

Pengembangan Sistem Kabut Air Bertekanan Rendah untuk Pemadaman *Pool Fire*

Yulianto S Nugroho, Khairul Fajarudin, Dwi Wahyulianto, dan Harinaldi

Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia

Kampus UI Depok 16424, INDONESIA

E-mail : yulianto@eng.ui.ac.id

Abstrak

Makalah ini mempresentasikan hasil pengembangan sistem kabut air (water mist system) bertekanan rendah (2 s.d. 6 bar) untuk memadamkan kebakaran minyak dalam bentuk kolam api (pool fire). Pada makalah ini disajikan analisis teoritis pemadaman api berbasis kabut air, hasil penelitian berupa pengaruh tekanan dan bukaan nosel pada debit kabut air, kurva temperatur terhadap waktu dan analisis pengaruh parameter operasi sistem kabut api terhadap kinerjanya dalam memadamkan pool fire. Penelitian ini dapat membuktikan hipotesis bahwa air dalam bentuk kabut (water mist) dapat digunakan untuk memadamkan kebakaran minyak.

Kata kunci: Teknik Keselamatan Kebakaran (Fire Safety Engineering), Pool Fires, Sistem Kabut Air (Water mist sistem).

1. Pendahuluan

Api, sebagai hasil proses pembakaran (*combustion*), merupakan reaksi kimia yang sangat kompleks antara bahan bakar, oksigen dari udara dan sumber panas. Apabila api terjadi secara tidak terkendali, maka dapat terjadi bahaya kebakaran (*fire*), dengan resiko kerusakan yang hebat pada material, properti, lingkungan dan terjadinya korban manusia [Ramachandran, 1998]. Terus tumbuhnya gedung-gedung bertingkat untuk perkantoran dan tempat tinggal, serta sentra-sentra industri proses/manufaktur dengan investasi yang besar, mendorong perlunya peningkatan pengetahuan yang bersifat menyeluruh mengenai keselamatan kebakaran (*fire safety*), baik dari sisi fenomena kebakaran bangunan, pengukuran berbagai sifat bahan bangunan terhadap api secara komprehensif, maupun proteksi kebakaran yang efektif.

Tahapan pertumbuhan api dalam ruang tertutup (*enclosed fire*), umumnya terdiri dari beberapa tahapan, yaitu [Drysdale, D., 2003]: (a) tahap induksi panas / incipient stage, (b) tahap penyalaan / ignition, (c) tahap pertumbuhan / fire growth dan (d) tahap flash over. Pada kasus kebakaran ini, tercapainya kondisi api kembang penuh (kondisi yang sangat membahayakan penghuni dan isi bangunan lainnya) tercapai dalam waktu kurang dari 10 menit. Dengan demikian upaya penanganan dan pemadaman api pada tahap induksi panas dan tahap penyalaan awal (Tahap a dan b) menjadi kunci bagi pencegahan terjadinya kondisi (c dan d) [Nugroho, YS, dkk., 2006].

Berdasarkan jenis material yang terbakar, maka kebakaran umumnya dapat diklasifikasikan ke dalam 5 kelas, yaitu (a) Kelas A : bahan mampu bakar umum, seperti kertas, kayu ; (b) Kelas B : bahan bakar cairan dan gas; (c) Kelas C : peralatan listrik; (d) Kelas D : metal reaktif ; dan (e) Kelas K : minyak goreng (cooking oil). Salah satu permasalahan dalam upaya pemadaman kebakaran adalah kesesuaian bahan kimia dengan kelas kebakaran / jenis api yang akan dipadamkan. Di masa lalu, bahan kimia berbasis Halon digunakan secara luas, namun kesadaran akan potensi Halon dalam merusak lapisan Ozon telah mendorong pelarangan penggunaan Halon (Montreal Protocol) [DiNenno, P J, 2002]

