

BAB II

DASAR TEORI

2.1 REAKSI PEMBAKARAN

Api adalah reaksi kimia eksotermik yang disertai timbulnya panas/kalor, cahaya (nyala), asap dan gas dari bahan yang terbakar. Pembakaran adalah reaksi kimia yang cepat antara oksigen dan bahan yang dapat terbakar, disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor. Pembakaran dikatakan sempurna bila campuran bahan bakar dan oksigen (dari udara) mempunyai perbandingan yang tepat, hingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, dikatakan campuran “*lean*” (kurus). Sebaliknya, bila bahan bakarnya terlalu banyak (atau tidak cukup oksigen), dikatakan campuran “*rich*” (kaya).

Perbandingan jumlah udara dengan jumlah bahan bakar disebut dengan *Air-Fuel Ratio* (AFR). Perbandingan ini dapat dibandingkan baik dalam jumlah massa ataupun dalam jumlah volume.

$$AFR = \frac{m_{fuel}}{m_{air}} = \frac{V_{fuel}}{V_{air}} \quad (2.1)$$

Besarnya AFR dapat diketahui dari uji coba reaksi pembakaran yang benar-benar terjadi. Nilai ini disebut AFR aktual. Sedangkan AFR lainnya adalah AFR stokiometrik, yang merupakan AFR diperoleh dari persamaan reaksi pembakaran. Kebalikan dari nilai AFR adalah *Fuel Air Ratio* (FAR), yaitu perbandingan jumlah bahan bakar dengan jumlah udara.

Dari perbandingan nilai AFR tersebut dapat diketahui nilai Rasio Ekuivalen (ϕ) :

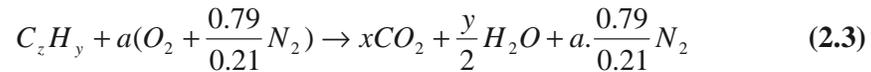
$$\phi = \frac{AFR_{sto}}{AFR_{akt}} = \frac{FAR_{akt}}{FAR_{sto}} \quad (2.2)$$

Dimana jika nilai rasio ekuivalen tersebut :

- $\phi > 1 \rightarrow$ Terdapat kelebihan bahan bakar dan campuran disebut campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\phi < 1 \rightarrow$ Terdapat kelebihan udara dan campurannya disebut miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)

$\phi = 1 \rightarrow$ Merupakan campuran stokiometri.

Untuk dapat mengetahui nilai AFR, maka harus dihitung jumlah keseimbangan atom C, H, dan O dalam suatu reaksi pembakaran. Adapun rumus umum reaksi pembakaran yang menggunakan udara kering adalah:



Reaksi pembakaran di atas adalah reaksi pembakaran sempurna (stokiometrik), dimana semua hidrogen dan karbon di dalam bahan bakar teroksidasi seluruhnya menjadi H₂O dan CO₂. Persamaan tersebut juga menunjukkan bahwa setiap kmol udara di atmosfer mengandung 0,79 kmol nitrogen dan 0,21 kmol oksigen.

Proses reaksi pembakaran dapat terjadi dalam dua cara, yaitu *premixed* dan *non-premixed*. Api *premixed* terjadi ketika bahan bakar dan udara sudah dicampur terlebih dahulu sebelum terjadi reaksi pembakaran. Contoh dari api jenis ini adalah pada busur nyala api las dan pada motor pembakaran dalam. Sedangkan api *non-premixed* adalah api yang berasal dari bahan bakar dengan mengambil udara secara difusi dari lingkungan sekitarnya. Api jenis ini banyak ditemui seperti pada kebakaran gedung, dan kebakaran-kebakaran pada ruangan terbuka lainnya.

Pada api *non-premixed*, besarnya laju pembakaran dihitung dari laju suplai bahan bakar. Pada bahan bakar padat dan cair, laju tersebut berarti laju suplai material *volatile* dari permukaan bahan bakar. Sehingga besarnya laju pembakaran (\dot{m}'') adalah:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s} \quad (2.4)$$

dimana :

\dot{Q}_F'' = heat flux berasal dari api (kW/m²)

\dot{Q}_L'' = heat flux yang hilang ke permukaan bahan bakar (kW/m²)

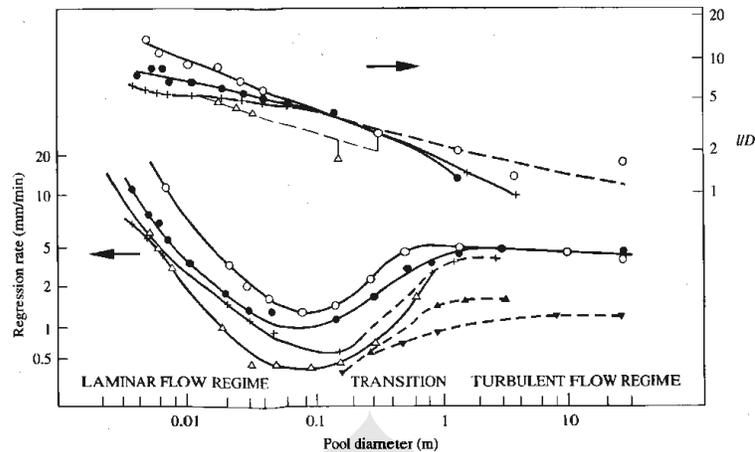
L_V = panas yang diperlukan untuk menghasilkan material volatile (kJ/g),
dimana untuk bahan bakar cair sama dengan nilai panas penguapannya.

Bahan bakar dapat terbakar dan mengalami reaksi pembakaran hanya dalam kondisi gas. Oleh karena itu, bahan bakar yang berada dalam bentuk zat awal selain gas (padat dan cair) harus mengalami perubahan bentuk menjadi gas sebelum dapat terbakar. Untuk bahan bakar cair, proses tersebut dapat dilakukan dengan cara menguapkannya saja. Sedangkan bagi hampir semua bahan bakar padat, perlu dilakukan dekomposisi secara kimiawi yang disebut pyrolisis untuk menghasilkan produk yang berat molekulnya cukup ringan sehingga dapat menguap dan terbakar.

2.2 POOL FIRE

Bahan bakar cair cenderung untuk terbakar sebagai suatu 'kolam api' (*pools*) dengan permukaannya yang mendatar dan uniform. Sebuah *pool fire* adalah api yang terbakar secara difusi dari penguapan cairan bahan bakar dengan momentum bahan bakarnya yang sangat rendah. Api yang terbakar dari bahan bakar jenis ini sangat sulit dipadamkan dan menimbulkan dampak kerugian yang besar. Penanganan kebakaran dari api jenis ini berbeda dengan kebakaran dari bahan bakar padat. Kebakaran jenis *pool fire* tidak bisa dipadamkan dengan air, karena berat jenis air lebih berat dari pada berat jenis bahan bakar. Sehingga memadamkan *pool fire* dengan menyiramkan air justru akan memperbesar nyala apinya.

