



## HİMMETOĞLU VE SEYİTÖMER BİTÜMLÜ ŞEYLLERİ İLE PLASTİK ŞEHİR ATIKLARININ KABARCIKLI AKIŞKAN YATAKLI REAKTÖRDE GAZLAŞTIRILMASI

Duygu UYSAL\*, Hazal ÖZTAN\*\*, Ahmed Abdullah GAFUR\*\*\* ve Özkan Murat DOĞAN\*\*\*\*

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara

\* duysal@gazi.edu.tr, ORCID:0000-0002-8963-6026

\*\* hazaloztan@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1456-7238

\*\*\* ahmet0516@yahoo.com

\*\*\*\* mdogan@gazi.edu.tr, ORCID: 0000-0003-3801-3141

(Geliş Tarihi: 09.03.2022, Kabul Tarihi: 07.10.2022)

**Özet:** Artan plastik kullanımı ve kullanılan plastiklerin bir süre sonra atık olarak birikmesi günümüzün başlıca sorunlarından biridir. Atık plastiklerin yeniden değerlendirilmesi için termokimyasal dönüşüm prosesleri oldukça verimlidir. Atık plastiklerin tek başına ve çeşitli yerli kömürler ile birlikte gazlaştırılması sayesinde yakıt olarak kullanıma uygun CO, CH<sub>4</sub> ve bir enerji taşıyıcısı olan H<sub>2</sub> içeren sentez gazı üretimi mümkündür. Bu amaçla yapılan çalışmada, Himmetoğlu ve Seyitömer bitümlü şeylleri ile plastik atık karışımı (%56 polietilen, %28 polipropilen ve %16 polistiren) gazlaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, 4 cm iç çapında ve 110 cm boyundaki kuvars camdan imal edilen laboratuvar ölçekli akışkan yataklı sistemde gerçekleştirilmiş olup akışkanlaştırıcı gaz olarak hava ve gazlaştırıcı akışkan olarak da su buharı kullanılmıştır. Sıcaklığın (750°C, 800°C, 850°C), su buharı akış hızının (5-10-15 g/dak) ve beslemedeki plastik oranının (%40 ve %70) sentez gazındaki H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> konsantrasyonuna etkileri incelenmiştir. 5-10 g/dak akış hızındaki su buharı kullanımı Himmetoğlu bitümlü şeylinin ve karışımlarının gazlaştırılması için uygundur. Seyitömer bitümlü şeyli ve karışımlarının gazlaştırılmasında ise 10-15 g/dak olacak şekilde daha yüksek akış hızlarının uygun olduğu görülmüştür. Himmetoğlu ve Seyitömer bitümlü şeyllere %40 ve %70 oranında plastik atık karıştırıldığında üretilen sentez gazındaki H<sub>2</sub> konsantrasyonu azalırken CH<sub>4</sub> konsantrasyonu artmıştır. Çalışma sonucunda, en yüksek H<sub>2</sub> konsantrasyonu %21,33 (750°C - 10 g/dak- %60 Himmetoğlu bitümlü şeyli ve %40 plastik beslemesi) ve en yüksek CH<sub>4</sub> konsantrasyonu ise %74,71 (850°C - 10 g/dak- %30 Himmetoğlu bitümlü şeyli-%70 plastik atık) olarak elde edilmiştir. Üretilmesi planlanan sentez gazının kullanım alanına göre sıcaklık, su buharı akış hızı ve besleme karışım oranı değiştirilerek uygun çalışma koşulları belirlenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Bitümlü şeyl, Plastik atık, Akışkan yatak, Gazlaştırma, Hidrojen

## GASIFICATION OF HİMMETOĞLU AND SEYITÖMER OIL SHALES WITH PLASTIC CITY WASTES IN A BUBBLING FLUIDIZED BED REACTOR

**Abstract:** Increasing use of plastics and accumulation of used plastics as waste after a while are the main problems of today. Thermochemical conversion processes are highly efficient for recycling waste plastics. With the gasification of waste plastics alone and with various local coals, it is possible to produce syngas containing H<sub>2</sub>, as an energy carrier, with CO and CH<sub>4</sub> suitable for use as fuel. In this study, Himmetoğlu and Seyitömer bituminous shales and plastic waste mixture (56% polyethylene, 28% polypropylene, and 16% polystyrene) were gasified. Experimental studies were carried out in a laboratory-scale fluidized bed system made of quartz glass with an inner diameter of 4 cm and a length of 110 cm, and the air was used as a fluidizing gas and water vapor was used as a gasifier agent. The effects of temperature (750 °C, 800 °C, 850 °C), water vapor flow rate (5-10-15 g / min), and plastic in the feed (40% and 70%) on the concentration of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in the syngas were investigated. When the gasification results were examined, the use of steam with a flow rate of 5-10 g/min is suitable for the gasification of Himmetoğlu bituminous shale and its mixtures. In the gasification of Seyitömer bituminous shale and mixtures, it was determined that higher flow rates of 10-15 g min should be preferred. When 40% and 70% plastic waste was mixed into Himmetoğlu and Seyitömer bituminous shales, the concentration of H<sub>2</sub> in the syngas decreased while the concentration of CH<sub>4</sub> increased. As a result of the study, the highest H<sub>2</sub> concentration was obtained as 21.33% (750 °C - 10 g / min- 60% Himmetoğlu bituminous shale - 40% plastic waste) and the highest CH<sub>4</sub> concentration was obtained as 74.71% (850°C- 10 g / min- 30% Himmetoğlu bituminous shale- 70% plastic waste). Suitable operating conditions can be determined by changing temperature, steam flow rate, and feed mixture ratio according to the usage area of the syngas planned to be produced.

**Keywords:** Oil shale, Plastic waste, Fluidized bed, Gasification, Hydrogen

## SEMBOLLER

|                 |                                 |
|-----------------|---------------------------------|
| HM              | Himmetoğlu bitümlü şisti        |
| SYT             | Seyitömer bitümlü şisti         |
| U               | Boş kolon hızı [m/s]            |
| U <sub>mf</sub> | Minimum akışkanlaşma hızı [m/s] |

## GİRİŞ

Küresel enerji tüketimi, artan insan nüfusu ve gelişen endüstriden dolayı hızla artmaktadır. Enerji tüketiminin olduğu başlıca alanlar endüstri, ulaşım ve konut içeriklidir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) 2021 verilerine göre sektör bazı enerji tüketimi endüstride 2339,3 Mtoe, ulaşım 2890,9 Mtoe ve konutta 2109,2 Mtoe olmuştur (IEA, 2021). Kaynak bazı enerji tüketiminde ise ilk üç sırada kömür, petrol ve doğal gaz olmak üzere fosil yakıtların yer aldığı bildirilmiştir. Giderek artan enerji ihtiyacını karşılamada fosil yakıtların kullanımı rezervlerin planlanandan daha hızlı tükenmesine yol açmış ve sera gazı olarak bilinen CO<sub>2</sub> emisyonlarının endişe verici düzeylere gelmesinde birinci sırada rol oynamıştır. Türkiye Kömür İşletmeleri'nin (TKİ) 2019 yılı Kömür Sektör Raporu'na göre dünya fosil yakıt kaynaklarından kömür 119 yıl, petrol 47 yıl ve doğal gaz 60 yıllık bir rezerve sahiptir (TKİ, 2019).

Enerji üretimindeki fosil yakıt rezervi ve emisyon sorunlarının yanı sıra hızlı endüstriyel üretim ve tüketim sonucu çeşitli atık sınıfındaki malzemelerin doğada birikimi de sürdürülebilir yeşil ekonominin başlıca bir sorunu hâline gelmiştir (Adami ve Schiavon, 2021; Lopez vd, 2018; Aguilar- Hernandez vd, 2019). Atık sınıfındaki malzemelerden en önemlisi günümüzde atık plastiklerdir. Plastikler modern yaşamın en temel destek malzemesi hâline gelmiş durumdadır. Düşük üretim maliyetine, çok geniş kullanım alanına ve farklı özelliklere sahip olmaları diğer malzemelerin yerini almalarını sağlamıştır (Wong vd, 2015). Plastik malzemelerin üretiminin ve tüketiminin hızla artmasına bağlı olarak günümüzde geri dönüşüm için çok fazla çaba sarf edilmesi gerektiği de açıktır. Doğada uzun süre bozunmamaları sebebiyle büyük bir çevre problemi haline gelmiş durumdadırlar (Lopez vd, 2018). Lopez vd. 2018'nin çalışmasında belirtildiği üzere 2015 yılında dünyada 322 milyon ton plastik üretimi gerçekleşmiştir ancak 275 milyon ton plastiğin ise karasal alanda kontrolsüz şekilde yayılmış atık olarak kaldığı belirtilmiştir (Jambeck vd, 2015). Atık plastikler büyük bir çevre sorunu yaratmalarına karşın aslında karbon içerikli malzemeler olmaları nedeniyle ciddi bir karbon kaynağının da kaybi olarak görülmelidir.

