

Pemodelan dan Eksperimental Perilaku Pembakaran *Co-Firing* Cangkang Kelapa Sawit dan Batubara Peringkat Rendah di Dalam Reaktor *Drop Tube Furnace* (DTF)

Dwika Budianto^{1,*}, Cahyadi², Muhammad Aziz³

^{1,2}Balai Besar Teknologi Konversi Energi, BPPT, Indonesia

³Advanced Energy Systems for Sustainability Center, Tokyo Institute of Technology, Japan

*email: dwika.budianto@bppt.go.id

Abstrak

Penelitian ini membahas tentang karakteristik perilaku pembakaran *co-firing* cangkang kelapa sawit dan batubara peringkat rendah didalam reaktor *Drop Tube Furnace* (DTF) dengan menggunakan pendekatan analisis simulasi numerik dan divalidasi secara eksperimental. Pemodelan dilakukan dengan software *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dimana *co-firing* campuran batubara dan cangkang merupakan reaksi kimia yang kompleks yang mempertimbangkan fase gas & solid dengan efek turbulensi disepanjang reaktor tungku. Pada simulasi numerik mempertimbangkan dua langkah mekanisme reaksi untuk pembakaran *homogeneous* (*volatile matter*) dan *heterogenous* (*char*), turbulensi, radiasi perpindahan panas. Reaksi pembakaran tersebut dapat diamati melalui evolusi gas produk pembakaran CO, O₂ dan CO₂. Validasi analisis numerik dilakukan secara eksperimental di dalam DTF menggunakan batubara dan distribusi konsentrasi gas produk pembakaran diamati sepanjang tungku DTF. Simulasi numerik dilakukan terhadap 4 sampel masing-masing sampel batubara, *co-firing* dengan cangkang 10%, 25%, dan 50% berdasarkan fraksi massa (*wt%*). Hasil analisis menunjukkan semakin besar fraksi massa cangkang berpengaruh terhadap reaktivitas pembakaran yang berkaitan dengan temperatur pembakaran serta gas yang dihasilkan.

Kata Kunci : *Co-firing*, Cangkang, Batubara, DTF, CFD, temperatur, CO₂, CO

1. Latar Belakang

Pertumbuhan ekonomi di Indonesia mendorong terhadap kenaikan permintaan kebutuhan listrik sekitar 7% per tahun atau setara 6 GW. Kondisi saat ini hampir 60% ketersediaan listrik disuplai oleh pembangkit listrik berbahan bakar batubara [1]. Di sisi lain potensi cadangan batubara Indonesia didominasi batubara peringkat rendah (*low rank coal*) yang secara tipikal memiliki kandungan moisture yang tinggi. Hal ini menyebabkan beberapa permasalahan dalam pemanfaatannya [2], terutama selama proses pembakaran, isu lingkungan terkait dengan jumlah produksi gas rumah kaca (GHG).

Kondisi geografis Indonesia sangat mendukung kekayaan potensi sumber daya dari biomassa seperti tanaman perkebunan kelapa sawit (*Elaeis Guineensis*). Laju pertumbuhan perkebunan kelapa sawit terus meningkat sebesar 7.67% per tahun selama

dekade terakhir dan total produksi minyak sawit juga tumbuh sebesar 11.09% per tahun [3]. Peningkatan produksi minyak sawit berdampak terhadap peningkatan limbah sawit antara lain : tandan kosong atau *empty fruit bunch* (EFB), cangkang atau *palm kernel shell* (PKS) serta serat atau *fiber*. Dibandingkan dengan limbah biomassa yang lain, cangkang (PKS) memiliki beberapa kelebihan yaitu rendah *moisture content*, memiliki nilai kalor yang tinggi dan rendah *ash content*. Rendemen cangkang didalam Tandan Buah Segar (TBS) kelapa sawit adalah sekitar 5-7%, sehingga bila dihitung total potensinya setara 6.65 juta ton per tahun atau setara 770 MWe.

