

PENGARUH LIP THICKNESS TURNCATED NOZZLE SUDUT LUAR TERHADAP KARAKTERISTIK API DIFUSI CONCENTRIC JET FLOW

Ahmad Akromul Huda

Mahasiswa S2
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
akromul91@gmail.com

Agung Sugeng Widodo

Dosen
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
agung_sw@ub.ac.id

Eko Siswanto

Dosen
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
eko_s112@ub.ac.id

Diffusion combustion is a daily combustion process where is often used primarily in industrial systems. An optimal burner design is needed to get more efficient combustion results. Then the shape of the burner nozzle greatly affects the turbulence between the fuel and air which forms the flow recirculation zone. The flow recirculation zone functions to produce homogeneous mixing and get a more perfect combustion. Recirculation zones are formed to disrupt flow rates, causing vortices and backflow around the end of nozzle. This research uses burner concentric jet flow. The lip thickness of the outer angles turncated nozzle are used 16 mm, 12 mm, 8 mm, 4 mm, and 0 mm length variation To obtain flame stability, the lift off and blow off limits are used with variations in air velocity. Thermocouples are used to measure the flame temperature distribution. The numerical simulations are used to reinforce this study. The results showed that the characteristics of the concentric jet flow diffusion affected by the use of the lip thickness of the outer angles turncated nozzle. The highest concentric jet flow diffusion stability is at 16 mm nozzle. The highest concentric jet flow diffusion temperature is at 12 mm nozzle. Experimental and numerical simulations show the perfect combustion on the 12 mm lip thickness nozzle. This can be seen by direct photographs of blue-dominated flames and the visualization of the temperature contour distribution which is dominated by red.

Keywords: *diffussion flame, concentric jet flow, lip thickness, turncated nozzle*

1. PENDAHULUAN

Secara teoritis, proses pembakaran dapat diartikan sebagai reaksi kimia berantai antara oksigen dengan elemen yang mudah terbakar (*combustible element*). Pembakaran berperan penting bagi perkembangan masyarakat modern. Karena pembakaran merupakan kunci penting dalam kehidupan modern saat ini, maka teknologi pembakaran banyak diteliti dan dikaji. Pembakaran yang umum digunakan dalam kehidupan sehari – hari terutama pada sistem industri adalah pembakaran difusi. Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan udara sebagai pengoksida tidak bercampur secara mekanik, melainkan dibiarkan bercampur secara alami melalui proses difusi dalam ruang bakar atau proses pembakaran[1].

Kelebihan pembakaran difusi adalah pada segi keamanannya karena tidak ada bahaya flashback karena api tidak menjalar ke sumber bahan bakar [2,3]. Disisi lain Pembakaran difusi memiliki kelemahan karena cukup sulit mendapatkan komposisi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara. Maka, salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah mendesain sistem pembakaran difusi yang optimal, sehingga didapatkan suatu desain burner yang lebih efektif dan efisien[2].

Salah satu faktor yang mempengaruhi karakteristik pembakaran api difusi adalah geometri burner atau karena merupakan tempat terjadinya rekasi pembakaran[4]. Maka proses mixing reaktan merupakan variabel yang sangat penting untuk diteliti sehingga didapatkan efisiensi pembakaran yang tinggi. Luas *mixing area* akan mempengaruhi karakteristik maupun struktur api dan akan sangat mempengaruhi pada level aliran turbulen[5]. Pada proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, kehadiran vorteks-vorteks akibat

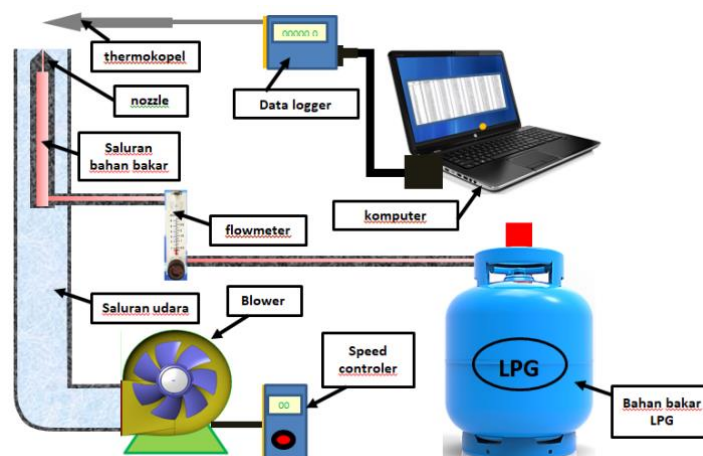
struktur geometri burner berperan penting sebagai *stirring flow*. Dinamika vorteks hadir pada struktur aliran api non-premix yang bertujuan untuk menstabilkan proses pembakaran[2]. Turbulensi akan menyebabkan pergeseran batas kritis kestabilan api dan meningkatkan temperatur api difusi [6]. Ada dua kondisi aliran kritis yang berhubungan dengan kestabilan api yaitu *lift off* dan *blowoff* [1,2,7].

Oleh karena kondisi kritis batas kestabilan tersebut sangat tergantung pada kondisi geometris burnernya, berbagai macam penelitian telah dilakukan. seperti penambahan flame holder, swirler, dan lain – lain[8,9] pada burner. Faizal [2] meneliti model combustor *concentric jet flow* dengan *turncated nozzle* untuk mengetahui pengaruh variasi *lip thickness turncated nozzle* terhadap karakteristik api difusi. Sudut pancung yang digunakan ialah sudut dalam. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *lip thickness* pada *turncated nozzle* terpancung sudut dalam dapat meningkatkan kestabilan api difusi. Srinivasarao [10] juga meneliti pengaruh *lip thickness* pada *nozzle* dengan model *combuster concentric jet flow* namun dengan geometri *nozzle* dan burner yang berbeda. Penelitian tersebut hanya terfokus pada hasil eksperimen dengan kecepatan fluida sonic jet dan subsonik. Dari hasil penelitian *lip thickness* sangat mempengaruhi mixing aliran dan vortex. Geometri *nozzle* pada burner juga memiliki peran terhadap hasil pembakaran sebagaimana Payri [11] meneliti efek geometri *nozzle* terhadap penundaan penyalaan dan *lif toff* pada semprotan injeksi langsung tiga bahan bakar yang berbeda. Dari hasil penelitian, geometri *nozzle* silinder, terlepas dari *lift off* yang lebih pendek ditemukan memiliki penundaan penyalaan yang lebih lama, jika dibandingkan dengan *nozzle* kerucut.