Sifat *flame* yang terbentuk dari *pool fire* ada tiga jenis tergantung dari diameter *pool fire* tersebut. Jika diameternya kurang dari 0.03 m, maka *flame*-nya bersifat laminar dan laju pembakarannya akan meningkat sebanding dengan peningkatan diameter *pool fire*. Sementara pada diameter besar ($D > 1$ m), *flame*-nya bersifat turbulen dan ukuran diameter tidak mempengaruhi laju pembakaran. Untuk jangkauan $0.03 < D < 1$ m, *flame* bersifat transisi antara laminar dan turbulen. Pada *pool fire* berukuran kecil, *heat transfer* paling besar terjadi secara konduksi, sedangkan pada *pool fire* berukuran besar *heat transfer* paling banyak terjadi secara radiasi.



Gambar 2.1 Grafik *regression rate and flame height* untuk *pool fire* [Drysdale,2002]

2.2.1 Laju Pembakaran dan Laju Produksi Kalor (HRR) Pool Fire

Untuk menghitung laju pembakaran pool fire, maka digunakan rumus :

$$m'' = m_{\infty}'' (1 - e(-K\beta D)) \quad (2.5)$$

dengan :

$K\beta$ = Koefisien perpindahan panas radiasi

D = diameter pool fire.

Dari nilai laju pembakaran tersebut dapat diketahui besarnya energi yang dikeluarkan api pembakaran.

$$\dot{Q}_C = x \cdot m'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \text{ (kW)} \quad (2.6)$$

dimana : A_f = luas permukaan bakar (m^2)

ΔH_c = panas pembakaran material volatile (kJ/g)

x = faktor (<0,1) kesempurnaan pembakaran.

Laju produksi kalor dapat terukur dengan menggunakan *cone calorimeter*. *Cone calorimeter* 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].

Cone calorimeter berfungsi sebagai alat simulasi kebakaran secara parsial pada suatu ruangan [Babrauskas and Peacock, 1992]. Karena menurut Babrauskas, pada awalnya *cone calorimeter* 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].

Metode yang digunakan dalam pengukuran laju produksi kalor menggunakan *cone calorimeter* 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.

Apabila proses pembakaran terjadi secara sempurna (dalam hal ini produk pembakarannya hanya uap air dan karbondioksida), maka laju produksi kalor dapat dihitung dengan persamaan (2.7).

$$\dot{Q}_c = (0.21 - \eta_{O_2}) \cdot V \cdot 10^3 \cdot \rho_{O_2} \cdot \Delta H_{c,ox} \quad (2.7)$$

dimana \dot{Q}_c adalah laju produksi kalor (kW), V merupakan aliran volumetrik 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 (2.8) dibawah ini:

$$q = (13,1 \times 10^3) 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5 X_{O_2})} \quad (2.8)$$

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 temperatur at orifice plate* (K)

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

Dengan memasukkan nilai fraksi mol oksigen yang terukur pada keadaan normal 0,2095 maka persamaan (2.8) berubah menjadi:

$$q = (13,1 \times 10^3) 1,10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(0,2095 - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5 X_{O_2})} \quad (2.9)$$

Persamaan (n) ini dipakai dalam perhitungan laju produksi kalor secara experimental dengan menggunakan *cone calorimeter*.

2.2.2 Tinggi Nyala Api *Pool Fire* (*Flame Height*)

Nyala api dari *pool fire* selalu berfluktuasi, sehingga untuk menentukan tinggi nyala api dapat dilakukan perhitungan maupun dengan visual yang terjadi sebenarnya (difoto). Untuk menentukan tinggi nyala api dengan perhitungan dapat menggunakan korelasi yang telah dibuat oleh *Heskestad*, (1995) dan *Thomas* (1962). Rumus berikut merupakan rumus empiris yang berdasarkan kepada eksperimental [Heskestad, 1995 and Thomas, 1962] :

$$H_f = 0.235 \dot{Q}^{2/3} - 1.02 D \quad (2.10)$$

Dengan:

H_f = flame height (m)

\dot{Q} = heat release rate of the fire (kW)

D = diameter of the fire (m)

2.3 SOLID FUEL (*BRIKET BATUBARA*)

Briket Batubara adalah bahan bakar padat yang terbuat dari Batubara dengan sedikit campuran seperti tanah liat dan tapioka. Teknologi pembuatan Briket tidaklah terlalu rumit dan dapat dikembangkan oleh masyarakat maupun pihak swasta dalam waktu singkat. Namun demikian Briket memiliki keterbatasan yaitu waktu penyalaan awal memakan waktu 5 – 10 menit dan diperlukan sedikit penyiraman minyak tanah sebagai penyalaan awal, Briket Batubara hanya efisien jika digunakan untuk jangka waktu data 2 jam. [sumber ; pt. ba, bppt].

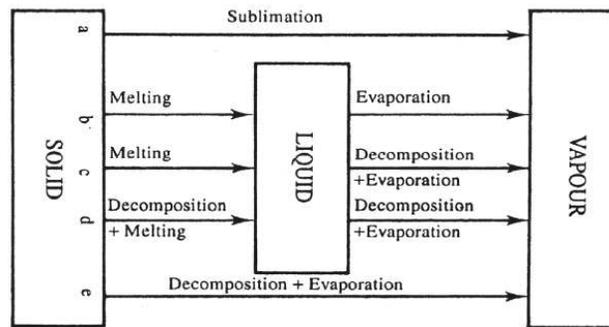
Tabel 2.1 Komposisi dan Emisi Briket Batubara

Komposisi Kimia	Emisi Gas
- Karbon (C) 64,0 - 67,0%	- Sulfur (SO ₂) < 5 ppm
- Hidrogen (H) 2,7 - 49,0%	- Nitrogen Dioksidan (NO _x) < 2 ppm
- Oksigen (O) 11,1 - 13,0%	- Karbon Monoksida (CO) < 1.000 ppm
- Nitrogen (N) 1,0 - 1,1%	Asap Tidak Berasap Suhu Penyalaan 185 C



Gambar 2.2 Briket bentuk telur

Pembakaran bahan bakar padat akan melalui tahapan perubahan fase menjadi fase gas. Pada dasarnya, dekomposisi termal atau pyrolysis dari bahan bakar padatan hanya terjadi di tingkatan temperatur tertentu pada permukaan padatan tersebut. kemudian setelah menjadi gas yang bersifat volatile dan bercampur dengan udara sebagai oksidator maka gas tersebut dapat dipicu dengan *igniter* agar membentuk api . Pada saat yang bersamaan dengan proses oksidasi campuran bahan bakar, terjadi pula proses emisi kalor yang melepaskan sejumlah panas, maka proses ini digolongkan ke dalam reaksi eksotermik dimana terjadi perpindahan energi dari sistem ke lingkungan.