Saat ini pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan bakar alternatif untuk substitusi bahan bakar fosil mendapat perhatian khusus. Menurut beberapa penelitian mengatakan bahwa *co-firing*

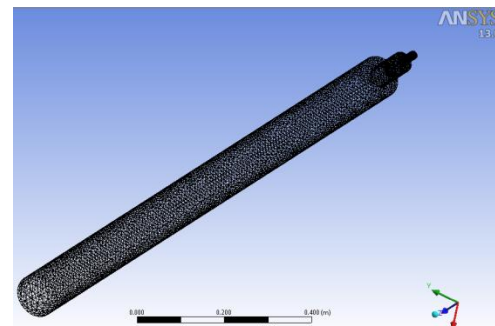
limbah biomassa dengan boiler batubara eksisting merupakan teknologi yang layak diaplikasikan, tidak hanya peningkatan pemanfaatan energi terbarukan tetapi juga signifikan dalam penurunan emisi CO₂. Co-firing dengan limbah biomassa telah berhasil dilakukan lebih dari 200 pembangkit di dunia dengan variasi jenis biomassa dan variasi skala (pilot maupun komersial). Karakteristik analisis biomassa menjadi dasar desain untuk pertimbangan kondisi operasi untuk boiler [4].

Beberapa peneliti telah menginvestigasi perilaku pembakaran co-firing dengan biomassa dengan menggunakan CFD dengan sampel biomassa kayu pinus (*pinewood*) [5], ilalang (*switchgrass*) [6], limbah zaitun (*olive*) [7], cangkang (*palm kernel shell*) [8]. Selain itu pemodelan CFD juga digunakan untuk menginvestigasi pembakaran oxy-fuel batubara dalam DTF [9]. CFD merupakan tools yang efektif untuk menghitung aliran fluida, perpindahan panas & massa, reaksi kimia dan interaksi antara fluida serta mampu digunakan untuk memprediksi perilaku pembakaran termasuk co-firing. Pada studi ini difokuskan pada penelitian perilaku pembakaran co-firing dalam reaktor DTF skala lab melalui simulasi numerik CFD terhadap 4 kasus sampel yaitu batubara, co-firing cangkang 10%, 25%, 50% serta dilakukan validasi analisis numerik secara eksperimental di dalam reaktor DTF menggunakan batubara.

2. Modeling CFD

Dalam studi ini pemodelan simulasi numerik menggunakan software komersial CFD ANSYS Design Modeler dan Fluent versi 16.2 (ANSYS Inc.) yang telah banyak digunakan untuk menentukan problem solving terkait aliran fluida selama proses pembakaran. Pemodelan tungku DTF dianalisis dalam 3D model dimana pada proses numerik memperhitungkan *governing equation* (massa, momentum, enthalpy, temperatur), turbulensi, radiasi perpindahan panas, reaksi diantara fase partikel dan fase gas. CFD code mampu menyelesaikan

transport equation melalui pendekatan *Eulerian-Lagrangian* sebagai dasar untuk menghitung partikel trajektori didalam lingkungan fluida gas. Selain itu juga melibatkan model turbulen dan radiasi heat transfer dalam aliran dinamis serta proses devolatilisasi melalui global kinetik Arrhenius sebagai korelasi laju penurunan partikel bahan bakar terhadap temperatur.



Gambar 1. Pemodelan DTF

Proses meshing terhadap model reaktor DTF diasumsikan sebagai unstructured tetrahedral mesh dengan jumlah node 15884 and elemen 74400 cell.

Asumsi dalam pemodelan mencakup :

- 1) *Viscous model* menggunakan k-epsilon, standard model, standard wall functions.
 - C1-epsilon 1.44
 - C2-epsilon 1.92
 - TKE *Prandtl number* 1
 - *energy Prandtl number* 0.85
 - PDF *Schmidt number* 0.85
- 2) *Radiation model* menggunakan P1 radiasi
- 3) *Species model* dipilih *Non-Premixed Combustion* dengan hubungan kesetimbangan, input unsur bahan bakar (C,H,O,N,S, *volatile matter*, *fixed carbon*, *moisture*) dengan mempertimbangkan masing-masing bahan bakar (batubara dan cangkang), proses reaksi pembakaran melibatkan kalkulasi thermal NO_x dan SO₂.
- 4) *Boundary condition*
 - Inlet *mass flowrate* bahan bakar sebesar 1.38e-05 kg/s (*normal to boundary*), temperatur 300 K

- Inlet mass flowrate udara sebesar 1.6×10^{-4} kg/s (*normal to boundary*), temperatur 300 K
- *Wall furnace* disetting pada kondisi *isothermal* 1300 K, *wall roughness* 0.5, *internal emissivity* 1
- *Wall probe* diasumsikan kondisi *isothermal* 300 K

