



**EFISIENSI PEMBAKARAN NYALA TURBULEN TAK-PRACAMPUR
YANG DIPENGARUHI ANGIN SILANG DAN PENAMBAHAN STEAM**

Wusnah¹, Yazid Bindar²

¹Chemical Engineering Dept., University of Malikussaleh, Lhokseumawe,
Indonesia.

²Energy and Processing System of Chemical Engineering Dept., Faculty of
Industrial Technology, Bandung Institute of Technology, Bandung.
Email : wusnah@yahoo.com

Abstrak

Artikel ini memaparkan hasil yang diperoleh dari dinamika fluida komputasi (DFK) untuk mensimulasi nyala turbulen tak pra-campur. Konfigurasi, diskretisasi dan kondisi batas nyala digambarkan menggunakan perangkat lunak pra-processor Gambit dan kalkulasi turbulensi dan pembakaran menggunakan perangkat lunak Fluent. Penelitian ini memfokuskan pada kajian pengaruh berbagai kecepatan angin silang dan penambahan steam terhadap karakteristik nyala hidrokarbon dan pengaruhnya terhadap efisiensi pembakaran yang dihasilkan. Model turbulensi yang digunakan pada penelitian ini adalah model k-standard dan model pembakaran Eddy Dissipasi. Kajian dilakukan pada berbagai kecepatan angin silang yaitu 3,77 m/s, 7,5 m/s dan 10 m/s dan ratio steam terhadap bahan bakar 0,14, 0,25, dan 2,35 serta dilakukan pada kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s. Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk kontur temperatur dari berbagai kecepatan angin silang dan penambahan steam. Dari kontur tersebut terlihat bahwa besarnya nilai S yang diberikan pada berbagai kecepatan angin sangat mempengaruhi terhadap temperatur pembakaran yang dihasilkan, dimana dari hasil kontur tersebut dapat diketahui bahwa temperatur nyala menurun seiring peningkatan jumlah steam yang diberikan di dalam aliran bahan bakar, dan hal tersebut secara nyata terlihat pada nilai S yang besar (2,35). Efisiensi pembakaran pada berbagai kecepatan angin silang semakin menurun seiring bertambahnya ratio steam terhadap bahan bakar.

Kata kunci: simulasi, nyala turbulente tak-pracampur, angin silang, steam, pembakaran

1. Pendahuluan

Peristiwa pembakaran merupakan kejadian yang sangat kompleks yang melibatkan interaksi antara peristiwa fisika dan kimia. Hampir seluruh sistem pembakaran pada berbagai peralatan seperti mesin pembakaran dalam, roket, mesin pesawat terbang, dapur pembakaran dan cerobong di industri dilaksanakan

dalam suasana turbulen, dengan tujuan meningkatkan laju pembakaran. Namun demikian, mengingat kajian secara eksperimental dan analitik sulit dilakukan karena tingkat kompleksitas pengukuran dan penyelesaian analitik, pemodelan secara numerik menggunakan dinamika fluida komputasi merupakan salah satu alternatif penelitian masalah pembakaran. Ini tidak berarti persoalan dapat dijalankan tanpa tantangan, karena pada hakikatnya tanpa kehadiran turbulensi, pembakaran itu sendiri merupakan peristiwa yang cukup kompleks. Kompleksitas lain muncul dari turbulen itu sendiri karena kehadiran skala panjang dan waktu di dalam aliran tak-bereaksi yang sampai saat ini pun belum dapat digambarkan secara rinci oleh komputer super-cepat sekalipun.

Karakteristik nyala cerobong pada kondisi atmosfer stabil (tenang) sangat berbeda dengan pada saat atmosfer berangin. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa angin dengan kecepatan tinggi pada permukaan cerobong dapat menurunkan efisiensi pembakaran. Selain itu nyala akan menekuk ke arah angin dengan ukuran nyala yang semakin kecil sehingga oksigen yang terdifusi ke dalam nyala semakin sedikit (Fairweather dkk, 1992; Sinai, 1994; dan Johnson, 2000). Dengan berkurangnya pasokan udara ke dalam nyala, dengan sendirinya pembakaran berjalan secara tidak sempurna dan menghasilkan lebih banyak polutan yang tidak diinginkan.