Air telah dikenal sebagai media pemadaman api melalui mekanisme pendinginan yang efektif. Namun demikian, penggunaan air dalam alat pemadam api konvensional untuk pemadaman api yang berasal dari kebakaran minyak (Api Kelas B) atau listrik (Api Kelas C) perlu dihindari karena dapat menimbulkan letupan atau berpotensi menimbulkan kerusakan peralatan listrik. Potensi letupan atau kerusakan peralatan listrik akibat penggunaan air, dapat dikurangi atau dihilangkan apabila air digunakan pada diameter air yang sangat kecil. Ukuran air perlu dikurangi dari butiran (droplet)

menjadi kabut (mist). Kabut air (water mist) dalam pengertian bidang proteksi kebakaran seringkali dipahami sebagai sprai air berukuran halus dengan diameter butiran tidak lebih dari 1,0 mm atau 1000 mm [Mawhinney, J.R dan Gerard G. Back III, 2002]. Penggunaan sistem kabut air (water mist system) dapat menjadi salah satu alternative pengganti Halon dalam proteksi kebakaran.

Makalah ini mempresentasikan hasil pengembangan sistem kabut air (*water mist system*) bertekanan rendah (2 s.d. 6 bar) untuk memadamkan kebakaran minyak (Api kelas B) dalam bentuk kolam api (*pool fire*). Penelitian ini juga membuktikan hipotesis bahwa air dalam bentuk kabut (water mist) dapat digunakan untuk memadamkan kebakaran minyak.

2. Teori

2. 1. Pool fires (Kolam Api)

Pool fire adalah nyala difusi turbulen yang terjadi pada permukaan bahan bakar cair yang menguap dengan momentum awal yang rendah. *Pool fire* dapat bersifat statik/ diam atau bergerak (*running fire*). *Pool fire* merupakan resiko yang signifikan pada instalasi lepas pantai dengan inventori hydrogen cair yang banyak, maupun pada kebakaran dapur (*kitchen fire*) yang melibatkan terbakarnya minyak goreng akibat kelebihan kalor. Bentuk nyala pembakaran pada *pool fire* dapat dibagi menjadi 3 regime yang bergantung pada diameter api. Jika diameter api kurang dari 0,03 m, nyala yang terbentuk bersifat laminar dengan laju pembakaran menurun dengan meningkatnya diameter api. Untuk diameter api yang besar ($D > 1\text{m}$), nyala bersifat turbulen dan laju pembakaran tidak lagi dipengaruhi oleh perubahan diameter api. Perilaku transisi antara kondisi laminar dan turbulen terjadi pada terjadi $0,03 < D < 1,0\text{ m}$ [Drysdale, 2003].

Secara umum laju pembakaran bahan bakar pada *pool fire* dapat dinyatakan sebagai [Drysdale, 2003]:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}_F - \dot{Q}_L}{L_v} \quad (\text{kg/m}^2.\text{s}) \quad (1)$$

dengan \dot{Q}_F adalah kalor yang diberikan oleh nyala (*flame*) (kW/m^2), \dot{Q}_L adalah kalor yang dilepaskan melalui permukaan bahan bakar (kW/m^2), dan L_v adalah kalor yang dibutuhkan untuk menghasilkan uap (kJ/g) atau untuk bahan bakar cair setara dengan kalor laten penguapannya.

Besarnya kalor yang diberikan oleh nyala \dot{Q}_F , merupakan penjumlahan kalor yang dikontribusikan oleh komponen perpindahan kalor konduksi, konveksi dan radiasi, sebagai berikut [Drysdale, 2003 dan]:

$$\dot{Q}_F = \dot{q}_{\text{konduksi}} + \dot{q}_{\text{konveksi}} + \dot{q}_{\text{radiasi}} \quad (2)$$

Untuk *pool fire* dengan diameter lebih besar dari 0,2 m, Zabetakis dan Burgess (1961) dalam [Drysdale, 2003] merekomendasikan besarnya laju pembakaran sebagai berikut:

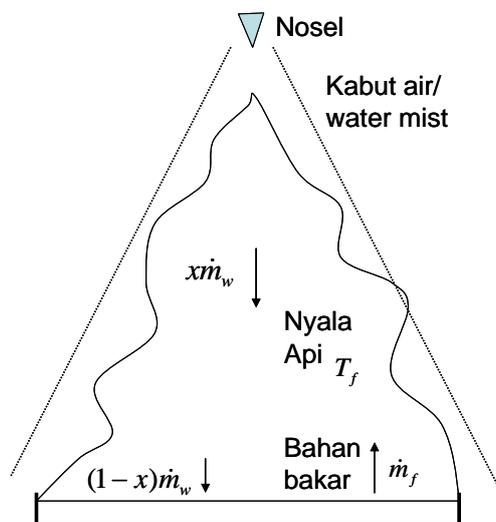
$$\dot{m}_f = \dot{m}_\infty (1 - \exp(-k\beta D)) \quad (3)$$

dengan \dot{m}_∞ adalah nilai batas laju pembakaran bahan bakar ($\text{kg/m}^2.\text{s}$), k adalah koefisiensi extinction (m^{-1}), β adalah faktor koreksi panjang gelombang rata-rata, dan D diameter *pool* (m).

