



## KAJIAN PENGARUH ANGIN SILANG TERHADAP KARAKTERISTIK NYALA HIDROKARBON

Wusnah<sup>1</sup>, Novi Sylvia<sup>1</sup>, Yazid Bindar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chemical Engineering Dept., University of Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia

<sup>2</sup>Energy and Processing System of Chemical Engineering Dept., Faculty of  
Industrial Technology, Bandung Institute of Technology, Bandung.

### Abstrak

**Abstrak.** Artikel ini memaparkan hasil yang diperoleh dari kajian dinamika fluida komputasi (DFK) untuk mensimulasi nyala turbulen tak pra-campur akibat pengaruh angin silang. Konfigurasi, diskretisasi dan kondisi batas nyala digambarkan menggunakan perangkat lunak pra-processor Gambit. Pengaruh angin silang terhadap nyala hidrokarbon (nyala dengan pengaruh angin silang) dilakukan pada kondisi kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s dengan kecepatan angin berubah-ubah dan pada kondisi kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s dengan kecepatan bahan bakar berubah - ubah . Hasil penelitian dengan kondisi bahan bakar tetap menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan angin silang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap medan alir dan temperatur. Pada kajian dengan kondisi bahan bakar berubah - ubah ketika kecepatan angin silang tetap, terlihat bahwa peningkatan kecepatan bahan bakar memberikan dampak positif pada nyala, karena nyala semakin mampu melawan pengaruh angin silang terhadap nyala.

**Kata kunci:** simulasi, nyala turbulenta tak-pracampur, model turbulensi, angin silang

### I. Pendahuluan

Karakteristik nyala cerobong pada kondisi atmosfer stabil (tenang) sangat berbeda dengan pada saat atmosfer berangin. Berbagai penelitian (Fairweather dkk, 1992; Sinai, 1994; dan Johnson, 2000) 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. Dengan berkurangnya pasokan udara ke dalam nyala, dengan sendirinya pembakaran berjalan secara tidak sempurna dan menghasilkan lebih banyak polutan yang tidak diinginkan.

Banyak kajian menunjukkan bahwa angin silang dapat menurunkan efisiensi pembakaran walaupun tidak dapat dipungkiri bahwa hal tersebut didasarkan sebatas pada kajian berdasarkan parameter – parameter uji seperti kecepatan angin, komposisi gas, laju alir gas, dan kandungan hidrokarbon cair yang terikut tidak diketahui. Berdasarkan pemahaman mengenai mekanisme pembakaran dan struktur dalam beberapa nyala dapat menjadi petunjuk untuk meningkatkan efisiensi termal sehingga dapat mengurangi emisi dari polutan yang tidak diinginkan yang berasal dari hasil pembakaran gas buang suatu industri.

Kajian mengenai pancaran turbulen tanpa terjadinya pembakaran yang dipengaruhi angin silang diantaranya dilakukan oleh Kamotami dan Greber (1972). Mereka mengukur profil kecepatan dan menyatakan bahwa struktur pancaran didominasi oleh *double vortex* yang terbentuk dibelakang pancaran, Patankar dkk (1977) memprediksi profil kecepatan menggunakan analisis tiga dimensi, Flack dkk (1994) mendapatkan informasi yang lebih terperinci mengenai daerah pencampuran pada pancaran yang dipengaruhi angin silang. Pembakaran yang terjadi pada pancaran nyala yang dipengaruhi angin silang lebih rumit karena hal tersebut menyebabkan kombinasi karakteristik dari pancaran dan reaksi kimia. Pada bab ini akan dibahas analisis pengaruh angin silang terhadap nyala propana yang dilakukan dengan perangkat lunak Fluent. Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk kontur medan alir, temperature dan konsentrasi spesies. Penelitian ini dilakukan untuk menggambarkan peristiwa angin silang pada cerobong secara simulasi numerik. Penelitian ini dilaksanakan dengan dua variasi yaitu dengan mengubah berbagai kecepatan angin silang pada kecepatan keluaran bahan bakar tetap 20 m/s dan perubahan berbagai kecepatan bahan bakar keluaran pada kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s.

