

BAB 4

HASIL & ANALISIS

4.1 PENGUJIAN KARAKTERISTIK WATER MIST UNTUK PEMADAMAN DARI SISI SAMPING BAWAH (CO-FLOW)

Untuk mengetahui kemampuan pemadaman api menggunakan sistem water mist terlebih dahulu perlu dilakukan penelitian mengenai karakteristik keefektifan penggunaan sistem ini untuk berbagai arah pemadaman dan jenis kebakaran. Pada sistem ini terdapat beberapa parameter penting antara lain *flux density*, laju aliran kabut air, ukuran droplet, dan momentum karena hal tersebut akan menentukan kehandalan sistem ini di dalam pemadaman suatu nyala api.

Pada tahap penelitian ini akan dilakukan percobaan untuk mengetahui fluks massa yang dihasilkan oleh sistem kabut air untuk skala laboratorium. Perbedaan percobaan ini dibandingkan penelitian water mist sebelumnya adalah arah datangnya kabut air untuk pemadaman, pada percobaan sebelumnya arah pemadaman dilakukan dari sisi atas nyala api sedangkan pada percobaan ini arah datangnya kabut air akan dilakukan dari sisi samping bawah ke arah atas sehingga dapat dilihat keefektifan perbedaan arah datangnya kabut air tersebut terhadap *fluks density*.



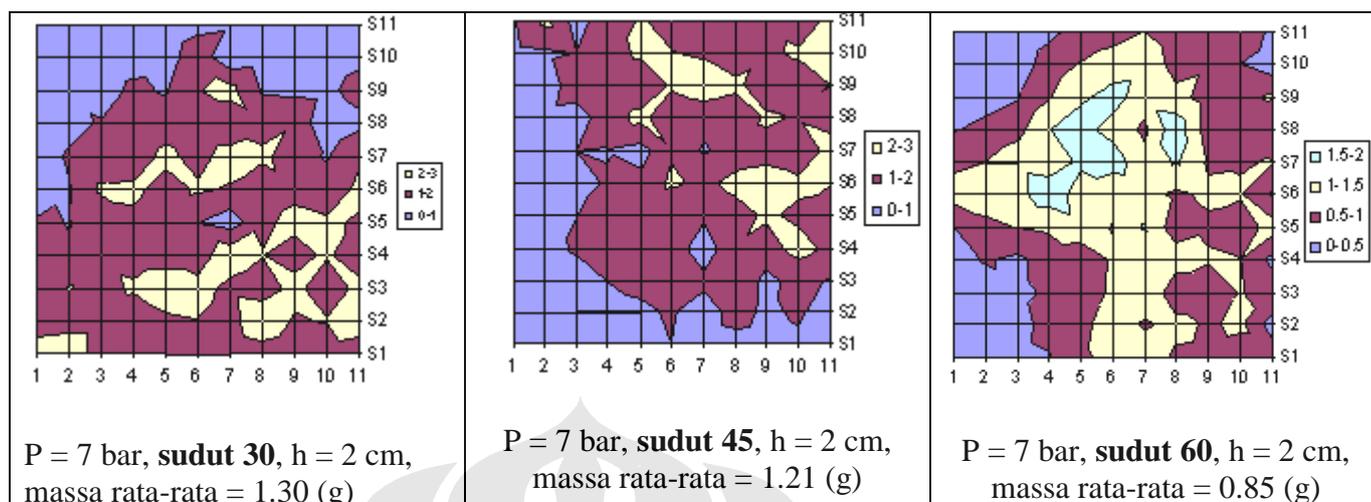
Gambar 4.1 Perbedaan Penyemprotan Dari Atas Dan Dari Sisi Samping Bawah

Tahapan berikutnya adalah merancang dudukan nosel agar pemadaman dapat dilakukan dari sisi samping bawah dan juga merancang agar dudukan nosel dapat diatur ketinggian dan jarak antar nosel, setelah itu ditetapkan variabel pengujian apa saja yang akan digunakan (variabel apa saja yang berubah dan tetap). Untuk penelitian ini variabel tetap yaitu jumlah nosel yang digunakan adalah 4 buah, jenis nosel tipe green house dengan bukaan nosel sebesar 540° . Variable yang berubah untuk mengetahui karakteristik dari pemadaman water mist dari sisi samping bawah ini adalah kemiringan sudut dengan variasi 30° , 45° , dan 60° sedangkan untuk variabel ketinggian nosel, yang digunakan adalah 0 cm, 2 cm, 4 cm dari ujung pool fire. Tekanan yang digunakan ditentukan sebesar 7 bar. Dari variasi sudut dan juga ketinggian nosel ini akan dilihat yaitu pengaruh sudut dan ketinggian terhadap *fluks density* serta distribusi kabut air yang dihasilkan.

4.1.1 Pengaruh Kemiringan Sudut Nosel Terhadap Fluks Massa Kabut Air

Salah satu parameter penting di dalam pemadaman nyala api dengan menggunakan sistem water mist adalah *fluks density* kabut air pada daerah pemadaman. Untuk mengetahui persebaran serta seberapa besar fluks massa yang dihasilkan maka digunakan metodologi menggunakan busa yang mudah menyerap air, logikanya karena busa dapat mudah menyerap air maka dapat diketahui seberapa besar jangkauan serta massa kabut air pada daerah pemadaman. Pengambilan data menggunakan busa yang dipotong kotak sebanyak 11×11 buah. Luas masing-masing kotak sebesar 9 cm^2 sehingga luas seluruhnya menjadi 1089 cm^2 atau 0.1089 m^2 . Untuk mendapatkan fluks density dari kabut air yang diuji, massa awal busa diukur dan massa akhir diukur (setelah disemprotkan kabut air), maka akan didapatkan selisih yang merupakan massa air yang terkandung. Setelah semua busa ditimbang, maka akan terlihat pola kabut air yang diuji. Pola kabut air yang dihasilkan ternyata berbeda pada setiap variasi, seperti variasi kemiringan sudut serta ketinggian nosel. Untuk dapat menganalisis hasil, maka dalam melakukan perbandingan harus pada variabel yang sama. Berikut ini akan dibandingkan hasil yang didapat berupa perbandingan kemiringan sudut serta ketinggian nosel.

Pengaruh Kemiringan Sudut



Gambar 4.2 Fluks Massa Dengan Berbagai Kemiringan Sudut

Untuk mengetahui pengaruh kemiringan sudut nosel terhadap *fluks density* maka perlu dibandingkan pada ketinggian serta tekanan yang sama dalam hal ini yaitu 2 cm dan tekanan 7 bar, sehingga dari hasil pengambilan data akan terlihat pola persebaran kabut air serta interaksi antar nosel. Pada gambar diatas terlihat pada sudut 30° dan 45° memiliki kecenderungan fluks massa mengumpul di daerah tepi dengan jumlah persebaran yang merata dari penambahan *fluks density* yang berkisar antara 2-3 (g), sedangkan pada sudut 60° dimana pola konsentrasi persebaran *fluks density* lebih mengarah ke bagian tengah akibat dengan penambahan massa sekitar 1.5-2 (g), dari sudut kemiringan yang semakin besar sehingga pancaran spray lebih jauh.

Persebaran *fluks density* pada sudut 30° dan 45° yang mengumpul di daerah tepi disebabkan karena pengaruh kemiringan sudut nosel sehingga kabut air yang dipancarkan terlebih dahulu mengarah ke area uji dan diserap oleh busa sebelum berinteraksi dengan kabut air yang keluar dari nosel yang lainnya hal ini berbeda pada sudut 60° persebaran spray kabut air lebih mengarah ke bagian tengah akibat dari besar kemiringan sudut sehingga jumlah kabut air yang jatuh merupakan hasil interaksi dari keempat nosel. Kemiringan sudut berpengaruh terhadap rata-rata massa yang diserap oleh busa, pada sudut 30° dan 45° massa rata-rata yang diserap lebih besar yaitu 1.30 (g) dibandingkan dengan sudut 60°

yang hanya 0.85 (g) karena semakin kecil kemiringan sudut ujung kepala nosel jangkauan spray lebih mengarah terlebih dahulu ke daerah uji dengan konsekuensi jangkauan persebaran yang lebih sempit, berbeda dengan sudut 60° yang massa rata-ratanya lebih kecil akibat dari kabut air yang jatuh merupakan kabut air sisa hasil interaksi dari keempat nosel sehingga sebagian kabut air jatuh keluar dari daerah uji.

Fenomena yang menarik pada interaksi spray keempat buah nosel yaitu aliran spray yang saling bertabrakan pada bagian tengah daerah uji mengalami putaran (*turbulensi*), hal ini bisa terjadi akibat spray kabut air yang keluar masing-masing memiliki momentum yang diberikan oleh nosel, apabila salah satu nosel memiliki momentum yang lebih besar dibandingkan yang lainnya yang terjadi adalah pola persebaran *fluks density* cenderung terdorong ke arah spray kabut air yang memiliki momentum lebih lemah, sehingga pada gambar diatas terdapat daerah yang jumlah fluks massanya sangat sedikit.

