

SENTEZ GAZI ELDE ETMEK İÇİN KONTROL EDİLEBİLİR REAKTÖR PARAMETRELERİNE BAĞLI GELİŞTİRİLEN İKİ AŞAMALI BİR SU GAZI YÖNLENDİRME REAKTÖRÜ MODELİ

A.M.Özbayoğlu^{*}, C. Kasnakoğlu^{**}, A. Güngör^{***}, A. Bıyıkoğlu^{****}, B.Z. Uysal^{*****}

^{*}Bilgisayar Müh. Böl., Müh. Fak., TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 06560/Ankara

^{**}Elektrik Müh. Böl., Müh. Fak., TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, 06560/Ankara

^{***}Makina Müh. Böl., Müh. Fak., Akdeniz Üniversitesi, 07058/Antalya

^{****} Makina Müh. Böl., Müh. Fak., Gazi Üniversitesi, 06570/Ankara

^{*****}Kimya Müh. Böl., Müh. Fak., Gazi Üniversitesi, 06570/Ankara

mozbayoglu@etu.edu.tr, kasnakoğlu@etu.edu.tr, afsingungor@hotmail.com, abivik@gazi.edu.tr,
bzuysal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 10.10.2011; Kabul/Accepted: 06.02.2013)

ÖZET

Bu çalışmada sentez gazı rafinesi için seri bir model önerilmektedir. Birinci aşamada, oluşturulan sentez gazının bir kısmını çıkış gazına transfer eden bir yangeçit vardır. Bunun yanı sıra, iki aşamada da her iki reaktöre buhar takviyesi sunabilecek ayarlı buhar girişleri bulunmaktadır; bunun sonucunda çıkıştaki sentez gazı karakteristikleri istenilen şekile getirilebilir. Reaktör çıkışındaki H₂/CO oranının kısıt olarak sağlanması üzerine odaklanılmıştır. Birinci aşama girişine beslenen sentez gazının kompozisyonu tüm reaktör davranışını şekillendirmektedir. Sonuçta, yapılandırılan model, arzu edilen sentez gazı karakteristiklerini sağlayabilmek için herhangi bir kömür türüne bağlı olarak uygun proses parametre değerlerini oluşturabilme yeteneğine sahiptir. Model üç değişik kömür ile test edilmiş, ve her defasında en uygun yangeçit değeri ve buhar oranları elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Su Gazı Yönlendirme reaktörü, sentez gazı, kömür gazlaştırılması

A TWO-STAGE WATER-GAS SHIFT REACTOR MODEL TO OBTAIN DESIRED SYNTHESIS GAS CHARACTERISTICS WITH ADJUSTABLE REACTOR PARAMETERS

ABSTRACT

A cascaded model is proposed for SYNGAS refinement. The first stage has a bypass outlet to transfer some SYNGAS to the output. Also, both stages have adjustable steam inputs controlling the amount of steam supply to both reactors separately; hence SYNGAS characteristics at the output can take the desired form. Satisfying the constraints of H₂/CO ratio at reactor exit was emphasized. SYNGAS composition fed into the first stage characterizes the overall behavior. Hence, the structured model has the capability to refine any SYNGAS composition by identifying the proper process parameters of a given coal type for desired SYNGAS properties. The model was tested with three different coal types, and in each case the best bypass values and steam ratios were obtained.

Keywords: Water Gas-Shift reactor, synthesis gas refinement, two-stage process, coal gasification

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji talebinde son yıllarda görülmekte olan ani artış, araştırmacıların verimli enerji teknolojileri üzerine tasarım ve geliştirme çalışmalarına yönelmelerine sebep olmuştur. Aynı zamanda, çevre duyarlılığı çok daha fazla önem kazanmış ve enerji firmaları temiz ve/veya yenilenebilir enerji çözümlerine yönelik büyük miktarlarda araştırma harcamaları yapmaya başlamışlardır. Kömür, yüzyıllardır enerji için her zaman ilk seçeneklerden biri olagelmıştır; fakat aynı zamanda en kirlilik yaratanlardan biri olmuştur. Petrolün tersine, dünyadaki kömür kaynaklarının önümüzdeki birkaç yüzyıl boyunca talebi karşılamaya yetecek seviyede bulunması, kömürü temel enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere büyük bir teşvik yaratmaktadır. Buna ilaveten, çevre kirliliği yaratmadığı sürece, üretim maliyeti en ucuz olan enerji tercihlerinden biridir. Bunun sonucunda, çevreyi yüksek miktarda enerji üretimine bağlı oluşabilecek zararlı etkilerden koruyabilmek için yeni uygulanabilir metotların geliştirilmesine yönelik özel hassasiyet gösterilmesi gerekmektedir. Bu hedefi gerçekleştirebilmeye yönelik olarak enerji üretimi için kömür gazlaştırılmasının kullanılması olası alternatif metotlar arasında önerilebilir [1-7]. Bunun yanı sıra, gazlaştırma sonucunda elde edilen enerji üretiminin, geleneksel sistemlere kıyasla toplam verimliliği her zaman daha yüksek olmaktadır [8]. Sonuç olarak, gelecekte enerji üretimi için sentez gazı kullanımı, daha fazla firmanın gazlaştırma sistemlerini göz önüne almalarının önünü açacaktır; bunun yanı sıra araştırmacıların gazlaştırma rafine prosesinde maliyet düşürmeye yönelik çalışmalara ilgisi artacaktır. Tüm bunlar göz önüne alındığında, gazlaştırma teknolojisinin enerji üretimi için uygulanmasında ilerlemeye yönelik potansiyel bulunmaktadır. Literatürde enerji elde etmek için sentez gazı üretimine yönelik yakın zamanda yapılmış bazı çalışmalar [14,15,17,18] mevcuttur. Casleton ve

arkadaşları [1] kömür gazlaştırma teknolojilerinin gözden geçirildiği ve özellikle enerji elde etmek için sentez gazı üretimine ait çok sayıda uygulama ve yararlı referansların yer aldığı bir çalışma yapmışlardır.

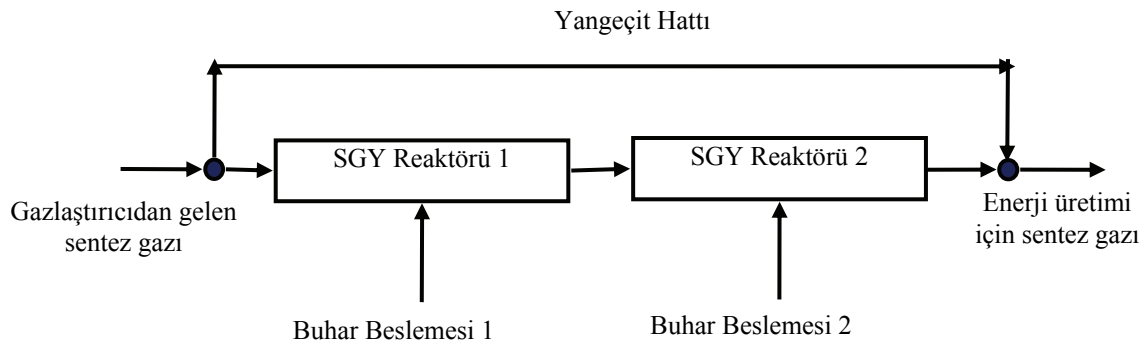
Bu çalışmada, enerji elde etmek için kömürden sentez gazı rafine prosesinde çalışma şartlarına yönelik değer kümesinin tespit edilmesine özel bir önem gösterilmiştir. En makul sentez gazı rafine prosesinin elde edilmesinin sağlanması için en uygun proses parametrelerinin elde edilmesi için değişik girdi parametreleri seçimleri yapılmıştır.

