

Biyokütle Yakan Dolaşımli Akışkan Yataklı Yakıcıların İki Boyutlu Modellenmesi

Afşin GÜNGÖR

Ar. Gör. Dr., İTÜ Makina Fakültesi

ÖZET

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesinde, mevcut yanma teknolojileri arasında en etkili ve uygun olanı akışkan yatak teknolojisidir. Buradan hareketle bu çalışmada, biyokütle yakan bir dolaşımli akışkan yataklı yakıcı için hidrodinamik, ısı geçişi ve yanmayı bir bütün olarak dikkate alan ve eş zamanlı olarak tahmin eden 2 boyutlu bir model geliştirilmiştir. Model sonuçları literatürde yayınlanmış ve farklı tipte biyokütle yakıtlar kullanan, küçük ve büyük ölçekli biyokütle yakıcılarının deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Biyokütle, dolaşımli akışkan yatak, sayısal model

ABSTRACT

The fluidized bed technology is the most efficient and suitable for converting biomass into energy among the proven combustion technologies. From this point of view, in this study, a 2D model for a circulating fluidized bed biomass combustor has been developed which integrates and simultaneously predicts the hydrodynamics, heat transfer and combustion aspects. The model results are compared with and validated against experimental data both for small-size and industrial-size biomass combustors which uses different types of biomass fuels given in the literature.

Keywords: Biomass, circulating fluidized bed, numerical model

GİRİŞ

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesi ile ilgili gerek yurt içinde, gerekse yurt dışında pek çok bilimsel çalışma yapılmaktadır. Biyokütle yakıtlar; yakma sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilirler gibi gazlaştırma ve piroliz gibi ısıl kimyasal dönüşümleri ile de enerjiye dönüştürülerek kullanılabilirler [1, 2].

Kömürden ve diğer katı yakıtlar ile atıklardan, temiz enerji üretimi amacıyla yapılan Ar-Ge çalışmaları sonucu ortaya konulan ve uygulamaya aktarılan bir teknoloji, akışkan yatak teknolojisidir. Özellikle düşük kaliteli yakıtların yüksek verimlilikle değerlendirilmesi ve uluslararası çevre standartlarında verilen emisyon seviyelerine uygun yakılabilmesi açısından akışkan yatak teknolojisi gün geçtikçe önem kazanmaktadır.

Dolaşımli akışkan yataklı yakıcı (DAYY)lar, akışkan yatak teknolojisinde en geliştirilmiş tip yakıcılar olup, diğer katı yakıtlı kazanlara göre yakıt esnekliği, yüksek yanma verimi ve düşük baca gazı emisyonları gibi avantajlara sahiptir. Literatürde biyokütlenin DAYY'larda yanması ile ilgili geniş gözden geçirme çalışmaları mevcuttur [3-5]. Bu çalışmalarda, DAYY'ların biyokütlenin yakılmasında en etkili seçenek olduğu vurgulanmaktadır.

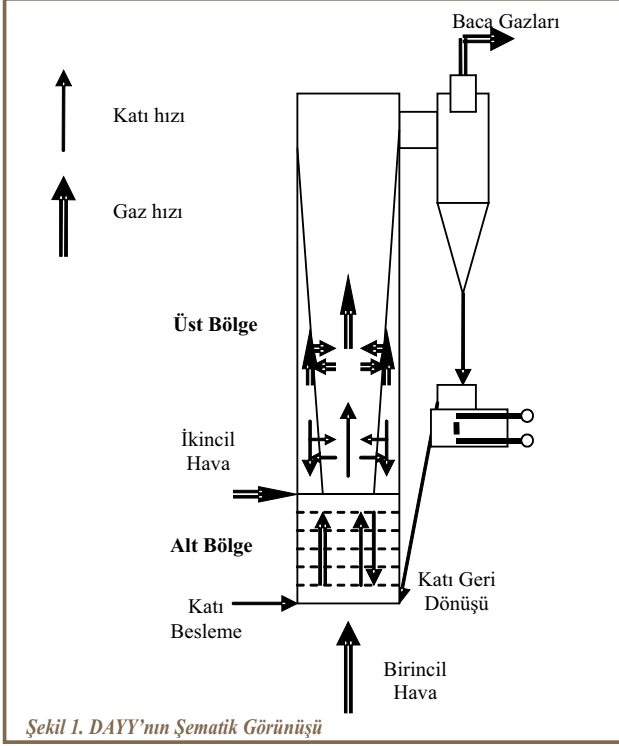
DAYY'ların dizaynı; biyokütlenin yüksek bir verimle yakılması ve baca gazı emisyonlarının kabul edilebilir seviyelerde tutulması için oldukça önemlidir. Bununla beraber,

DAYY'ların optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespitinde, gerçek boyuttaki yakıcılarla çalışmanın gerek zaman ve ekonomiklik, gerekse uygulama açısından pratik olmayacağı açıktır. Bu nedenle, geliştirilen bir model ile, DAYY'larında etkin olan tasarım ve işletme parametrelerinin tespiti ve sistemin optimum çalışmasını sağlayacak gerekli parametrelerin belirlenmesi, mümkün olacaktır. Bu amaçla, bu çalışmada biyokütle yakan DAYY'lar için dinamik iki boyutlu bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model; hidrodinamik, ısı geçişi ve yanmayı bir bütün olarak dikkate alarak, eş zamanlı olarak çözmekte ve gaz ve katı fazı için radyal ve aksel yönde boşluk oranı, hız, sıcaklık, tane çap dağılımı, basınç düşüşü ve gaz emisyonlarını her bir zaman adımı için hesap edebilmektedir. Model sonuçları, yakıt olarak zeytin küspesi kullanan 0.125 m çapında ve 1.8 m yüksekliğinde olan ve yakıt olarak pirinç kabuğu kullanan 0.2 m x 0.2 m kesit alanına sahip, 6 m yüksekliğindeki, 1 MW'lık iki adet küçük ölçekli DAYY ve yakıt olarak odun kullanan 1.6 m x 1.6 m kesit alanına sahip, 14 m yüksekliğindeki, 12 MW'lık büyük ölçekli bir DAYY'dan elde edilen test verileri ile karşılaştırılmış ve modelin geçerliliği kanıtlanmıştır [6-8].