Kestabilan api difusi berhubungan erat dengan temperatur hasil pembakaran. Semakin tinggi kestabilan api difusi maka temperatur pembakaran yang dihasilkan juga semakin tinggi [4]. Dari penelitian tersebut perlu diteliti mengenai pengaruh variasi *lip thickness turncated nozzle* dari sudut luar. Oleh sebab itu, peneliti tertarik melakukan penelitian mengenai pengaruh bentuk *turncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness* dengan harapan dapat diketahui perubahan luasan kestabilan api dan temperatur api. Visualisasi *direct photograph* dan *shadow photograph* akan menunjukkan gambaran nyata nyala api [12,13]. Untuk menunjang dan mempertegas hasil penelitian, selain menggunakan metode eksperimen dilakukan juga simulasi numerik (*Finite Volume Method*) [14,15,16].

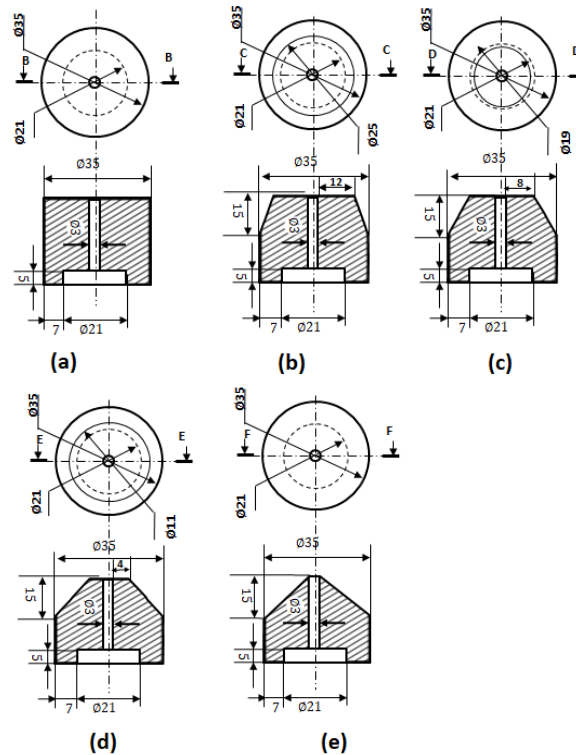
2. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental (*experimental research*) dan simulasi numerik (*Computation Fluid Dynamic*) dengan variasi *lip thickness turncated nozzle*: 0 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, dan 16 mm. pada penelitian secara eksperimen data yang diambil adalah kestabilan nyala, temperatur api dan visualisasi *direct photograph* dan *shadow photograph* api difusi *concentric jet flow*. Sedangkan pada simulasi numerik data yang diambil adalah distribusi temperatur, visualisasi kontur temperatur dan visualisasi kontur densitas. Skema penelitian dan bentuk *nozzle* ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Instalasi Penelitian

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah LPG dan jenis ruang bakarnya adalah *concentric jet flow burner*. Pada ujung ruang bakarnya dipasang *truncated nozzle* sudut luar dengan lima macam *lip thickness* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Ruang bakar terdiri dari saluran bahan bakar dengan diameter 3 mm dan saluran udara dengan diameter 74 mm. Saluran bahan bakar dihubungkan ke tangki LPG, sedangkan saluran udara dialiri udara yang berasal dari blower. Besar kecilnya kecepatan bahan bakar diatur dengan rotameter dan udara diatur dengan katup sedangkan kecepatannya diukur dengan anemometer.



Gambar 2. *Truncated Nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness*: (a) *Nozzle* 16 mm, (b) *Nozzle* 12 mm, (c) *Nozzle* 8 mm, (d) *Nozzle* 4 mm, (e) *Nozzle* 0 mm. Sumber : Huda (2018)

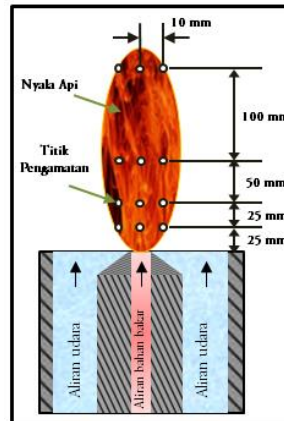
2.1 Pengujian Kestabilan Api difusi

Pengujian kestabilan api dimulai dengan mempersiapkan alat uji terlebih dahulu dan mengkalibrasi alat ukur. Kemudian mulai menyalakan blower udara dan mengukur kecepatan udara pada burner menggunakan anemometer. Kecepatan udara yang digunakan 2.05 m/s. Memasang *nozzle* dengan *lip thickness* 16 mm kemudian membuka katup bahan bakar dan menyalakan api pada burner. Setelah itu menyalakan blower kembali untuk mengalirkan udara. Untuk mengatur kecepatan bahan bakar digunakan rotameter udara. Debit bahan bakar pada rotameter udara akan dikonversikan menjadi kecepatan bahan bakar. Selanjutnya meningkatkan kecepatan aliran bahan bakar hingga nyala api pada kondisi *lift off* dan mencatat debit bahan bakar yang diperlukan. Kemudian meningkatkan kecepatan aliran bahan bakar hingga api padam (*blowoff*) dan mencatat kecepatan aliran bahan bakar pada kondisi tersebut.

