

## **Analisis Pengaruh *Swirl Number* Terhadap Peningkatan Stabilitas Nyala *Premix* Dan Karakteristik *Lift-Up Flame* Pada Modifikasi Bunsen Burner Menggunakan *Rotating Swirl Fan***

I Made Kartika Dhiputra<sup>1, a</sup>, Ridho Ernandi<sup>2, b\*</sup>, Shahwardhana Iskandar Siregar<sup>3, c</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Flame and Combustion Research Group Laboratory of Thermodynamics  
Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424, Indonesia  
email: dhiputra\_made@yahoo.com, ridhoernandi@yahoo.co.id, ardhansiregar@yahoo.com

### **Abstrak**

Stabilitas nyala api merupakan salah satu aspek penting dari teknik pembakaran yang memiliki aplikasi yang sangat luas, baik dari segi kebermanfaatan energi maupun keselamatan dari kebakaran. Penggunaan dari daerah stabilitas nyala api terlihat dari kemampuan untuk mengatur letak pembakaran, tinggi nyala sesuai dengan konsumsi udara yang dibutuhkan.

Upaya kajian teoritis untuk meningkatkan nilai stabilitas nyala api terus ditingkatkan. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan luas stabilitas nyala api pada penggunaan bahan bakar LPG dengan cara penambahan “*swirl flow*” (aliran pusar) saat pencampuran udara dan bahan bakar pada nyala api premix. *Swirl flow* dihasilkan oleh *rotating fan mixer* dan dikuantifikasikan dengan bilangan tak berdimensi *swirl number* sesuai dengan peningkatan putaran. Variasi *swirl number* yang digunakan adalah 0, 0.44, 0.86, 1.28, 1.69, 2.06, 2.17. Laju aliran LPG divariasikan pada 300 cc/min, 350 cc/min, 400 cc/min, 450 cc/min, 500 cc/min, 550cc/min, 600 cc/min.

Hasil penelitian ini menunjukkan luas stabilitas nyala api meningkat seiring dengan peningkatan *Swirl Number*. Hasil penelitian menunjukkan dengan peningkatan *swirl number*, luasan stabilitas nyala api meningkat sebesar 7.09 %, 16.67 %, 27%.50 %, 29.41 %, 41,43 % dan 57.65 % seiring dengan peningkatan *swirl number*.

Eksperimen *flame lift-up* dilakukan pada *Bunsen burner* berdiameter luar 30 mm dengan modifikasi tambahan *rotating swirl fan* dan dengan *bluff body* berbentuk *ring* dari *stainless steel*. Diameter *ring* yang dipakai dalam eksperimen adalah 12 mm. Posisi *ring* ke *Bunsen burner* divariasikan dalam tiga posisi, yaitu 10, 15, dan 20 mm. Bahan bakar yang digunakan adalah gas LPG dengan komposisi massa propana 50 % dan butana 50%. Eksperimen ini dilakukan pada tiga variasi laju bahan bakar dengan *range* 0.0033 – 0.0050 L/s. Pengambilan data dilakukan dengan merekam fenomena dalam ruangan gelap menggunakan kamera digital Panasonic Lumix DMC-F2 dengan spesifikasi video 30 fps dan kualitas gambar 848 x 480 pixel. Parameter yang diukur adalah stabilitas api dan tinggi nyala api keseluruhan ( $L_f$ ). Hasil Eksperimen menunjukkan bahwa kurva kestabilan *lift-up* pada diagram *Fuidgesedikit* menurun dengan bertambahnya nilai *swirl number*. Panjang nyala api *lift-up* bertambah seiring dengan penambahan *burning load* dan berkurang ketika jarak *ring* semakin menjauh dari *nozzle*. Nyala api pun semakin sulit untuk *lift-up* dan nyala stabil di atas *ring* ketika nilai *swirl number* ditingkatkan.

**Kata kunci:** *Swirl number*, stabilitas nyala, *lift-up flame*, *Bunsen burner*, *rotating swirl fan*

## Pendahuluan

Pembakaran memiliki peranan yang vital dalam kehidupan sehari-hari khususnya pada zaman sekarang ini. Pemanfaatan bahan bakar fosil tidak dapat terlepas dari aktivitas masyarakat. Teknik pembakaran sendiri, sebagai suatu ilmu, memainkan peranan penting dalam mengefisienkan pemakaian bahan bakar fosil yang digunakan.