MODEL

Akışkan yataklı yakıcılar, yakıt/kömür taneciklerinin hava ile akışkanlaştırılmış katı taneciklerin bulunduğu bir ortamda yakıldığı sistemlerdir. Akışkanlaştırma, delikli bir plaka üzerinde bulunan tanecikler arasından hava geçirilerek sağlanır. Yaklaşık %99'u yatak malzemesi, %1'i yakıtın oluşan akışkan yatak; yatak malzemesinin yüksek ısı

kapasitesi nedeniyle büyük bir ısı deposu, yüksek türbülans etkisi ile tutuşma stabilizörü, yakıt taneciklerinin yatakta kalma süresini arttırarak kok filtresi vb. işlevleri görmekte, bu da her türlü düşük kaliteli yakıtın verimli yanmasını sağlamaktadır. Akışkan yataklarda; turba, linyit, taşkömürü, kömür madenciliği atıkları, kent çöpleri, ağır yağlar ve biyokütle gibi katı yakıtlar kullanılabilir. DAYY'nın şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DAYY'nın Şematik Görünüşü

Gaz-katı iki-fazlı akışının oldukça karmaşık olması, homojen ve heterojen katalitik gaz fazı reaksiyonları barındırması, yanma, emisyon oluşumu ve indirgenmesi olaylarının tam olarak bilinmemesi nedeniyle DAYY'ların modellenmesi oldukça zordur.

Hidrodinamik Model

Dolaşımli akışkan yataklarda katı tanecikler, yataktan tek bir taneciğin taşınmasını sağlayacak gaz hızlarının biraz altında çalışırlar. Bu nedenle havalı taşıma sistemlerinde olduğu gibi tanecikler yataktan hemen dışarı atılamazlar. Tam tersine, yatak içinde farklı çaptaki tanecikler yukarı ve/veya aşağı hareket ederek bir araya gelirler, topaklar oluştururlar ve büyük oranda geri dönüşümü sağlarlar. Bu uzun parçalar halindeki katı tanecik kümeleri yukarı, aşağı ve yatay yönde hareketleri sırasında da parçaları tekrar birleşir ve sürekli bir hareketlilik sağlarlar. Dolaşımli akışkan yatakların akış yapısının aksel düzensizlikler gösterdiği bilinmektedir. Genelde hızlı akışkanlaşma (fast-fludization) rejiminde çalışan dolaşımli akışkan yataklarda, yatağın alt kısımlarında yoğun fazlı, üst kısımlarında ise seyrek fazlı bir bölge bulunmaktadır. Yoğun fazlı bölge türbülanslı yatak karakteri göstermekte, seyrek

bölge ise çeperlerde merkeze göre katı madde açısından daha yoğun olan ince bir bölge ile çevrilmiştir.

Dolaşımli akışkan yatakların sahip olduğu bu özel hidrodinamik yapının iyi anlaşılması, bu yatakların tasarım ve etkenliğini arttırmakta önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, yatak içerisindeki gaz-katı akış yapısını doğru bir şekilde tahmin edebilecek modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Geliştirilecek iyi bir hidrodinamik model ile yatak içerisinde; gaz ve katılar için boşluk oranı, konuma bağlı gaz ve katı hızları, katı kütle akışı ve yatak basıncının aksel ve radyal yöndeki dağılımlarının bilinmesi, DAYY'lar için optimum tasarım ve işletme parametrelerinin tespit edilmesini sağlayacaktır.

Geliştirilen hidrodinamik modelde, alt bölge türbülanslı akış rejiminde olan kabarcıklı akışkan yatak olarak ele alınmış ve ayrılmış akış modeline göre modellenmiştir. Dağıtıcı elekten ikincil hava girişine kadar olan alt bölgede akış:

- Hareketli katı tanecikleri içeren yoğun faz ve kabarcık faz olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Yoğun fazda minimum akışkanlaşma hızında olan gaz hızı, kabarcık fazında yatak işletme hızı ile minimum akışkanlaşma hızı farkı kadar bir hıza sahiptir.
- Kabarcık yükselme hızı, kabarcık büyüklüğü, kabarcık ve yoğun faz boşluk oranı, Horio [9]'da verilen kabarcıklı yatak modelindeki ifadelerin yüksek gaz hızlarına uyarlanmış hali sirkülasyonlu akışkan yatak modelinde kullanılmıştır.
- Kabarcık faz ve yoğun faz arasındaki katı madde geçişi, yatakta aksel olarak değişim gösteren kabarcık çapının fonksiyonu olarak ve konsantrasyon farkına göre dikkate alınmıştır.
- Katı madde hareketinin incelenmesinde geri dönüşlü karışma modeli gözönüne alınmıştır.
- Alt bölgede dikey doğrultuda; gaz hareketinin, seyrek faz ve yoğun fazın her ikisinde de yukarı doğru olduğu kabul edilmiş ve gazın geri dönüşü ihmal edilmiştir.
- Alt bölgede katı hareketi seyrek fazda yukarı, yoğun fazda ise aşağı doğru alınmıştır.
- Siklondan gelen kütle besleme ile birlikte yatağa girdiği kabul edilmiştir.
- Taneciklerin küresel olduğu kabul edilmiş, ısı ve mekanik ufanmaları ve çap dağılımı gözönüne alınmıştır.