Tahap pengujian kestabilan api pada kecepatan udara 2.05 m/s telah dilakukan kemudian dilanjutkan pengamatan dengan kecepatan udara 3.56 m/s, 4.6 m/s, 5.8 m/s, 7.2 m/s. setelah selesai pengambilan data pada *nozzle* 16 mm dengan cara yang sama dilakukan pengambilan data dengan menggunakan *nozzle* dengan *lip thickness* 12 mm, 8 mm, 4 mm dan 0 mm. Setelah semua data yang di perlukan didapatkan maka data tersebut di analisa serta mengambil kesimpulan dari penelitian.

2.2 Pengujian Distribusi Temperatur Api difusi

Untuk mengetahui distribusi temperatur dalam ruang pembakaran digunakan teknik diagnosis temperatur sederhana menggunakan termokopel. Pemasangan termokopel pada titik-titik yang telah ditentukan seperti pada Gambar 3 dibawah ini :

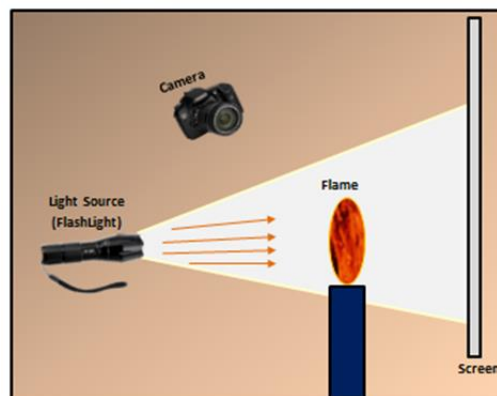


Gambar 3. Titik Tinjau Temperatur Api Difusi

Tahap awal pengujian distribusi temperatur adalah dengan menyalakan api kemudian mengatur kondisi api pada keadaan stabil menggunakan *nozzle* 16 mm. Kecepatan udara (V_u) dijaga pada 3.56 m/s sedangkan kecepatan bahan bakar (V_b) 9,44 m/s. Selanjutnya memasang termokopel pada titik yang telah ditentukan dimana titik tinjau yang digunakan -10 mm, 0 mm, dan 10 mm dalam arah horizontal. Jarak titik tinjau vertikal 25 mm, 50 mm, 100 mm, dan 200 mm. Termokopel dihubungkan dengan data logger yang terhubung dengan komputer untuk mencatat data yang temperatur api difusi. Kemudian setelah selesai pengambilan data dengan *nozzle* 16 mm langkah selanjutnya mengganti dengan *nozzle* variasi *lip thickness* 12 mm, 8 mm, 4 mm dan 0 mm dengan cara pengambilan data yang sama. Setelah seluruh data distribusi temperatur setiap variasi *nozzle* didapatkan, data tersebut kemudian dianalisa untuk mengetahui perubahan nilai distribusi temperatur variasi *truncated nozzle* sudut luar. Pada simulasi numerik digunakan kontur temperatur menggunakan software ANSYS Fluent 15.0 yang berbasis *finite volume method* untuk menunjukkan distribusi temperatur yang terjadi [16].

2.3 Pengujian Visualisasi Api difusi

Untuk mendapatkan gambaran nyata tentang pola aliran pada nyala api difusi *concentric jet flow* dilakukan Pengujian dilakukan dengan menyusun peralatan uji seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema pengambilan gambar visualisasi *shadowgraph*

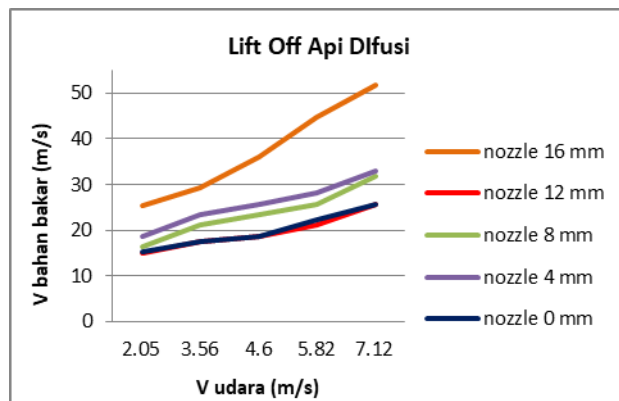
Layar putih dengan lebar 1.5 m dan tinggi 2 m dipasang tepat di belakang burner. Selain itu lampu 500 Watt dipasang dan diatur sudut serta fokus pencahayaannya pada layar. Selanjutnya menyalakan api dan mengatur kecepatan udara serta debit bahan bakar pada kondisi api seperti pada pengujian distribusi temperatur api agar dapat menghubungkan hasil yang diperoleh. Kemudian dilanjutkan dengan mengambil gambar dari bayangan api yang terbentuk pada layar menggunakan kamera. Setelah itu mengambil foto api yang terbentuk. Proses pengambilan gambar diulang dengan menggunakan *nozzle* uji yang berbeda, sehingga didapatkan gambar bayangan api dari masing-masing *nozzle*.

Pada simulasi numerik digunakan kontur densitas untuk menunjukkan distribusi densitas yang terjadi seperti halnya pada visualisasi *shadowgraph*. Setelah semua data didapatkan kemudian data tersebut dianalisa pengaruh variasi *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar terhadap karakteristik pencampuran aliran bahan bakar dan udara nyala api difusi *concentric jet flow*. Dari data – data yang telah dianalisa tersebut kemudian ditarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

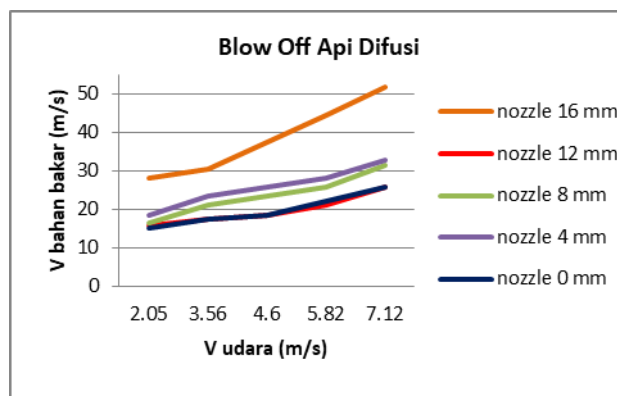
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kestabilan Api Difusi

Secara fisik, mekanisme api *lift off* dapat dilihat saat api tidak menyentuh mulut *nozzle* pembakar atau dengan kata lain ketika api mulai menjauhi port burner, namun stabil pada beberapa jarak dari mulut *nozzle*. Lift Off terjadi karena terjadi ketidak seimbangan antara kecepatan aliran bahan bakar pada pangkal api dan kecepatan penyalaan dalam proses pencampuran bahan bakar dan udara.