## II. Aspek Angin Silang

Nyala industri merupakan suatu system pembakaran terbuka sehingga sangat memungkinkan dipengaruhi kondisi cuaca, yang akan berdampak pada besar kecilnya nyala api dan berdampak pula terhadap efisiensi nyala untuk membakar gas buang. Salah satu yang mempengaruhi efisiensi nyala tersebut adalah kecepatan angin. Bila nyala api lebih kecil dari akuran optimal, nyala tidak dapat membakar secara efisien. Akibatnya hanya sedikit polutan-polutan yang dapat diuraikan apabila dibandingkan dengan kondisi stabil tanpa pengaruh angin silang, maka diperoleh efisiensi sebesar 98 – 99%. Polutan yang tidak terbakar akan dilepaskan ke udara dan memenuhi emisi standar yang diperbolehkan karena pembakaran berlangsung secara efisien, (Areas, 2006).

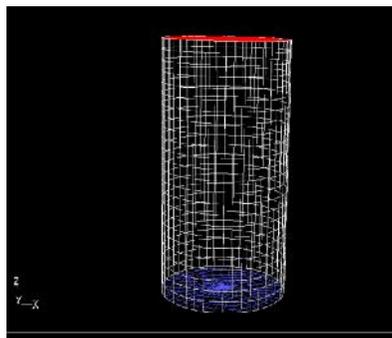
Hasil publikasi mengenai efisiensi pembakaran nyala api pancaran dalam lingkungan masih relatif sedikit. Penelitian oleh Pohl dkk (1986) dilakukan dengan membakar bahan bakar gas hidrokarbon dan dikeluarkan melalui lubang vertikal dengan diameter 0,076 dan 0,305 m. Hasil pembakaran seluruhnya dikumpulkan, 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 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. Pada penelitian yang dilakukan Enviromental Integrity Project, (2000) menunjukkan efisiensi pembakaran beberapa nyala industri dapat mengalami penurunan tajam dengan naiknya kecepatan angin silang dari 1 sampai 6 m/s. Maka dari penelitian ini, berdasarkan pertimbangan teori dan hasil observasi disimpulkan bahwa efisiensi pembakaran nyala dapat berkisar pada rentang 70% untuk kecepatan angin lambat. Dan dapat menjadi lebih kecil lagi bila kecepatan angin tinggi. Apalagi tinggi nyala cerobong biasanya antara 10 sampai 100 meter. Kecepatan angin di dekat nyala api (dilokasi ujung nyala) biasanya lebih kencang dibandingkan kecepatan di permukaan.

Ada beberapa hal yang menyebabkan pembakaran menjadi tidak sempurna, misalnya yang terjadi pada nyala api yang dipengaruhi oleh angin silang yang menyebabkan ukuran nyala api mengecil, efisiensi nyala api juga menurun karena lebih banyak udara yang masuk ke dalam nyala api yang besar dibandingkan nyala api yang kecil dan konsekuensinya lebih banyak oksigen yang tersedia sehingga lebih banyak panas yang dapat hilang dari nyala api yang besar, maka efisiensi pembakaran lebih besar pada nyala besar. Penelitian Johnson dan Kostiuk (2000) menyatakan bahwa nyala api yang dipengaruhi kondisi angin dapat menghilangkan partikel dari aliran bahan bakar sebelum berlangsungnya reaksi pembakaran. Hal ini dibuktikan dari hasil analisa komposisi gas di terowongan angin yang menunjukkan adanya hidrokarbon yang tidak terbakar yang sama dengan bahan bakar. Oleh karena itu sangat penting untuk melakukan analisa kuantitatif pengaruh angin silang terhadap nyala industri dan pengaruhnya terhadap efisiensi pembakaran.

### III. KALKULASI MEDAN ALIR DAN PEMBAKARAN

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 program dinamika fluida komputasi.. Gambar 3.1 menunjukkan konfigurasi geometri domain yang dilakukan dengan menggunakan Gambit dimana nozzle berada di bagian bawah dari domain.



Gambar 3.1 Geometri tiga dimensi domain nyala yang telah terdiskretisasi

Kalkulasi medan alir dilakukan dengan menggunakan model turbulen  $k$ - standar sementara model pembakaran digunakan model Eddy Dissipasi. Pada bagian ini perlakuan dijalankan dengan kecepatan angin yang divariasikan dari 0 m/s, 0,1 m/s, 0,3 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s, 1,5 m/s, 3,77 m/s, 5 m/s, 7,5 m/s dan 10 m/s pada kondisi kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s. Pada bagian lain kecepatan bahan bakar divariasikan dari 3 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s, dan 30 m/s pada kecepatan angin tetap yaitu 1,1 m/s. Prosedur kalkulasi medan alir dan pembakaran menggunakan perangkat lunak Fluent 6.2.16 (Fluent. Inc, 2005) yang berfungsi sebagai prosesor sekaligus post-prosesor, dimana komposisi dari bahan bakar yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.1