Yatak minimum akışkanlaşma hızı U_{ma} ; tanecik çapı, yatak boşluk oranı, katı ve gaz yoğunlukları ve gaz viskozitesi cinsinden çeşitli korelasyonlarla hesaplanabilmektedir. Modelde minimum akışkanlaşma hızı Wen ve Yu [10] tarafından aşağıda verilen ifade ile hesap edilmektedir:

$$U_{ma} = \frac{\mu}{\rho_g d_p} \left[\left(33,7^2 + 0,0651Ar \right)^{0,8} - 33,7 \right] \quad (1)$$

Burada Ar , Arşimed sayısıdır ($Ar = d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu^2$).

U_B ; tek bir kabarcığın ortalama hızı olmak üzere, modelde türbülanslı akış rejimi durumunda kabarcık boşluk oranı aşağıdaki bağıntılar ile hesap edilebilmektedir [9]:

$$\epsilon_b = \frac{\dot{V}_b}{U_B} \quad (2)$$

$$\psi = 1,45 Ar^{-0.18}$$

$$\dot{V}_b = \psi (U_0 - U_{ma}) \quad (10^2 < Ar < 10^4) \quad (3)$$

Üst bölge için halkasal akış yapısı kullanılmıştır. Yatak yüksekliğinin büyük bir kısmı, yukarı doğru hareket eden seyrek faz ve onu çevreleyen ve aşağı doğru hareket eden tane kümelerinin bulunduğu yoğun fazdan oluşan karşı akışlı bu bölge ile kaplanmaktadır. Farklı ölçekli yatakların kullanıldığı deneysel verilerle göstermiş olduğu uyum dikkate alınarak, modelde üst bölgede herhangi bir h yatak yüksekliğinde yoğun fazın kalınlığı, δ için Werther ve Wein [11] tarafından önerilen aşağıdaki ifade kullanılmıştır.

$$\frac{\delta}{D} = 0,55 Re^{-0.22} \left(\frac{H}{D} \right)^{0.21} \left(\frac{H-h}{H} \right)^{0.73} \quad (4)$$

Geliştirilen modelde yatak içerisindeki basınç dağılımının, katı ve gaz hızlarının, boşluk oranlarının, sıcaklıklarının ve katı kütle akılarının eksenel ve radyal yöndeki dağılımları dikkate alınmış olup, hidrodinamik model detayları literatürde mevcuttur [12].

Kinetik Model

Modelde; yatağa beslenen biyokütle taneciklerinin yatak içerisinde ani sıcaklık değişimi ile parçalanması,

biyokütlenin uçucularına ayrılması, yanma kinetiği, dolaşımli akışkan yataklarda biyokütle yanması, emisyonların oluşum reaksiyonları ve emisyonların indirgenmesi kinetik model bünyesinde ele alınmıştır.

Modelde, uçucu maddelerin alt bölgede açığa çıktığı ve yatak içindeki dağılımının katı madde karışımına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Modelde, biyokütle yanması heterojen olup, tanecik yüzeyinde yanmanın difüzyon ve kinetik kontrollü gerçekleştiği, biyokütlenin önce uçucularına ayrıldığı, bunu takiben uçucu ve kokun yanması kabul edilmiştir. Biyokütlenin uçucularına ayrılması ile açığa çıkan maddelerin hacimsel oranları aşağıdaki bağıntılardan hesap edilmiştir [13]:

$$[CO] = 120.72 - 0.1183T + (5.0 \times 10^{-5})T^2 \quad (5)$$

$$[CO_2] = 140.51 - 0.1991T + (7.0 \times 10^{-5})T^2 \quad (6)$$

$$[H_2] = -74.44 + 0.1467T - (5.0 \times 10^{-5})T^2 \quad (7)$$

$$[CH_4] = -49.345 + 0.1026T - (4.0 \times 10^{-5})T^2 \quad (8)$$

$$[C_m H_n] = -37.401 + 0.068T - (3.0 \times 10^{-5})T^2 \quad (9)$$

Yatak içine beslenen biyokütle, uçucularına ayrıldıktan sonra geriye gözenekli yapıda kok kalır. Kokun yanma modelinde, tanelerin kimyasal ve kinetik kontrollü olarak yandığı, meydana gelen külün yatak malzemesine karıştığı ve tane çapının sabit kalmayarak giderek küçüldüğü bir tanecik modeli gözönüne alınmıştır [10]. Modelde dikkate alınan yanma reaksiyonları ve reaksiyon sabitleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modelde Kullanılan Reaksiyonlar ve Reaksiyon Sabitleri