Gambar 2.3 Perubahan fase zat dari padat ke gas untuk reaksi pembakaran
[Drysdale, 2002]

2.4 KELAS KEBAKARAN

Dalam memadamkan api atau kebakaran maka diperlukan alat pemadam yang tepat sesuai dengan jenis atau asal api. Ada beberapa jenis api yang dihasilkan, dimana perbedaan terletak pada sumber bahan yang terbakar. Sumber bahan/material yang terbakar akan menentukan karakteristik api, asap yang akan terbentuk, sehingga memerlukan alat pemadam api yang berbeda untuk hal tersebut.

Tabel 2.2 Kelas Kebakaran

No	Kelas Kebakaran	Keterangan	Pemadaman
1	A	Kebakaran yang disebabkan oleh benda-benda padat, misalnya kertas, kayu, plastik, karet, busa dan lain-lainnya	Air, pasir, karung goni yang dibasahi, dan Alat Pemadam Kebakaran (APAR) atau racun api tepung kimia kering.
2	B	Kebakaran yang disebabkan oleh benda-benda mudah terbakar berupa cairan, misalnya bensin, solar, minyak tanah, spirtus, alkohol dan lain-lainnya	Media pemadaman kebakaran untuk kelas ini berupa: pasir dan Alat Pemadam Kebakaran (APAR) atau racun api tepung kimia kering. Dilarang memakai air untuk jenis ini karena berat jenis air lebih berat dari pada berat jenis bahan di atas sehingga bila kita menggunakan air maka kebakaran akan melebar

			kemana-mana
3	C	Kebakaran yang disebabkan oleh listrik.	Alat Pemadam Kebakaran (APAR) atau racun api tepung kimia kering. Matikan dulu sumber listrik agar kita aman dalam memadamkan kebakaran
4	D	Kebakaran yang terjadi pada material-material logam.	Pemadamannya biasa menggunakan bubuk kimia kering.
5	K	Kebakaran yang disebabkan oleh minyak penggorengan.	Kebakaran ini merupakan bagian kebakaran kelas B, tetapi karakteristiknya yang berbeda membuat kebakaran jenis ini perlu mendapat perhatian khusus.

2.5 SISTEM PEMADAM KEBAKARAN KABUT AIR

Pemadam kebakaran sistem kabut air adalah suatu sistem perlindungan bahaya kebakaran yang dipasang tetap pada suatu instalasi bangunan yang menggunakan air untuk mengontrol, menahan, atau memadamkan api [Kathy,1994]. Sistem tersebut terdiri dari nosel otomatis yang terpasang dengan sistem pemipaan yang dihubungkan dengan tempat penampungan air. Pada saat beroperasi, pemadam kebakaran sistem kabut air ini akan menyemprotkan air yang memiliki ukuran droplet sangat kecil sehingga berbentuk kabut dengan bentuk semprotannya yang berupa kerucut. Pada beberapa sistem juga ditambahkan gas-gas lain atau sejenis aditif. Pemadam kebakaran sistem kabut air yang baik harus mampu menghasilkan, menyalurkan, dan menjaga konsentrasi droplet air pada selang waktu terjadinya kebakaran. Akan tetapi laju aliran air pada pemadam kebakaran sistem kabut air lebih rendah dari laju aliran pemadam kebakaran sistem sprinkler biasa.

2.5.1 Kabut Air

Kabut air adalah air yang pecah dan membentuk seperti awan dengan ukuran tetesan air (droplet) yang sangat kecil. Hal ini menyebabkan luas permukaannya menjadi sangat besar, sehingga memperbesar laju perpindahan

panas. Pada salah satu sumber, ukuran droplet air yang dimaksud tadi adalah apabila memiliki diameter rata-rata volumetrik antara 30-300 μm [Kathy,1994]. Sedangkan pada sumber lain [Husted,2003] menyatakan bahwa kabut air terjadi pada air yang memiliki ukuran droplet dengan radius 50 μm .

Untuk memperoleh kabut air yang baik, dapat dilakukan dengan menggunakan tiga jenis nosel [Hart,2005], yaitu: nosel tekanan tinggi orifis tunggal, nosel tekanan rendah fluida tunggal, dan nosel atomisasi udara. Nosel tekanan tinggi umumnya bekerja pada tekanan lebih dari 10 MPa, dan menghasilkan droplet air dengan ukuran diameter rata-rata antara 30 – 100 μm . Nosel tekanan rendah fluida tunggal bekerja pada tekanan antara 0,6 – 1 MPa. Ukuran droplet air yang dihasilkannya lebih besar dari nosel tekanan tinggi, yaitu sekitar 200 – 300 μm . Sedangkan pada nosel atomisasi udara mampu menghasilkan droplet air berukuran antara 100 – 200 μm dan umumnya bekerja pada tekanan rendah yaitu antara 0,6 – 1 MPa.

2.5.2 Penggunaan Sistem Kabut Air

Pemadam kebakaran sistem kabut air awalnya digunakan pada tahun 1930 di Inggris, dimana pada saat itu diterapkan di industri untuk melindungi aset perusahaan. Penelitian untuk mengembangkan dan mengoptimalkan sistem ini terus dilakukan pada dekade terakhir ini, dan perkembangan sistem ini diarahkan untuk dapat menggantikan beberapa sistem pemadam yang sudah ada sehingga meningkatkan tingkat keamanan dari bahaya kebakaran.

Pemadam kebakaran dengan menggunakan sistem kabut air ternyata memiliki berbagai kelebihan dibandingkan dengan pemadam kebakaran konvensional, diantaranya adalah:

1. Tidak beracun. Media yang digunakan adalah air sehingga tidak menimbulkan bahaya racun seperti jika menggunakan media pemadam halon.
2. Akses air yang mudah diperoleh. Air adalah materi yang dapat diperoleh dari mana saja, tidak seperti zat lainnya yang sulit untuk didapat.

3. Biaya yang murah. Penyediaan air relatif murah dibandingkan dengan zat media pemadam lainnya.
4. Sedikit (bahkan tidak ada) residu. Kabut air tidak akan menyisakan air, sehingga aman bagi komponen-komponen listrik dan peralatan yang sensitif terhadap air. Meskipun masih menyisakan air, akan lebih mudah ketika dibersihkan.
5. Penetrasi yang luas. Kabut air dapat menjangkau areal yang luas, sehingga laju penyerapan panas menjadi lebih besar.
6. Ukuran dan berat yang ringan. Hal ini akan sesuai digunakan pada sarana transportasi, dimana masalah berat menjadi faktor yang penting.