Ketergantungan manusia pada energi yang dihasilkan dari pembakaran meningkat pesat dalam beberapa dekade terakhir. Pembakaran digunakan pada berbagai keperluan manusia sehari – hari, mulai dari memasak sampai membangkitkan listrik. Dan seperti yang sudah diketahui, ketersediaan bahan bakar fosil yang sering digunakan sebagai bahan bakar makin menipis. Sehingga, efisiensi pembakaran sangat perlu ditingkatkan untuk mendapatkan pembakaran yang optimal sekaligus mengurangi konsumsi bahan bakar fosil.

Kajian eksperimental maupun kajian teoritis tentang pembakaran telah banyak dilakukan untuk lebih memahami fenomena pembakaran. Dengan kondisi ketersediaan bahan bakar yang semakin langka, kajian tentang pembakaran sangat mempengaruhi penghematan penggunaan bahan bakar.

Selain itu, masalah keamanan juga sangat mempengaruhi dalam aplikasi praktis pemakaian gas dalam aktivitas sehari-hari. Sebagaimana yang telah diketahui, api, sebagai daerah terjadinya reaksi pembakaran, yakni oksidasi bahan bakar, bisa saja tiba-tiba padam akibat terjadinya fenomena *blow off* dan api bisa saja terbakar dalam kondisi yang tidak stabil dan liar. Sebagai konsekuensi, penelitian tentang stabilitas nyala api sangat diperlukan.

Salah satu faktor yang menentukan stabilitas nyala api ialah rasio perbandingan udara dan bahan bakar (*air to fuel ratio*), *burning load*, bentuk aliran dan homogenitas campuran.

Untuk memperbaiki efisiensi pembakaran akibat pengaruh kondisi burner, dapat dilakukan dengan meneliti karakteristik nyala api seperti stabilitas nyala dan panjang nyala api. Karakteristik ini dapat dioptimalkan dengan cara memasang benda penghalang (*bluff body*) berupa batang (*rod*) maupun cincin (*ring stabilizer*), pemantik (*ignitor*) atau *pilot flame* [12, 13, 14]. Dengan adanya *bluff body* ini, fenomena api padam (*blow-off*) yang diakibatkan karena kecepatan campuran udara-bahan bakar lebih besar daripada kecepatan pembakaran dapat dicegah. Selain itu, *bluff body* juga membuat api terangkat dan menyala di atasnya yang disebut dengan fenomena *flame lift-up*. Dengan demikian,

*nozzle* terhindar dari kerusakan erosi akibat nyala api yang terus-menerus pada dinding *nozzle* [17].

## Dasar Teori

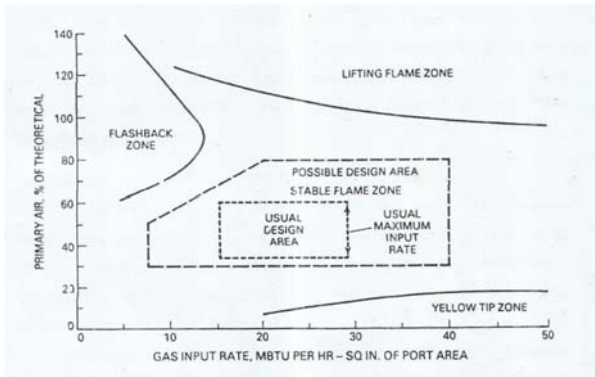
Nyala api stabil adalah kondisi dimana fenomena api terjadi pada daerah dibawah kurva *blow off* dan diatas kurva *yellow tip*. Nyala api stabil ditandai dengan bentuk api yang berwarna biru, panjang memendek membentuk kerucut, stabil dan tidak liar.

Fenomena yang berkaitan erat dengan kestabilan nyala api ialah *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan *lift-up*. Parameter lainnya yang dapat menggambarkan stabilitas nyala ialah gradien kecepatan nyala, daerah stabilitas nyala, dan batas mampu nyala. Daerah stabilitas nyala tidak lain merupakan penggambaran dari daerah *flashback*, *lifting flame*, dan *yellow tip* yang membatasi daerah stabilitas.