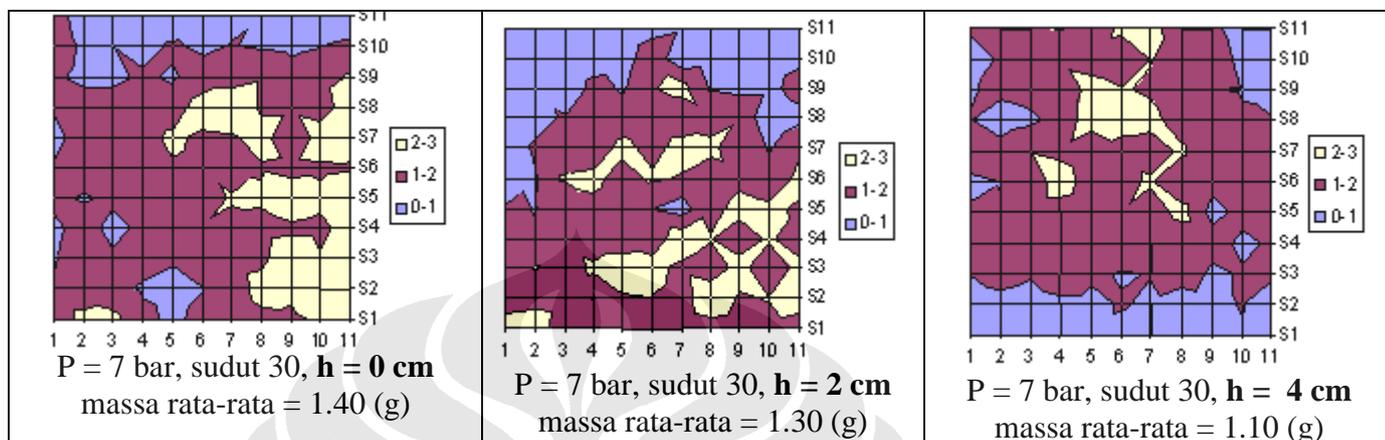
Dengan kemiringan sudut yang yang lebih kecil 30° dan 45° akan didapatkan konsentrasi *fluks density* pada daerah tepi dengan jumlah *fluks density* yang semakin besar, sedangkan pada kemiringan sudut semakin besar 60° konsentrasi fluks lebih mengarah ke bagian tengah dan juga sedikit cenderung ke tepi daerah uji. Sehingga dari hasil ini dapat diketahui dari sistem ini, terkait dengan penggunaannya apabila diinginkan objek tertentu yang terkonsentrasi, maka dapat digunakan kemiringan sudut rendah (30° dan 45°) atau bila dibutuhkan sistem kabut air untuk api yang besar dapat menyebar maka dapat dipakai aplikasi dengan kemiringan sudut tinggi (60°).

4.1.2 Pengaruh Ketinggian Penyemprotan Terhadap Fluks Massa

Selain faktor kemiringan sudut juga akan dilihat faktor ketinggian nosel pada saat penyemprotan terhadap pola persebaran serta jumlah fluks massanya. Setelah melihat hasil pengaruh kemiringan sudut terhadap fluks massanya untuk sudut kemiringan lebih mengarah ke daerah uji, rata-rata fluks massa semakin besar sehingga dapat dijadikan hipotesis sementara untuk ketinggian yang semakin dekat dengan daerah uji maka jumlah fluks massanya akan semakin besar

pula, untuk mendukung hipotesis ini maka perlu dibandingkan dengan hasil percobaan.

Pengaruh Ketinggian Pancaran Nosel



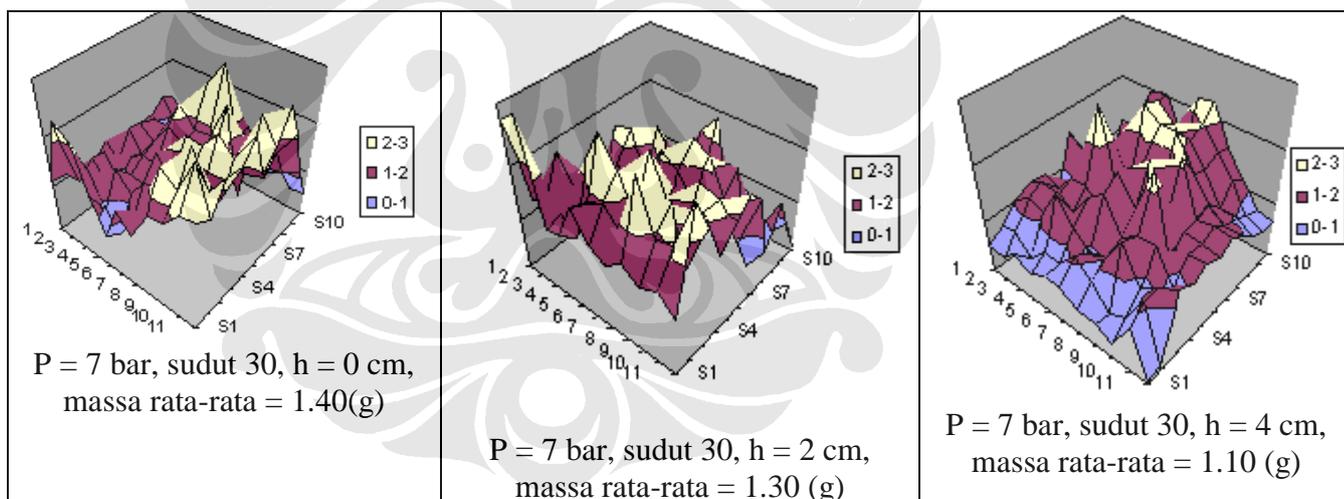
Gambar 4.3 Pengaruh Ketinggian Terhadap Fluks Density

Pada gambar diatas terlihat perbedaan pola persebaran yang terjadi pada tiga variasi ketinggian yaitu 0, 2, dan 4 cm dari ujung tepi daerah uji, untuk lebih memudahkan didalam analisis maka variabel tetap yaitu sudut kemiringan dan tekanan masing-masing 30⁰ dan 7 bar. Untuk ketinggian 0 dan 2 cm pola persebaran lebih cenderung ke daerah tepi dengan *fluks density* sekitar 1-2 (g) dan terdapat penumpukan fluks massa sekitar 2-3 kg, sedangkan semakin tinggi ketinggian pancaran nosel maka pola persebaran cenderung lebih mengarah ke daerah tengah dengan *fluks density* sekitar 1-2 (g) pada daerah tengah yang diikuti juga dengan penumpukan sekitar 2-3 (g).

Persebaran fluks massa yang cenderung mengumpul di tepi pada ketinggian yang semakin dekat daerah uji sesuai dengan hipotesis sebelumnya bahwa pancaran spray dari nosel akan menyentuh daerah uji terlebih dahulu sebelum berinteraksi dengan pancaran dari keempat nosel. Ketika ketinggian nosel bertambah maka daerah yang menyentuh tepi daerah uji akan semakin sedikit sebaliknya dengan adanya momentum maka pancaran spray dari keempat nosel akan berinteraksi di daerah tengah, sehingga *fluks density* yang terdapat di bagian tengah merupakan kabut air yang jatuh akibat interaksi momentum antar

nosel. Ketinggian nosel berpengaruh juga terhadap rata-rata *fluks density* yang dihasilkan pada ketinggian 0 cm rata-rata *fluks density* sekitar 1.40 (g), semakin bertambah ketinggian noselnya rata-rata *fluks density* semakin turun yaitu pada ketinggian 2 dan 4 cm masing-masing 1.30 dan 1.10 (g).

Analisis yang mendekati adalah bertambahnya ketinggian nosel menyebabkan pancaran spray nosel yang jatuh dan diserap oleh busa semakin sedikit, sehingga interaksi spray nosel cenderung mengarah di daerah tengah, dan dengan bertemunya momentum dari keempat nosel menyebabkan spray yang jatuh berkurang akibat terbawa aliran udara sekitar. Pada hipotesis disebutkan bahwa pada ketinggian nosel 0 cm kecenderungan penumpukan fluks massa akan menumpuk di daerah tepi dan semakin bertambah ketinggian nosel maka penumpukan massa akan cenderung di daerah tengah akibat dari interaksi pancaran spray kabut air antar nosel. Untuk melihat hal tersebut maka akan ditampilkan ilustrasi 3 dimensi dari fluks massa



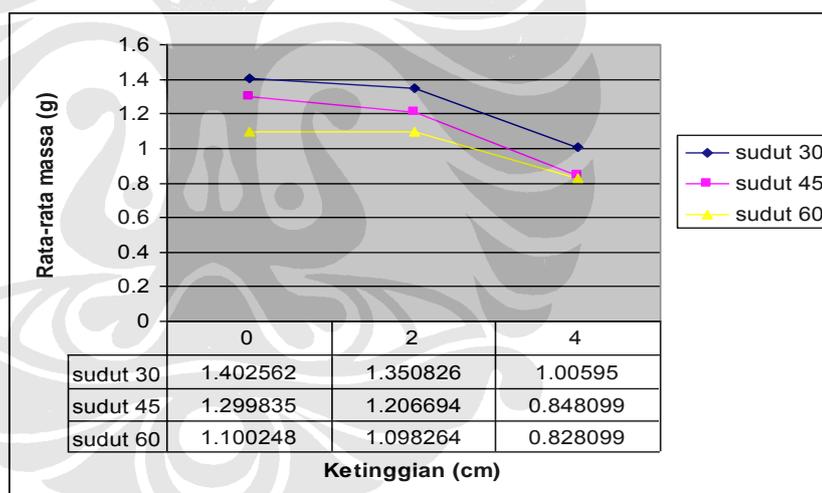
Gambar 4.4 Tampilan 3 Dimensi Ketinggian Terhadap Fluks Massa

Dari grafik perbandingan 3 dimensi diatas terbukti bahwa pada ketinggian 0 cm dari tepi daerah uji terjadi penumpukan *fluks density* akibat pancaran spray dari nosel terlebih dahulu menyentuh dan akhirnya diserap oleh busa, pada ketinggian 2 cm penumpukan *fluks density* mulai cenderung bergeser ke arah tengah dari daerah tepi. Hal ini diperkuat dengan semakin bertambahnya ketinggian mak penumpukkan *fluks density* yang terjadi semakin ketengah akibat

dari interaksi momentum antar nosel sehingga penumpukan *fluks density* yang jatuh tidak begitu banyak akibat dari tumbukan antar spray yang terbawa udara sekitar. Jadi dengan adanya data perbedaan ketinggian ini dapat diambil kesimpulan bahwa dengan ketinggian yang lebih dekat dari daerah uji, akan meningkatkan performa dari kabut air tersebut . Peningkatan performa yang dimaksud yaitu luas cakupan area yang sama besar dengan jumlah fluks massa yang lebih besar, Momentum dan fluks merupakan hal penting dalam performa pemadaman menggunakan kabut air.