**Tabel 3.1** Karakteristik nyala hidrokarbon

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

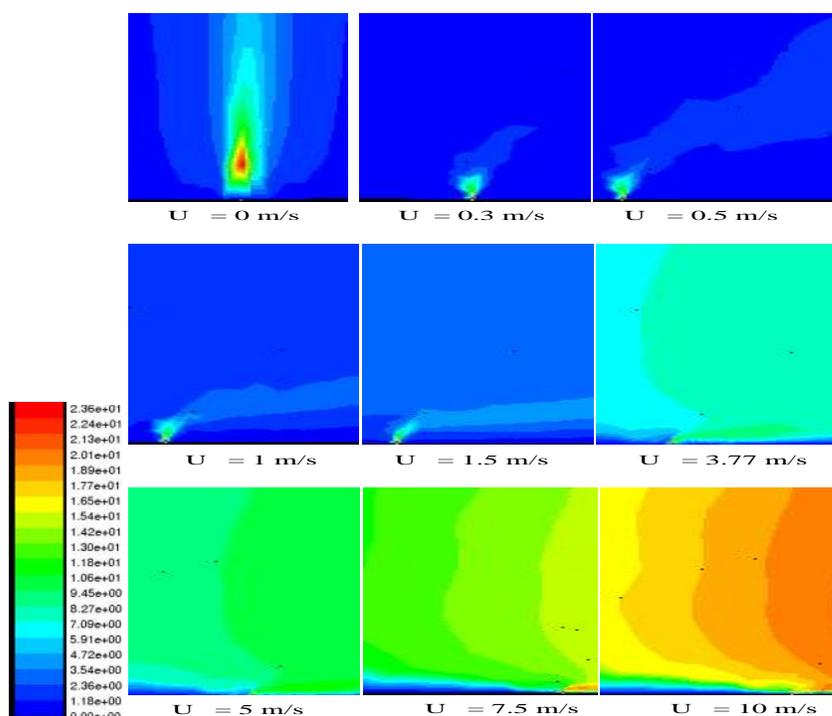
Sumber: Tsue (2000)

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Analisis Pengaruh Angin Silang Pada Kecepatan Bahan Bakar Tetap

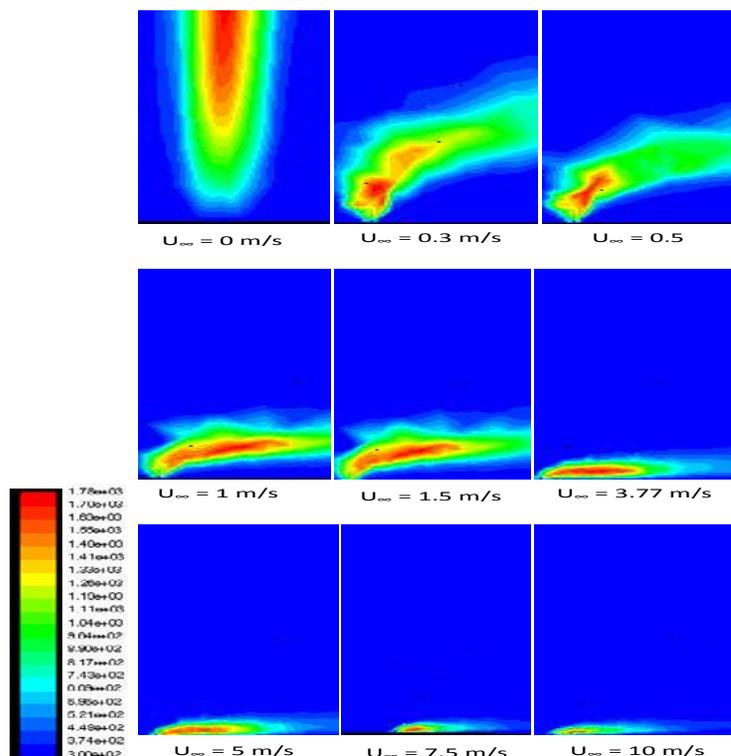
Gambar 4.1 menampilkan kontur medan alir dari berbagai kecepatan angin silang pada kecepatan bahan bakar tetap. Medan alir tertinggi berada pada ujung keluaran nozel dan semakin mengalami penurunan dengan semakin tingginya nyala, hal ini dapat dipahami karena diameter ujung nozel merupakan luasan terkecil dari aliran keluar. Karena aliran keluar ke atmosfer terbuka sehingga luasan akan semakin besar maka menyebabkan kecepatannya menjadi berkurang. Akibatnya ketinggian nyala lebih rendah dibandingkan dengan nyala tanpa pengaruh angin ( $U = 0$ ). Pada kasus nyala cerobong, tujuan pembakaran adalah bagaimana agar dapat mendispersikan polutan sejauh mungkin dari sumber

