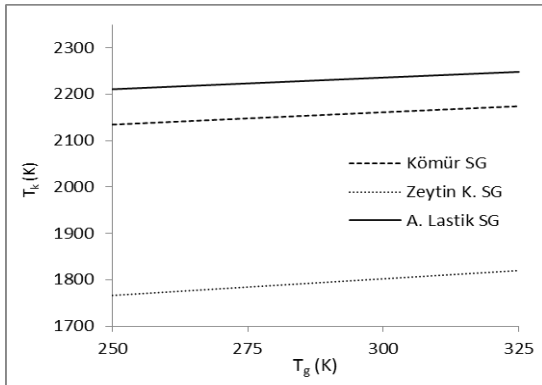
Şekil 9. Farklı Emv değerlerinde giriş sıcaklığına göre NO_x kütle kesitindeki değişimi ($\text{EO}=1,0$, $w=0,014$, $P_g=1,0$ Pa)

Şekil 10’da farklı Emv değerlerinde giriş sıcaklığına göre SO_x ve CO kütle kesitlerindeki değişimler verilmiştir. Kütle kesitleri farklı Emv değerlerinde değişim göstermemektedir. Giriş sıcaklığındaki artış ise kütle kesitlerinin yükselmesine neden olmuştur.



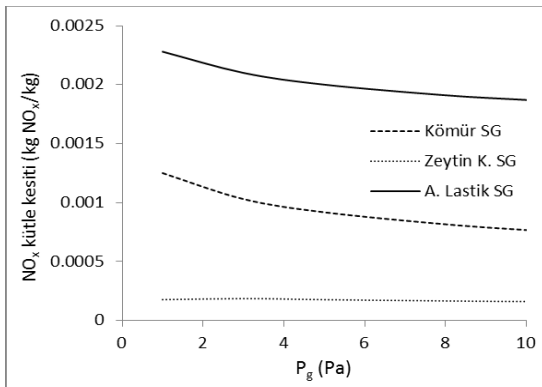
Şekil 10. Farklı Emv değerlerinde giriş sıcaklığına göre SO_x ve CO kütle kesitlerindeki değişim ($\text{EO}=1,0$, $w=0,014$, $P_g=1,0$ Pa)

Reaktan giriş sıcaklığının reaksiyon sıcaklığı üzerine etkisi Şekil 11’de verilmiştir. Giriş sıcaklığındaki artış gazların yanma sonu sıcaklıklarında yükselmeye neden olmaktadır. Yanma sonu sıcaklıklarına göre yüksekte düşüğe sıralama, atık lastik, kömür ve zeytin küspesi sentez gazı şeklinde gerçekleşmiştir. Yükselme en düşük ve en yüksek giriş sıcaklıkları arasında Kömür, A. Lastik ve Zeytin K. SG için sırasıyla % 1,8, 1,65 ve 2,95’dir.



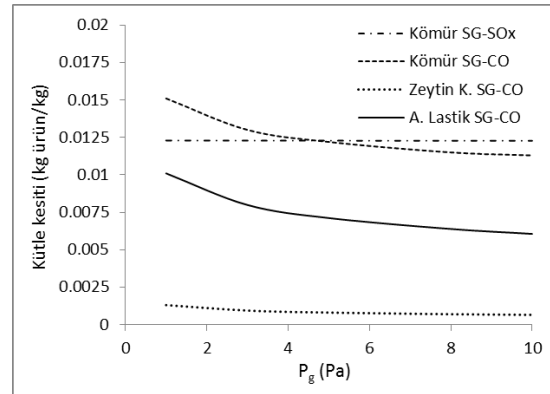
Şekil 11. Giriş sıcaklığına göre reaksiyon sıcaklığındaki değişim ($Emv=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $EO=1,0$, $w=0,014$, $P_g=1,0 \text{ Pa}$)

Reaktanların giriş basıncındaki artışın NO_x kütle kesitlerini düşürdüğü Şekil 12’de gösterilmektedir. Zeytin küspesi sentez gazı yanma sonu NO_x kütle kesitindeki değişim çok düşük kalmaktadır.