4.1.3 Perbandingan Keseluruhan Kemiringan Sudut Serta Ketinggian Terhadap Fluks Massa

Untuk lebih dapat melihat perbandingan keseluruhan dari pengaruh kemiringan sudut dan ketinggian dapat dilihat pada grafik di bawah ini



Gambar 4.5 Perbandingan Kemiringan Sudut, Ketinggian Terhadap Rata-rata *Fluks Density*

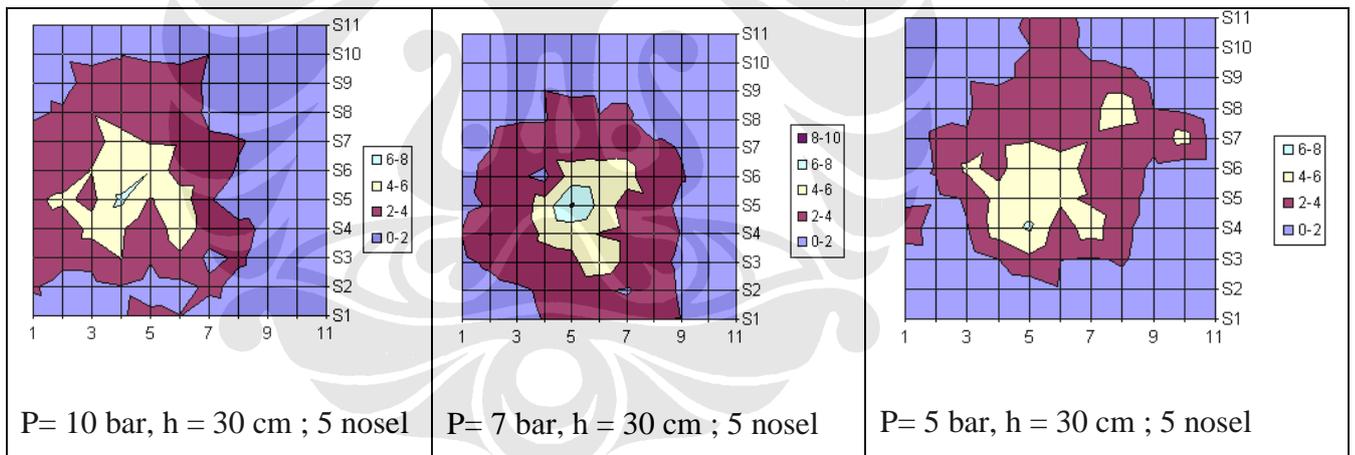
Pada grafik perbandingan di atas untuk membuktikan dengan analisis sebelumnya bahwa dengan kemiringan sudut nosel yang semakin kecil dan dengan ketinggian yang semakin dekat dengan daerah uji maka akan didapatkan rata-rata massa yang semakin besar dengan nilai terbesar yaitu pada sudut 30° dengan ketinggian 0 cm dari daerah uji didapatkan nilai sebesar 1.40 dan nilai terkecil yaitu pada sudut 60° dengan ketinggian 4 cm dari permukaan daerah uji.

Dari grafik perbandingan keseluruhan ini dapat digunakan sebagai panduan di dalam kemiringan sudut dan ketinggian pemadaman.

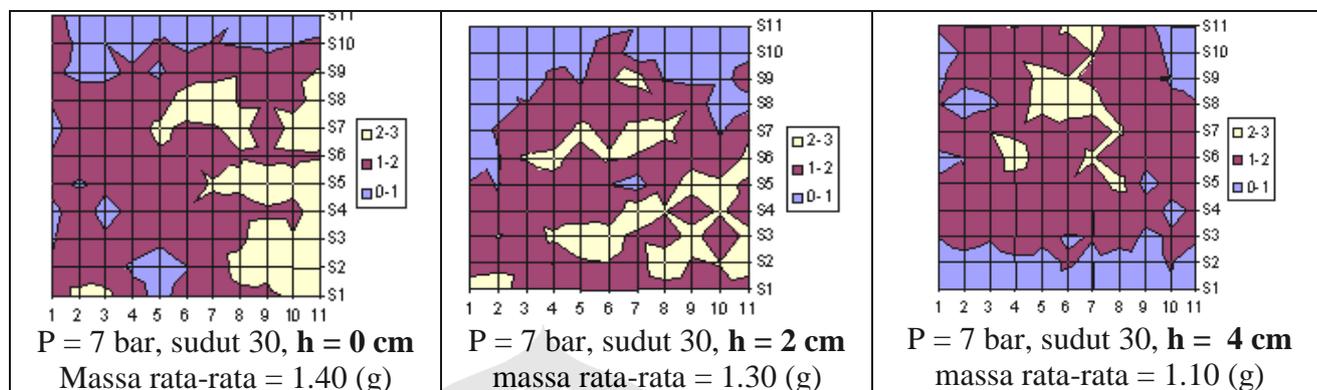
4.1.4 Perbandingan Penyemprotan Dari Sisi Samping Bawah Dengan Sisi Atas Terhadap Fluks Density

Untuk melihat perbedaan karakteristik arah pemadaman dari sisi samping bawah dengan sisi atas terhadap fluks massa, maka akan dibandingkan percobaan yang telah dilakukan sebelumnya yang dilakukan dari sisi atas dengan menggunakan 5 buah nosel tipe green house bukaan katup 540^o dengan jarak antar nosel 8 cm dan variasi ketinggian 10 cm dan 30 cm. Di dalam analisis perbandingan ini hanya ingin dibandingkan karakteristik pola persebaran fluks massa dan massa dari kabut air

Penyemprotan Dari Sisi Atas



Penyemprotan Dari Sisi Samping Bawah



Gambar 4.6 Perbedaan Persebaran Fluks Density Dari Atas Dengan Sisi Bawah

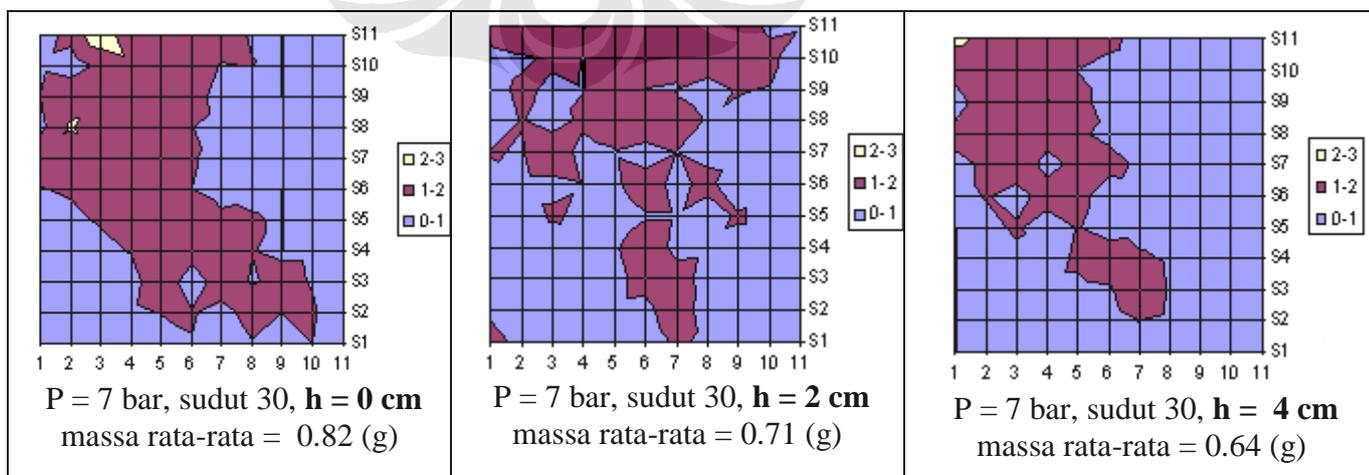
Pada grafik perbandingan diatas terlihat perbedaan yang cukup signifikan antara penyemprotan dari sisi atas dibandingkan dari sisi bawah terhadap pola persebaran fluks massa kabut air yang jatuh di daerah uji. Pola Penyemprotan dari sisi atas dengan 5 nozel dengan variasi tekanan 5, 7 dan 10 bar terlihat memiliki pola membulat dan terkonsentrasi di daerah tengah, sedangkan pada penyemprotan dari sisi samping bawah sesuai dengan analisis sebelumnya terlihat pola yang menyebar atau merata secara keseluruhan pada daerah uji.