Reaksiyon	Reaksiyon Hızı	
$C + \frac{1}{\Phi} O_2 \rightarrow \left(2 - \frac{2}{\Phi}\right) CO + \left(\frac{2}{\Phi} - 1\right) CO_2$	$R_c = \pi d_c^2 k_c C_{O_2} \left(\frac{mol}{m^2 s}\right)$ $k_c = \frac{R_u T / M_c}{1 + \frac{1}{k_{cr}} + \frac{1}{k_{cd}}} \left(\frac{kg}{s}\right)$	$k_c = 8710 \cdot \exp\left(\frac{-1,4947 \cdot 10^8}{R_u \cdot T}\right) \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot kPa}\right)$ $k_{cd} = \frac{12 \cdot Sh \cdot \Phi \cdot D_g}{d_p \cdot R_g \cdot T} \left(\frac{kg}{m^2 \cdot s \cdot kPa}\right)$ [17]
	$Sh = \frac{k_c d_p}{D_g} = 2\varepsilon + 0.69 \left(\frac{Re_p}{\varepsilon}\right)^{1/2} Sc^{1/3}$ [18, 19]	
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	$R_{CO} = 3 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-6.699 \cdot 10^7}{R_u T}\right) y_{CO}^{0.5} y_{O_2}^{1.5} \frac{17.5 \cdot y_{O_2}}{1 + 24 \cdot y_{O_2}} \left(\frac{P}{R_u T}\right)^{1.8} \left(\frac{mol}{cm^2 s}\right)$ [20]	
$CO_2 + C \rightarrow 2CO$	$R_{CO_2 C} = N \pi d_p^2 k_{CO_2} \left(\frac{mol}{s}\right)$ [21, 22]	$k = 4.1 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-29787}{T}\right)$
$C_2H_6 + \frac{5}{2} O_2 \rightarrow 2CO + 3H_2O$	$R_{O_2} = \frac{dC_{O_2}}{dt} = -k C_{C_2H_6} C_{O_2} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [23]	$k = 2.67 \cdot 10^8 T^{-0.5} \exp\left(\frac{-20131}{T}\right)$
$CH_4 + \frac{3}{2} O_2 \rightarrow CO + H_2O$	$R_{CH_4} = k C_{O_2}^{0.8} C_{CH_4}^{0.7} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [24]	$k = 1.585 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-24157}{T}\right)$
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$	$R_{H_2} = k C_{O_2} C_{H_2}^{1.5} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [24]	$k = 1.63 \cdot 10^9 T^{1.5} \exp\left(\frac{-3420}{T}\right)$
$HCN + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CNO$	$R_{HCN} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [24]	$k = 2.14 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$CNO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO + CO$	$R_{CNO-O_2} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{k_1}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [24]	$\frac{k_2}{k_1} = 1.02 \cdot 10^9 \exp\left(\frac{-25460}{T}\right)$
$CNO + NO \rightarrow N_2O + CO$	$R_{CNO-NO} = k C_{O_2} C_{HCN} \left(\frac{k_2 C_{NO}}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [24]	$k = 2.14 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$Kok - N + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow -CNO$ $-CNO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow NO + CO_2$ $-CNO + NO \rightarrow N_2O + CO_2$	$R_{NO} = \frac{dC_{NO}}{dt} = -\frac{C_N}{C_c} R_c \left(\frac{k_1 - k_2 C_{NO}}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$ [25] $R_{N_2O} = \frac{dC_{N_2O}}{dt} = -\frac{C_N}{C_c} R_c \left(\frac{k_2 C_{NO}}{k_1 + k_2 C_{NO}}\right) \left(\frac{mol}{m^3 s}\right)$	$\frac{k_2}{k_1} = 9.0 \cdot 10^2 \exp\left(\frac{-3551}{T}\right)$

Tablo 2. Modelde Kullanılan Reaksiyonlar ve Reaksiyon Sabitleri

Reaksiyon	Reaksiyon Hızı	
$N_2O \rightarrow N_2 + \frac{1}{2}O_2$	$R_{N_2O} = \varepsilon_{kok} \rho_{kok} k C_{N_2O} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [26]	$k = \frac{43.5}{d_p^{0.74}} \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$N_2O \rightarrow N_2 + \frac{1}{2}O_2$	$R_{N_2O} = \varepsilon_{katı} \rho_{katı} k C_{N_2O} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [27]	$k = 1.7 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-22150}{T}\right)$
$N_2O + C \rightarrow N_2 + CO$	$R_{N_2OC} = k N \pi d_c^2 C_{N_2O} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$ [28]	$k = 2.9 \cdot 10^9 \exp\left(\frac{-16983}{T}\right)$
$N_2O + CO \rightarrow N_2 + CO_2$	$R_{N_2O-CO} = k C_{N_2O} C_{CO} \left(\frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [28]	$k = 5.01 \cdot 10^{13} \exp\left(\frac{-4.40 \cdot 10^4}{R_u T}\right)$
$N_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow N_2 + O_2$	$R_{N_2O-O_2} = k C_{N_2O} C_{O_2} \left(\frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [28]	$k = 1.00 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-2.80 \cdot 10^4}{R_u T}\right)$
$NO + C \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO$	$R_{NOC} = k N \pi d_c^2 C_{NO} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$ [24]	$k = 5.85 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-12000}{T}\right)$
$NO + \frac{1}{2}C \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{1}{2}CO_2$	$R_{2NOC} = k N \pi d_c^2 C_{NO} \left(\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right)$ [29]	$k = 1.3 \cdot 10^5 \exp\left(\frac{-17111}{T}\right)$
$NO + CO \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO_2$	$R_{NOCO} = KT \frac{(k_1 C_{NO} (k_2 C_{CO} + k_3))}{(k_1 C_{NO} + k_2 C_{CO} + k_3)} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [24]	$KT = 1.952 \cdot 10^{10} \exp\left(\frac{-19000}{T}\right)$ $k_1 = 0.1826$, $k_2 = 0.00786$ $k_3 = 0.002531$
$NH_3 + \frac{5}{4}O_2 \rightarrow NO + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3,NO} = k C_{NH_3} C_{O_2} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [24]	$k = 2.73 \cdot 10^{14} \exp\left(\frac{-38160}{T}\right)$
$NH_3 + \frac{5}{4}O_2 \rightarrow NO + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3,NO} = \varepsilon_{char} k C_{NH_3} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [26]	$k = 1.09 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$NH_3 + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3,N_2} = \frac{k C_{NH_3} C_{O_2}}{C_{O_2} + k'} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [24]	$k = 3.38 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$ $k' = 0.054$
$NH_3 + \frac{3}{4}O_2 \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NH_3,N_2} = \varepsilon_{char} k C_{NH_3} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [30]	$k = 9.83 \cdot 10^6 \exp\left(\frac{-10000}{T}\right)$
$NO + NH_3 + \frac{1}{4}O_2 \rightarrow N_2 + \frac{3}{2}H_2O$	$R_{NONH_3} = k \sqrt{C_{O_2}} \sqrt{C_{NH_3}} \sqrt{C_{NO}} \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right)$ [31]	$k = 1.07 \cdot 10^{12} \exp\left(\frac{-29400}{T}\right)$

