

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan teori-teori yang mendasari dan yang dijadikan acuan penelitian pengaruh kemiringan posisi terhadap karakteristik pembakaran material kayu dengan menggunakan alat uji Kalorimeter Api.

II.1. TEORI PEMBAKARAN

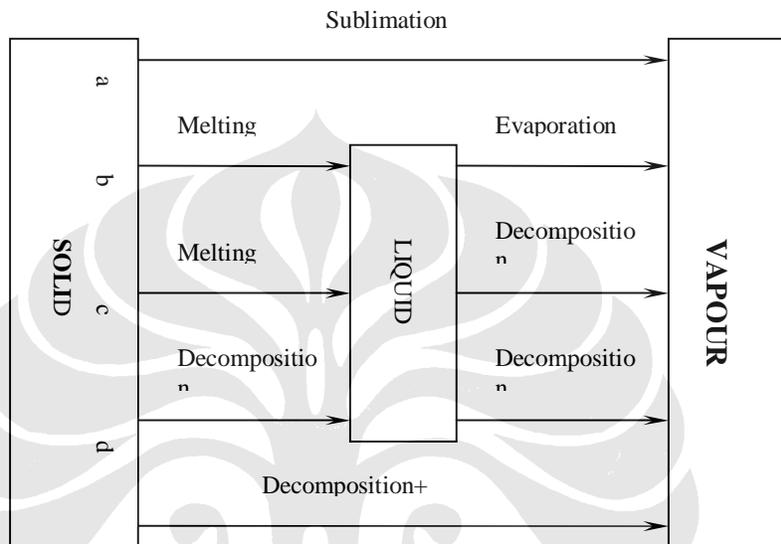
II.1.1. Definisi dan Proses Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi kimia antara bahan bakar dan *oksidiser* dengan disertai pelepasan energi secara signifikan dalam bentuk panas [Mastorakos , 2003]. Dalam definisi lain [Drysdale, 2003] dikatakan bahwa, pembakaran merupakan proses yang melibatkan reaksi kimia antara material yang dapat terbakar (*combustible species*) dan oksigen yang terkandung diudara. Proses pembakaran melibatkan bahan bakar, oksigen dan sumber penyalaan (*ignition*). Bahan bakar adalah segala zat yang melepaskan energi ketika dioksidasi [Mastorakos, 2003].

Nyala api dan energi panas merupakan ciri-ciri suatu proses pembakaran, namun tidak selalu suatu proses pembakaran menghasilkan nyala api sebagai contoh suatu proses pembakaran zat – zat makanan didalam tubuh manusia, bahan bakar yang dibakar berupa zat makanan kemudian *oksidiser* yang dibutuhkan didapatkan dari proses respirasi dan energi yang dihasilkan dalam proses metabolisme digunakan untuk proses pembakaran. Api merupakan fenomena dalam fase gas, sehingga pembakaran dengan nyala api pada bahan bakar cair dan padat, harus didahului dengan proses perubahan fase bahan bakar tersebut menjadi fase gas. Untuk bahan bakar cair, proses ini pada umumnya berupa penguapan sederhana dari hasil pendidihan pada permukaan, tetapi untuk hampir semua padatan, dekomposisi kimia atau pirolisis dibutuhkan agar menghasilkan produk dengan berat molekular rendah yang dapat melayang dari permukaan, dan memasuki api. Perubahan fase padatan yang seperti ini ditunjukkan oleh padatan jenis (e) pada Gambar 2.1. Adapun, penjelasan mekanisme Gambar 2.1. dan contoh-contoh padatan sesuai dengan jenis perubahan fasenya ditunjukkan lebih lanjut pada Tabel 2.1. Pada dasarnya,

dekomposisi termal atau pirolisis dari bahan bakar padatan hanya akan terjadi pada tingkat temperatur tertentu pada permukaan padatan itu sendiri.

Selanjutnya, gas dan uap hasil dekomposisi termal tersebut akan bercampur dengan oksigen atau udara sebagai *oxidizer* untuk membentuk campuran yang dapat terbakar. Udara merupakan oxidizer alami, karena udara pada keadaan normal memiliki kandungan oksigen sebesar 21%.



