

Perbandingan Karakteristik Penyalaan Partikel Batubara Di Dalam *Drop Tube Furnace* (DTF) dan *One Dimensional Furnace* (1D Furnace)

Yulianto Sulistyio Nugroho, Dwika Budianto*

Laboratorium Termodinamika, Departemen Teknik Mesin,
Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424, Indonesia
email: yulianto@eng.ui.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini membahas perilaku karakteristik penyalaan partikel batubara dengan menggunakan udara lingkungan atmosfer. Sampel batubara terdiri atas 3 jenis variasi peringkat batubara yaitu bituminous, subbituminous dan lignite yang telah diseragamkan ukurannya sebesar 75 μm (200 mesh). Pada masing-masing sampel batubara diuji dengan kedua alat tungku pembakaran yaitu pada Drop Tube Furnace (DTF) dan One Dimensional Furnace (1D furnace). Kedua alat tersebut memiliki konfigurasi geometri dan cara pemanasan awal yang berbeda. Pada DTF, temperatur dinding cenderung lebih tinggi dibanding temperatur lokal gas oleh karena jumlah panas yang dilepaskan batubara relatif kecil, sebaliknya pada tungku 1D temperatur gas cenderung lebih tinggi daripada temperatur dinding, hal ini disebabkan oleh karena panas yang dilepaskan batubara cukup besar sehingga mampu untuk melakukan proses penyalaan secara kontinyu. Metode penentuan waktu penyalaan dilakukan dengan pendekatan komposisi O_2 dan CO_2 yaitu dimana waktu penyalaan batubara diindikasikan dengan terbakarnya 1% karbon batubara. Hasil analisis eksperimen menunjukkan bahwa waktu penyalaan hasil DTF cenderung lebih lambat dibanding 1D furnace, dimana hal ini dipengaruhi oleh oleh *thermal* inersia pada 1D furnace lebih besar karena didukung *burning rate* besar, selain itu minimnya konsentrasi O_2 pada lingkungan gas dalam tungku DTF akibat kondisi temperatur tinggi dalam tungku menyebabkan O_2 langsung berinteraksi dengan volatil menghasilkan CO_2 dimana CO_2 memiliki kapasitas panas besar yang berdampak terhadap penurunan temperatur dan keterlambatan penyalaan. Selain itu waktu penyalaan terhadap masing-masing peringkat batubara mengindikasikan konsisten dimana semakin besar fuel ratio (FC/VM) maka waktu penyalaan akan semakin panjang.

Kata kunci : penyalaan, waktu penyalaan, partikel batubara, 1D furnace, DTF

Latar Belakang

Informasi mengenai waktu penyalaan sangat bermanfaat terutama bagi boiler pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar batubara yang bervariasi peringkat jenisnya.

*) Alamat tetap: Balai Besar Teknologi Energi, BPPT, Kawasan Puspiptek Serpong Gd. 620-622 (Dwika Budianto)

Saat partikel batubara mulai menyala dan terbakar tentu akan mempengaruhi pergeseran temperatur puncak pada daerah radiasi, sehingga penting untuk diketahui untuk menjadi acuan untuk desain boiler serta prediksi proses pembakarannya.

Berbicara mengenai penyalaan maka tidak terlepas dengan mekanisme penyalaan dan keterlambatan penyalaan. Mekanisme penyalaan

dibedakan menjadi 2 yaitu penyalaan homogeneous dan heterogenous. Penyalaan homogen terjadi dimana saat partikel batubara masuk dalam temperatur tinggi maka komponen volatil menyala kemudian memicu partikel char untuk menyala secara serentak atau simultan.

Kondisi ini biasanya dialami pada ukuran yang halus kurang dari 65 μm , temperatur lingkungan yang tinggi (*high heating rate*) seperti yang diungkap pada penelitian Howard dan Essenhigh [1,2]. Sedangkan penyalaan heterogen adalah penyalaan bertahap dimana diawali fase penyalaan gas dan diikuti penyalaan fase partikel. Kondisi tersebut terjadi karena dipengaruhi oleh ukuran partikel yang lebih besar ($< 100 \mu\text{m}$), proses laju pemanasan lambat (*slow heating rate*) [3,4,5]. Annamalai dan Durbetaki [6] mengembangkan transisi antara penyalaan homogen dan heterogen. Selain itu juga memprediksi pengaruh temperatur ambien dan kandungan volatil pada penyalaan transisi dan temperatur penyalaan [7]. Dari beberapa

penelitian [1-8]. Hal-hal yang dapat dipengaruhi penyalan antara lain : jumlah massa sampel, ukuran partikel, *heating rate* partikel, kondisi temperatur lingkungan sekitar tungku, kandungan volatil, konsentrasi gas O₂ serta peringkat batubara.