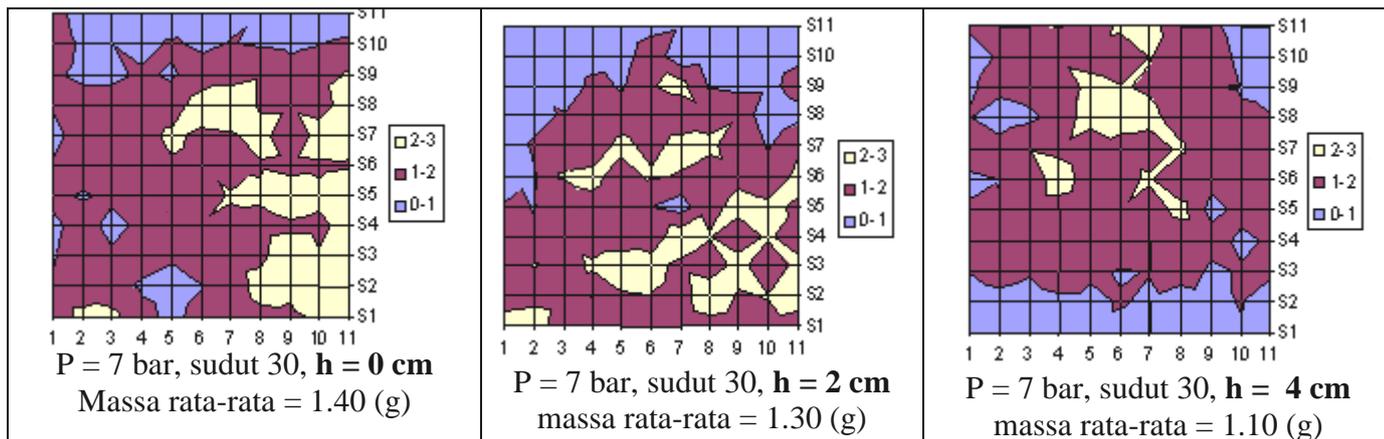
Perbandingan jumlah massa kabut air yang dapat ditangkap oleh busa terlihat perbedaan yang signifikan, pada penyemprotan dari sisi atas massa yang dapat ditampung oleh gabus bisa mencapai 6-8 (g) bahkan dapat mencapai 8-10 (g) hal ini sangat berbeda dibandingkan dengan penyemprotan dari sisi samping dimana massa kabut air yang dapat diterima oleh busa berkisar antara 1-2 (g). Hal ini terjadi akibat kabut air yang jatuh dari sisi atas langsung menuju daerah uji (busa), berbeda dengan pemadaman dari sisi samping bawah dimana kabut air yang ditangkap terlebih dahulu mengarah ke atas setelah itu baru jatuh akibat kehilangan momentum [Husted, Bjarne Paulsen et al, 2004]..

4.1.5 Perbandingan Penyemprotan Turbulensi Terhadap Fluks Density

Terjadi fenomena yang menarik pada saat awal dilakukan percobaan *fluks density*, apabila keempat nosel yang berhadapan tidak berada pada satu garis lurus atau setidaknya sedikit miring ke kiri atau ke kanan akan terjadi interaksi antar kabut air yang disemprotkan oleh nosel sehingga menciptakan turbulensi pada tengah daerah uji. Oleh karena fenomena turbulensi inilah kami tertarik untuk mengetahui karakteristiknya terhadap massa *fluks density* serta pola aliran penyebarannya sebelum mengetahui karakteristiknya pada saat pemadaman nyala api. Parameter yang akan diperbandingkan yaitu tekanan 7 bar, sudut kemiringan nosel 30° , dan keempat kepala nosel miring ke kanan sebesar 20° dan variasi ketinggian penyemprotan yaitu 0, 2 dan 4 cm dari tepi ujung daerah uji. Kami menggunakan sudut kemiringan 30° karena jumlah rata-rata massanya paling banyak dibandingkan yang lain sehingga diharapkan terlihat perbedaan yang signifikan untuk rata-rata massa yang mampu diserap oleh busa dan pola persebaran alirannya. Sedangkan untuk kemiringan sudut 20° ke kanan dipilih dari beberapa kali percobaan karena dianggap cukup mewakili fenomena turbulensi pada tengah area uji apabila sudutnya lebih besar dari 20° maka pola aliran turbulensi yang tercipta akan keluar dari daerah uji. Berikut ini akan dibandingkan hasil yang didapat berupa perbandingan kemiringan sudut serta ketinggian nosel.

Penyemprotan Sudut 30 Dengan Fenomena Turbulen



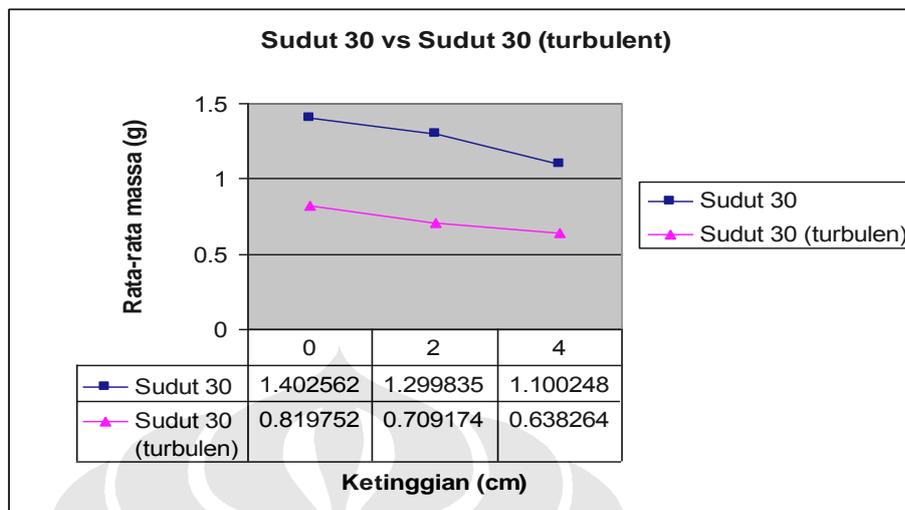


Gambar 4.7 Perbandingan Penyemprotan Sudut 30⁰ Dengan Fenomena Turbulensi

Untuk mengetahui pengaruh kemiringan kepala nosel ke kanan sebesar 20⁰ sehingga menciptakan fenomena turbulen maka perlu diperbandingkan pada variabel yang sama agar terlihat perbedaannya dalam hal ini pada saat tekanan 7 bar dan ketinggian 0 cm dari tepi daerah uji. Pada gambar persebaran *fluks density* diatas terlihat persebaran pola aliran *fluks density* pada sudut 30⁰ tanpa turbulensi pola alirannya lebih merata dengan adanya penumpukkan massa sekitar 1-2 (g) pada daerah tepi serta jumlah massa rata-rata sekitar 1.4 (g). Sedangkan pada sudut 30⁰ dengan turbulensi terlihat pola aliran yang lebih acak dan cenderung mengarah ke tengah namun tidak terjadi penumpukan yang terlalu signifikan terbukti dari massa rata-ratanya sekitar 0.709174 selisihnya sekitar 0.5-0.6 (g) dengan sudut 30⁰ tanpa turbulensi.

Persebaran sudut 30⁰ dengan turbulensi yang cenderung lebih acak dan mengumpul pada daerah tengah disebabkan oleh interaksi keempat nosel yang membentuk aliran turbulen pada daerah tengah tempat uji, sedangkan pola aliran yang mengacak dan tidak mengumpul di titik area tengah disebabkan karena dorongan aliran yang dikeluarkan oleh masing-masing nosel menyebabkan berputar-putar di tengah daerah uji sehingga kabut air yang jatuh memiliki karakteristik yang lebih acak dan tidak mengumpul pada daerah tengah, hal ini dapat terlihat jelas ketika ketinggian 2 cm pola aliran yang terbentuk cenderung terpisah-pisah tidak terkonsentrasi di satu titik.

Untuk melihat perbandingan keseluruhan rata-rata massa pada sudut 30° dengan turbulensi dengan sudut 30° biasa dapat dilihat pada grafik di bawah ini



Gambar 4.8 Perbandingan Sudut 30° & Sudut 30° (Turbulen) Terhadap Rata-rata Fluks Density

Pada grafik dapat dilihat rata-rata massa fluks density sudut 30° (turbulen) memiliki rata-rata massa yang lebih kecil dibandingkan dengan sudut 30° biasa dengan selisih yaitu sekitar 0.5-0.6 (g), rata-rata massa tertinggi yaitu pada ketinggian 0 cm dengan nilai 0.82, dan rata-rata massa terendah pada ketinggian 4 cm dengan nilai 0.64 hal ini sesuai dengan analisis sebelumnya bahwa semakin tinggi jarak nosel dengan daerah uji maka rata-rata massa yang jatuh ke daerah uji akan semakin sedikit.

Jumlah rata-rata massa pada sudut 30° turbulensi cenderung lebih sedikit karena oleh kabut air yang jatuh pada daerah uji seperti sapuan kabut diakibatkan kabut air yang akan jatuh terdorong lagi oleh nosel yang lainnya begitu seterusnya sehingga banyak kabut air yang terbang keluar daerah uji sehingga sedikit yang dapat diserap oleh busa pada daerah uji. Dari percobaan dengan pengaruh turbulensi tersebut dapat disimpulkan bahwa jumlah rata-rata massa *fluks density* yang dapat diserap oleh busa cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan penyemprotan tanpa pengaruh turbulensi, tetapi pengaruhnya terhadap efektifitas waktu pemadaman baru dapat diketahui setelah dilakukan percobaan pemadaman nyala api.