Gambar 2.1 Beberapa cara uap bahan bakar dihasilkan dari padatan [Drysdale, 2003]

Tabel 2.1 Formasi volatile dari padatan yang dapat terbakar

Designation (Gambar 2.1.)	Mechanism	Examples
a	Sublimation	Methenamine
b	Melting and evaporation without chemical change	Low molecular weight paraffin waxes, although the mechanism likely to involve (b) and (c)
c	Melting, then decomposition followed by evaporation of low molecular weight products	Thermoplastic; high molecular weight waxes, etc.
d	Decomposition to produce molten products which decompose further to yield volatile species	Polyurethanes
e	Decomposition to give volatile species directly	Cellulose; most thermosetting resins (except polyurethanes)

[Drysdale, 2003]

Aliran atau semburan dari gas hidrokarbon yang telah bercampur dengan udara dapat dipicu dengan *igniter* agar membentuk api, dimana terlihat bahwa sebagian volume di dalam campuran tersebut sedang mengalami proses oksidasi. Pada

saat yang bersamaan dengan proses oksidasi campuran bahan bakar, terjadi pula proses emisi kalor. Karena pembakaran melepaskan sejumlah panas, maka proses ini digolongkan ke dalam reaksi eksotermik, dimana terjadi perpindahan energi dari sistem ke lingkungan.

Dalam penelitian ini digunakan sampel bahan bakar padat berbasis karbon (*Plywood*) dan akan menimbulkan nyala api, asap dan pelepasan energi kalor jika terbakar. Jika kita memperhatikan lebih dalam dari penjelasan diatas dapat dipahami bahwa pengertian bahan bakar disini yaitu segala zat yang akan melepaskan energi ketika dioksidasi dan akan menimbulkan nyala api.

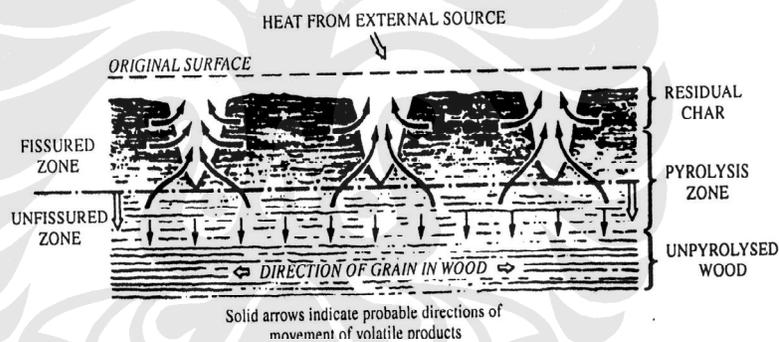
II.1.2 Karakteristik Pembakaran pada Kayu

Kayu adalah sebuah material *inhomogeneous* dan juga non-isotropis, sebagai contoh, banyak sifat – sifatnya yang berbeda tergantung dari arah mana pengujian terhadap kayu tersebut dilakukan. Kayu adalah campuran yang rumit dari polimer alami dengan berat molekul yang tinggi. Diantara polimer – polimer alami penyusun kayu diantaranya adalah selulosa (50%), hemiselulosa (25%), dan lignin (25%) [Madorsky, 1964], walaupun proporsi ini berbeda untuk setiap jenis kayu. Kayu juga menyerap kelembaban, yang jumlahnya sangat tergantung dari kelembapan relatif (RH) dan kondisi lokasi. Selulosa yang merupakan unsur penyusun terpenting dari setiap tanaman tingkat tinggi, merupakan polimer kondensasi dari heksosa, D-glukosa. Susunan tersebut menyebabkan molekul – molekulnya dapat menyatukan diri dalam bentuk ikatan (*bundle*) mikrofibril sehingga memperkuat struktur dan memberikan kelakuan pada dinding sel. Mikrofibril terikat ketika proses lignifikasi saat hemiselulosa dan lignin terdapat bersama pada tumbuhan yang sedang berkembang.