Şekil 12. Reaktan giriş basıncına göre NO_x kütle kesitindeki değişim ($Emv=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $EO=1,0$, $w=0,014$, $T_g=300,0 \text{ K}$)

Şekil 13’de reaktanların giriş basıncındaki artışın CO kütle kesitlerinde düşüşe neden olduğu belirlenmiştir. Zeytin SG yanma sonu CO miktarındaki azalma diğerlerine göre daha düşük miktardadır. Basıncın, Kömür SG yanma sonu SO_x kütle kesiti üzerinde bir etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 13. Reaktan giriş basıncına göre SO_x ve CO kütle kesitlerindeki değişimler ($Emv=1,0 \text{ kg/m}^3\text{s}$, $EO=1,0$, $w=0,014$, $T_g=300,0 \text{ K}$)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kömür, atık lastik ve zeytin küspesinden elde edilen sentez gazlarının yanma sonu ürünlerinden NO_x , SO_x ve CO’ın kütle kesitlerindeki değişimler, farklı işletme koşullarında hesaplamalı olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- NO_x kütle kesitleri, kömür, atık lastik ve zeytin küspesi sentez gazları için sırasıyla 0,915, 0,875 ve 0,98 ekivalans oranlarında maksimuma ulaşmaktadır.
- Ekivalans oranı arttıkça CO kütle kesitleri yükselmeye başlamış ve en yüksek değer Kömür SG’na ait olduğu saptanmıştır. Ekivalans oranının artmasıyla birlikte SO_x kütle kesitlerinde de yükselme meydana gelmiştir.
- Reaktanların giriş sıcaklığındaki artış ile birlikte tüm gazlar için yanma sonunda NO_x ve CO miktarları artmaktadır. SO_x ise önemsenmeyecek miktarda bir artış göstermektedir.

- Yakma havasında nemin yükselmesi NO_x , CO ve SO_x kütle kesitlerinde düşüşe neden olmuştur.
- Reaktan toplam kütle miktarındaki artış önemli bir etkiye sahip olmamakla birlikte yanma sonu NO_x kütle kesitlerinde azalmaya, CO salınımında ise az bir miktar artışa sebep olmaktadır. Kütle miktarındaki artış ile SO_x salınım miktarı değişmemiştir.
- NO_x kütle kesiti, yükselen reaktan giriş sıcaklığında, artan reaktan giriş kütlesi ile azalmaktadır. SO_x ve CO kütle kesitleri ise farklı Emv değerlerinde değişim göstermemektedir. Giriş sıcaklığındaki artış ise kütle kesitlerinin yükselmesine neden olmuştur.
- Reaktan giriş sıcaklığındaki artış sentez gazların yanma sonu sıcaklıklarında yükselmeye neden olmaktadır.
- Reaktanların giriş basıncındaki artış NO_x ve CO kütle kesitlerinde düşüşe neden olmaktadır. SO_x kütle kesiti basınç değişiminden etkilenmemektedir.

Semboller

CO	: Karbon monoksit
CREK	: Laminer ve türbülanslı akış kinetiklerini ve yanma reaksiyonu bilgi eşitliklerini hesaplayan bir bilgisayar programı
Emv	: Konvektif ve difüzyon yolla kontrol hacime giren reaktan kütlesi hızı, $\text{kg}/\text{m}^3\text{s}$
EO	: Ekvivalans oranı
NO_x	: Azot oksitler
NO	: Azot oksit
NO_2	: Azot dioksit
P_g	: Reaktan giriş basıncı, Pa
SG	: Sentez gazı
SO_x	: Kükürt oksitler
SO_2	: Kükürt dioksit
T_g	: Reaktan giriş sıcaklığı, K
T_k	: Reaksiyon sıcaklığı, K
k	: Hız katsayısı, $\text{kmol}/\text{m}^3\text{s}$
w	: Nem oranı, $\text{kg}_{\text{sb}}/\text{kg}_{\text{kh}}$

5. TEŞEKKÜR

Yanma konusunda öğrettikleri ve kendisinden temin ettiğim CREK programı için Dr. Öğr. Üy. Mustafa EYRİBOYUN'a teşekkür ederim.