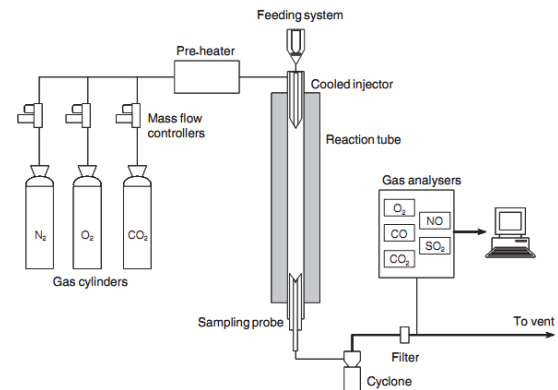
Jumlah udara diseting tetap untuk seluruh variasi co-firing dengan cangkang (PKS) sedangkan jumlah bahan bakar yang diumpankan juga diatur tetap untuk seluruh variasi co-firing.

3. Eksperimental & Material

3.1. Drop Tube Furnace (DTF)

Konfigurasi skema DTF ditunjukkan pada gambar 2 yaitu berupa tungku vertikal drop tube skala lab kapasitas 1 kW_{th} , tinggi 1.5 m dan diameter dalam 0.07 m. Tungku DTF dipanaskan secara elektrik dengan media kumparan heater yang terbagi menjadi 3 zone heater untuk menjamin tercapai kondisi *isothermal* disepanjang tungku. Pengumpanan batubara dikontrol oleh motor *screw feeder* yang dilengkapi dengan *vibrator*. Partikel batubara diinjeksikan melalui bagian tengah probe injektor (*cooling probe*) yang didinginkan dengan media air pendingin. Hal ini dimaksudkan untuk

menjamin tidak terjadi pembakaran awal bahan bakar sebelum keluar dari mulut injektor. Proses pembakaran berlangsung dalam *furnace* dengan arah *draft* pembakaran kearah bawah. Suplai udara pembakaran terdiri udara primer dengan laju alir volumetrik sebesar 3 lpm (liter per menit) dan udara sekunder sebesar 4 lpm. Sedangkan suplai umpan partikel bahan bakar berkisar 0.045 kg/jam diinjeksikan kedalam tungku DTF melalui *cooling probe* atas bersamaan dengan udara primer. Evolusi gas hasil reaksi pembakaran diambil sampel gas buang melalui *cooling sampling probe* bawah yang terhubung dengan *gas analyser* untuk dianalisis konsentrasinya (O_2 , CO_2 , CO).



Gambar 2. Skema eksperimental DTF [8]

3.2. Analisis Sampel Batubara & Cangkang

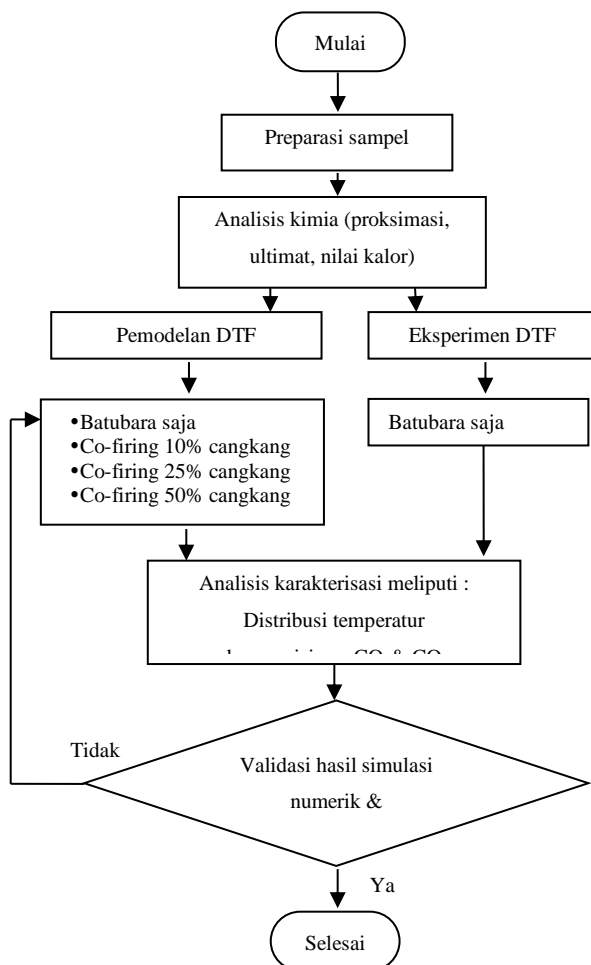
Tabel 1. Hasil analisis *proximate*, *ultimate*, nilai kalor