Fenomena *flame lift-up* merupakan peristiwa di mana nyala api terangkat (tidak menyentuh mulut tabung) pada jarak tertentu dari ujung mulut tabung. Fenomena ini terjadi apabila kecepatan aliran lebih besar dari kecepatan nyala api laminar lokal. Semakin kecil kecepatan aliran (namun tetap lebih besar dari kecepatan nyala), semakin dekat jarak antara ujung bawah api dengan mulut tabung. Sebaliknya, semakin besar kecepatan aliran (namun di bawah kecepatan kritis), semakin besar jarak antara ujung bawah nyala api dengan mulut tabung serta sudut kerucut nyala turun dan ujung nyala sedikit bergeser ke bawah.

Jika kecepatan aliran terus dinaikkan melebihi kecepatan kritis, maka nyala akan padam. Fenomena ketinggian *lift-off* dipengaruhi oleh gravitasi; tanpa gravitasi ketinggian *lift-off* akan menurun meskipun dengan fraksi bahan bakar yang sama.

Gambar 1. di bawah menunjukkan daerah stabilitas nyala dengan bahan bakar industri yang berisi hidrogen. Bekerja pada daerah atas *lifting* mengakibatkan terjadinya *lift-up*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 1. Diagram kestabilan yellow tip, flashback, dan lift-off untuk bahan bakar gas industri [1]

### Campuran Udara-Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor pembakaran, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen ( $\Phi$ ).

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \quad (2)$$

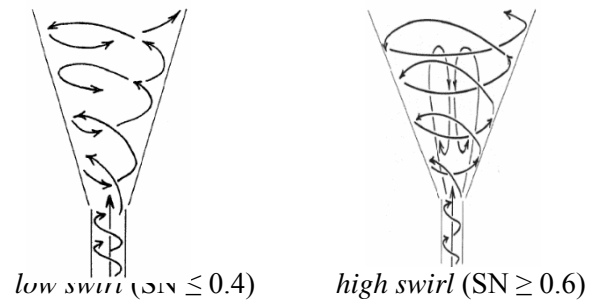
$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (3)$$

### Swirl Number

*Swirl number* adalah merupakan bilangan non dimensional yang tingkatan atau derajat pusaran (*swirl*) pada sebuah aliran yang berpusar (*swirling flow*). Menurut Chigier dan Beer [8] dan disederhanakan oleh Sheen et al. [9], nilai dari *swirl number* dapat diperoleh dengan menggunakan rumus berikut:

$$SN = \frac{G_{tg}}{R \times G_{ax}} = \frac{\int_0^R w u r^2 dr}{R \int_0^R u^2 r dr}$$

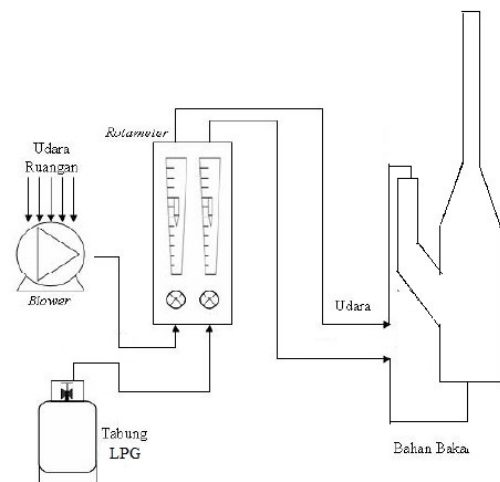
Selain itu, aliran berpusar dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan nilai *swirl number* yang dimiliki oleh aliran tersebut seperti yang ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Jenis aliran berpusar