2. GELİŞTİRİLEN MODEL (DEVELOPED MODEL)

Değişik kömür özelliklerinin ve proses parametrelerinin değerlerinin geniş bir aralığa sahip olması enerji üretimi için en uygun Sentez gazı bileşiminin elde edilmesini oldukça zor yapmaktadır. Sentez gazı bileşimini etkileyen çok sayıda parametre olması problemi daha da karmaşık hale getirmektedir.

Şekil 1’de, gazlaştırıcıdan gelen sentez gazının rafine edilmesi işlemi için bu çalışmada önerilen iki aşamalı su gazı yönlendirme (SGY) reaktörü ve bu seri iki reaktörün çıkışında elde edilen son sentez gazının kompozisyonunun kontrolü için tasarlanan yangeçit hattı gösterilmektedir.

Birinci aşama prosesinde, gazlaştırıcıdan gelen sentez gazı sisteme girdi olarak verilir ve 1. SGY reaktöründe buhar ile karıştırılır [10,11]. Bu çalışmada sentez gazı üretimi için üç değişik kömür numunesi [3] kullanılmıştır. Kömürlere ait elementel analiz, nem ve kömürlerin kalorifik değerleri Tablo 1’de sunulmuştur. Bu kömürlerden elde edilen sentez gazlarının kompozisyonları Tablo 2 [14-18]’de gösterilmektedir. Bu kompozisyonlar birinci reaktöre girdi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 1. Seri SGY reaktör sisteminin şematik görünümü (Schematic view of serially connected WGS reactor system)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan kömür çeşitleri [3] (Coal types used in this study)

Bileşenler	Yüzde (%)		
	Kömür 1	Kömür 2	Kömür 3
Nem	13,51	38,44	17,42
Kül	30,15	24,50	18,67
C	41,81	27,85	48,71
H	4,28	2,17	3,53
N	2,16	0,95	1,53
O	8,09	6,09	10,14
Alt Isıl Değeri (LHV) – MJ/kg	22,69	26,63	18,44
Üst Isıl Değeri (HHV) - MJ/kg	23,97	27,71	19,64

Önerilen modelde giriş hattına gelen sentez gazının bir kısmının doğrudan çıkışa gitmesini sağlayan bir bir yangeçit hattı mevcuttur. Aynı zamanda, birinci reaktörde buhar giriş hattından reaktöre beslenen kontrollü miktarda buhar ve yangeçit hattına gönderilmemiş olan kalan sentez gazı giriş hattı bulunmaktadır. İkinci aşamada, benzer bir kurulum düzenlenmiştir; SGY Reaktör 1'den gelen sentez gazı

ikinci bir buhar beslemesi ile karıştırılmaktadır. Nihai sentez gazı kompozisyonu SGY Reaktör 2'den çıkan sentez gazı ile yangeçit hattından gelen ilk sentez gazının birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bir uçtan diğer uca sentez gazı rafine prosesi sentez gazı yangeçit oranı, f, ve buhar/sentez gazı oranları SR₁ and SR₂ ile kontrol edilmektedir [4-6].

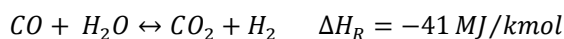
Tablo 2. Gazlaştırıcıdan gelen sentez gazının kompozisyonu [16] *
(Composition of synthesis gas from gasifier)

Sentez Kompozisyonu	Hacimsel Yüzde (%)		
	Kömür 1	Kömür 2	Kömür 3
H ₂	28,55	39,72	21,86
CO	33,71	28,88	37,74
CO ₂	0,37	0,27	0,46
N ₂	32,28	30,64	32,27
H ₂ O	0,40	0,48	0,34
CH ₄	4,69	0	7,33
H ₂ / CO	0,846879	1,3751	0,5792

* Hava/Yakıt = 1, Buhar/Yakıt = 0,1, P = 1 atm and T = 1150 K

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

SGY reaksiyonu aşağıda verilmiştir.



Tablo 3 SGY reaksiyonu denge sabitinin sıcaklığa göre nasıl değiştiğini göstermektedir. K_{p,s} denge sabitinin hesaplanabilmesi için seri SGY reaktör modelinde ara değerlerin interpolasyonunu içeren bir teknikten faydalanılmıştır. Birinci SGY reaktörüne

girdi olarak beslenen değişik sentez gazı kompozisyonları Tablo 2'de verilmiştir.

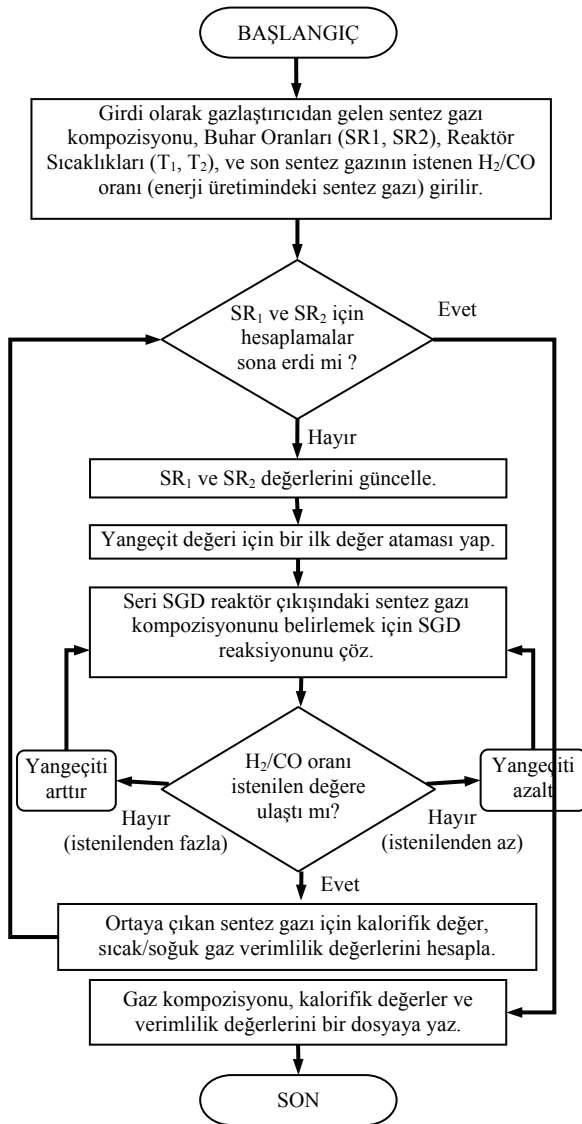
Gazlaştırıcıdan gelen sentez gazı kompozisyonları birinci reaktör için girdi değerlerini belirlemektedir ve bu değerler birinci SGY reaktöründe SGY reaksiyon koşullarına göre yeniden oluşturulan sentez gazının içeriğinin hesaplanmasında kullanılmaktadır, daha sonra bu sentez gazı kompozisyonu ikinci reaktöre girdi olarak sunulmakta ve aynı şekilde SGY reaksiyon koşullarına göre yeniden oluşturulan ikinci