pembakaran. Oleh karena itu, diharapkan nyala dapat setinggi mungkin di atas permukaan cerobong, sehingga polutan dapat terdispersi oleh angin silang di atas cerobong. Pada kecepatan angin silang 0,3 m/s perubahan medan alir mulai terlihat jelas, dimana medan alir terlihat tidak lagi simetris melainkan mulai berpencah ke arah angin silang.



**Gambar 4.1** Kontur medan alir nyala propana pada berbagai kecepatan angin silang ( $U = 0 - 10$  m/s)

Pertambahan kecepatan angin silang pada nyala dengan kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s menghasilkan kontur medan alir yang semakin tidak beraturan. Kecepatan fluida semakin meningkat bukan saja pada ujung nozel tetapi juga pada bagian hilir aliran keluaran dari nozel. Hal tersebut terjadi karena pada kecepatan angin silang tinggi pencampuran bahan bakar dan udara terjadi sangat cepat pada pangkal nyala, dimana ada gerakan vortex sehingga menyebabkan udara yang masuk menjadi hilang diujung nyala sehingga nyala menekuk terhadap arah angin silang. Banyaknya udara yang masuk mempengaruhi pembentukan tinggi nyala. Profil kecepatan memiliki puncak yang tajam pada pangkal seperti terlihat pada Gambar 4.1 yang ditunjukkan dengan warna merah pada keluaran nozel dan menjadi tumpul di ujung. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur nyala didominasi oleh fluks momentum pada pangkal nyala dan menyebabkan struktur nyala didominasi oleh angin silang pada ujung nyala.



**Gambar 4.2** Kontur temperatur nyala propana pada berbagai kecepatan angin silang ( $U = 0 - 10 \text{ m/s}$ )

Gambar 4.2 menampilkan kontur temperatur nyala dengan kecepatan bahan bakar propana sebesar 20 m/s pada berbagai kecepatan angin silang. Pada gambar tersebut terlihat bahwa nyala mulai menekuk ke arah angin silang ketika kecepatan angin bergerak dengan kecepatan  $U = 0,3 \text{ m/s}$ . Profil nyala yang dipengaruhi angin silang 0,3 m/s sampai dengan 1,5 m/s masih memiliki ketinggian nyala yang mengarah ke atas atmosfer tetapi mulai pada kecepatan angin silang 3,77 m/s sampai 10 m/s arah nyala lebih mendatar ke arah angin silang. Hal tersebut menunjukkan struktur nyala lebih didominasi oleh angin silang yang menyebabkan nyala mengikuti arah angin silang. Namun demikian nyala tidak padam hanya proses pembakaran lebih peka karena adanya pengaruh angin silang. Pada nyala seperti ini akan menyebabkan polutan cenderung jatuh tidak jauh dari cerobong, akibat “wash-out” oleh angin silang. Dari hasil simulasi terlihat bahwa nyala hidrokarbon dengan aliran bahan bakar tetap 20 m/s akan dipengaruhi secara signifikan oleh angin silang dengan kecepatan 0,3 – 10 m/s.

