

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 API DAN REAKSI PEMBAKARAN

Api disebabkan oleh suatu proses pembakaran, timbulnya api disertai dengan adanya panas (kalor), cahaya (nyala api), serta gas sisa hasil pembakaran. Pembakaran itu sendiri merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidan yang menghasilkan energi berupa panas. Bahan bakar dalam kondisi penyimpanan (*handling*) fasanya dapat berupa cairan (*liquid*) seperti bensin, minyak tanah, solar dan dapat berupa padatan (*solid*) seperti kayu bakar, briket batu bara, tetapi agar bahan bakar tersebut mudah terbakar pada reaksi pembakaran fasanya harus berupa gas.

Untuk oksidan adalah zat yang mengandung oksigen (misal: udara bebas) yang dapat bereaksi dengan bahan bakar. Komponen udara bebas itu sendiri terdiri dari Oksigen(O<sub>2</sub>), Nitrogen(N<sub>2</sub>), Karbondioksida(CO<sub>2</sub>), Argon(Ar), Helium(He), Neon (Ne) dll, dalam presentase jumlah Oksigen (O<sub>2</sub>) hanya 20 % sedangkan Nitrogen (N<sub>2</sub>) dan serta gabungan gas yang lainnya sekitar 79 % . Campuran udara itu disebut juga dengan campuran udara kering, untuk perhitungan pembakaran komposisi yang masuk dalam perhitungan dianggap hanya nitrogen dan oksigen saja. 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 ( $\phi$ ) :

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

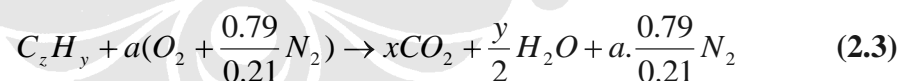
Dimana jika nilai rasio ekuivalen tersebut :

$\phi > 1$  → Terdapat kelebihan bahan bakar dan campuran disebut campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)

$\phi < 1$  → Terdapat kelebihan udara dan campurannya disebut miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)

$\phi = 1$  → 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 H<sub>2</sub>O dan CO<sub>2</sub>. Persamaan tersebut juga menunjukkan bahwa setiap kmol udara di atmosfer mengandung 0,79 kmol nitrogen dan 0,21 kmol oksigen. Sehingga untuk melakukan pembakaran sempurna dengan menggunakan oksigen dari udara kering, setiap 1 mol oksigennya akan dipenuhi dari :



dan setiap 1 kg oksigen akan dipenuhi dari



Akan tetapi pada kenyataannya sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran sempurna. Hal ini disebabkan karena pada reaksi stokiometrik tersebut, pencampuran udara-bahan bakarnya selalu tidak sempurna dan laju reaksinya terbatas. Oleh karena itu udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada. Jumlah udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka persentase udara lebih dapat dinyatakan sebagai:

$$\% \text{ udara lebih} = \left[ \frac{\dot{V}_{\text{O}_2} \text{ prod}}{\dot{V}_{\text{N}_2} \text{ prod} / 3,76 - \dot{V}_{\text{O}_2} \text{ prod}} \right] \times 100 \quad (2.6)$$

atau

$$\% \text{ udara lebih} = \left[ \frac{\dot{K}_{\text{O}_2} \text{ prod}}{\dot{K}_{\text{N}_2} \text{ prod} / 3,76 - \dot{K}_{\text{O}_2} \text{ prod}} \right] \times 100 \quad (2.7)$$

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:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_V} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s} \quad (2.8)$$

dimana :

$\dot{Q}_F''$  = heat flux berasal dari api (kW/m<sup>2</sup>)

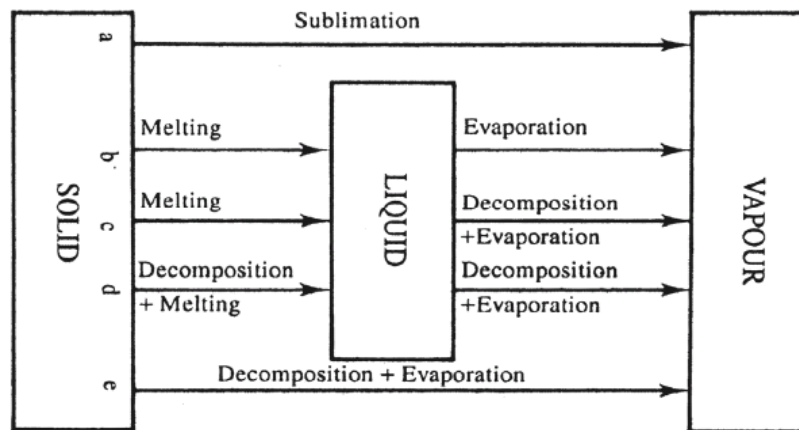
$\dot{Q}_L''$  = heat flux yang hilang ke permukaan bahan bakar (kW/m<sup>2</sup>)

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

Laju pembakaran bahan bakar ini merupakan faktor yang penting. Dari nilai laju pembakaran tersebut dapat diketahui besarnya energi yang dikeluarkan api pembakaran.

$$\dot{Q}_C = x \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \text{ kW} \quad (2.9)$$

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.