reaktör çıkışındaki sentez gazını belirlemektedir. Tarif edilen seri SGY reaktörü modelindeki hesaplama aşamalarını gösteren akış çizeneği Şekil 2'de gösterilmektedir.

Tablo 3. K_p,s denge sabitinin SGY reaksiyonunda sıcaklık değerlerine göre değişimi [2]

Sıcaklık (K)	K_p,s
400	4050,00
600	27,00
800	4,04
1000	1,38
1500	0,37

Akış çizeneğinin detayları incelendiğinde modelin



Şekil 2. Seri SGY reaktör modeli akış çizeneği (Flow diagram of serially connected WGS reactor model)

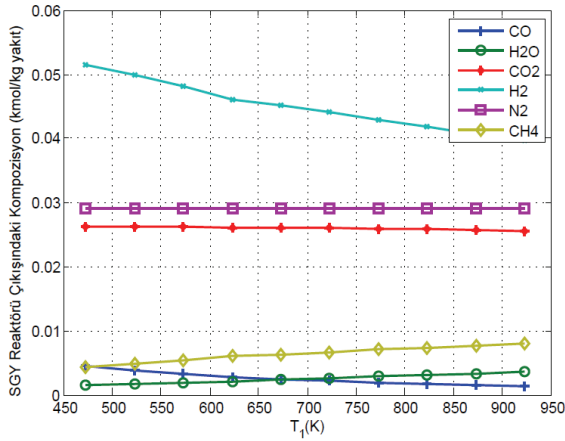
başlangıçtaki sentez gazı kompozisyonunu bilmesi gerektiği görülmektedir; operasyon parametreleri olarak belirlenen buhar oranları, SR1 ve SR2, reaktör sıcaklıkları T1 ve T2, ve arzu edilen H2/CO oranı girildiğinde model SR1 ve SR2 değerlerinin hesaplanmasını yinelemeli bir şekilde gerçekleştirir. Bu yinelemeler, denge durumunun erişildiğini gösteren, hesaplamaların belirli bir çözüme yakınsaması durumunda, sona erdirilir. Daha sonra, program sonuçları bir dosyaya kaydeder ve sona erer. Aksi takdirde yinelemeler SR1 ve SR2 değerlerini güncelleyerek ve sentez gazı elde edilmesinde kullanılan SGY reaksiyonunun çözümü için gereken yanageçit oranına bir ilk değer atayarak devam ederler. Yinelemeli döngünün bir parçası ise arzu edilen H2/CO oranının kontrol edilmesidir. Bu çalışmada, bu oran 2 olarak seçilmiştir, fakat başka uygulamalar bu modelde olduğu gibi daha değişik kısıtlara ihtiyaç duyabilirler [12,13]. Eğer bu oran seçilen kriteri sağlamışsa, program sonuçta elde edilen sentez gazı kompozisyonunun üst ısıl değerini (HHV), sıcak ve soğuk gaz verimliliği değerlerini hesaplar. Başka eniyileme ve kısıt sağlama kriterleri de istendiği takdirde sisteme eklenebilir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

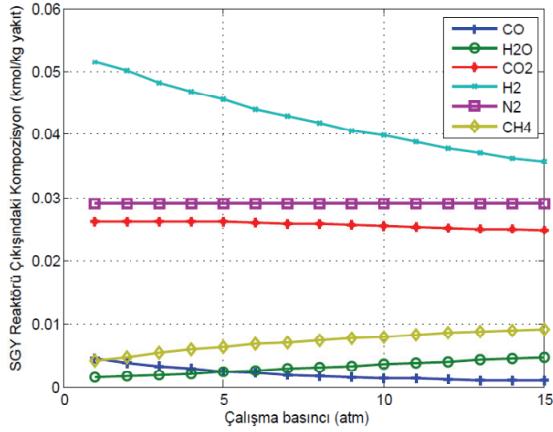
Sentez gazı kompozisyonunu etkileyen parametreler şu şekilde sıralanabilir: buhar-1 – sentez gazı oranı (SR₁), buhar-2 – sentez gazı oranı (SR₂), SGY Reaktör 1 sıcaklığı (T₁), SGY Reaktör 2 sıcaklığı (T₂), çalışma basıncı P ve yanageçit oranı f. Bu çalışmada yakıt olarak sentez gazı elde edilecek kömürün kendisi kullanılmıştır.

Çalışma basıncının 1 numaralı kömürden elde edilen sentez gazına olan etkisi Şekil 3'de izlenebilir. Şekil 3 incelendiğinde, SGY reaktör çıkışındaki sentez gazı kompozisyonunda herhangi bir kayda değer değişiklik gözlenmemektedir. Bundan dolayı, rafine prosesinde daha kolay bir çalışma ortamı sağladığından ötürü çalışma basıncı olarak atmosferik basınç seçilebilir.

Şekil 4 birinci SGY reaktörünün sıcaklık değerinde yapılan değişikliklerin 2. Reaktör çıkışındaki sentez gazı kompozisyonunu kayda değer bir şekilde etkilemediğini göstermektedir. Bu durum, ikinci SGY reaktörünün sıcaklık değerinin değişim reaksiyonunda yer alan gazların son denge dağılımlarını belirlemede tek parametre olarak yer alması sebebiyle aslında beklenmektedir. Bunun sonucunda, sisteme ilave edilen buhar miktarı ve ikinci reaktör sıcaklığı tüm durumlar için aynı olduğundan ötürü, birinci SGY reaktörünün sıcaklığı ne olursa olsun, çıkışta oluşan sentez gazı kompozisyonu aynı olacaktır.