Setelah dilakukan pengujian karakteristik nozel terhadap fluks density yang dihasilkan, maka sudut nozel yang dipilih untuk pemadaman nantinya yaitu dengan kemiringan 30° derajat, hal ini dikarenakan jumlah fluks density yang dihasilkan dibandingkan sudut 45° dan 60° lebih optimal.

4.2 KARAKTERISTIK POOL FIRE

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. *Pool fire* termasuk ke dalam kelas kebakaran B, dan untuk memadamkannya saat ini banyak digunakan bubuk kimia kering (*dry powder*). Pemadaman api jenis ini tidak dapat menggunakan media air, karena api bukan padam bahkan menyebabkan api menyebar. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa penelitian ini akan mencoba memadamkan jenis *pool fire* ini menggunakan sistem kabut air. Sebelum memadamkannya, perlu diketahui juga karakteristik dari *pool fire* yang akan diuji. Ini sebagai dasar analisis saat pemadaman.

Pada penelitian ini akan dilakukan pemadaman *pool fire* yang berbahan bakar alkohol. Wadah *pool fire* yang digunakan yaitu berukuran 5 cm dan 8 cm, yang akan menghasilkan ketinggian flame yang berbeda-beda. Bahan bakar yang digunakan untuk wadah 5 cm sebanyak 2 ml, wadah 8 cm sebanyak 250 ml. Sebelum melakukan pemadaman, dilakukan dulu perhitungan karakteristik dari *pool fire* yang akan diuji. Karakteristik itu dapat berupa laju pembakaran bahan bakar, laju produksi kalor teoritis, tinggi nyala api, dan temperatur nyala. Sifat nyala api dari *pool fire* tersebut penting untuk menganalisis apa yang terjadi saat dilakukan usaha pemadaman menggunakan kabut air.

4.2.1 Laju Pembakaran Bahan Bakar dan Laju Produksi Kalor Alkohol

Untuk mengetahui pembakaran yang terjadi pada *pool fire* yang diuji, maka perlu dilakukan perhitungan dan pengujian terhadap laju pembakaran bahan

bakar dan laju produksi kalornya. Menghitung laju pembakaran \dot{m}'' diperoleh dengan menggunakan rumus :

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - \exp(-k\beta D))$$

Tabel 4.1 Laju Pembakaran Bahan Bakar

Material	Mass Loss Rate \dot{m}'' (kg/m ² -sec)	Heat of Combustion $\Delta H_{c, eff}$ (kJ/kg)	Density ρ (kg/m ³)	Empirical Constant $k\beta$ (m ⁻¹)
Cryogenics				
Liquid H ₂	0.017	12,000	70	6.1
LNG (mostly CH ₄)	0.078	50,000	415	1.1
LPG (mostly C ₃ H ₈)	0.099	46,000	585	1.4
Alcohols				
Methanol (CH ₃ OH)	0.017	20,000	796	100 **
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	0.015	26,800	794	100 **
Simple Organic Fuels				
Butane (C ₄ H ₁₀)	0.078	45,700	573	2.7
Benzene (C ₆ H ₆)	0.085	40,100	874	2.7
Hexane (C ₆ H ₁₄)	0.074	44,700	650	1.9
Heptane (C ₇ H ₁₆)	0.101	44,600	675	1.1
Xylene (C ₈ H ₁₀)	0.090	40,800	870	1.4
Acetone (C ₃ H ₆ O)	0.041	25,800	791	1.9
Dioxane (C ₄ H ₈ O ₂)	0.018	26,200	1,035	5.4
Diethyl ether (C ₄ H ₁₀ O)	0.085	34,200	714	0.7
Petroleum Products				
Benzine	0.048	44,700	740	3.6
Gasoline	0.055	43,700	740	2.1
Kerosene	0.039	43,200	820	3.5
JP-4	0.051	43,500	760	3.6
JP-5	0.054	43,000	810	1.6
Transformer Oil, hydrocarbon	0.039	46,400	760	0.7
Fuel Oil, heavy	0.035	39,700	940–1,000	1.7
Crude Oil	0.022–0.045	42,500–42,700	830–880	2.8
Solids				
Polymethylmethacrylate (C ₅ H ₈ O ₂) _n	0.020	24,900	1,184	3.3
Polypropylene (C ₃ H ₆) _n	0.018	43,200	905	100 **
Polystyrene (C ₈ H ₈) _n	0.034	39,700	1,050	100 **
Miscellaneous				
561® Silicon Transformer Fluid	0.005	28,100	960	100 **

** these values are to be used only for computation purposes; the true values are unknown.

Untuk bahan bakar **alkohol** nilai $k\beta = 100 \text{ m}^{-1}$ dan $\dot{m}''_{\infty} = 0,017 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

Maka didapatkan nilai :

- **diameter 5 cm** : $\dot{m}'' = 0.017 * (1 - \exp(-100 * 0.05)) = 16.8 * 10^{-3} \text{ kg / m}^2 \cdot \text{s}$

- **diameter 8 cm** : $\dot{m}'' = 0.017 * (1 - \exp(-100 * 0.08)) = 16.9 * 10^{-3} \text{ kg / m}^2 \cdot \text{s}$

Setelah mendapatkan laju pembakaran, maka dilakukan perhitungan laju produksi kalor (HRR) untuk kedua diameter pool fire tersebut :

$$\dot{Q}_c = \dot{m}'' \cdot \Delta H_c$$

- **diameter 5 cm** : $\dot{Q}_c = 16.8 * 10^{-3} \cdot 20000 = 336 \text{ kJ / m}^2 \cdot \text{s} = 336 \text{ kW / m}^2$

- **diameter 8 cm** : $\dot{Q}_c = 16.9 * 10^{-3} \cdot 20000 = 338 \text{ kJ / m}^2 \cdot \text{s} = 338 \text{ kW / m}^2$

4.2.2 Tinggi Nyala Api & Bentuk Api Pool fire

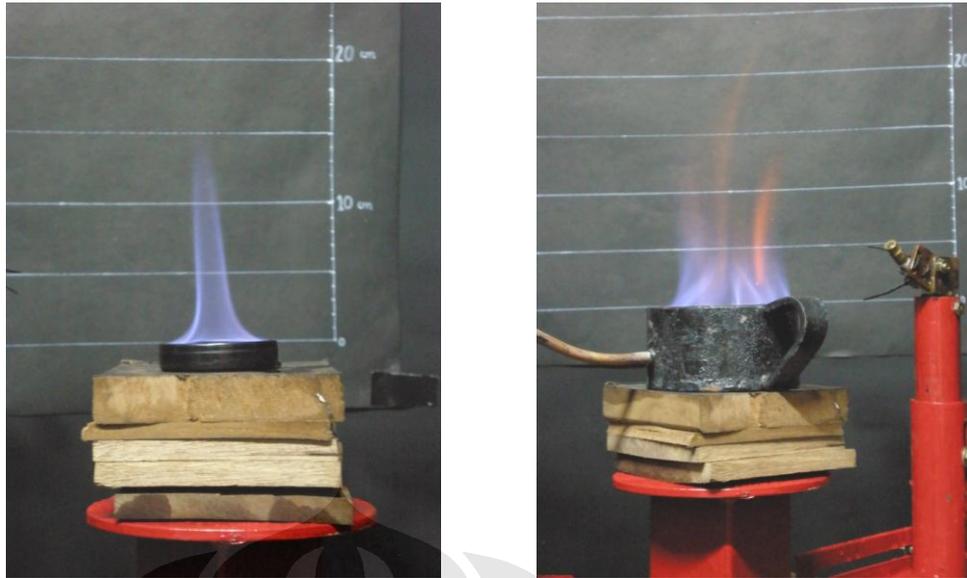
Untuk mengetahui tinggi nyala api dari pool fire dapat menggunakan rumus :

$$H_f = (0.235 Q^{2/5}) - 1.02 D ; (\text{METHOD OF HESKESTAD})$$

Dengan Q yaitu laju produksi kalor dalam kW, dan D merupakan diameter dari pool fire dalam meter. Berikut ini hasil perhitungan tinggi nyala api dari ketiga diameter yang diuji :

- diameter 5 cm : $H_f = (0.235 * 0.483^{2/5}) - 1.02 * 0.05 = 0.125 \text{ m} = 12.5 \text{ cm}$

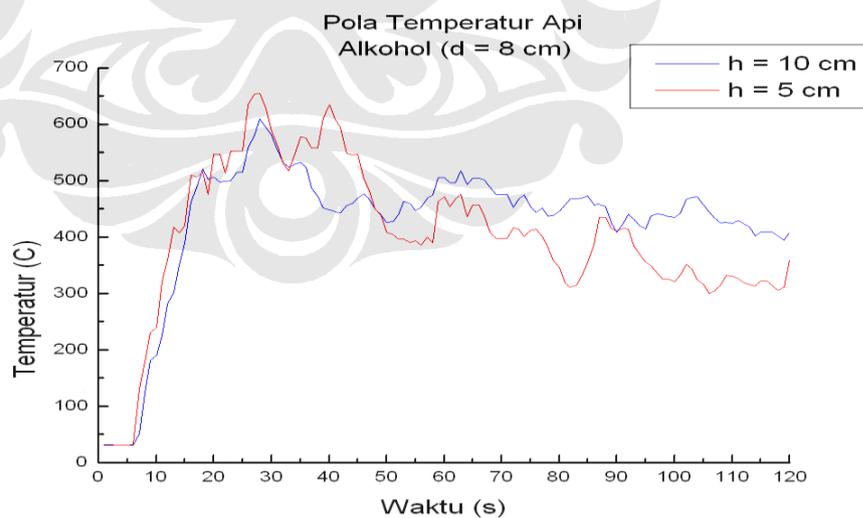
- diameter 8 cm : $H_f = (0.235 * 1.909^{2/5}) - 1.02 * 0.15 = 0.153 \text{ m} = 15.3 \text{ cm}$



Gambar 4.9 Visual Nyala Api *Pool Fire* Alkohol Dengan Diameter Berbeda

4.2.3 Temperatur Nyala Alkohol

Setelah mengetahui laju produksi kalor teoritis dan tinggi nyala api, selanjutnya penting untuk mengetahui temperatur nyala dari *pool fire*. Temperatur nyala ini diukur pada dua ketinggian, pada 5 cm dan 10 cm di atas permukaan bahan bakar.