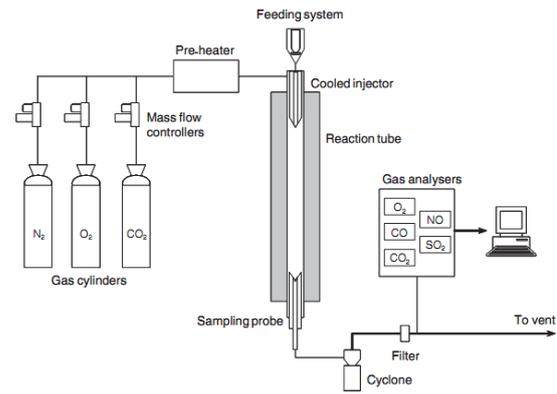
Keterlambatan waktu penyalan juga telah dibahas beberapa peneliti [9, 10, 11, 12] dimana hal ini terjadi pada penyalan *oxyfuel* yang cenderung didominasi oleh konsentrasi CO₂. Akibatnya dengan sifat CO₂ yang memiliki kapasitas panas besar menyebabkan heat loss pada partikel dan mengurangi reaktifitas sehingga terjadi keterlambatan penyalan.

Dalam paper ini akan dibahas mengenai analisis waktu penyalan dan keterlambatannya pada alat 1D furnace dan DTF pada ukuran sampel batubara yang seragam yaitu 75 µm (200 mesh) terhadap 3 jenis peringkat batubara pada kondisi pembakaran udara ambien.

Eksperimental & Material

1. Drop Tube Furnace (DTF)

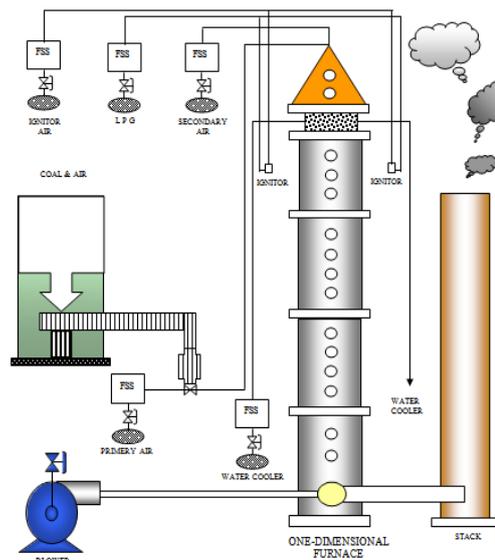
Konfigurasi geometri DTF pada gambar 1 yaitu berupa tungku vertikal drop tube skala lab kapasitas 1 kW_{th}, dengan tinggi 1.5 m dan diameter dalam 0.07 m. Tungku DTF dipanaskan secara elektrik dengan media kumparan heater yang terbagi menjadi 3 zone heater untuk menjamin tercapai kondisi *isothermal* disepanjang tungku. Pengumpanan batubara dikontrol oleh motor *screw feeder* yang dilengkapi dengan *vibrator*. Selanjutnya partikel batubara diinjeksikan melalui bagian tengah probe injektor (*cooling probe injector*) yang didinginkan dengan media air pendingin. Hal ini dimaksudkan untuk menjamin tidak terjadi pembakaran awal batubara sebelum keluar dari mulut injektor. Proses pembakaran berlangsung dalam silinder *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. Kondisi udara primer dan sekunder tersebut sebelumnya dipanaskan terlebih dahulu melalui oven hingga mencapai temperatur 180°C. Sedangkan suplai umpan partikel batubara berkisar 0.045-0.060 kg/jam diinjeksikan kedalam tungku DTF melalui *cooling probe* atas bersamaan dengan udara primer. Produk hasil reaksi pembakaran diambil sampel emisi gas buang melalui *cooling probe* bawah kemudian dianalisa konsentrasi gas (O₂, CO₂, CO, NO, SO₂) dengan alat gas analyser.