Şekil 3. Çalışma basıncının Kömür 1 sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of operating pressure on synthesis gas composition for coal type 1). ($T_1 = 350^\circ\text{C}$, $T_2 = 200^\circ\text{C}$, yangeçit = 0, $SR_1 = 0,3$, $SR_2 = 0$)

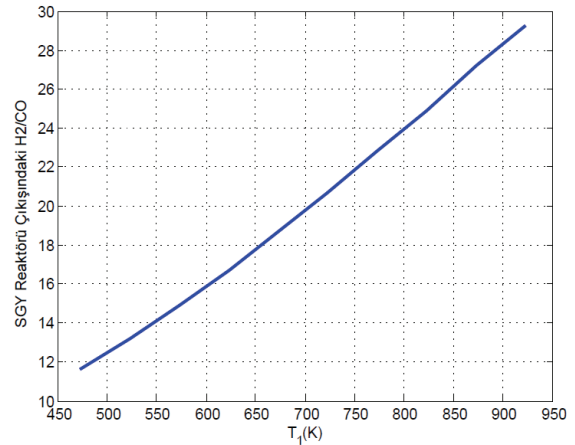


Şekil 4a. SGY Reaktör-1 sıcaklığının, (T_1) sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of temperature of WGS reactor-1 on synthesis gas composition) ($T_2 = 200^\circ\text{C}$, yangeçit = 0, $SR_1=0,3$, $SR_2 = 0$)

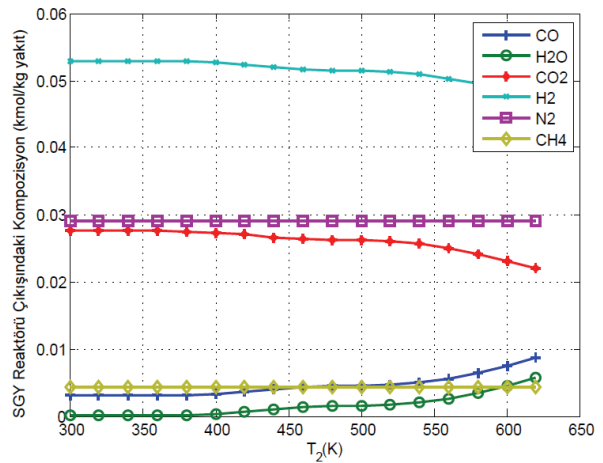
Şekil 5 ikinci SGY reaktörünün sıcaklığının artırılmasının çıkış gazında yer alan H2 miktarını azalttığını, ve CO miktarını arttırdığını göstermektedir; SGY reaksiyonu egzotermik olduğundan ötürü ve Tablo 3'de verilen denge sabitlerinin sıcaklıkla değişimi dikkate alındığında bu durum beklenmelidir. Sonuç olarak, H2/CO oranı artan sıcaklıklara bağlı olarak azalma gösterir.

Buhar-1'in sentez gazına (SR_1) ve buhar-2'nin sentez gazına (SR_2) göre molar oranlarının değişimlerine ve oluşan H2/CO oranlarına ait grafikler Şekil 6 ve 7'de gösterilmektedir. Bu iki şekildedeki grafikler analiz edildiğinde, sisteme yapılan buhar beslemesinin toplam buhar miktarı aynı olduğu sürece birinci veya ikinci reaktöre yapılması arasında herhangi bir fark

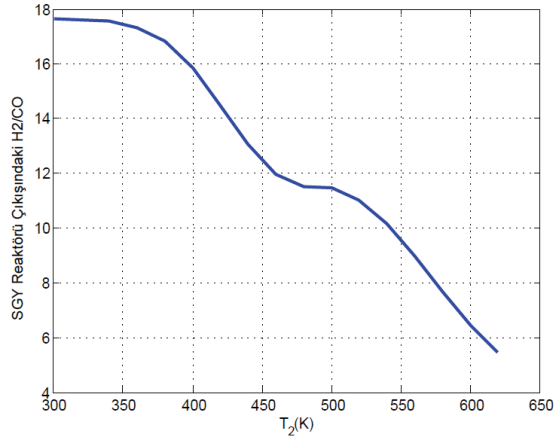
oluşturmadığı gözlenmektedir. Buna ilaveten, ilginç olarak beslenen buhar miktarının artırılması başlangıçta üretilen H2 miktarının artmasına yol açsa da diğer buhar besleme musluğunun kapatıldığı durumda $SR_1 = 0,5$ ve/veya $SR_2 = 0,5$ seviyelerine ulaşıldığında H2 oranı bir doygunluk seviyesine ulaşmaktadır. Buna bağlı olarak, 0,5 değeri, proses için kullanılması gereken optimum buhar molar oranı olarak değerlendirilebilir. SR_1 değerini arttırmak H2/CO oranını artırıyor gibi görünse de gerçekte bu artışın sebebi H2 konsantrasyonunun artmasından değil, CO miktarının sıfıra doğru yaklaşması sonucu H2/CO oranının sınırsız bir ölçüde artıyor olmasından kaynaklanmaktadır.



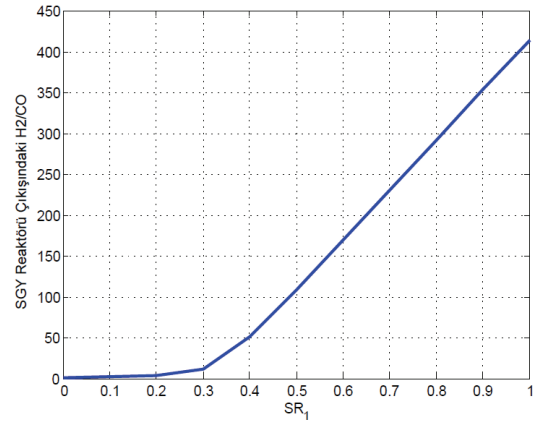
Şekil 4b. SGY Reaktör-1 sıcaklığının, (T_1) H2/CO oranına etkileri (Effects of temperature of WGS reactor-1 on H2/CO ratio) ($T_2 = 200^\circ\text{C}$, yangeçit = 0, $SR_1=0,3$, $SR_2 = 0$)



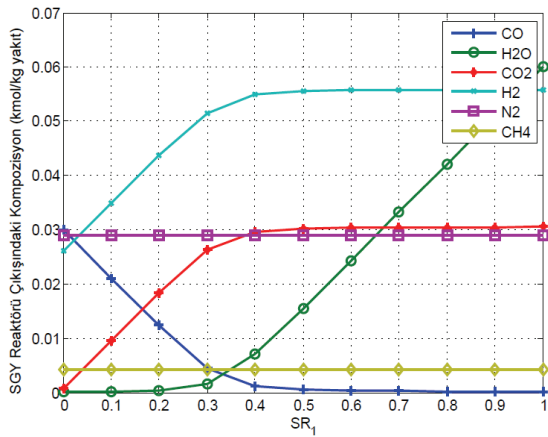
Şekil 5a. SGY Reaktör-2 sıcaklığının, (T_2) sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of temperature of WGS reactor-2 on synthesis gas composition) ($T_1 = 350^\circ\text{C}$, yangeçit = 0, $SR_1=0,3$, $SR_2 = 0$)