**Gambar 2.1.** Perubahan fase zat dari padat ke gas untuk reaksi pembakaran [13]

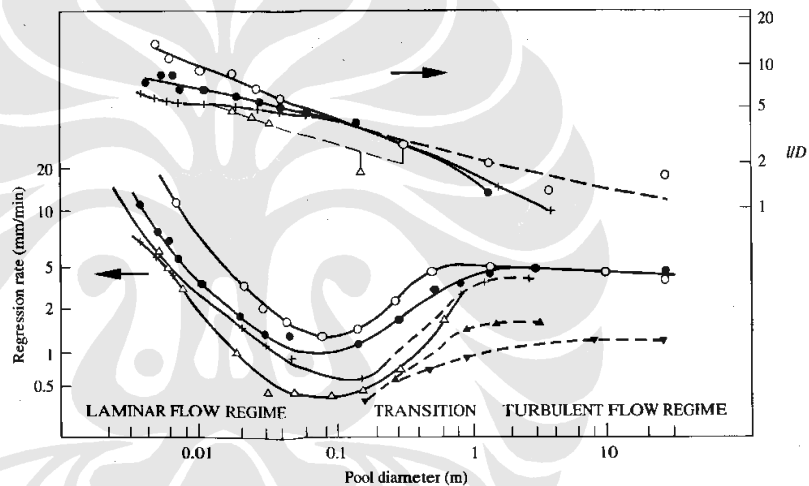
Bahan bakar cair cenderung untuk terbakar sebagai suatu ‘kolam api’ (*pools*) dengan permukaannya yang mendatar dan uniform. Sebuah *pool fire* adalah api yang terbakar secara difusi dari penguapan cairan bahan bakar dengan momentum bahan bakarnya yang sangat rendah. Api yang terbakar dari bahan bakar 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.

## 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 2.2** 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 :

$$m'' = m_{\infty}''(1 - e(-K\beta D)) \quad (2.10)$$

dengan :

$K\beta$  = Koefisien perpindahan panas radiasi

D = diameter pool fire.

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

$$\dot{Q}_c = x \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \text{ (kW)} \quad (2.11)$$

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

$\Delta H_c$  = 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 O<sub>2</sub> [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 (2.12).

$$\dot{Q}_c = (0.21 - \eta_{O_2}) \cdot V \cdot 10^3 \cdot \rho_{O_2} \cdot \Delta H_{c,OX} \quad (2.12)$$

dimana  $\dot{Q}_c$  adalah laju produksi kalor (kW), V merupakan aliran volumetrik udara (m<sup>3</sup>/s),  $\rho_{O_2}$  massa jenis oksigen (kg/m<sup>3</sup>) pada temperatur dan tekanan normal, serta  $\eta_{O_2}$  fraksi mol oksigen. Persamaan di atas bila diturunkan akan menjadi persamaan (2.13) dibawah ini:

$$q = (3,1 \times 10^3) \cdot 10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(0,2095 - X_{O_2})}{(105 - 1,5 X_{O_2})} \quad (2.13)$$

dimana :

$q$  = *heat release rate* (kW)

$C$  = *calibration constant for O<sub>2</sub> consumption analysis* (m<sup>1/2</sup> kg<sup>1/2</sup> k<sup>1/2</sup>)

$\Delta P$  = *pressure drop across the orifice plate* (Pa)

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

$X_{O_2}$  = *measured mole fraction of O<sub>2</sub> in the exhaust air*

Dengan memasukkan nilai fraksi mol oksigen yang terukur pada keadaan normal 0,2095 maka persamaan (2.13) berubah menjadi:

$$q = (3,1 \times 10^3) \cdot 10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(0,2095 - X_{O_2})}{(105 - 1,5 X_{O_2})} \quad (2.14)$$

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] :

$$H_f = 0.235 \dot{Q}^{2/3} - 1.02 D \quad (2.15)$$

Dengan:

$H_f$  = flame height (m)

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

$D$  = diameter of the fire (m)

### 2.3 KABUT AIR

Kabut air adalah air yang pecah yang membentuk seperti awan dengan ukuran tetesan air (droplet) 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  $\mu\text{m}$  [1]. Sedangkan pada sumber lain [2] menyatakan kabut air terjadi pada air yang memiliki ukuran droplet dengan radius 50  $\mu\text{m}$ . Berikut perbandingan perbedaan ukuran diameter droplet dengan bentuk yang terjadi.