Apabila kayu dibakar atau dipanaskan diatas 450° C, pada umumnya 15% sampai 25% dari massanya tersisa dalam bentuk *char*. Kebanyakan dari *char* ini terbentuk akibat kandungan lignin (10-12% dari berat kayu). Akan tetapi, jika kayu tersebut memiliki banyak ‘pengotor’ inorganik(contoh : garam sodium) maka akan lebih banyak *char* yang terbentuk. Kerumitan komposisi kayu mempersulit penentuan laju pembakarannya, hal ini disebabkan struktur urat kayu(*wood grain*), yang menyebabkan sifatnya berbeda untuk setiap arahnya. Volatil yang dihasilkan tepat

dibawah kayu yang tidak terkena dampak (*unaffected area*) dapat terlepas dengan mudah jika searah dengan seratnya dibandingkan dengan yang melawan arah seratnya. Hal ini dibuktikan dengan munculnya jet volatil serta nyala api yang timbul dari ujung blok ataupun tongkat kayu yang terbakar.

Kayu akan mengalami perubahan warna dan timbul *char* pada temperature dibawah $200^{\circ} - 250^{\circ} C$, meskipun pemanasan terus – menerus dengan temperature yang lebih rendah ($\geq 120^{\circ} C$) juga akan menghasilkan efek yang sama. Struktur fisik kayu akan mulai mengalami kerusakan dengan cepat pada temperature diatas $300^{\circ} C$. Timbulnya retakan (*crack*) dipermukaan kayu yang terbakar menyebabkan volatil sapat keluar melalui sela – selanya. Kedalam retakan akan bertambah seiring dengan bertambahnya ketebalan *char*. Proses terjadinyaretakan – retakan ini sering disebut dengan fenomena ‘*aligatoring*’ ataupun ‘*crocodiling*’, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Penggambaran dari potongan kayu yang terbakar, atau sedang pirolisis [Drysdale, 2003]

Timbulnya char menimbulkan analisa teoritis tentang pembakaran kayu menjadi sulit karena hal tersebut menghambat terjadinya pembakaran. Char yang masih membara pada kayu yang terbakar sedang mengalami oksidasi dan merupakan proses esotermis. Hal ini akan mempengaruhi kalor yang dihasilkan dari pembakaran ataupun gasifikasi kayu.

Fenomena pembakaran pada kayu, pada dasarnya merupakan rangkaian dari proses yang sangat kompleks. Proses yang sangat kompleks disini dikarenakan pada setiap tahapan pembakaran yang terjadi didalamnya senantiasa selalu melibatkan reaksi – reaksi kimia, serta perpindahan kalor dan massa (*heat and mass transfer*

process). Proses tersebut diatas diawali dengan pemberian panas terlebih dahulu terhadap kayu oleh suatu sumber panas tertentu (*external heat source*) hingga mencapai kondisi temperature pirolisis. temperature pirolisis disini dapat dikatakan sebagai temperature kritis pada kayu, dimana pada kondisi tersebut kayu akan mulai melakukan suatu proses dekomposisi dengan memproduksi gas pirolisis. Gas dan uap hasil dari dekomposisi thermal ini pada akhirnya akan tercampur dengan udara sekitar dan menciptakan suatu daerah campuran yang dapat terbakar (*boundary layer of combustible mixture*) pada saat daerah campuran yang dapat terbakar tersebut telah mencapai konsentrasi tertentu (*flammable limit*), serta kondisi temperature sekitar telah cukup untuk terjadinya suatu reaksi kimia pembakaran.