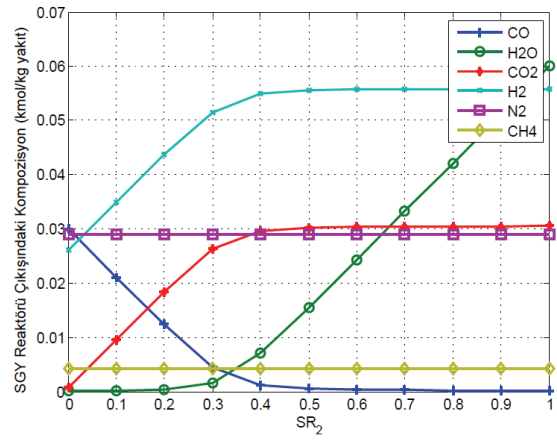
Şekil 5b. SGY Reaktör-2 sıcaklığının, (T_2) H_2/CO oranına etkileri (Effects of temperature of WGS reactor-2 on H_2/CO ratio) ($T_1 = 350$ °C, yangeçit = 0, $SR_1=0,3$, $SR_2 = 0$)



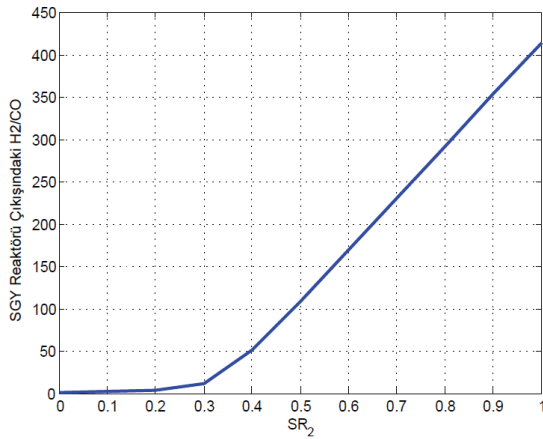
Şekil 6b. Buhar-1 – sentez gazı molar oranının (SR_1) H_2/CO oranına etkileri (Effects of molar fraction of synthesis gas on H_2/CO ratio for steam 1) ($T_1 = 350$ °C, $T_2 = 200$ °C, yangeçit = 0, $SR_2 = 0$)



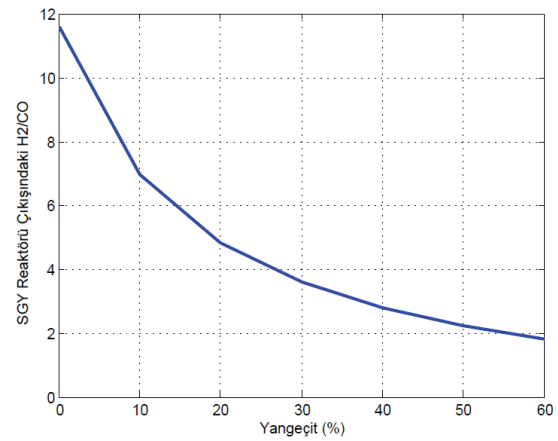
Şekil 6a. Buhar-1 – sentez gazı molar oranının (SR_1) sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of molar fraction of synthesis gas on its composition for steam 1) ($T_1 = 350$ °C, $T_2 = 200$ °C, yangeçit = 0, $SR_2 = 0$)



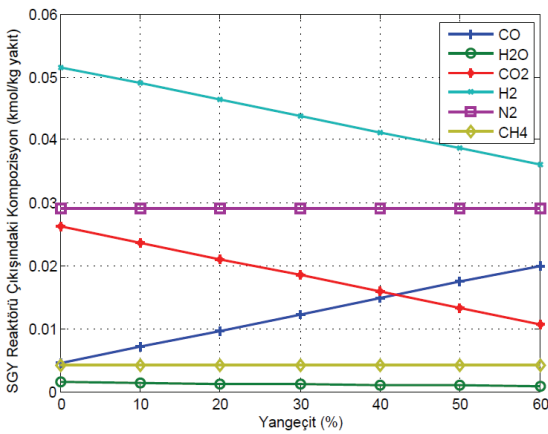
Şekil 7a. Buhar-2 – sentez gazı molar oranının (SR_2) sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of molar fraction of synthesis gas on its composition for steam 2) ($T_1 = 350$ °C, $T_2 = 200$ °C, yangeçit = 0, $SR_1 = 0$)



Şekil 7b. Buhar-2 – sentez gazı molar oranının (SR_2) H_2/CO oranına etkileri (Effects of molar fraction of synthesis gas on H_2/CO ratio for steam 2) ($T_1 = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 200\text{ }^\circ\text{C}$, yangeçit = 0, $SR_1 = 0$)



Şekil 8b. Yangeçit oranının H_2/CO oranına etkileri (Effects of bypass ratio on H_2/CO) ($T_1 = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 200\text{ }^\circ\text{C}$, $SR_1 = 0,3$, $SR_2 = 0$).



Şekil 8a. Yangeçit oranının sentez gazı kompozisyonuna etkileri (Effects of bypass ratio on composition of synthesis gas) ($T_1 = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 200\text{ }^\circ\text{C}$, $SR_1 = 0,3$, $SR_2 = 0$).

Şekil 8, yangeçit oranının SGY reaktörü çıkışında oluşan sentez gazı kompozisyonuna etkisini göstermektedir. Şekil 8'de de görülebileceği gibi yangeçit oranı %10'dan %60'a doğru artarken H_2/CO oranı 7'den 2'ye düşmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi yangeçit değeri tek başına H_2/CO oranını etkilememektedir, bundan ötürü istenen H_2/CO oranını elde etmek için yangeçit değerini ayarlamak yeterlidir. Reaktör modelinin kullanılacağı uygulama için düşünülen sentez gazının kompozisyonuna bağlı olarak istenilen

değerler seçilebilir. Yangeçit oranı herhangi bir uygulama için istenilen şekilde bir sentez gaz kompozisyonu elde etmek üzere optimize edilebilir. Gazlaştırıcıdan gelen sentez gazı kompozisyonunun seri SGY modelinin girişinde rafine işleminden önce bilindiği varsayılmaktadır. Şekil 4 ve 5'de görülebileceği gibi, birinci SGY ve ikinci SGY reaktörlerinin sıcaklıkları düşük derecelerde sentez gazı kompozisyonunu etkilememektedir, bu çalışmada birinci reaktör sıcaklığı $350\text{ }^\circ\text{C}$, ikinci reaktör sıcaklığı ise $200\text{ }^\circ\text{C}$ olarak seçilmiş ve H_2/CO değerindeki değişim çeşitli yangeçit değerleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Onbir değişik yangeçit değeri seçilmiş ve SR_1 and SR_2 değerleri 1'den 0'a doğru 0,1 aralıklarla azalacak şekilde SGY modeli benzetimleri çalıştırılmıştır. Her bir durum için, Şekil 2'de gösterilen algoritmayı kullanarak rafine prosesinin sonucunda H_2/CO oranını 2 yapacak optimum yangeçit oranı hesaplanmıştır, bu oran tüm durumlar göz önüne alındığında 1. kömür için 0,61, 2. kömür için 0,79 ve 3. kömür için 0,52 olarak elde edilmiştir.