Efisiensi suatu nyala dianggap sama dengan efisiensi pembakaran. Besarnya fraksi CO₂ total yang terbakar dinyatakan sebagai efisiensi pembakaran nyala, dan hal tersebut sangat dipengaruhi oleh berbagai kondisi operasi dan kondisi desain. Efisiensi nyala dan emisi gas kadang kala berubah-ubah yang disebabkan oleh adanya perbedaan kondisi. Salah satu kondisi operasi tersebut adalah adanya perubahan kecepatan angin. Secara umum diketahui nyala cerobong memiliki efisiensi pembakaran >95%. Namun dampak pengaruh kecepatan angin terhadap efisiensi nyala cerobong dan emisi yang dihasilkan sampai saat ini masih dalam kajian para peneliti, baik secara eksperimental maupun komputasional. Penelitian yang dilakukan Johnson dan Kastiuk (2000) menunjukkan bahwa efisiensi pembakaran nyala cerobong sangat bergantung

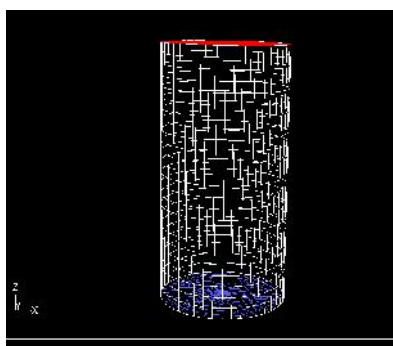
kepada kecepatan angin di permukaan cerobong tersebut. Penurunan efisiensi pembakaran dapat dihambat dengan meningkatkan kecepatan bahan bakar keluaran, dimana penelitian mereka ini merupakan hasil kajian secara eksperimental pada cerobong dengan diameter 37,2 mm.

Penelitian oleh Pohl dkk (1986) dilakukan dengan membakar bahan bakar gas hidrokarbon dan dikeluarkan melalui lubang vertikal dengan diameter 0,076 dan 0,305 m. Hasil pembakaran seluruhnya dikumpulkan, diambil contoh dan dilakukan analisa untuk menentukan efisiensi pembakaran. Mereka menyimpulkan bahwa jika nyala api stabil (yang merupakan pengaruh kecepatan keluar dan nilai bakar dari bahan bakar gas), efisiensi dapat lebih besar dari 98%. Peneliti lain mengungkapkan pengaruh angin yang tegak lurus terhadap pancaran bahan bakar sebagai parameter lainnya (Kuipers dkk, 1996; Bandaru dan Turns, 2000; Johnson dan Kostiuk, 2000). Mereka menyatakan pengaruh angin silang dengan rentang 1 sampai 15 m/s dapat mengurangi efisiensi pembakaran secara signifikan. Dari penelitian Wusnah (2011) diketahui bahwa kecepatan angin sangat mempengaruhi terhadap struktur nyala api flare yang dihasilkan dimana hal ini juga mempengaruhi terhadap hasil pembakaran yang dilepaskan ke atmosfer, Fokus penelitian ini adalah penggunaan model matematika untuk melihat pengaruh angin silang dan penambahan steam terhadap pembakaran nyala hidrokarbon dengan model komputasi fluida dinamik. Dari penelitian ini akan diketahui pengaruh berbagai kecepatan angin dan penambahan steam terhadap efisiensi nyala yang dihasilkan.

2. Metode penelitian

Penelitian ini dimulai dengan tahapan penggambaran geometri diikuti dengan simulasi turbulen dan pembakaran. Penggambaran geometri pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Gambit (*Geometri and Mesh Buiding Intelligent Toolkit*). Prosedur yang dilakukan untuk menggambar geometri yaitu dimulai dengan menggambar silinder dalam tiga dimensi untuk nozel dan domain, diikuti dengan proses meshing atau membagi obyek menjadi bagian-bagian kecil agar dapat dilakukan analisis pada progam

dinamika fluida komputasi. Pendefinisian kondisi batas dilakukan sebagai *velocity inlet*, *pressure outlet*, *wall* dan *interior*. Gambar 1 menunjukkan geometri tiga dimensi domain nyala A yang telah didiskretisasi.



Gambar 1. Geometri tiga dimensi domain nyala A yang telah terdiskretisasi

Kalkulasi medan alir dilakukan menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2.16 (Fluent. Inc, 2005) yang berfungsi sebagai prosesor sekaligus post-prosesor, dengan bervariasi berbagai kecepatan angin silang dan penambahan steam dengan karakteristik nyala seperti tercantum pada tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik nyala

Nyala B	Propane Jet Flame
Komposisi Bahan Bakar	Propane 100%
Kecepatan Bahan Bakar	20 m/s (Re 8800)
Diameter Nozel	2 mm
Diameter Domain	0.7 m

Sumber: Tsue (2000)

Kalkulasi medan alir akan dilakukan dengan menggunakan model turbulen *k-ε* standar sementara model pembakaran digunakan model Eddy Dissipasi. Pada bagian ini perlakuan dijalankan dengan kecepatan angin yang divariasikan dari 3,77 m/s, 7,5 m/s dan 10 m/s dan perbandingan penambahan steam/bahan bakar (S) 0,14, 0,25, dan 2,35.