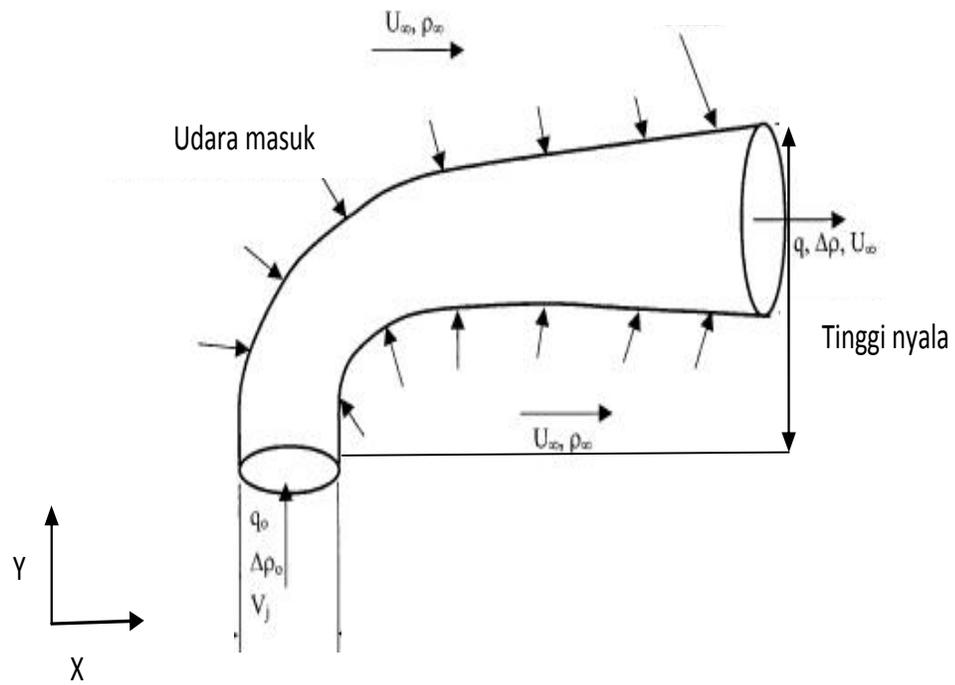
Secara kualitatif pengaruh angin silang ini mempengaruhi bukan saja ketinggian nyala juga temperature pada nyala seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. pembakaran polutan menghendaki temperatur nyala berada pada temperatur tinggi agar polutan dapat terdispersi. Dari hasil penelitian ini jelas terlihat bahwa angin silang menghasilkan temperatur nyala yang rendah, sehingga konsekuensinya menyebabkan polutan akan tidak terdispersi sempurna. Tinggi

nyala yang ditampilkan pada Tabel 4.1 merupakan tinggi yang diukur seperti pada Gambar 4.3.

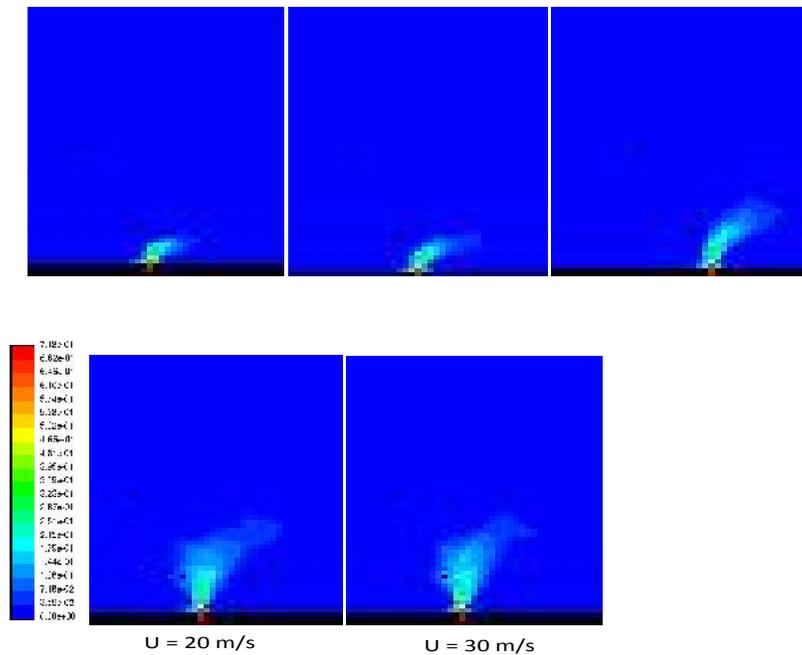
Secara kualitatif pada kecepatan bahan bakar 20 m/s pengaruh angin silang sampai kecepatan 10 m/s menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap nyala hidrokarbon dan secara kuantitatif juga menunjukkan pengaruh yang berarti seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1. Dengan semakin meningkatnya kecepatan angin silang ketinggian nyala yang dihasilkan semakin rendah. Hal tersebut karena pada kondisi yang dipengaruhi oleh angin silang, lebih banyak udara yang masuk ke dalam nyala pembakaran sehingga ujung nyala lebih didominasi oleh angin silang yang menyebabkan nyala menekuk mengikuti arah angin silang. Pada kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s kenaikan kecepatan angin silang dari 0 sampai 10 m/s menyebabkan terjadinya penurunan ketinggian nyala yang disebabkan oleh pengaruh kecepatan angin silang sehingga untuk mengantisipasi hal tersebut dapat dilakukan diantaranya dengan menaikkan kecepatan bahan bakar untuk mengimbangi efek angin silang agar nyala tidak didominasi oleh udara yang menyebabkan terjadi penurunan ketinggian nyala, dimana apabila hal tersebut terjadi dapat menyebabkan senyawa-senyawa yang terkandung dalam bahan bakar belum sepenuhnya terbakar sehingga dapat menjadi polutan di udara yang akan membahayakan bagi manusia dan lingkungan.