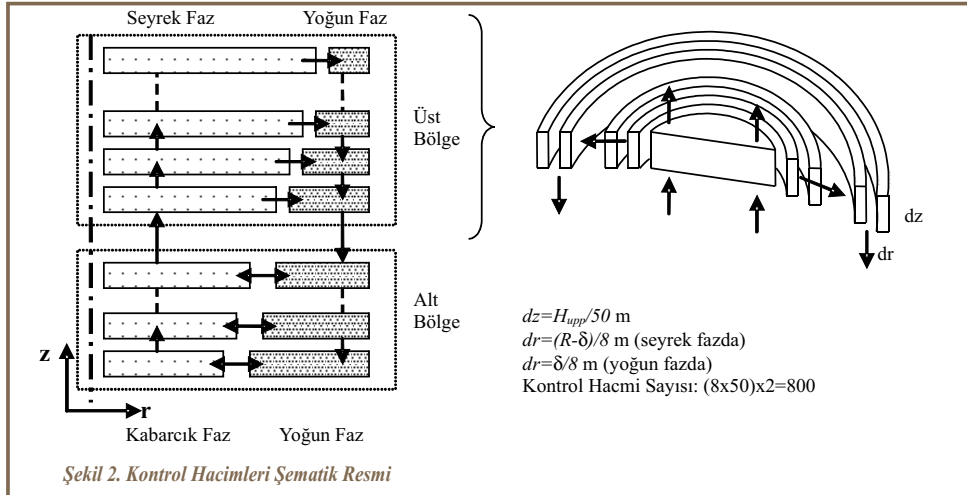
DAYY'lar 800-900 °C gibi düşük işletme sıcaklıklarına sahip olduklarından, besleme havası içerisindeki azot ısıl olarak azotoksit dönüşmesine de yakıt azotu kok taneciğinin yanması esnasında açığa çıkan yüksek ısı nedeniyle ısıl olarak azotoksit dönüşmektedir. Yatak sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, birincil havanın ikincil havaya oranı gibi işletme şartları ve yakıt bünyesindeki uçucu madde miktarı, yakıt içerisindeki azot miktarı gibi yakıt özellikleri akışkan yataklardaki azotoksit emisyonlarının oluşumunu etkilemektedir. Modelde dikkate alınan reaksiyonlar ve reaksiyon sabitleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir.

Dolaşım akışkan yataklı yakıcılarda yanma sonucu açığa çıkan enerji, ısı geçiş yüzeyleri ile soğutucu akışkana aktarılarak kullanılmaktadır. Modelde yanma sonucu açığa çıkan enerjinin ısı geçiş yüzeyleri ile soğutucu akışkana aktarılması sağlanan ısı geçiş mekanizması, literatürde geniş bir kabul gören ve yaygın olarak kullanılan

yenilenen tanecik modeli ile dikkate alınmıştır. Isı geçiş hesaplarında taneciklerden ısı geçiş yüzeylerine iletim ve radyasyonla ısı geçişi olduğu, gazlardan ısı geçiş yüzeylerine ise taşınım ve radyasyonla ısı geçişi olduğu kabul edilmiştir. Isı geçiş modeli ile ilgili detaylar literatürde mevcuttur [10-12].

ÇÖZÜM METODU

Yatak için geliştirilen denklemler, öncelikle ayrıklaştırma metodu kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Denklemlerin ayrıklaştırılması işleminde, geriye-ayrıklaştırma metodu kullanılmıştır. Denklemler ayrıklandıktan sonra model sonuçlarının elde edilmesinde; süreklilik ve momentum denklemlerinin sayısal çözümü için iteratif Gauss-Seidel metodu, enerji denkleminin sayısal çözümü için iteratif Newton-Raphson metodu ve F90 Fortran Programlama dili kullanılmıştır. Modelde kullanılan kontrol hacimlerinin şematik resmi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Kontrol Hacimleri Şematik Resmi

Tablo 3. Gaz Fazına Ait Süreklilik Momentum ve Enerji Denklemleri

Süreklilik Denklemi	
$\frac{\partial(C\varepsilon)_j}{\partial t} + \frac{\partial(Cu\varepsilon)_j}{\partial r} + \frac{\partial(Cu\varepsilon)_j}{\partial z} = 0$	
$(j = O_2, CO, CO_2, NO, N_2O, N_2, HCN, CNO, NH_3, H_2O, SO_2, CH_4)$	
Momentum Denklemi	
$\frac{\partial(Cu\varepsilon_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Cu\varepsilon_i u)}{\partial r} = -\frac{\partial(\tau_{rr}\varepsilon_i)}{\partial r} - \frac{\partial(\tau_{rz}\varepsilon_i)}{\partial z} - \beta(u-v)$	
$\frac{\partial(Cu\varepsilon_i)}{\partial t} + \frac{\partial(Cu\varepsilon_i u)}{\partial z} = -\frac{\partial(\tau_{zz}\varepsilon_i)}{\partial z} - \frac{\partial(\tau_{zr}\varepsilon_i)}{\partial r} - \beta(u-v)$	
İdeal gaz eşitliği	
$\tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$	$C = \frac{1}{R_u T}$
$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)$	
$\tau_{rz} = \tau_{zr} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)$	
Gaz-katı sürtünme katsayısı	
$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{C\varepsilon_i (1-\varepsilon_i)}{\varepsilon_i^{2.65}} \frac{1}{d_p} u-v $	
$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad Re_p < 1000$	
$C_D = 0.44 \quad Re_p \geq 1000$	
Enerji Denklemi	
$C\varepsilon_i c_p \frac{\partial T}{\partial t} - u C\varepsilon_i c_p \frac{\partial T}{\partial r} - u C\varepsilon_i c_p \frac{\partial T}{\partial z}$	
$+ \rho_p \varepsilon_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} - u \rho_p \varepsilon_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial r} - u \rho_p \varepsilon_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial z}$	
$= R'' - \dot{Q}_{su} + \mu \varepsilon_i \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\}$	
$+ \mu_p \varepsilon_i \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}$	

Modelde gaz ve katılar için geliştirilen süreklilik ve momentum denklemleri ile bünye denklemleri Tablo 3'de verilmiştir. Modelde zaman adımı 1×10^{-12} s alınmıştır. Çözüm metodunun detayları literatürde mevcuttur [10].