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Pengaruh penambahan steam pada berbagai kondisi angin silang

Fraksi massa spesies yang berada dalam aliran bahan bakar untuk berbagai nilai S (perbandingan steam terhadap bahan bakar) seperti tercantum pada Tabel 2. di bawah ini.

Tabel 2. Fraksi Massa Spesies Aliran Bahan Bakar Untuk Berbagai Nilai S

No	S	$X_{C_3H_8}$	X_{N_2}	X_{H_2O}
1	0	1	0	0
2	0,14	0,8	0,09	0,112
3	0,25	0,72	0,1	0,18
4	0,35	0,6	0,19	0,21
5	2,35	0,18	0,39	0,423

Efisiensi pembakaran merupakan laju alir massa karbon dalam bentuk CO_2 yang dihasilkan nyala dibagi dengan laju alir massa karbon yang ada di dalam bahan bakar seperti terlihat pada persamaan 1 di bawah ini.

$$\eta = \frac{\text{laju alir massa karbon dalam } CO_2 \text{ yang dihasilkan nyala}}{\text{laju alir massa karbon dalam } C_xH_x \text{ pada aliran bahan bakar}} \quad (1)$$

Tabel 3. Laju Massa Spesies (10^{-5} kg/s) dan Hasil Perhitungan Efisiensi pada Kecepatan Angin Silang 3,77 m/s

Kecepatan Angin Silang (m/s)	S	C_3H_8 in	CO_2 out	
3,77	0,14	9,8	9,7	99,3
	0,25	8,1	7,3	92,1
	2,35	3,7	1,2	34

Pada kecepatan angin silang 3,77 m/s terlihat dari hasil perhitungan efisiensi pembakaran terus mengalami penurunan seiring bertambahnya

penambahan steam. Efisiensi pembakaran terjadi penurunan yang signifikan untuk nilai S 2,35 karena pada kecepatan angin silang 3,77 m/s tidak dapat mengimbangi banyaknya steam dalam aliran bahan bakar yang menyebabkan tidak berlangsungnya pembakaran secara sempurna sehingga menyebabkan efisiensi pembakaran menurun. Penurunan efisiensi pembakaran mengindikasikan terjadinya pembakaran secara tidak sempurna yang diakibatkan oleh berkurangnya suplai O₂ pada proses pembakaran tersebut.

Tabel 3. Laju Massa Spesies (10⁻⁵ kg/s) dan Hasil Perhitungan Efisiensi pada Kecepatan Angin Silang 7,5 m/s

Kecepatan Angin Silang (m/s)	S	C ₃ H _{8 in}	CO _{2 out}	η
7,5	0,14	5,9	5,8	98,3
	0,25	5,1	4,9	96
	2,35	2,1	0,4	0.19

Efisiensi pembakaran pada kecepatan angin silang 7,5 m/s terlihat pada tabel 3 diatas, penambahan steam (S) sampai 0,25 masih dapat dilakukan karena tidak terjadi penurunan efisiensi yang besar tetapi pada nilai S 2,35 tidak dapat ditolerir karena kecilnya efisiensi pembakaran yang dihasilkan, namun pada kecepatan angin silang 10 m/s, penambahan steam sangat tidak efektif diberikan karena terlihat dari efisiensi pembakaran yang diperoleh tidak menunjukkan nilai efisiensi pembakaran yang diperbolehkan untuk nyala api flare yaitu diatas 95%, hal itu disebabkan pada kecepatan bahan bakar yang diberikan 20 m/s tidak mampu mengimbangi kecepatan angin silang 10 m/s sehingga proses pembakaran berlangsung tidak sempurna.

Tabel 4. Laju Massa Spesies (10⁻⁵ kg/s) dan Hasil Perhitungan Efisiensi pada Kecepatan Angin Silang 10 m/s