**Tabel 4.1** Temperatur Pembakaran Pada Kecepatan Bahan Bakar 20 m/s

No	Kecepatan Angin Silang (m/s)	Tinggi Nyala (m)	Temperatur Pembakaran (K)
1	0	1.4	1780
3	0.3	0.3	1677
3	0.5	0.2	1660
4	1	0.1	1590
5	1.5	0.08	1550
6	3.77	0.04	1490
6	5	0.03	1430
7	7.5	0.02	1350
8	10	0.015	1200

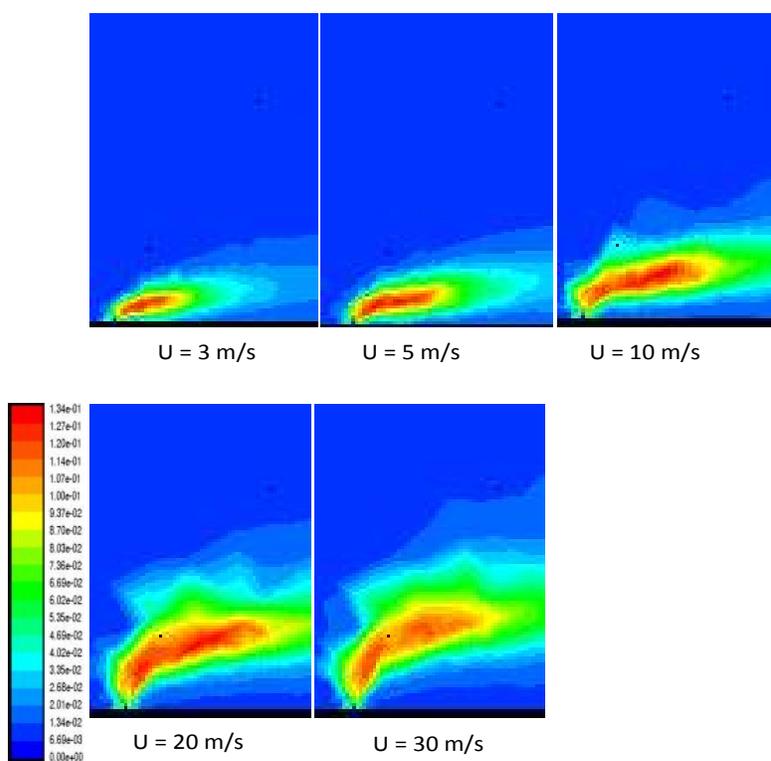


Gambar 4.3 Penentuan Tinggi nyala



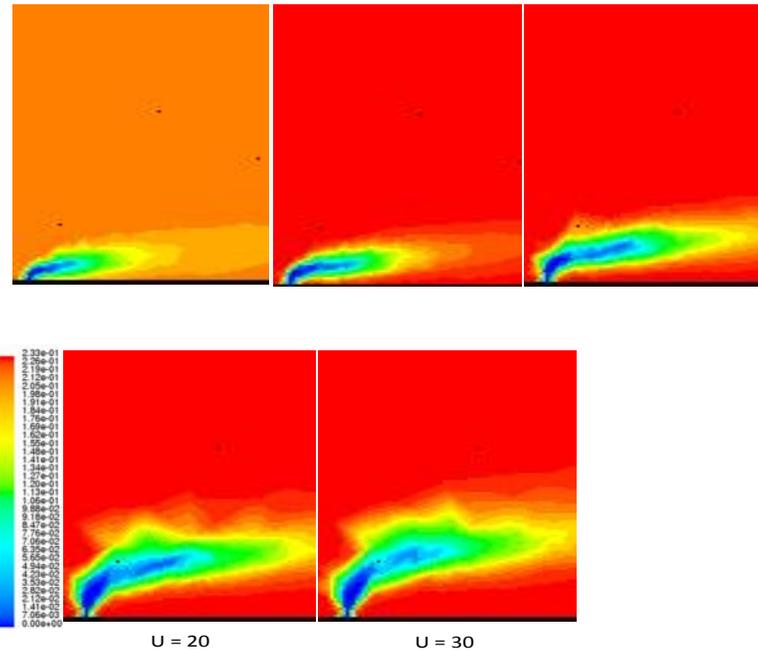
Gambar 4.4 Kontur fraksi massa  $C_3H_8$  nyala propana pada berbagai kecepatan bahan bakar ( $U= 3 - 30$  m/s)

