

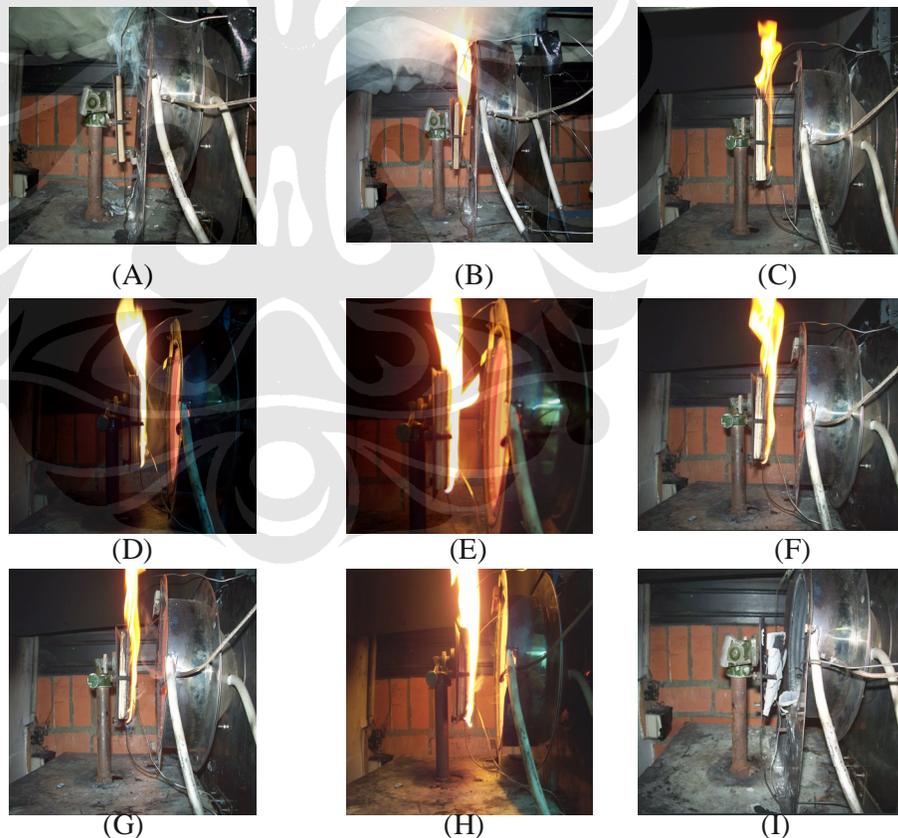
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini terbagi menjadi beberapa sub-bab yang telah menjadi batasan masalah dalam penelitian ini, diantaranya :

1. Pengamatan Visual Terhadap Kayu yang Terbakar.
2. Analisa Pola Penyebaran Api (*Flame Spread*)
3. Analisa Laju Pelepasan Kalor (*Heat Release Rate*) dan Analisa Konsentrasi Oksigen
4. Analisa Laju Penurunan Massa (*Mass Loss Rate*)

IV.1 PENGAMATAN VISUAL



Gambar 4.1. Pengamatan visual pembakaran kayu (A)penerimaan radiasi dan penguapan *moisture*; (B)*ignition*; (C)kayu terbakar serta terjadi crack; (D)kayu terbakar; (E)permukaan terbakar penuh; (F)permukaan terbentuk *char*; (G)api mulai menuju permukaan belakang (H)api menyebar kebelakang; (I)pembakaran selesai dan terbentuk *char*.

Sampel kayu pada awalnya menerima sejumlah panas radiasi dari heater yang telah disetting dengan temperatur tertentu. Setelah beberapa saat, sampel kayu akan mulai mengeluarkan uap air (*moisture*) yang dikandungnya. Pada proses pengeluaran uap air ini, sampel tidak dapat terbakar meskipun telah dipicu dengan *igniter* selama beberapa kali dan laju penurunan massanya bersifat stabil serta cenderung rendah. Pada saat yang sama, permukaan sampel bagian depan mulai mengalami keretakan. Kemudian setelah tahap penguapan uap air, sampel mulai mengeluarkan *volatile matter*-nya. Pada tahap ini, proses pembakaran sampel dengan menggunakan *igniter* dilakukan dan sampel menyala. Pembakaran sampel kayu ini membentuk *char* pada bagian permukaan yang berangsur-angsur akan menebal serta membuat retakan-retakan pada tahap sebelumnya menjadi semakin dalam. Semakin dalamnya retakan ini memudahkan *volatile matter* yang lain keluar dari sampel kayu tersebut. Karena perbedaan kandungan kelembaban di setiap bagian pada kayu sampel maka bagian sisi-sisi yang bersentuhan langsung dengan oksidiser cenderung melengkung ke depan (mendekati heater), karena *moisture*-nya telah terlebih dahulu menguap dibandingkan dengan bagian tengah. Hal ini sesuai dengan hubungan kelembaban dengan penyusutan dan defleksi pada kayu [Simpson, 1999]. Akan tetapi seiring dengan penebalan lapisan *char*, *moisture* dan *volatile matter* akan semakin sulit menembus *char* dan keluar dari kayu, sehingga keduanya mencari jalan termudah dengan keluar melalui arah urat kayu. Pernyataan ini ditunjukkan oleh fenomena pada saat pembakaran berupa semburan (*jetting*), baik berupa *moisture* (tanpa nyala api), maupun berupa *volatile* (dengan nyala api), pada arah urat kayu. Hal ini berlangsung secara bergantian di sisi samping sampel kayu. Proses semburan dari *volatile* ini menjadikan nyala api pembakaran besar kembali setelah nyalanya mengecil untuk beberapa saat sejak penyalan pertama.

Pembakaran dari sebagian besar permukaan dan sisi-sisi sampel kayu akan membuat *char* terbentuk di hampir semua bagian kayu. Akibatnya sisa *moisture* dan *volatile matter* hanya bisa keluar dengan leluasa melalui bagian belakang sampel yang belum terbakar, dan hal ini menyebabkan sampel mulai melengkung ke depan. *Volatile matter* yang keluar dari bagian belakang tersebut pada akhirnya akan menyala apabila konsentrasi yang keluar tersebut cukup dan terpicu oleh radiasi panas akibat pembakaran bagian lainnya. Pembakaran sampel kayu ini berlangsung sampai *volatile matter* menguap seluruhnya yang ditandai dengan mengecilnya nyala api, serta semua bagian dari sampel telah menjadi *char*.

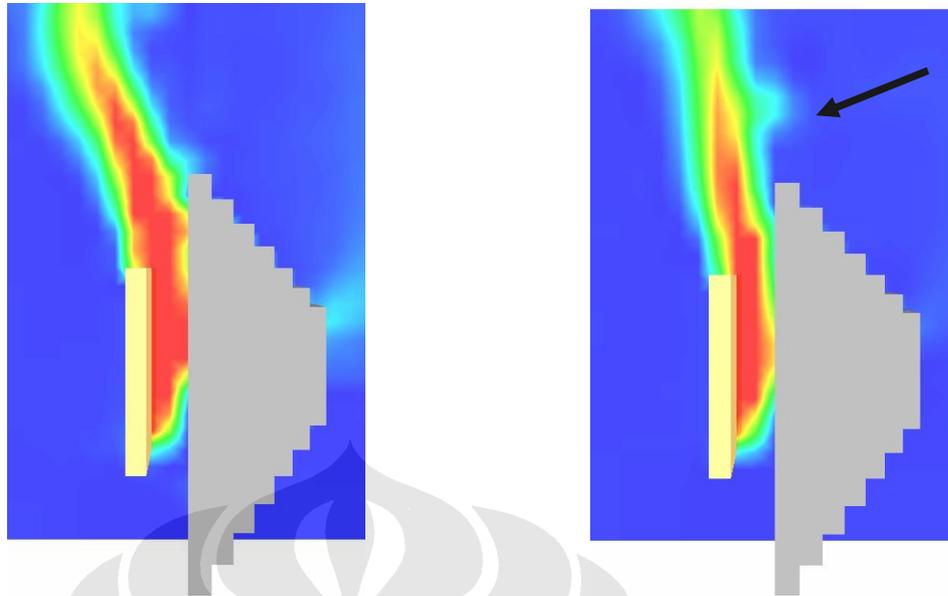
Hasil pengamatan visual yang diperoleh untuk setiap jenis sampel pada umumnya sama, perbedaannya terletak dari waktu serta tempat terjadinya fenomena-fenomena tersebut pada kayu sampel. Hasil pengamatan visual ini sejalan dengan teori serta pengamatan lain yang telah dilakukan sebelumnya.

Selama proses eksperimen terdapat beberapa fenomena menarik yang terjadi. Dimana fenomena yang terjadi berupa pergerakan api yang seolah – olah terdorong oleh suatu gaya yang ditimbulkan oleh kalor dari heater, sehingga selama heater menyala api tidak bergerak lurus vertikal, melainkan membentuk sebuah sudut, seperti terlihat dari gambar berikut :



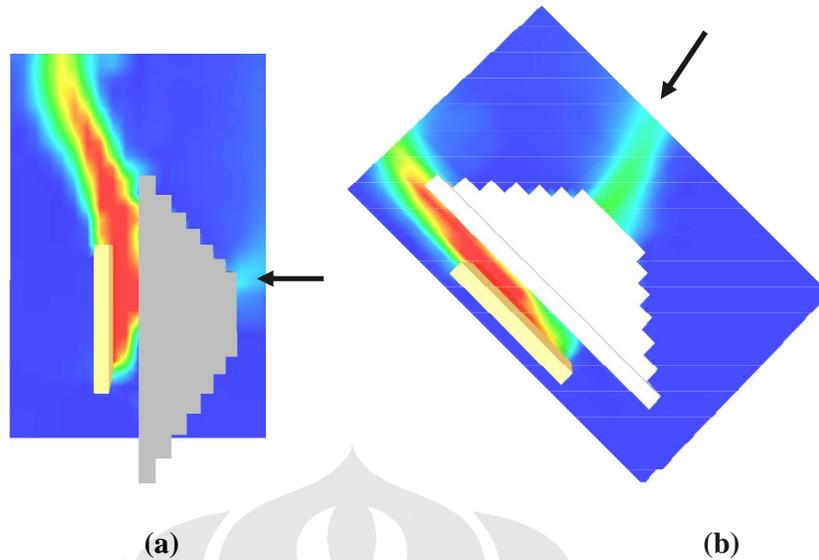
Gambar 4.2 Fenomena api terdorong oleh kalor dari heater

Dari gambar dapat dilihat bahwa panah berwarna putih menunjukkan api terlihat terdorong oleh suatu gaya. Dimana gaya tersebut berasal dari kalor yang dihasilkan oleh heater, untuk membuktikan gaya dorong tersebut berasal dari kalor yang dihasilkan heater maka dilakukan simulasi dengan FDS, yaitu heater dimatikan ditengah – tengah eksperimen, seperti terlihat dalam gambar berikut ini :



Gambar 4.3 (a) heater menyala sampai selesai ; (b) heater sudah dimatikan ditengah – tengah eksperimen.

Dari gambar diatas terlihat bahwa setelah heater dimatikan (gambar b) ternyata nyala api bergerak vertikal lurus dan gaya dorong mulai tidak terlihat, hal ini membuktikan bahwa pada saat heater menyala akan memberi pengaruh terhadap gerakan api yang timbul. Fenomena lain yang terjadi adalah pada saat eksperimen dengan arah vertikal dan arah miring ternyata kalor konveksi yang keluar pada lubang belakang heater mempunyai intensitas yang berbeda, dimana pada arah vertikal kalor konveksi yang keluar lewat lubang belakang heater lebih sedikit dibanding dengan arah miring. Hal ini sudah penulis uji dengan memasang termokopel dilubang tersebut, hasilnya pada arah vertikal temperature yang keluar lewat lubang gelakang heater sebesar $\pm 68^{\circ}$ C, sedangkan pada arah miring temperaturenya sebesar $\pm 90^{\circ}$ C. Untuk membuktikan lebih lanjut fenomena tersebut juga telah dilakukan simulasi dengan FDS sebagai berikut :



Gambar 4.4 (a) arah vertikal; (b) arah miring.

Berdasarkan data tersebut, dengan semakin besar kalor konveksi yang keluar lewat lubang belakang heater, maka besarnya akumulasi kalor radiasi dan kalor konveksi yang mengenai permukaan sampel akan semakin kecil. Sehingga fenomena tersebut akan mempengaruhi waktu nyala pada arah vertikal dan arah miring.

IV.2 ANALISA POLA PENYEBARAN API (*FIRE SPREAD*)

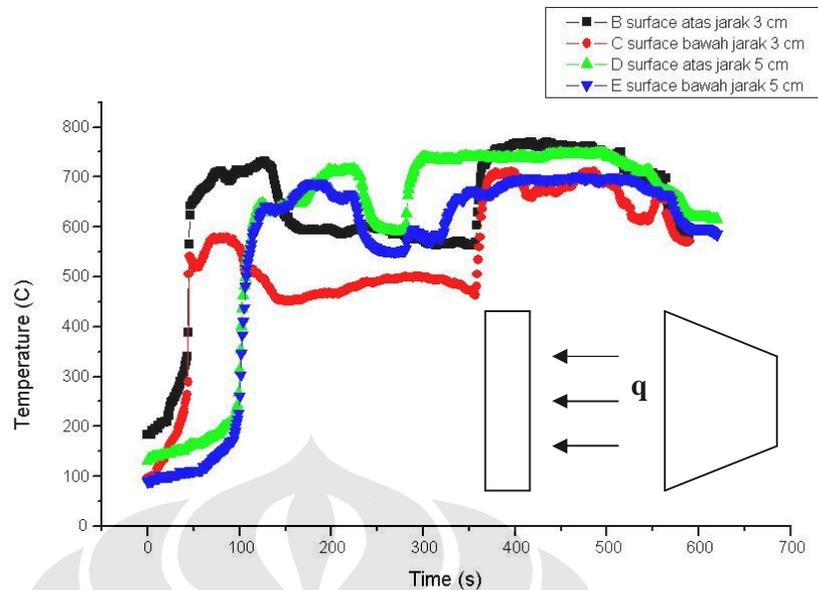
Pola penyebaran api merupakan sesuatu hal yang penting dan menarik untuk dipelajari terutama proses nyala api pada benda padat. Tidak seperti kolam api, orientasi permukaan benda padat bisa diubah-ubah, yang tentunya dapat memberi pengaruh yang signifikan terhadap perilaku api. Secara umum, permukaan padat dapat terbakar dengan sudut orientasi berapapun, namun penyebaran api akan sangat cepat bila terbakar pada permukaan benda padat yang vertikal [Drysdale, 2003].