Component	Batubara		Cangkang (PKS)	
	As-received	Air Dry Basis	As-received	Air Dry Basis
Proximate analysis				
FC	24.93	40.23	20.80	24.35
VM	25.76	41.57	57.05	66.77
Moisture	48.76	17.30	17.86	3.86
Ash	0.56	0.90	4.29	5.02
Ultimate analysis				
C	35.30	56.98	37.02	43.77
H	2.29	3.69	4.95	5.85
O	11.23	18.13	35.79	42.32

Sampel batubara peringkat rendah berasal dari Kalimantan dan sampel tersebut mewakili peringkat batubara rendah, sedangkan sampel cangkang diperoleh dari limbah perkebunan kelapa sawit di Sumatra. Kedua sampel baik batubara maupun cangkang dipreparasi hingga ukurannya seragam 75 *micron* atau 200 mesh. Setelah ukuran sampel dipreparasi selanjutnya dilakukan analisis kimia mencakup analisis *proximate*, *ultimate* dan nilai kalor.

3. Metode Penelitian

Tahapan metode penelitian diawali dengan preparasi sampel uji batubara dan cangkang (PKS) kemudian dianalisis kimia (*proximate*, *ultimate* dan nilai kalor). Data analisis kimia tersebut menjadi acuan dalam penentuan kebutuhan stoikiometri perbandingan jumlah udara dan bahan bakar, selain itu juga menjadi masukan karakteristik bahan bakar dalam CFD.

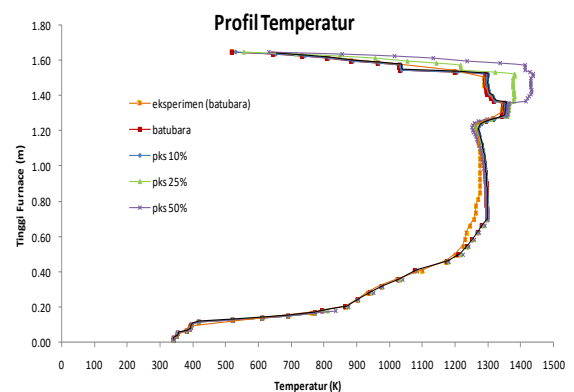


Gambar 3. Metodologi penelitian

Selanjutnya proses pemodelan DTF dengan menggunakan software ANSYS FLUENT 16.2 dan analisis numerik terhadap variasi co-firing pembakaran. Secara eksperimental juga dilakukan uji pembakaran didalam DTF hanya dengan sampel batubara saja. Dari hasil uji eksperimen diperoleh parameter distribusi temperatur serta data evolusi komposisi gas O₂, CO₂ dan CO. Data-data parameter tersebut digunakan sebagai validasi bagi hasil analisis simulasi numerik CFD.

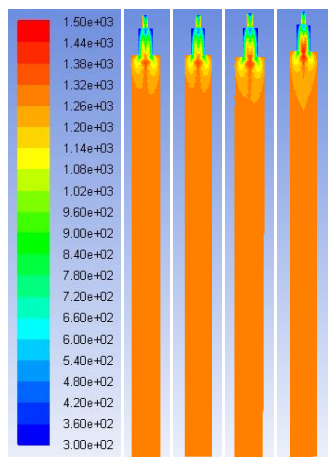
4. Diskusi & Hasil

4.1. Distribusi Temperatur



Gambar 4. Profil distribusi temperatur DTF

Pada gambar 4 menunjukkan hubungan antara distribusi temperatur terhadap ketinggian tungku DTF pada seluruh kondisi campuran co-firing. Dari analisis tersebut terlihat bahwa distribusi temperatur cenderung meningkat sesuai dengan penambahan fraksi massa cangkang (PKS). Co-firing dengan penambahan cangkang (PKS) (3.573 kcal/kg, a.r.) yang memiliki nilai kalor lebih tinggi terhadap batubara (3.307 kcal/kg,a.r.) mengakibatkan kenaikan temperatur gas pembakaran terutama pada jarak 10-40 cm dari mulut injektor. Perbandingan profil distribusi temperatur pada hasil simulasi CFD terlihat pada gambar 5.