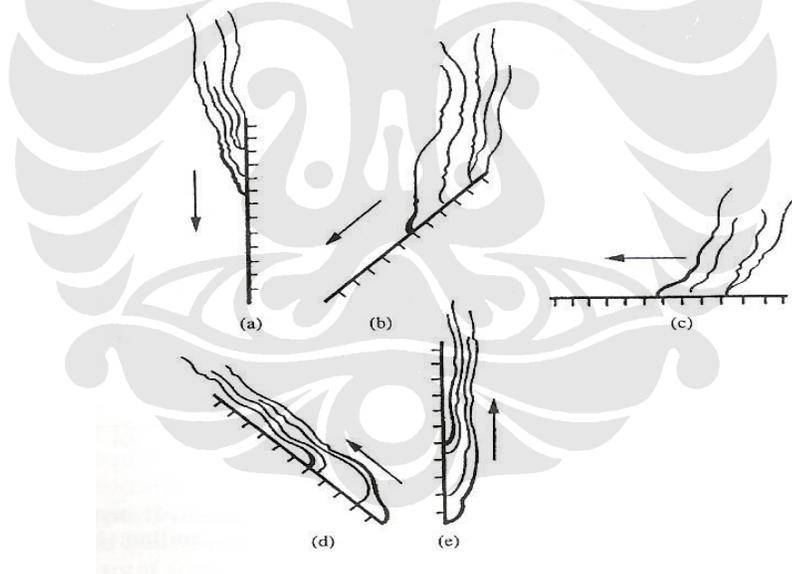
II.2. PENGARUH ORIENTASI PADA PENYEBARAN API PEMBAKARAN BAHAN BAKAR PADAT

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. Hal ini sudah dibuktikan oleh Magee dan McAlevy (1971) dengan menggunakan sampel dari secarik kertas dengan perambatan api ke atas. Sesuai tebal di bawah, dapat dilihat bahwa semakin besar sudut orientasi semakin cepat pula kecepatan dari penyebaran api. Perlu diketahui bahwa sudut orientasi merupakan sudut yang terbentuk antara permukaan benda padat dengan garis horizontal, dimana sudut 0° berarti permukaan horizontal dan sudut 90° berarti permukaan vertikal.

Tabel 2.2 Kecepatan penyebaran api

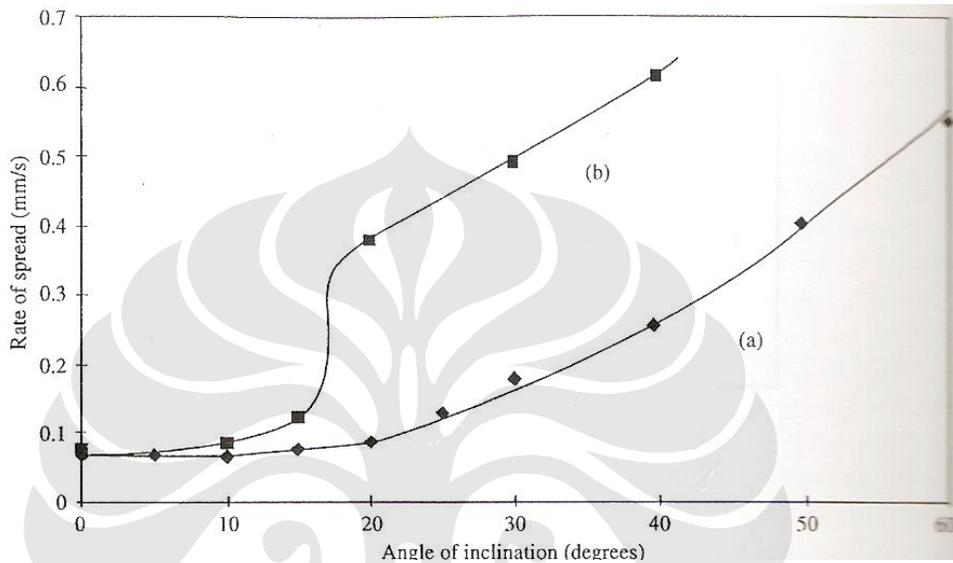
Orientasi ($^\circ$)	Kecepatan penyebaran api (mm/s)
0 (horizontal)	3.6
22.5	6.3
45	11.2
75	29.2
90 (vertikal)	46 - 74

Arah dari perambatan api juga menentukan kecepatan penyebaran api. Penyebaran api ke bawah akan lebih lambat dibanding penyebaran api ke atas. Alasannya dapat dijelaskan berdasarkan interaksi fisik yang terjadi antara lidah api dengan bahan bakar yang belum terbakar yang dapat berubah ketika orientasinya berubah. Untuk penyebaran api kebawah dan horizontal, penyebarannya disebut *counter-current*, sedangkan penyebaran ke atas disebut *concurrent*. Istilah *counter-current* menjelaskan peristiwa dimana terdapat aliran udara yang arahnya berlawanan dengan arah perambatan api, sedangkan *concurrent* sebaliknya, yaitu ketika adanya aliran udara yang searah dengan penyebaran api. Penyebaran api pada *concurrent* lebih cepat dibanding pada *counter-current*. Hal ini disebabkan 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.