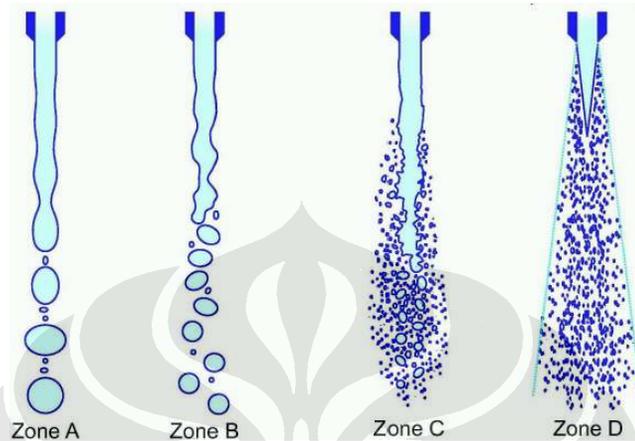
2.5.3 Pembentukan Droplet Dari Berbagai Jenis Nosel

Terdapat tiga cara untuk membentuk suatu spray [Hart,2005], yaitu:

- a. Dengan membuat rotasi aliran di dalam spray
- b. Dengan membenturkan jet air
- c. Dengan membuat droplet air secara langsung dari aliran jet air (water jet) yang turbulen, saat keluar dari nosel.

Cara yang paling umum terdapat dalam sistem water mist adalah dari cara ketiga, yaitu dengan membuat bentuk droplet langsung dari aliran jet air yang turbulen. Bagaimana cara pemecahan aliran jet tersebut tergantung dari kecepatan dan diameter jet. Ada empat cara untuk membuat droplet dari jet air, yaitu:

- a. Dengan aturan "*Rayleigh break-up*". Droplet dibentuk jauh dari ujung nosel. Diameter droplet lebih besar daripada diameter lubang di nosel.
- b. Dengan cara "*First wind-induced break-up*". Pembentukan droplet terjadi jauh dibawah outlet nosel. Diameter droplet ukurannya kira-kira sama dengan ukuran lubang nosel.
- c. Dengan cara "*Second wind-induced break-up*". Droplet terbentuk di dekat ujung outlet nosel. Diameter droplet lebih kecil daripada diameter lubang nosel.
- d. Dengan cara "Atomisasi". Droplet terbentuk di ujung lubang keluar nosel. Diameter droplet jauh lebih kecil dari pada diameter lubang nosel.



Gambar 2.4 Cara pembentukan Droplet [Husted, 2004]

Faktor yang paling mempengaruhi cara pembentukan droplet adalah bilangan Reynold dan bilangan Ohnesorge. Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan gaya inersia dengan gaya viskositas yang mengalir pada suatu fluida.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2.11)$$

ρ = kerapatan fluida (kg/m^3)

v = kecepatan aliran (m/s)

l = panjang karakteristik (m)

μ = viskositas dinamik (Ns/m^2)

Sedangkan bilangan Ohsenorge (Oh) adalah rasio antara gaya viskos dengan tegangan permukaan.

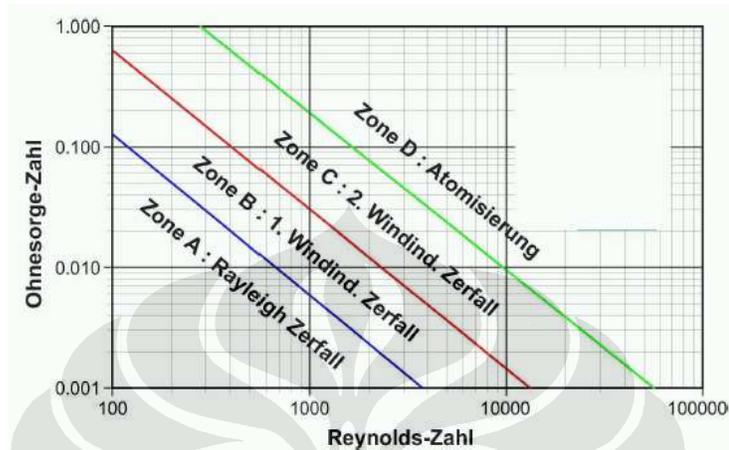
$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} \quad (2.12)$$

dimana : σ = Tegangan permukaan (N/m)

d = Diameter nosel (m)

Untuk nosel bertekanan tinggi yang biasa dengan diameter dalam nosel 0,8 mm, bilangan Ohnesorge-nya adalah 0,004.

Berikut ini adalah tabel grafik untuk menentukan jenis droplet yang terbentuk dengan menggunakan bilangan Reynolds dan bilangan Ohnesorge.



Gambar 2.5 Grafik Reynolds vs Ohsenorge [Husted, 2004]

2.5.4 Perlambatan Droplet Didalam Spray

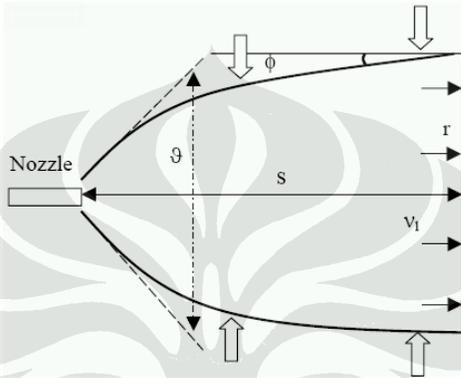
Droplet air yang meninggalkan nosel dengan kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan kritisnya akan mengalami perlambatan secara cepat. Droplet yang berukuran kecil mengalami perlambatan sangat cepat. Droplet berukuran 100 μm yang banyak digunakan pada sistem kabut air mengalami perlambatan selama 0,01 detik dari kecepatan asal 100 m/s menjadi 10 m/s pada jarak 0,3 m. Selama mengalami perlambatan, droplet tersebut menguap, tergantung dari kandungan uap air dan temperatur udara sekitar.

Droplet yang mengalami perlambatan momentumnya akan hilang dan di transfer ke udara sekitar, sehingga arah akan sama dengan arah pergerakan droplet. Pada spray dengan banyak droplet, hal ini akan menyebabkan udara terhisap ke dalam spray. Percepatan yang dialami udara berarti kecepatan relatif antara droplet dan udara sekitar berkurang, yang akan meningkatkan panjang pancaran droplet.

Hal ini akan terjadi tergantung pada mekanisme nosel mendistribusikan droplet. Bentuk yang paling umum adalah kerucut penuh (*full cone*) dan kerucut

berlubang (*hollow cone*). Pada *spray full cone*, droplet di distribusikan secara merata pada semua sudut pancaran spray. Sedangkan pada *hollow cone*, droplet dibuat lebih banyak di daerah pinggir cone & droplet mengalami perlambatan yang sangat cepat. Medan kecepatan droplet di dalam spray pun sangat kompleks.

Sedangkan untuk spray yang berbentuk *full cone*, properti fisiknya dapat diketahui.