Gambar 4.4 menunjukkan kontur fraksi massa spesies  $C_3H_8$  pada berbagai kecepatan bahan bakar dengan kondisi kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s. Fraksi massa  $C_3H_8$  pada ujung nozel terlihat berada pada nilai terbesar dan terus mengalami penurunan seiring berlangsungnya proses pembakaran sampai pada ujung nyala. Terlihat bahwa fraksi massa  $C_3H_8$  memiliki luasan yang semakin besar dengan bertambahnya kecepatan bahan bakar dimana pada kecepatan bahan bakar 3 m/s luasan fraksi massa  $C_3H_8$  lebih kecil dibandingkan pada kecepatan bahan bakar 5 m/s sampai 30 m/s. Hal tersebut mengindikasikan bahan bakar menyebabkan fraksi massa  $C_3H_8$  lebih cepat mengalami kenaikan sehingga proses pembakaran dapat berlangsung lebih baik.



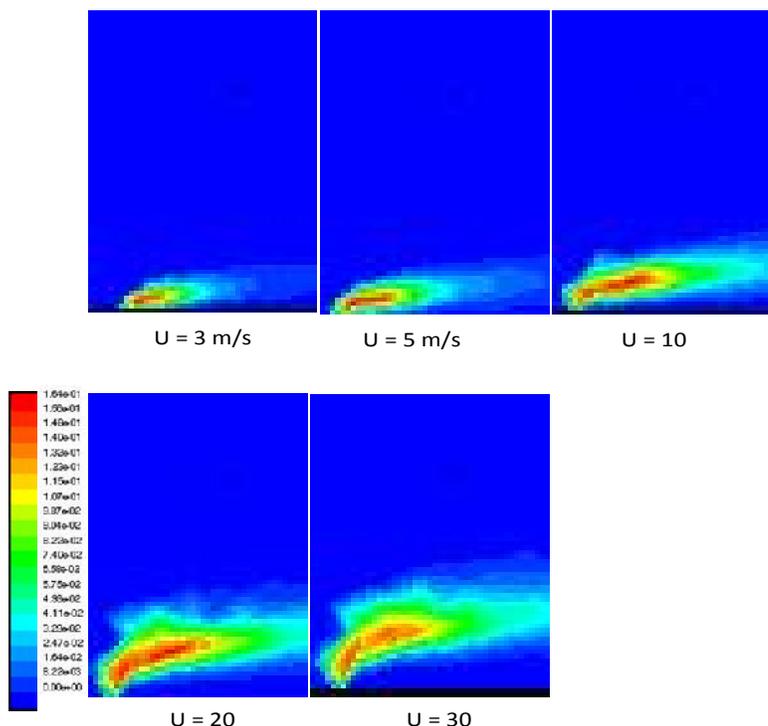
**Gambar 4.5** Kontur fraksi massa  $CO_2$  nyala propana pada berbagai kecepatan bahan bakar ( $U= 3 - 30$  m/s)

Gambar 4.5 menunjukkan kontur fraksi massa spesies  $CO_2$  pada berbagai kecepatan bahan bakar dengan kondisi kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s. Fraksi massa  $CO_2$  pada ujung nozel terlihat berada pada nilai terbesar dan terus mengalami penurunan seiring berlangsungnya proses pembakaran sampai pada ujung nyala. Terlihat bahwa fraksi massa  $CO_2$  memiliki luasan yang semakin besar dengan bertambahnya kecepatan bahan bakar dimana pada kecepatan bahan bakar 3 m/s luasan fraksi massa  $CO_2$  lebih kecil dibandingkan pada kecepatan bahan bakar 5 m/s sampai 30 m/s. Hal tersebut mengindikasikan bertambahnya kecepatan bahan bakar menyebabkan fraksi massa  $CO_2$  lebih cepat mengalami kenaikan.