Gambar 1. Skema DTF

2. One Dimensional Furnace (1D furnace)

1D *furnace* pada prinsipnya sama penggunaannya dengan DTF yang membedakan adalah dimensi, laju alir umpan batubara, dan proses pemanasannya. 1D furnace memiliki panjang 6 m dan diameter dalam 0.3 m, dinding furnace terbuat dari batu tahan api (*refractory*) dan mampu menerima panas hingga 1500 C, pada dinding furnace dilengkapi dengan thermocouple yang termonitor dalam program data akuisisi dan lubang-lubang transparan untuk observasi dan pengambilan data gas. Proses pemanasan awal dinding tungku diperoleh dari pembakaran gas LPG. Laju alir umpan batubara 6-7 kg/jam. Dalam pengoperasiannya mulai dari pengaturan laju alir udara primer, sekunder, ID fan, laju umpan batubara, monitoring temperatur, emisi gas buang sudah terkoneksi dan terintegrasi dalam jaringan pada *control room*.



Gambar 2. Skema 1D furnace [13]

3. Analisis Sampel Batubara

Sampel batubara terdiri 3 sampel yang masing-masing mewakili jenis peringkat batubara yaitu

bituminous, sub-bituminus dan lignite. Sampel dipreparasi hingga ukurannya seragam 75 *micron* atau 200 mesh. Sampel halus tersebut selanjutnya dianalisis kimia mencakup analisis *proximate, ultimate* dan nilai kalor.

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

Proximate Analysis (AR)	Bituminous	Subbituminous	Lignite
FC (%)	42.60	29.52	24.93
VM (%)	37.00	43.02	25.76
Moisture (%)	14.80	22.10	48.76
Ash (%)	5.60	5.35	0.56
CV kCal/kg	5950	4720	3307
Fuel Ratio (FC/VM)	1.15	0.69	1.03

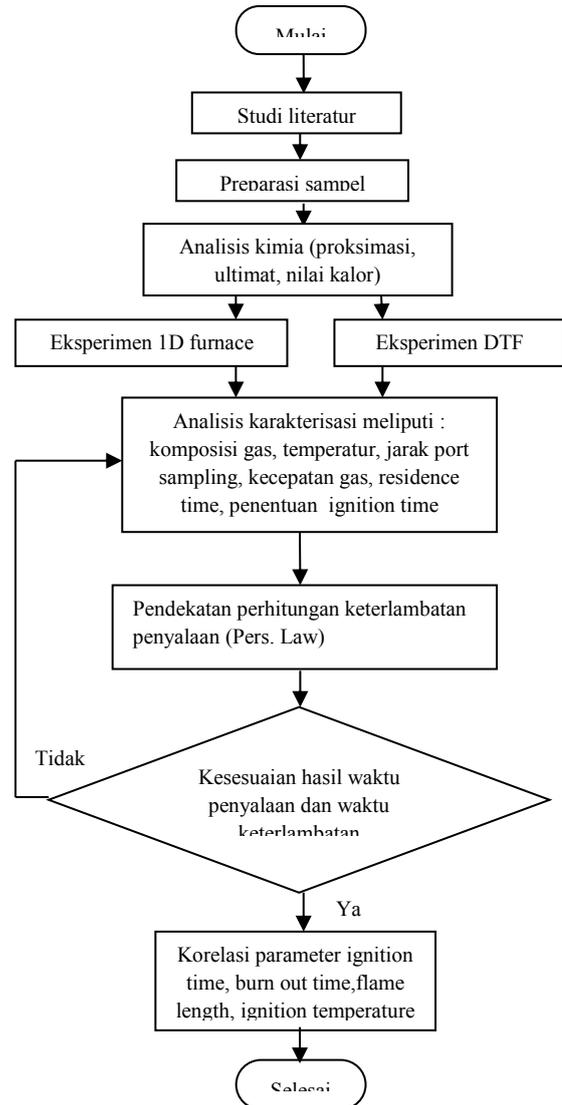
Ultimate Analysis (AR)	Bituminous	Subbituminous	Lignite
C (%)	59.10	48.55	35.30
H (%)	4.26	3.90	2.29
O (%)	14.43	19.19	11.23
N (%)	1.03	0.49	1.75
S (%)	0.78	0.42	0.11
Moisture (%)	14.80	22.10	48.76
Ash (%)	5.60	5.35	0.56

Metode Penelitian

Tahapan metode penelitian diawali pengumpulan studi literatur berupa jurnal ilmiah mengenai proses penyalaaan. Selanjutnya menyiapkan sampel uji batubara yang terdiri dari 3 jenis peringkat batubara kemudian dianalisis kimia (*proximate, ultimate* dan nilai kalor). Data analisis tersebut menjadi acuan dalam perhitungan perbandingan stoikiometri antara jumlah udara dan batubara. tahap selanjutnya proses pembakaran dalam tungku 1D *furnace* dan DTF. Dari hasil eksperimen diperoleh data komposisi gas O₂ dan CO₂, data temperatur. Selanjutnya data diolah untuk mendapatkan waktu penyalaaan partikel batubara.