Dalam penelitian ini dilakukan eksperimen dengan membakar sampel kayu lapis dengan ketebalan 10 cm dengan tiga variasi, yaitu : variasi fluks kalor, variasi jarak sampel dengan heater, dan variasi arah orientasi heater terhadap kayu. Dalam percobaan fluks kalor yang digunakan ada dua variasi, yaitu fluks kalor sebesar 27 kW/m² yang diperoleh dengan memberikan kalor radiasi dan konveksi dengan menggunakan heater yang disetting pada temperature 600° C dan fluks kalor sebesar 16,4 kW/m² yang diperoleh dengan memberikan kalor radiasi dan konveksi dari heater dengan mensettingnya pada temperature 500° C. Penulis memilih kedua fluks

tersebut karena fluks kalor 27 kW/m^2 merupakan fluks kalor maksimal yang dapat diberikan oleh alat uji kalorimeter api yang ada di laboratorium sehingga dengan memberikan fluks yang maksimal akan memudahkan proses *ignition* dan pengambilan data. Variasi juga dilakukan terhadap jarak sampel terhadap heater, dimana dalam eksperimen variasi terhadap jarak juga dilakukan dengan dua variasi, yaitu jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm dan jarak heater dengan sampel sejauh 5 cm. Pemilihan variasi jarak tersebut dipilih berdasarkan pertimbangan untuk mempermudah mempercepat terjadinya *ignition* serta memudahkan pengambilan data, karena variasi jarak yang semakin jauh akan memperpanjang waktu *ignition* dan kecepatan proses pembakaran. Selain itu jarak 3 cm dan 5 cm dipilih untuk memudahkan pemasangan termokopel dan pemasangan sampel. Kemudian variasi yang terakhir dilakukan terhadap arah orientasi sampel terhadap heater, dimana dalam eksperimen ini variasi terhadap orientasi sampel terhadap heater dibedakan menjadi tiga arah, yaitu arah vertikal, arah miring (45°), dan arah horizontal dengan arah radiasi dari bawah. Pemilihan terhadap ketiga orientasi tersebut berdasarkan belum adanya eksperimen yang dilakukan terhadap sampel kayu dengan menggunakan ketiga variasi tersebut. Selama ini eksperimen yang sering dilakukan adalah dengan arah horizontal dengan arah radiasi dari bawah, sehingga hal tersebut mendorong penulis untuk melakukan eksperimen dengan ketiga variasi orientasi tersebut.

IV.2.1 Analisa Pola Penyebaran Api (*Flame Spread*) yang Dipengaruhi oleh Jarak

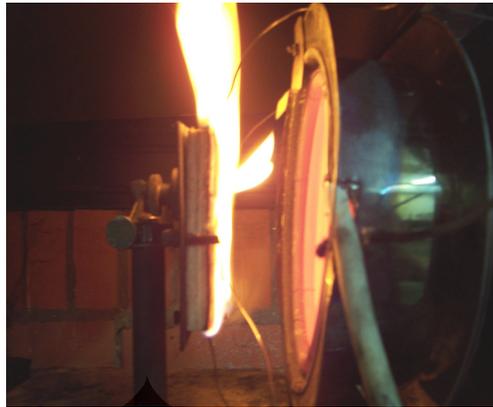
Grafik dibawah ini menunjukkan penyebaran temperature yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m^2 dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm dan 5cm..



Gambar 4.5 Perbandingan penyebaran temperature pada arah vertikal dengan variasi jarak 3cm dan 5cm dengan fluks kalor sebesar 27 kW/m^2

Pada gambar 4.5 diatas sumbu menunjukkan perbandingan antara temperature dengan waktu, dimana sumbu horizontal merupakan waktu dalam satuan detik dengan skala 100 detik, sedangkan pada sumbu vertikal menunjukkan temperature yang terjadi dengan satuan derajat celcius dan skala 50° C . Grafik diatas menunjukkan perbandingan penyebaran temperature yang terjadi pada arah vertikal dengan temperature 600° C (fluks 27 kW/m^2) dengan jarak sampel 3cm dan 5 cm dari heater.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa dengan jarak sampel 3 cm mempunyai waktu nyala (*time ignition*) yang lebih cepat dibandingkan dengan jarak sampel 5cm. Dimana pada pembakaran dengan jarak sampel 3cm waktu nyala yang terjadi pada detik ke – 45 sedangkan pada pembakaran dengan menggunakan jarak sampel 5 cm waktu nyala (*time ignition*) lebih lama yaitu 100 detik. pada proses pembakaran dengan jarak sampel 3 cm fluks yang diterima oleh permukaan sampel lebih besar dibandingkan dengan sampel dengan jarak 5cm. Sehingga untuk mencapai nilai kalor kritis (*critical heat flux*) yang merupakan nilai fluks kalor terkecil yang diterima oleh sampel untuk dapat terbakar pada jarak sampel 3 cm lebih cepat dibandingkan dengan jarak sampel 5cm. Oleh karena itu, waktu nyala (*time ignition*) pada jarak yang lebih dekat dengan fluks yang sama akan lebih cepat.

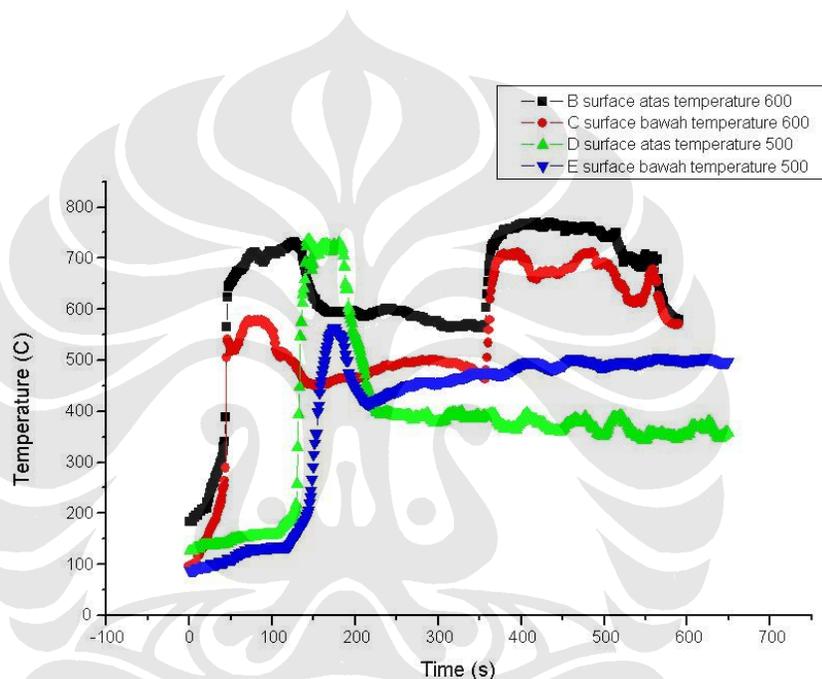


Gambar 4.6 Pengamatan visual kondisi nyala api

Dilihat dari grafik, pada permukaan atas dengan kedua variasi jarak diatas menunjukkan temperature lebih tinggi atau meningkat lebih cepat dibandingkan dengan kenaikan temperature pada permukaan bawah. Sehingga dapat diketahui bahwa untuk orientasi vertikal, penyebaran api dimulai dari permukaan sebelah ujung atas yang ditandai dengan kenaikan temperature lebih awal kemudian diikuti dengan kenaikan temperature pada permukaan sebelah bawah. Maka sesuai dengan teori bahwa penyebaran api keatas (*councurrent*) lebih cepat daripada penyebaran api kebawah (*counter current*). Hal ini terjadi karena pada *concurrent* lidah api dan udara panas mengalir ke arah yang sama, memberikan kontribusi panas ke daerah yang belum terbakar dan menyebabkan api mudah menjalar ke daerah tersebut [Drysdale , 2004]. Ketika bahan bakar (*volatile matters*) yang terdapat pada bagian atas habis, maka api akan menyebar kebagian bawah untuk mencari bahan bakar yang tersedia.

IV.2.2 Analisa Pola Penyebaran Api (*Flame Spread*) yang Dipengaruhi oleh Fluks Kalor

Grafik dibawah ini menunjukkan penyebaran temperature yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m^2 (600°C) dan fluks kalor sebesar $14,6 \text{ kW/m}^2$ (500°C) dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm.



Gambar 4.7 Perbandingan penyebaran temperature pada arah vertikal dengan variasi fluks kalor sebesar 27 kW/m^2 dan $14,6 \text{ kW/m}^2$ dengan jaeak sampel 3cm

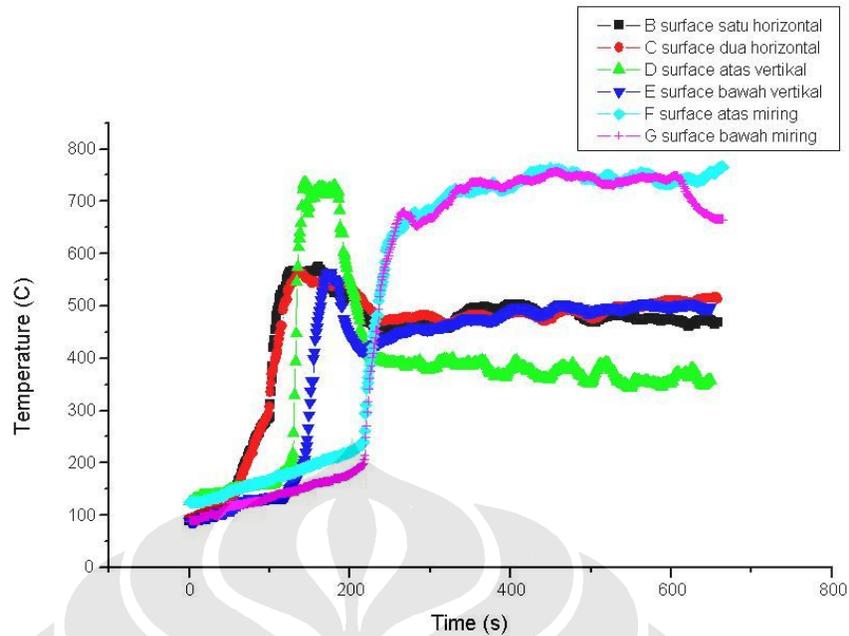
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa perbedaan yang paling jelas diantara kedua variasi diatas adalah waktu dicapainya fluks kalor kritis yang berhubungan dengan waktu nyala (*time ignition*). Dimana untuk fluks kalor sebesar 27 kW/m^2 (600°C) waktu nyala yang dibutuhkan adalah selama 45 detik, sedangkan untuk fluks kalor sebesar $14,6 \text{ kW/m}^2$ (500°C) waktu yang dibutuhkan untuk nyala adalah selama 130 detik. Dengan besaran fluks kalor yang diberikan oleh heater terhadap sampel yang berbeda besarnya walaupun jarak sampel sama, maka fluks yang diterima oleh

sampel pun akan berbeda besarnya sehingga akan mempengaruhi pencapaian *critical heat flux* yang berpengaruh pada waktu nyala.

Dilihat dari grafik diatas, temperature yang terdapat pada permukaan ujung atas mempunyai nilai yang lebih tinggi dan meningkat lebih awal dibandingkan dengan temperature yang terdapat pada permukaan sebelah bawah. Sehingga dari grafik dapat dilihat bahwa api menyala pada permukaan sampel sebelah atas yang kemudian nyala api menyebar kepermukaan sebelah bawah. Fenomena penyebaran ini hampir sama dengan pembahasan penyebaran api dengan variasi jarak sampel. Namun yang membedakan dari grafik variasi fluks diatas adalah *rate of flame spread* dimana pada fluks kalor yang lebih besar akan mempunyai laju penyebaran api yang lebih besar dibandingkan dengan fluks kalor yang lebih kecil, jadi ada fluks kalor yang lebih besar akan menyebabkan material lebih cepat habis. Hal ini sesuai dengan teori, dimana dengan memberikan fluks kalor radiasi akan meningkatkan laju penyebaran api [Drysdale, 2003]. Hal ini juga diperkuat dengan hasil eksperimen dengan memberikan fluks kalor yang lebih besar, maka akan meningkatkan laju penyebaran api, apalagi jika fluks kalor diberikan dalam waktu yang lama [Drysdale, 2003].

IV.2.3 Analisa Pola Penyebaran Api (*Flame Spread*) yang Dipengaruhi oleh Arah Orientasi Kayu

Grafik dibawah ini menunjukkan penyebaran temperature yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan fluks kalor sebesar $16,4 \text{ kW/m}^2$ ($500 \text{ }^\circ\text{C}$) dan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm. Dalam grafik dibawah ini variasi dilakukan terhadap arah orientasi sampel terhadap heater, yaitu arah vertikal, arah miring, dan arah horizontal.

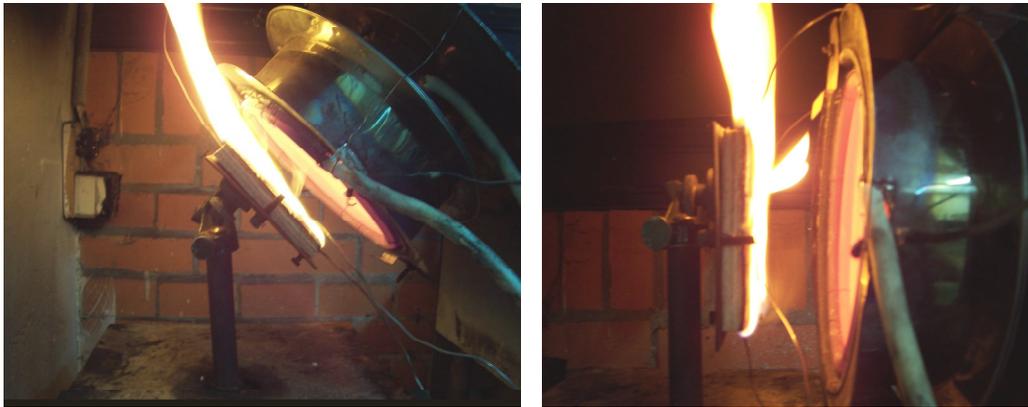


Gambar 4.8 Perbandingan penyebaran api dengan variasi arah sampel terhadap heater

Grafik diatas merupakan perbandingan penyebaran api dalam berbagai orientasi sampel terhadap heater. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada arah sampel vertikal dan arah sampel miring kenaikan temperature terlebih dahulu terjadi pada permukaan sebelah atas. Kemudian pada pertengahan proses pembakaran temperature permukaan bawah pada arah vertikal dan miring memotong temperature permukaan sebelah atas. Dengan demikian pada arah vertikal dan arah miring pola penyebaran api mempunyai kemiripan, yaitu pada awal pembakaran api menyala pada bagian permukaan atas. Pada arah vertikal dan arah miring api cenderung menyala pada bagian ujung, hal ini diakibatkan oleh faktor kalor konveksi. Dimana udara yang terkena kalor konveksi mempunyai densitas yang lebih rendah dibanding udara dingin, sehingga selalu bergerak keatas. Oleh karena itu, pada arah vertikal dan miring, kalor koveksi yang bergerak keatas hanya mengenai bagian permukaan sampel ujung atas sehingga kalor yang terkonsentrasi lebih dominan pada bagian ujung atas yang menyebabkan nyala api pertama kali timbul pada permukaan atas. Kemudian ketika bahan bakar (*volatile matters*) pada bagian atas habis, api menyebar kebagian bawah yang masih tersedia bahan bakar (*volatile matters*). Sedangkan pada orientasi sampel horizontal dengan arah radiasi dari bawah fenomena

penyebaran api berbeda dengan arah vertikal dan arah horizontal, dimana pada arah horizontal seperti yang ditunjukkan pada grafik, temperature permukaan satu dan permukaan mempunyai nilai yang sama dan naik hampir bersamaan pula. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pada arah horizontal api menyala pada permukaan bagian tengah, kemudian menyebar secara bersama – sama kebagian pinggir. Pada arah horizontal api menyala pertama kali pada bagian tengah permukaan sampel karena kalor radiasi dan seluruh kalor konveksi bergerak keatas dan mengenai permukaan sampel dan terpuasar pada bagian tengah, sehingga akumulasi kalor terjadi pada bagian permukaan tengah sampel. Setelah menyebar kebagian tepi, pada arah horizontal api mulai membakar permukaan sampel sebelah atas yang tidak terkena radiasi langsung.

