

Pengaruh Variasi Lip Thickness pada Nozzle Terpancung terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi Concentric Jet Flow

Elka Faizal¹, Agung Sugeng Widodo², Mega Nur Sasongko³

^{1, 2, 3} Teknik Mesin Universitas Brawijaya Indonesia, Jl. MT. Haryono, 167 - Malang 65145

E-mail address: elka6388@gmail.com

Abstract

Nozzle shape greatly influence turbulence between the fuel, air and formation of flow recirculation zone to produce a homogeneous mixing and get a near-perfect combustion. The recirculation zone is area that caused by flow rate breakdown, causing vortex and backflow around the end of nozzle. This backflow that hold up while lowering the flame so the flow rate of fuel and air mixture maintained lower or equal with flame speed. This study used variation of lip thickness of truncated nozzle 0, 4, 8, 12, and 16 mm. To obtain flame stability, fuel velocity and air velocity were variated. Thermocouples were used to measure flame temperature and its distribution. The results showed that stability of concentric jet diffusion flame flow increased with narrow lip thickness on a truncated nozzle. The wider stability area obtained in 4 mm lip thickness. In addition, temperature on diffusion flames concentric jet flow also more evenly distributed evenly with size of the nozzle lip thickness. The highest temperature and temperature distribution in the horizontal direction were occurred in in the nozzle with lip thickness of 0 mm. A shadowgraph visualization was also used to identify phenomena of the nozzle exit flow.

Keywords : diffusion flame, lip thickness, concentric jet flow, recirculation zone

PENDAHULUAN

Proses pembakaran merupakan proses yang sangat penting dalam memanfaatkan energi kimiawi bahan bakar yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi manusia. Salah satu jenis pembakaran yang umum digunakan dalam bidang industri adalah pembakaran difusi. Pada pembakaran difusi bahan bakar yang dialirkan melalui saluran *burner* dibuat terpisah dari saluran udara, sehingga pencampuran bahan bakar dan udara tidak terjadi secara mekanik sebelum terjadinya proses pembakaran melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi sesaat sebelum proses pembakaran. Salah satu keuntungan digunakannya pembakaran difusi pada bidang industri adalah dari sisi keamanan, yaitu tidak adanya bahaya *flash back*. Tetapi di sisi lain, pembakaran difusi memiliki kelemahan yaitu sulitnya mendapatkan komposisi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara. Oleh sebab itu, salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan cara mendesain sistem pembakaran difusi yang optimal, sehingga didapatkan suatu desain *burner* yang efektif dan efisien.

Salah satu faktor yang mempengaruhi karakteristik pembakaran api difusi adalah geometri *burner*. Geometri *burner* sangat berpengaruh dalam proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, sehingga mempengaruhi karakteristik pembakaran. Pada proses pencampuran antara bahan bakar dan udara, kehadiran vorteks-vorteks akibat struktur geometri *burner* berperan penting sebagai pengaduk aliran. Dinamika vorteks hadir pada struktur aliran api non-premix yang bertujuan untuk menstabilkan proses pembakaran[1]. Daerah kestabilan api difusi dapat diperluas dengan pemasangan swirling vanes[2]. Kestabilan api pada umumnya menjelaskan batas

operasional dari sistem pembakaran. Ada dua kondisi aliran kritis yang berhubungan dengan kestabilan api, yaitu *lift off* dan *blow off*. Oleh karena kondisi kritis batas kestabilan tersebut sangat tergantung pada kondisi geometris *burnernya*, maka pada penelitian ini digunakan *nozzle* dengan variasi *lip thickness* terpancung pada tipe *burner concentric jet flow*. *Lip thickness burner* berpengaruh terhadap kestabilan api *non-premixed* akibat perubahan zona resirkulasi aliran[3]. Aliran resirkulasi yang merupakan faktor penting dalam kestabilan api dengan jalan pengadukan bahan bakar baik di belakang halangan maupun untuk proses pencampurannya[4]. Zona resirkulasi adalah daerah dimana terjadi pemecahan laju aliran yang menimbulkan pusaran (*vortex*) dan aliran balik di sekitar ujung *nozzle*. Dengan penggunaan variasi *lip thickness nozzle* terpancung pada penelitian ini, diharapkan akan terjadi pemecahan laju aliran sehingga terbentuk zona resirkulasi yang akan menyempurnakan pembakaran. Hal ini diindikasikan dengan kemudahan terbentuknya *lift off* dan *blow off* sebagai indikator kestabilan api difusi.