Gambar 2.6 Skematik *full-cone* spray [Husted, 2004]

Nilai v_1 dapat diketahui dari [Gardiner, 1998] :

$$v_1 \approx \frac{\sqrt{m_w^* \cdot p^{0,5}}}{r} \quad (2.13)$$

Dimana m_w^* = laju aliran massa air,

p = tekanan nossel,

r = jari-jari spray, yang dihitung dari : $r \approx s \cdot \tan\left(\left(\frac{\vartheta}{2} + \phi\right) \cdot \frac{1}{2}\right)$, $\vartheta \leq 45^\circ$ (2.14)

$$r \approx s \cdot \tan(\vartheta/4), \vartheta \geq 45^\circ$$

ϑ = sudut cone

s = jarak dari nossel

ϕ = sudut ujung spray terhadap normal

2.5.5 Distribusi Ukuran Droplet

Distribusi ukuran droplet menunjukkan daerah dari ukuran droplet terkandung dalam sample yang representatif dari spray atau kabut awan diukur pada lokasi yang ditentukan. NFPA 750 telah membagi droplet yang diproduksi oleh sistem *water mist* menjadi 3 kelas untuk membedakan antara “lebih kasar” dan “lebih halus” ukuran droplet dalam 1000 micron window. Klasifikasinya adalah:

- Kelas 1
Mist mempunyai 90% dari volume spray ($D_{v0.9}$) dalam ukuran tetesan 200 micron atau kurang.
- Kelas 2
Mempunyai $D_{v0.9}$ 400 micron atau kurang.
- Kelas 3
Mist mempunyai nilai $D_{v0.9}$ lebih besar dari 400 micron.

Dalam teori, droplet kecil lebih efektif dalam penanggulangan kebakaran dari pada droplet besar, karena total luas permukaannya yang tersedia untuk evaporasi dan penurunan panas lebih besar. Hal itu lebih efektif dalam melemahkan radiasi. Selain itu juga, droplet kecil mempunyai waktu tinggal yang lebih lama, memungkinkan mereka dibawa arus udara ketempat terpencil atau bagian yang terhalang dalam penahanan. Droplet kecil dapat menampilkan perilaku mirip gas dan karakteristik percampuran yang lebih tinggi. Akan tetapi sangat sulit bagi droplet kecil untuk penetrasi kedalam lidah api dan untuk mencapai permukaan bahan bakar dikarenakan daya angkat dan hidrodinamik efek dari lidah api. Droplet halus dengan momentum rendah mudah terbawa pergi dari api dengan arus udara. Sebagai tambahan, dibutuhkan energi lebih besar untuk memproduksi droplet halus dan memindahkan mereka ke-api.

Droplet besar dapat penetrasi ke lidah api dengan mudah untuk menghasilkan efek langsung dan untuk membasahi dan mendinginkan bahan yang

mudah terbakar. Droplet besar mempunyai total area permukaan untuk evaporasi dan penurunan panas lebih kecil. Kemampuan dari *water mist* dalam mencegah penghalang/perisai api berkurang seiring peningkatan ukuran droplet. Dengan begitu droplet besar dengan kecepatan tinggi dapat menyebabkan bahan bakar cair memercik, yang mengakibatkan peningkatan ukuran api.

Experimental test dengan skala besar dibawah kondisi api yang berbeda telah diteliti untuk mengidentifikasi ukuran droplet optimum untuk penanggulangan kebakaran. Andrews, meringkas ukuran droplet optimum yang disarankan oleh banyak penulis berbeda, seperti diperlihatkan dalam tabel 2.

Tabel 2.3 Ukuran Droplet [Liu, 2000]

Author	Date	Droplet Size (μm)	Notes
Braidech & Neale	1955	300 – 350 100 – 150 150 – 300	Applied vertically down Applied horizontally Low flash point, immiscible fuel
Herterich	1960	350	
Yao & Kalelkar	1970	< 350 4000 – 5000	For gas layer cooling For plume penetration
Vincent et al	1976	310	Gas explosion suppression
Beyler	1977	> 1000	Penetration and prewetting of fires larger than 250 kW
Pietrzak & Patterson	1979	200 – 300	Flame/gas layer cooling
Rasbash	1985	400	High flash point, immiscible fuels
Kaletka	1986	300 – 900	Optimum depends on gas layer temperature
Osaka	1988	250 – 300	Hand-held fog nozzle
Tour & Andersson	1989	300	TA Fogfighter nozzle, hand-held
Marioff	1991	60	Pressure fog nozzle

Bisa dilihat bahwa ukuran optimum dari droplet untuk penanggulangan kebakaran sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti sifat-sifat dari bahan bakar, dan ukuran dari api. Distribusi ukuran droplet yang paling efektif dalam pemadaman suatu skenario kebakaran tidak akan selalu menjadi yang terbaik

untuk skenario lain. Tidak ada satu ukuran distribusi yang cocok untuk semua skenario kebakaran. Sebenarnya, performa *water mist* dengan distribusi percampuran seimbang dari droplet halus dan kasar lebih baik daripada dengan ukuran droplet yang seragam. Lebih lanjut lagi, setiap perubahan dalam ukuran api, kecepatan (momentum) spray dan efek pengurangan akan merubah ukuran droplet yang optimum untuk penanggulangan kebakaran.

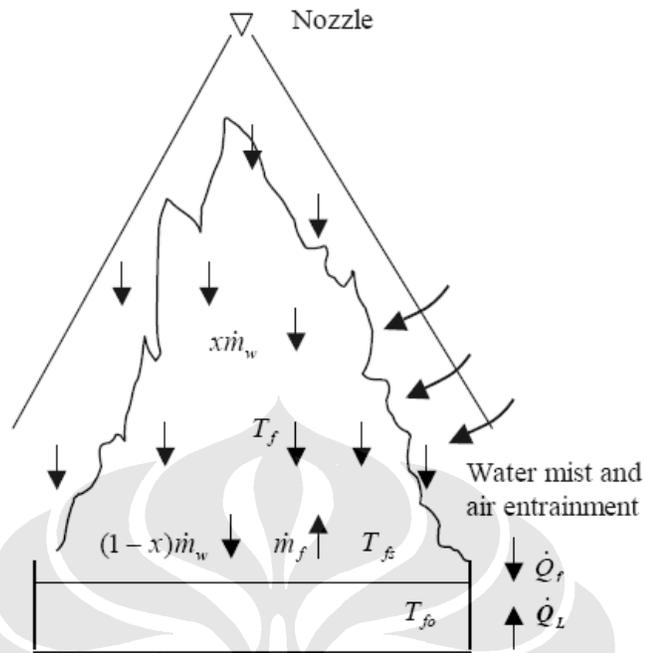
2.5.6 Performa Pemadaman Dengan Kabut Air

Air dapat memadamkan api dengan berbagai cara, diantaranya adalah:

- a. Pemadamaan *flame*. Droplet memasuki *flame*, kemudian *flame* mengalami pendinginan ke temperatur yang cukup rendah sehingga *flame* tidak bisa menyala lagi, akibatnya api akan padam. Permukaan panas dari bahan bakar tersebut akan terus memproduksi produk pyrolisis untuk jangka waktu tertentu yang dapat memicu terjadinya *re-ignition*.
- b. Pendinginan permukaan. Droplet mengenai permukaan bahan bakar, yang mendinginkannya ke temperatur dimana produk pyrolisis tidak lagi dapat diproduksi untuk menghasilkan nyala api kembali.
- c. Droplet menghalangi atau mengurangi re-radiasi dari nyala api dan karena itu mengurangi laju pemanasan dan laju pyrolisis dari permukaan bahan bakar.