Gambar 5. Diagram gabungan *lift off* api difusi *turncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness*

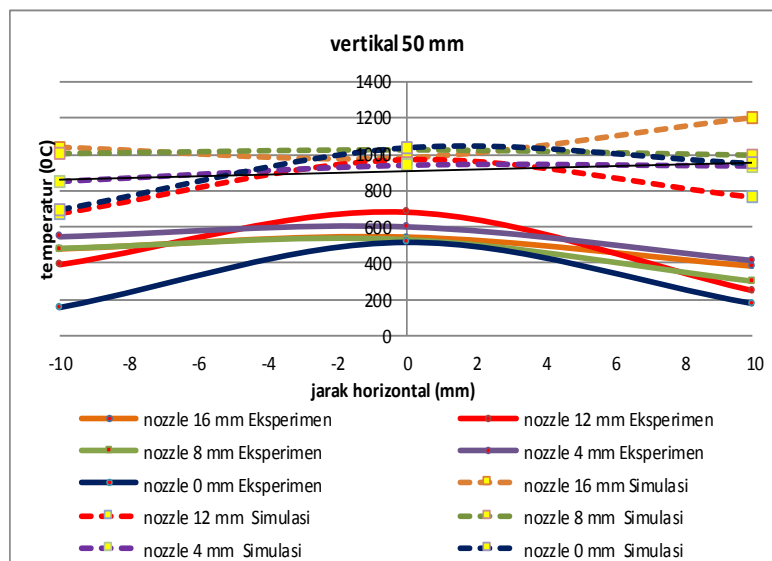


Gambar 6. Diagram gabungan *blow off* api difusi *turncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness*

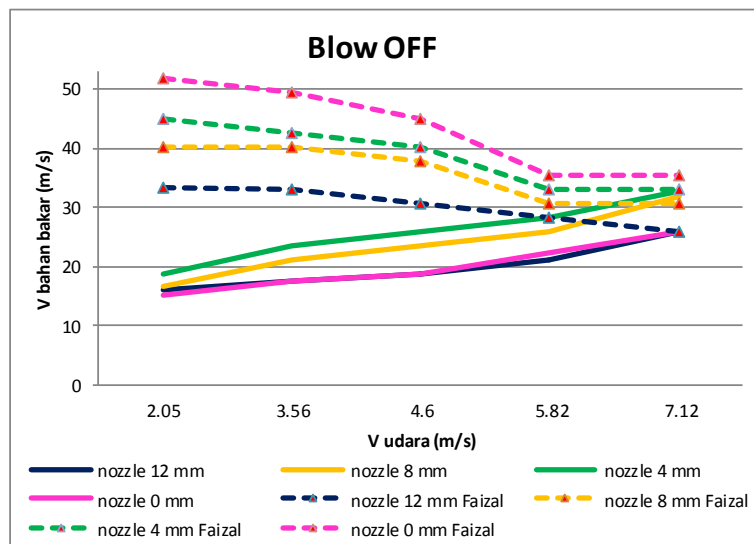
Pada variasi *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar menunjukkan pengaruh kecepatan udara terhadap batas *lift off* dan *blow off* dimana semakin besar kecepatan udara (V_u) maka batas kestabilan api juga cenderung meningkat. Pancung sudut luar pada *nozzle* serta *lip thickness* memegang peranan penting pada fenomena *lift off* dan *blow off* yang terjadi. Pancung dan *lip thickness* pada *nozzle* menahan api tetap

menyentuh pada mulut *nozzle*. Batas *blowoff* tertinggi ditunjukkan oleh *nozzle* dengan *lip thickness* 16mm. dan terendah pada *nozzle* dengan *lip thickness* 0 mm. Diagram gabungan kestabilan api difusi *lift off* dan *blowoff* dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6.

Hasil penelitian menunjukkan suatu fenomena dimana pada *nozzle* 8, *nozzle* 4, dan *nozzle* 0 batas *lift-off* dan *blowoff* berada pada suatu batas yang sama. Hal ini terjadi karena semakin cepat aliran udara membuat proses difusi menjadi semakin cepat. Faizal [2] menyatakan meningkatnya kecepatan bahan bakar mengakibatkan *Damkohler number* (Da) menjadi semakin kecil, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi semakin kecil. *Damkohler Number* adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam rekayasa kimia untuk menghubungkan waktu reaksi kimia (laju reaksi) dengan laju fenomena transport yang terjadi dalam sistem [4]. Sehingga api langsung mengalami *lift off* dan *blowoff* secara hampir bersamaan meskipun campuran udara dan reaktan masih pada batas mampu nyala.