Bu deneylerden elde edilen sonuçlar çıkış gazı kompozisyonları, sentez gazının sıcak gaz verimliliği, η_h ve soğuk gaz verimliliği, η_c ile beraber üç kömür için sırasıyla Tablo 4,5 ve 6'da gösterilmektedir. η_h ve η_c formülleri aşağıda verilmiştir:

$$\eta_c = \frac{V_{\text{sentezgazı}} \cdot \dot{U}ID_{\text{sentezgazı}}}{\dot{m}_{\text{yakıt}} \cdot \dot{U}ID_{\text{yakıt}}} \quad (1)$$

$$\eta_h = \frac{V_{\text{sentezgazı}} (\dot{U}ID + \Delta H)_{\text{sentezgazı}}}{\dot{m}_{\text{yakıt}} \dot{U}ID_{\text{yakıt}}} \quad (2)$$

burada, $\dot{V}_{\text{sentezgazı}}$ üretilen sentez gazının hacimsel akış oranını [m^3/s] şeklinde göstermektedir ve $\dot{m}_{\text{yakıt}}$ yakıtın kütleli akış oranı için kullanılmaktadır. Sentez gazının üst ısıl değeri, $\dot{U}ID_{\text{sentezgazı}}$ [kJ/m^3] H_2 , CO , CO_2 , H_2S and CH_4 'dan oluşan yanıcı bileşenlerin tek tek ısıl katkılarının toplanması sonucu elde edilmektedir. Bu gazların değişik sıcaklıklarda

elde edilmiş ısıl değerleri ve entalpileri literatürdeki çeşitli referanslarda halihazırda bulunmaktadır [2]. Bu özel çalışmada, H_2S and CH_4 değerleri düşük seviyelerde olduğu için göz ardı edilmiş ve ısıl değeri hesaplamalarında kullanılmamıştır. Tablo 4,5 ve 6 incelendiğinde, metanol ve pek çok petro-kimya ürünlerinin üretilmesi için, arzu edilen H_2/CO oranı olan 2'nin tüm denemelerde elde edildiği gözlenmektedir. Buna ilaveten, SR_1 'in ve SR_2 'in tüm değişik değerleri için elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olması dikkat çekicidir.

Tablo 4. Kömür tipi 1: Farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGY reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi (Coal Type 1: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam ratio couples)

SR_1	SR_2	$\dot{n}_{\text{sentezgaz}}$	H_2	CO	CO_2	N_2	H_2O	H_2/CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
1,0	0,0	0,1245	29,95	14,97	9,62	23,28	18,79	2,00	0,82	0,85
0,9	0,1	0,1276	29,22	14,61	9,38	22,72	20,76	2,00	0,82	0,85
0,8	0,2	0,1300	28,68	14,34	9,21	22,30	22,24	2,00	0,82	0,85
0,7	0,3	0,1317	28,30	14,15	9,09	22,00	23,25	2,00	0,82	0,85
0,6	0,4	0,1328	28,08	14,04	9,02	21,83	23,85	2,00	0,82	0,85
0,5	0,5	0,1331	28,01	14,00	8,99	21,78	24,05	2,00	0,82	0,85
0,4	0,6	0,1328	28,08	14,04	9,02	21,83	23,85	2,00	0,82	0,85
0,3	0,7	0,1317	28,30	14,15	9,09	22,00	23,25	2,00	0,82	0,85
0,2	0,8	0,1300	28,68	14,34	9,21	22,30	22,24	2,00	0,82	0,85
0,1	0,9	0,1276	29,22	14,61	9,38	22,72	20,76	2,00	0,82	0,85
0,0	1,0	0,1245	29,95	14,97	9,62	23,28	18,79	2,00	0,82	0,85

Tablo 5. Kömür tipi 2: Farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGD reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi (Coal Type 2: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam ratio couples)

SR ₁	SR ₂	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂ /CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
1,0	0,0	0,1127	37,82	18,91	5,20	25,34	12,72	2,00	0,76	0,78
0,9	0,1	0,1144	37,24	18,62	5,12	24,95	14,05	2,00	0,76	0,79
0,8	0,2	0,1158	36,81	18,40	5,06	24,66	15,06	2,00	0,76	0,79
0,7	0,3	0,1167	36,50	18,25	5,02	24,46	15,77	2,00	0,76	0,79
0,6	0,4	0,1173	36,32	18,16	5,00	24,34	16,18	2,00	0,76	0,79
0,5	0,5	0,1175	36,26	18,13	4,99	24,30	16,32	2,00	0,76	0,79
0,4	0,6	0,1173	36,32	18,16	5,00	24,34	16,18	2,00	0,76	0,79
0,3	0,7	0,1167	36,50	18,25	5,02	24,46	15,77	2,00	0,76	0,79
0,2	0,8	0,1158	36,81	18,40	5,06	24,66	15,06	2,00	0,76	0,79
0,1	0,9	0,1144	37,24	18,62	5,12	24,95	14,05	2,00	0,76	0,79
0,0	1,0	0,1127	37,82	18,91	5,20	25,34	12,72	2,00	0,76	0,78

Tablo 6. Kömür tipi 3: Farklı buhar oranı çiftleri ile iki kademeli SGD reaktör sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi (Coal Type 3: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam ratio couples)

SR ₁	SR ₂	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂ /CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
1,0	0,0	0,1315	26,92	13,46	12,42	21,87	20,36	2,00	0,87	0,90
0,9	0,1	0,1353	26,17	13,08	12,08	21,26	22,59	2,00	0,87	0,91
0,8	0,2	0,1383	25,61	12,81	11,82	20,80	24,24	2,00	0,87	0,91
0,7	0,3	0,1404	25,23	12,61	11,64	20,49	25,38	2,00	0,87	0,91
0,6	0,4	0,1416	25,00	12,50	11,54	20,31	26,04	2,00	0,87	0,91
0,5	0,5	0,1421	24,93	12,46	11,50	20,25	26,26	2,00	0,87	0,91
0,4	0,6	0,1416	25,00	12,50	11,54	20,31	26,04	2,00	0,87	0,91
0,3	0,7	0,1404	25,23	12,61	11,64	20,49	25,38	2,00	0,87	0,91
0,2	0,8	0,1383	25,61	12,81	11,82	20,80	24,24	2,00	0,87	0,91
0,1	0,9	0,1353	26,17	13,08	12,08	21,26	22,59	2,00	0,87	0,91
0,0	1,0	0,1315	26,92	13,46	12,42	21,87	20,36	2,00	0,87	0,91

Bu sebeple, prosesin SGY1 ve SGY2 reaktörlerine ayrı ayrı beslenen buhar miktarlarına değil, sisteme toplamda verilen buhar miktarına bağlı bir hassasiyet içerdiği söylenebilir. Bunun sonucunda, sisteme beslenen tüm buharın yalnızca birinci reaktöre gönderildiğini varsayıp, tüm modelin analizinin daha kolay yapılabilmesi rahatça sağlanabilir.