**Tabel 2.1.** Perbandingan ukuran diameter droplet dengan bentuknya

Radius Droplet ( $\mu\text{m}$ )	Deskripsi
10	Kabut tipis (fog)
50	Kabut tebal (mist)
100	Spray
500	Hujan

(sumber : Con Doolan, July 2003)

Untuk penelitian ini maka penulis memilih batasan yang dimaksud dengan kabut air adalah air yang memiliki diameter droplet lebih kecil dari 100  $\mu\text{m}$ .

### 2.3.1 Definisi Pemadam Kebakaran Sistem 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. 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.

Untuk memperoleh kabut air yang baik, dapat dilakukan dengan menggunakan tiga jenis nosel [Kathy A Notarianni, June 1994], 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  $\mu\text{m}$ . 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  $\mu\text{m}$ . Sedangkan pada nosel atomisasi udara mampu menghasilkan droplet air berukuran antara 100 – 200  $\mu\text{m}$  dan umumnya bekerja pada tekanan rendah yaitu antara 0,6 – 1 MPa.

### 2.3.2 Dasar 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 di arahkan 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. Laju aliran yang rendah. Hal ini mengurangi jumlah konsumsi air yang digunakan.

7. Ukuran dan berat yang ringan. Hal ini akan sesuai digunakan pada sarana transportasi, dimana masalah berat menjadi faktor yang penting.

### **2.3.3 Jenis-Jenis Pemadam kebakaran Sistem Kabut Air**

Sistem pemadam kebakaran kabut air dapat dibagi menjadi dua, yaitu: sistem yang mirip dengan sprinkler dan sistem yang berbeda dengan sprinkler. Sistem pemadam kabut air yang mirip dengan sprinkler banyak di terapkan di kapal-kapal. Pemakaian sistem ini telah mendapat ijin oleh Organisasi Maritim Internasional dan dapat dipakai pada tempat-tempat publik. Sistem ini menggunakan nossel yang tertutup secara otomatis dan dapat aktif berdasarkan sensor termal yang cara kerjanya sama seperti prinsip kerja sprinkler. Sistem ini memang mirip dengan sistem sprinkler, akan tetapi berat jenis air yang dikeluarkan dari nossel hanyalah sepertiga sampai tiga per empat dari berat jenis minimal air yang digunakan pada sistem sprinkler.

Sistem kabut air yang tidak mirip dengan sprinkler digunakan pada area dimana penggunaan splinker menjadi tidak efektif. Sistem pemadam kabut air tersebut telah di uji cobakan pada tempat-tempat yang banyak berhubungan dengan alat-alat permesinan, seperti turbin, dan pompa. Kebakaran yang terjadi pada tempat-tempat tersebut biasanya disebabkan dari tumpahan atau kebocoran bahan bakar. Oleh karena itu pemadaman dengan air justru akan memperparah situasi yang ada. Sistem ini menggunakan nossel yang terbuka dengan sensor api yang terpisah. Sistem pemadam kabut air jenis ini memiliki banyak perbedaan dengan sistem sprinkler yang ada.

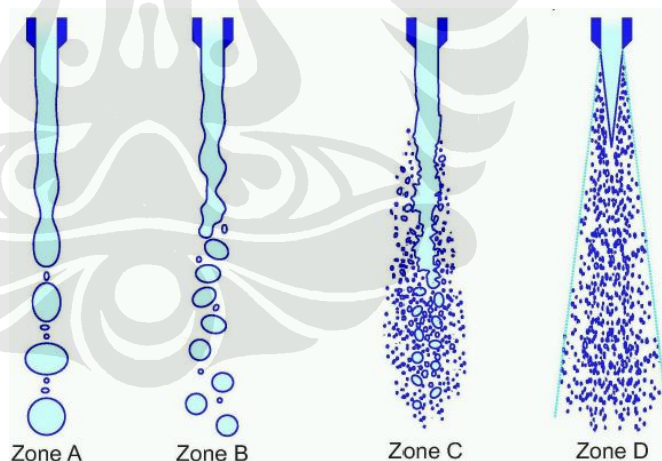
### **2.3.4 Pembentukan Droplet dari Berbagai Jenis Nozzel**

Terdapat tiga cara untuk membentuk suatu spray, 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 nossel.

Cara yang paling umum terdapat dalam sistem kabut air 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:

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



**Gambar 2.3.** Empat cara pembentukkan droplet [4]

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.

Bilangan Reynolds (Re) :