Gambar 7 Diagram gabungan perbandingan *lift off* api difusi *turncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness* terhadap penelitian sebelumnya



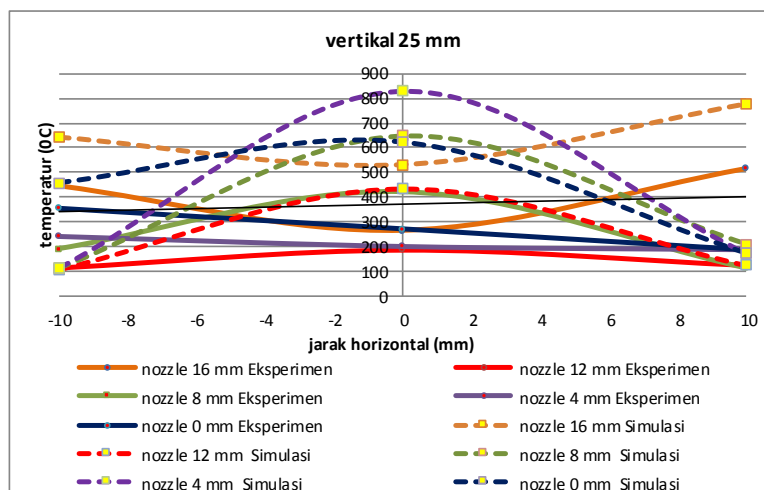
Gambar 8. Diagram gabungan perbandingan *lift off* api difusi *turncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness* terhadap penelitian sebelumnya.

Penggunaan *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar mengakibatkan kestabilan api menjadi lebih rendah dari *nozzle* tanpa pancung (*nozzle* 16 mm) dan dari penelitian sebelumnya oleh Faizal (2016).

Hal ini ditunjukkan oleh Gambar 7 dan 8 dimana tren grafik batas *lift off* dan *blow off* yang lebih tinggi dihasilkan oleh *turncated nozzle* sudut dalam. Namun dari grafik terlihat kondisi *lift off* dan *blow off* yang cenderung semakin turun ditunjukkan oleh penggunaan *turncated nozzle* sudut dalam. Hal berbeda justru ditunjukkan oleh *turncated nozzle* sudut luar dimana semakin tinggi kecepatan maka udara nilai *lift off* dan *blow off* yang dihasilkan terlihat semakin tinggi. Hal ini diakibatkan perbedaan zona resirkulasi aliran dimana vortex terbentuk pada aliran bahan bakar untuk *turncated nozzle* sudut dalam, sedangkan pada *turncated nozzle* sudut luar *vortex* terbentuk di aliran udara. Sehingga, api masih bisa menyala lebih lama dan tetap menyentuh mulut *nozzle* ketika aliran bahan bakar di tingkatkan. Sedangkan berbeda dengan *turncated nozzle* sudut luar yang lebih cepat terangkat dari mulut *nozzle* yang disebabkan zona resirkulasi aliran dan *vortex* terbentuk pada aliran udara.

3.2 Distribusi Temperatur Api Difusi

Untuk mengetahui distribusi temperatur api difusi, dibuat suatu grafik distribusi temperatur. Hal ini berguna untuk menentukan seberapa baik pencampuran antara bahan bakar dengan udara dari seberapa besar temperatur nyala api tersebut. Grafik distribusi temperatur ini menunjukkan nilai rata-rata temperatur pada tiap-tiap titik tinjau dengan cara membandingkan temperatur di jarak horizontal pada jarak vertikal yang sama untuk setiap variasi *nozzle*. Hasil penelitian baik secara eksperimen maupun simulasi numerik menunjukkan bahwa semakin besar *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar maka temperatur api yang dihasilkan semakin tinggi. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

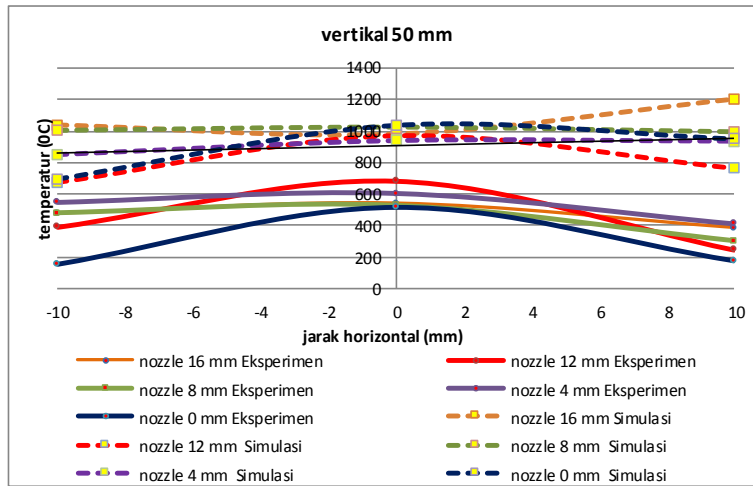


Gambar 9. Grafik perbandingan eksperimen dan simulasi distribusi temperatur nyala api pada titik tinjau 25 mm

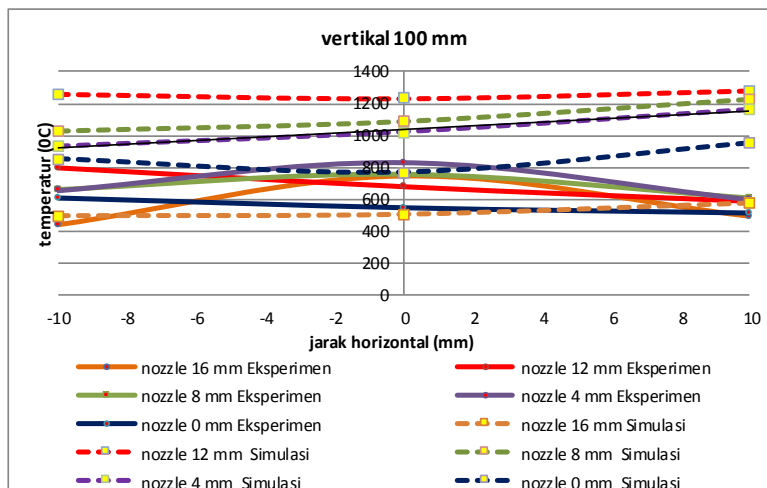
Gambar 9-12 menunjukkan perbandingan temperatur nyala api pada masing- masing variasi *lip thickness nozzle* pada titik tinjau vertikal 25 mm 50 mm, 100 mm dan 200 mm. Gambar grafik menunjukkan bentuk tren grafik simulasi yang cenderung menyamai tren grafik eksperimen namun perbedaannya ialah nilai temperatur yang dihasilkan melalui simulasi cenderung lebih tinggi dari eksperimen. Hal ini dikarenakan pada proses simulasi kondisi penelitian merupakan kondisi ideal dan tidak terpengaruh energi dari luar. Dari gambar perbandingan diatas sama – sama menunjukkan bahwa aliran dan proses reaksi pembakaran masih cenderung berada ditengah pada titik tinjau 25 mm. Nilai temperatur tertinggi ditunjukkan oleh *nozzle* 8 mm untuk eksperimen dan *nozzle* 4 mm untuk simulasi.