Küresel enerji krizleri ve artan insan nüfusu, yerli enerji kaynaklarına sahip olunamaması, fosil yakıt rezervlerinin azalan ömürleri, geleneksel enerji üretim sistemlerinin emisyon sorunları ve buna bağlı olarak küresel ısınma, artan atık ve bunların depolama sorunları gibi günümüzün en temel sorunları araştırmaları daha sürdürülebilir, daha temiz ve daha çevre dostu enerji

kaynağı arayışına yöneltmiştir. Önemli bir enerji taşıyıcısı olması nedeniyle günümüzde H<sub>2</sub> gazı yeşil ekonominin büyük bir parçası hâline gelmiş durumdadır (Dinçer ve Zamfirescu, 2014). Pek çok enerji kaynağından üretilebilir olma, kullanıldığında sera gazı emisyonu yapmaması, sıvı ya da gaz olarak depolanabilmesi, sıkıştırıldığında pillere kıyasla daha fazla enerji yoğunluğuna sahip olması gibi birçok olumlu özelliği yakıt olarak kullanılabilmesinin önünü açan özellikler olmuştur (Australian Hydrogen Council, 2021).

H<sub>2</sub> gazı, pek çok kaynaktan çeşitli prosesler yardımı ile üretilebilmektedir (Dinçer ve Zamfirescu, 2014). Bu proseslerden günümüzde endüstriyel olarak hali hazırda uygulanabilir olanı gazlaştırma prosesleridir (Cocco vd, 2014; Geldart, 1986; Kunii ve Levenspiel, 1991; Grace, 2020). Temelde kömür gazlaştırması ile sentez gazı üretimi yapılmakta ve daha sonrasında sentez gazı bileşeni olan H<sub>2</sub>, PSA sistemlerinde saflaştırılarak yakıt hücrelerinde kullanıma sunulmaktadır (Du vd, 2021). Saf H<sub>2</sub> eldesinin yanında sentez gazının hammadde olarak kullanımı da metanol, sentetik doğal gaz, dimetil eter ve amonyak gibi değerli kimyasalların üretilmesinde önemli bir uygulamadır (Kovac vd, 2021; Chaudhari vd, 2001; Labochyov vd, 1998; Hamelinck vd, 2004; Canbaz ve Gür, 2020). Plastik atıkların yeniden değerlendirilmesinde içerdikleri yüksek kalorifik değerden dolayı yakma prosesleri akla gelen ilk dönüşüm süreci olsa da plastik atıkların yakılması yerine değerli kimyasallara dönüştürülmesi için gazlaştırma prosesleri ön plandadır (Moya vd, 2017; Benim ve Kuppa, 2016). Özellikle plastik atıkların en iyi değerlendirme yollarından biri kömür ile birlikte gazlaştırılmasıdır (Straka ve Bicakova, 2014). Birlikte gazlaştırma işlemi hem atık yönetimine hem de fosil yakıt tüketiminin bir miktar da olsa önüne geçilmesine yardımcı olmaktadır (Emami-Taba vd, 2013). Gazlaştırma teknolojisi özellikle akışkan yataklı sistemlerde yüksek dönüşüm verimi ile düşük karbon içeriğine sahip atıkların bile kolayca dönüştürülebilmesine olanak verdiğinden atık plastiklerin yanı sıra düşük kalitedeki kömürlerin de verimli kullanımına son derece uygundur (Basu, 2006; Basu, 2010; Emami-Taba vd, 2012; Ramos vd, 2018; Pinto vd, 2009; NETL, 2021)

Ülkemiz yüksek kalitedeki kömürlerden çok genç kömürler olan linyit ve bitümlü şeyller açısından daha zengin bir yapıya sahiptir (TKİ, 2010). Bitümlü şeyller, kerojen adı verilen organik madde içeren sedimanter kayalardır ve kömüre benzer yapıdadırlar. Isıtıldıklarında petrol ve gaz üretebildikleri için önemli bir fosil yakıt kaynağı olarak görülmektedirler (Öztürk, 2020). Ülkemizde Kütahya/Seyitömer ve Bolu/Himmetoğlu sahaları önemli bitümlü şeyl sahalarımızdır. Himmetoğlu bitümlü şeyli (HM) üst ısı değeri 4992 kcal/kg ve Seyitömer bitümlü şeyli (SYT) üst ısı değeri ise 847 kcal/kg olup kül içerikleri yüksek kaynaklardır (Toraman ve Uçurum, 2009).

Bu çalışma kapsamında, plastik şehir atıklarını yerli fosil kaynaklar olan Himmetoğlu (HM) ve Seyitömer (SYT) bitümü şeylleri ile birlikte akışkan yatakta gazlaştırarak hidrojen zengin sentez gazı üretimi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalar, laboratuvar ölçekli akışkan yataklı gazlaştırma sisteminde gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın, su buharı akış hızının ve besleme karışımındaki plastik oranının sentez gazı bileşimine etkileri araştırılmıştır. Sentez gazı bileşimindeki H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> konsantrasyonları incelenmiştir. H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> üretimi için gerekli optimum işletme koşulları ve birlikte gazlaşma davranışı çalışma sonucunda belirlenmiştir. Belirlenen amaç doğrultusunda, yerli kaynakların ve verimli gazlaştırma sistemlerinin kullanımı ile atıkların katma değer ürünlere dönüştürülmesi teşvik edilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada, Himmetoğlu bitümlü şeyli, Seyitömer bitümlü şeyli ve plastik şehir atığı (%56 polietilen-%28 polipropilen-%16 polistiren) kullanılmıştır. Bitümlü şeyllere ait kaba ve elementel analiz sonuçları Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Bitümlü şeyllere ait kaba analiz sonuçları

| %            | Himmetoğlu bitümlü şeyli | Seyitömer bitümlü şeyli |
|--------------|--------------------------|-------------------------|
| Nem          | 6,65                     | 4,64                    |
| Kül          | 14,68                    | 42,20                   |
| Uçucu madde  | 59,81                    | 49,93                   |
| Sabit karbon | 18,86                    | 3,23                    |

**Tablo 2.** Bitümlü şeyllere ait elementel analiz sonuçları

| %   | Himmetoğlu bitümlü şeyli | Seyitömer bitümlü şeyli |
|-----|--------------------------|-------------------------|
| C   | 61,35                    | 43,47                   |
| H   | 7,06                     | 6,58                    |
| N   | 1,44                     | 1,08                    |
| O   | 12,91                    | 15,62                   |
| S   | 4,44                     | 3,57                    |
| Kül | 12,80                    | 29,68                   |