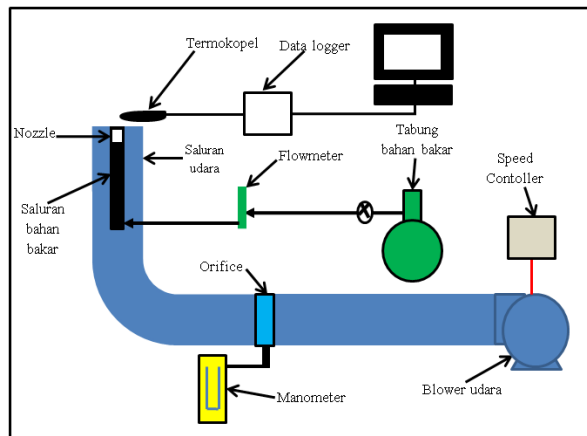
Pengaruh kecepatan bahan bakar pada *concentric jet flow* terhadap kondisi *lift off* diteliti untuk laju aliran udara yang dibuat konstan dengan laju aliran bahan bakar yang bervariasi. Tinggi pangkal nyala meningkat secara linier terhadap kecepatan aliran gas yang keluar dari *nozzle*[5]. Dengan semakin kecil ketebalan *lip thickness* pada *nozzle* terpancung akan mempermudah terciptanya pemecahan aliran yang berguna dalam menjaga kecepatan aliran reaktan agar lebih rendah atau sama dengan kecepatan nyala serta berperan dalam proses pengadukan bahan bakar dengan udara akibat terbentuknya zona resirkulasi, sehingga memperkecil peluang terjadinya *lift off* dan *blow off* atau dengan

kata lain terjadi peningkatan kestabilan api difusi. Kestabilan api difusi memiliki hubungan erat dengan temperatur pembakaran. Semakin tinggi kestabilan api difusi maka temperatur pembakaran juga semakin tinggi. Salah satu faktor penting dalam peningkatan temperatur pembakaran adalah proses pencampuran antara bahan bakar dengan udara. Pada proses pencampuran reaktan salah satu faktor yang mempengaruhi adalah adanya turbulensi aliran yang berguna dalam proses *mixing* reaktan. Turbulensi aliran fluida menyebabkan pergeseran batas kritis kestabilan api difusi dan meningkatkan distribusi temperatur nyala sehingga menghasilkan pembakaran yang sempurna[6]. Distribusi temperatur mulai dari *burner tip* hingga *flame tip* sangat penting diketahui. Hal ini berguna dalam menentukan seberapa baik pencampuran antara bahan bakar dengan udara yang dapat diketahui dari seberapa besar temperatur nyala api tersebut. Distribusi temperatur api difusi semakin merata ke arah horizontal seiring dengan peningkatan sudut luar maupun sudut dalam *nozzle* akibat terbentuknya zona resirkulasi aliran[7]. Zona resirkulasi berperan dalam meningkatkan kestabilan api difusi dengan cara menjaga kecepatan aliran reaktan lebih rendah atau sama dengan kecepatan nyala, serta berperan dalam proses pengadukan bahan bakar dengan udara. Pada

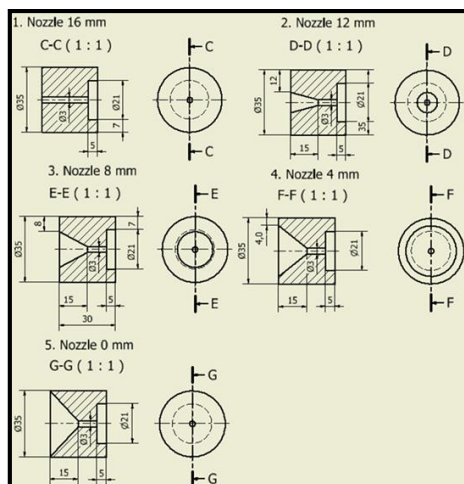
penelitian ini semakin kecil luasan *lip thickness* pada *nozzle* terpancung mempermudah terjadinya proses pengadukan reaktan pada zona resirkulasi yang menyebabkan campuran bahan bakar semakin homogen sebelum terbakar, sehingga pembakaran semakin sempurna yang diindikasikan dengan meningkatnya temperatur pembakaran. Selain itu untuk menunjang dan mempertegas hasil yang didapat dari penelitian ini, maka diperlukan suatu metode untuk memvisualisasikan struktur aliran tersebut. Oleh karena pola aliran sangat dipengaruhi oleh densitas aliran, maka digunakan teknik visualisasi *shadowgraph*. Dengan visualisasi *shadowgraph*, maka didapatkan gambaran nyata adanya perbedaan densitas aliran, sehingga struktur aliran pada proses pencampuran antara bahan bakar dan udara dapat terlihat secara jelas.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental (*experimental research*) dengan variasi *lip thickness nozzle* terpancung : 0 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, dan 16 mm, dimana data yang diambil adalah kestabilan nyala dan temperatur api difusi *concentric jet flow*. Skema penelitian dan bentuk *nozzle* ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Instalasi Penelitian



Gambar 2. Nozzle terpancung dengan variasi *lip thickness*

Pengujian Kestabilan Api Difusi

Sebelum melakukan pengujian perlu dilakukan persiapan peralatan-peralatan serta memastikan bahwa peralatan dapat bekerja dengan baik dan aman. Selain itu perlu dilakukan kalibrasi peralatan ukur yang akan digunakan, seperti alat ukur laju aliran bahan bakar dan udara maupun alat ukur temperatur untuk menjamin ketepatan hasil pengukuran.