2.2 Mekanisme Pemadaman Kolam Api (*Pool fires*) dengan Kabut Air

Ketika kabut air disemprotkan kedalam api, seperti pada Gambar 1, sebagian butiran air ($x\dot{m}_w$) tertahan di dalam nyala (*flame*) dan sisanya ($(1-x)\dot{m}_w$), menembus nyala dan mencapai permukaan pembakaran. Butiran air yang tertahan tersebut menyerap kalor dari nyala dan kalor yang

dilepaskan dari pembakaran bahan bakar digunakan untuk memanaskan campuran udara-bahan bakar dan butiran air.



Gambar 1. Interaksi antara nyala api dengan kabut air, diadaptasi dari Liu, Z, dkk (2005).

Api dapat dipadamkan apabila kabut air mampu mendinginkan zona reaksi hingga kondisi di bawah temperatur nyala adiabatika. Hal ini akan menghentikan reaksi pembakaran campuran udara bahan bakar. Api juga dapat dipadamkan, apabila laju suplay uap bahan bakar atau laju pembakaran dapat dikurangi akibat efek pendinginan, sehingga tidak tersedia uap bahan bakar yang memadai untuk menopang stabilitas nyala. Dengan demikian, pada saat pemadaman berlangsung dapat disusun kesetimbangan energi antara laju pelepasan kalor bahan bakar dan kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan air dan campuran gas hingga temperature nyala adibatika, T_{fl} , sebagai berikut [Liu, Z, dkk., 2005]:

$$\dot{m}_f \Delta H_c = x \dot{m}_w (L_{vw} + C_{pwL} (373 - T_w) + C_{pww} (T_{fl} - 373)) + \dot{m}_f (C_{pf} (T_{fl} - T_{fo}) + \phi C_{pf} (T_{fl} - T_{ao}) + L_{vf}) \quad (4)$$

Pemadaman kolam api dapat juga terjadi apabila kabut air mencapai permukaan cairan yang sedang terbakar dan mendinginkannya hingga lebih rendah dari titik nyalanya. Temperatur cairan yang lebih rendah menyebabkan uap bahan bakar yang dihasilkan tidak memadai untuk menopang terjadinya nyala.

$$f_c \Delta H_c \dot{m}_f + \dot{Q}_E = L_{vf} \dot{m}_f + \dot{Q}_L \quad (5)$$

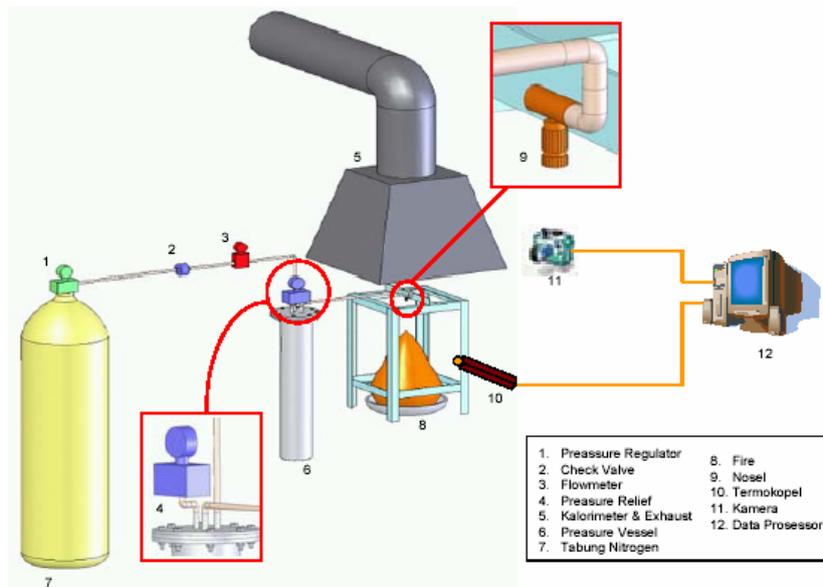
Persamaan di atas menunjukkan kesetimbangan antara fraksi kalor yang dipindahkan dari nyala api ke permukaan cairan bahan bakar, dan laju kalor eksternal yang dipindahkan ke bahan bakar (\dot{Q}_E) terhadap energi yang dibutuhkan untuk penguapan bahan bakar dan laju kalor yang hilang dari bahan bakar, baik secara radiasi, konduksi ke dalam bahan bakar, maupun ke butiran kabut air (\dot{Q}_L). Dengan mengabaikan besarnya \dot{Q}_E , Persamaan di atas dapat disusun menjadi [Liu, Z, dkk., 2005]:

$$S = (f_c \Delta H_c - L_{vf}) \dot{m}_f - (1-x) \dot{m}_w (L_{vw} + C_{pwL} (373 - T_w)) \quad (6)$$

Apabila $S \geq 0$, maka tersedia kalor yang memadai untuk terjadinya nyala di permukaan bahan bakar. Jika $S < 0$, maka tidak tersedia kalor yang memadai untuk menghasilkan uap bahan bakar, sehingga nyala api akan padam.

3. Eksperimental

Peralatan riset yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2. Kabut air (*water mist*) dihasilkan melalui sebuah nosel (9) yang menerima air bertekanan dari bejana tekan (6) terhubung dengan tabung nitrogen (7). Peralatan eksperimen ini dilengkapi berbagai peralatan keselamatan dan pengendali proses (1 s.d. 5). Untuk memudahkan pengolahan data, maka berbagai informasi penting yaitu citra yang dihasilkan, waktu dan temperature direkam secara bersamaan melalui sebuah computer personal (10-12). Pada penelitian ini digunakan bahan bakar bensin (iso oktana) yang ditempatkan pada sebuah wadah terbuka berdiameter 50 mm. Pada saat pengujian, kabut air yang dihasilkan dengan variasi tekanan 2 s.d. 6 bar disemprotkan ke nyala api bensin (berupa *pool fire*) dari ketinggian 50 cm.

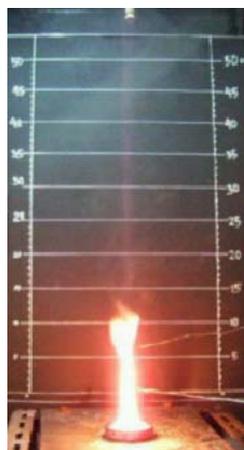


Gambar 2 Skematika peralatan riset yang akan digunakan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Karakteristik Kolam Api (*Pool fire*)

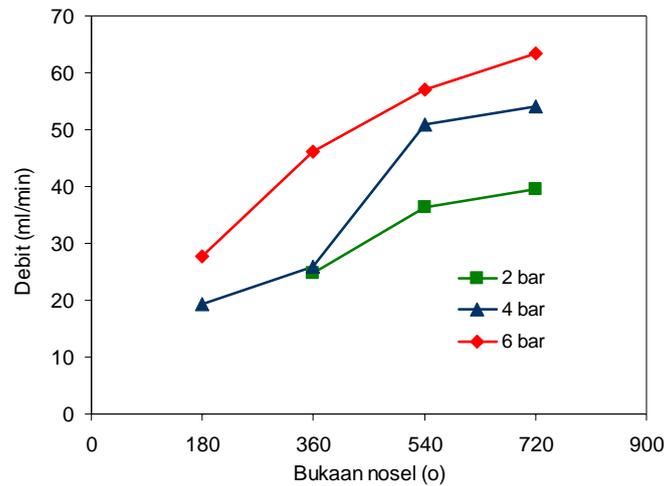
Pada wadah *pool fire* berdiameter 50 mm diberikan bahan bakar bensin sebanyak 2 ml. Setelah dinyalakan akan terbentuk nyala api dengan ketinggian 15 s.d. 20 cm yang mampu bertahan selama kurang lebih 2 menit.