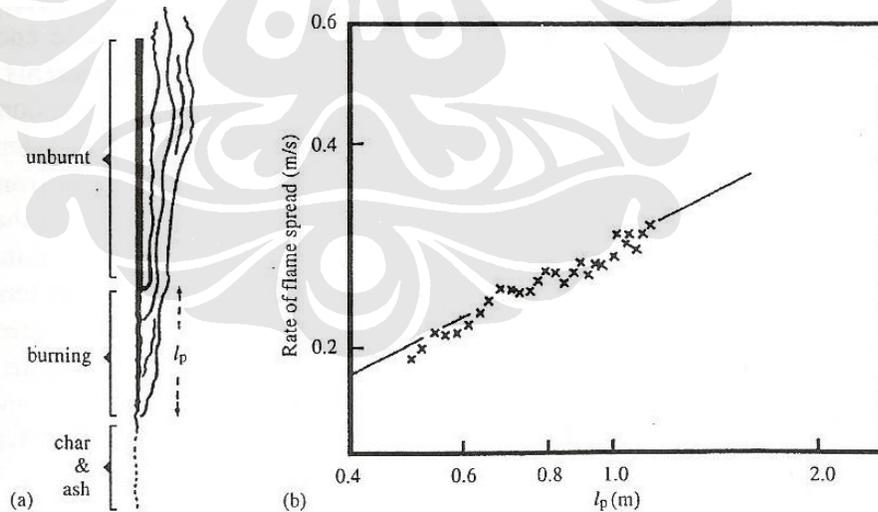


Gambar 2.3 Interaksi antara api yang menyebar dengan permukaan dari benda padat yang dapat terbakar (*combustible solid*) untuk berbagai sudut kemiringan : (a) -90° ; (b) -45° (c) 0° ; (d) $+45^\circ$; (e) $+90^\circ$. (a), (b), dan (c) adalah penyebaran *counter-current* sedangkan (d), dan (e) penyebaran *concurrent*.

Untuk bahan bakar padat yang tebal (*thick*), peningkatan kecepatan penyebaran ke atas (*upward spread*) dapat dilihat hanya ketika kemiringan dari permukaan diperbesar menjadi 15° - 20° . Kecepatan dari penyebaran api akan membesar secara signifikan jika aliran udara dari sisi samping dihalangi. Hal ini disadari setelah kejadian kebakaran dari eskalator kayu yang terjadi di stasiun bawah tanah di London tahun 1988. Fenomena ini disebut sebagai *trench effect*.



Gambar 2.4. Penyebaran ke atas dari sepotong kain yang diposisikan vertikal (a) bagian-bagian dari



sampel yang terbakar; (b) peningkatan kecepatan penyebaran sebanding dengan peningkatan panjang daerah *pyrolysis* (l_p). Sampel adalah kain katun sutra dengan lebar 0.457m panjang 1.524m dan densitasnya 103 g/m^2 (Markstein dan de Ris, 1972).

Dari gambar di atas dapat terlihat bahwa kecepatan penyebaran api sebanding dengan panjang daerah *pyrolysis* (l_p), sehingga dapat dituliskan:

$$V_p \equiv l_p^n \quad (2.1)$$

dimana V_p kecepatan penyebaran api vertikal dan l_p ialah panjang daerah *pyrolysis*, dan n merupakan konstanta, dimana nilainya mendekati 0.5.

II.3. LAJU PRODUKSI KALOR (*HEAT RELEASE RATE / HRR*)

II.3.1. Standar Pengujian Material

American Society for Testing and Material (ASTM) telah mengeluarkan *paper* berupa kompilasi dari jenis-jenis pengujian kebakaran. Pada edisi yang dikeluarkan pada tahun 1988, disebutkan bahwa terdapat 77 jenis pengujian kebakaran, padahal ASTM sendiri hanya salah satu dari sekian banyak organisasi yang juga mengeluarkan standar pengujian kebakaran. Sehingga total seluruh standar pengujian kebakaran yang ada mungkin berjumlah ratusan.

Adapun, standar pengujian kebakaran biasanya terbagi menjadi dua kategori umum, yaitu:

1. Reaksi terhadap api (Reaction-to Fire) atau *Flammability*

Reaksi terhadap api sebenarnya adalah bagaimana suatu material atau produk merespon pemanasan ataupun api. Respon yang dimaksud berupa *ignitability*; penyebaran api; produksi kalor; produk hasil pembakaran; serta produksi dari berbagai zat racun (*toxic*), zat yang tidak dikenal, zat korosif dan lain sebagainya. Sebagian besar pengujian reaksi terhadap api menitikberatkan pada emisi dari hal-hal yang tidak diinginkan, seperti jumlah panas yang dilepaskan, jumlah asap yang dihasilkan, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan emisi awal (*ignitability*). Pengujian ini biasanya dilaksanakan pada benda-benda yang dapat terbakar.