Dari grafik, perbedaan yang mencolok pada ketiga arah orientasi sampel diatas adalah waktu nyala (*time ignition*). Dimana dari grafik dapat dilihat bahwa pada arah horizontal mempunyai waktu nyala (*time ignition*) paling cepat yaitu selama ± 100 detik, kemudian arah vertikal dengan waktu ± 130 detik dan paling lama arah miring selama ± 220 detik.



(a)

(b)



(c)

Gambar 4.9 (a) Pengamatan visual arah miring, (b) Pengamatan visual arah vertikal, (c) Pengamatan visual arah horizontal

Pada arah horizontal dengan arah radiasi dari bawah mempunyai waktu nyala yang lebih cepat, hal ini dikarenakan pada arah radiasi dari bawah, maka komponen kalor yang mengenai permukaan sampel adalah kalor radiasi dan seluruh kalor konveksi yang bergerak keatas akibat densitas udara panas yang terkena kalor konveksi lebih ringan dibanding udara yang lebih dingin. Sehingga akumulasi kalor yang diterima oleh permukaan sampel sangat besar, sehingga untuk mencapai fluks kalor kritis (*critical heat flux*) memerlukan waktu lebih cepat, sehingga nyala api juga terjadi paling cepat dibanding arah orientasi yang lainnya. Pada arah orientasi vertikal dan miring waktu nyala terjadi lebih lama karena faktor kalor konveksi. Dimana pada arah vertikal dan miring kalor konveksi yang terjadi banyak yang hilang atau tidak mengenai permukaan sampel sehingga akumulasi kalor yang diterima sampel tidak sebanyak yang terjadi pada arah horizontal. Seperti yang sudah dijelaskan diatas, bahwa kalor konveksi selalu bergerak keatas karena mempunyai densitas yang ringan sehingga pada saat keluar dari heater, kalor konveksi hanya mengenai permukaan sampel sebelah atas dan tidak terlalu besar, sehingga akumulasi yang kalor juga tidak terlalu besar. Pada arah vertikal lebih cepat nyala karena pada arah vertikal fluks kalor yang diterima permukaan sampel lebih besar dibanding arah miring sehingga untuk mencapai *critical heat flux* lebih cepat. Sedangkan pada arah miring fluks kalor yang diterima permukaan sampel lebih kecil karena kalor konveksi yang timbul banyak yang keluar lewat lubang belakang heater. Sebagai perbandingan penulis telah mengambil data mengenai temperature yang keluar lewat lubang belakang heater untuk kedua orientasi tersebut, dimana untuk arah miring temperature yang keluar lewat lubang belakang heater sebesar $\pm 90^{\circ} \text{C}$ sedangkan untuk arah vertikal temperature yang keluar lewat lubang belakang heater adalah sebesar $\pm 68^{\circ} \text{C}$ (lihat gambar 4.4). Dengan demikian kalor konveksi yang permukaan sampel pada arah miring lebih kecil dibandingkan arah vertikal, sehingga untuk mencapai *critical heat flux* juga lebih lama yang menyebabkan waktu nyala (*time ignition*) pada arah miring juga lebih lama. Oleh sebab itu, makin besar fluks yang diterima sampel maka laju penyebaran api lebih cepat, sesuai dengan teori bahwa kecepatan penyebaran api pada arah vertikal sebesar 46 – 74 mm/s jauh lebih cepat dibandingkan dengan arah miring yang hanya 11,2 mm/s [Drysdale , 2003].

Berkut ini data kecepatan penyebaran api pada beberapa variasi jarak sampel, arah orientasi, dan fluks kalor.

Tabel 4.1 Kecepatan penyebaran api

Heater (°C)	Jarak sampel-heater (cm)	Orientasi	Kecepatan penyebaran api (mm/s)
600	3	45°	8
		90°	10
		180°	13.3
	5	45°	5
		90°	6,67
		180°	10
500	3	45°	2.67
		90°	3
		180°	8
	5	45°	2.3
		90°	2.5
		180°	5

Dari data di atas dapat dilihat bahwa pada temperatur dan jarak sampel yang sama, sampel dengan arah orientasi horizontal memiliki kecepatan penyebaran api paling cepat. Hal ini dapat terjadi karena penyebaran api pada sampel untuk orientasi horizontal dipengaruhi oleh faktor konveksi dan radiasi. Sedangkan untuk orientasi lainnya pengaruh konveksi sangat kecil sehingga penyebaran apinya lebih dipengaruhi oleh faktor radiasinya saja.

IV.3 ANALISA LAJU PELEPASAN KALOR (*HEAT RELEASE RATE*)

Laju pelepasan kalor (*Heat Release Rate*) adalah sejumlah energi yang dilepaskan oleh suatu benda ke lingkungan dengan satuan yang digunakan adalah kW/m². Metode pengukuran *Heat Release Rate* (HRR) yang dilakukan dengan menggunakan kalorimeter api adalah melalui metode konsumsi oksigen pada proses pembakaran. Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai HRR berdasarkan laju konsumsi oksigen adalah dengan menggunakan persamaan yang telah dituliskan dalam bab dasar teori. Berikut disajikan lagi persamaan untuk menghitung nilai HRR berdasarkan konsumsi oksigen yang digunakan pada pengujian dengan menggunakan kalorimeter api [24].

$$q = (3,1 \times 10^3) 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(0,2095 - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5 X_{O_2})}$$

dimana :

q = *heat release rate* (kW)

C = *calibration constant for O₂ consumption analysis* (m^{1/2} kg^{1/2} k^{1/2})

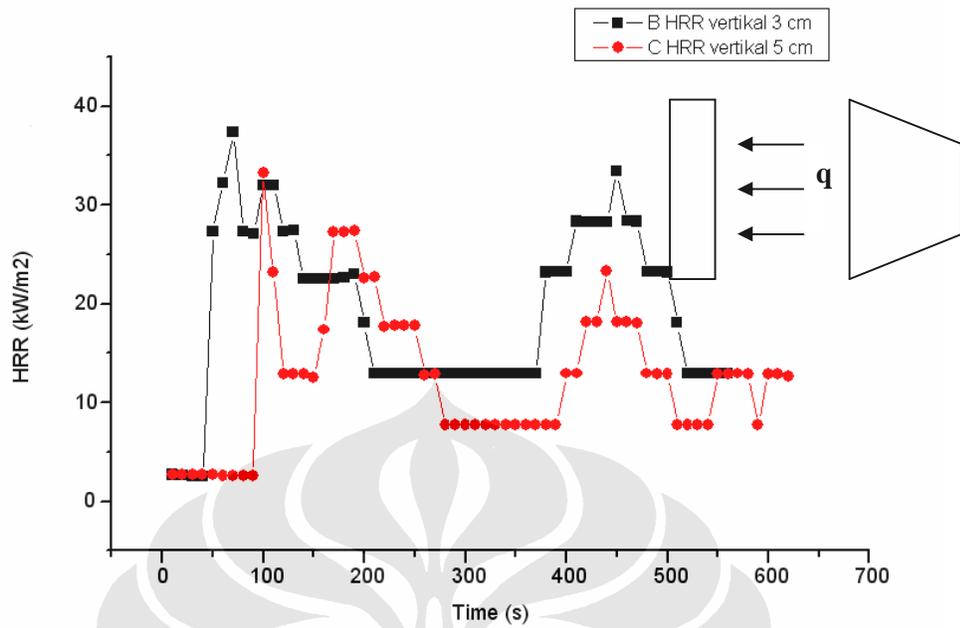
ΔP = *pressure drop across the orifice plate* (Pa)

T_e = *gas temperature at orifice plate* (K)

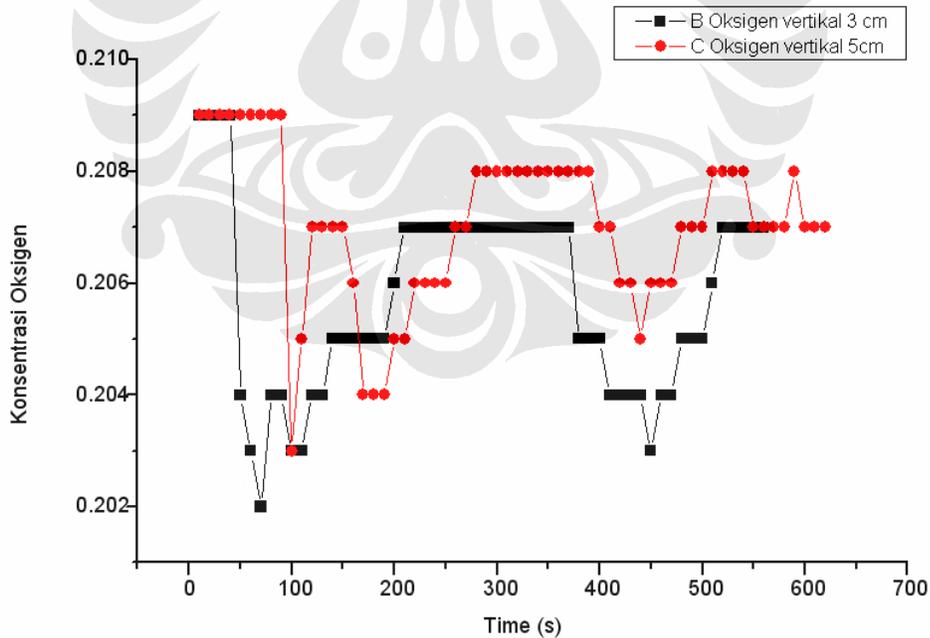
X_{O_2} = *measured mole fraction of O₂ in the exhaust air*

IV.3.1 Analisa Laju Pelepasan Kalor (*Heat Release Rate*) dengan Variasi Jarak Sampel

Grafik dibawah ini menunjukkan laju pelepasan kalor (*heat release rate*) yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm dan 5cm. Untuk menunjukkan hubungan laju pelepasan kalor dengan konsentrasi oksigen, maka dibawah ini juga disajikan grafik mengenai konsentrasi oksigen untuk variasi yang sama.



Gambar 4.10 Laju pelepasan kalor arah vertikal dengan jarak 3cm dan 5cm untuk fluks kalor 27 kW/m²



Gambar 4.11 Konsentrasi oksigen arah vertikal dengan jarak 3cm dan 5cm untuk fluks kalor 27 kW/m²

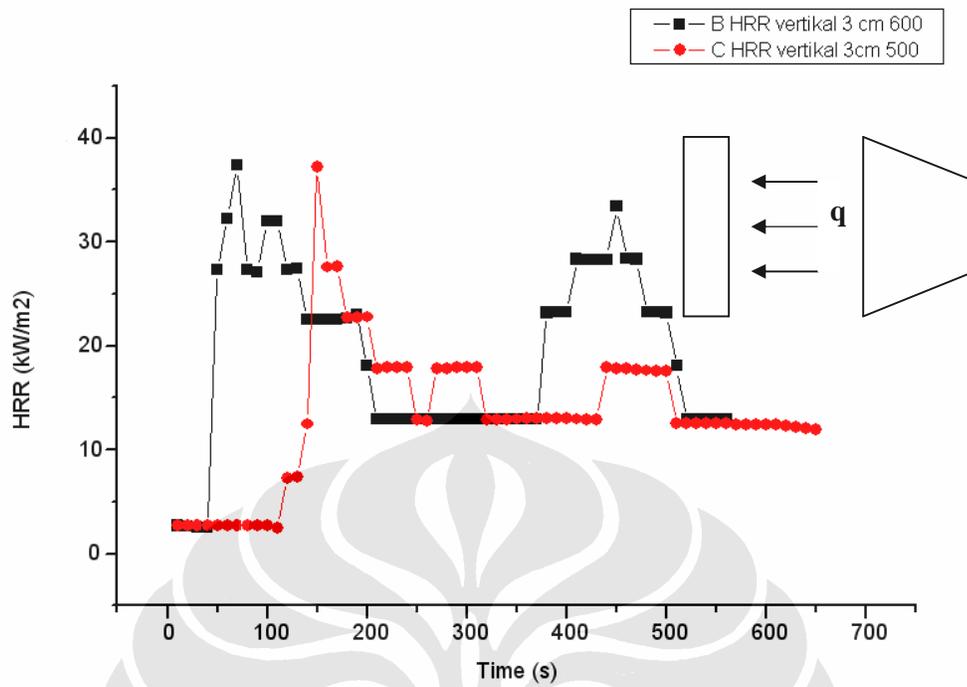
Sumbu horizontal pada Gambar 4.10 menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik. Sumbu vertikal menyatakan laju produksi kalor/*heat release rate* (dalam satuan kW/m²). Sedangkan gambar 4.11 menunjukkan grafik konsentrasi oksigen dengan sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik, sumbu vertikal menunjukkan konsentrasi oksigen yang sebenarnya. Bentuk grafik konsentrasi oksigen yang diperoleh merupakan hasil pengukuran dalam pembakaran kayu lapis (*plywood*) dengan menggunakan gas analyzer yang tercatat secara otomatis setiap 10 detik, sedangkan grafik laju produksi kalor merupakan hasil perhitungan berdasarkan data konsentrasi oksigen, tekanan orifice, dan temperature gas buang dengan menggunakan persamaan yang telah disebutkan diatas.

Pada grafik laju pelepasan kalor diatas dapat dilihat bahwa untuk jarak 3 cm dengan jarak 5 cm mempunyai perbedaan terutama pada besarnya nilai laju produksi kalor tertinggi (*peak heat release rate*) serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi tersebut. Akan tetapi pada grafik diatas keduanya diawali dengan pola mendatar yang menggambarkan laju produksi kalor pada saat awal proses pembakaran cenderung stabil dan nilainya rendah. Pada kondisi tersebut sampel hanya mengeluarkan *moisture* berupa asap putih, pada jarak 3 cm garis mendatar terjadi selama ± 70 detik, sedangkan pada jarak 5 cm waktu yang dibutuhkan lebih lama, yaitu ± 100 detik. Setelah melewati garis mendatar, kurva langsung naik tajam mencapai *peak heat release rate* sebesar 45 kW/m² untuk jarak 3 cm dan sebesar 35 kW/m² untuk jarak 5 cm. dengan demikian perbedaan jarak dapat mengakibatkan perbedaan nilai *peak heat release rate* yang dicapai oleh suatu material saat dibakar. Pada grafik laju pelepasan kalor diatas, setelah mencapai puncak tertinggi kurva langsung turun. Pada jarak 3 cm kurva sempat mengalami kestabilan pada tengah – tengah pembakaran, kemudian kembali naik ± 380 , hal ini terjadi karena pada waktu tersebut api kembali membesar dengan membakar bagian kayu yang belum terbakar, yaitu pada bagian kayu sebelah belakang walaupun kalor yang dilepaskan tidak sebesar puncak yang pertama. Sedangkan pada jarak 5 cm, kurva kembali naik pada detik 400 -500 walupun tidak setinggi pada jarak 3 cm.