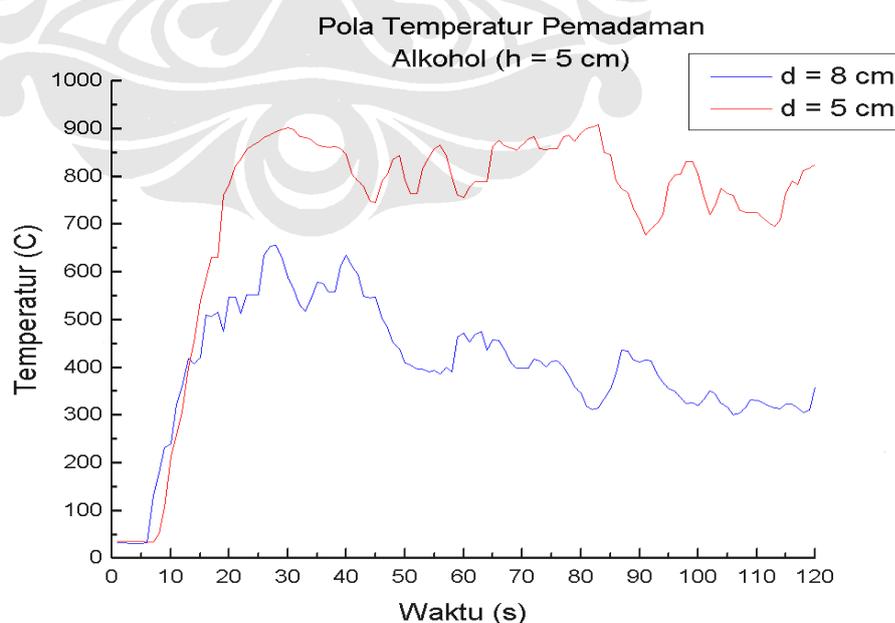


Gambar 4.10 Temperatur Nyala *Pool fire* Pada Ketinggian Berbeda

Hasil pengambilan data untuk temperatur nyala dari *pool fire* terlihat pada grafik diatas. Temperatur pada 5 cm diatas permukaan bahan bakar memiliki nilai

yang lebih tinggi daripada pada titik 10 cm. Ini dikarenakan termokopel yang diletakkan 5 cm diatas permukaan bahan bakar lebih dekat ke daerah/zona inti api. Pada posisi 10 cm temperatur yang terukur, yaitu pada bagian lidah api, sehingga temperaturnya tidak setinggi pada 5 cm. Fluktuasi atau tidak stabilnya nyala api sesuai dengan karakteristik daripada *pool fire* yaitu penguapan cairan bahan bakar dengan momentum bahan bakarnya yang sangat rendah sehingga penguapan pada permukaan bahan bakar tidak terjadi secara serentak sehingga nyala api akan mencari bahan bakar yang dapat menguap terlebih dahulu selain itu kondisi aliran udara yang menyebabkan api sedikit bergerak.

Dari grafik temperatur ini dapat diketahui pola penyalaan nyala api jenis *pool fire* bahan bakar alkohol untuk diameter 8 cm penambahan temperatur dari temperatur rendah rendah ($<50^{\circ}\text{C}$) sampai ke temperatur tinggi ($\pm 700^{\circ}\text{C}$) membutuhkan waktu < 25 sekon. Ini membuktikan bahwa bahan bakar alkohol menguap secara cepat sejalan dengan peningkatan temperatur. Semakin tinggi temperatur api, maka akan menyebabkan percepatan penguapan bahan bakar karena adanya peningkatan perpindahan panas. Perpindahan panas akan semakin cepat karena perbedaan temperatur api (T_f) dengan temperatur permukaan bahan bakar (*liquid Temperatur, T_l*) akan semakin besar. Ini sesuai dengan prinsip konduksi, konveksi dan radiasi pada *pool fire* [Drysdale,1998].



Gambar 4.11 Perbandingan Temperatur Nyala Berbagai Diameter

Grafik diatas menyajikan temperatur nyala pool fire pada kedua jenis diameter yaitu diameter 5 cm dan diameter 8 cm. Temperatur ini diambil pada ketinggian 5 cm dari permukaan bahan bakar. Terlihat bahwa temperatur nyala dari pool fire pada diameter 5 cm lebih besar dari diameter 8 cm, karena nyala api pada diameter 5 cm lebih stabil sehingga kenaikan temperaturnya akan lebih tinggi. Api dinyalakan pada detik ke-5, kemudian temperatur akan langsung naik ke temperatur stabil pada daerah tersebut. Temperatur mengalami kestabilan antara 550-700°C, pada kedua jenis diameter. Fluktuasi kecil yang terjadi dikarenakan dinamika api yang terus bergerak, dikarenakan adanya aliran udara (angin) yang menerpa nyala api.

4.3 PEMADAMAN BAHAN BAKAR LIQUID (*POOL FIRE*)

Dalam penelitian kali ini akan dicoba pemadaman dari api berbahan bakar liquid. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah alkohol. Penggunaan bahan bakar alkohol ditujukan untuk memastikan pemadaman dengan *water mist* yang dilakukan dari samping dapat memadamkan nyala api *pool fire* setelah itu digunakan bahan bakar alkohol untuk melihat karakteristik pemadaman serta faktor keamanannya. Dalam pemadaman ini akan dipakai empat buah nosel dengan tekanan percobaan 7 bar, sudut kemiringan nosel 30°, bukaan nosel 540° sebagai proyeksi dan variasi ketinggian 0, 2, 4 cm dari permukaan *pool fire*.

4.3.1 Analisa Visual Nyala Api Pemadaman Bahan Bakar Alkohol

Karakteristik mengenai pool fire telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Pool fire yang akan coba dipadamkan yaitu dengan diameter wadah 5 cm & 8 cm, yang berbahan bakar alkohol. Pemadaman dilakukan dengan tekanan 7 bar bukaan nosel 540° sebagai proyeksi dan variasi ketinggian 0, 2, 4 cm dari permukaan *pool fire*. Pengamatan dilakukan terhadap temperatur dari nyala api yang dihasilkan sebelum kabut air dinyalakan dan setelah kabut air dinyalakan. Oleh karena itu akan ditempatkan dua buah termokopel serta video kamera untuk melihat pergerakan temperatur nyala api saat dikenai kabut air dan saat pemadaman

terjadi. Termokopel tersebut diletakkan pada jarak 5 cm dan 10 cm diatas permukaan bahan bakar.

Pemadaman akan dilakukan dengan menggunakan empat buah nosel dari sisi samping bawah dengan sudut kemiringan nosel 30° , penggunaan sudut kemiringan nosel 30° dikarenakan pada saat pengujian *fluks density* sudut 30° dilihat paling optimal dilihat dari segi jumlah kabut air yang mengarah ke daerah pemadaman. Penggunaan empat nosel ini bertujuan untuk ”mengurung” nyala api sehingga menimbulkan efek pendinginan dan mengurangi udara yang masuk ke dalam daerah *pool fire*. Berikut hasil rekam visual pemadaman *pool fire* alkohol dengan sistem *water mist* dari sisi samping bawah untuk diameter *pool fire* 5 dan 8 cm



Detik ke-1 tahap preparasi bahan bakar



Detik ke-5 bahan bakar dinyalakan



Detik ke-20 api mulai stabil



Detik ke-25 watermist dinyalakan



Detik ke-26 mulai padam

Detik ke 27 api benar-benar padam

Gambar 4.12 Tahapan pemadaman dengan kabut air bahan bakar alkohol diameter 5 cm

Gambar di atas menunjukkan hasil rekam visual proses pemadaman api berbahan bakar alkohol dengan menggunakan sistem *water mist* dari sisi samping bawah. Proses yang ditampilkan ini pada diameter *pool fire* 5 cm kondisi tekanan 7 bar kemiringan nosel 30° dan derajat bukaan nosel sebesar 540° . Gambar tersebut menggambarkan urutan terjadinya mekanisme pemadaman dimulai dari penyalakan bahan bakar pada detik ke 5 untuk menyesuaikan temperatur bahan bakar dengan temperatur ruangan, kemudian nyala api mulai berkembang penuh dan stabil pada antara detik ke 20 sampai 25.