2.5.6.1 Pemadaman Flame (Nyala Api)

Ketika kabut air disemprotkan kedalam api, seperti pada gambar dibawah ini, beberapa droplet air ($x m_w^*$) tertahan di dalam *flame* dan sisanya ($(1-x) m_w^*$), menembus *flame* dan mencapai permukaan pembakaran.



Gambar 2.7 Interaksi antara api dan kabut air [Liu, 2006]

Droplet air yang tertahan tadi menyerap panas dari *flame* dan panas yang dilepaskan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan campuran udara-bahan bakar dan droplet air. Persamaan kesetimbangan energi di dalam *flame* dapat ditulis berdasarkan persamaan kesetimbangan energi umum:

$$\begin{aligned}
 Q_{out} &= \sum Q_{in} \\
 Q_{out} &= Q_{in\ 1} + Q_{in\ 2} + Q_{in\ 3}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Q_{out} adalah panas yang dikeluarkan dari laju pembakaran. Besarnya nilai panas ini adalah:

$$Q_{out} = \dot{m}_f \Delta H_c^*
 \tag{2.16}$$

Panas tersebut lalu diberikan kepada droplet air ($Q_{in\ 1}$), udara sekitar ($Q_{in\ 2}$), dan permukaan bahan bakar ($Q_{in\ 3}$). Panas yang diterima droplet ($Q_{in\ 1}$) digunakan untuk menguapkan air, lalu menaikkan temperatur uapnya ke temperatur adiabatik *flame*. Besarnya nilai kalor ini adalah:

$$Q_{in\ 1} = x m_w^* L_{vw} + x m_w^* C_{p,wL} (T_{wp} - T_w) + x m_w^* C_{p,wv} (T_f - T_{wp}) \quad (2.17)$$

$$Q_{in\ 1} = x m_w^* (L_{vw} + C_{p,wL} (T_{wp} - T_w) + C_{p,wv} (T_f - T_{wp}))$$

Panas yang diterima udara langsung diserap oleh udara sekitar. Nilai panas yang dibuang ke udara ini adalah:

$$Q_{in\ 2} = \phi \cdot m_f^* \cdot C_{p,a} (T_f - T_a) \quad (2.18)$$

Sedangkan panas yang diterima permukaan bahan bakar adalah:

$$Q_{in\ 3} = m_f^* C_{p,f} (T_f - T_{f,s}) \quad (2.19)$$

Dengan menggabungkan ketiga persamaan diatas tadi menjadi:

$$m_f^* \Delta H_c = x m_w^* (L_{vw} + C_{p,wL} (T_{wp} - T_w) + C_{p,wv} (T_f - T_{wp})) + \phi \cdot m_f^* \cdot C_{p,a} (T_f - T_a) + m_f^* C_{p,f} (T_f - T_{f,s}) \quad (2.20)$$

Dimana diasumsikan bahwa *flame* memiliki temperatur yang uniform (T_f) dan kapasitas termal C_p dari bahan bakar, udara, dan air tidak berubah terhadap temperatur. Laju pembakaran bahan bakar m_f , nilainya sama dengan laju penguapan bahan bakar. Sedangkan x adalah fraksi massa total kabut air m_w yang terlibat dalam pendinginan *flame*. ϕ adalah *air-fuel ratio* (AFR). Nilai AFR ini lebih besar daripada AFR stokiometrik, karena sifat api yang terbakar adalah *non-premixed*, sehingga udara yang masuk kedalam *flame* melebihi jumlah yang dibutuhkan untuk membakar bahan bakar, dan juga penyemprotan kabut air turut membawa tambahan udara kedalam *flame*.

Api dapat padam, ketika kabut air mendinginkan zona reaksi sampai di bawah batas temperatur nyala adiabatiknya, yang mampu menghentikan proses pembakaran udara dengan bahan bakar. Untuk kebanyakan hidrokarbon dan uap organik, batas bawah temperatur adiabatiknya mendekati 1600 K (1327°C).

Droplet air yang mencapai permukaan bahan bakar akan mendinginkan bahan bakar. Api juga dapat padam karena laju uap bahan bakar, atau laju pembakaran berkurang karena adanya pendinginan dan tidak dapat

mempertahankan nyala api. Kestimbangan energi pada permukaan bahan bakar pada kondisi ini adalah [Husted, et al 2004]

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) m_f + Q_E^* - Q_L^* \quad (2.21)$$

Dimana fraksi f_c adalah fraksi maksimum dari panas pembakaran yang dapat *flame* hilangkan dari bahan bakar tanpa adanya self extinction. Q_E^* adalah laju panas eksternal yang diberikan kepada bahan bakar dan dapat diabaikan dalam aplikasi pemadam api lokal. Q_L^* adalah *heat loss* dari bahan bakar, termasuk *heat loss* ke udara sekitar melalui radiasi, ke dalam bahan bakar sendiri melalui konduktansi dan ke droplet air.

$$Q_L^* = \epsilon \sigma T_{fs}^4 + q_{fL} + (1-x) m_w (C_{pw} (T_{fs} - T_w) + L_{vw}) \quad (2.22)$$

Dimana q_{fL} adalah *heat loss* dari permukaan bahan bakar ke dalam bahan bakar dan dapat dinyatakan dengan

$$q_{fL} = k_f \frac{(T_{fs} - T_{fo})}{\delta} \quad (2.23)$$

Sehingga kestimbangan energi pada permukaan bahan bakar selama pemadaman dapat ditulis menjadi:

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) m_f - (\epsilon \sigma T_{fs}^4 + q_{fL} + (1-x) m_w (L_{vw} + C_{pw} (T_{fs} - T_w))) \quad (2.24)$$

Pada bahan bakar dengan titik nyala yang tinggi seperti minyak goreng, kayu, dan bahan bakar padat, temperatur permukaannya pada saat pembakaran juga tinggi (~400-500 C), yang membuat terjadinya *heat loss* secara radiasi yang signifikan melalui permukaan bahan bakar [Husted, et al 2004]. *Heat loss* ke air juga signifikan ketika droplet air mengenai dan menguap pada permukaan bahan bakar yang panas. Api dapat dipadamkan dengan kabut air melalui pendinginan permukaan bahan bakar.