Perhitungan waktu penyalaaan berkaitan dengan penentuan waktu tinggal, jarak titik pengambilan sampel gas dan data kecepatan aliran gas di dalam tungku. Waktu penyalaaan diindikasikan dengan terbakarnya 1% karbon pada partikel batubara, sehingga untuk mengetahui jumlah persentase

karbon yang terbakar pada masing-masing titik pengukuran maka diperlukan data gas O₂ dan CO₂.



Gambar 3. Metodologi penelitian penyalaaan

Data gas CO₂ pada tiap-tiap pengukuran dikoreksi terhadap data gas O₂ pada titik pengukuran yang sama. Sehingga mendapatkan data CO₂ *corrected*. Hasil CO₂ *corrected* dinormalisasikan dengan hasil CO₂ *corrected max* sehingga didapat persentase normal karbon yang terbakar (*carbon burn out*). Untuk menghitung waktu tinggal karbon/ *residence time* tiap-tiap elevasi diperlukan data jarak masing-masing titik pengukuran dibandingkan dengan kecepatan gas (*velocity*) yang telah dikoreksi. Kecepatan gas aktual diperoleh dengan menghitung jumlah debit volume gas pembakaran (CO₂, SO₂, H₂O, N₂ dan O₂) dibandingkan dengan luas penampang tungku (*cross section area*). Setelah persentase karbon terbakar dan residence time diketahui maka dapat dipakai untuk mencari waktu penyalaaan.

$$Ignition\ time = \left(\frac{1}{\% \text{ carbon burned start}} \times Residence\ time \right) \quad (1)$$

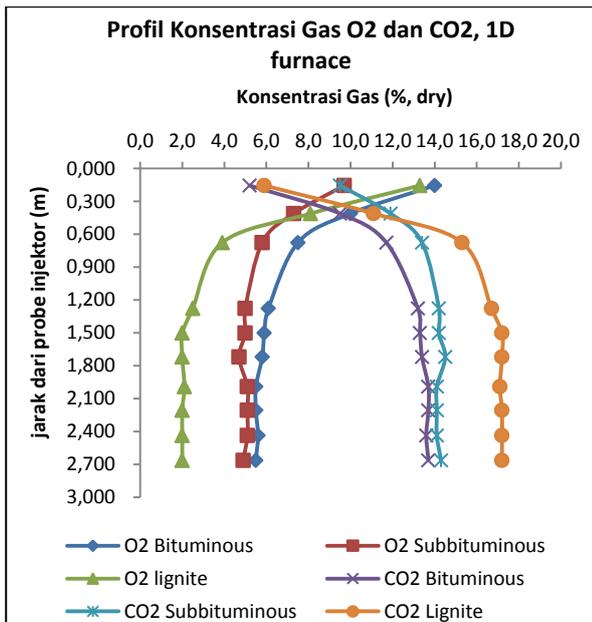
Sedangkan untuk perhitungan keterlambatan waktu penyalaan (ignition delay time) digunakan pendekatan rumus dari Law CK [14] :

$$\tau_i = \frac{C_v(T_0^2/T_a)}{q_c Y_{F,0} A \exp(-T_a/T_0)} \quad (2)$$

Dimana keterlambatan penyalaan bergantung dari molar kapasitas panas (*capacity heat*) dari campuran (C_v), *heat release* reaksi (q_c), reaktifitas dari bahan bakar yang sesuai dengan kondisi operasi temperatur awal batubara (T_0) dan temperatur aktifasi penyalaan (T_a) serta fraksi massa awal batubara ($Y_{F,0}$).