Bir sonraki analizde, değişik yangeçit oranları kullanıldığında $H_2/CO = 2$ oranını sağlamak için SGY reaktörlerine beslenmesi gereken minimum buhar miktarı hesaplanmış ve sonuçlar incelenmiştir. Bu durum için de Şekil 2'de açıklanan algoritma kullanılmış, fakat bu sefer, optimize edilmek istenen parametre SR_1 olarak seçilmiştir.

için hesaplanan minimum buhar sonuçları Tablo 7,8 ve 9'da gösterilmektedir. Tablolarda gösterilen sonuçlar dikkatlice incelendiğinde, $H_2/CO = 2$ kriterinin sağlanması için gereken minimum buhar miktarının yangeçit oranının sifira gitmesi durumunda gerçekleştiği göze çarpmaktadır. SGY reaktörlerine giren CO miktarının bu durumda en fazla olduğu ve bunun sonucunda gereken H_2 miktarının daha az buhar miktarıyla üretilebildiği göz önüne alındığında, bu durum beklenmelidir. Ancak, yangeçit kullanılmasının işletmeye getirdiği esneklik de dikkate alınmalıdır.

Değişik kömür türlerinden elde edilen sentez gazları

Tablo 7. Kömür tipi 1: Farklı buhar (SR_1) ve yangeçit oranı (f) çiftleri ile iki kademeli SGY reaktörü sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi* (Coal Type 1: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam (SR_1) and bypass ratio (f) couples)

SR_1	f	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H_2	CO	CO ₂	N ₂	H ₂ O	H ₂ /CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
0,13	0,00	0,1012	36,84	18,42	11,83	28,64	0,11	2,00	0,82	0,84
0,14	0,07	0,1012	36,82	18,41	11,82	28,63	0,14	2,00	0,82	0,84
0,15	0,14	0,1013	36,81	18,41	11,82	28,62	0,18	2,00	0,82	0,84
0,16	0,20	0,1013	36,80	18,40	11,82	28,61	0,21	2,00	0,82	0,84
0,18	0,27	0,1014	36,78	18,39	11,81	28,60	0,26	2,00	0,82	0,84
0,20	0,34	0,1014	36,76	18,38	11,80	28,58	0,31	2,00	0,82	0,84
0,22	0,41	0,1015	36,74	18,37	11,80	28,56	0,38	2,00	0,82	0,84
0,25	0,47	0,1016	36,70	18,35	11,78	28,53	0,49	2,00	0,82	0,84
0,29	0,54	0,1019	36,59	18,30	11,75	28,45	0,77	2,00	0,82	0,84
0,53	0,61	0,1085	34,38	17,19	11,04	26,73	6,78	2,00	0,82	0,85

*SGY-2 reaktöründe buhar beslemesinin yapılmadığı durum incelenmiştir ($SR_2 = 0$).

Tablo 8. Kömür tipi 2: Farklı buhar (SR_1) ve yangeçit oranı (f) çiftleri ile iki kademeli SGY reaktörü sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi* (Coal Type 1: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam (SR_1) and bypass ratio (f) couples)

SR_1	f	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H_2	CO	CO_2	N_2	H_2O	H_2/CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
0,06	0,00	0,0984	43,31	21,66	5,96	29,02	0,06	2,00	0,76	0,78
0,06	0,09	0,0984	43,31	21,66	5,96	29,02	0,06	2,00	0,76	0,78
0,07	0,18	0,0985	43,27	21,64	5,95	28,99	0,14	2,00	0,76	0,78
0,08	0,26	0,0985	43,26	21,63	5,95	28,98	0,18	2,00	0,76	0,78
0,09	0,35	0,0986	43,24	21,62	5,95	28,97	0,23	2,00	0,76	0,78
0,10	0,44	0,0986	43,22	21,61	5,95	28,96	0,28	2,00	0,76	0,78
0,12	0,53	0,0987	43,19	21,60	5,94	28,94	0,33	2,00	0,76	0,78
0,15	0,61	0,0987	43,17	21,58	5,94	28,92	0,39	2,00	0,76	0,78
0,20	0,70	0,0988	43,12	21,56	5,93	28,89	0,50	2,00	0,76	0,78
0,69	0,79	0,1066	39,98	19,99	5,50	26,79	7,74	2,00	0,76	0,78

* SGY-2 reaktöründe buhar beslemesinin yapılmadığı durum incelenmiştir ($SR_2 = 0$).

Tablo 9. Kömür tipi 3: Farklı buhar (SR_1) ve yangeçit oranı (f) çiftleri ile iki kademeli SGY reaktörü sisteminin çıkışındaki sentez gazı bileşimi ve sıcak ve soğuk gaz verimlerinin değişimi* (Coal Type 1: Variation of the composition of synthesis gas at the exit of the two stage WGS reactor system and the efficiencies of cold and hot gas with different combination of steam (SR_1) and bypass ratio (f) couples)

SR_1	f	$\dot{n}_{\text{sentez gaz}}$	H_2	CO	CO_2	N_2	H_2O	H_2/CO	η_c	η_h
		[kmol]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]			
0,18	0,00	0,1049	33,76	16,88	15,58	27,42	0,15	2,00	0,87	0,90
0,19	0,06	0,1049	33,75	16,87	15,57	27,41	0,18	2,00	0,87	0,90
0,20	0,12	0,1050	33,73	16,87	15,57	27,40	0,21	2,00	0,87	0,90
0,22	0,17	0,1050	33,72	16,86	15,56	27,39	0,25	2,00	0,87	0,90
0,23	0,23	0,1051	33,71	16,85	15,55	27,38	0,30	2,00	0,87	0,90
0,25	0,29	0,1051	33,68	16,84	15,54	27,36	0,36	2,00	0,87	0,90
0,28	0,35	0,1052	33,65	16,83	15,53	27,33	0,45	2,00	0,87	0,90
0,31	0,40	0,1054	33,60	16,80	15,51	27,29	0,61	2,00	0,87	0,90
0,35	0,46	0,1058	33,46	16,73	15,44	27,18	1,02	2,00	0,87	0,90
0,58	0,52	0,1139	31,09	15,55	14,35	25,25	8,03	2,00	0,87	0,90

* SGY-2 reaktöründe buhar beslemesinin yapılmadığı durum incelenmiştir ($SR_2 = 0$).