SONUÇLAR VE İRDELEME

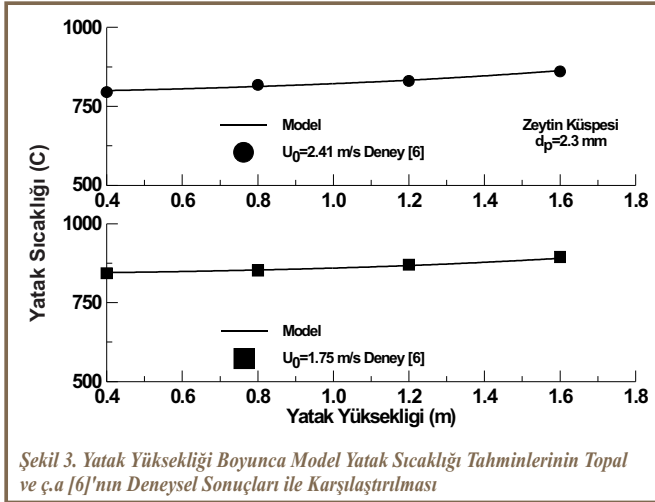
Model sonuçları öncelikle, yakıt olarak zeytin küspesi kullanan 0.125 m çapında ve 1.8 m yüksekliğinde olan ve yakıt olarak pirinç kabuğu kullanan 0.2 m x 0.2 m kesit alanına sahip, 6 m yüksekliğindeki, 1 MW'lık iki adet küçük ölçekli DAYY ve yakıt olarak odun kullanan 1.6 m x 1.6 m kesit alanına sahip, 14 m yüksekliğindeki, 12 MW'lık büyük ölçekli bir DAYY'dan elde edilen test verileri ile karşılaştırılmıştır [6-8].

Tablo 4. Biyokütle Yakıtların Analiz Sonuçları (Kütle %)

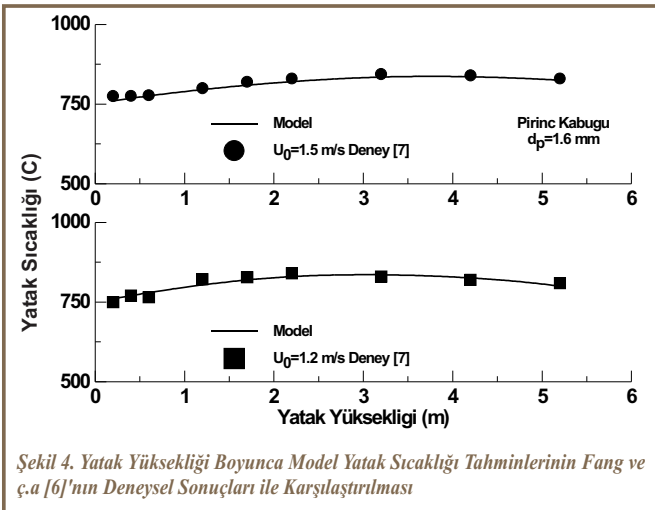
	Zeytin Küspesi	Pirinç Kabuğu	Odun (Kuru)
Kısmi Analiz			
Nem	6.53	6.00	10.1
Kül	9.01	16.92	0.9
Uçucu Mad.	68.82	51.98	78
Sabit karbon	15.64	25.10	22
Elementer Analiz			
Karbon	46.80	37.600	50.7
Hidrojen	6.07	4.888	5.9
Kükürt	0.12	0.094	0.04
Nitrojen	0.68	1.888	0.2
Oksijen	36.69	32.610	43.1

Bu karşılaştırma kapsamında, yatak yüksekliği boyunca yatak sıcaklığı, CO ve NO_x emisyonlarının değişimleri mukayese edilmiştir. Kullanılan biyokütle yakıtların özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Şekil 3 ve 4'de yatak yüksekliği boyunca model yatak sıcaklığı tahminlerinin farklı yatak işletme hızlarına göre deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Yatak sıcaklığının yatak yüksekliği boyunca artan bir eğim göstermesi, biyokütle yakıtlarda uçucu madde oranının çok yüksek olması ve uçucu madde yanmasının yatağın üst bölgelerinde de devam etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durum özellikle yatak yüksekliğinin çok daha küçük olduğu Topal ve ç.a. [6]'nın deneylerinde daha açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3).