Gambar 3. Bentuk nyala api dalam *pool fire* dengan diameter wadah 50 mm.

4.2. Karakteristik Kabut Air (*Water mist*)

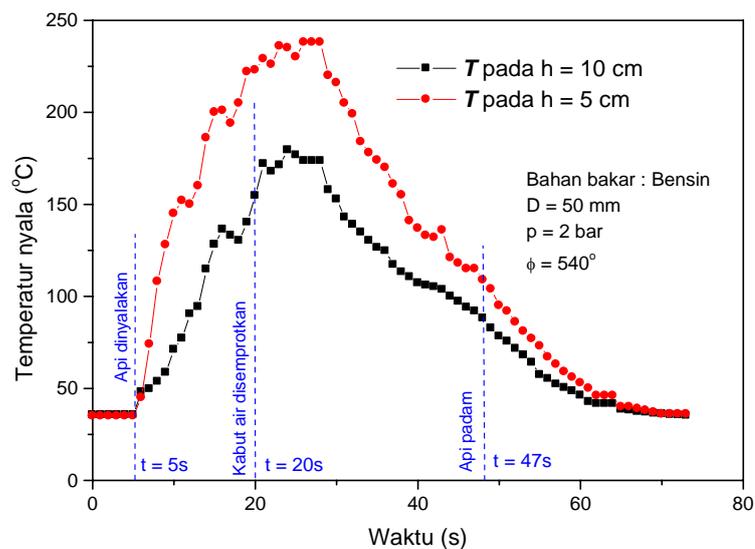
Peralatan eksperimental yang digunakan memungkinkan dilakukannya variasi terhadap tekanan maupun bukaan nosel ($^{\circ}$). Gambar 4 memperlihatkan pengaruh tekanan dan bukaan nosel pada debit kabut air yang dihasilkan. Tampak bahwa secara konsisten debit kabut air yang terukur meningkat sejalan dengan peningkatan tekanan air maupun bukaan nosel. Pada batasan tekanan rendah (2 s.d. 6 bar) pengaruh tekanan lebih signifikan dibandingkan dengan sudut bukaan nosel. Pengaruh sudut bukaan nosel terhadap debit kabut air cenderung berkurang dan menuju nilai asimtotik pada bukaan yang lebih besar.



Gambar 4. Pengaruh sudut bukaan nosel ($^{\circ}$) pada debit kabut air yang dihasilkan, untuk tekanan air 2 s.d. 6 bar.

4.3. Karakteristik Pemadaman Api (*Pool fire*)

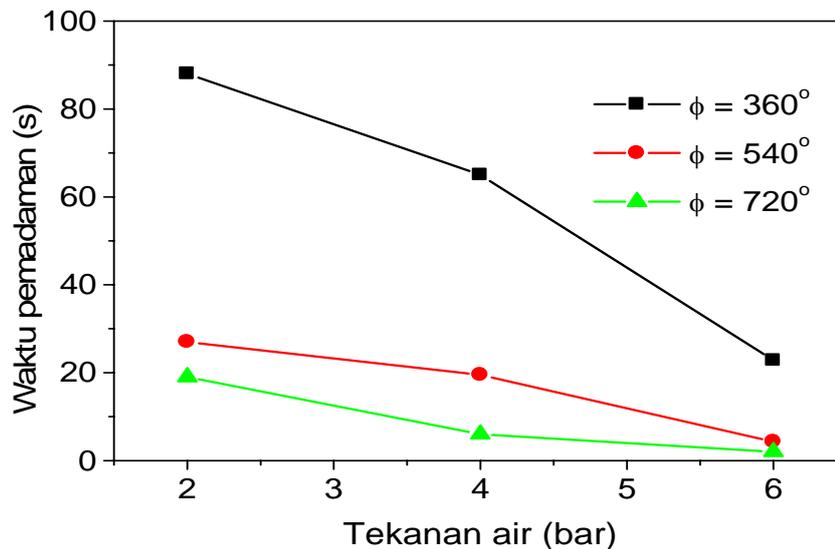
Gambar 4. memperlihatkan tahapan pelaksanaan eksperimental, yang ditunjukkan oleh kurva temperatur terhadap waktu pada setiap tahapannya. Secara garis besar, Gambar 4 dapat dibagi menjadi 3 tahapan, yaitu (i) tahapan penyalaan api, (ii) tahapan penyemprotan kabut air, dan (iii) tahapan pemadaman api.