2. Ketahanan terhadap Api (*Fire Endurance/Resistance*)

Ketahanan terhadap api adalah berkaitan dengan seberapa baik suatu produk dapat menahan atau mencegah penyebaran api, dan seberapa lama dapat menahan beban selama terjadi kebakaran. Pengujian-pengujian ketahanan terhadap api diantaranya adalah pengujian dengan penghalang kebakaran dan

elemen penunjang seperti lantai, tembok, atap, pintu, jendela dan benda-benda berhubungan lainnya.

Standar-standar tersebut pada umumnya ingin mendefinisikan bahaya yang ada pada peristiwa kebakaran secara lebih tepat. Oleh karena itu, pengembangan terhadap berbagai standar pengujian baik reaksi maupun ketahanan terhadap api tetap dilaksanakan.

Salah satu parameter pengujian reaksi-terhadap-api yang cukup penting untuk mengkarakteristikan api yang tidak diinginkan adalah laju produksi kalor (*Heat Release Rate/HRR*). Laju produksi kalor merupakan parameter kuantitatif dari api ataupun peristiwa pembakaran, sehingga bahaya dari api yang tidak diinginkan dapat diketahui dan diukur. Laju produksi kalor dinyatakan dalam satuan kiloWatt (atau MW dalam beberapa kasus).

II.3.2. Definisi dan Fungsi Laju Produksi Kalor

Laju produksi kalor pada dasarnya adalah nilai kalor yang dilepaskan per satuan waktu pada suatu sampel akibat adanya reaksi eksotermik setelah energi aktivasinya terlewati. Laju produksi kalor tidak hanya satu dari sebagian variabel yang digunakan untuk mendeskripsikan kebakaran/api. Namun, laju produksi kalor adalah variabel tunggal terpenting dalam mendeskripsikan kebakaran, kecuali ledakan [Babrauskas and Peacock, 1992]. Ada tiga alasan utama untuk hal ini, yaitu:

1. Laju produksi kalor (HRR) adalah gaya penggerak untuk kebakaran/api. Laju produksi kalor dapat digambarkan sebagai mesin penggerak kebakaran. Hal ini cenderung terjadi dalam arah umpan balik-positif (*positive-feedback*), panas/kalor menimbulkan lebih banyak lagi panas/kalor (*'heat makes more heat'*). Hal ini tidak terjadi seperti halnya dengan variabel kebakaran lainnya, contohnya karbon monoksida. Karbon monoksida tidak menimbulkan lebih banyak lagi karbon monoksida.
2. Sebagian besar variabel lain berhubungan dengan laju produksi kalor (HRR) Perkembangan dari sebagian besar produk hasil kebakaran yang tidak diinginkan cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya laju produksi kalor. Asap, gas-gas berbahaya, temperatur ruangan dan variabel bahaya kebakaran lainnya umumnya bergerak naik secara bersamaan seiring dengan meningkatnya laju produksi kalor.

3. Tingginya laju produksi kalor (HRR) mengindikasikan tingginya ancaman kematian

Beberapa variabel kebakaran tidak secara langsung berhubungan sebagai ancaman hidup. Sebagai contoh jika suatu produk menunjukkan kemudahannya untuk mampu nyala (*ignitability*) ataupun tingginya laju penyebaran apinya, hal ini tidak selalu berarti bahwa suatu kondisi kebakaran dianggap berbahaya. Keadaan tersebut dianggap hanya sebagai kecenderungan api yang mengganggu. Sebaliknya, tingginya laju produksi kalor dalam suatu kebakaran sangatlah berbahaya. Hal ini disebabkan karena tingginya laju produksi kalor dapat mengakibatkan tingginya temperatur dan besarnya fluks kalor yang terjadi, hal ini terbukti mematikan bagi penghuni dalam suatu kondisi kebakaran.