Pengujian kestabilan api diawali dengan menyalakan *blower* udara dan mengukur kecepatan udara yang keluar dari burner menggunakan anemometer. Pada penelitian ini kecepatan awal yang digunakan sebesar 1 m/s. Agar tepat perlu dilakukan pengaturan kecepatan blower yang disesuaikan dengan pembacaan pada anemometer. Selanjutnya memasang nozzle dengan lip thickness terpancung 16 mm dan dilanjutkan dengan membuka katup bahan bakar serta menyalakan api. Untuk mengatur *supply* bahan bakar yang akan digunakan dalam pengujian dilakukan dengan flowmeter. Debit bahan bakar yang digunakan akan dikonversikan menjadi kecepatan bahan bakar. Kemudian pengujian dilanjutkan dengan mengatur aliran bahan bakar pada kondisi api stabil yaitu pada debit 3 l/min dan 5 l/min dengan tetap menjaga beda ketinggian pada manometer 2 mm. Mengambil gambar dari api yang terbentuk dengan menggunakan kamera digital Nikon D3200. Selanjutnya memperbesar aliran bahan bakar hingga mencapai kondisi lift off dan dilanjutkan dengan blow off serta mencatat debit bahan bakar ketika terjadi lift off dan blow off.

Tahap pengujian kestabilan api difusi *concentric jet flow* dengan nozzle 16 mm pada $\Delta h = 2$ mm sudah selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah tetap menggunakan nozzle 16 mm tetapi menaikkan kecepatan udara, sehingga beda tekanan yang terbaca pada manometer menjadi 6 mm kemudian mengulangi langkah pengujian seperti sebelumnya. Pengujian ini diulangi dengan Δh manometer 10, 16, dan 24 mm.

Setelah pengujian kestabilan api difusi *concentric jet flow* menggunakan nozzle terpancung dengan lip thickness 16 mm selesai dilakukan, maka pengujian tahap selanjutnya adalah mengganti nozzle terpancung dengan lip thickness 16 mm dengan nozzle 12 mm, 8 mm, 4 mm, dan 0 mm, dengan mengulangi langkah-langkah yang telah dilakukan sebelumnya kemudian mengolah data-data yang didapat dan melakukan analisa serta mengambil kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

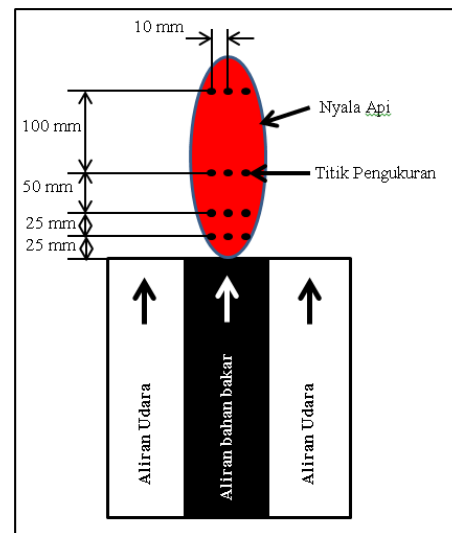
Pengujian Distribusi Temperatur

Pengujian distribusi temperatur nyala api difusi *concentric jet flow* dengan variasi lip thickness pada nozzle terpancung dilakukan terpisah dengan pengujian kestabilan api disebabkan karena dikhawatirkan pemasangan termokopel dapat mengganggu struktur aliran api. Tahap awal pengujian distribusi temperatur adalah menyalakan api dan mengatur kecepatan udara pada kondisi api stabil. Kemudian dilanjutkan dengan memasang termokopel

pada titik-titik yang telah ditentukan seperti pada Gambar 3.

Titik tinjau yang digunakan tiap 10 mm dalam arah horizontal dan jarak jarak 25, 50, 100, 200 mm pada arah vertikal. Termokopel dipasang pada data logger yang terhubung dengan komputer dan digunakan untuk mengambil data temperatur api difusi.

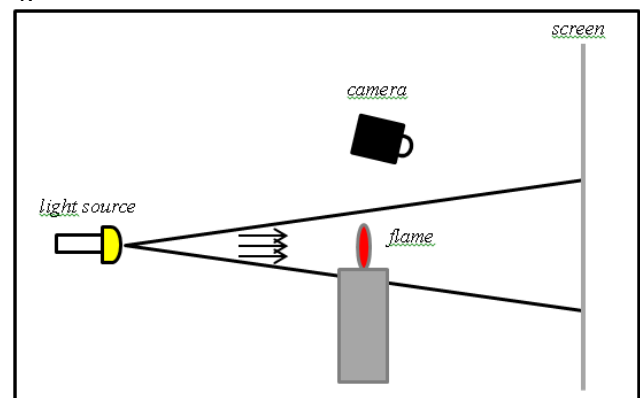
Proses pengujian dilanjutkan dengan mengganti nozzle terpancung dengan nozzle yang berbeda ketebalannya kemudian mengulang proses sebelumnya. Setelah mendapatkan data distribusi temperatur api, data kemudian diolah dan dilakukan analisa mengenai pengaruh variasi lip thickness pada nozzle terpancung terhadap temperatur nyala api pembakaran difusi *concentric jet flow*.