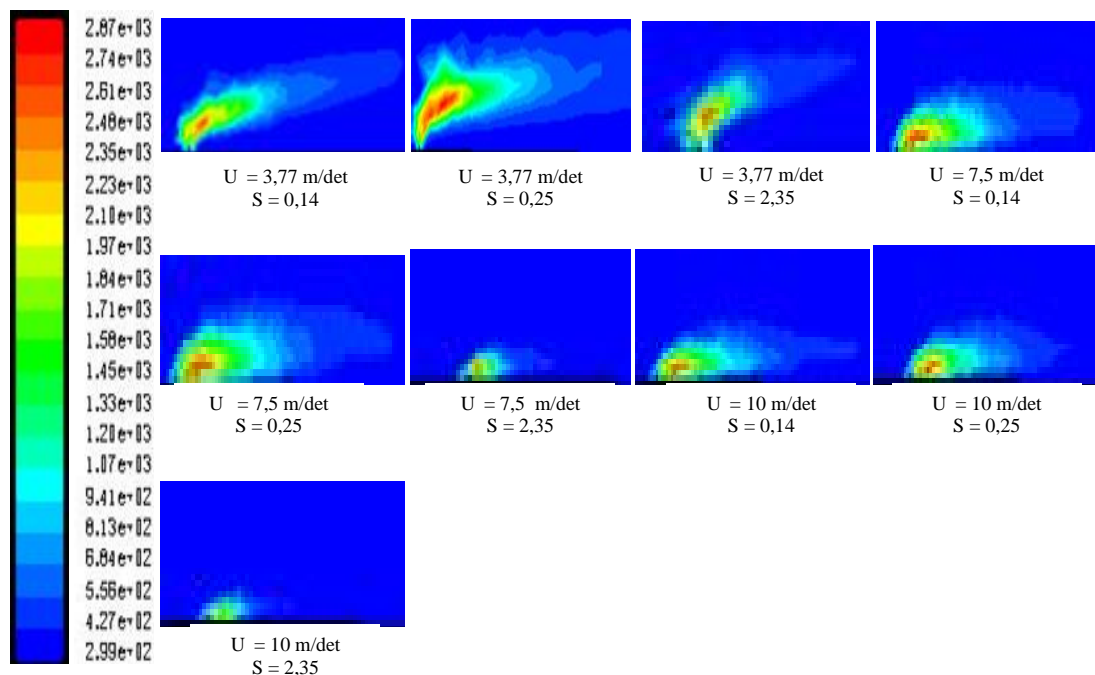
Kecepatan Angin Silang (m/s)	S	C ₃ H _{8 in}	CO _{2 out}	
10	0,14	4,7	3,8	81,4
	0,25	3,8	1,9	31,7
	2,35	0,8	0,07	0,09

Kecepatan angin silang sangat mempengaruhi efisiensi pembakaran, hal tersebut terlihat dari hasil perhitungan efisiensi pembakaran semakin tinggi kecepatan angin silang efisiensi pembakaran juga mengalami penurunan hal tersebut disebabkan oleh pada kecepatan angin silang yang tinggi sebagian bahan bakar belum terbakar sempurna namun telah terbawa angin, dan hal tersebut juga sangat dipengaruhi oleh besarnya kecepatan bahan bakar yang diberikan untuk melawan pengaruh dari angin silang tersebut, namun pada penelitian ini kecepatan bahan bakar yang diberikan tetap yaitu 20 m/s. Sementara itu akibat adanya penambahan steam dalam aliran bahan bakar (S), juga sangat mempengaruhi terhadap hasil pembakaran yang dihasilkan, terlihat semakin besar nilai S efisiensi pembakaran mengalami penurunan, namun penurunan yang sangat signifikan terjadi pada kecepatan angin silang 10 m/s, pada nilai S 2,35 pembakaran berlangsung secara tidak sempurna terindikasi dari nilai efisiensi pembakaran yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan penambahan steam yang terlalu besar sangat tidak dianjurkan untuk pengoperasian flare. Areas, 2006 menyatakan pada kecepatan angin silang rendah (0 sampai 3 m/s) konversi bahan bakar menjadi CO₂ masih sangat baik (diatas 94%), tetapi efisiensi pembakaran menurun secara signifikan pada kecepatan angin silang diatas 3 m/s. Meningkatnya hidrokarbon yang tidak terbakar dan emisi CO teramati pada kecepatan angin silang yang terus meningkat dan nyala hampir padam pada kecepatan angin silang 10 m/s dan efisiensi juga sangat rendah yaitu 37,9%.

3.2. Kontur Temperatur

Gambar 2. menunjukkan kontur temperatur yang dihasilkan pada berbagai kecepatan angin dan pada berbagai variasi nilai S yang diberikan. Perbedaan warna pada gambar kontur menunjukkan perbedaan nilai temperatur yang dihasilkan oleh masing-masing nyala. Dari kontur tersebut terlihat bahwa besarnya nilai S yang diberikan pada berbagai kecepatan angin sangat mempengaruhi terhadap temperature pembakaran yang dihasilkan, dimana dari hasil kontur tersebut dapat diketahui bahwa temperatur nyala menurun seiring

peningkatan jumlah steam yang diberikan di dalam aliran bahan bakar, dan hal tersebut secara nyata terlihat pada nilai S yang besar (2,35). Pada nilai S yang besar nyala api dapat padam, sehingga hal tersebut mengakibatkan terlepasnya senyawa hidrokarbon ke atmosfer dan terindikasi juga dari kecilnya efisiensi yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut.