Untuk kebanyakan cairan bahan bakar, temperatur permukaannya saat terbakar mendekati, tapi masih di bawah titik didihnya. Oleh karena itu untuk bahan bakar cair yang memiliki titik didih yang rendah (<100 C) atau temperatur permukaannya yang rendah, seperti heptana, *radiatif losses* nya ke droplet air

melalui penguapan dapat diabaikan, dan *heat loss* dari permukaan bahan bakar dapat disederhanakan menjadi :

$$\dot{Q}_L = \dot{q}_{fl} + (1-x) \dot{m}_w C_{pw} (T_{fs} - T_w) \quad (2.25)$$

Kesetimbangan energi pada permukaan bahan bakar untuk bahan bakar cair seperti ini menjadi :

$$S = (\dot{f}_c \Delta H_c - L_{vf}) \dot{m}_f - (\dot{q}_{fl} + (1-x) \dot{m}_w C_{pw} (T_{fs} - T_w)) \quad (2.26)$$

Kesetimbangan energi persamaan (2.20) dan (2.24) untuk *flame* dan permukaan bahan bakar juga menunjukkan bahwa laju pembakaran karena bahan bakar berhubungan dengan sifat bahan bakar dan pemberian kabut air merupakan parameter yang penting untuk menentukan bagaimana api tersebut padam. Sehingga dapat dinyatakan bahwa :

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_f - \dot{Q}_L}{L_{vf}} \quad (2.27)$$

Dimana \dot{Q}_L adalah *heat loss* dari bahan bakar dan dinyatakan dari persamaan (2.22) diatas. \dot{Q}_f adalah laju panas yang ditransfer ke permukaan bahan bakar dari *flame*. Panas yang dipindahkan tersebut terjadi secara konduktif dari wadah, dan konvektif dan radiasi dari *flame*

$$\dot{Q}_f = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (2.28)$$

dimana $\dot{q}_{cond} = 4 \frac{k_1 (T_{cw} - T_{fs})}{D}$

$$\dot{q}_{conv} = k_2 (T_f - T_{fs})$$

$$\dot{q}_{rad} = k_3 (T_f^4 - T_{fs}^4) (1 - \exp(-k_4 D)) \quad (2.29)$$

Selama pemadaman api pada aplikasi yang sebenarnya, ukuran wadah besar, atau bahan bakar tidak ditaruh pada wadah. Perpindahan panas konduktif dari wadah menjadi terbatas dan dapat diabaikan, sehingga persamaan 2.29 menjadi

$$\dot{Q}_f = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (2.30)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.24) dan (2.27) laju pembakaran untuk bahan bakar yang mudah terbakar menjadi

$$m_f = \frac{(q_{conv}^* + q_{rad}^*) - (q_{fl}^* + (1-x)m_w C_{pw} (T_{fs} - T_w))}{L_{vf}} \quad (2.31)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.22) dengan (2.30), laju pembakaran untuk bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi menjadi :

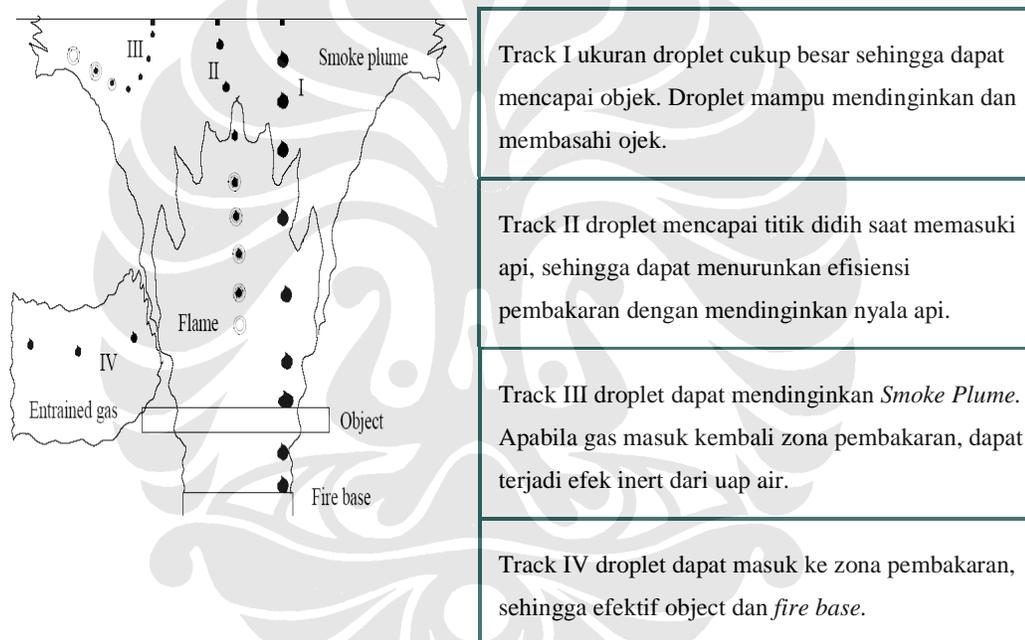
$$m_f = \frac{(q_{conv}^* + q_{rad}^*) - (\epsilon\sigma T_{fs}^4 + q_{fl}^* + (1-x)m_w (C_{pw} (373 - T_w) + L_{vw}))}{L_{vf}} \quad (2.32)$$

Kedua persamaan terakhir (2.31 dan 2.32) di atas menunjukkan bahwa laju pembakaran bahan bakar dapat meningkat selama pemadaman api, karena pemberian kabut air meningkatkan konveksi antara *flame* dan bahan bakar. Pengaruh pendinginan yang diberikan melalui kabut air pada saat laju pembakaran pada bahan bakar yang mudah terbakar jumlahnya terbatas, karena *heat loss* dari permukaan bahan bakar juga terbatas, sementara pada bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi, pengaruh pendinginan pada laju pembakaran menjadi signifikan.

2.5.6.2 Pendinginan Permukaan

Air yang mencapai permukaan pembakaran akan memanaskan dan menguap, dan akibatnya akan mendinginkan permukaan. Laju pyrolysis permukaan tersebut akan berkurang dan ketika lajunya cukup kecil (panas yang dilepas sekitar 50-75 kW/m²), nyala api di permukaan tersebut akan menghilang. Hal ini juga dapat dijelaskan melalui teori pemadaman termal. Berdasarkan hasil teori dan eksperimen menunjukkan bahwa jumlah air yang dibutuhkan untuk memadamkan air yang terbakar karena kayu (laju pyrolysis < 5 g/s.m²) adalah ≈ 2 g/s.m². Jika permukaan tersebut juga terkena radiasi, maka jumlah air yang dibutuhkan untuk memadamkan apinya akan meningkat secara dramatis. Sebagai contoh, pada laju radiasi permukaan 25 kW/m², kebutuhan air akan meningkat sampai 10 g/s.m².

Saat air disemprotkan pada dinding yang panas, air tersebut akan menyerap panas. Air memiliki panas laten yang tinggi, yaitu sekitar 2260 kJ/kg. Dengan menggunakan air, maka akan diperoleh efek pendinginan yang tinggi. Setelah air tersebut mengenai dinding, air itu temperaturnya akan naik sambil menurunkan temperatur dinding. Sebagian air akan mengalami penguapan. Tetapi perpindahan panas dari dinding yang panas kepada droplet air merupakan proses yang kompleks, yang tergantung dari kecepatan tumbukan droplet saat mengenai dinding, diameter droplet dan temperatur dindingnya. Oleh karena itu digunakan parameter tak berdimensi bilangan Weber (We), yang menggambarkan kejadian saat tumbukkan tadi.