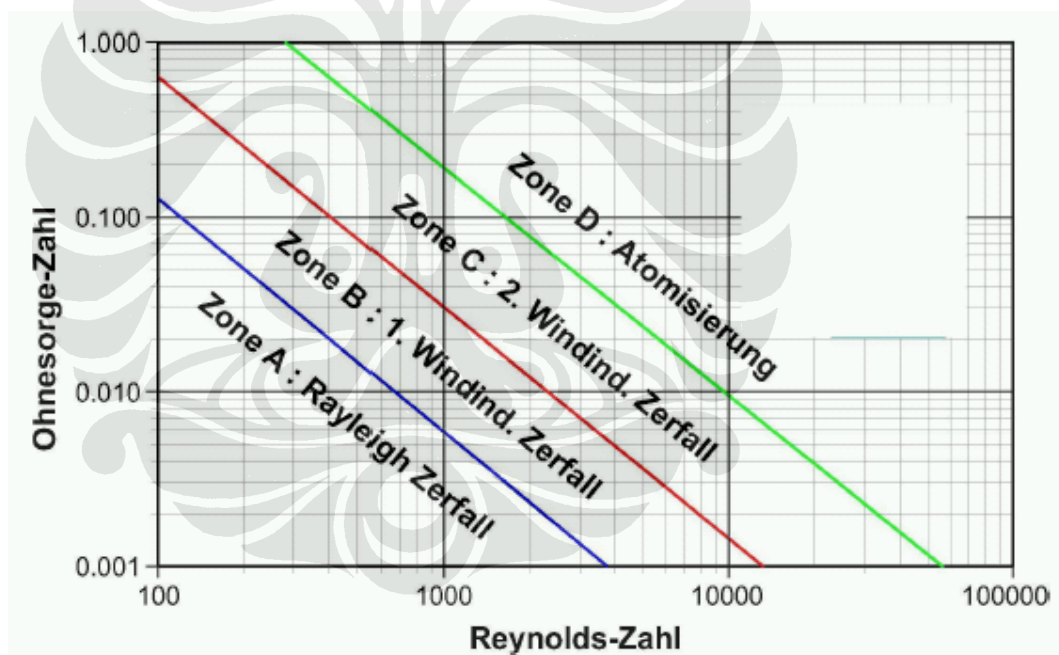
$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2.16)$$

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

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} \quad (2.17)$$

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 2.4.** Tabel grafik Reynolds vs Ohnesorge [4]

### 2.3.5 Distribusi Ukuran Droplet

Proses pembuatan spray mempengaruhi perbedaan ukuran droplet. Droplet yang kecil (<2 mm) akan menyerupai bentuk seperti bola dan dapat secara akurat ditentukan diameternya. Untuk menggambarkan distribusi droplet pada seluruh

cakupan spray, biasanya digunakan cara statistik. Salah satu cara untuk mengetahui karakteristik suatu spray dengan sebuah parameter adalah dengan menggunakan “*Sauter mean diameter*”, yang biasa di tulis dengan  $d_{32}$ . *Sauter mean diameter* adalah angka yang digunakan untuk menyatakan ukuran rata-rata droplet yang diperoleh dari rasio rata-rata volume terhadap luas permukaan droplet. Oleh karena itu *Sauter mean diameter* adalah diameter dari droplet hipotesis dimana rasio volume terhadap permukaan besarnya adalah sama dengan seluruh droplet yang ada di spray.

Ukuran droplet juga tergantung dari tekanan di dalam nosel. Ukuran droplet terus mengalami penurunan sampai tekanan 7 bar. Pada tekanan yang lebih tinggi, ukuran droplet terus berkurang dengan laju yang lebih rendah.

### 2.3.6 Perlambatan Droplet – Sifat Aerodinamik dari Spray

#### 2.3.6.1 Gaya Pada Droplet Tunggal

Terdapat sejumlah gaya yang mempengaruhi pergerakan sebuah droplet yang bergerak di udara, seperti gaya Magnus, gaya Saffman, dan gaya Faxen. Akan tetapi, banyak dari gaya-gaya tersebut yang dapat di abaikan karena pengaruhnya yang sangat kecil dibandingkan dengan gaya gravitasi dan gaya gesek.

Gaya yang tersisa yang mengenai ke sebuah droplet dapat diturunkan dari hukum kedua Newton.

$$m = \rho_w \frac{\pi \cdot d^3}{6} \quad (2.18)$$

$$C_D = \left( \frac{v \cdot d \cdot \rho_l}{\mu} \right) \quad (2.19)$$

$$\bar{F} = \frac{d}{dt} \left( m \cdot \bar{v} \right) = m \cdot \bar{g} - C_D \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot \rho_l}{8} \cdot \left( -\bar{v}_l \right) \cdot \left| \bar{v} - \bar{v}_l \right| \quad (2.20)$$

Karena adanya pengaruh gaya gesek, pergerakan droplet akan mengalami perlambatan. Dengan membuat  $\bar{F} = 0$  di persamaan (2.20) di atas, akan didapat kecepatan kritis dari droplet. Untuk droplet dengan bilangan Reynold lebih kecil

dari 1 (satu), koefisien Drag-nya ( $C_D$ ) dapat dihitung dengan berdasarkan hukum Stokes, yaitu  $C_D = 24/Re$ . Hal ini berarti persamaan (2.20) dapat diselesaikan secara analitik untuk droplet yang ukurannya dibawah 80  $\mu\text{m}$ . Untuk droplet yang ukurannya lebih besar dari 80  $\mu\text{m}$  ( $Re > 1$ ), persamaan tersebut harus diselesaikan secara numerik.