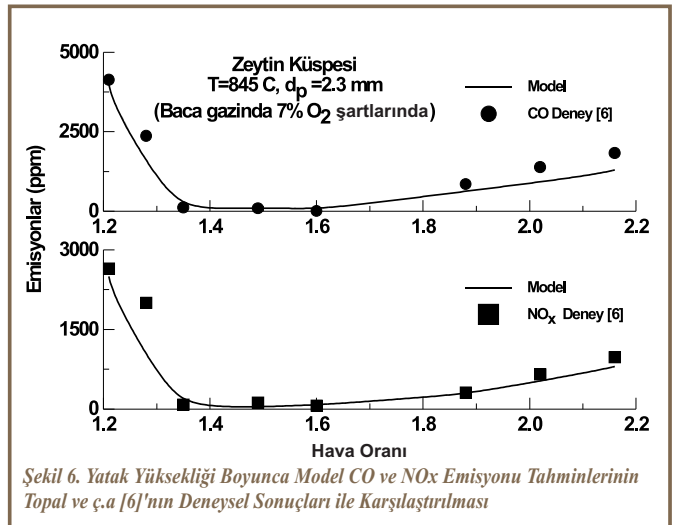
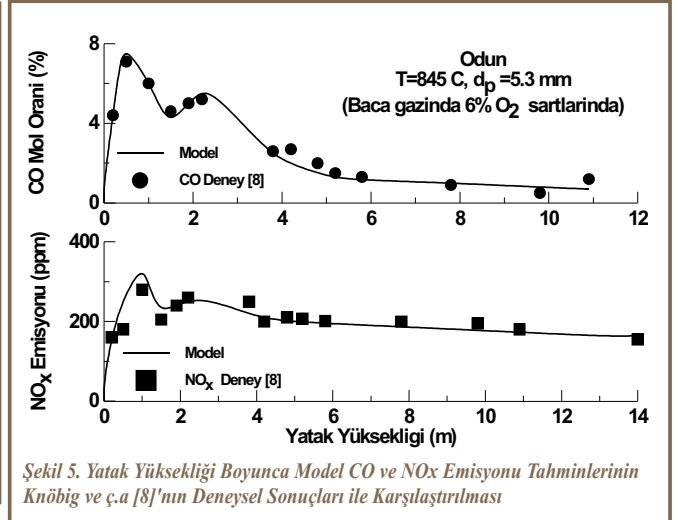


Yatak işletme hızının artırılması durumunda yatak sıcaklığının düşmesi, artan yatak işletme hızının taneciklerin yatak içerisindeki kalış sürelerini azaltması ve yanmayı olumsuz yönde etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Her iki şekilden de açıkça görülebileceği gibi model sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5'de büyük ölçekli bir yatak için (12 MW) yatak yüksekliği boyunca model CO ve NO_x emisyonu tahminlerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden açıkça görüldüğü gibi, CO ve NO_x emisyonu değerleri yakıtın uçucularının yatağın alt bölgesinde açığa çıkması nedeniyle, bu bölgede yüksek olmasına rağmen ikincil hava beslemesinden sonra (dağıtıcı elekten 2.2 m yükseklikte) her iki emisyon değeri de belirgin bir düşüş göstermektedir. Yatak yüksekliği boyunca CO ve NO_x emisyonu simülasyon sonuçlarının büyük ölçekli DAYY test ünitesi ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 6'da Atımtay ve ç.a. [6] tarafından zeytin küspesinin küçük ölçekli bir akışkan yataklı yakıcıda yakılması sonucu ölçülen CO ve NO_x emisyonu değerleri farklı hazla hava oranları cinsinden verilmektedir.



Şekilden de açıkça görülebileceği gibi, CO ve NO_x emisyonu değerlerinin hava oranının 1.5 değerine kadar düşüş göstermesi, bu değere kadar hava oranının yanma üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermesi açısından önemlidir. Hava fazlalık katsayısının artması, yatağa beslenen hava miktarını arttırmakta, bu durum beslenen hava sıcaklığının ve artan baca gazı debisinin etkisiyle yatak ortalama sıcaklığının düşmesine sebep olmakta ve yanmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca artan hava oranı, yataкта kalma süresini azaltarak CO ve NO_x emisyonu değerlerinde artışa sebep olmaktadır. Model sonuçlarının, beklendiği gibi deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Türkiye'de biyokütleden enerji elde edilmesi ile ilgili çalışmalar henüz başlangıç aşamasında olup, halihazırda kurulu bir biyokütle enerji tesisimiz bulunmamaktadır. Kurulacak biyokütle enerji tesisinde kullanılacak uygun yakma teknolojisinin seçilmesi, biyokütlenin yüksek bir verimle yakılması ve baca gazı emisyonlarının kabul edilebilir seviyelerde tutulması için oldukça önemlidir. Literatürde yapılan

çalışmalar incelendiğinde, temiz yakma teknolojileri içerisinde önemli bir yere sahip olan DAYY'ların biyokütlenin yakılmasında en etkili seçenek olduğu vurgulanmaktadır. Buradan hareketle, bu çalışmada, yakıt olarak farklı tipte biyoküteller kullanan DAYY'lar için iki boyutlu bir model geliştirilerek, akışkan yatak teknolojisinin bu alanda kullanılmasının önemi vurgulanmıştır. Geliştirilen model, gerek küçük ölçekli, gerekse büyük ölçekli DAYY'larda farklı tipte biyokütle yakıtlar kullanılması durumunda ve farklı işletme şartlarında deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum göstererek, geçerliliğini kanıtlamıştır. Gerek model tahminleri, gerekse deneysel veriler; DAYY'larda biyokütle yakılması durumunda emisyolların kabul edilebilir seviyelerde olduğunu göstermiştir.