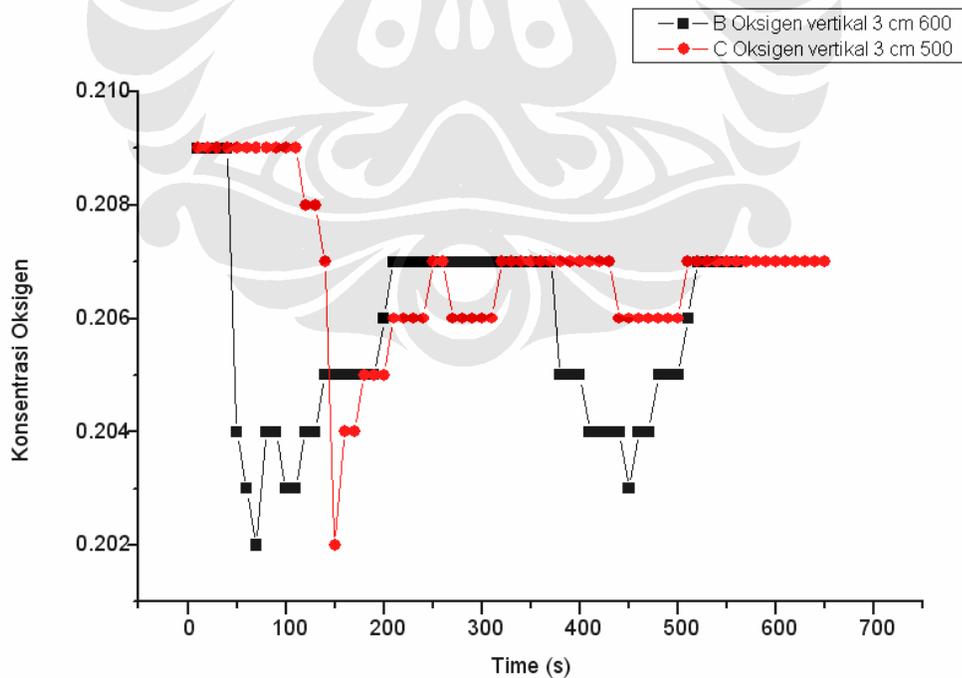
Pada grafik 4.11 menunjukkan konsentrasi oksigen untuk variasi yang sama dengan grafik laju pelepasan kalor yang berada di atasnya. Apabila dicermati grafik konsentrasi oksigen tersebut mempunyai korelasi yang berbanding terbalik dengan laju pelepasan kalor, hal ini sesuai dengan pernyataan Putri Dwithasari [2004]. Pada saat laju pelepasan kalor mencapai maksimum, konsentrasi oksigen yang terjadi ternyata turun drastis sampai konsentrasi 20,2% untuk jarak 3 cm dan 20,3% untuk jarak 5 cm, dimana pada kondisi tersebut nyala api mulai membesar. Sehingga semakin besar api menyala, makin besar pula laju pelepasan kalor yang terjadi, akan tetapi konsentrasi oksigen akan turun drastis. Seiring dengan turunnya laju pelepasan kalor, konsentrasi oksigen juga mulai stabil dan mendekati ke konsentrasi normalnya yaitu 20,7% untuk jarak 3 cm dan 20,8% untuk jarak 5 cm. Walaupun pada detik 400 - 500 konsentrasi oksigen keduanya sempat turun lagi mencapai 20,3% dan 20,5%, seiring membesarnya kembali nyala api. Disaat akhir proses pembakaran laju pelepasan kalor dan konsentrasi oksigen untuk kedua jarak tersebut cenderung stabil pada nilai 12 kW/m² dan konsentrasi oksigen 20,7% karena pada sampel telah terbentuk lapisan *char* yang cukup tebal dan kandungan karbon pada sampel mulai habis. Dengan demikian, perbedaan jarak sampel akan mempengaruhi waktu tercapainya konsentrasi oksigen paling minimum serta besarnya konsentrasi oksigen terkecil dalam pembakaran.

IV.3.2 Analisa Laju Pelepasan Kalor (Heat Release Rate) dengan Variasi Temperature

Grafik dibawah ini menunjukkan laju pelepasan kalor (*heat release rate*) yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m² dan 14,6 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm. Untuk menunjukkan hubungan laju pelepasan kalor dengan konsentrasi oksigen, maka dibawah ini juga disajikan grafik mengenai konsentrasi oksigen untuk variasi yang sama.



Gambar 4.12 Laju pelepasan kalor arah vertikal dengan jarak 3cm dengan fluks kalor 27 kW/m² dan 14,6 kW/m²



Gambar 4.13 Konsentrasi oksigen arah vertikal dengan jarak 3cm dengan fluks kalor 27 kW/m² dan 14,6 kW/m²

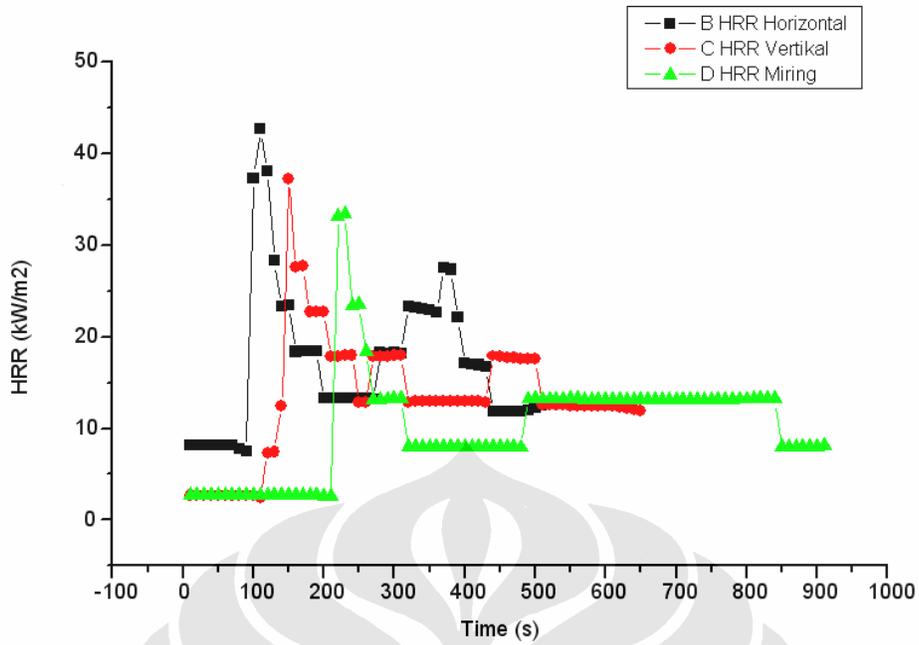
Sumbu horizontal pada Gambar 4.12 menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik. Sumbu vertikal menyatakan laju produksi kalor/*heat release rate* (dalam satuan kW/m²). Sedangkan gambar 4.13 menunjukkan grafik konsentrasi oksigen dengan sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik, sumbu vertikal menunjukkan konsentrasi oksigen yang sebenarnya. Bentuk grafik konsentrasi oksigen yang diperoleh merupakan hasil pengukuran dalam pembakaran kayu lapis (*plywood*) dengan menggunakan gas analyzer yang tercatat secara otomatis setiap 10 detik, sedangkan grafik laju produksi kalor merupakan hasil perhitungan berdasarkan data konsentrasi oksigen, tekanan orifice, dan temperature gas buang dengan menggunakan persamaan yang telah disebutkan diatas.

Dari grafik 4.12 diatas, laju pelepasan kalor untuk fluks kalor 27 kW/m² dan fluks kalor 16,4 kW/m² mempunyai beberapa perbedaan. Perbedaan yang paling jelas adalah waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai laju produksi kalor tertinggi (*peak heat release rate*) . Dimana pada fluks kalor 27 kW/m² mempunyai waktu untuk mencapai kondisi tersebut selama ± 70 detik, sedangkan pada fluks kalor 16,4 kW/m² waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak heat release rate* adalah sebesar ± 150 detik. Dari grafik 4.6 diatas juga dapat dilihat bahwa pada fluks kalor 27 kW/m² cenderung lebih lama dipuncak, sedangkan pada fluks kalor 16,4 kW/m² kurva hanya sebentar berada dipuncak dan langsung stabil. Pada fluks kalor 27 kW/m² kurva juga mengalami kenaikan yang cukup tinggi pada 400 – 500, sedangkan pada fluks kalor 16,4 kW/m² hanya kurva sedikit naik pada detik 450 – 500. Hal ini berarti, pada fluks kalor yang lebih besar, nyala api akan cenderung lebih besar dalam waktu lebih lama. Perbedaan lainnya diantara kedua fluks diatas adalah bentuk panjang grafik. Bentuk panjang grafik yang seperti ini tergantung dari besarnya fluks kalor yang diterima oleh sampel. Semakin besar fluks kalor, maka semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran. Terlepas dari perbedaan yang ada, pada grafik laju pelepasan kalor untuk kedua fluks kalor tersebut mempunyai persamaan pada awal proses pembakaran, yaitu terbentuknya grafik mendatar yang merupakan tahapan pelepasan *moisture* yang berupa asap putih, walaupun keduanya mempunyai waktu yang berbeda untuk melepaskan semua *moisture* yang terkandung dalam sampel.

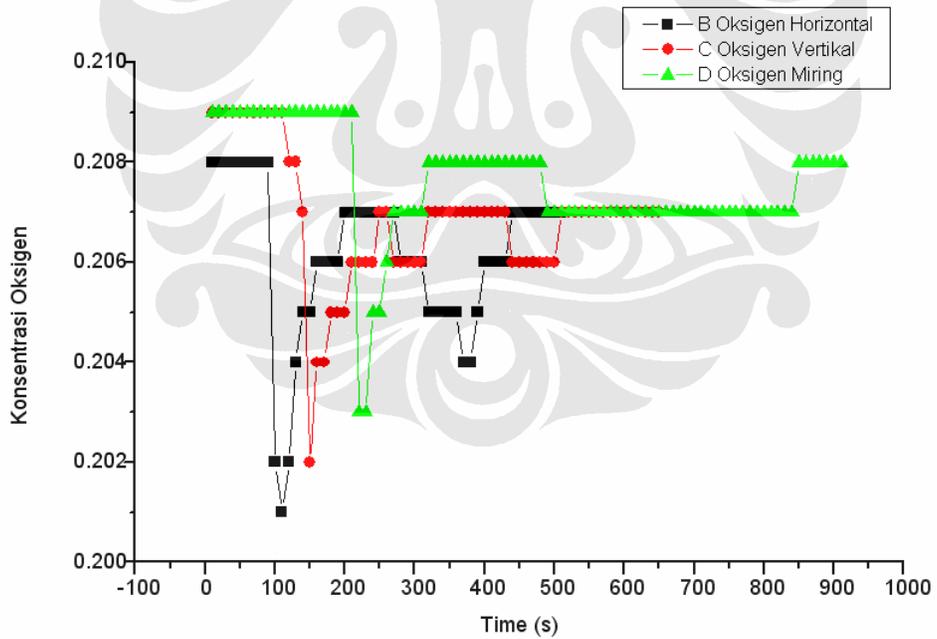
Dari gambar 4.13 yang merupakan grafik konsentrasi oksigen menunjukkan korelasi yang berbanding terbalik dengan laju pelepasan kalor. Dimana perbedaan keduanya juga terjadi dalam lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik minimum konsentrasi oksigen, dimana dalam kondisi tersebut nyala api terjadi paling besar. Dimana untuk fluks kalor 27 kW/m² waktu yang dibutuhkan selama ± 70 detik dan pada fluks kalor 16,4 kW/m² membutuhkan waktu selama ± 150 detik. Pada fluks kalor yang lebih besar juga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai konsentrasi oksigen yang stabil pada konsentrasi yang mendekati normal dibanding fluks kalor yang lebih kecil, karena nyala api besar cenderung lebih lama, sehingga konsentrasi oksigen yang dibutuhkan pun juga besar. pada grafik konsentrasi oksigen perbedaan juga terlihat pada panjangnya grafik diantara kedua fluks diatas. Dimana fluks kalor yang lebih besar mempunyai grafik yang lebih pendek sehingga lebih cepat mencapai konsentrasi normal, karena proses pembakaran juga berlangsung lebih cepat.

IV.3.3 Analisa Laju Pelepasan Kalor (Heat Release Rate) dengan Variasi Arah Orientasi Sampel Terhadap Heater

Grafik dibawah ini menunjukkan laju pelepasan kalor (*heat release rate*) yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 14,6 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm. Untuk menunjukkan hubungan laju pelepasan kalor dengan konsentrasi oksigen, maka dibawah ini juga disajikan grafik mengenai konsentrasi oksigen untuk variasi yang sama.



Gambar 4.14 Laju pelepasan kalor jarak 3cm dengan fluks kalor 14,6 kW/m² dalam berbagai orientasi arah sampel



Gambar 4.15 Konsentrasi oksigen jarak 3cm dengan fluks kalor 14,6 kW/m² dalam berbagai orientasi arah sampel

Sumbu horizontal pada Gambar 4.14 menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik. Sumbu vertikal menyatakan laju produksi kalor/*heat release rate* (dalam satuan kW/m²). Sedangkan gambar 4.15 menunjukkan grafik konsentrasi oksigen dengan sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik, sumbu vertikal menunjukkan konsentrasi oksigen yang sebenarnya. Bentuk grafik konsentrasi oksigen yang diperoleh merupakan hasil pengukuran dalam pembakaran kayu lapis (*plywood*) dengan menggunakan gas analyzer yang tercatat secara otomatis setiap 10 detik, sedangkan grafik laju produksi kalor merupakan hasil perhitungan berdasarkan data konsentrasi oksigen, tekanan orifice, dan temperature gas buang dengan menggunakan persamaan yang telah disebutkan diatas.

Dari gambar 4.14 dapat dilihat ketiga grafik secara keseluruhan mempunyai pola yang mirip, yaitu grafik diawali dengan kurva mendatar, kemudian langsung naik tajam untuk mencapai *peak heat release rate* yang dilanjutkan dengan penurunan kurva menuju pergerakan yang relatif stabil dengan laju pelepasan kalor yang tidak terlalu tinggi. Kurva mendatar mempunyai panjang yang bervariasi, dimana kurva tersebut menandakan pelepasan *moisture* yang berupa asap putih. Dimana perbedaan panjang kurva mendatar tersebut didasarkan atas waktu nyala api (*time ignition*). Pada arah horizontal kurva mendatar paling pendek, menandakan *time ignition* pada arah horizontal paling cepat, yaitu selama ± 100 detik, diurutan kedua arah vertikal dengan waktu ± 120 detik, dan paling lama arah miring dengan waktu ± 230 detik. Disamping perbedaan panjang pendeknya kurva mendatar diawal pembakaran, pada grafik laju pelepasan kalor juga terlihat beberapa perbedaan. Waktu untuk mencapai nilai laju produksi kalor tertinggi (*peak heat release rate*) diantara ketiga orientasi diatas juga menunjukkan perbedaan. Dimana sesuai dengan kecepatan waktu nyala, waktu yang diperlukan untuk mencapai *peak heat release rate* paling cepat juga terjadi pada arah horizontal yaitu sekitar ± 120 detik, diikuti arah orientasi vertikal selama ± 150 detik, dan waktu paling lama diperlukan oleh arah miring, yaitu selama ± 240 detik. Dengan demikian pada arah horizontal nyala api paling cepat membesar. Dari ketiga variasi diatas juga menunjukkan nilai *peak heat release rate* dimana arah horizontal yang mempunyai waktu nyala paling cepat mempunyai nilai terbesar, yaitu sebesar 45 kW/m², diikuti arah vertikal sebesar 40 kW/m², dan nilai paling kecil pada arah miring sebesar 35 kW/m². Perbedaan besarnya nilai *peak heat release rate* tersebut dipengaruhi oleh besarnya akumulasi kalor yang diterima sampel. Dimana

pada arah horizontal kalor yang diterima sampel paling besar yang merupakan gabungan kalor radiasi dan seluruh kalor konveksi. Sedangkan pada arah vertikal akumulasi kalor tidak sebanyak arah horizontal karena sebagian kalor konveksi keluar lewat lubang belakan heater sehingga fluks kalor yang diterima sampel berasal kalor radiasi dan sebagian kalor konveksi. Pada arah miring fluks kalor yang diterima sampel paling kecil karena kalor konveksi sebagian besar keluar lewat lubang belakang heater sehingga fluks kalor yang diterima sampel hanya kalor radiasi dan sebagian kecil kalor konveksi. Panjang keseluruhan dari grafik laju pelepasan kalor diantara ketiga orientasi tersebut juga berbeda, dimana arah horizontal yang menerima fluks kalor terbesar mempunyai kurva paling pendek, yaitu sekitar 510 detik. Dengan demikian semakin pendek kurva, maka makin cepat habisnya material dalam proses pembakaran.