Pada detik ke 25 sistem pemadaman *water mist* mulai dinyalakan, terlihat cakupan spray mulai tampak dan mengembang sempurna pada detik ke 26 mulai terjadi interaksi antara api dengan kabut air. Saat kabut air tersebut mengenai permukaan bahan bakar, api yang ada disekitar daerah tersebut menjadi tidak stabil sehingga terjadi pembesaran api secara tiba-tiba. Secara tidak langsung pembesaran tersebut dikarenakan bahan bakar yang tidak terbakar yang menguap jauh diatas permukaan alkohol itu terbakar. Pada tahapan ini, perpindahan kalor secara konveksi dan radiasi terjadi, fenomena yang terjadi antara interaksi api dengan kabut air yaitu bentuk lidah api cenderung mengecil dan menjadi tidak stabil dan mengarah ke bagian tengah akibat dari dorongan momentum kabut air yang dihasilkan oleh keempat nosel dari keempat sisi, setelah itu nyala api

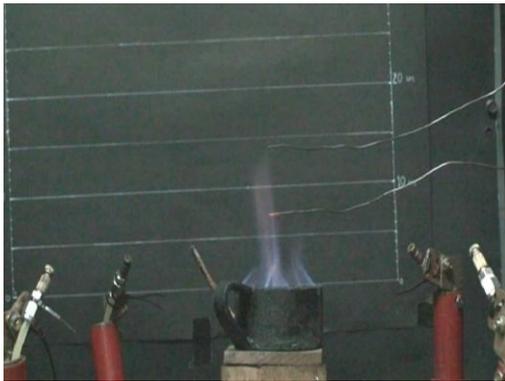
semakin kecil akibat kabut air semakin dominan menutup permukaan nyala api sehingga mengurangi udara atau oksigen yang dibutuhkan pada reaksi pembakaran menyebabkan api padam. Lama waktu pemadaman untuk diameter 5 cm cenderung cepat yaitu hanya berkisar 1-2 s. Untuk diameter 8 cm tahapan preparasi sampai tahapan penyalaan sistem *water mist* sesuai dengan diameter 5 cm, hanya yang membedakan bentuk nyala api yang lebih besar dikarenakan pengaruh diameter pool fire sehingga jumlah bahan bakar pada kondisi yang sama, memiliki nyala api lebih besar dibandingkan dengan diameter 5 cm. Interaksi yang terjadi antara kabut air dengan api pada saat disemprotkan terjadi pembesaran mendadak. Seperti pada diameter 5 cm, tetapi pada diameter 8 cm terlihat lebih besar, kemudian kabut air mulai melakukan penetrasi mendorong nyala api dari keempat sisi sehingga bentuk nyala api berubah bentuk menjadi kecil dan berputar-putar (*swirl*) akibat kabut air menyelimuti nyala api sehingga udara serta kandungan oksigen yang masuk kedalam nyala api semakin berkurang menyebabkan api padam.



Detik ke-1 tahap preparasi bahan bakar



Detik ke-5 bahan bakar dinyalakan



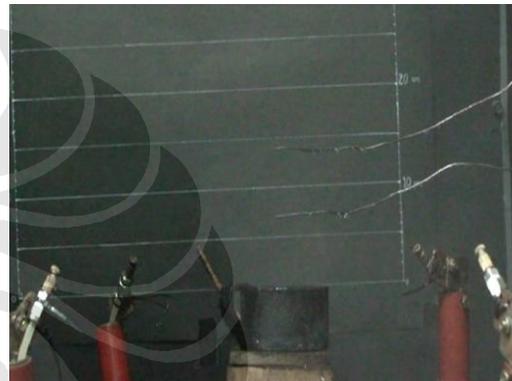
Detik ke-20 api mulai stabil



Detik ke-25 watermist dinyalakan



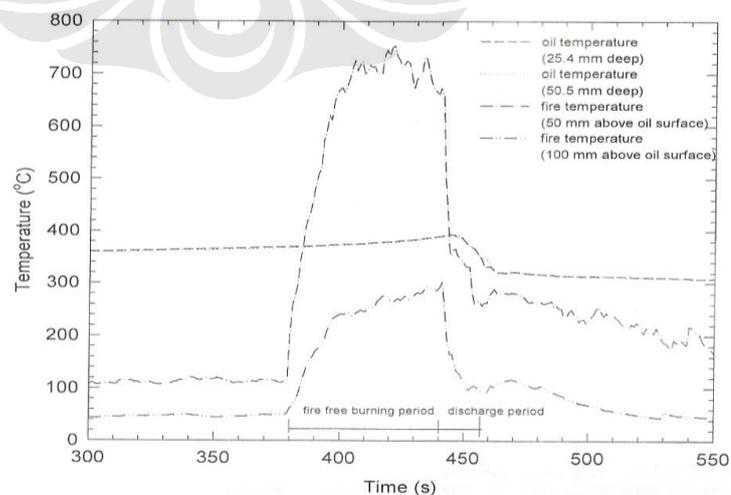
Detik ke-27 api mulai padam



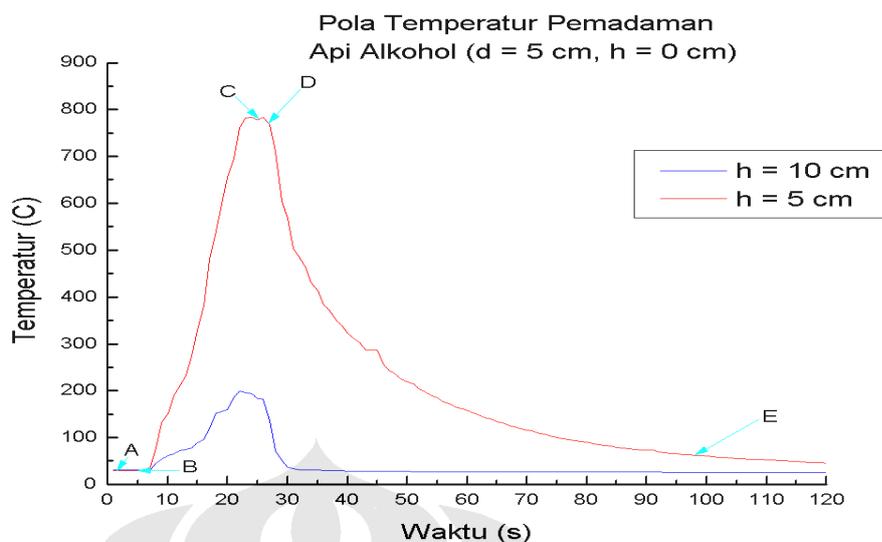
Detik ke 28 api benar-benar padam

Gambar 4.13 Tahapan pemadaman dengan kabut air bahan bakar alkohol diameter 8 cm

4.3.2 Analisa Penurunan Temperatur Terhadap Waktu



Gambar 4.14 Grafik validasi waktu dan suhu saat pemadaman



Gambar 4.15 Pola Temperatur Pemadaman *Pool Fire* (P=7bar; d=5cm, h=0cm)

Keterangan :

A – B : Suhu ruang sebelum *pool fire* dibakar (35°C).

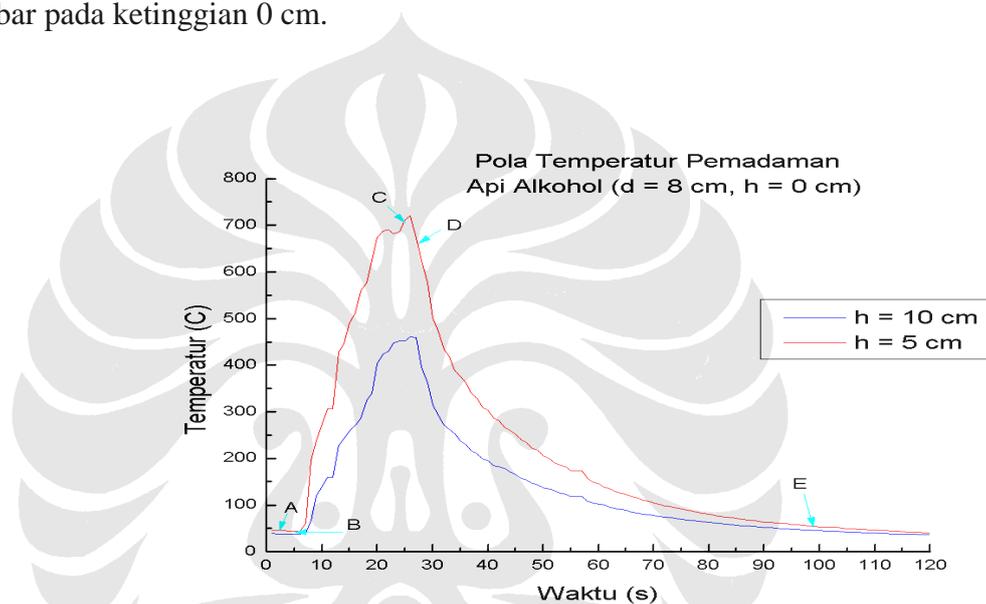
B – C : *Pool fire* dibakar hingga stabil sebelum ada pemadaman

C – D : Pemadaman dengan menggunakan kabut air

D – E : Penurunan temperatur setelah api padam.