Gambar 3. Titik Tinjau Temperatur Api Difusi

Pengujian Visualisasi Shadowgraph

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan gambaran nyata tentang pola aliran pada nyala api difusi *concentric jet flow* yang digunakan untuk mendukung dan mempertegas hasil yang didapat dari penelitian yang telah dilakukan. Pengujian diawali dengan menyusun peralatan uji seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Visualisasi Shadowgraph

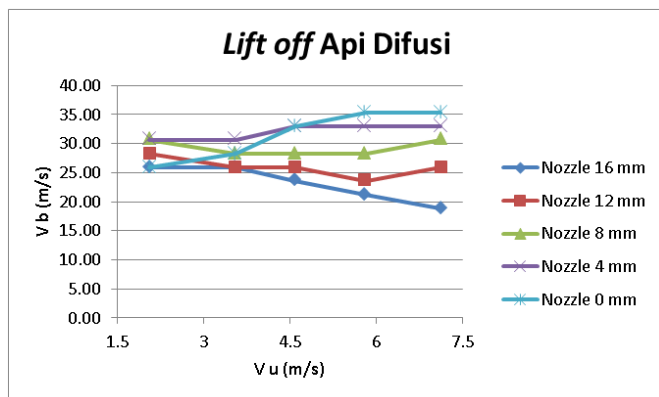
Layar putih dengan lebar 1.5 m dan tinggi 2 m dipasang tepat di belakang burner. Selain itu lampu

500 Watt dipasang dan diatur sudut serta fokus pencahayaannya agar nanti dapat menciptakan bayangan dari api yang terbentuk pada layar. Tahap selanjutnya menyalakan api dan mengatur kecepatan udara serta debit bahan bakar pada kondisi api stabil dan dikondisikan seperti pada pengujian distribusi temperatur api agar hasil yang diperoleh dapat saling dihubungkan. Kemudian dilanjutkan dengan mengambil gambar dari bayangan api yang terbentuk pada layar menggunakan kamera. Proses pengujian ini diulang dengan menggunakan *nozzle* uji yang berbeda, sehingga didapatkan gambar bayangan api dari masing-masing *nozzle*. Setelah itu mengolah data dan melakukan analisa mengenai pengaruh variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung terhadap karakteristik pencampuran aliran bahan bakar dan udara dari nyala api pembakaran difusi *concentric jet flow* serta menarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kestabilan Api Difusi

Lift off terjadi akibat ketidak seimbangan antara kecepatan aliran bahan bakar pada pangkal api dan kecepatan penyalaan dalam proses pencampuran antara aliran *jet* bahan bakar dengan udara pengoksidasi. Pada variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung 16 mm, 12 mm, dan 8 mm, semakin besar aliran udara maka *lift off* memiliki kecenderungan semakin cepat terjadi. Hal ini terjadi dikarenakan semakin cepat aliran udara, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin cepat yang menyebabkan waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) juga semakin kecil, sehingga titik pangkal nyala api semakin mudah terangkat menjauhi ujung *nozzle*.

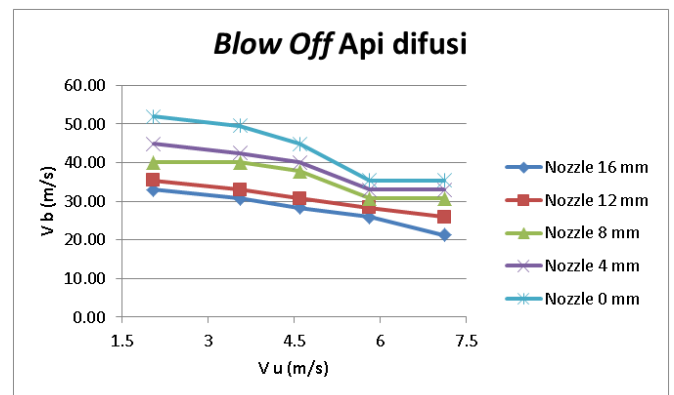


Gambar 5. Diagram gabungan *lift off* dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung.

Gambar 5 menunjukkan bahwa dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung membuat luasan daerah kestabilan api berubah. Semakin kecil *lip thickness* yang digunakan, maka luasan daerah kestabilan memiliki kecenderungan semakin bertambah. Hal ini terjadi karena dengan semakin kecilnya *lip thickness*, intensitas turbulensi dan zona

resirkulasi yang terbentuk juga semakin besar, menyebabkan pencampuran udara dan bahan bakar menjadi semakin homogen dan pembakaran semakin mendekati sempurna, sehingga memperlambat proses terjadinya *lift off*.

Disisi lain terlihat jelas pengaruh zona resirkulasi aliran dalam menahan nyala api dan menyempurnakan proses pembakaran. Pada variasi *lip thickness nozzle* terpancung 4 mm dan 0 mm semakin tinggi kecepatan udara membuat kestabilan api justru semakin meningkat. Hal ini terjadi akibat adanya zona resirkulasi aliran yang menyebabkan timbulnya pusaran dan aliran balik di sekitar permukaan *nozzle*. Aliran balik inilah yang menghambat sekaligus menekan nyala api sehingga mencegah terjadinya *lift off*. Selain itu zona resirkulasi aliran sangat berguna dalam proses pengadukan reaktan, menyebabkan pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi semakin homogen sehingga membuat reaksi pembakaran mendekati sempurna. Zona resirkulasi aliran juga berperan dalam memecah laju aliran sehingga kecepatan aliran bahan bakar dan udara dapat terjaga lebih rendah atau sama dengan kecepatan nyala.