## Akışkan Yataklı Gazlaştırma Sistemi

Gazlaştırma deneyleri laboratuvar ölçekli akışkan yataklı sistemde (7) gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Yatak kuvars camdan imal edilmiş olup yatak iç çapı 4 cm ve boyu 110 cm uzunluğundadır. Gazlaştırıcı akışkan olarak su buharı beslemesi, 100°C’de (1 atm) 45 kg/saat buhar besleyebilen buhar jeneratörü (4) ile yapılmıştır. Su buharı akış hızı 5-10-15 g/dak olacak şekilde bir yıkama şişesinin (5) yardımı ile ayarlanmıştır. Yıkama şişesinde yoğunlaşan buhar miktarı birim zamanda ölçülmüş, en az üç ölçüm yapılmış ve ortalaması alınarak sabit akış hızında olmak üzere plastik boru hattı (6) ile yatağa

gönderilmiştir. Yatak malzemesi olarak 0,6 mm partikül çaplı silika kum tercih edilmiştir. Yatak malzemesi (silika kum) yoğunluk değeri deneysel olarak 2235 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Yataktaki akışkanlaşma sabit 0,47 m/s hızında hava ile sağlanmıştır ( $U/U_{mf} = 2$ ). Yatağa hava beslemesi, ortamdan (1) havayı alıp ön ısıtıcıya ve yatağa gönderen bir kompresör (2) ile yapılmıştır. Hava, buhar jeneratöründen gelen ikinci bir hat ile ön ısıtıcıda (3) ısıtılarak yatağa beslenmiştir. Yatakta homojen gaz dağılımı sağlanması için delikli plaka kullanılmıştır. Gazlaştırma için gerekli enerji elektrikli bir fırın (8) tarafından sağlanmış ve ısı çifti (11) ile yatak içindeki sıcaklık kontrol edilmiştir. Gazlaştırılacak hammaddeler yatağın üst kısmında yer alan bunkere (10) doldurulmuş ve bir vidalı besleyici (9) ile yatağa beslenmiştir. Yataktan çıkan gaz soğutma kolonunda (12) soğutulmuş ve soğuyan gazdan numune şişesine (13) bir miktar gaz alınmıştır.

Deneylerde sıcaklığın, su buharı akış hızının ve farklı karışım oranlarının sentez gazı bileşimine etkisi incelenmiştir. Gazlaştırma sıcaklıkları 750°C, 800°C ve 850°C olarak ve su buharı akış hızı 5, 10, 15 g/dak olacak şekilde ayarlanmıştır. Gazlaştırılacak hammaddeler farklı kütsel oranlarda %100 HM, %60 HM- %40 plastik atık, %30 HM- %70 plastik atık, %100 SYT, %60 SYT- %40 plastik atık, %30 SYT-%70 plastik atık ve %100 plastik atık (%56 polietilen, %28 polipropilen, %16 polistiren karışımı) olarak hazırlanmıştır. Her bir karışım üç farklı sıcaklıkta (akış hızı sabit tutulup) ve üç farklı akış hızında (sıcaklık sabit tutulup) gazlaştırılarak 63 adet deney gerçekleştirilmiştir.

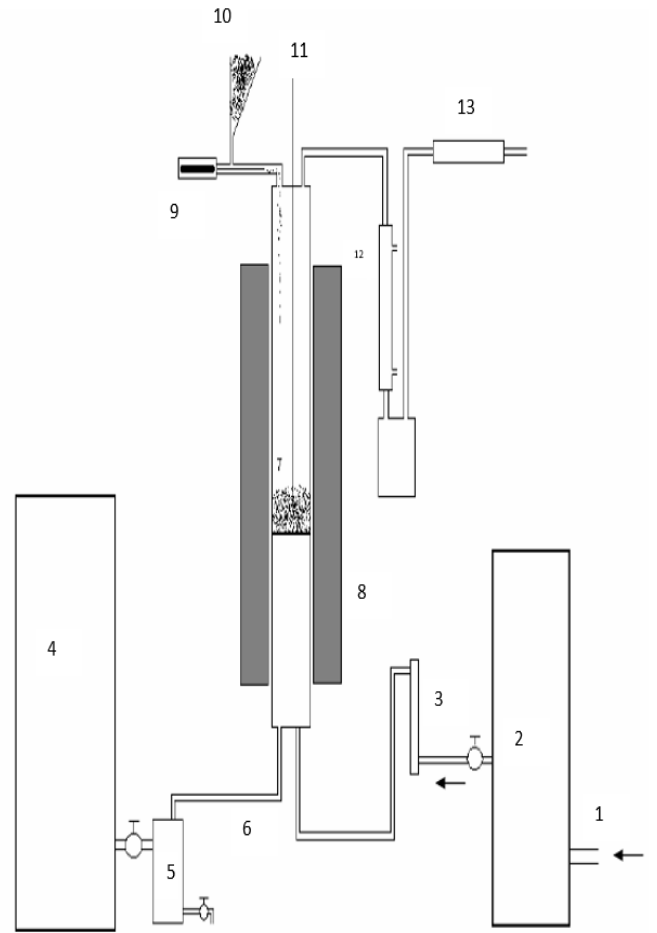
Deneye başlarken yatağın istenen sıcaklığa gelmesi için sıcaklık kontrol cihazı çalıştırılmış ve sıcaklık ayarlanmıştır. Yatağın istenen sıcaklığa gelmesi için beklenirken buhar jeneratörü de çalıştırılarak kazan basıncının artması beklenmiştir. Basıncı artan jeneratörde bypass kolu açılarak akış sağlanmış ve yıkama şişesine gönderilen buharın (birinci hat) akış hızı ayarlanmıştır. Buhar jeneratöründen çıkan ikinci hat ön ısıtıcıya gönderilmiş ve kompresörden gelen havanın ısıtılması sağlanmıştır böylece ilk hattan gelen buhar beslemesinin yatak girişinde yoğunlaşması önlenmiştir.

Isınan hava ve birinci hattan gelen buhar, yan yana yatağın alt bölgesinden beslenmiştir. Yatak istenen sıcaklığa geldiğinde bunkere doldurulan hammadde vidalı besleyici ile üstten beslenmiştir. Elde edilen ürün gazı, yatağın üst kısmından geçip soğutma kolonuna girerek hem soğutulmuş hem de içinde buhar mevcutsa yoğunlaştırılıp tutulmuştur. Soğutucudan geçen gaz, numune şişesine alınmıştır. Gaz analizleri SRI 310 TCD model gaz kromatografisi cihazında gerçekleştirilmiştir. Numune şişesinden 0,5 ml numune şırınga ile çekilip cihaza basılmış, analiz sonuçları kaydedilmiştir. Deneyler her sıcaklık ve her akış hızı için tekrarlanmıştır.

## Yatak Hidrodinamiği

Gazlaştırıcı içinde yatak sıcaklığının homojen tutulması, yatak içi karışımın çok iyi sağlanması ve gaz-katı arasındaki hem kütle hem de ısı transferinin en iyi düzeyde sağlanması adına akışkan yataklarda yatak malzemeleri kullanılmaktadır. Yatak malzemeleri, inert ya da katalitik etkide bulunabildiği gibi tasarlanacak olan yatağın akışkanlaştırma rejimine uygun özelliklere de sahip olmalıdır. İnert yatak malzemelerinden en çok tercih edileni silika kumdur. Silika kum, yapısı gereği gazlaştırma sıcaklık aralığında (500°C-1000°C) bozunmadan yatak içinde kullanılabilmektedir. Ayrıca, Geldart partikül sınıflandırılmasına göre B tipi yatak malzemeleri (100-1000  $\mu\text{m}$ ) çok iyi akışkanlaşırlar. B grubundaki yatak malzemeleri kullanıldığında kabarcıklı yataklardaki kabarcıklar son derece hareketli olup karışımın çok iyi gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, B grubundaki yatak malzemelerine verilebilecek en iyi örnek kum taneleridir. Yapılan çalışmada, yatak malzemesi olarak B grubunda bulunan ve 600  $\mu\text{m}$  çapa sahip silika kum tercih edilmiştir. Diğer bir yandan, kolay akışkanlaştırılabilmesi yatak içinde boş kolon hızının  $U/U_{mf}=2$  olacak şekilde tasarlanmasına olanak vermektedir. Bu tasarım parametresi aynı zamanda yatak içinde kullanılacak hava debisinin minimumda tutulmasını sağlayarak gazlaştırmada reaktant olarak su buharının ön planda olmasına yardımcıdır.