Simulasi yang dilakukan oleh Bukowski dkk. (1989) serta Peacock & Bukowski (1990) menjelaskan alasan-alasan tersebut. Simulasi yang dilakukan adalah pembakaran pada kursi dengan kain pelapis yang terjadi dalam suatu ruangan. Variabel yang digunakan untuk mengukur tingkat bahaya dari kebakaran dalam simulasi ini adalah temperatur dan CO₂. Walaupun masih banyak gas-gas lain yang dapat digunakan sebagai indikator dari tingkat toxicity, akan tetapi konsentrasi CO₂ mewakili jenis serta bentuk dari kurva untuk gas-gas lainnya. Simulasi yang dilakukan adalah dengan tiga variasi pembakaran, yaitu:

1. Kasus dasar, sebuah kursi yang terbakar dalam suatu ruangan
2. Penggantian variabel laju produksi kalor (HRR) dari kursi
3. Penggantian variabel toxicity dari material
4. Percepatan waktu penyalaan dari kursi yang terbakar dari 70 detik menjadi 35 detik.

Tabel 2.3 Hasil Simulasi Pembakaran Pada Kursi Dengan Kain Pelapis yang Terjadi Dalam Suatu Ruangan

Skenario	Waktu untuk terjadi (detik)	Waktu untuk kematian (detik)
Kasus dasar	180	>600
Penggandaan variabel HRR	160	180
Penggandaan variabel toxicity	180	>600
percepatan waktu penyalaan	140	>600

[Babrauskas and Peacock, 1992]

Dari hasil yang diperoleh, seperti terlihat pada Tabel 2.3., ternyata penggandaan variabel laju produksi kalor menghasilkan efek berbahaya yang lebih besar jika dibandingkan dengan merubah waktu penyalaan (walau dalam beberapa kasus aktual yang terjadi, perbaikan dari performa penyalaan suatu produk dapat mencegah terjadinya kebakaran).

II.3.3. Pengukuran Laju Produksi Kalor

Laju produksi kalor dapat terukur dengan menggunakan kalorimeter api (*cone calorimeter api*). Kalorimeter api merupakan alat uji berskala kecil (skala laboratorium) untuk mengukur laju produksi kalor (*Rate of Heat Release*), waktu nyala (*Ignition Time*), laju pengurangan massa (*mass loss*) dan produksi asap (*Smoke Production*) dari produk-produk bangunan [Tsantaridis, 2003 & ASTM E 1354, 1997]. Kalorimeter api ini dapat juga digunakan untuk mengukur parameter-parameter diatas dari suatu material furnitur.

Kalorimeter api berfungsi sebagai alat simulasi kebakaran secara parsial pada suatu ruangan [Babrauskas and Peacock, 1992]. Karena menurut Babrauskas, pada awalnya kalorimeter api dikembangkan sebagai alat untuk mengukur laju produksi kalor dari produk-produk bangunan agar kontribusi produk-produk bangunan tersebut terhadap kebakaran ruang dapat diramalkan [Tsantaridis, 2003].

Selain fungsi yang telah disebutkan di atas, kalorimeter api juga dapat mengetahui karakteristik ketahanan suatu material terhadap bahaya kebakaran. Fungsi ini dapat direalisasikan dengan pengukuran parameter laju produksi kalor, waktu nyala, laju

pengurangan massa, dan produksi asap pada saat pembakaran sampel material dengan kalorimeter api.

Metode yang digunakan dalam pengukuran laju produksi kalor menggunakan kalorimeter api adalah teknik pengukuran konsumsi oksigen. Metode ini berdasarkan fakta bahwa kalor pembakaran dari bahan bakar secara umum adalah konstan jika dihubungkan dengan konsumsi oksigen ataupun udara. Teknik pengukuran laju produksi kalor (HRR) berdasarkan konsumsi oksigen mengacu kepada prinsip dasar bahwa panas yang dilepaskan per unit oksigen yang dibutuhkan adalah kurang lebih sama untuk bahan bakar organik umum yang sering ditemui sebagai bahan bakar dalam kebakaran, dengan nilai sebesar 13.1 kJ/g O₂ [Hugget, 1980:61-65]. Nilai tersebut didapatkan melalui beberapa proses perhitungan.