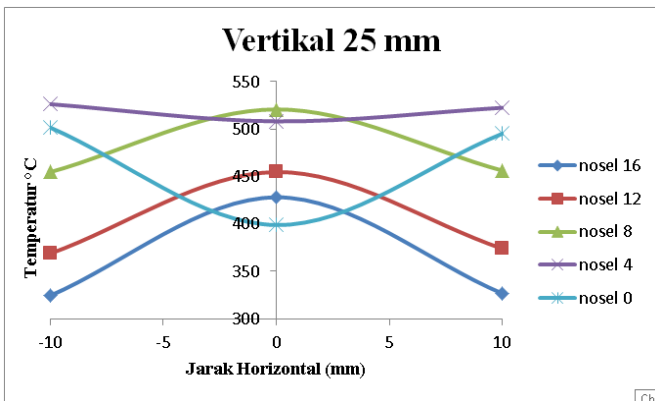
Gambar 6. Diagram gabungan *blow off* dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung.

Gambar 6 menunjukkan profil dari tiap-tiap diagram cenderung sama, yakni mempunyai batas *blow off* yang relatif tinggi pada kecepatan udara yang rendah dan menurun seiring dengan bertambahnya laju aliran udara. Hal ini terjadi karena semakin cepat aliran udara, maka proses pencampuran antara bahan bakar dan udara juga semakin cepat, akibatnya *Damkohler number (Da)* menjadi semakin kecil, yang berarti waktu yang tersedia untuk melakukan reaksi (*characteristic chemical time*) tidak mencukupi dibandingkan dengan waktu mengalirnya reaktan (*characteristic flow time*). Sehingga api mengalami *blow off* meskipun campuran antara bahan bakar dan udara masih dalam batas mampu nyala. Selain itu terlihat bahwa bahwa dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung membuat batas *blow off* api berubah. Semakin kecil *lip thickness* yang digunakan, maka batas *blow off* api cenderung semakin meningkat. Hal ini terjadi karena dengan semakin kecilnya *lip thickness*, intensitas turbulensi dan zona

resirkulasi yang terbentuk juga semakin besar, sehingga menyebabkan pencampuran udara dan bahan bakar menjadi semakin homogen dan pembakaran semakin mendekati sempurna. Selain itu pengadukan pada proses pencampuran udara bahan bakar akan menyebabkan pemanasan awal pada reaktan, dimana hal ini juga berperan dalam menyempurnakan reaksi pembakaran.

Distribusi Temperatur Api Difusi

Untuk mengetahui distribusi temperatur api difusi, maka perlu dibuat suatu grafik distribusi temperatur mulai dari *burner tip* hingga *flame tip*. Hal ini berguna dalam menentukan seberapa baik pencampuran antara bahan bakar dengan udara yang dapat diketahui 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 dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung, sehingga dapat diketahui perbedaan distribusi temperatur pada penggunaan masing-masing *nozzle* pengujian. Pada pengujian ini titik tinjau pengukuran pada arah vertikal adalah 25, 50, 100, dan 200 mm dari ujung *nozzle*, sedangkan pada arah horizontal adalah -10, 0, dan 10 mm dari sumbu *nozzle*.



Gambar 7. Grafik distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 25 mm dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung

Gambar 7 menunjukkan distribusi temperatur pada jarak vertikal terkecil, yaitu 25 mm dari ujung *nozzle*. Pada jarak 25 mm terlihat bahwa dengan perbedaan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung 16, 12, dan 8 mm, menyebabkan perubahan temperatur. Semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan proses pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik yang ditunjukkan dengan meningkatnya nilai temperatur pada titik tinjau yang sama. Selain itu dari grafik juga terlihat bahwa temperatur tertinggi berada pada daerah tengah api yaitu pada titik tinjau 0 mm arah horizontal, sedangkan pada titik tinjau -10 dan 10 mm temperatur yang dihasilkan cenderung lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran bahan

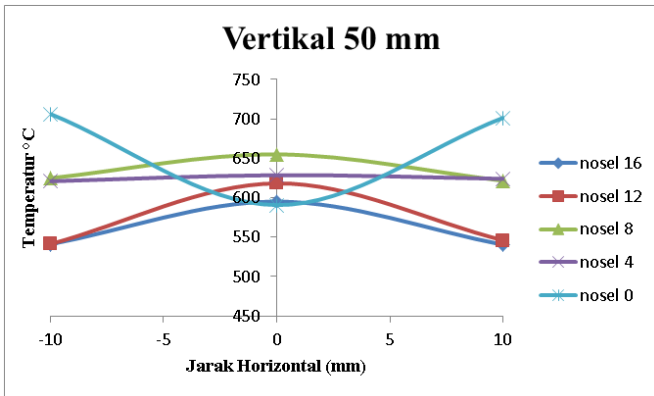
bakar masih terpusat pada bagian tengah *nozzle*, sedangkan pada bagian sisi proses pencampuran antara bahan bakar dan udara sebagian besar terjadi secara difusi.