6. KAYNAKLAR

1. Lee, H.C., Jiang, L.Y., Mohamad, A.A., 2014. A Review on the Laminar Flame Speed and Ignition Delay Time of Syngas Mixtures, International Journal of Hydrogen Energy, 39, 1105-1121.
2. Huynh, C.V., Kong, S.C., 2013. Combustion and NO_x Emissions of Biomass-derived Syngas under Various Gasification Conditions Utilizing Oxygen-enriched-air and Steam, Fuel, 107, 455-464.
3. Varyenli, H.İ., Menlik, T., Özkaya, M.G., 2011. Isı Enerjisi Destekli Bir Kompresörün Buhar Sıkıştırma Soğutma Sistemindeki Performansının Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 26, 1-8.
4. Caro, S., Torres, D., Toledo, M., 2015. Syngas Production from Residual Biomass of Forestry and Cereal Plantations Using Hybrid Filtration Combustion, International Journal of Hydrogen Energy, 40, 2568-2577.
5. Cornelissen, R., Tober, E., Kok, J., Van De Meer, T., 2006. Generation of Synthesis Gas by Partial Oxidation of Natural Gas in a Gas Turbine, Energy, 31, 3199-3207.
6. Ouimette, P., Seers, P., 2009. NO_x Emission Characteristics of Partially Premixed Laminar Flames of $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CO}_2$ Mixtures, International Journal of Hydrogen Energy, 34, 9603-9610.
7. Daniel, E.G., Sibendu, S., Suresh, K.A., 2006. NO_x Emission Characteristics of Counterflow Syngas Diffusion Flames with Airstream Dilution, Fuel, 85, 1729-1742.
8. Azimov, U., Okuno, M., Tsuboi, K., Kawahara, N., Tomita, E., 2011. Multidimensional CFD Simulation of Syngas Combustion in A Micro-pilot-ignited Dual-fuel Engine Using a Constructed Chemical Kinetics Mechanism, International Journal of Hydrogen Energy, 36, 13793-13807.

9. Kayahan, U., 2008. Design and Operation of A Laboratory Scale Fluized Bed Gasification System, Ms Thesis, Marmara University, Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, İstanbul, 85.
10. Van Dyk, J.C., Keyser, M.J., Coertzen, M., 2006. Syngas Production from South African Coal Sources Using Sasol-Lurgi Gasifiers, International Journal of Coal Geology, 65, 243-253.
11. Mendioroz, S., Martin-Rojo, A. B., Rivera, F., Martin, J.C., Bahamonde, A., Yates, M., 2006. Selective Catalytic Reduction of NO_x by Methane in Excess Oxygen over Rh Based Aluminum Pillared Clays, Applied Catalysis B: Environmental, 64, 161-170.
12. Özden, Ö., Koçaker, S., Döğeroğlu, T., 2008. Eskişehir’de Azot Dioksit (NO₂) ve Kükürt Dioksitin (SO₂) Kış Dönemi İç ve Dış Ortam Seviyelerinin Pasif Örnekleme Yöntemiyle Ölçümü, Hava Kirliliği ve Kontrolü Ulusal Sempozyumu, 22-25 Ekim, Hatay, 618-630.
13. Can, A., Eryener, D., 1997. Sanayi ve Şehir Kaynaklı Hava Kirliliği ve Önlemleri, Ekoloji, 24, 6-12.
14. Fischer, M., Jiang, X., 2014. An Assessment of Chemical Kinetics for Bio-syngas Combustion, Fuel, 137, 293-305.
15. Pratt, D.T., Wormeck, J.J., 1976. CREK: A Computer Program for Calculation of Combustion Reaction Equilibrium in Laminar or Turbulent Flow, Report WSU-ME-TEL-76-1, Washington State University.
16. Öztürk, S., Eyriboyun, M., 2010. NO_x Formation in Combustion of Natural Gases Used in Turkey under Different Conditions, J. of Thermal Science and Technology, 30, 95-102.
17. El-Sherif, A.S., 1998. Effects of Natural Gas Composition on the Nitrogen Oxide, Flame Structure and Burning Velocity Under Laminar Premixed Flame Conditions, Fuel, 77, 1539-1547.
18. Eötvös Lorand University, Institute of Chemistry, 2011. <http://garfield.chem.elte.hu/Combustion/combine.htm> (Erişim Tarihi: 17.10.2011).
19. Yılmazoğlu, M.Z., 2010. Gazlaştırıcı Kombine Çevrim Santrallerinde Yanma Öncesi Karbondioksit Tutma, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 173-179.
20. Donatelli, A., Iovane, P., Molino, A., 2010. High Energy Syngas Production by Waste Tyres Steam Gasification in A Rotary Kiln Pilot Plant, Experimental and Numerical Investigations, Fuel, 89, 2721-2728.
21. Bing, G., Tian, Y., Zang, S., 2016. The Effects of Humidity on Combustion Characteristics of A Nonpremixed Syngas Flame, International Journal of Hydrogen Energy, 41, 9219-9226.