Proses perhitungan kalor pembakaran yang dinyatakan dengan konsumsi oksigen, dapat dilihat dengan mengambil proses pembakaran propana sebagai salah satu contoh. Dengan melihat pada persamaan pembakaran propana:



dapat dikatakan bahwa sejumlah 2044 kJ energi dilepaskan untuk setiap pembakaran satu mol propana, atau untuk lima mol oksigen yang dikonsumsi, maka kalor pembakaran dapat dinyatakan $\Delta H_{c,ox} = -408,8$ kJ/mol atau $(-408,8/32) = -12,77$ kJ/g, (32 adalah berat molekul oksigen). Dapat dilihat pada Tabel 2.4., untuk berbagai jenis bahan bakar nilai $\Delta H_{c,ox}$ mendekati nilai tertentu.

Tabel 2.4 Kalor pembakaran dari beberapa bahan bakar pada 25° C (298K)

		$-\Delta H_c$ (kJ/mol)	$-\Delta H_c$ (kJ/g)	$-\Delta H_{c,air}$ (kJ/g(air))	$-\Delta H_{c,ox}$ (kJ/g(O ₂))
Carbon monoxide	CO	283	10.10	4.10	17.69
Methane	CH ₄	800	50.00	2.91	12.54
Ethane	C ₂ H ₆	1423	47.45	2.96	11,21
Ethene	C ₂ H ₄	1411	50.35	3.42	14.74
Ethyne	C ₂ H ₂	1253	48.20	3.65	15.73
Propane	C ₃ H ₈	2044	46.45	2.97	12.80
n-Butane	n-C ₄ H ₁₀	2650	45.69	2.97	12.80
n-Pentane	n-C ₅ H ₁₂	3259	45.27	2.97	12.80
n-Octane	n-C ₈ H ₁₈	5104	44.77	2,97	12.80
c-Hexane	c-C ₆ H ₁₂	3680	43.81	2.97	12.80
Benzene	C ₆ H ₆	3120	40.00	3.03	13.06
Methanol		635	19.83	3.07	13.22
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	1232	26.78	2.99	12.88
Acetone		1786	30.79	3.25	14.00
D-Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	2772	15.4	3.08	13.27
Cellulose		--	16.09	3.15	13.59
Polyethylene		--	43.28	2,93	12.65
Polypropylene		--	43,31	2.94	12.66
Polystyrene		--	39.85	3.01	12.97
Polyvinylchloride		--	16.43	2.98	12.84
Polymethylacrylate		--	24,89	3.01	12.98
Polyacrylonitrile		--	30.80	3.16	13.61
Polyoxymethylene		---	15.46	3.36	14.50
Polycarbonate		--	29.72	3.04	13.12
Nylon 6.6		--	29.58	2.94	12.67

Berdasarkan penelitian, Hugget (1980) menyimpulkan bahwa bahan bakar cair dan gas umumnya memiliki nilai $\Delta H_{c,ox} = -12,72 \pm 3\%$ kJ/g oksigen (kecuali ethene dan ethyne). Sedangkan polimer memiliki nilai $\Delta H_{c,ox} = -13,02 \pm 4\%$ kJ/g oksigen (kecuali polyoxymethylene).

Apabila proses pembakaran terjadi secara sempurna (dalam hal ini produk pembakarannya hanya uap air dan karbondioksida), maka laju produksi kalor dapat dihitung dengan persamaan (2.3).

$$\dot{Q}_c = (0.21 - \eta_{O_2}) \cdot V \cdot 10^3 \cdot \rho_{O_2} \cdot \Delta H_{c,ox} \quad (2.3)$$

dimana \dot{Q}_c adalah laju produksi kalor (kW), V merupakan aliran volumetric udara (m³/s), ρ_{O_2} massa jenis oksigen (kg/m³) pada temperatur dan tekanan normal, serta η_{O_2} fraksi mol oksigen. Persamaan di atas bila diturunkan akan menjadi persamaan (2.4) dibawah ini:

$$q = (13,1 \times 10^3) 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e} \frac{(XO_2^0 - XO_2)}{(1,105 - 1,5XO_2)}} \quad (2.4)$$

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*

Dengan memasukkan nilai fraksi mol oksigen yang terukur pada keadaan normal 0,2095 maka persamaan (2.4) berubah menjadi:

$$q = (13,1 \times 10^3) 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e} \frac{(0,2095 - XO_2)}{(1,105 - 1,5XO_2)}} \quad (2.5)$$

Persamaan (n) ini dipakai dalam perhitungan laju produksi kalor secara experimental dengan menggunakan kalorimeter api.