Pada *nozzle* 4 mm dan 0 mm dapat dilihat bahwa profil temperatur cenderung lebih tinggi pada bagian sisi yaitu titik tinjau -10 dan 10 mm daripada bagian tengah atau titik tinjau 0 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa zona resirkulasi aliran sudah mulai terbentuk pada ujung *nozzle*. Zona resirkulasi aliran timbul akibat pemecahan laju aliran yang menyebabkan fokus aliran bahan bakar tidak hanya terpusat pada bagian tengah *nozzle*. Selain itu zona resirkulasi aliran menyebabkan timbulnya pusaran dan aliran balik di sekitar ujung *nozzle* yang berfungsi sebagai pengaduk dalam proses pencampuran antara bahan bakar dan udara sehingga proses pencampuran reaktan pada bagian sisi *nozzle* tidak hanya terjadi secara difusi tetapi juga karena adanya *mixing* aliran. *Mixing* aliran dapat menyempurnakan pembakaran karena membuat campuran bahan bakar dan udara lebih homogen, sehingga temperatur pembakaran yang dihasilkan lebih tinggi

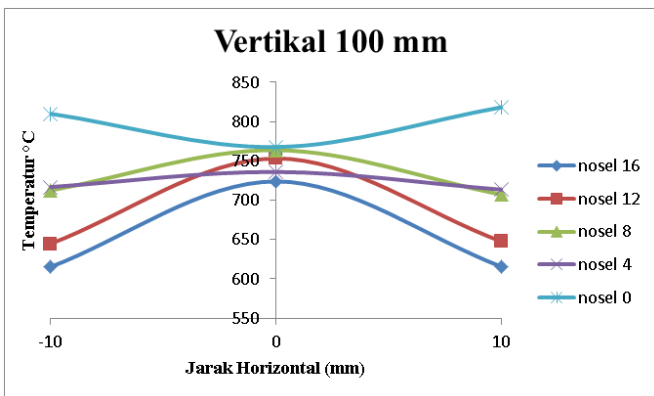
Pada jarak vertikal 50 mm secara umum profil temperatur dari masing-masing *nozzle* pengujian tidak jauh berbeda dengan profil pada titik tinjau 25 mm yaitu dengan semakin kecilnya *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan temperatur pada semua titik tinjau semakin tinggi. Yang menarik di sini adalah pada tiga titik tinjau horizontal, profil temperatur pada hampir semua *nozzle* pengujian melandai. Ini menunjukkan bahwa pada titik tinjau vertikal 50 mm, pembakaran bisa dikatakan hampir merata pada semua titik tinjau horizontal. Dengan kata lain secara umum zona resirkulasi aliran sudah terbentuk pada semua *nozzle* pengujian. Semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan semakin besar zona resirkulasi aliran yang menyebabkan pembakaran semakin sempurna dan merata sehingga temperatur api yang dihasilkan semakin tinggi. Secara khusus pada kasus *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 0 mm, temperatur pada bagian tepi api yaitu titik tinjau -10 dan 10 mm lebih tinggi daripada bagian tengah atau 0 mm. Hal ini terjadi akibat intensitas turbulensi dan pusaran aliran yang terlalu tinggi sehingga sebagian besar bahan bakar yang keluar *nozzle* terpecah ke bagian sisi *nozzle*, akibatnya pada bagian pusat *nozzle* atau titik tinjau 0 mm terjadi kekurangan bahan bakar sehingga temperatur yang dihasilkan lebih rendah

Gambar 9 menunjukkan distribusi temperatur pada jarak vertikal 100 mm. Pada jarak ini secara umum tetap terlihat bahwa semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan temperatur yang dihasilkan juga semakin tinggi. Temperatur tertinggi terletak pada jarak -10 dan 10 mm untuk *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 0 mm. Pada *nozzle* 0 mm juga terlihat bahwa penyebaran temperatur pada semua titik tinjau hampir merata, terlihat pada profil temperatur yang semakin landai. Untuk *nozzle* yang lain temperatur tertinggi untuk masing-masing *nozzle*

berada pada titik tinjau horizontal 0 mm atau daerah tengah api. Pada *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 4 mm temperatur landai, artinya daerah yang mempunyai temperatur seimbang pada hampir semua titik pengukuran sedangkan temperatur terendah dihasilkan oleh *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 16 mm pada jarak horizontal -10 dan 10 mm.



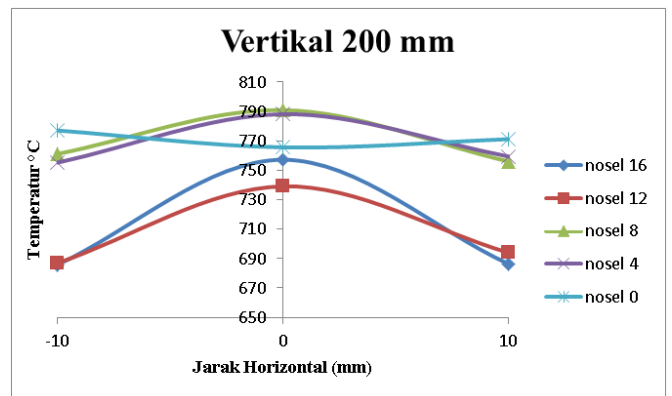
Gambar 8. Grafik distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 50 mm dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung



Gambar 9. Grafik distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 100 mm dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung

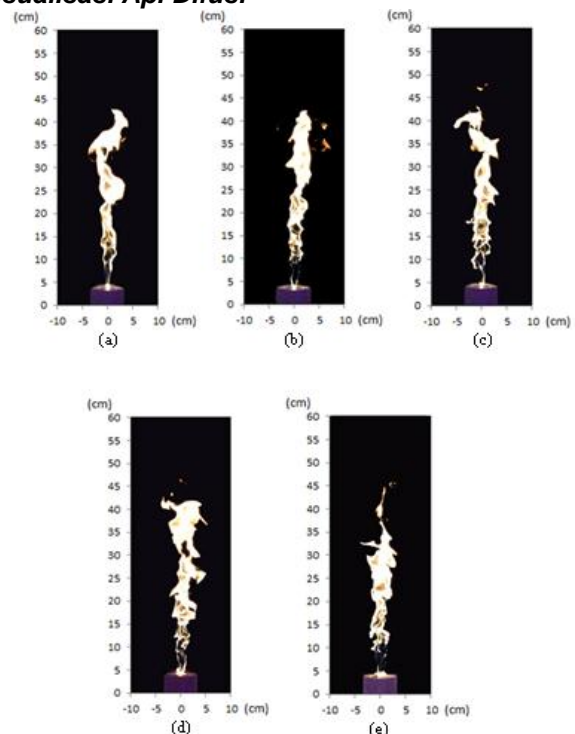
Pada jarak vertikal 200 mm, secara umum temperatur tertinggi untuk semua variasi *lip thickness nozzle* terpancung berada pada jarak horizontal 0 mm atau tengah api. Temperatur terendah ada pada *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 12 mm yang terjadi hampir di semua titik pengukuran horizontal. Dari gambar 10 juga terlihat bahwa temperatur tertinggi dimiliki oleh *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 8 mm yang pola dan nilainya cenderung identik atau berhimpit dengan *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 4 mm, kemudian diikuti oleh *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 0 mm, 16 mm dan terakhir 12 mm. Pada ketinggian ini temperatur puncak *nozzle* 16 mm lebih tinggi daripada *nozzle* 12 mm. Kemungkinan pada titik ini merupakan reaksi

puncak pembakaran, karena pada *nozzle* 16 mm arah aliran bahan bakar cenderung terfokus pada bagian tengah api, sehingga pada ketinggian ini masih terdapat banyak bahan bakar yang belum terbakar. Rata-rata pada jarak ini didapatkan temperatur tertinggi dari setiap *nozzle* karena daerah ketinggian tersebut reaksi pembakaran semakin baik akibat reaktan telah mengalami pemanasan awal pada daerah dibawahnya. Akan tetapi khusus pada *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 0 mm justru mengalami penurunan temperatur jika dibandingkan dengan temperatur pada jarak vertikal 100 mm. Hal ini terjadi karena pada *nozzle* 0 mm, kemungkinan seluruh bahan bakar sudah terbakar habis sebelum mencapai jarak 200 mm, sehingga pada titik tinjau tersebut yang terukur hanya sisa panas dari reaksi pembakaran sebelumnya.



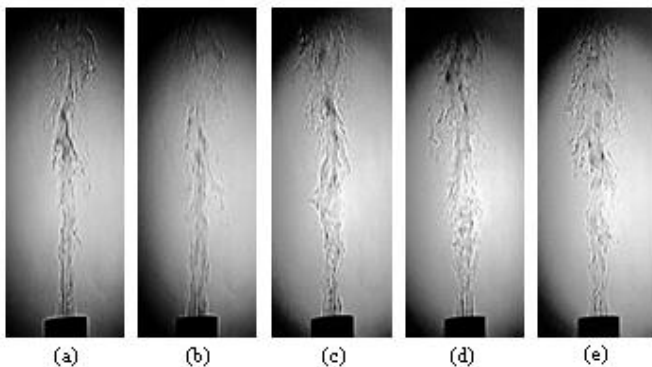
Gambar 10. Grafik distribusi temperatur api pada titik tinjau vertikal 200 mm dengan variasi *lip thickness*

Visualisasi Api Difusi



Gambar 11. Visualisasi api *direct photograph* dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung.