Pada titik tinjau vertikal 50 mm distribusi temperatur simulasi grafik terlihat cenderung lebih melandai dibanding eksperimen dikarenakan aliran telah terpecah ke arah samping ditunjukkan oleh *nozzle* 0 mm untuk eksperimen dan *nozzle* 12 mm untuk simulasi. Pada titik tinjau vertikal 100 mm menunjukkan tren grafik simulasi temperatur titik tinjau horizontal -10 mm dan 10 mm lebih tinggi dari titik tinjau 0 mm. Hal ini dikarenakan pada proses simulasi zona resirkulasi telah terbentuk dan membuat api menyebar sehingga pembakaran tidak terfokus ditengah. Nilai temperatur tertinggi ditunjukkan oleh *nozzle* 4 mm untuk eksperimen

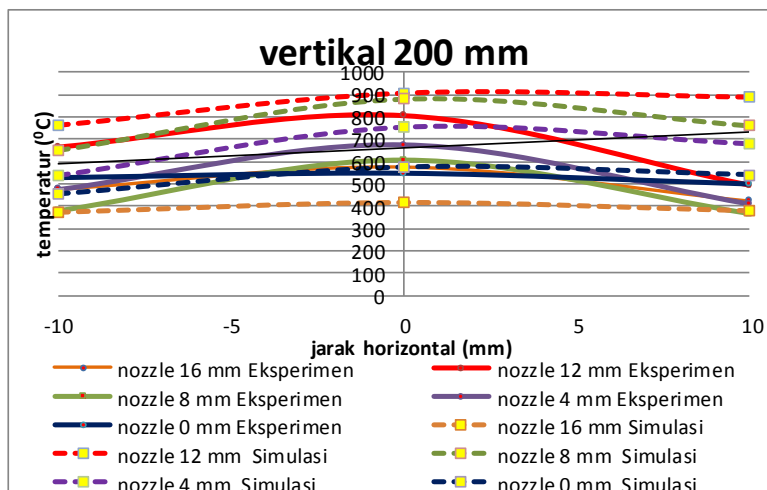
imen dan *nozzle* 12 mm untuk simulasi. Pada titik tinjau vertikal 200 mm grafik menunjukkan tren grafik simulasi yang cenderung menyamai tren grafik eksperimen. Dari Gambar 12 masih menunjukkan bahwa aliran dan proses reaksi pembakaran kembali berada ditengah pada titik tinjau 200 mm. Pada simulasi distribusi temperatur terlihat grafik yang cenderung melandai dibanding eksperimen karena aliran telah terpecah ke arah samping sehingga penyebarannya lebih merata dan tidak terfokus di tengah.



Gambar 10. Grafik perbandingan eksperimen dan simulasi distribusi temperatur nyala api pada titik tinjau 50 mm

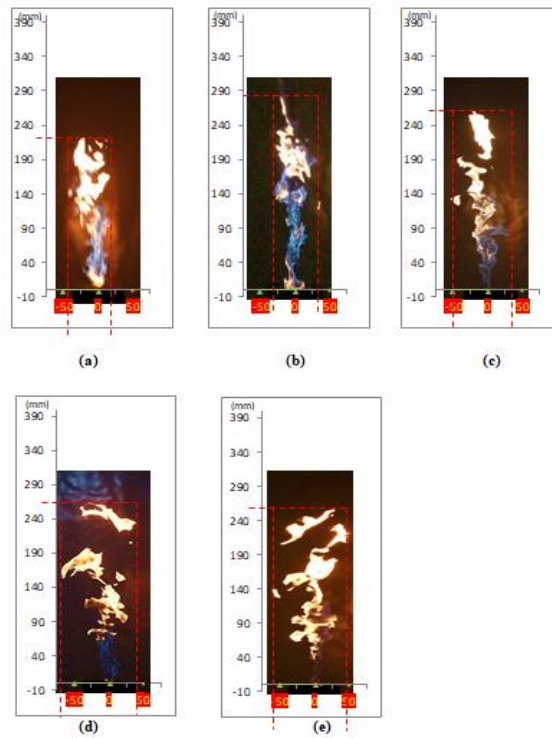


Gambar 11. Grafik perbandingan eksperimen dan simulasi distribusi temperatur nyala api pada titik tinjau 100 mm

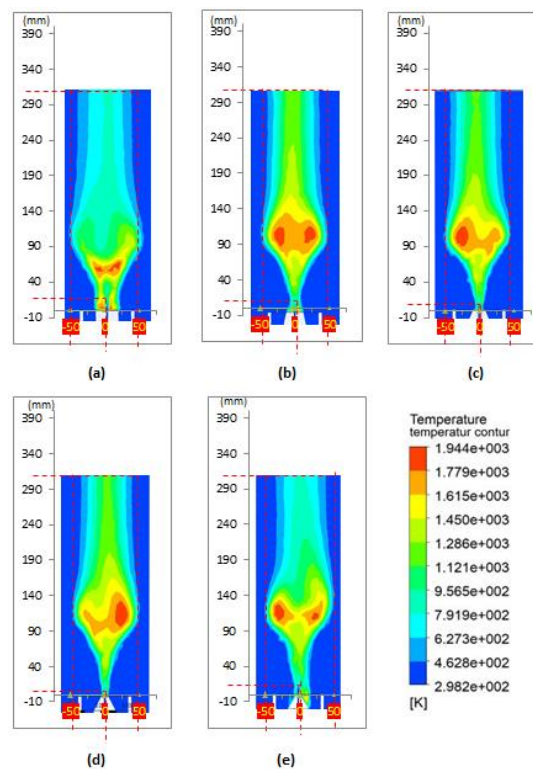


Gambar 12. Grafik perbandingan eksperimen dan simulasi distribusi temperatur nyala api pada titik tinjau 200 mm