### **2.3.6.2 Perlambatan Droplet Tunggal Dengan Kecepatan Awal Yang Tinggi**

Droplet air yang meninggalkan nosel dengan kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan kritisnya akan mengalami perlambatan secara cepat. Perlambatan dan panjang pancaran dapat dihitung dari persamaan (2.20) di atas. Tapi untuk kecepatan yang tinggi seperti ini, perhitungan koefisien Drag menjadi lebih kompleks dan persamaan tersebut harus diselesaikan secara numerik.

Droplet yang berukuran kecil mengalami perlambatan sangat cepat. Droplet berukuran 100  $\mu\text{m}$  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. Hal ini mempengaruhi gaya drag dan ukuran droplet. Akan tetapi menurut, hal tersebut pengaruhnya sangat kecil terhadap gaya drag di persamaan (2.20)

Selain itu dapat diketahui juga bahwa panjang pancaran untuk droplet tunggal dengan diameter  $< 100 - 200 \mu\text{m}$  adalah sangat pendek, meskipun kecepatan asal yang berasal dari nosel dibuat dengan tekanan 100 – 200 bar. Satu-satunya cara untuk memperbesar jarak pancaran adalah dengan mengurangi kecepatan relatif antara droplet dengan udara sekitar.

### **2.3.6.3 Perlambatan Droplet Dalam Spray**

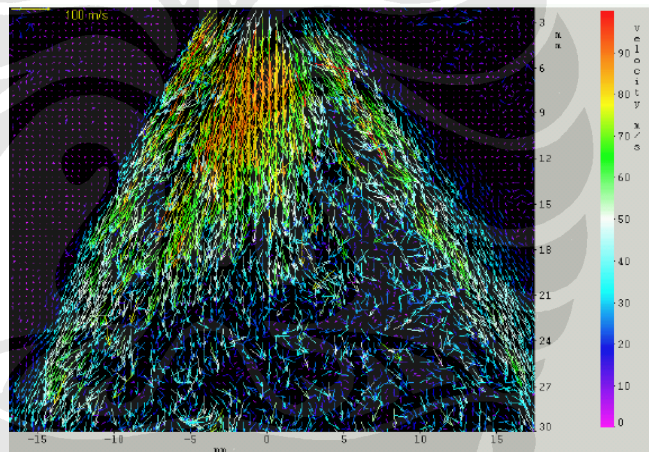
Droplet yang mengalami perlambatan momentumnya akan hilang dan di transfer ke udara sekitar, sehingga arah akan sama dengan arah pergerakan droplet. Pada spray dengan banyak droplet, hal ini akan menyebabkan udara terhisap ke dalam spray. Percepatan yang dialami udara berarti kecepatan relatif



antara droplet dan udara sekitar berkurang, yang akan meningkatkan panjang pancaran droplet.

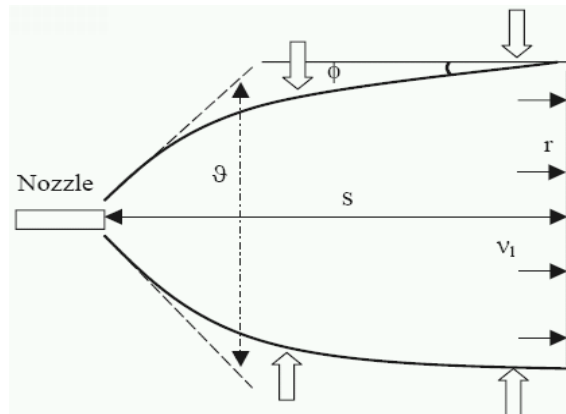
Hal ini akan terjadi tergantung pada mekanisme nosel mendistribusikan droplet. Bentuk yang paling umum adalah kerucut penuh (full cone) dan kerucut berlubang (hollow cone). Pada spray full cone, droplet di distribusikan secara merata pada semua sudut pancaran spray. Sedangkan pada hollow cone, droplet dibuat lebih banyak di daerah pinggir cone.

Pada hollow cone, droplet mengalami perlambatan yang sangat cepat. Medan kecepatan droplet di dalam spray pun sangat kompleks. Berikut ini adalah salah satu contoh gambaran medan kecepatan droplet dari spray yang berbentuk hollow cone yang diambil dengan menggunakan Particle Induced Velocimetry (PIV) dengan waktu bukaan pengambilan gambar yang singkat.