Gambar 11 merupakan visualisasi api secara *direct photograph* dengan variasi *lip thickness nozzle* terpancung pada kondisi kecepatan udara dan bahan bakar yang sama yaitu $V_u = 3,56$ m/s dan $V_b = 11,8$ m/s. Dari gambar 11 (a) terlihat bahwa dengan penggunaan *lip thickness nozzle* terpancung 16 mm, pangkal api terlihat kecil dan semakin melebar keatas seiring bertambahnya tinggi api. Warna pangkal api juga masih didominasi warna kuning yang menunjukkan proses pencampuran bahan bakar dan udara sebagian besar masih melalui proses difusi. Pada gambar 11 (b) mulai terlihat efek perubahan *lip thickness* pada *nozzle* terpancung. Dimana dengan penggunaan *lip thickness* 12 mm nyala pangkal api menjadi sedikit lebih lebar dan semakin terlihat warna biru. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan meningkatnya intensitas turbulensi aliran. Zona resirkulasi aliran semakin membesar seiring dengan mengecilnya *lip thickness* pada *nozzle* terpancung. Kemudian berturut-turut dari gambar 11 (c), (d), dan (e) semakin jelas dimana nyala pangkal api terlihat semakin melebar dan semakin biru yang menunjukkan proses pembakaran semakin sempurna. Secara keseluruhan dengan penggunaan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung pada kecepatan udara dan bahan bakar yang sama, tinggi api dapat dikatakan tidak mengalami perubahan panjang yang signifikan dan warna api dari semua variasi *lip thickness nozzle* terpancung sebagian besar masih didominasi warna kuning yang disebabkan oleh reaksi pembentukan jelaga yang menjadi ciri khas dari pembakaran difusi.



Gambar 12. Visualisasi api *shadowgraph* dengan variasi *lip thickness* pada *nozzle* terpancung.

Hal ini diperkuat dengan visualisasi *shadowgraph* pada gambar 12 (a) dimana terlihat bahwa aliran bahan bakar yang keluar *nozzle* mengalir panjang lurus keatas tanpa gangguan dan berangsur-angsur bercampur dengan udara seiring bertambahnya tinggi api atau berkurangnya tekanan keluar *nozzle*. Dapat dilihat bahwa pada penggunaan *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 16 mm, terjadinya pemecahan laju aliran bahan bakar yang menyebabkan terbentuknya zona resirkulasi aliran masih sangat kecil, akibatnya aliran bahan bakar masih terfokus pada bagian tengah api, sehingga pola

aliran bahan bakar tidak hanya terfokus pada bagian tengah api. Kemudian pada visualisasi *shadowgraph* gambar 12 (b) panjang aliran bahan bakar pada bagian tengah api mengalami penurunan jika dibandingkan gambar 12 (a). Hal ini terjadi akibat adanya perluasan zona resirkulasi aliran, sehingga proses pencampuran antara bahan bakar dan udara lebih baik. Selanjutnya berturut-turut dari gambar 12 (c), (d), dan (e) semakin memperkuat dugaan bahwa semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung menyebabkan zona resirkulasi aliran semakin membesar yang ditandai dengan semakin kecilnya panjang aliran bahan bakar pada bagian tengah api akibat pemecahan laju aliran dan meningkatnya intensitas turbulensi aliran reaktan, sehingga proses *mixing* reaktan semakin baik dan pembakaran semakin sempurna.

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian dapat ditarik kesimpulan:

1. Semakin kecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung mengakibatkan kestabilan dan nyala api difusi *concentric jet flow* semakin meningkat. Kestabilan api difusi *concentric jet flow* terbesar diperoleh pada penggunaan *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 4 mm.
2. Temperatur api difusi *concentric jet flow* tinggi dengan semakin kecilnya *lip thickness* pada *nozzle* terpancung.
3. Temperatur tertinggi diperoleh pada *nozzle* terpancung dengan *lip thickness* 0 mm sebesar $818,27^{\circ}$ C dan berada pada bagian tepi api, yakni pada jarak horizontal 10 mm serta pada jarak vertikal 100 mm.
4. Semakin tinggi kecepatan udara akan membuat nyala api semakin pendek dan melebar. Memperkecil *lip thickness* pada *nozzle* terpancung membuat daerah kestabilan semakin luas karena membuat proses *mixing* reaktan semakin baik sehingga campuran bahan bakar dan udara semakin homogen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coats, C. M., & Zhao, H. 1988. Transition and Stability of Turbulent Jet Diffusion Flames. *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion- The Combustion Institute*, 22, 685–692.
- [2] Takahashi, F., & Schmoll, W. J. 1990. Lifting criteria of jet diffusion flames. *Symposium (International) on Combustion*, 23(1), 677–683.
- [3] Rohmat, T.A., Yoshihashi, T., Obara, T., & Ohyagi, S. 1999. *An Experimental Study of Turbulent Diffusion Flames Established on a Porous Plate Behind a Backward-Facing Step*. Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference, California.
- [4] Miake-Iye, R. C., & Hammer, J. A. 1988. Jet Flames: a Stability Criterion Based on the Jet Large-Scale Structure. *Twentieth Symposium*

- (international) on Combustion. *The Combustion Institute*, 817–824.
- [5] Soenoko, R., 2010. The Effect of a Flame Holder Shape Modification Toward the Diffusion Flame Stability Zone Shift, *8(3)*, 339–344.
- [6] Akbar L., 2013. Pengaruh Sudut Cetral Fuel Tube Terhadap Kestabilan dan Temperatur Nyala Api Difusi Double Concentric Jet Flow. Vol.III: 122.04.XII.592.
- [7] Widodo, A. S., 2004, *Pengaruh Posisi dan Sudut Kemiringan Swirl Terhadap Kestabilan Pancaran Api Difusi Double Concentric*, Malang: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Vol. 16 No.2, Lembaga Penelitian Universitas Brawijaya.