Yapılan çalışmada, yatak malzemesinin akışkanlaşması için hava kullanılmış ve yatak içinde hava debisi 0.0007473  $\text{m}^3/\text{s}$  olarak sabit tutulmuştur. 5, 10 ve 15 g/dak akış hızları için yatak içindeki buhar debileri sırası ile 0,000141  $\text{m}^3/\text{s}$ , 0,000283  $\text{m}^3/\text{s}$  ve 0,000423  $\text{m}^3/\text{s}$ 'dir. Su buharı/hava oranları ise sırasıyla 0,18, 0,37 ve 0,56'dır. Yatak içi boş kolon hızı  $U/U_{mf}=2$  olacak şekilde buhar debisinden bağımsız olarak belirlenmiştir. Buhar debisi ile birlikte yatak içi  $U/U_{mf}$  oranları 5, 10 ve 15 g/dak buhar akış hızları için sırası ile %15, %27 ve %36 olacak şekilde artmaktadır.  $U/U_{mf}$  oranlarındaki bu artış, genel çalışma aralığı kabul edilen ve akışkanlaşma şartlarının sağlandığı uygun akışkanlaşma şartı olan  $U/U_{mf}=2-3$  arasındadır. Tasarlanan akışkan yatağın statik yatak yüksekliği, 0,045 m olarak hesaplanmıştır.



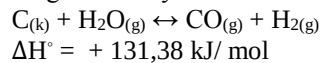
Şekil 1. Akışkan yataklı gazlaştırıcı sistemi şematik görünümü

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Sentez gazı bileşimi temel gazlaştırma reaksiyonlarının denge şartlarına son derece bağlıdır. Gazlaştırıcının işletme şartlarına göre üretilen sentez gazının dengedeki bileşimi değişmektedir (Basu, 2006). Temel gazlaştırma reaksiyonları Eş. 1 ve Eş. 5 arasında sunulmuştur. Karbonun tüketildiği temel reaksiyonlar su gazı Eş. (1) ve Boudouard Eş. (3) reaksiyonlarıdır. Gazlaştırmada  $\text{H}_2$  üretimi temelde su gazı reaksiyonu Eş. (1) ile gerçekleşir. Bunun yanı sıra, su gazı yönlendirme Eş. (2) ve metanın buharla reformlanma reaksiyonu Eş. (5) da gazlaştırıcı akışkan çeşidi ve miktarına göre gerçekleşebilmektedir.

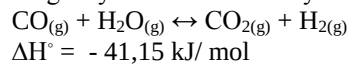
Gazlaştırmada  $\text{CH}_4$  üretimi piroliz sırasında metanlaşma reaksiyonu Eş. (4) ile gerçekleşirken aynı zamanda gazlaştırılan malzemenin çeşidine-yapısına göre de sentez gazındaki miktarı değişiklik gösterebilir (Emami-Taba vd, 2013; Emami-Taba vd, 2012).

Su gazı reaksiyonu



(1)

Su gazı yönlendirme reaksiyonu



(2)

Boudouard reaksiyonu  
 $C_{(k)} + CO_{2(g)} \leftrightarrow 2CO_{(g)}$   
 $\Delta H^\circ = + 172,58 \text{ kJ/mol}$

(3)

Metanlaşma reaksiyonu  
 $C_{(k)} + 2H_{2(g)} \leftrightarrow CH_{4(g)}$   
 $\Delta H^\circ = - 74,90 \text{ kJ/mol}$

(4)

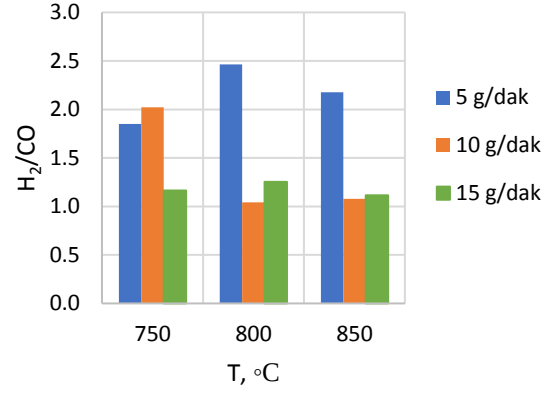
Metanın buharla reformlanması reaksiyonu  
 $CH_{4(g)} + H_2O_{(g)} \leftrightarrow 3H_{2(g)} + CO_{(g)}$   
 $\Delta H^\circ = + 206 \text{ kJ/mol}$

(5)

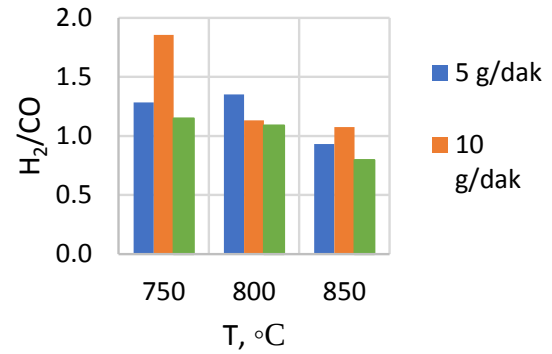
Himmetoğlu ve Seyitömer bitümlü şeylleri, plastik şehir atıkları ile birlikte akışkan yataklı bir gazlaştırıcı sisteminde gazlaştırılmıştır. Çalışmada sıcaklığın, su buharı akış hızının ve beslemedeki plastik atık oranının sentez gazı bileşimine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, gazlaştırıcı işletme sıcaklıkları 750°C, 800°C ve 850°C ve işletme basıncı atmosferik basınçtır. Buhar akış hızı 5, 10 ve 15 g/dak olacak şekilde değiştirilmiştir. Bitümlü şeyller ve plastik atıklar tek başlarına gazlaştırılmış ardından birlikte gazlaştırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Birlikte gazlaştırma deneylerinde beslemedeki plastik atık oranı kütlece %40 ve %70 olacak şekilde ayarlanmıştır.

### H<sub>2</sub> Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi

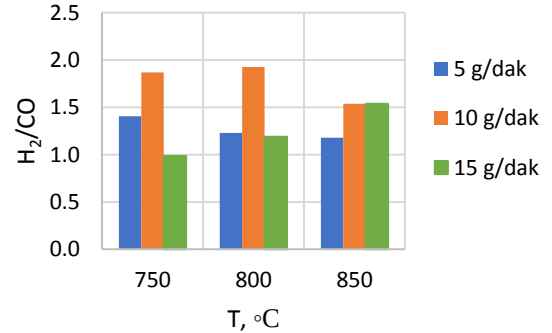
Himmetoğlu bitümlü şeyli ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilen sentez gazı bileşimindeki H<sub>2</sub> konsantrasyonları incelenmiştir. Sentez gazının hidrojen zengin olarak değerlendirilmesi için H<sub>2</sub>/CO oranının 2'ye yakın olması beklenmektedir (Özbayoğlu vd, 2013). Özellikle metanol üretiminde H<sub>2</sub>/CO oranının 2 olması üretim açısından önemlidir (Ciferno and Marano, 2002; Liu vd, 2016; NETL Liquid Fuels, 2021). Himmetoğlu bitümlü şeyli 750°C'de tek başına gazlaştırıldığında 5 g/dak ve 10 g/dak su buharı akış hızındaki H<sub>2</sub>/CO oranları sırası ile 1,9 ve 2 olarak elde edilmiştir. 5 g/dak sabit su buharı akış hızındaki deneylerde 800°C'deki H<sub>2</sub>/CO oranı 2,5 ve 850°C'deki H<sub>2</sub>/CO oranı ise 2,2 olarak belirlenmiştir (Şekil 2). Himmetoğlu şeyli ve plastik atıkların birlikte gazlaştırılmasına bakıldığında yine hidrojen zengin sentez gazı eldesinin mümkün olduğu görülmüştür. Her iki karışımın gazlaştırması için de H<sub>2</sub>/CO oranı, 750°C ve 10 g/dak su buharı akış hızı için 1,9 olarak belirlenmiştir (Şekil 3 ve Şekil 4).