(a) (b) (c) (d)

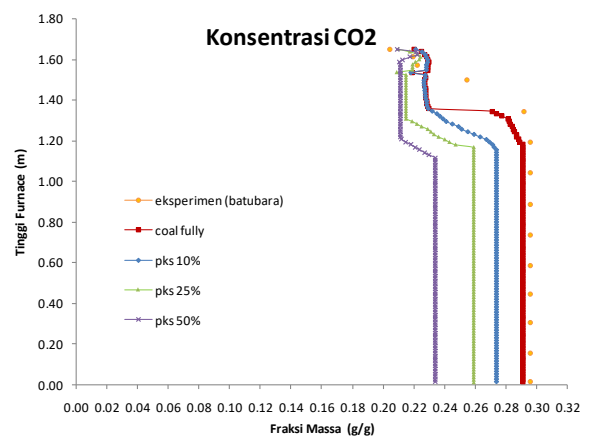
Gambar 5. Profil distribusi temperatur DTF hasil simulasi (a) batubara, (b) 10% cangkang (PKS), (c) 25% cangkang (PKS), (d) 50% cangkang (PKS)

4.2. Komposisi Gas CO₂ dan CO

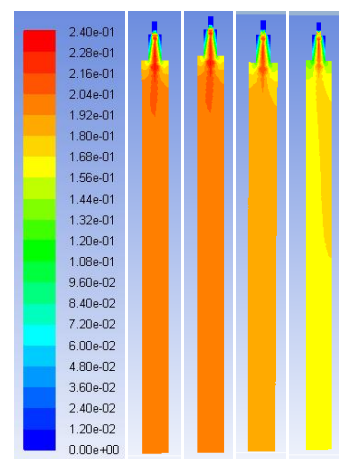
Gambar 6 menunjukkan distribusi fraksi massa CO₂ disepanjang tungku DTF. CO₂ dihasilkan selama proses pembakaran dan menjadi unsur utama didalam gas buang. Semakin besar fraksi massa cangkang (PKS) pada co-firing maka akan mempercepat proses pembakaran sehingga pembentukan CO₂ akan semakin cepat. Setelah proses devolatilisasi lengkap, char biomassa mulai proses oksidasi dengan berinteraksi dengan O₂ membentuk CO₂.

Gambar 7 menunjukkan perbandingan hasil simulasi fraksi massa CO₂. Sedangkan grafik profil distribusi konsentrasi CO selama pembakaran terhadap jarak dari injektor bahan bakar DTF ditunjukkan pada gambar 8. Pembentukan gas CO dapat terjadi akibat parsial oksidasi O₂ dan reaksi gasifikasi gas CO₂ dengan karbon dari volatile matter dan char. Gas CO yang terbentuk akan secara cepat teroksidasi dengan O₂ menjadi CO₂. Secara umum konsentrasi CO yang terbentuk cenderung lebih tinggi pada jarak 10-40 cm dari injektor atau ruang furnace bagian atas, kemudian cenderung turun di sepanjang furnace. Hal tersebut terlihat pada gambar 9 tentang perbandingan hasil simulasi fraksi massa CO. Senyawa CO terbentuk oleh karena reaksi

oksidasi komponen volatile matter dan sebagian permukaan karbon/char. Komposisi cangkang (PKS) yang didominasi volatile matter memiliki kecenderungan untuk menghasilkan CO yang lebih tinggi. Semakin tinggi penambahan fraksi massa cangkang (PKS) dalam co-firing maka akan meningkatkan konsentrasi CO pada permulaan pembakaran. Konsentrasi tersebut perlahan lahan turun didalam furnace DTF oleh karena CO bereaksi dengan sebagian O₂ membentuk CO₂.

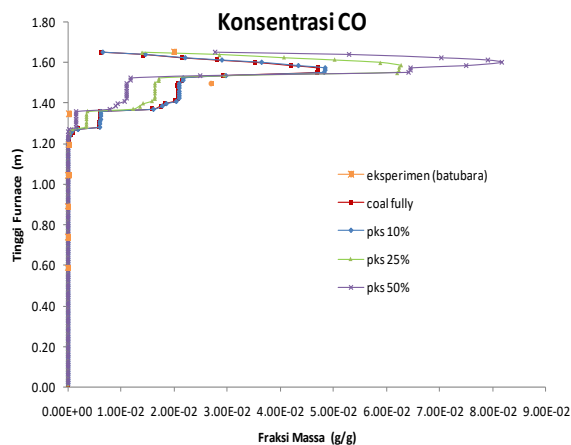


Gambar 6. Profil konsentrasi CO₂ hasil eksperimen dan simulasi DTF



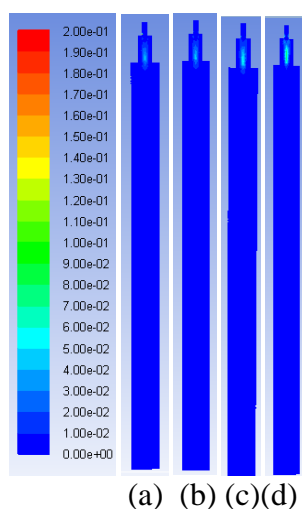
(a) (b) (c) (d)