Hasil Analisis

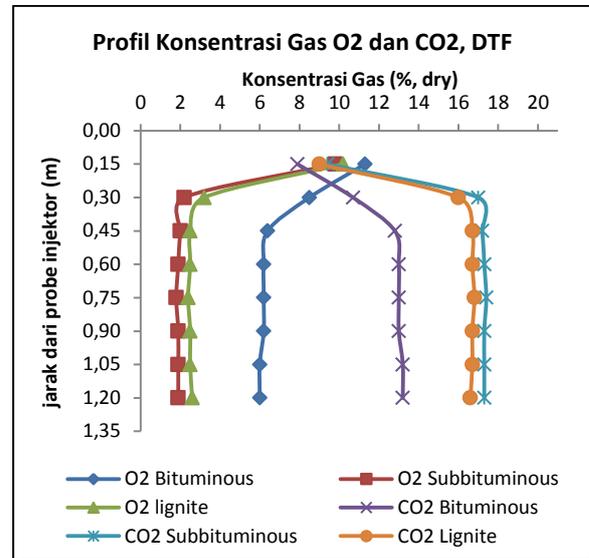
1. Komposisi Gas



Gambar 4. Profil konsentrasi O_2 , CO_2 1D *furnace*

Hasil komposisi gas O_2 dan CO_2 dalam tungku 1D dan DTF terhadap pembakaran masing-masing sampel menunjukkan pola pembakaran yang sama yaitu pada *port* awal memiliki kecenderungan konsentrasi O_2 lebih besar kemudian cenderung turun sedangkan CO_2 sebaliknya. Hal ini menunjukkan adanya reaksi antara oksigen dengan partikel batubara pada *port* awal (1-2) sebagai fase penyalaan dan propagasi dimana pembakaran belum stabil. Yang membedakan diantara kedua alat tersebut adalah konsentrasi O_2 dalam DTF lebih cepat bereaksi dengan partikel batubara oleh karena beberapa faktor antara lain :

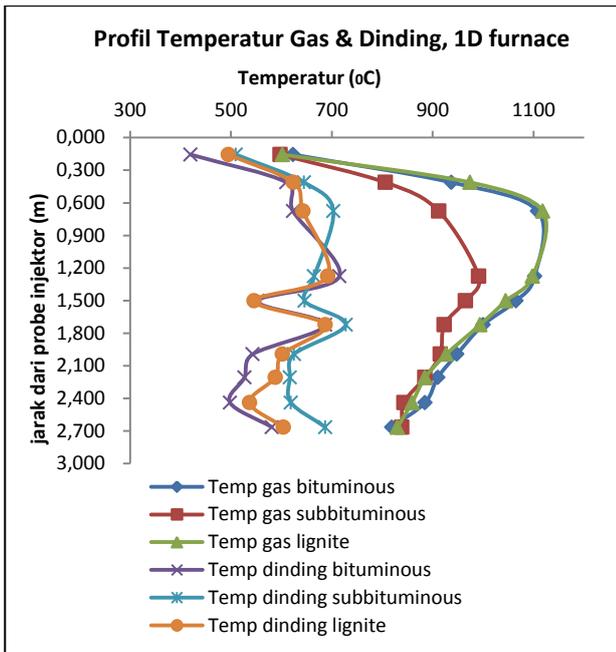
lingkungan temperatur relatif tinggi dan merata, udara yang digunakan sebagai oksidiser dipanasi hingga temperatur $180\ ^\circ C$, serta jumlah laju alir massa batubara relatif kecil.



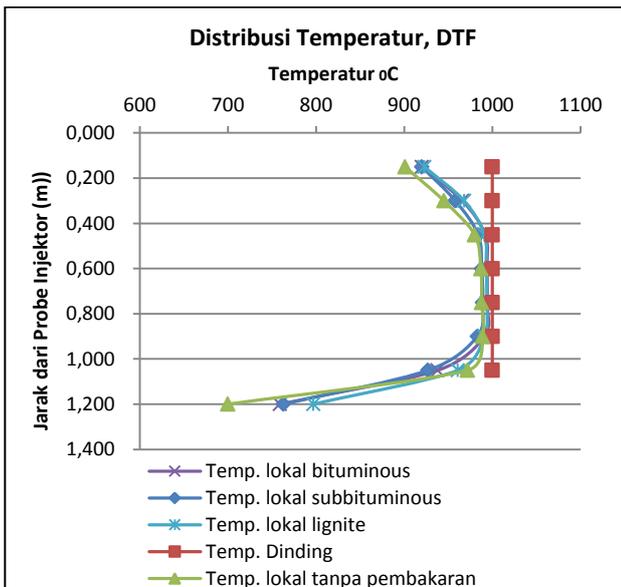
Gambar 5. Profil konsentrasi O_2 , CO_2 DTF