Şekil 2. %100 Himmetoğlu bitümlü şeyli için H<sub>2</sub>/CO oranları



Şekil 3. %60 Himmetoğlu - %40 plastik karışımı için H<sub>2</sub>/CO oranları



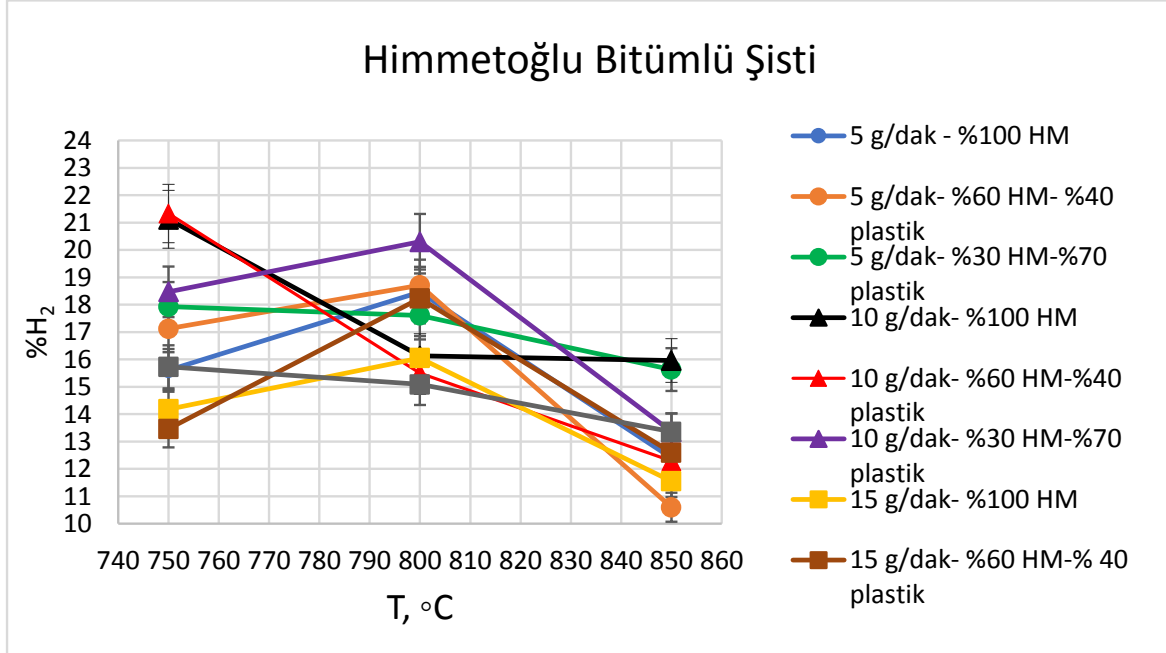
Şekil 4. %30 Himmetoğlu - %70 plastik karışımı için H<sub>2</sub>/CO oranları

800°C'de 10 g/dak akış hızında %30 Himmetoğlu bitümlü şeyli-%70 plastik karışımının gazlaştırılmasında da H<sub>2</sub>/CO oranı 1,9 olarak elde edilmiştir. Ancak, işletme maliyetleri düşünüldüğünde olabildiğince düşük gazlaştırma sıcaklıkları tercih edilmektedir. H<sub>2</sub> üretimi için düşük gazlaştırma sıcaklıklarının daha uygun olduğu yapılan çalışmalarda da vurgulanmıştır (Uysal vd, 2013; Vural vd, 2014; Hammad vd, 2016).

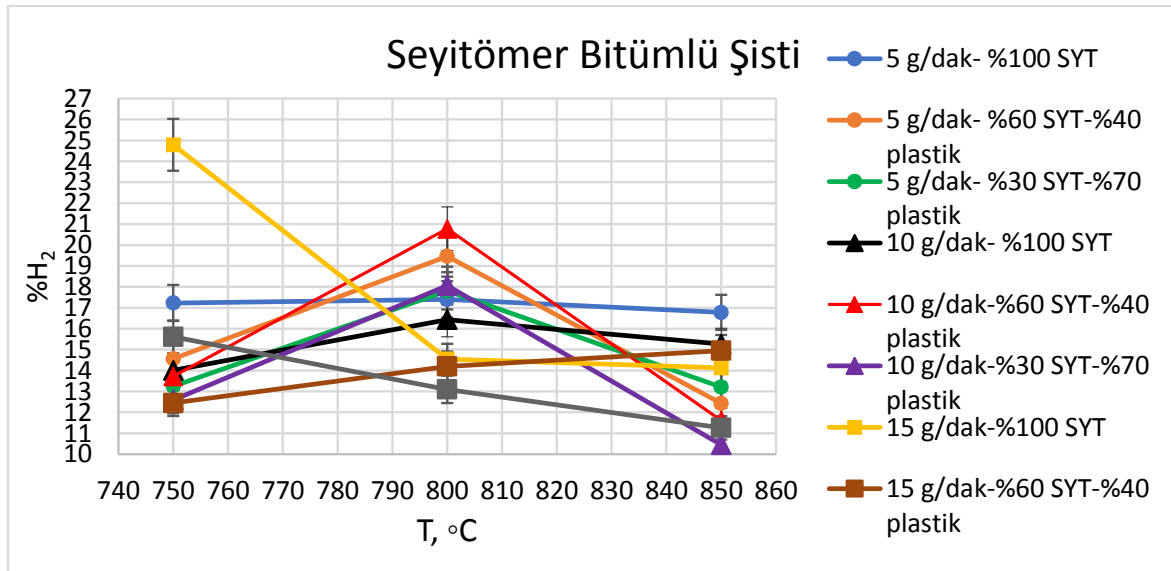
H<sub>2</sub> üretiminde su gazı reaksiyonu aktif rol alırken gazlaştırıcıda su buharı miktarı artırılarak su gazı yönlendirme reaksiyonu sayesinde H<sub>2</sub> konsantrasyonu daha da artırılabilir. Böylece sentez gazındaki CO gazı

da değerlendirilmiş olmaktadır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, gazlaştırıcı akışkan su buharı olduğunda ve beslemede fazla miktarda bulunduğu su gazı yönlendirme reaksiyonunun gerçekleştiği ve H<sub>2</sub> üretimine destek olduğu belirtilmiştir (Kryca vd, 2018; Li vd, 2014; Zhang vd, 2014; Uysal vd, 2013). Himmetoğlu bitümlü şeyli ile yapılan deneylerde hidrojen zengin sentez gazı eldesinde su gazı

yönlendirme reaksiyonunun etkili olduğu ve sahip olduğu sabit karbon oranından dolayı gazlaştırma prosesi ile H<sub>2</sub> üretiminde değerlendirilebileceği belirlenmiştir. Buna göre, en yüksek H<sub>2</sub> konsantrasyonu, %60 Himmetoğlu- %40 plastik atık karışımı için 750°C 'de ve 10 g/dak su buharı akış hızında %21,33 olarak belirlenmiştir (Şekil 5)



Şekil 5. Himmetoğlu bitümlü şeylinin gazlaştırılmasında elde edilen tüm H<sub>2</sub> konsantrasyonları (%5 hata barı ile)

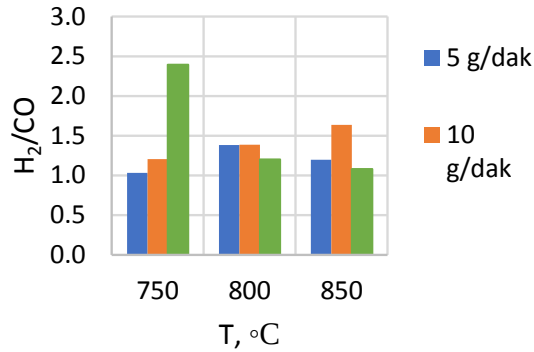


Şekil 6. Seyitömer bitümlü şistin gazlaştırılmasında elde edilen tüm H<sub>2</sub> konsantrasyonları (%5 hata barı ile)

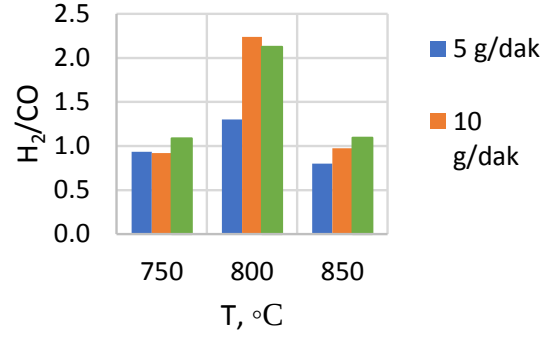
Seyitömer bitümlü şeylinin sabit karbon miktarı Himmetoğlu bitümlü şeylinin sabit karbon miktarından daha düşük olduğundan sentez gazındaki H<sub>2</sub> konsantrasyonları da daha düşüktür (Şekil 6). 750°C'de %100 Seyitömer bitümlü şeyli gazlaştırıldığında H<sub>2</sub> miktarının artması için daha yüksek su buharı akış hızına (15 g/dak) ihtiyaç duyulmuştur (Şekil 7). Seyitömer bitümlü şeyli ve plastik atıkların gazlaştırma sonuçlarına bakıldığında, hidrojen zengin sentez gazı üretimi için