**Gambar 2.5.** Hollow cone, 80 bar, diameter nosel = 0,8 mm. [4]

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



**Gambar 2.6.** Skematik full cone spray [ 4]

Nilai  $v_1$  dapat diketahui dari :

$$v_1 \approx \frac{\sqrt{\dot{m}_w \cdot p^{0,5}}}{r} \quad (2.21)$$

$$r \approx s \cdot \tan\left(\left(\frac{\vartheta}{2} + \phi\right) \cdot \frac{1}{2}\right), \vartheta \leq 45^\circ \quad (2.22)$$

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

### 2.3.7 Evaporasi Droplet Air

Proses penguapan (evaporasi) droplet-droplet air tergantung dari temperatur dan kandungan air yang ada di udara sekeliling droplet. Perubahan diameter droplet setiap waktu dapat ditulis :

$$\frac{dd}{dt} = -\frac{2h}{H_v \cdot \rho} \cdot \Delta T \quad (2.23)$$

Untuk droplet air yang kecil, koefisien perpindahan panas  $h$  dinyatakan dengan bilangan tak berdimensi Nusselt (Nu) :

$$Nu = \frac{h \cdot d}{k} = 2 + 0,6 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,5} \quad (2.24)$$

Persamaan ini dapat diselesaikan secara analitik untuk beberapa kasus yang mudah.

Untuk droplet yang lebih kecil dari 0,1 mm, droplet tersebut akan mengalami perlambatan secara cepat dan mencapai kecepatan terminalnya dengan cepat. Pada kecepatan tersebut, konveksi alamiah akan mendominasi dan bilangan Nusselt akan sama dengan 2. Dengan menggabungkan kedua persamaan terakhir di atas akan menghasilkan:

$$\frac{dd}{dt} = -\frac{4 \cdot k \cdot \Delta T}{H_v \cdot \rho \cdot d} \quad (2.25)$$

Jika perbedaan temperatur antara droplet dan udara konstan setiap saat, maka integrasi persamaan di atas akan menghasilkan :

$$d^2 = d_0^2 - \beta \cdot t \quad (2.26)$$

dimana  $t$  adalah waktu, sedangkan  $\beta$  diperoleh dari:

$$\beta = \frac{8 \cdot k \cdot \Delta T}{H_v \cdot \rho} \quad (2.27)$$

Dari sejumlah percobaan yang telah dilakukan sebelumnya dapat diketahui bahwa umur droplet yang hilang karena proses evaporasi tidak dipengaruhi oleh kecepatan asal droplet. Alasannya adalah karena besarnya perlambatan yang dialami oleh droplet. Kecepatan asal droplet yang tinggi (tekanan nosel yang besar) tersebut hanya berlangsung singkat tetapi tidak memberikan pengaruh yang besar dalam meningkatkan laju penguapan.

### 2.3.8 Performa Pemadaman Dengan Air

Air dapat memadamkan api dengan berbagai cara, diantaranya adalah:

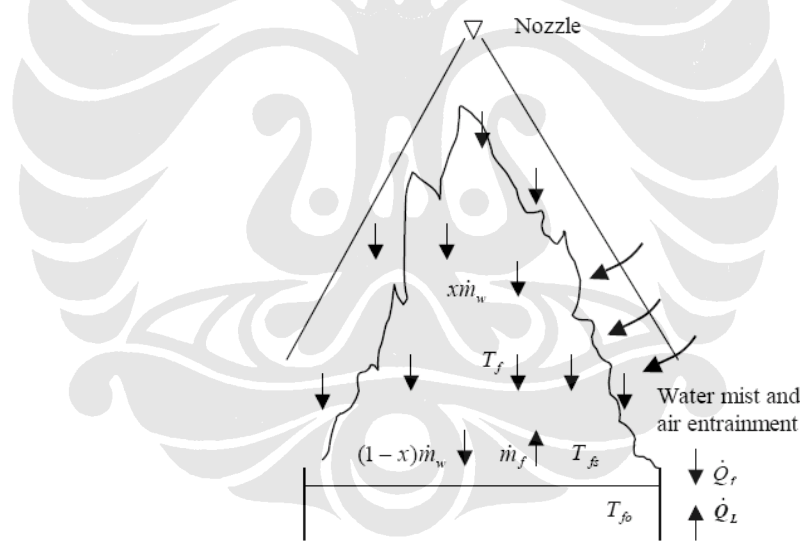
- a. Pemadamaan flame. Droplet memasuki flame, kemudian flame mengalami pendinginan ke temperatur yang cukup rendah sehingga flame tidak bisa menyala lagi, akibatnya api akan padam. Permukaan panas dari bahan

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 pirolisis 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.

### 2.3.8.1 Pemadaman Flame (Nyala Api)

Ketika kabut air disemprotkan kedalam api, seperti pada gambar dibawah ini, beberapa drop air ( $x\dot{m}_w$ ) tertahan di dalam flame dan sisanya ( $(1-x)\dot{m}_w$ ), menembus flame dan mencapai permukaan pembakaran.