KAYNAKÇA

1. **Chao CYH, Kwong PCW, Wang JH, Cheung CW, Kendall G**, Co-firing Coal With Rice Husk and Bamboo And The Impact On Particulate Matters and Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions. *Bioresource Technol*, doi:10.1016/j.biortech.2006.11.051, 2007.
2. **Kouprianov VI, Permchart W**, Emissions From a Conical FBC Fired With a Biomass Fuel, *Applied Energy*, 74, 383-92, 2003.
3. **Martín C, Villamañán MA, Chamorro CR, Otero J, Cabanillas A, Segovia JJ**, Low-grade Coal and Biomass co-Combustion on Fluidized Bed: Exergy Analysis, *Energy*, 31(23), 33034, 2006.
4. **Demirbas A**, Combustion Characteristics of Different Biomass Fuels, *Prog Energ Combust Sci*, 30, 219230, 2004.
5. **Sami M, Annamalai K, Wooldridge M**, Co-firing of Coal and Biomass Fuel Blends. *Prog Energy Combust Sci*, 27, 171214, 2002.
6. **Topal H, Atımtay AT, Durmaz A**, Olive Cake Combustion in a Circulating Fluidized Bed. *Fuel*, 82, 1049-56, 2003.
7. **Fang M, Yang L, Chen G, Shi Z, Luo Z, Cen K**, Experimental Study on Rice Husk Combustion in a Circulating Fluidized Bed. *Fuel Process Technol*, 85, 127382, 2004.
8. **Knöbig T, Werther J, Amand LE, Leckner B**, Comparison of Large and Small-scale Circulating Fluidized Bed Combustors With Respect to Pollutant Formation and Reduction For Different Fuels, *Fuel*, 77(14), 1685-42, 1998.
9. **Horio, M**, Hydrodynamics. In: *Circulating Fluidized Beds*, London: Blackie Academic & Professional, 40, 1992.
10. **Wen CY, Yu YH**, Mechanics of fluidization, *Chem Engng Prog Symp Ser*, 62, 100-110, 1966.
11. **Werther J, Wein J**, Expansion Behavior of Gas Fluidized Beds In The Turbulent Regime, *AIChE Symp Ser*, 301 (90), 31-44, 1994.
12. **Gungor A, Eskin N**, Hydrodynamic Modeling of a Circulating Fluidized Bed. *Powder Technol*, 172, 1-13, 2007.
13. **Gill J, Corella J, Aznar M-P, Caballero MA**, Biomass Gasification in Atmospheric and Bubbling Fluidized Bed: Effect of the Type of Gasifying Agent on the Product Distribution, *Biomass Bioener*, 17, 389-403, 1999.
14. **Gungor A**. Sirkülasyonlu Akışkan Yataklı Yakıcıların Modellenmesi. Doktora Tezi, İ.T.U., İstanbul; 2006.
15. **Gungor A, Eskin N**, Effects of Immersed Surfaces on the Combustor Efficiency of Small-Scale Fluidized Beds, *International Journal of Applied Thermodynamics*, 8 (3), 127-136.
16. **Gungor A, Eskin N**, Analysis of Environmental Benefits of CFB Combustors Via One Dimensional Model, *Chem Eng J*, 131, 301-317, 2007.
17. **Field MA, Gill DW, Morgan BB, Hawksley PWG**, Combustion of pulverized coal, *Coal Utiliz Res Assoc*, 31 (6), 285-292, 1967.
18. **Adanez J, Gayán P, Grasa G, de Diego LF, Armesto L, Cabanillas A**, Circulating Fluidized Bed Combustion in the Turbulent Regime, Modeling of Carbon Combustion Efficiency and Sulfur Retention, *Fuel*, 80, 1405-1414, 2001.
19. **Hua Y, Flamant G, Lu J, Gauthier D**, Modelling of Axial and Radial Solid Segregation in a CFB boiler, *Chem Engng Process*, 43 (8), 971-978, 2003.
20. **Hottel HC, Williams GC, Nerheim NM, Schneider GR**, Burning Rate of Carbon Monoxide, In, 10th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1965, pp,111-117.
21. **Huilin L, Guangbo Z, Rushan B, Yongjin C, Gidaspow D**, A Coal Combustion Model for Circulating Fluidized Bed Boilers, *Fuel*, 79, 165-172, 2000.
22. **Rajan RR, Wen CY**, A Comprehensive Model for Fluidized Bed Coal Combustors, *AIChE J*, 26, 642-55, 1980.
23. **Zimont VL, Trushin YM**, Total Combustion Kinetics of Hydrocarbon Fuels, *Combust Explosion Shockwaves*, 5 (4), 567-73, 1969.
24. **Desroches-Ducarne E, Dolignier JC, Marty E, Martin G, Delfose L**, Modeling of Gaseous Pollutants Emissions in Circulating Fluidized Bed Combustion of Municipal refuse, *Fuel*, 77 (13), 1399-410, 1998.
25. **Goel SK, Morihara A, Tullin CJ, Sarofim AF**, Effect of NO and O₂ Concentration on N₂O Formation During Coal Combustion in a Fluidized-bed Combustor, Modeling Results, In, 25th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1994, p, 1051-59.
26. **Johnsson JE, Amand L-E, Dam-Johansen K, Leckner B**, Modeling of N₂O Reduction in a Circulating Fluidized Bed Boiler, In, 5th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Beijing, P.R, China, 1996.
27. **Johnsson JE, Amand L-E, Dam-Johansen K, Leckner B**, Modeling N₂O Reduction and Decomposition in a Circulating Fluidized Bed Boiler, *Energy Fuel*, 10, 970-9, 1996.
28. **Liu H, Feng B, Lu JD**, Coal Property Effects on N₂O and NO_x Formation From Circulating Fluidized Bed Combustion of Coal, *Chem Engng Commun*, 192 (10-12), 1482-1489, 2005.
29. **Kilpinen P, Kallio S, Kontinen J, Barisic V**, Char-Nitrogen Oxidation Under Fluidised Bed Combustion Conditions, *Single Particle Studies*, *Fuel*, 81, 2349-2362, 2002.
30. **Johnsson JE**, A new NO_x Module for the IEA-Model, 21st IEA-AFBC Meeting, Beograd, 1990.
31. **Zijlma GJ, Gerritsen AW, van den Bleek CM**, NO_x Formation and Reduction With NH₃ in Fluidized Bed Combustion-the Influence of the O₂ Concentration on the Kinetics, In, Reuter RB, Editor, 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Savannah, GA, Paper No, FBC 99-0168, ASME, 1999.