%60 Seyitömer bitümlü şeyli-%40 plastik karışımının 800°C'de 10 g/dak ve 15 g/dak sabit su buharı akış hızlarında gazlaştırılması uygundur. Bu şartlarda elde edilen sentez gazındaki H<sub>2</sub> konsantrasyonları sırasıyla %20,78 ve %14,20 olarak belirlenmiştir. H<sub>2</sub>/CO oranları ise sırasıyla 2,2 ve 2,1'dir (Şekil 8). %30 Seyitömer bitümlü şeyli-%70 plastik atık karışımının H<sub>2</sub>/CO oranlarına bakıldığında hidrojen zengin sentez gazı

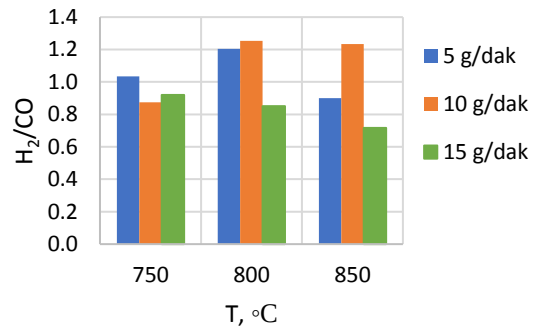
için bu karışım oranının uygun olmadığı görülmüştür (Şekil 9).



**Şekil 7.** %100 Seyitömer bitümlü şeyline ait H<sub>2</sub>/CO oranları



**Şekil 8.** %60 Seyitömer- %40 plastik karışımına ait H<sub>2</sub>/CO oranları



**Şekil 9.** %30 Seyitömer- %70 plastik karışımına ait H<sub>2</sub>/CO oranları

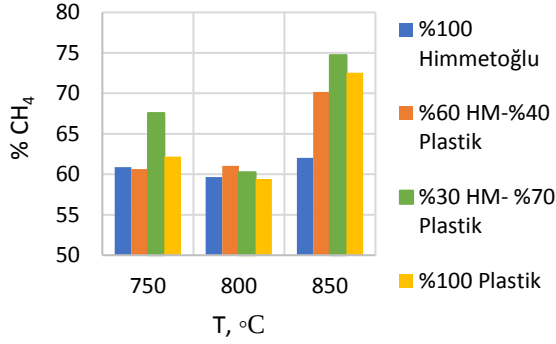
#### CH<sub>4</sub> Konsantrasyonlarının Değerlendirilmesi

Himmetoğlu şeyli ve plastik atık karışımlarındaki plastik oranı arttıkça üretilen sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu da artmıştır. CH<sub>4</sub> konsantrasyonundaki bu davranış literatür çalışmaları ile uyum göstermektedir (Pinto vd, 2009). Birlikte gazlaştırma çalışmalarında elde edilen sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun karışımdaki plastik miktarı ve yapısı ile doğrudan ilişkili olduğu belirtilmiştir (Arena vd, 2014). Gazlaştırma sırasında plastik malzemelerdeki C-H bağları diğer besleme malzemesinden gelen C-H atomları ile daha çok CH<sub>4</sub> oluşturma eğilimi göstermektedir (Lopez vd, 2018). CH<sub>4</sub> konsantrasyonunu artıran bir diğer önemli etmen de gazlaştırıcıda hava bulunmasıdır. Gazlaştırma çalışmalarında su buharı kullanımı sentez gazındaki H<sub>2</sub> konsantrasyonunu desteklerken hava kullanımı ise H<sub>2</sub> üretimini sınırlayarak CH<sub>4</sub>, çeşitli hidrokarbonlar ve yanma ürünlerinin oluşumuna yol açmaktadır (Xiao vd, 2007; Leung and Wang, 2003). Bu nedenle, su buharı/hava oranının üretilcek sentez gazı üzerindeki etkisi önemlidir (Straka ve Bucko, 2009).

Yapılan çalışmada, özellikle 800°C'de H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> konsantrasyonlarının dengedeki davranışı gözlenmiştir. Su gazı reaksiyonu ile H<sub>2</sub> üretimi 750°C'de varlığını gösterirken sıcaklığın artışı ile Boudouard reaksiyonu beslemedeki karbonun daha çok CO üretimi için kullanımına neden olmaktadır (Öztaş vd, 2020; Mastral

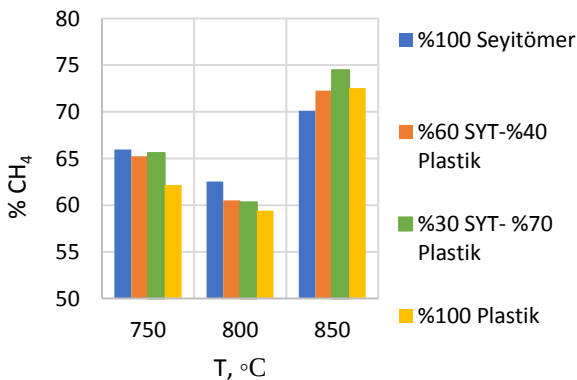
vd, 2003). Gazlaştırıcıda su buharı miktarı da hava ile sınırlandırıldığında su gazı yönlendirme reaksiyonu ile H<sub>2</sub> üretimi desteklenemez ve genellikle konsantrasyonda düşüş gözlenmektedir. Ayrıca, metanlaşma reaksiyonu ile kısa da olsa piroliz aşamalarında oluşan CH<sub>4</sub> ise su buharı yetersizliği sebebiyle metanın reformlanma reaksiyonunda harcanamamaktadır (Wie vd, 2012; Upadhyay vd, 2020; Khzouz ve Gkanas, 2018). Gazlaştırma reaksiyonlarının dengedeki davranışlarının bilinmesi ve üretilmesi planlanan ürün için en uygun koşulların belirlenmesi önemlidir.

Şekil 10 incelendiğinde sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu beslemeye plastik atık ekledikçe artış göstermiştir. Elde edilen sentez gazı motorlarda değerlendirilmek istenirse CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun yüksek olması beklenir. Bu nedenle, Himmetoğlu bitümlü şeyli ve plastik atık karışımı kullanılırsa 850°C'de (10 g/dak sabit su buharı akış hızında) %30 Himmetoğlu bitümlü şeyli-%70 plastik atık karışımının gazlaştırılması uygundur ve bu koşullar altında yapılan deney sonucunda, sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonunun maksimum değerde (%74,71) olduğu görülmüştür.



**Şekil 10.** Himmetoğlu bitümlü şeyline plastik atık eklenmesi sonucu elde edilen CH<sub>4</sub> konsantrasyonları

Seyitömer bitümlü şeyline plastik şehir atığı karıştırıldığında sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonları artmıştır. %30 Seyitömer bitümlü şeyli-%70 plastik karışımı (10 g/dak sabit su buharı akış hızında) 850°C’de gazlaştırıldığında sentez gazındaki maksimum CH<sub>4</sub> konsantrasyonu %74,47 olarak belirlenmiştir (Şekil 11). Plastik oranının artması sonucu sentez gazında CH<sub>4</sub> konsantrasyonunda artış gözlenmesi literatür sonuçları ile uyumlu bulunmuştur. Pinto vd. yaptıkları çalışmada Puertollano ve Colombian kömürleri ile polietileni ve çeşitli biyokütleleri birlikte gazlaştırmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek CH<sub>4</sub> konsantrasyonları, her iki kömür çeşidi ile polietilen birlikte gazlaştırıldığında ve polietilen miktarı arttığında elde edilmiştir (Pinto vd, 2009). Benzer şekilde, Win vd., plastik atıkların gazlaştırılmasında atıkların yapısal bozunma reaksiyonları sonucu CH<sub>4</sub> üretimine yakınlık olduğu belirtilmiştir (Win vd, 2019).