Grafik konsentrasi oksigen juga menunjukkan situasi yang tidak jauh berbeda, hanya memiliki korelasi yang berlawanan dengan laju pelepasan kalor. Dimana secara keseluruhan grafik konsentrasi oksigen diawali dengan kurva mendatar, dimana pada kondisi tersebut belum terjadi nyala api dan sampel hanya mengeluarkan asap putih (*moisture*). Kemudian pada saat laju pelepasan kalor mencapai maksimum yang berarti api sudah menyala dan membesar, konsentrasi oksigen menjadi minimum mencapai 20,1 % pada arah horizontal. Kemudian konsentrasi oksigen mulai stabil pada nilai 20,7 % setelah melalui puncak. Dimana pada saat kondisi konsentrasi oksigen relatif stabil, berarti nyala api relatif kecil dan konstan, kecuali pada arah horizontal yang sempat naik setelah mengalami penurunan. Hal ini berarti pada arah horizontal api sempat mengecil dan membesar lagi pada saat api mulai menyebar ke permukaan sampel sebelah atas yang tidak terkena radiasi langsung. Perbedaan lainnya ketiganya mempunyai panjang kurva yang tidak sama, dimana pada arah horizontal mempunyai kurva paling pendek yang berarti proses pembakaran selesai paling cepat dan konsentrasi oksigen paling cepat menuju pada konsentrasi normalnya, yaitu 20,9%.

IV.4 ANALISA LAJU PENURUNAN MASSA

Laju penurunan massa atau *mass loss rate* dapat didefinisikan sebagai kecepatan penurunan massa akibat pembakaran dalam suatu luasan dan dalam interval waktu tertentu. Besarnya dinyatakan dalam satuan $\text{g/m}^2\text{s}$. Perhitungan laju penurunan massa untuk pengujian dengan menggunakan kalorimeter api mengacu kepada perhitungan yang digunakan dalam standar ASTM E-1354, yaitu dengan menggunakan penurunan massa ($-\text{dm}/\text{dt}$) pada setiap interval waktu tertentu dengan penurunan numerik lima titik (*five point differentiation*). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Untuk penurunan pertama ($i=0$)

$$-\left[\frac{dm}{dt}\right]_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t}$$

- Untuk penurunan kedua ($i=1$)

$$-\left[\frac{dm}{dt}\right]_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t}$$

- Untuk penurunan $1 < i < n-1$ dimana (n adalah jumlah penurunan yang dilakukan)

$$-\left[\frac{dm}{dt}\right]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t}$$

- Untuk penurunan satu sebelum terakhir ($i = n-1$)

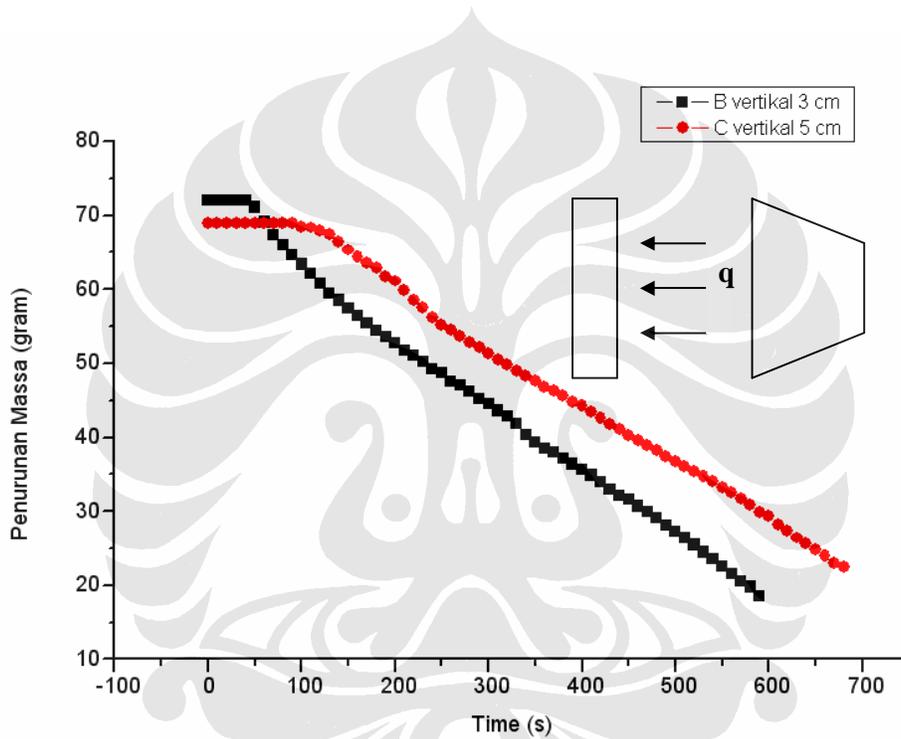
$$-\left[\frac{dm}{dt}\right]_{i=n-1} = \frac{-3m_0 - 10m_1 + 18m_2 - 6m_3 + m_4}{12\Delta t}$$

- Untuk penurunan terakhir ($i=n$)

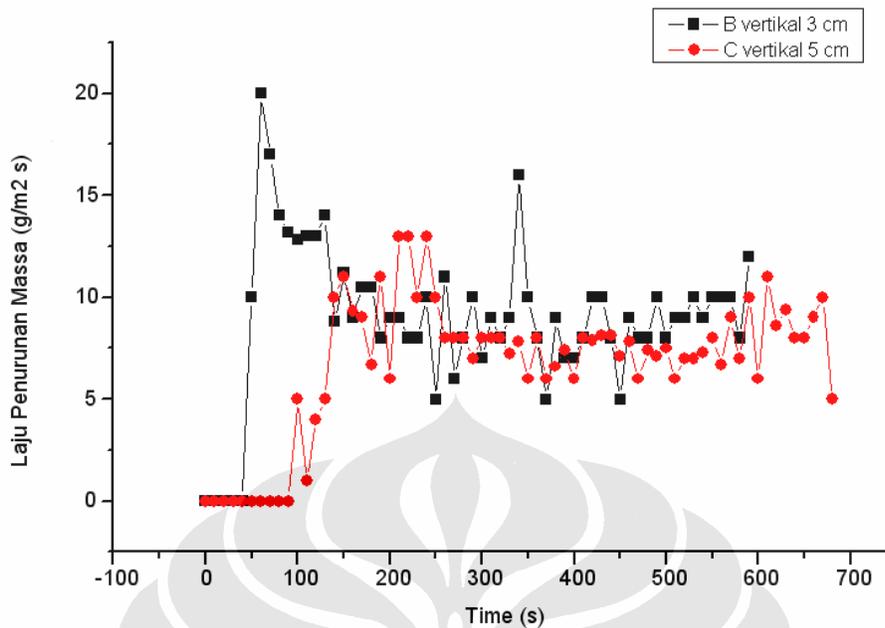
$$-\left[\frac{dm}{dt}\right]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t}$$

IV.4.1 Analisa Laju Penurunan Massa dengan Variasi Jarak

Grafik dibawah ini menunjukkan laju Penurunan massa dan laju penurunan massa yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm dan 5 cm.



Gambar 4.16 Penurunan massa vertikal dengan fluks 27 kW/m² pada jarak 3 cm dan 5 cm



Gambar 4.17 Laju penurunan massa dengan fluks 27 kW/m² pada jarak 3 cm dan 5 cm

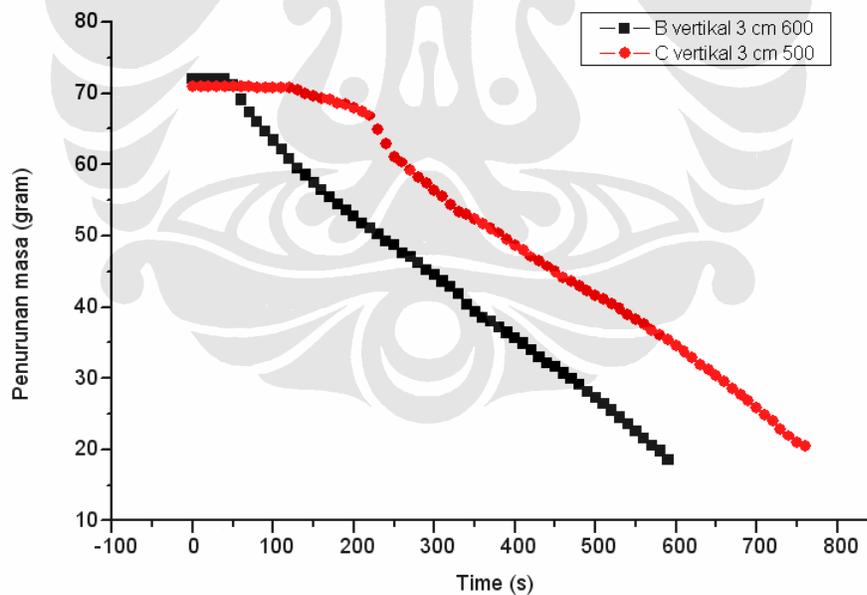
Pada Gambar 4.16 menunjukkan penurunan massa, dimana sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik. Sumbu vertikal menyatakan massa (dalam satuan gram). Sedangkan pada gambar 4.17 menunjukkan grafik laju penurunan massa, dimana sumbu horizontal menunjukkan waktu (dalam satuan detik) dengan skala per 100 detik. Sumbu vertikal menyatakan laju penurunan massa (gram/m² s). Bentuk grafik yang diperoleh merupakan hasil pengamatan pola umum yang terjadi dalam pengujian kayu lapis menggunakan kalorimeter api. Pengambilan data dilakukan dengan interval 10 detik sekali, dimulai dari pemasukan sampel ke dalam kalorimeter api hingga padamnya nyala api pada sampel

Pada grafik penurunan massa, terlihat kedua kurva diawali dengan garis mendatar, dimana pada kondisi tersebut sampel hanya mengeluarkan *moisture* berupa asap putih. Kondisi tersebut menandakan laju penurunan massa juga mendatar dalam arti stabil yang dapat dilihat pada gambar 4.17. Pada detik ke 50 pada jarak 3 cm dan detik ke 100 pada jarak 5 cm, grafik massa mulai turun tajam, dimana pada kondisi tersebut api mulai menyala dan membesar. Dengan turunnya massa tersebut, maka grafik laju penurunan massa akan menunjukkan lonjakan yang tajam pula, dimana pada jarak 3 cm laju penurunan massa mencapai 20 gram/m² s. Sedangkan pada jarak 5 cm mencapai 13 gram/m² s. Ketika penurunan massa mulai stabil dan tidak

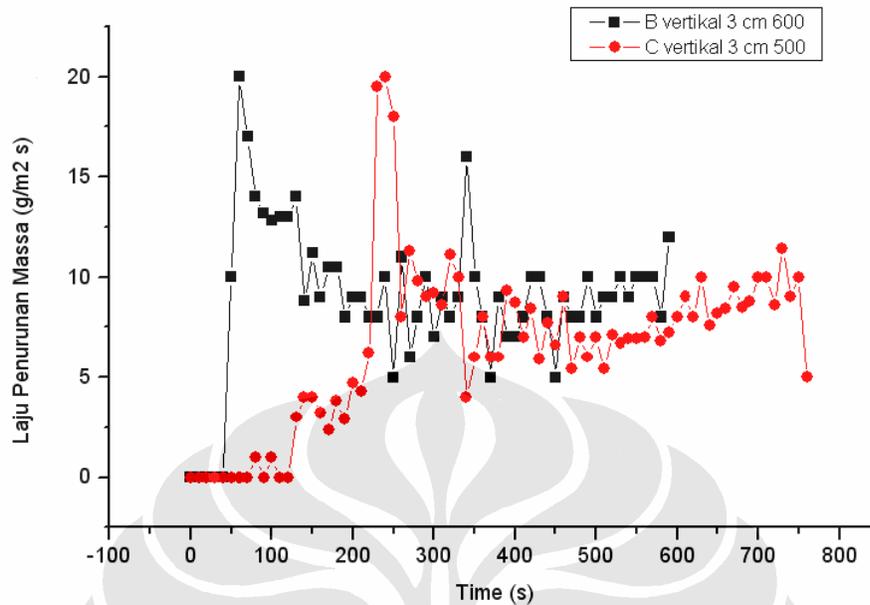
mengalami penurunan yang signifikan yang berarti kondisi nyala api stabil dan tidak terlalu besar, pada grafik laju penurunan massa menunjukkan pola naik turun yang fluktuatif, karena perbedaan penurunan massa pada kondisi tersebut tidak terlalu jauh. Secara garis besar perbedaan pola penurunan massa dan laju penurunan massa pada sampel dengan variasi jarak terdapat pada waktu pencapaian puncak laju penurunan massa yang merupakan pengurangan massa paling banyak yang dipengaruhi oleh waktu nyala api. Pada kedua grafik, panjang kurva juga berbeda dimana pada jarak 3 cm mempunyai kurna yang lebih pendek sehingga waktu yang dibutuhkan untuk pembentukan *char* lebih cepat.

IV.4.2 Analisa Laju Penurunan Massa dengan Variasi Fluks Kalor

Grafik dibawah ini menunjukkan laju Penurunan massa dan laju penurunan massa yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal yang diberi fluks kalor sebesar 27 kW/m² dan 16,4 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm.