Belirli bir seviyenin üzerinde yangeçit oranı kullanılması çabaları (1 no'lu kömür için 0.65, 2 no'lu kömür için 0.8, 3 no'lu kömür için 0.53) uygulama imkanı olan bir sonuca ulaşmamaktadır, bu sebeple bu değerlerin üstü tablolarda gösterilmemiştir. Yangeçit oranının çok yüksek olması, giriş gazının büyük oranda doğrudan çıktıya gönderilmesine yol açtığı için, bu aslında beklenen bir durumdur. Bunun neticesinde, SGY reaktörlerine giden gazın içerisinde çok az miktarda CO kalmış olacağından, H₂/CO oranını 2 seviyesinde olması için sentezlenmesi gereken yeterli miktarda H₂ gazı kalmayacaktır. Buna bağlı olarak, uygulamada istenen H₂/CO oranı için seçilen değere bağlı olarak, kullanılacak yangeçit değeri belirli bir üst limiti olacak şekilde dikkatlice belirlenmelidir, aksi takdirde, uygulaması mümkün olmayan bir sonuç ortaya çıkabilecektir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, sentez gazı rafine prosesi için yangeçit ve buhar beslemeli iki seviyeli bir seri SGY reaktör modeli test edilmiştir. Model başarımının ölçülmesi amacıyla üç değişik kömür numunesi kullanılmıştır. Bu çalışma sonucu gözlemlenen önemli bir sonuç, basıncın etkisinin önemli olmamasından ötürü rafine prosesi için çalışma basıncının atmosferik basınç olarak seçilmesidir. Bunun yanı sıra, elde edilen sonuçlar, sentez gazı kompozisyonunun belirlenmesinde üç önemli parametrenin (buhar oranları, ikinci SGY reaktörü sıcaklığı ve yangeçit oranı) önemli olduğunu göstermektedir.

Sentez gazı kompozisyonu için optimum H₂/CO değeri kullanılan parametrelere bağlı olarak elde edilen sentez gazının kullanım amacına göre değişebilir. Bu çalışmada, metanol üretiminde kullanılabilir bir durumun örnek alındığı bir ortam düşünülmüş ve H₂/CO oranı 2 olarak seçilmiştir. Daha sonra, SR₁ ve SR₂ oranlarına göre sentez gazı miktarı belirlenmiştir. Optimizasyon sonuçları analiz edildiğinde, üretilen sentez gazının miktarının SR₁ ve SR₂ oranlarına göre her kilogram yakıt (kömür) için 0,11 ile 0,13 kmol ve H₂/CO oranı 2 olacak şekilde düzenlenmesi gerektiği sonucuna varılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, bu çalışmaya verdikleri destekten ötürü Türkiye Kömür İşletmeleri'ne (TKİ) teşekkürlerini sunmaktadırlar.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

1. Casleton, K.H., Breault, R. W., Richards, G. A., 2008, "System Issues and Tradeoffs Associated with Syngas Production and Combustion", Combust. Sci. and Tech, Vol. 180, pp. 1013–1052.
2. Basu, P., 2006, **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**, CRC Press.
3. Tuncalı, E., Çiftçi, B., Yavuz, N., Toprak, S., Köker, A., Gencer Z., Ayçık, H., Şahin N., "Türkiye tersiyer kömürlerinin kimyasal ve teknolojik özellikleri", MTA Genel Müdürlüğü Yayını, 2002.
4. Güngör, A., Ozbayoglu, A.M., Kasnakoglu, C., Biyikoglu, A. and Uysal, B.Z, "Determination of Air/Fuel and Steam/Fuel Ratio for Coal Gasification Process to Produce Synthesis Gas", Journal of Environmental Science and Engineering, 5(5), June 2011.
5. Biyikoglu, A., Kasnakoğlu, C., Ozbayoglu, A.M., Güngör, A., Özgür, D.Ö. and Uysal, B.Z., "Determination of Coal Gasification parameters for the production of Synthesis Gas", 9th National Chemical Engineering Congress (UKMK-9), 22-25 June, 2010, Gazi University, Ankara, Turkey.
6. A. Güngör, M. Özbayoglu, C. Kasnakoğlu, A. Biyikoglu, B.Z. Uysal, "A parametric study on coal gasification for the production of syngas", Chemical Papers, vol 66, No 7, pp. 677-683, 2012, DOI: 10.2478/s11696-012-0164-0, July 2012.
7. Smoot, L.D., Smith, P.J., "Coal combustion and gasification", Plenum Press, New York, NY, 1985.
8. Minchener, A.J., "Coal gasification for advanced power generation", Fuel, 84 (17), pp. 2222—2235, 2005.
9. Huang, J., Fang, Y., Chen, H., Wang, Y., "Coal gasification characteristic in a pressurized fluidized bed", Energy & fuels, 17 (6), pp. 1474—1479, 2003.
10. Podolski, W.F., Kim, Y.G., "Modeling the water-gas shift reaction", 13 (4), 415—421, 1974.
11. Amadeo, N.E., Laborde, M.A., "Hydrogen production from the low-temperature water-gas shift reaction: kinetics and simulation of the industrial reactor", International journal of hydrogen energy, 20 (12), 949—956, 1995.
12. Criscuoli, A., Basile, A., Drioli, E., "An analysis of the performance of membrane reactors for the water-gas shift reaction using gas feed mixtures", Catalysis Today, 56 (1), pp. 53—64, 2000.
13. Riggs, J.B., "Method for controlling H₂/CO ratio of in-situ coal gasification product gas", US Patent 4476927, 1984.

14. Özbayoğlu, A.M., Kasnakoğlu, C., Güngör, A., Bıyıkoğlu, A., Uysal, B.Z., "An Analysis of Water Gas-Shift Reactor Battery System for Synthesis Gas Refinement", 11th International Combustion Symposium pp. 1-6, Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, 24-27 June 2010.
15. A. Güngör, A. Bıyıkoğlu, C. Kasnakoğlu, M. Özbayoğlu, B.Z. Uysal, "Kömürün Gazlaştırılması ile Hidrojen Üretiminde İşletme Parametrelerinin Etkisi," V. Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 16-17 Ekim 2009, Kayseri, Türkiye
16. A. Güngör M. Özbayoğlu, C. Kasnakoğlu A. Bıyıkoğlu, B. Z. Uysal, "Determination of Air/Fuel and Steam/Fuel Ratio for Coal Gasification Process To Produce Synthesis Gas," The Second International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources, July 5th-7th, 2010, Golbasi Convention Center, Ankara, Türkiye.
17. A. Güngör, M.Özbayoğlu, C. Kasnakoğlu, A. Bıyıkoğlu, B.Z. Uysal, "A Parametric Study on Coal Gasification for the Production of Syngas", 8th European Conference on Coal Research and Its Applications, ECCRIA-8, 6-8 September 2010, University of Leeds, UK.
18. A. Bıyıkoğlu, A. Güngör, C. Kasnakoğlu, M.Özbayoğlu, B.Z. Uysal, "Effect Of Operation Parameters on Gasification for the Production of Synthesis Gas," The 27th Annual International Pittsburg Coal Conference, IPCC 2010, October 11-14, 2010, Istanbul, Turkey.