Gambar 7. Hasil simulasi fraksi massa CO₂, (a) batubara, (b) 10% cangkang (PKS), (c) 25% cangkang(PKS), (d) 50% cangkang(PKS)



Gambar 8. Profil konsentrasi CO hasil eksperimen dan simulasi DTF

Hasil komposisi gas O_2 dan CO_2 dalam tungku DTF terhadap pembakaran batubara menunjukkan pola pembakaran pada awal permulaan memiliki kecenderungan konsentrasi O_2 lebih besar dan CO_2 lebih kecil, selanjutnya sambil bereaksi disepanjang furnace kondisi konsentrasi kemudian berubah sebaliknya. Hal ini merupakan proses reaksi antara oksigen dengan partikel batubara mulai dari fase penyalan diikuti fase propagasi sampai fase oksidasi char pembakaran secara menyeluruh. Senyawa O_2 dalam DTF lebih cepat bereaksi dengan partikel batubara oleh karena dipengaruhi beberapa faktor antara



Gambar 9. Hasil simulasi fraksi massa CO, (a) batubara, (b) 10% cangkang (PKS), (c) 25% cangkang (PKS), (d) 50% cangkang (PKS)

lain kondisi temperatur lingkungan relatif tinggi dan merata, serta jumlah laju alir massa batubara relatif kecil.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi pemodelan dan eksperimen pembakaran didalam DTF dapat disimpulkan bahwa semakin besar penambahan cangkang dalam pembakaran *co-firing* batubara didalam tungku DTF maka secara umum distribusi temperatur mengalami kenaikan akibat nilai kalor cangkang lebih besar dari batubara. Penambahan campuran cangkang (10%, 25% hingga 50%) yang memiliki kandungan volatile matter lebih tinggi dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran yang ditunjukkan dengan pembentukan gas CO cenderung lebih tinggi dari batubara 100%.

6. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh laboratorium uji Bidang Konversi Energi, Balai Besar Teknologi Konversi Energi (B2TKE-BPPT) dan software ANSYS 16.2 yang disupport oleh Advanced Energy Systems for Sustainability Center, Tokyo of Institute of Technology, Jepang.

Daftar Pustaka

- 1) RUPTL PLN 2014, <http://www.pln.co.id/dataweb/RUPTL> 2015-2024 (Last access: 2015.10.8)
- 2) Liu, Y.; Aziz, M.; Kansha, Y.; Tsutsumi, A., *Chem. Eng. Sci.*, 100, 392-401 (2013)
- 3) Aziz, M.; Oda, T.; Kashiwagi, T., *J. Jpn. Inst. Energy*, 94, 143-150 (2015)
- 4) Van Loo, S.; Koppenjan, J., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Routledge (2008)
- 5) Backreedy, R.I.; Fletcher, L.M.; Jones, J.M.; Ma, L.; Pourkashanian, M.; Williams, A., *Proc. Combust. Inst.*, 30, 2955-2964 (2005)
- 6) Gera, D.; Mathur, M.P.; Freeman, M.C.; Robinson, A., *Energy Fuels*, 16, 1523-1532 (2002)

- 7) Ma,L.;Gharebaghi,M.;Porter,R.;Pourkashanian,M.; Jones,J.M.; Williams,A.,*Fuel*,88, 2448-2454 (2009)
- 8) Muhammad Aziz, Dwika B., Takuya Oda., Co-firing of palm Kernel Shell Into Coal Fired Power Plant., *Energies* 2016, 9:137
- 9) Dwika B., Cahyadi, Adi Suryosatyo, Yulianto SN, Prediksi karakteristik pembakaran oxy-fuel dengan pemodelan CFD, Enerlink Ed. Agustus 2014
- 10) Cahyadi.; Dwika B.;Adi Suryosatyo; Yulianto, S.N.; Karakterisasi Pembakaran Batubara Halus Dalam Lingkungan Udara Dan Oxy-Fuel., Enerlink Ed. Agustus 2014