2. Distribusi Temperatur

Pada 1D *furnace* distribusi temperatur lokal gas lebih tinggi daripada distribusi temperatur dinding. Hal ini dikarenakan tungku 1D memperoleh panasnya berasal dari kekontinyuan laju umpan batubara sampel itu sendiri. Gradien temperatur lokal sangat besar yaitu antara $600\ ^\circ C$ - $1100\ ^\circ C$ sedangkan temperatur dinding antara $400\ ^\circ C$ - $650\ ^\circ C$. Dalam tungku DTF temperatur heater diset pada $1000\ ^\circ C$. Hasil distribusi temperatur pembakaran sampel dalam DTF menunjukkan temperatur dinding masih lebih tinggi daripada temperatur lokal.



Gambar 6. Profil distribusi temperatur 1D furnace



Gambar 7. Profil distribusi temperatur DTF

3. Korelasi Hasil Ignition Time dan Ignition Delay pada DTF dan 1D Furnace

Data profil temperatur dan komposisi gas hasil eksperimen digunakan sebagai masukan dalam perhitungan waktu penyalaan dan waktu keterlambatan penyalaan. Hasil waktu penyalaan dan keterlambatan waktu penyalaan menunjukkan konsisten terhadap fuel ratio sampel batubara, dimana batubara bituminous memiliki fuel ratio paling besar diikuti batubara lignite dan subbituminous. Hasil keseluruhan waktu penyalaan dan keterlambatan penyalaan

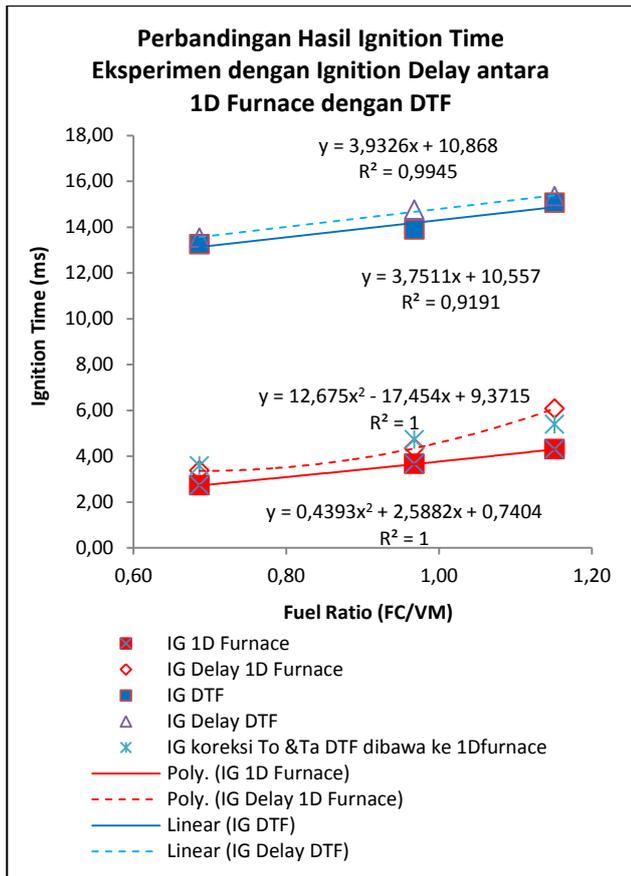
menunjukkan pada DTF cenderung lebih besar dibandingkan hasil 1D furnace.

Tabel 2. Hasil penyalan *Drop Tube Furnace* & 1D furnace serta analisis keterlambatan waktu penyalaan

Parameter	DTF		
	<i>Bituminou</i> <i>s</i>	<i>Subbituminou</i> <i>s</i>	<i>Lignit</i> <i>e</i>
IG time , milisecon d	15.06	13.25	13.89
IG delay, milisecon d	15.35	13.54	14.75

Parameter	1D furnace		
	<i>Bituminou</i> <i>s</i>	<i>Subbituminou</i> <i>s</i>	<i>Lignit</i> <i>e</i>
IG time , milisecon d	4.30	2.72	3.66
IG delay, milisecon d	6.08	3.36	4.35