**Şekil 11.** Seyitömer bitümlü şeyline plastik atık eklenmesi sonucu elde edilen CH<sub>4</sub> konsantrasyonları

#### Su buharı/Hava Oranı Etkisinin Değerlendirilmesi

Deney sonuçları incelendiğinde, su buharı/hava oranı arttıkça (buhar akış hızı artırıldığı için yatak içindeki oran) hem HM hem SYT için elde edilen sentez gazı içeriğindeki H<sub>2</sub> konsantrasyonları ya da H<sub>2</sub>/CO oranları için belirli bir davranış elde edilmemiştir. Özellikle,

%100 HM ve %100 SYT gazlaştırma sonuçlarına bakıldığında su buharı/hava oranı artsa da H<sub>2</sub> konsantrasyonunu etkileyen iki önemli parametre gazlaştırma sıcaklığı ve bitümlü şeylin sabit karbon miktarıdır. Şekil 7 incelendiğinde, %100 SYT’nin 750°C’de gazlaştırılmasında yüksek su buharı akış hızına ihtiyaç duyulmuştur. Su buharı akış hızındaki artış H<sub>2</sub>/CO oranını artırsa da bu etki 800°C ve 850°C’lerde gözlenmemiştir. Burada etkili olan parametre yakıtın düşük sabit karbon içeriğidir. Çünkü, sıcaklık ve su buharı akış hızı artsa bile H<sub>2</sub>/CO oranları istenen değerin altında kalmıştır. Aynı şekilde Şekil 8 incelendiğinde, su buharı akış hızı H<sub>2</sub> konsantrasyonunu artırsa da sıcaklık etkisi ön plandadır. Şekil 9’da ise su buharı/hava oranı ve sıcaklık artmasına rağmen yakıt karışımının bileşimi H<sub>2</sub>/CO oranlarını ilk sırada etkileyerek istenen değerin altında kalmasına neden olmuştur. Su buharı/hava oranının sentez gazı konsantrasyonuna etkisinin sıcaklık ve yakıt bileşimi sabit tutularak incelenmesi önerilmektedir.

Su buharı/hava oranının sentez gazı bileşimindeki etkisi CH<sub>4</sub> üretimi için daha sınırlayıcı bir faktör olabilir. Çünkü, sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu bir önceki bölümde de belirtildiği gibi gazlaştırıcı akışkanın içinde hava olması ya da tamamen hava ile gazlaştırma işlemlerinde denge reaksiyonlarına bağlı olarak artış gösterebilmektedir. Sentez gazı içeriğindeki CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> konsantrasyonlarının dengedeki davranışı su buharı/hava oranının optimizasyonu ile belirlenebilir. Sentez gazından CH<sub>4</sub> üretimi amaçlandığında sabit sıcaklık, sabit buhar akış hızı ve sabit yakıt karışımı bileşiminde beslenen hava debisinin CH<sub>4</sub> konsantrasyonuna etkisi incelenebilir.

#### SONUÇLAR

Seyitömer ve Himmetoğlu bitümlü şeylerine plastik şehir atığı karıştırılarak laboratuvar ölçekli akışkan yataklı bir sistemde gazlaştırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığın, su buharı akış hızının ve beslemedeki plastik oranının sentez gazı bileşimine etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda hidrojen zengin sentez gazı üretimi amaçlandığında Himmetoğlu bitümlü şeylinin Seyitömer bitümlü şeyline tercih edilebileceği belirlenmiştir. Her iki bitümlü şey beslemesi için de plastik atık oranı arttıkça sentez gazındaki CH<sub>4</sub> konsantrasyonu artmıştır. Maksimum CH<sub>4</sub> konsantrasyonu eldesi için hem Himmetoğlu bitümlü şeyli hem de Seyitömer bitümlü şeyli tercih edilebilir. Sentez gazı bileşiminin sıcaklığa, su buharı akış hızına ve plastik oranına son derece bağlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, sentez gazının hangi alanda kullanılacağı belirlenerek işletme şartlarının optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ülkemiz için önemli bir fosil yakıt kaynağı olması açısından bitümlü şeylerin gazlaştırma gibi verimli sistemlerde değerlendirilmesi yerli kaynakların kullanımını teşvik edecek niteliktedir.

Yapılan çalışma, Himmetoğlu ve Seyitömer bitümlü şeyllerinin sabit karbon içeriklerinin gazlaştırmada değerlendirmek üzere uygun olup olmadığını belirlemek amacı ile laboratuvar ölçekli akışkan yataklı gazlaştırmada gerçekleştirilmiştir. Büyük ölçekli sistemlere geçildiğinde reaktör boyutları, besleme noktası ve akış dinamikleri vb. gibi parametrelerin HM ve SYT bitümlü şeyllerinden elde edilecek sentez gazı konsantrasyonlarına etkisi gerekli yatak tasarımı hesapları yapılarak gerçekleştirilmelidir. Besleme noktasının uygun konumlandırılması ile yakıt-buhar etkileşiminin maksimum düzeye çıkarılması ve dolayısıyla karbon dönüşümünün maksimum derecede elde edilebilmesi yapılacak çalışmalar ile mümkün olacaktır. Aynı şekilde, farklı akışkanlaşma rejimlerinde çalıştırılan akışkan yatakların kullanımı ile yine gaz-katı etkileşimlerinin incelenmesi önerilmektedir. Yatak özelliklerinin sentez gazı üzerindeki etkilerinin araştırılması akışkan yatakların gazlaştırmada etkin rol oynaması için öncülüdür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 06/2007-26 nolu proje kapsamında yapılmıştır. Ayrıca yazarlar, çalışmalar sırasında desteğini esirgemeyen çok kıymetli Prof. Dr. Bekir Zühtü UYSAL'a teşekkürlerini sunmaktadır.

## REFERANSLAR

Adami L. and Schiavon M., 2021, From circular economy to circular ecology: a review on the solution of environmental problems through circular waste management approaches, *Sustainability*, 13(2), 1-2.

Aguilar-Hernandez G.A., Sigüenza-Sanchez, C.P., Donati F., Merciai S., Schmidt J., Rodrigues J., F., D. Tukker A., 2019, The circularity gap of nations: A multiregional analysis of waste generation, recovery, and stock depletion in 2011. *Resour. Conserv. Recycl.*, 151.

Arena U. and Gregorio F. D., 2014, Energy Generation by Air Gasification of Two Industrial Plastic Wastes in a Pilot Scale Fluidized Bed Reactor, *Energy*, 68, 735-743.

Basu P., 2006, *Combustion and gasification in fluidized bed*, Halifax- Nova Scotia: Taylor and Francis Group, (1. Basım), 59-101.

Basu P., 2010, *Gasification theory and modeling of gasifiers*. New York: Elsevier, (1. Basım), 125-191.

Benim A., C. ve Kuppa K., 2016, Modeling of Entrained-flow coal gasification by an equilibrium Eulerian-Eulerian two-phase flow formulation, *Isı Bilim. Tek. Derg.*, 36(2), 93-102.

Canbaz E., D. ve Gür M. (2020). Prediction of underground coal gasification performance of Turkish lignite reserves using stoichiometric equilibrium model, *Isı Bilim. Tek. Derg.*, 40(2), 195-200.

Chaudhari S., T., Bej S., K., Bakhshi N., N., Dalai A., K., 2001, Steam gasification of biomass-derived char for the production of carbon monoxide-rich synthesis gas, *Energy Fuel*, 15, 736-742.

Ciferno J., P. and Marano J., J., 2002, Benchmarking biomass gasification Technologies for fuels, chemicals and hydrogen production, U.S. Department of Energy-National Energy Technology Laboratory, 14.

Cocco R., Karri S., B., R., and Knowlton T., 2014, Introduction to fluidization. *Chem Eng Prog*, 110(11), 21-29.

Dinçer İ. ve Zamfirescu C., 2014, Advanced Power Generation Systems, *Elsevier*, (1st ed.), USA, 134-141. Du Z., Liu C., Zhai J., Gou X., Xiong Y., Su W. and He G., 2021, A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles, *Catalysts*, 2-17.