**Gambar 2.7.** Interaksi antara api dengan kabut air [6]

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:

$$Q_{out} = \sum Q_{in}$$

$$Q_{out} = Q_{in\ 1} + Q_{in\ 2} + Q_{in\ 3} \quad (2.28)$$

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

$$Q_{out} = \dot{m}_f \Delta H_c \quad (2.29)$$

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:

$$Q_{in\ 1} = x\dot{m}_w \left( \dot{m}_{vw} + C_{p,wL}(T_{wp} - T_w) + C_{p,wv}(T_f - T_{wp}) \right) \quad (2.30)$$

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

$$Q_{in\ 2} = \phi \cdot \dot{m}_f \cdot C_{p,a}(T_f - T_a) \quad (2.31)$$

Sedangkan panas yang diterima permukaan bahan bakar adalah:

$$Q_{in\ 3} = \dot{m}_f C_{p,f}(T_f - T_{f.s}) \quad (2.32)$$

Dengan menggabungkan keempat persamaan di atas tadi menjadi:

$$\dot{m}_f \Delta H_c = x\dot{m}_w \left( \dot{m}_{vw} + C_{p,wL}(T_{wp} - T_w) + C_{p,wv}(T_f - T_{wp}) \right) + \phi \cdot \dot{m}_f \cdot C_{p,a}(T_f - T_a) + \dot{m}_f C_{p,f}(T_f - T_{f.s}) \quad (2.33)$$

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  $\dot{m}_f$ , nilainya sama dengan laju penguapan bahan bakar. Sedangkan  $x$  adalah fraksi massa total kabut air  $\dot{m}_w$  yang terlibat dalam pendinginan flame.  $\phi$  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. Kesetimbangan energi pada permukaan bahan bakar pada kondisi ini adalah

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) \dot{m}_f + \dot{Q}_E - \dot{Q}_L \quad (2.34)$$

dimana fraksi  $f_c$  adalah fraksi maksimum dari panas pembakaran yang dapat flame hilangkan dari bahan bakar tanpa adanya self extinction.  $\dot{Q}_E$  adalah laju panas eksternal yang diberikan kepada bahan bakar dan dapat diabaikan dalam aplikasi pemadam api lokal.  $\dot{Q}_L$  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.

$$\dot{Q}_L = \varepsilon \sigma T_{fs}^4 + \dot{q}_{fL} + (1-x) \dot{m}_w (\dot{C}_{pw} (T_{fs} - T_w) + L_{vw}) \quad (2.35)$$

dimana  $\dot{q}_{fL}$  adalah heat loss dari permukaan bahan bakar ke dalam bahan bakar dan dapat dinyatakan dengan

$$\dot{q}_{fL} = k_f \frac{(T_{fs} - T_{fo})}{\delta} \quad (2.36)$$

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

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) \dot{m}_f - (\varepsilon \sigma T_{fs}^4 + \dot{q}_{fL} + (1-x) \dot{m}_w (L_{ww} + C_{pw} (T_{fs} - T_w))) \quad (2.37)$$

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. 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 :

$$\dot{Q}_L = \dot{q}_{fL} + (1-x) \dot{m}_w C_{pw} (T_{fs} - T_w) \quad (2.38)$$

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

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) \dot{m}_f - (\dot{q}_{fL} + (1-x) \dot{m}_w C_{pw} (T_{fs} - T_w)) \quad (2.39)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa jika temperatur permukaan terlalu rendah saat pemadaman, maka akan sulit memadamkan api dengan cara

mendinginkan permukaan tersebut, karena heat loss dari permukaan tersebut lebih kecil dari pada panas yang diperoleh dari flame.

Kesetimbangan energi persamaan (2.37) dan (2.39) 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 :

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_f - \dot{Q}_L}{L_{vf}} \quad (2.40)$$

dimana  $\dot{Q}_L$  adalah heat loss dari bahan bakar dan dinyatakan dari persamaan (2.38) 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

$$\dot{q}_{cond} = 4 \frac{k_1(T_{cw} - T_{fs})}{D} \quad (2.41)$$

$$\dot{q}_{conv} = k_2(T_f - T_{fs}) \quad (2.42)$$

$$\dot{q}_{rad} = k_3(T_f^4 - T_{fs}^4)(1 - \exp(-k_4 D)) \quad (2.43)$$

$$\dot{Q}_f = \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (2.44)$$

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 (2.44) menjadi

$$\dot{Q}_f = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (2.45)$$



Dengan menggabungkan persamaan (2.38) dan (2.40), laju pembakaran untuk bahan bakar yang mudah terbakar menjadi

$$\dot{m}_f = \frac{(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) - (\dot{q}_{fl} + (1-x)\dot{m}_w C_{pw}(T_{fs} - T_w))}{L_{vf}} \quad (2.46)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.35) dengan (2.40), laju pembakaran untuk bahan bakar dengan temperatur permukaan yang tinggi menjadi :

$$\dot{m}_f = \frac{(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) - (\varepsilon\sigma T_{fs}^4 + \dot{q}_{fl} + (1-x)\dot{m}_w(C_{pw}(373 - T_w) + L_{vw}))}{L_{vf}} \quad (2.47)$$

Kedua persamaan terakhir (2.46) dan (2.47) 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.