3.3 Visualisasi Nyala Api Difusi

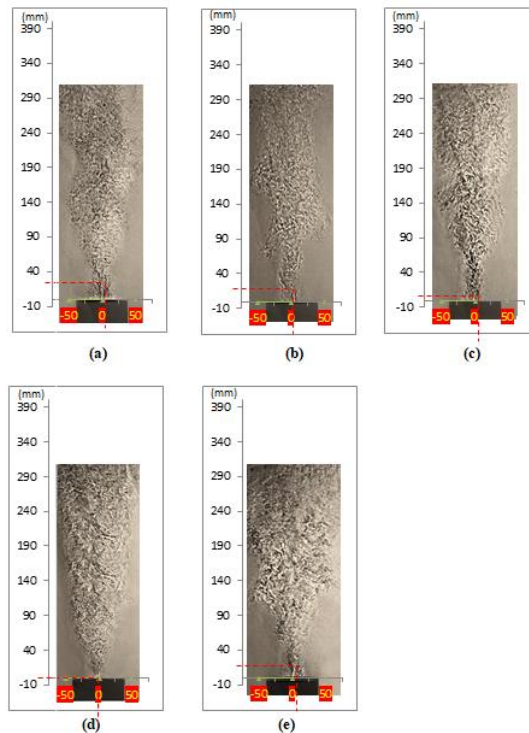


Gambar 13. Visualisasi api *direct photograph* dengan variasi *lip thickness* pada *truncated nozzle* sudut luar. (a) *nozzle* 16 mm, (b) *nozzle* 12 mm, (c) *nozzle* 8 mm, (d) *nozzle* 4 mm, (e) *nozzle* 0 mm



Gambar 14. Visualisasi simulasi api temperatur kontur dengan variasi *lip thickness* pada *truncated nozzle* sudut luar. (a) *nozzle* 16 mm, (b) *nozzle* 12 mm, (c) *nozzle* 8 mm, (d) *nozzle* 4 mm, (e) *nozzle* 0 mm.

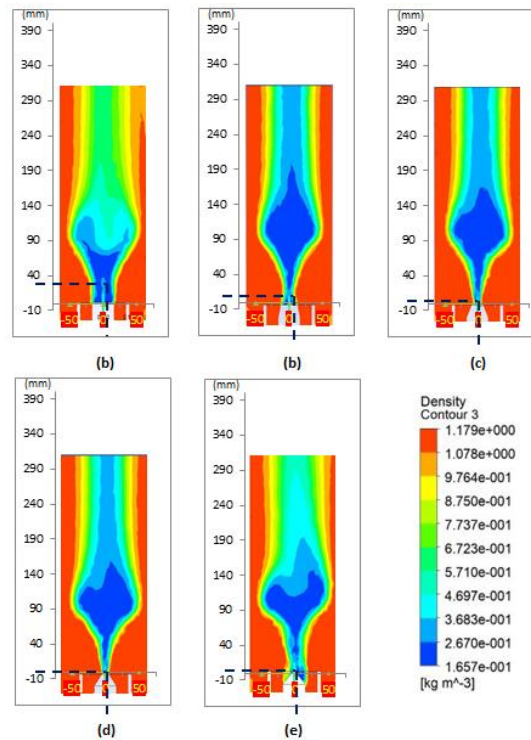
Dari Gambar 13(a) penggunaan *nozzle* 16 mm warna api masih didominasi warna kuning yang menunjukkan proses pencampuran bahan bakar dan udara cenderung masih melalui proses difusi. Tinggi api terendah pada penggunaan *nozzle* 16 mm. Gambar 13. (b) mulai terlihat efek *lip thickness* 12 mm pada *turncated nozzle* sudut luar. Visualisasi api menunjukkan api menjadi semakin tinggi dan tertinggi diantara *nozzle* lainnya. Warna api didominasi warna biru yang menunjukkan pembakaran yang lebih sempurna karena intensitas turbulensi aliran yang semakin meningkat dan zona resirkulasi aliran yang semakin baik. Gambar 13(c) menunjukkan visualisasi api *nozzle* 8 mm. Dari gambar terlihat diameter api yang lebih besar dari diameter api *nozzle* 12 mm. Warna profil api pada penggunaan *nozzle* ini didominasi warna kuning yang menandakan proses pembakaran yang menjadi kurang sempurna. Gambar 13(d) menunjukkan visualisasi api *nozzle* 4 mm. Visualisasi api menunjukkan diameter api yang semakin besar. Pangkal api didominasi warna biru dan puncak api didominasi warna kuning yang menandakan proses pembakaran yang kurang sempurna karena sebagian besar bahan bakar telah terebakar pada pangkal api. Gambar 13(e) menunjukkan visualisasi api *nozzle* 0 mm pada *turncated nozzle* sudut luar. Dari gambar terlihat api masih didominasi warna kuning. Tinggi api pada penggunaan *nozzle* ini mengalami penurunan dari *nozzle* sebelumnya. Hal ini tidak jauh berbeda dari visualisasi kontur temperatur pada simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 15. Visualisasi api shadowgraph dengan variasi *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar. (a) *nozzle* 16 mm, (b) *nozzle* 12 mm, (c) *nozzle* 8 mm, (d) *nozzle* 4 mm, (e) *nozzle* 0 mm