**Gambar 4.6** Kontur fraksi massa  $O_2$  nyala propana pada berbagai kecepatan bahan bakar ( $U= 3 - 30$  m/s)

Gambar 4.6 menunjukkan kontur fraksi massa spesies  $O_2$  pada berbagai kecepatan bahan bakar dengan kondisi kecepatan angin silang 1,1 m/s. Fraksi massa  $O_2$  pada ujung nozel terlihat berada pada nilai terkecil dan terus mengalami kenaikan seiring berlangsungnya proses pembakaran sampai pada ujung nyala karena pada ujung nyala fraksi massa bahan bakar telah menurun sehingga udara yang mengandung  $O_2$  mendominasi di ujung nyala. Terlihat bahwa fraksi massa  $O_2$  memiliki luasan yang semakin kecil dengan bertambahnya kecepatan angin silang dimana pada kecepatan angin silang 3,77 m/s luasan fraksi massa  $O_2$  lebih kecil dibandingkan pada kecepatan angin silang 0,3 m/s sampai 1,5 m/s. Hal tersebut mengindikasikan angin silang menyebabkan fraksi massa  $O_2$  cepat mengalami kenaikan karena bahan bakar telah habis dikonsumsi pada pangkal nyala.



**Gambar 4.7** Kontur fraksi massa H<sub>2</sub>O nyala propana pada berbagai kecepatan bahan bakar (U= 3 - 30 m/s)

Gambar 4.7 menunjukkan kontur fraksi massa spesies H<sub>2</sub>O pada berbagai kecepatan bahan bakar dengan kondisi kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s. Fraksi massa H<sub>2</sub>O pada ujung nozel terlihat berada pada nilai terbesar dan terus mengalami penurunan seiring berlangsungnya proses pembakaran sampai pada ujung nyala. Terlihat bahwa fraksi massa H<sub>2</sub>O memiliki luasan yang semakin besar dengan bertambahnya kecepatan bahan bakar dimana pada kecepatan bahan bakar 3 m/s luasan fraksi massa H<sub>2</sub>O lebih kecil dibandingkan pada kecepatan bahan bakar 5 m/s sampai 30 m/s. Hal tersebut mengindikasikan bertambahnya kecepatan bahan bakar menyebabkan fraksi massa H<sub>2</sub>O mengalami kenaikan di sepanjang nyala.

## V. KESIMPULAN

Dari penelitian terhadap kajian pengaruh angin silang pada nyala turbulen tak-pracampur dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengaruh angin silang terhadap nyala yang memiliki kecepatan bahan bakar tetap 20 m/s menunjukkan bahwa pada kecepatan angin silang 3,77 m/s sampai 10 m/s arah nyala lebih cenderung menuju arah mendatar searah dengan arah angin silang. Hal tersebut menunjukkan struktur nyala lebih didominasi oleh angin silang yang menyebabkan nyala mengikuti arah angin silang. Pada kecepatan angin silang 10 m/s, angin silang benar-benar

mengendalikan struktur nyala, artinya kecepatan bahan bakar tidak lagi mampu untuk mengimbangi efek dari angin silang.

2. Pengaruh angin silang terhadap nyala ketika kecepatan angin silang tetap 1,1 m/s dan kecepatan bahan bakar berubah-ubah menunjukkan bahwa dengan kecepatan bahan bakar yang semakin tinggi struktur nyala semakin mampu mengimbangi pengaruh angin silang. Namun pada kecepatan bahan bakar di bawah 10 m/s, struktur nyala masih lebih didominasi oleh pengaruh angin silang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Areas, D. C., (2006), “A Computational Fluid Dynamic Simulation Model for Flare Analysis and Control”, *Dissertation*, University of Texas.
- 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.
- EIP (Environmental Integrity Project), (2002), “Smoking Guns”.
- 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.
- Flack, R., Dullenkopf, K., dan Scherer, V., (1994), “*Exp. Fluids*” 17:198–204.
- Fluent 6.2, (2005), “User’s Guide”. Fluent Inc.
- Johnson, M.R., dan Kostiuik, L.W., (2000), “Efficiencies of Low-Momentum Jet Diffusion Flames in Crosswinds”, *Combustion and Flame*, 123:189–200.
- Kamotami, Y., dan Greber, I., (1972), “*AIAA J*” 10-11: 1942-1929.
- Patankar, S.V., Basu, D.K., dan Alpay, S.A.J., (1977) “*Fluid Eng.*” 99: 758-762.
- Peters, N., (1984), “Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 10:319-339.
- Pohl, J.H., Lee, J., dan Payne, R., (1986), “Combustion Efficiency of Flares”, *Combustion Science and Technology*, Vol.50, pp. 217-231.

- 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.
- 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.