Gambar 4.18 Penurunan massa vertikal dengan fluks 27 kW/m² dan 16,4 kW/m² pada jarak 3 cm

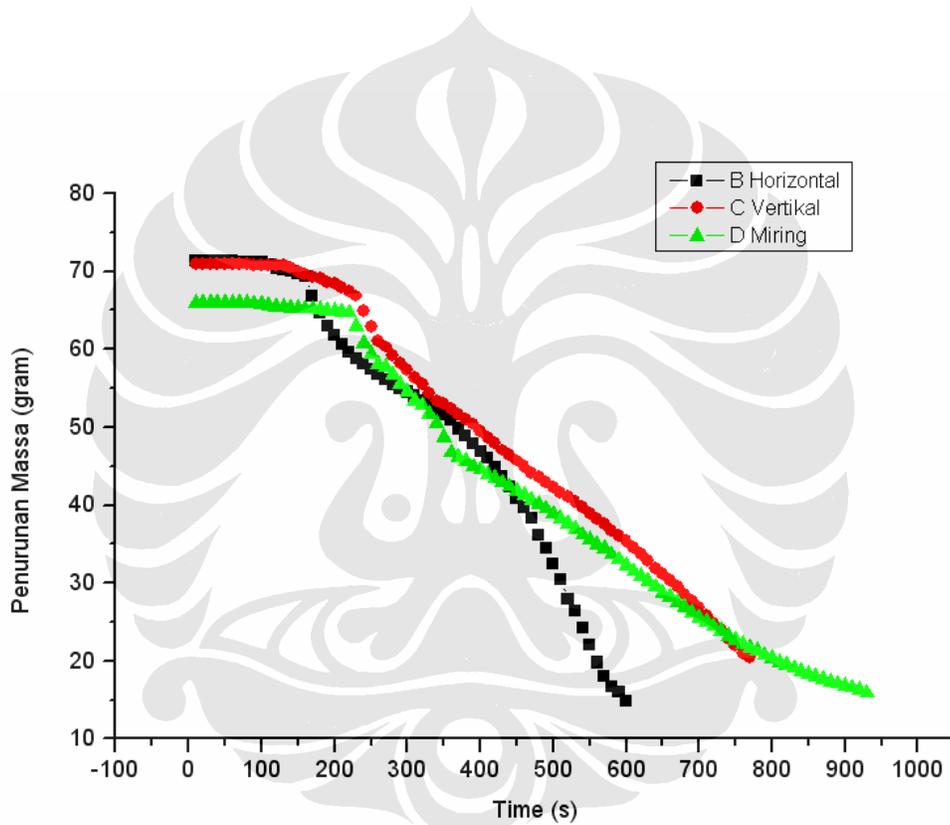


Gambar 4.19 Laju penurunan massa dengan fluks 27 kW/m² dan 16,4 kW/m² pada jarak 3 cm

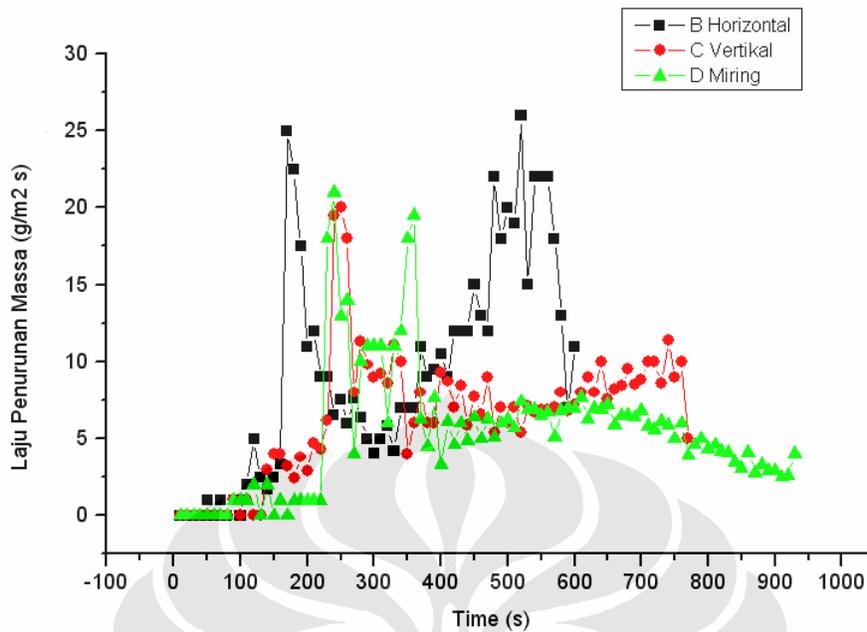
Dari grafik penurunan massa dan laju penurunan massa diatas menunjukkan perbedaan fluks kalor yang diterima oleh sampel akan menghasilkan pola penurunan massa dan laju penurunan massa yang berbeda pula. Dimana pada fluks kalor yang lebih besar pola penurunan massa akan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan fluks kalor yang lebih rendah, sehingga pola laju penurunan massa yang terjadi juga akan berbeda. Pada fluks kalor 27 kW/m² puncak laju penurunan massa yang besarnya mencapai 20 gram/m² s akan tercapai dalam waktu yang lebih cepat, yaitu selama ± 70 detik dan cenderung lebih lama berada diatas. Sedangkan pada fluks kalor 16,4 kW/m² puncak laju penurunan massa yang besarnya mencapai 19 gram/m² s lebih lama dicapai, yaitu selama ± 250 detik dan tidak lama bertahan langsung turun menuju laju penurunan massa yang stabil. Dengan demikian, semakin cepat puncak laju penurunan massa dicapai, maka proses nyala api yang terjadi lebih cepat dan proses pembakaran akan berlangsung lebih cepat. Sehingga perbedaan fluks kalor yang diberikan akan menghasilkan perbedaan pada penurunan massa.

IV.4.3 Analisa Laju Penurunan Massa dengan Variasi Arah Orientasi Sampel

Grafik dibawah ini menunjukkan laju Penurunan massa dan laju penurunan massa yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis dengan ketebalan 10cm dengan arah orientasi vertikal, miring ,dan horizontal yang diberi fluks kalor sebesar 16,4 kW/m² dengan jarak sampel dengan heater sejauh 3 cm.



Gambar 4.20 Penurunan massa vertikal dengan fluks 16,4 kW/m² pada jarak 3 cm dalam berbagai orientasi



Gambar 4.21 Laju penurunan massa dengan fluks 16,4 kW/m² pada jarak 3 cm dala berbagai orientasi

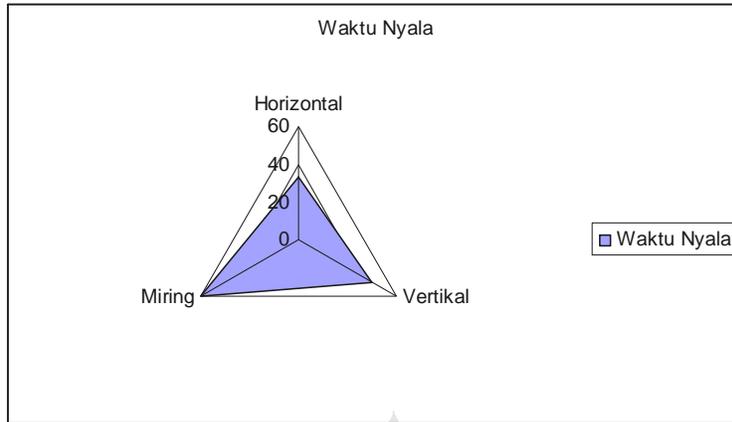
Dari grafik penurunan massa dan laju penurunan massa diatas, terlihat bahwa dengan orientasi yang berbeda menunjukkan hasil yang berbeda pula. Dimana perbedaan yang paling jelas adalah panjang pendeknya kurva mendatar yang merupakan kondisi dimana sampel belum terjadi nyala api dan hanya mengeluarkan asap putih (*moisture*). Dimana dari grafik terlihat bahwa waktu paling cepat untuk mencapai kondisi tersebut terjadi pada orientasi horizontal dengan waktu ± 100 detik serta waktu paling lama terjadi pada orientasi miring dengan waktu selama ± 250 detik. Pada grafik penurunan massa diatas terlihat jelas bahwa penurunan massa pada arah horizontal lebih cepat dibandingkan dengan orientasi yang lainnya. Sedangkan pada arah vertikal dan arah miring penurunan massa sedikit lebih cepat terjadi pada arah vertikal dimana dapat dilihat dengan massa awal yang lebih besar, grafik penurunan massa pada arah vertikal semakin mendekati grafik penurunan massa arah miring, bahkan pada akhir proses pembakaran grafik penurunan massa pada arah vertikal memotong grafik penurunan massa pada arah miring. Hal ini berarti pada arah vertikal penurunan massa lebih besar dibandingkan dengan penurunan massa pada arah orientasi miring.

Berikut ini tabel perbandingan diantara ketiga orientasi tersebut diatas sebagai perbandingan.

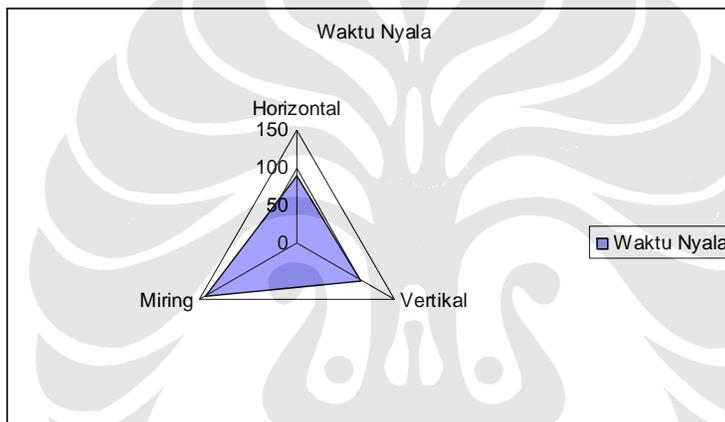
Tabel 4.2 Perbandingan waktu nyala api pada berbagai orientasi

Orientasi	Jarak cm	Heater °C	flux kW	t _{ig} detik
vertikal	3cm	600	27	45
		500	16,4	130
	5cm	600	27	100
		500	16,4	160
miring	3cm	600	27	60
		500	16,4	220
	5cm	600	27	140
		500	16,4	330
horizontal	3cm	600	27	33
		500	16,4	100
	5cm	600	27	90
		500	16,4	150

Untuk mempermudah perbandingan waktu penyalaan antara orientasi horizontal, vertikal, dan miring, maka dibuat grafik radar yang juga merupakan gambaran pemetaan waktu penyalaan antara ketiga arah orientasi yang berbeda tersebut.



(a)

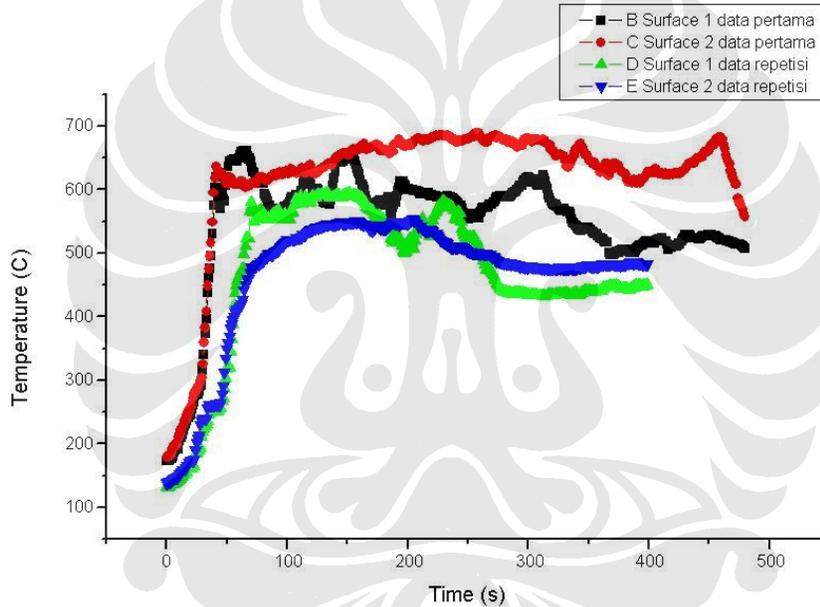


(b)

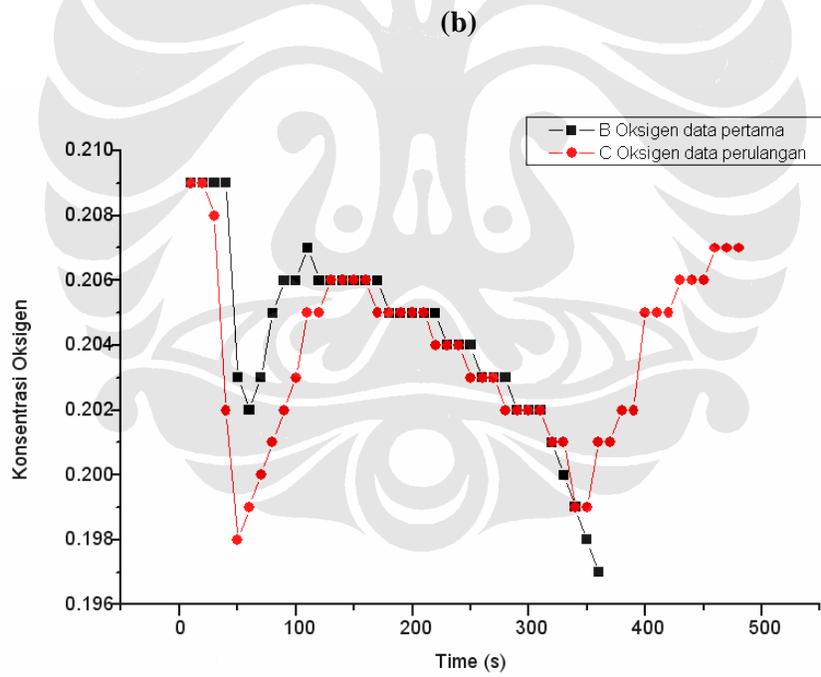
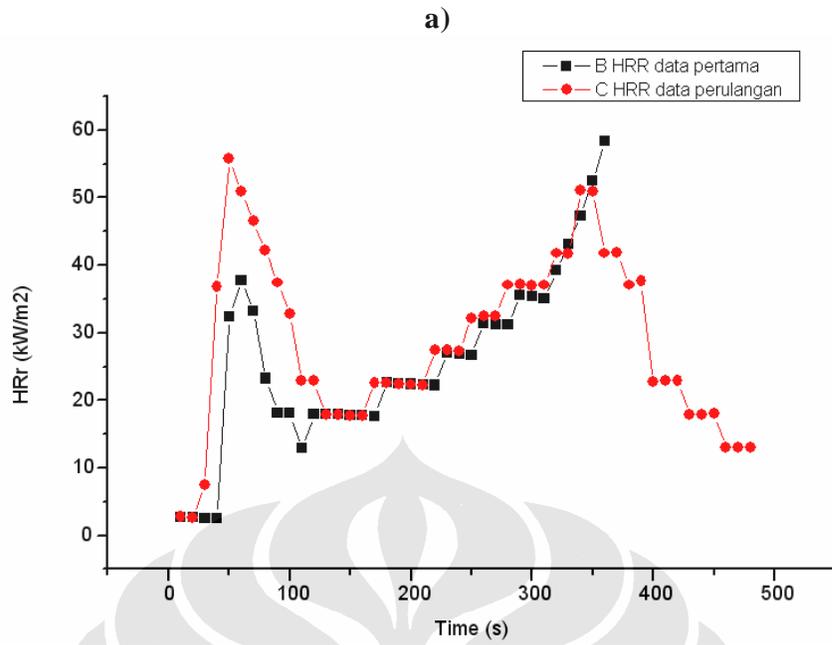
Gambar 4.22 (a) Grafik radar waktu nyala pada jarak 3 cm 600°C ; (b) Grafik radar waktu nyala pada jarak 5 cm 600°C .

IV.5 ANALISA HASIL *REPETISI* (*PENGULANGAN*) EKSPERIMEN

Dalam melakukan eksperimen, data yang didapatkan tidak selalu menunjukkan hasil yang bagus, selain itu untuk menjamin keakuratan data yang diperoleh dalam suatu eksperimen diperlukan pengulangan pengambilan data (*repetisi*) baik untuk memperkuat data yang didapat sebelumnya, maupun untuk memperbaiki data sebelumnya yang belum akurat. Oleh karena itu, dalam eksperimen penulis telah melakukan pengulangan eksperimen untuk memperoleh data yang lebih akurat yang dilakukan terhadap sampel kayu lapis (*plywood*) pada orientasi horizontal dengan radiasi dari bawah pada jarak 3 cm dengan fluks kalor sebesar 27 kW/m². pengulangan data dilakukan dua minggu setelah data pertama dengan sampel yang sama. Berikut hasil perbandingan kedua data yang diperoleh.



(a)



(c)

Gambar 4.23 (a) Temperature; (b) HRR; (c) Konebrtasi oksigen.