Gambar 4. Evolusi temperatur nyala api dan interaksinya dengan kabut air.

Temperatur nyala yang diukur pada ketinggian 5 cm dan 10 cm dari permukaan cairan bahan bakar, dapat mencapai temperatur yang tinggi 225°C (Gambar 4). Temperatur ini masih lebih rendah dari hasil pengujian pada skala besar, seperti yang telah dilaporkan dalam literatur [Liu, Z, dkk., 2005]. Setelah api berkembang penuh, maka dilakukan penyemprotan kabut air pada detik ke-20 s. Dari data pengukuran temperatur tampak hal yang menarik, dimana penyemprotan kabut air diikuti oleh peningkatan temperatur nyala sebesar 20°C . Momentum yang diberikan oleh semprotan kabut air berpotensi untuk meningkatkan konveksi kalor antara nyala api dengan uap bahan bakar [Liu, Z., dkk., 2007]. Setelah temperatur nyala api mengalami peningkatan sesaat, kabut air yang disemprotkan dapat secara cepat menurunkan temperatur nyala, hingga api padam pada $t = 47$ s. Temperatur udara di atas kolam api terus turun mendekati temperatur ruang, beberapa saat kemudian. Dengan demikian, untuk kondisi di atas waktu pemadaman api adalah 27 s.

Hasil eksperimental untuk beberapa kondisi lainnya dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Tampak bahwa tekanan memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap penurunan waktu pemadaman api. Bukaan nosel hanya memberikan kontribusi yang signifikan pada bukaan nosel yang kecil. Hal ini dapat dipahami karena pada bukaan nosel yang kecil sebagian besar tekanan air dipergunakan untuk mengatasi tegangan pegas dan hambatan aliran dalam nosel. Pada tekanan 6 bar dan bukaan nosel 720° , *pool fire* berdiameter 50 mm dapat dipadamkan dalam waktu 2 s setelah kabut air disemprotkan.



Gambar 5. Pengaruh tekanan air dan bukaan nosel pada waktu pemadaman *pool fire*.

5. Kesimpulan

Penelitian ini dapat membuktikan hipotesis bahwa sistem kabut air (*water mist system*) dapat secara efektif digunakan untuk memadamkan kebakaran minyak berbentuk kolam api (*pool fires*). Parameter operasi seperti tekanan air dan sudut bukaan nosel memberikan pengaruh yang signifikan pada karakteristik spray kabut air. Waktu pemadaman api dapat dikurangi dengan meningkatkan tekanan air dan sudut bukaan nosel.

Ucapan Terima Kasih

Dr. Yulianto S Nugroho dan anggota Tim Penelitian mengucapkan terima kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) Universitas Indonesia yang telah memungkinkan penelitian ini dilaksanakan, melalui Hibah Penelitian Riset Unggulan Universitas Indonesia (RUUI) tahun 2007.

Daftar Pustaka

1. Ramachandran (1998), G., *The economics of fire protection*, E & FN Spon, London, 1998.
2. Drysdale, D. (2003), *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, John Wiley & Sons, 2003.
3. Nugroho, YS, Soesanto, dan E. Puspiartono (2006), *Effect of Sample Orientation and Thickness on Piloted Ignition of Timber*, *Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Jakarta, 2006.
4. DiNenno, P J (2002), *Halon Replacement Clean Agent Total Flooding Syatems*, Chapter 7, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, pp. 4-173 – 4-200.
5. Mawhinney, J.R and Gerard G. Back III (2002), *Water Mist Fire Suppression Systems*, Chapter 14 *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition, pp. 4-311-4-337.
6. Liu, Z, Carpenter, D., dan Kim, A.K. (2005), *Application of Water Mist to Extinguish Large Oil Pool Fires for Industrial Oil Cooker Protection*, 8th International Symposium on Fire Safety Science, Beijing, China, pp. 1-12.
7. Liu, Z, Kim, A.K., dan Carpenter, D. (2007), *A study of portable water mist fire extinguishers used for extinguishment of multiple fire types*, *Fire Safety Journal* 42 (2007) 25–42.