### 2.3.8.2 Pendinginan Permukaan

Air yang mencapai permukaan pembakaran akan memanaskan dan menguap, dan akibatnya akan mendinginkan permukaan. Laju pyrolisis permukaan tersebut akan berkurang dan ketika lajunya cukup kecil (panas yang dilepas sekitar 50-75 kW/m<sup>2</sup>), 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 kayu yang terbakar karena api (laju pyrolisis < 5 g/s.m<sup>2</sup>) adalah ≈ 2 g/s.m<sup>2</sup>. Jika permukaan tersebut juga terkena radiasi, maka jumlah air yang dibutuhkan untuk

memadamkan apinya akan meningkat secara dramatis. Sebagai contoh, pada laju radiasi permukaan  $25 \text{ kW/m}^2$ , kebutuhan air akan meningkat sampai  $10 \text{ g/s.m}^2$ .

Saat air disemprotkan pada dinding yang panas, air tersebut akan menyerap panas. Air memiliki panas laten yang tinggi, yaitu sekitar  $2260 \text{ kJ/kg}$ . 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.

### 2.3.9 Parameter Kabut Air Untuk Pemadaman

Ada enam properti spray air yang penting untuk memadamkan api. Sedangkan untuk aplikasi kabut air, keenam properti tersebut dapat digabung menjadi tiga kriteria utama, yaitu : densitas fluks air, cakupan spray, dan momentum.

Seperti yang telah ditunjukkan dari persamaan (2.33) dan (2.36), 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 ( $x\dot{m}_w$ ) dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan (2.33) dan (2.46):

$$x\dot{m}_w = \frac{(\Delta H_c - C_{pf}(1600 - T_{fs}) - \phi C_{pa}(1600 - T_a) - L_{vf})}{L_{vw} + C_{pwL}(T_{wp} - T_w) + C_{pww}(1600 - T_{wp})} \times \frac{(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) - (\dot{q}_{fL} + (1-x)\dot{m}_w C_{pw}(T_{fs} - T_w))}{L_{vf}} \quad (2.48)$$

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 (2.33) dan (2.47) untuk pendinginan flame ( $x\dot{m}_w$ ), dan dengan menggabungkan persamaan (2.37) dan (2.47) tersebut untuk pendinginan permukaan bahan bakar ( $(1-x)\dot{m}_w$ ).

$$x\dot{m}_w = \frac{(\Delta H_c - C_{pf}(1600 - T_{fs}) - \phi C_{pa}(1600 - T_a) - L_{vf})}{L_{vw} + C_{pwL}(T_{wp} - T_w) + C_{pww}(1600 - T_{wp})} \quad (2.49)$$

$$\times \frac{(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} - (\dot{q}_{fL} + (1-x)\dot{m}_w(C_{pw}(T_{fs} - T_w) + L_{vw})) + \varepsilon \sigma T_{fs}^4)}{L_{vf}}$$

$$(1-x)\dot{m}_{cw} = \frac{(1 - \frac{L_{vf}}{f_c \Delta H_c})(\dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad}) - (\varepsilon \sigma T_{fs}^4 + \dot{q}_{fL})}{C_{pw}(T_{fs} - T_w) + L_{vw}} \quad (2.50)$$

Persamaan (2.48) sampai (2.50) 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.

Jumlah air yang dibutuhkan untuk memadamkan api premixed mencapai dua kali lebih banyak daripada untuk memadamkan api non-premixed. Hal ini karena pada non-premixed flame memiliki heat loss yang lebih besar dari pada

premixed flame. Jika ingin menggunakan uap air pada suhu 100 °C, maka jumlah air yang dibutuhkan dua kali lebih banyak jika dibandingkan menggunakan droplet air.

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 mencakupi seluruh permukaan fuel, maka flame yang tidak terkena langsung semprotan kabut air tidak akan padam. Flame tersebut akan mudah menyalakan kembali flame ketika kabut air dihentikan. Sudut efektif untuk cakupan spray ditentukan dengan jumlah minimal fluks air yang dibutuhkan untuk memadamkan api dan dapat dinyatakan dengan :

$$A_w = \pi(a_c L \tan \frac{\alpha}{2})^2 \quad (2.51)$$

Sudut spray  $\alpha$ , 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

$$U_{f \max} = 1,9\dot{Q}_c^2 \quad (2.52)$$

dimana  $\dot{Q}_c$  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 :

$$u_w = \frac{u_{wo}}{\exp\left(\frac{0,33\rho_g L}{d\rho_w}\right)} \quad (2.53)$$

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

$$u_{wo} = \sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho_w}\right)} \quad (2.54)$$

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

$$u_w \geq u_{f \text{ max}} \quad (2.55)$$

atau

$$u_w = \frac{\sqrt{2\left(\frac{\Delta P}{\rho_w}\right)}}{\exp\left(\frac{0,33\rho_g L}{d\rho_w}\right)} \geq 1,9\dot{Q}_c^2 \quad (2.56)$$

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 semprotan.