Gambar 2.8 Lintasan butiran api [Wighus R, 2002]

2.5.7 Karakteristik Kabut Air

Ada enam karakteristik kabut air yang penting untuk memadamkan api [Liu,2000]. Sedangkan untuk aplikasi kabut air, keenam properti tersebut dapat digabung menjadi tiga kriteria utama, yaitu : *flux density*, cakupan spray, dan momentum. *Flux density* menunjukkan jumlah fluks dalam waktu dan luasan tertentu. Luas cakupan spray dipengaruhi oleh kinerja nosel, tekanan dan

ketinggian penyempotan. Momentum menunjukkan kemampuan droplet air untuk melakukan penetrasi ke dalam nyala api. Semakin tinggi momentum, semakin banyak droplet yang memasuki wilayah pemadaman.

Seperti yang telah ditunjukkan dari persamaan (2.20) dan (2.23), api hanya dapat padam jika jumlah air yang disemprotkan dari alat pemadam cukup untuk mendinginkan *flame*, atau mendinginkan bahan bakar di bawah titik nyalanya. Untuk bahan bakar yang mudah terbakar yang memiliki temperatur permukaan yang rendah, pemadaman api umumnya terjadi dengan cara pendinginan *flame*.

Jumlah fluks kabut air kritis yang dibutuhkan (xm_w^*) dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan (2.20) dan (2.31):

$$xm_w^* = \frac{(\Delta H_c - C_{pf}(1600 - T_{fs}) + \phi C_{pa}(1600 - T_a) - L_{vf})}{L_{vw} + C_{pwL}(T_{wp} - T_w) + C_{pww}(1600 - T_{wp})} \times \frac{(q_{conv} + q_{rad}) - (q_{fl} + (1-x)m_w C_{pw}(T_{fs} - T_w))}{L_{vf}} \quad (2.33)$$

Untuk bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi, api dapat padam dengan cara pendinginan permukaan dan/atau pendinginan *flame*. Jumlah fluks kabut air kritis yang dibutuhkan dapat diperoleh dengan cara menggabungkan persamaan (2.20) dan (2.32) untuk pendinginan *flame* (xm_w^*), dan dengan menggabungkan kedua tsb untuk pendinginan permukaan bahan bakar ($(1-x)m_w^*$).

$$xm_w^* = \frac{(\Delta H_c - C_{pf}(1600 - T_{fs}) + \phi C_{pa}(1600 - T_a) - L_{vf})}{L_{vw} + C_{pwL}(T_{wp} - T_w) + C_{pww}(1600 - T_{wp})} \times \frac{(q_{conv} + q_{rad}) - (q_{fl} + (1-x)m_w(C_{pw}(T_{fs} - T_w) + L_{vw}) + \epsilon \sigma T_{fs}^4))}{L_{vf}}$$

$$(1-x)m_{cw}^* = \frac{(1 - \frac{L_{vf}}{f_c \Delta H_c})(q_{conv} + q_{rad}) - (\epsilon \sigma T_{fs}^4 + q_{fl})}{C_{pw}(T_{fs} - T_w) + L_{vw}} \quad (2.34)$$

Persamaan (2.30) sampai (2.34) menunjukkan bahwa pada permukaan bahan bakar dengan ukuran yang sama, maka dibutuhkan fluks kabut air yang lebih banyak pada bahan bakar cair yang mudah terbakar untuk memadamkan api dibandingkan api yang disebabkan oleh bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi, karena laju pembakarannya tidak terlalu berpengaruh.

Persamaan tersebut juga menunjukkan bahwa karakteristik spray optimum juga perlu dirubah tergantung dari jenis api yang akan dipadamkan. Untuk bahan bakar cair mudah terbakar, spray dengan kabut air yang halus mampu memadamkan api lebih baik dari pada dengan kabut air yang dropletnya besar-besar, karena semakin kecil dropletnya, maka droplet tersebut akan semakin tertahan di dalam *flame* dan mendinginkan *flame*. Sementara untuk bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi, spray dengan ukuran droplet besar lebih baik digunakan karena mampu mencapai permukaan bahan bakar dan mendinginkan permukaan.

Cakupan kabut air (A_w) berhubungan dengan distribusi droplet air dan densitas air yang dipakai. Hal penting lainnya adalah untuk dapat memadamkan api karena *flammable liquid fuel*, karena jika cakupan spray tidak cukup besar untuk mencakup seluruh permukaan *fuel*, maka *flame* yang tidak terkena langsung semprotan *water mist* tidak akan padam. *Flame* tersebut akan mudah menyala kembali *flame* ketika *water mist* dihentikan. Sudut efektif untuk cakupan spray ditentukan dengan jumlah minimal fluks air yang dibutuhkan untuk memadamkan api dan dapat dinyatakan dengan :

$$A_w = \pi(a_c L \tan \frac{\alpha}{2})^2 \quad (2.35)$$

Sudut spray α , adalah parameter desain nosel dan dapat dirubah menurut tekanan. a_c adalah koefisien untuk cakupan spray yang efektif (<1) dan ditentukan oleh jumlah minimal fluks air yang dibutuhkan dan berubah menurut properti *fuel*.

Kriteria ketiga untuk memadamkan api adalah momentum spray. Momentum spray harus cukup besar agar droplet air dapat memasuki api dan mencapai permukaan *fuel*. Kabut air dengan momentum yang rendah akan terbawa pijaran api. Kecepatan maksimum nyala api yang mengarah keatas $U_{f \max}$ adalah [24]

$$U_{f \max} = 1,9 Q_c^* \quad (2.36)$$

dimana Q_c^* adalah laju pelepasan panas secara konvektif dari api.

Untuk alat pemadam kabut air, jarak penyemprotan antara nosel dengan permukaan *fuel* relatif sangat pendek, dan penguapan droplet air dibatasi sebelum

mencapai *flame*. Kecepatan droplet air dapat dinyatakan dalam kondisi non-evaporasi :

$$u_w = \frac{u_{w0}}{\exp\left(\frac{0,33\rho_g L}{d\rho_w}\right)} \quad (2.37)$$

dimana kecepatan asal droplet air (u_{w0}) adalah :

$$u_{w0} = \sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho_w}\right)} \quad (2.38)$$

Untuk mencegah kabut air terbawa pijaran api, maka momentum kabut air harus paling tidak sama dengan momentum pijaran api, dan arahnya berlawanan dengannya:

$$u_w \geq u_{f \text{ max}}$$

atau

$$u_w = \frac{\sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho_w}\right)}}{\exp\left(\frac{0,33\rho_g L}{d\rho_w}\right)} \geq 1,9 Q_c^* \quad (2.39)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa penetrasi droplet air paling utamanya tergantung dari tekanan penyemprotan, ukuran droplet, jarak penyemprotan, dan ukuran api. Tingkat penetrasi tersebut dapat ditingkatkan baik dengan cara meningkatkan ukuran droplet, atau mengurangi jarak penyemprotan ke pijaran api dengan cara meningkatkan tekanan semprot.