Hasil penelitian diperkuat oleh Gambar 15. yang menunjukkan visualisasi *shadowgraph* api difusi *concentric jet flow*. Perbedaan densitas udara dan bahan bakar menyebabkan bayangan api. dari Gambar 15(a) menunjukkan bahwa aliran bahan bakar masih terfokus ditengah api akibat zona resirkulasi aliran yang kecil. Diameter bayangan api kecil panjang lurus keatas dan bercampur dengan udara seiring bertambahnya tinggi api. Gambar 15 (b), (c), (d), (e) menunjukkan perubahan diameter bayangan api semakin luas dengan semakin kecilnya *lip thickness nozzle* dimana terlihat aliran mulai menyebar ke arah samping seiring bertambahnya tinggi api. Hal ini terjadi akibat adanya perluasan daerah vortex pada saluran udara yang meningkatkan intensitas turbulensi aliran bahan bakar dan udara. Dari gambar juga menunjukkan juga bahwa semakin kecil *lip thickness* pada *turncated nozzle* sudut luar mengakibatkan semakin kecilnya aliran bahan bakar pada tengah api yang keluar dari mulut *nozzle* akibat pemecahan laju aliran yang pada Gambar 15 batas

ketinggiannya ditandai garis merah. Simulasi numerik kontur densitas juga menunjukkan visualisasi perbedaan densitas yang tidak jauh berbeda seperti pada Gambar 16.



Gambar 16. Visualisasi simulasi distribusi densitas dengan variasi *lip thickness* pada *truncated nozzle* sudut luar. (a) *nozzle* 16 mm, (b) *nozzle* 12 mm, (c) *nozzle* 8 mm, (d) *nozzle* 4 mm, (e) *nozzle* 0 mm.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa penggunaan *truncated nozzle* sudut luar dengan variasi *lip thickness* mengakibatkan kestabilan dan nyala api difusi *concentric jet flow* semakin menurun. Dengan semakin meningkatnya kecepatan aliran udara mengakibatkan kestabilan api semakin meningkat. Kestabilan api terbesar didapatkan pada penggunaan *truncated nozzle* sudut luar dengan *lip thickness* 4 mm. Temperatur api difusi *concentric jet flow* semakin besar dengan semakin besarnya *lip thickness* pada *truncated nozzle* sudut luar dan temperatur tertinggi dihasilkan oleh *nozzle* 12 mm baik melalui metode eksperimen dan simulasi numerik. Semakin besar *lip thickness* membuat tinggi api semakin panjang dan diameter api semakin kecil sedangkan sebaliknya semakin kecil *lip thickness* membuat tinggi api yang dihasilkan semakin pendek dan diameter api semakin luas.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] WARDANA, I.N.G., *Bahan bakar dan teknologi pembakaran*, Cetakan Pertama. PT. Danar Wijaya–Brawijaya University Press, Malang. 2008
- [2] FAIZAL, ELKA., “Pengaruh variasi lip thickness pada nozzle terpancung terhadap karakteristik api pembakaran difusi *concentric jet flow*”, *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.7, No.2, pp. 13-20. 2016
- [3] SASONGKO, M.N., WIJAYANTI, W., “Karakteristik api premiks biogas pada counterflow burner”, in: *Proceeding seminar nasional tahunan teknik mesin XIV (SNTTM XIV.)*, pp. 45-5, oktober. 2015
- [4] GLASSMAN, IRVIN and YETTER, R.A., *Combustion*, Fourth edition, San Diego-California. Elsevier. 2008081907303254
- [5] MANSOUR, M.S., et all., “Effect of the mixing fields on the stability and structure of turbulent partially premixed flames in a concentric flow conical nozzle burner”, Elsevier: *Combustion and flame*, vol.000, pp. 1-21, Oktober.2016
- [6] WIDODO, A. S & TRI AGUNG R., *Studi kestabilan api difusi double concentric jet flow (Pengaruh posisi, sudut kemiringan dan jumlah sirip swirl)*, Tesis, MT, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2003

- [7] RANKIN, D.D., THERKELSEN, P., *Lean combustion technology and control*, 2nd Edition, Elsevier. 2016
- [8] BAANANTO, F., “Studi numerik pembakaran butana (C_4H_{10}) dalam meso scale combustor dengan perforated plate”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol.9, No.2, pp. 69-74, 2018
- [9] UTOMO, FW., NURSASONGKO, M.N., WIDYA, W., “Studi eksperimen penambahan swirl vanes pada api difusi coflow burner”, in: *Proceeding of the national symposium on thermofluids viii*, pp. 120-125, Nov. 2016
- [10] SRINIVASARAO, T., MURTHY, I.D., LOVARAJU, P., RATHAKRISHNAN, E., “Effect of inner nozzle lip thickness on co-flow jet characteristics”, *De Gruyter: Int J Turbo Jet Eng*, pp 1-7. Februari. 2016
- [11] PAYRI, R., VIERA, J.P., GOPALAKRISHAN, V., SZYMKOWICZ, P.G., “The effect of nozzle geometry over ignition delay and flame lift-off of reacting direct-injection sprays for three different fuels”, Elsevier: *Fuel* vol. 199, pp. 76-90. 2017
- [12] BRAEUER, ANDREAS., “Shadowgraph and Schlieren Techniques”, in: *Supercritical Fluid Science and Technology*, Vol. 7., chapter 4, Elsevier, 2015
- [13] SETTLESS, G.S., “Smartphone schlieren and shadowgraph imaging”, *Optics and Lasers in Engineering: Elsevier*, Vol. 000, pp. 1-13. 2017
- [14] WICAKSONO, H., “Simulasi numeris karakteristik pembakaran $ch_4/co_2/udara$ dan $ch_4/co_2/o_2$ pada counterflow premixed burner”, *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.8, No.2, pp. 91-99. 2017
- [15] VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W., *An introduction to computational fluid dynamics*, Second edition, Harlow-London, Pearson Prentice Hall. 2008
- [16] STOLARSKI, T., NAKASONE, Y., YOSHIMOTO, S., *Engineering analysis with ANSYS software*, second edition, Oxford., Butterworth-Heineman:Elsevier. 2018