Dari ketiga grafik diatas menunjukkan perbandingan data eksperimen pertama dengan data hasil eksperimen perulangan yang mana hasilnya menunjukkan pada ketiga grafik diatas mempunyai pola dan nilai yang tidak berbeda jauh. Pada grafik temperature memperlihatkan pergerakan api mempunyai pola yang mirip dan nilainya juga tidak berbeda jauh. Akan tetapi perbedaannya terdapat pada waktu nyala (*time ignition*) dimana pada data pertama waktu nyalanya 50 detik, sedangkan pada data ulangan waktu nyala yang diperoleh lebih cepat, yaitu pada detik ke – 33.

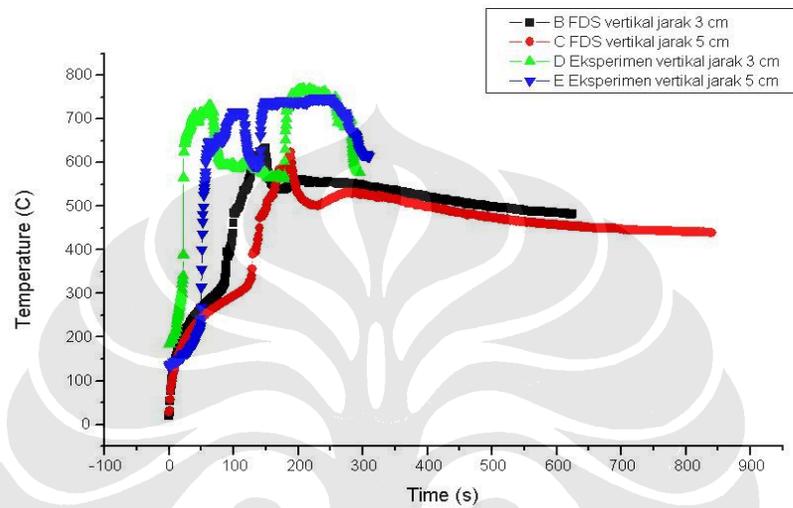
Pada grafik laju pelepasan kalor serta konsentrasi oksigen, pola dari kedua data yang diperoleh juga menunjukkan pola yang mirip dimana, laju pelepasan kalor mencapai puncak kemudian menuju stabil dan mencapai puncak kedua dengan ketinggian yang hampir sama. Perbedaan diantara kedua data pada grafik laju pelepasan kalor dan konsentrasi oksigen terdapat pada waktu yang dibutuhkan untuk mencapai puncak laju pelepasan kalor dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi oksigen minimum. Dimana pada data kedua waktu yang diperlukan untuk mencapai kedua kondisi tersebut lebih cepat dibandingkan dengan data pertama.

IV.6 ANALISA PERBANDINGAN DENGAN SIMULASI SOFTWARE FDS

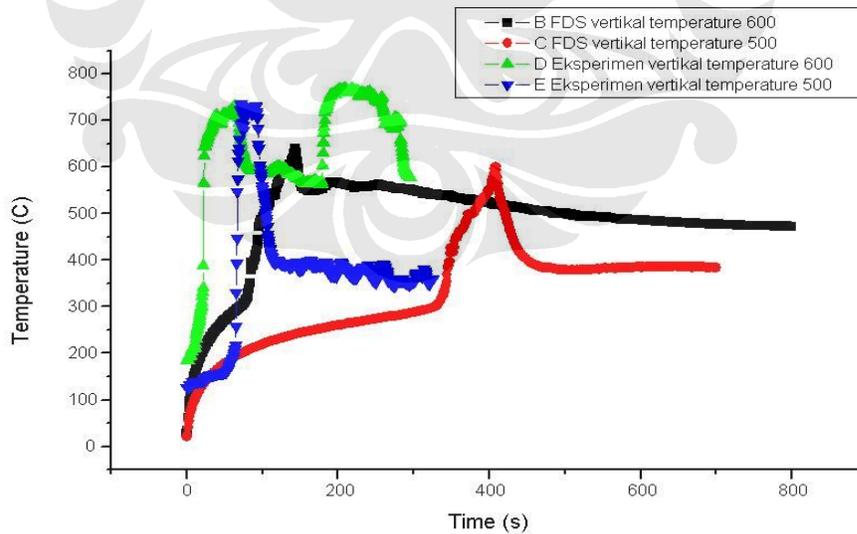
Untuk mengetahui sejauh mana pengaruh perbedaan arah orientasi terhadap nyala api, laju pelepasan kalor, dan laju penurunan massa, penulis melakukan pengambilan data dengan melakukan eksperimen secara langsung. Akan tetapi untuk membandingkan sejauh mana hasil yang diperoleh, maka dilakukan simulasi yang sama dengan menggunakan software *Fire Dynamic Simulation* (FDS) yang dilakukan oleh rekan saya Gatot Ranga Gumilang. Dibawah ini beberapa perbandingan hasil eksperimen dengan hasil simulasi software FDS.

IV.6.1. Analisa Perbandingan dengan Simulasi Software FDS terhadap Penyebaran Api

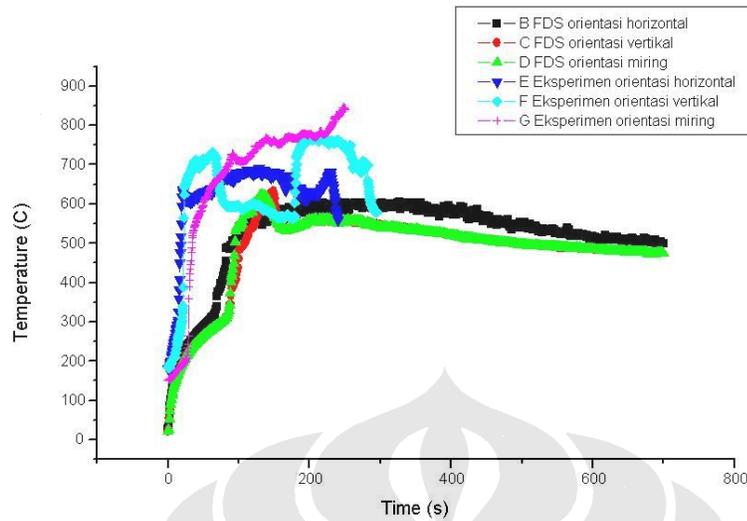
Perbandingan yang akan dibahas adalah perbandingan mengenai variasi jarak dan variasi fluks kalor, serta variasi orientasi. Dimana ketiga grafik tersebut akan ditampilkan secara bersama – sama, karena ketiganya mempunyai perbandingan yang sama. Perbandingan ketiga grafik tersebut adalah sebagai berikut :



(a)



(b)



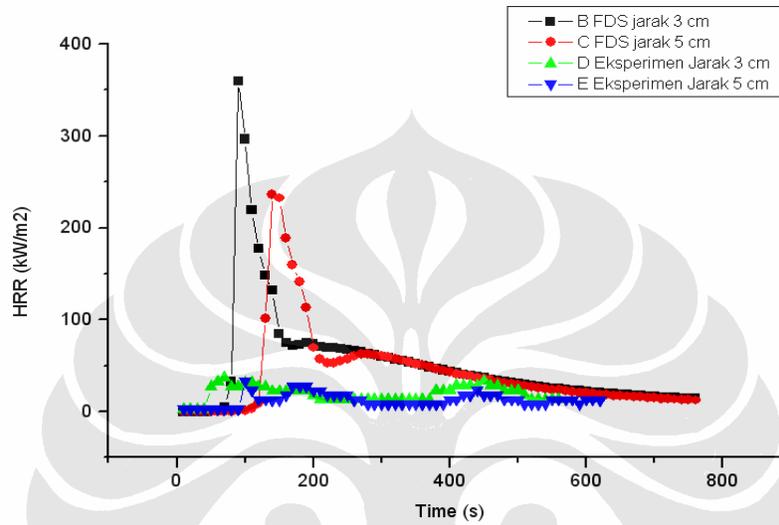
(c)

Gambar 4.24 (a) perbandingan eksperimen dan fds dengan variasi jarak, (b) Perbandingan eksperimen dan fds dengan variasi fluks, (c) Perbandingan eksperimen dan fds variasi orientasi

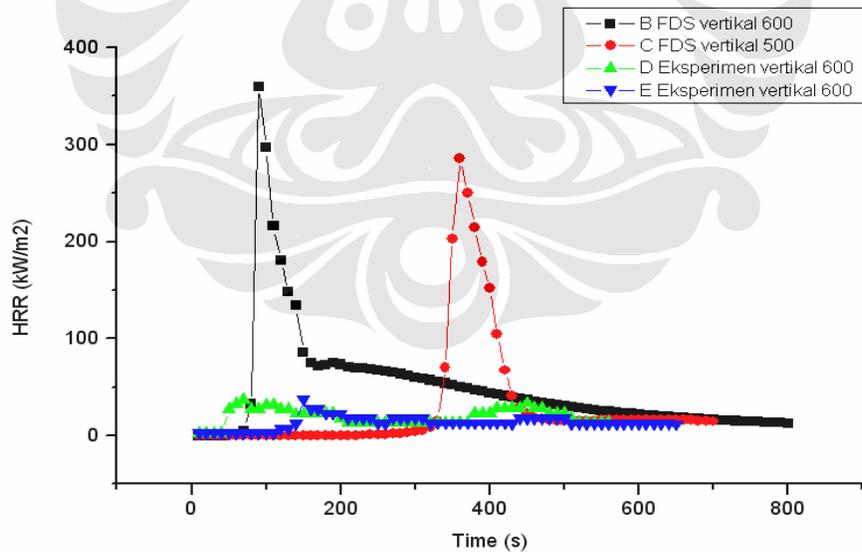
Dari gambar 4.24 diatas ternyata hasil eksperimen dengan hasil simulasi software FDS mempunyai beberapa persamaan dan perbedaan. Dimana pada grafik, diawal kurva diawali dengan garis mendatar yang menandakan api belum menyala dan hanya mengeluarkan asap putih (*moisture*), akan tetapi panjang dari kurva mendatar hasil eksperimen dan hasil FDS tidak sama, dimana hasil eksperimen lebih cepat dibanding hasil FDS yang berarti nyala api dalam eksperimen lebih cepat. Kondisi tersebut dapat terjadi karena dalam eksperimen penutup heater mengalami sedikit kebocoran yang berakibat sampel menerima fluks lebih besar sebelum heater dibuka sehingga volatile lebih cepat keluar dan nyala api lebih cepat. Dari grafik juga terlihat bahwa hasil eksperimen dan hasil FDS menunjukkan jarak mempengaruhi waktu nyala sampel, yaitu pada jarak 3 cm nyala api lebih cepat dibandingkan dengan jarak sampel 5 cm. Kemudian keduanya juga menunjukkan variasi arah orientasi juga mempengaruhi nyala api dimana arah horizontal paling cepat menyala, diikuti arah vertikal, dan arah miring.

IV.6.2. Analisa Perbandingan dengan Simulasi Software FDS terhadap Laju Pelepasan Kalor (*Heat Release Rate*)

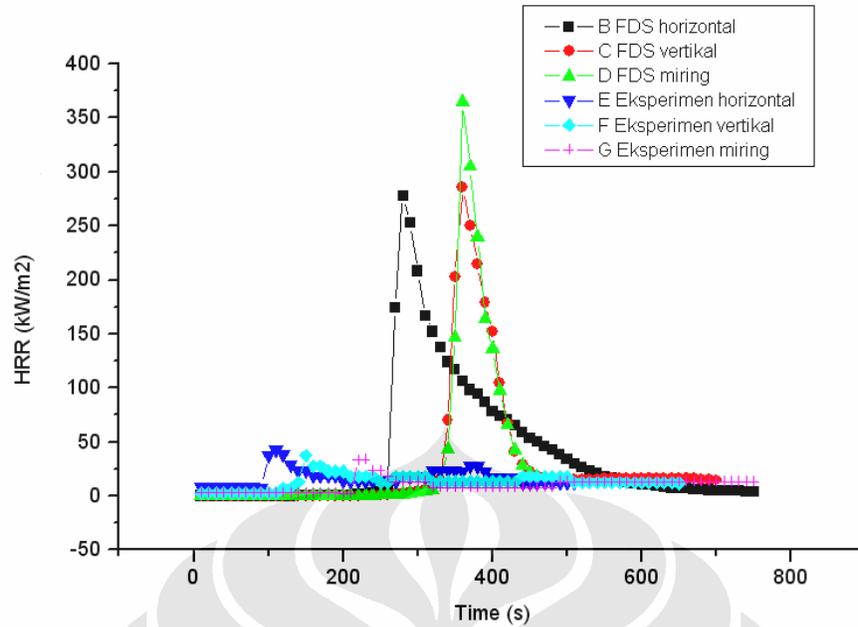
Perbandingan yang akan dibahas adalah perbandingan mengenai variasi jarak dan variasi fluks kalor, serta variasi orientasi. Dimana ketiga grafik tersebut akan ditampilkan secara bersama – sama, karena ketiganya mempunyai perbandingan yang sama. Perbandingan ketiga grafik tersebut adalah sebagai berikut :



(a)



(b)



(c)

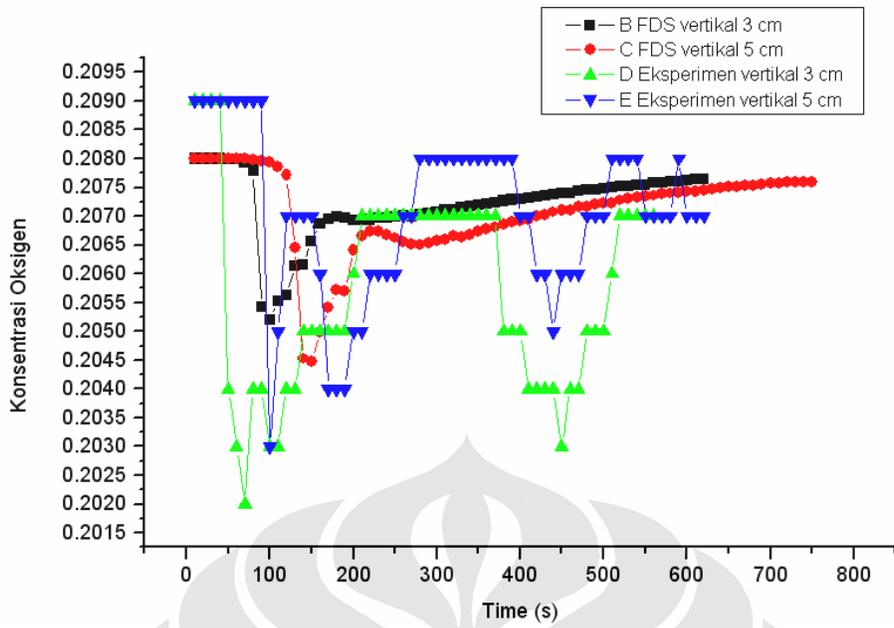
Gambar 4.25 (a) Perbandingan HRR variasi jarak; (b) Perbandingan HRR variasi fluks; (c) Perbandingan HRR variasi orientasi