Pada gambar 8 grafik perbandingan hasil *ignition time* antara 1D furnace dengan DTF dengan menggunakan metode eksperimen dan metode *ignition delay* menunjukkan tren kecenderungan yang sama yaitu semakin kecil nilai *fuel ratio* sampel maka akan semakin singkat waktu penyalaannya. Mengenai hasil *ignition time*, DTF memiliki kecenderungan lebih lambat daripada 1D furnace, hal ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain: temperatur gas dalam tungku dan konsentrasi O₂ antara kedua alat berbeda. Kondisi temperatur gas pada 1D furnace peak pada 1100 °C cenderung lebih tinggi daripada DTF sekitar 960 °C akibat tungku 1D memiliki thermal inersia yang besar disebabkan laju *flowrate* massanya batubara relatif besar. Selain itu konsentrasi O₂ pada DTF cenderung minim. Kedua faktor tersebut yang menyebabkan *ignition time* DTF lebih lambat daripada 1D furnace. Berdasarkan hasil penelitian Khatami *et al* [15] pada penyalaan sampel *bituminous* menunjukkan perbandingan tren keterlambatan waktu penyalaan batubara berdasarkan variasi fraksi O₂, dimana dengan semakin minimnya konsentrasi O₂ maka semakin besar waktu keterlambatan penyalaan.



Gambar 8. Perbandingan hasil *ignition time* eksperimen dan *ignition time delay* antara 1D *furnace* dan DTF

Kesimpulan

Dari hasil eksperimen karakterisasi pembakaran didalam 1D *furnace* dan DTF dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil *ignition time* dan *ignition delay time* pada masing-masing alat DTF dan 1D *furnace* memiliki pola tren yang sama terhadap fuel ratio batubara.
2. Hasil *ignition time* pada DTF cenderung lebih lambat dibanding tungku 1D, dimana penyalaan DTF terjadi pada 13.25-15.06 ms dan 1D terjadi pada 2.72-4.30 ms, hal ini dipengaruhi oleh faktor *fluks thermal* inersia 1D yang besar, serta dipengaruhi juga oleh minimnya konsentrasi O₂ dalam DTF.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan oleh Laboratorium uji pembakaran batubara Balai Besar Teknologi Energi (B2TE-BPPT) sehingga memungkinkan penelitian ini dilaksanakan.

Referensi

- [1]. J.B. Howard, R.H. Essenhigh, *Combust. Flame*, 9 (1965), pp. 337–339
- [2]. J.B. Howard, R.H. Essenhigh, *Proc. Combust. Inst.*, 11 (1967), pp. 399–408
- [3]. G.G. de Soete, *Rev. Inst. Franc. Petr.*, 37 (1981), pp. 403–530
- [4]. M. Chen, L. Fan, R.H. Essenhigh, *Sympos. Combust.*, 20 (1) (1985), pp. 1513–1521
- [5]. R.H. Essenhigh, M.K. Mirsa, D.W. Shaw, *Combust. Flame*, 77 (1989), pp. 3–30
- [6]. K. Annamalai, P. Durbetaki, *Combust. Flame*, 29 (1977), pp. 193–208
- [7]. X. Du, K. Annamalai, *Combust. Flame*, 97 (1994), pp. 339–354
- [8]. M.B. Toftegaard, J. Brix, P.A. Jensen, P. Glarborg, A.D. Jensen, *Oxy-fuel combustion of solid fuels*, *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 581–625.
- [9]. T.F. Wall, R.P. Gupta, V.S. Gururajan, D. Zhang, *Fuel*, 70 (9) (1991), pp. 1011–1016
- [10]. M.B. Toftegaard, J. Brix, P.A. Jensen, P. Glarborg, A.D. Jensen, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 36 (5) (2010), pp. 581–625
- [11]. H. Liu, R. Zailani, B.M. Gibbs, *Fuel*, 84 (7–8) (2005), pp. 833–840
- [12]. C.R. Shaddix, A. Molina, *Proc. Combust. Inst.*, 32 (2) (2009), pp. 2091–2098
- [13]. R.K. Rathnam, L.K. Elliott, T.F. Wall, Y. Liu, B. Moghtaderi, *Fuel Process. Technol.*, 90 (2009), pp. 797–802
- [14]. B2TE-BPPT, 2013, “Coal Combustion Test Report”
- [15]. Law CK, 2006, *Combustion Physics*. New York: Cambridge University.
- [16]. Khatami R, Stivers C, Levendis YA, *Combust. Flame*, 2012.