Gambar 2. Kontur Temperatur pada Berbagai Kecepatan Angin Silang dan Nilai S

4. Simpulan dan Saran

Efisiensi pembakaran yang menunjukkan karakteristik hasil pembakaran yang baik dan aman dilepaskan ke atmosfer diperoleh pada kecepatan angin silang 3,77 m/s dan perbandingan penambahan steam (S) 0,14. Besarnya nilai perbandingan penambahan steam (s) dapat menurunkan temperatur nyala. Penurunan temperatur nyala menyebabkan menurunnya efisiensi pembakaran.

Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan kajian untuk mengetahui pada kondisi kecepatan angin silang berapa mulai terjadi penurunan efisiensi pembakaran secara signifikan, dan perlu dilakukan juga kajian pengaruh dari

model pembakaran yang lain untuk simulasi untuk mengkaji efek kinetika dari proses pembakaran yang terjadi.

5. Daftar Pustaka

1. Areas, D. C., (2006), “A Computational Fluid Dynamic Simulation Model for Flare Analysis and Control”,. *Dissertation*, University of Texas.
2. Bandaru, R.V., dan Turns, S.R., (2000), “Turbulent Jet Flames in a Crossflow: Effects of Some Jet, Crossflow, and Pilot-Flame Parameters on Emissions”, *Combustion and Flame*, 121:137-151.
3. Crauford, N.L, Liew SK, dan Moss JB., (1985), “Experimental and numerical simulation of a buoyant fire”, *Combustion and Flame*, 61:55.
4. Fairweather, M., Jones, W.P., dan Lindstedt, R.P., (1992), “Prediction of Radiative Transper from a Turbulent Reacting Jet in a Cross-Wind”, *Combustion and Flame* 89: 45-63.
5. Fluent 6.2, (2005), “User’s Guide”. Fluent Inc.
6. Johnson, M.R., dan Kostiuk, L.W., (2000), “Efficiencies of Low-Momentum Jet Diffusion Flames in Crosswinds”, *Combustion and Flame*, 123:189–200.
7. Kuipers, E. W., Jarvis, B., Bullman, S. J., Cook, D. K., dan McHugh, D. R., (1996), “Combustion Efficiency of Natural Gas Nyalas; Effect of Wind Speed, Flow Rate and Pilots”, *Internal Report, Shell Research and Technology Thornton and British Gas Research Centre*.
8. Magnussen, B.F. dan Hjertager, (1976), “On Mathematical Models of Turbulen Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion”. In 16th Symp. (int’l) on Combustion, The Combustion Institute.
9. Meier, W., Barlow, R.S., Chen, Y.-L. dan Chen, J.-Y., (2000),” Raman/Rayleigh/LI F measurement in a turbulent CH₄/H₂/N₂ jet diffusion flame: experimental techniques and turbulence-chemistry interaction”. *Combustion and Flame*, 123:326-343.
10. Peters, N., (1984), “Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 10:319-339.

11. Pohl, J.H., Lee, J., dan Payne, R., (1986), “Combustion Efficiency of Flares”, *Combustion Science and Technology*, Vol.50, pp. 217-231.
12. Pope, S.B., (1997), “Computationally Efficient Implementation of Combustion Chemistry using In-situ Adaptive Tabulation”, *Combustion Theory and Modeling*, 1: 41-63.
13. Sinai, Y.L., dan Owens, M.,P., (1995), “Validation of CFD Modelling of Unconfined Pool Fires with Cross-Wind : Flame Geometry”, *Fire Safety Journal 1-34*.
14. Tamanini F., (1977), “Reaction rates, air entrainment and radiation in turbulence fire plumes”, *Combustion and Flame*, 30: 85-101.
15. Tsue, M., Kadota, T., dan Kono, M., (2000), “Detailed Measurements of the Structure of a Jet Diffusion Flame in a Cross Flow”, *Proceeding of the Combustion Institute*, Vol.28, 295-301.
16. Wusnah, (2011),”Simulasi Pengaruh Angin Silang Terhadap Karakteristik Nyala Hidrokarbon Turbulen Tak-Pracampur, *Tesis Magister Teknik Kimia Unsyiah*, B.Aceh.