Pada grafik diatas terlihat bahwa suhu ruang sebelum pengujian ini berkisar 35°C (A) kemudian pada hitungan detik ke-5 alkohol dinyalakan (B). Setelah itu api mulai berkembang penuh kemudian pada detik ke-25 berikutnya *water mist* dinyalakan (C). Pada pemadaman ini terlihat bahwa temperatur disekitar bahan bakar mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Hal itu terjadi karena adanya air langsung mengenai bahan bakar maka laju pembakaran semakin meningkat. Saat kabut air tersebut mengenai permukaan bahan bakar, api yang ada disekitar daerah tersebut menjadi tidak stabil sehingga terjadi pembesaran api secara tiba-tiba. Peristiwa tersebut juga memiliki dampak pengurangan jumlah kalor yang terkandung dalam alkohol dengan cepat. Jadi jika tidak menggunakan kabut air ini maka api alkohol ini akan nyala lebih lama karena api masih berkembang dan energi yang terbakar konstan (*Fuel-control burning*), namun jika dengan menggunakan kabut air maka waktu pemadaman semakin cepat namun bahaya yang timbul akibat dari pembesaran temperatur secara

mendadak dapat membahayakan. Efek pembakaran yang tak terkontrol akan mempercepat *flashover* sehingga api mulai mengalami penurunan temperatur sampai akhirnya padam. Setelah itu api mulai dapat dipadamkan dengan penurunan temperatur secara teratur. Berdasarkan pengamatan didapat lama pemadaman sebesar 1.2 detik, tetapi temperatur untuk turun membutuhkan waktu, hal ini dikarenakan panas yang masih tersimpan pada termokopel (*heat capacity*), sehingga membutuhkan waktu untuk pendinginan dengan udara sekitar. Di bawah ini grafik temperatur pemadaman *pool fire* untuk diameter 8 cm dengan tekanan 7 bar pada ketinggian 0 cm.



Gambar 4.16 Pola Temperatur Pemadaman *Pool Fire* ($P=7\text{bar}$; $d=8\text{cm}$, $h=0\text{cm}$)

Keterangan :

A – B : Suhu ruang sebelum *pool fire* dibakar (35°C).

B – C : *Pool fire* dibakar hingga stabil sebelum ada pemadaman

C – D : Pemadaman dengan menggunakan kabut air

D – E : Penurunan temperatur setelah api padam.

Berdasarkan grafik dan pengamatan didapat waktu padam sekitar 2-5 detik, dibandingkan dengan alkohol diameter 5 cm, waktu padam untuk diameter 8 cm lebih lama hal ini disebabkan penambahan diameter berarti jumlah bahan bakar yang dibakar sehingga bentuk nyala api menjadi lebih besar sehingga waktu

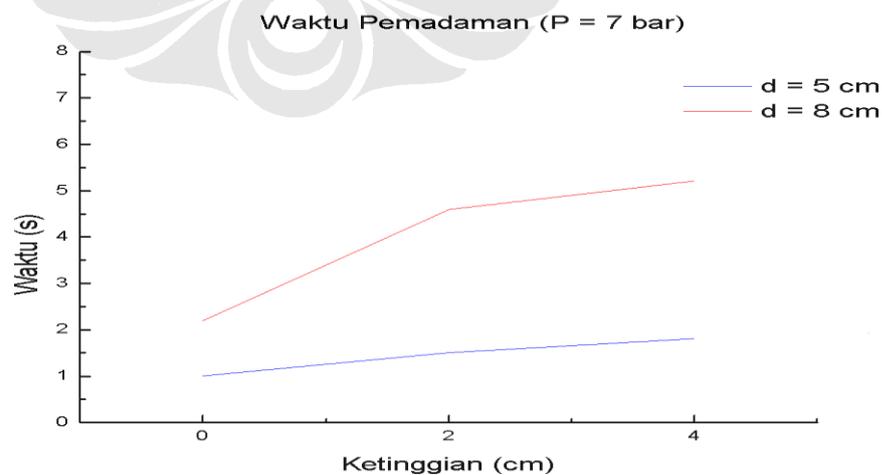
penetrasi kabut air untuk pendinginan nyala api (flame), pendinginan permukaan bahan bakar, pencegahan masuknya oksigen menjadi lebih lama.

4.3.3 Analisa Waktu Padam Pada Bahan Bakar Alkohol

Tabel 4.2 Waktu Pemadaman Alkohol Pada Variasi Ketinggian

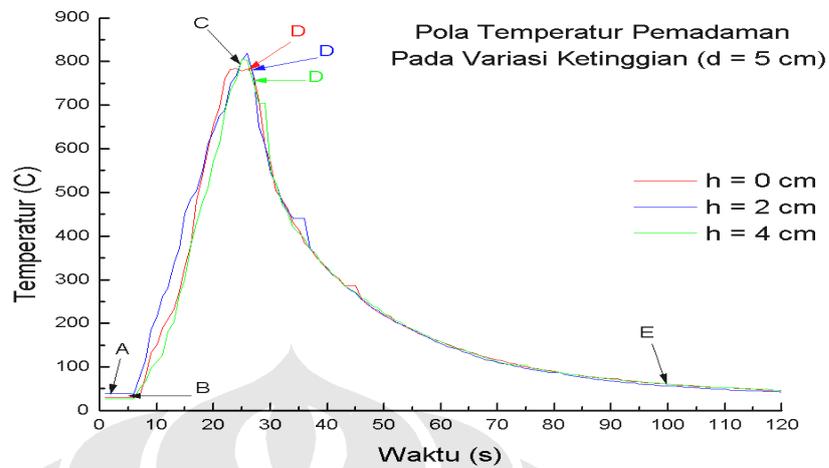
Ketinggian (cm)	Waktu Pemadaman	
	d=5cm	d=8cm
0	1 s	2.2 s
2	1.5 s	4.6 s
4	1.8 s	5.2 s

Dari hasil pengamatan waktu padam yang terjadi antara diameter 5 cm dan 8 cm memiliki perbedaan yang cukup signifikan, pada diameter 5 cm waktu padam berkisar antara 1-1.8 detik sedangkan pada diameter 8 cm waktu padam berkisar antara 10-30 detik, hal ini disebabkan oleh besar kecilnya diameter *pool fire*, semakin besar diameter jumlah bahan bakar yang terbakar lebih banyak sehingga nyala api yang harus dipadamakan menjadi semakin besar dan kemampuan penetrasi kabut air ke pusat api juga semakin lama.

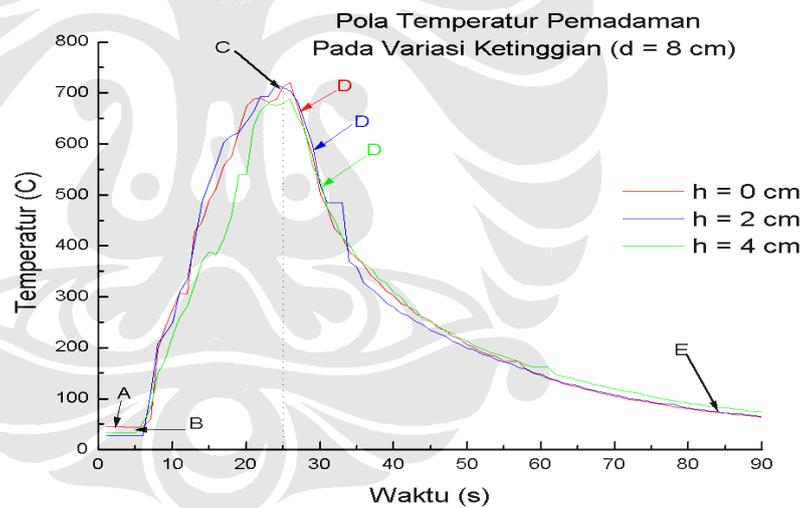


Gambar 4.17 Waktu Pemadaman Dengan Variasi Ketinggian Pemadaman

4.3.4 Analisa Penurunan Temperatur Terhadap Ketinggian



Gambar 4.18 Pola Temperatur Pemadaman *Pool Fire* ($P=7\text{bar}$; $d=5\text{cm}$, $h=0,2,4\text{cm}$)



Gambar 4.19 Pola Temperatur Pemadaman *Pool Fire* ($P=7\text{bar}$; $d=8\text{cm}$, $h=0,2,4\text{cm}$)

Keterangan :

A – B : Suhu ruang sebelum *pool fire* dibakar (35°C).

B – C : *Pool fire* dibakar hingga stabil sebelum ada pemadaman

C – D : Pemadaman dengan menggunakan kabut air

D – E : Penurunan temperatur setelah api padam.

Selain itu didapatkan pengaruh ketinggian pemadaman water mist dari ujung *pool fire*, semakin mendekati sumber nyala api yaitu ketinggian 0 cm waktu padam semakin cepat dan semakin ke atas menjauhi sumber nyala api waktu padam akan semakin lama, sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa untuk mendapatkan waktu pemadaman yang efektif ketinggian pemadaman harus mendekati pusat nyala api yaitu berada di sekitar tengah dan dekat bahan bakar yang terbakar, karena semakin bertambah ketinggian pemadaman kabut air kurang masuk ke dalam pusat api tetapi lebih mengarah ke ujung nyala api (*tip point*) Jika jarak jauh dari sumber api maka kabut air tersebut bergerak tak menentu dan lebih mendinginkan temperatur ruangan sekitar. Belum tentu langsung menuju pusat api. Namun jika dekat dengan api maka secara langsung mempersingkat waktu pemadaman. Kelebihan dengan jarak nosel yang jauh adalah mengurangi perambatan kalor yang terjadi sehingga terjadinya kebakaran yang besar dapat dihindari.