Emami Taba L., Irfan M. F., Wan Daud W. A. M., and Chakrabarti M. H., 2012, The effect of temperature on various parameters in coal, biomass and CO-gasification: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 16(8), 5584-5596.

Emami-Taba L., Irfan M. F., Wan Daud W. M. A., and Chakrabarti M. H., 2013, Fuel blending effects on the co-gasification of coal and biomass - A review. *Biomass Bioenerg.*, 57, 249-263.

Geldart D., 1986, *Gas Fluidization Technology*, Great Britain: Wiley-Interscience Publication, (1st ed.), 1-153. Grace J. R., 2020, Introduction, History, and Applications. In *Essentials of Fluidization Technology*, 1-9.

Hamelinck C., N., Faaij A., P., C., den Uil, and Boerrigter, H., 2004, Production of FT transportation fuels from biomass; technical options, process analysis and optimization, and development potential, *Energy*, 29(11), 1743-1771.

Hammad A. E. A., Nadirov E., Uysal D., Doğan Ö. M. ve Uysal, B. Z., 2016, Pirinadan Su Buharı Gazlaştırmayla Sentez Gazı Üretimi, 12. *Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, İzmir.

İnternet, 2021, International Energy Agency (IEA), *Total final consumption by source*, <https://www.iea.org/data-and-statistics>.

İnternet, 2019, Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ), *Temiz Kömür Teknolojileri*, <http://www.tki.gov.tr/bilgi/komur/komurteknolojileri/23> 5.

İnternet, 2021, Australian Hydrogen Council, *About Hydrogen*, <https://h2council.com.au/about-hydrogen>.

İnternet, National Energy Technology Laboratory (NETL), *Fluidized Bed Gasifiers*,

<https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/fluidizedbed>.

Internet, National Energy Technology Laboratory (NETL), *Syngas conversion to methanol*, <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energysystems/gasification/gasifipedia/methanol>.

Jambeck J. R., Geyer R., Wilco, C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., and Law, K.L., 2015, Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347, 768-71.

Khzouz M. and Gkanas E. I., 2018, Experimental and Numerical Study of Low Temperature Methane Steam Reforming for Hydrogen Production, *Catalysts*, 8, 1-20.

Kovac A., Paranos M. and Marcus D., 2021, Hydrogen in energy transition: A review, *Int. J. Hydrog. Energy*, 46, 10016- 10035.

Kryca J., Priscak J., Lojewka J., Kuba M. and Hofbauer H., 2018, Apparent Kinetics of The Water-gas-shift Reaction in Biomass Gasification Using Ash-layered Olivine as Catalyst, *Chem. Eng. J.*, 346, 113-119.

Kunii D. and Levenspiel O., 1991, *Fluidization Engineering*. Butterworth- Heinemann Series in Chemical Engineering (1st ed.), ABD.

Leung D. Y. C. and Wang C. L., 2003, Fluidized-bed Gasification of Waste Tire Powders. *Fuel Process. Technol.*, 84, 175-96.

Li B., Wei L., Yang H., Wang X., and Chen H., 2014, The Enhancing Mechanism of Calcium Oxide on Water Gas Shift Reaction for Hydrogen Production, *Energy*, 68, 248-254.

Liu Z., Peng W., Motahari-Nezhad M., Shahraki S. and Beheshti M., 2016, Circulating fluidized bed gasification of biomass for flexible end-use of syngas: a micro and nano scale study for production of bio-methanol, *J. Clean. Prod.*, 129:249-255.

Lobachyov K., V., Richter H., J., 1998, An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system, *Eng. Convers. Manag.*, 39(16-18), 1931-1943.

Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Alvarez J. Bilbao J. and Olazar M., 2018, Recent Advances in the Gasification of Waste Plastics- A Critical Overview, *Ren. Sust. Energ Rev.*, 82, 576-596.

Mastral F. J., Esperanza E., Berruero C., Juste M., and Ceamanos J., 2003, Fluidized Bed Thermal Degradation Products of HDPE in an Inert Atmosphere and in Air-nitrogen Mixtures. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 70, 1-17.

Moya D., Aldas C., Jaramillo D., Jativa E. and Kaparaju P., 2017, Waste-to-Energy Technologies: an opportunity of energy recovery from municipal solid waste using Quito-Ecuador as case study, *Procedia Eng.*, 134, 327-336.

Özbayoğlu A. M., Kasnakoğlu C., Güngör A., Bıyıkoglu A., ve Uysal, B. Z., 2013, Sentez Gazı Elde Etmek için Kontrol Edilebilir Reaktör Parametrelerine Bağlı Geliştirilen İki Aşamalı Bir Su Gazı Yönlendirme Reaktörü Modeli, *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.*, 28(2), 339-351.

Öztan H., Uysal Zıraman D., Doğan Ö. M. and Uysal B. Z., 2020, Production of Hydrogen-Rich Syngas in a Fluidized Bed, *10<sup>th</sup> Int. 100% Renewable Energy Conference*, İstanbul, 133-142.

Öztürk S., 2020, The effects of CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub> dilutions on pollutants of shale gas combustion, *Isı Bilim. Teknik. Derg.*, 40(1), 15-25.

Pinto F., André R. N., Franco C., Lopes H., Gulyurtlu I., and Cabrita I., 2009, Co-gasification of coal and wastes in a pilot-scale installation 1: Effect of catalysts in syngas treatment to achieve tar abatement. *Fuel*, 88(12), 2392–2402.

Ramos A., Monteiro E., Silva V., and Rouboa A., 2018, Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Ren. Sust. Energ. Rev.*, 81, 380–398.

Straka P. and Bucko Z., 2009, Co-gasification of a Lignite-Waste-Tyre Mixture in a Moving Bed. *Fuel Proces. Technol.*, 90, 1202-6.

Toraman Ö., Y. ve Uçurum M., 2009, Alternatif fosil enerji kaynağı: bitümlü şeyl, *TÜBAV Bilim Dergisi*, 2(1), 37-46. Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu (TKİ), 2010, Kömür sektör raporu (liniyit), *Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu*, Ankara, 1-12.

Upadhyay D. S., Panchal K. R., Skhiya A. K. and Patel R. N., 2020, Air-steam Gasification of Lignite in a Fixed Bed Gasifier: Influence of Steam to Lignite Ratio on Performance of Downdraft Gasifier, *Energy*, 211, 118187.

Uysal D., Doğan Ö., M., ve Uysal B., Z., 2013, Soma Linyitinin Su Buharı Gazlaştırmasıyla Sentez Gazı Üretimi, *ULIBTK'13 19. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Samsun.

Vural E. S., Uysal B. Z., ve Doğan Ö. M., 2014, Soma-Eynez Linyitinden Su Buharı Gazlaştırmasıyla Hidrojen İçeriği Yüksek Sentez Gazı Üretimi, *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, Eskişehir.

Wie J., Zhong W., Jin B., Shao Y. and Liu H., 2012, Simulation on Gasification of Forestry Residues in

Fluidized Beds by Eulerian- Lagrangian Approach. *Bioresour. Technol.*, 121, 36-46.

Win M. M., Asari M., Hayakawa R., Hosada H., Yano J. and Sakai S., 2019, Characteristics of Gas from the Fluidized Bed Gasification of Refuse Paper and Plastic Fuel (RPF) and Wood Biomass, *Waste Manage.*, 87, 178.

Wong S.L., Ngadi N., Abdullah TAT and Inuwa I. M., 2015, Current State and Future Prospects of Plastic Wastes as Source of Fuel: a review, *Ren. Sust. Energ. Rev.*, 50, 1167-80.

Xiao R., Jin ., Zhou H., Zhong Z. and Zhang M., 2007, Air Gasificaion of Polypropylene Plastic Waste in Fluidized Bed Gasifier. *Energ. Convers. Manag.*, 48,778-86.

Zhang Y., Gong X., Zhang B., Liu W. and Xu,M., 2014, Potassium Catalytic Hydrogen Production in Sorption Enhanced Gasification of Biomass With Steam, *Int. J. Hydrog. Energ.*, 39, 4234-42.