Dari gambar 4.25 diatas menunjukkan perbandingan laju produksi kalor antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi FDS. Dari grafik dapat dilihat bahwa keduanya mempunyai kesamaan, yaitu diawali dengan kurva mendatar dimana kondisi tersebut sampel hanya mengeluarkan asap putih (*moisture*). Kurva mendatar pada kedua grafik untuk variasi jarak sampel (gambar 4.25 (a)) menunjukkan pada jarak 3 cm mempunyai kurva mendatar yang lebih pendek serta waktu untuk mencapai *peak heat release rate* yang lebih cepat dibandingkan dengan kurva pada jarak 5 cm. Hal ini berarti hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan hasil yang sama, yaitu variasi jarak mempengaruhi waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai laju produksi kalor tertinggi (*peak heat release rate*). Kemudian pada grafik dengan variasi fluks kalor (gambar 4.25 (b)) juga menunjukkan hasil yang hampir sama, dimana kedua grafik menunjukkan pada fluks kalor yang lebih besar akan mempunyai kurva mendatar yang lebih pendek serta waktu untuk mencapai *peak heat release rate* juga lebih cepat dibandingkan dengan fluks kalor yang lebih kecil. Pada grafik dengan variasi arah orientasi (gambar 4.25 (c)) keduanya juga menunjukkan hasil yang sama dimana waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak heat release rate* serta waktu yang dibutuhkan untuk mengeluarkan seluruh *moisture* (kurva

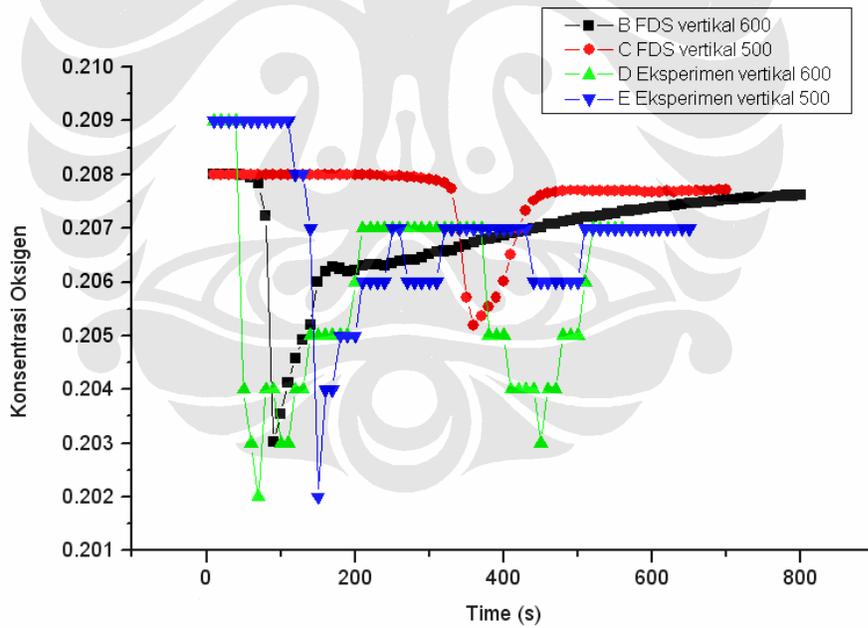
mendatar) yang paling cepat terjadi pada arah orientasi horizontal yang diikuti dengan arah orientasi vertikal, dan paling lama terjadi pada arah orientasi miring.

Terlepas dari persamaan – persamaan yang ada, grafik hasil simulasi FDS dan grafik hasil eksperimen juga mempunyai perbedaan, yaitu pada besarnya nilai laju produksi kalor (*heat release rate*), dimana pada eksperimen nilai laju produksi kalor paling besar sekitar 40 kW/m² sedangkan pada simulasi FDS nilai laju produksi kalor jauh lebih besar bisa mencapai 350 kW/m². Hal ini dapat terjadi karena perbedaan temperature (subbab 4.6.1) antara hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS juga menunjukkan hasil yang cukup jauh, sehingga berpengaruh pada laju produksi kalor yang dihasilkan. Selain itu perbedaan antara grafik eksperimen dan simulasi FDS juga dapat dilihat dari bentuk atau polanya, diman pada grafik hasil simualsi FDS setelah mengalami *peak heat release rate*, kurva langsung turun dan tabil pada nilai yang rendah, sedangkan pada grafik hasil eksperimen menunjukkan setelah mencapai *peak heat release rate* yang pertama kurva turun dan naik lagi. Hal ini menunjukkan adanya proses ignition yang kedua, yaitu kondisi dimana api mulai membesar kembali karena menyebar kedaerah yang belum terbakar yang masih mempunyai cukup bahan bakar yang dikarenakan oleh kalor atau api yang membakar bagian sampel yang lain.

Dalam kaitannya dengan laju pelepasan kalor (*heat release rate*), salah satu faktor penting dalam menentukan besar kecilnya nilai *heat release rate* tersebut adalah konsumsi oksigen selama proses pembakaran berlangsung. Berikut ini merupakan grafik perbandingan konsentrasi oksigen selama proses pembakaran antara hasil simulasi FDs dengan hasil pengukuran dalam eksperimen.



(a)



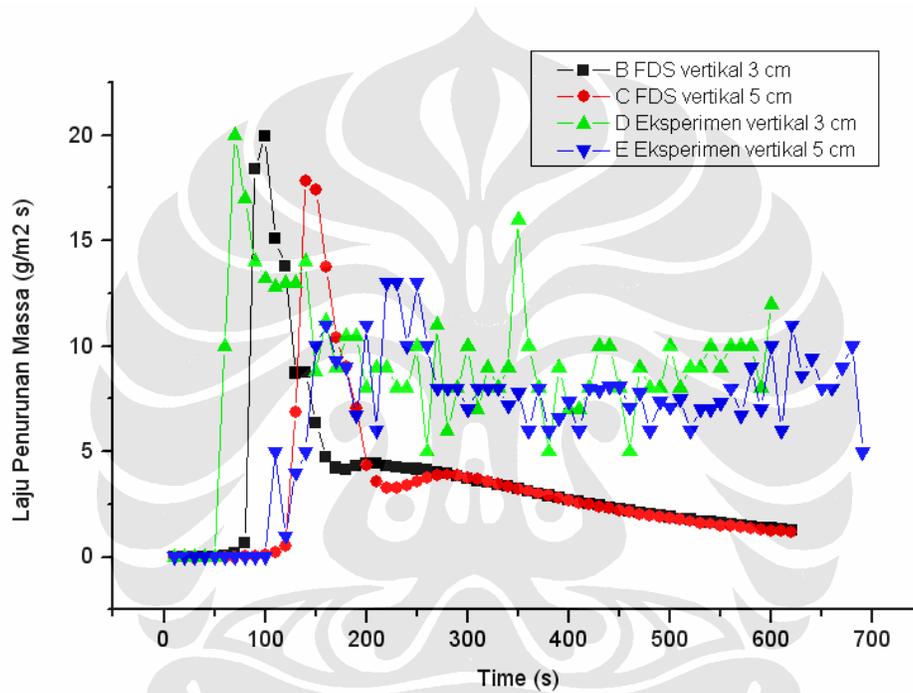
(b)

Gambar 4.26 (a) Perbandinagn konsentrasi oksigen variasi jarak; (b) Perbandingan konsentrasi oksigen variasi fluks

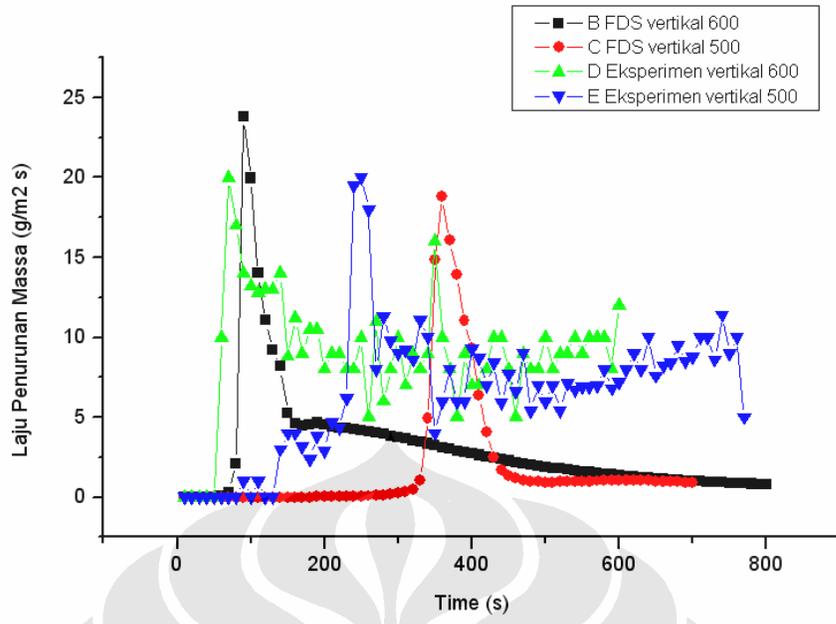
Dari gambar 4.26 diatas dapat dilihat bahwa konsentrasi yang didapatkan dari hasil simulasi dan hasil pengukuran yang dihasilkan dari eksperimen menunjukkan hasil dengan pola yang mirip dengan nilai yang tidak berbeda jauh. Dari gambar (a) dengan variasi jarak terlihat, baik dari hasil eksperimen maupun hasil FDS menunjukkan semakin dekat jarak sampel, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsentrasi oksigen terendah semakin cepat, dimana waktu yang dibutuhkan tersebut sama dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *peak heat release rate* karena keduanya mempunyai nilai yang berbanding terbalik. Konsentrasi oksigen (gambar (a)) hasil eksperimen menunjukkan konsentrasi oksigen setelah mencapai minimum pada puncak pertama secara bertahap akan menuju pada konsentrasi normal, kemudian pada sepertiga akhir waktu pembakaran konsentrasi oksigen menuju minimum lagi. Hasil ini berbeda dengan hasil simulasi FDS, dimana hasil simulasi FDS menunjukkan konsentrasi oksigen setelah mencapai puncak terendah akan bertahap menuju konsentrasi normal sampai akhir pembakaran, hal ini terjadi karena dalam eksperimen api yang menyala setelah ignition pertama akan membesar kemudian mengecil pada pertengahan pembakaran, dan api membesar lagi waktu sepertiga menjelang akhir pembakaran. Pada gambar 4.26 (b) juga terlihat bahwa hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS menunjukkan hasil yang sama, yaitu semakin besar fluks kalor yang diberikan kepada sampel, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai konsentrasi oksigen terendah akan lebih cepat dibandingkan dengan fluks kalor yang lebih kecil. perbedaan antar hasil eksperimen dan hasil IFDS (gambar (b)) terdapat pada kurva mendatar, dimana pada hasil eksperimen lebih pendek, hal ini terjadi karena waktu nyala pada eksperimen lebih cepat dibandingkan dengan simulasi FDS yang dikarenakan pada FDS tidak memakai igniter. Dengan demikian pada gambar 4.26 diatas hasil eksperimen dan hasil FDS menunjukkan hasil yang sama terhadap variasi jarak dan variasi fluks.

IV.6.3. Analisa Perbandingan dengan Simulasi Software FDS terhadap Laju Penurunan Massa

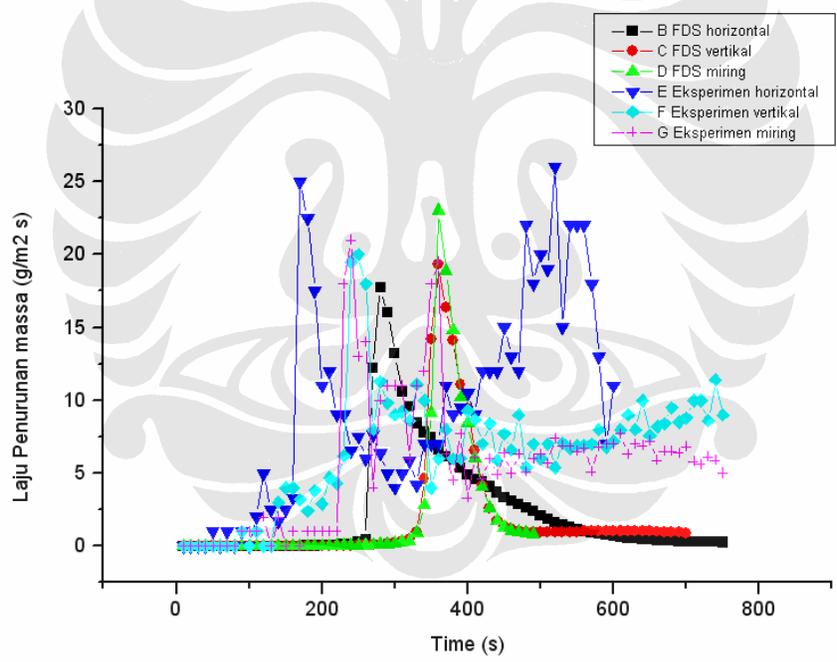
Perbandingan yang akan dibahas adalah perbandingan mengenai variasi jarak, variasi fluks kalor, serta variasi orientasi. Dimana ketiga grafik tersebut akan ditampilkan secara bersama – sama, karena ketiganya mempunyai perbandingan yang sama. Perbandingan ketiga grafik tersebut adalah sebagai berikut :



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.27 (a) Perbandingan laju penurunan massa variasi jarak; (b) Perbandingan laju penurunan massa variasi fluks; (c) Perbandingan laju penurunan massa variasi orientasi

Gambar 4.27 diatas memperlihatkan perbandingan hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS. Pada gambar 4.27 (a) diatas terlihat kedua hasil menunjukkan pola yang sama, dimana kurva diawali dengan garis mendatar kemudian mencapai laju penurunan massa maksimal pada saat api membesar, setelah mencapai puncak kurva mulai turun dan menunjukkan laju penurunan massa yang stabil, walaupun pada hasil eksperimen, kurva sempat naik lagi walaupun tidak terlalu tinggi yang dikarenakan api sempat membesar untuk kedua kalinya. Dari gambar (a) dapat disimpulkan bahwa keduanya menunjukkan hasil yang sama untuk variasi jarak, yaitu pada jarak sampel yang lebih dekat akan menghasilkan laju penurunan massa yang lebih cepat. Pada gambar 4.27 (b) perbandingan dengan variasi fluks kalor juga menunjukkan pola yang mirip, dimana kedua hasil menunjukkan pada fluks kalor yang lebih besar akan menghasilkan laju penurunan massa yang lebih cepat dibandingkan dengan fluks kalor yang lebih kecil. pada gambar 4.27 (c) kedua hasil menunjukkan bahwa arah orientasi menunjukkan pengaruh yang besar terhadap laju penurunan massa. Dimana dari gambar (c) diatas kedua hasil pengukuran menunjukkan pada arah orientasi horizontal kurva mendatar paling pendek, kemudian arah vertikal kurva mendatar sedikit lebih panjang, dan pada arah miring kurva mendatar paling panjang. Hal ini berarti hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS menunjukkan hasil yang sama, yaitu pada arah horizontal puncak laju penurunan lebih cepat tercapai, diikuti arah vertikal, dan terakhir arah miring.

Berdasarkan perbandingan – perbandingan diatas secara garis besar hasil pengukuran dalam eksperimen dan hasil simulasi dari FDS dapat dikelompokkan dalam tabel sebagai berikut :

Tabel 4.3 Perbandingan waktu nyala antara hasil eksperimen dan hasil simulasi FDS

Orientasi	Jarak cm	Heater °C	flux kW	t _{ig} detik	t _{ig} detik
				Eksperimen	FDS
vertikal	3cm	600	27	45	42
		500	16,4	130	158
	5cm	600	27	100	67
		500	16,4	160	260
miring	3cm	600	27	60	44
		500	16,4	220	160
	5cm	600	27	140	65
		500	16,4	330	244
horizontal	3cm	600	27	33	39
		500	16,4	100	145
	5cm	600	27	90	61
		500	16,4	150	230