### Metode Penelitian

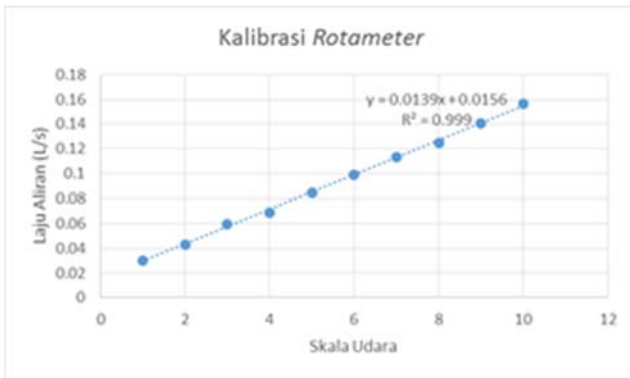
Pengambilan data dalam eksperimen ini dengan menggunakan cara eksperimental. Parameter yang dicari atau variabel bebas dalam kajian eksperimen ini adalah rasio AFR yang terjadi di ruang bakar jet sehingga terjadi *lift-up* sedangkan variabel yang diubah yakni aliran debit bahan bakar, debit udara, variasi putaran *rotating fan*, dan variasi jarak *ring*. Variasi debit bahan bakar yang diambil yakni untuk karakteristik nyala mulai dari 300 hingga 600 cc/min dengan interval 50 cc/min, dan untuk fenomena *lift-up* sebanyak 3 variasi mulai dari 200, 250, 300 cc/min pada skala *flowmeter*. Untuk variasi putaran fan ada enam, yaitu 0, 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 rpm untuk eksperimen karakteristik nyala dan empat variasi untuk eksperimen nyala *apilift-up*, yaitu 0, 1000, 1250, dan 1500 rpm. Selain itu, variasi posisi *ring* yang diambil yakni sebanyak 3 variasi yakni dimulai dari 10 mm, 15 mm, dan 20 mm.



Gambar 3. Perancangan Set-up Alat Penelitian  
(4)

### Kalibrasi Rotameter

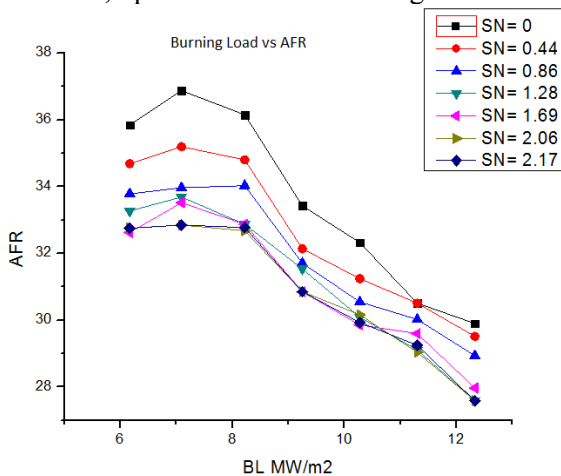
Set up alat penelitian seperti Gambar 3. diatas, yang dilengkapi dengan *Rotameter* yang terdapat pada unit P.A. Hilton memiliki skala baca dalam cm yang dapat dibaca langsung dalam percobaan, tetapi dalam pengolahan data, ukuran dalam cm tersebut harus dikonversikan terlebih dahulu menjadi satuan kapasitas aliran dalam m<sup>3</sup>/s. Alat yang digunakan untuk penyesuaian skala *rotameter* ini yaitu *Type-WE25AWet Gas Meter*. Alat ini memiliki temperature maksimum 60°C dan tekanan maksimum 1000 mmH<sub>2</sub>O. *Wet Gas Meter* ini memiliki volume 5 L, jadi jika jarum besar melakukan satu putaran maka telah mengalirkan 5 L cairan pengisi. Laju aliran gas yang diukur dapat diketahui dengan mencatat waktu tempuh aliran gas tersebut dalam melakukan satu putaran atau sebesar 5 L.



Gambar 4. Penyesuaian skala untuk udara

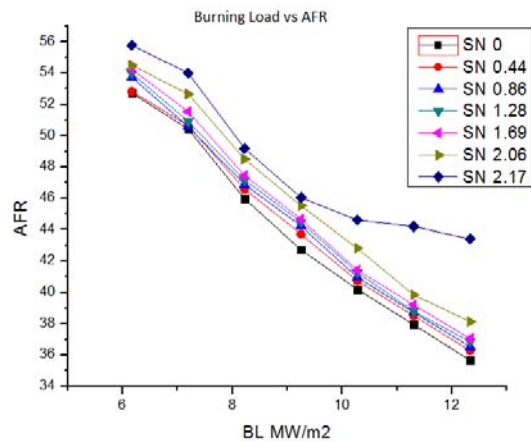
### Hasil dan Diskusi

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, diperoleh hasil-hasil sebagai berikut.



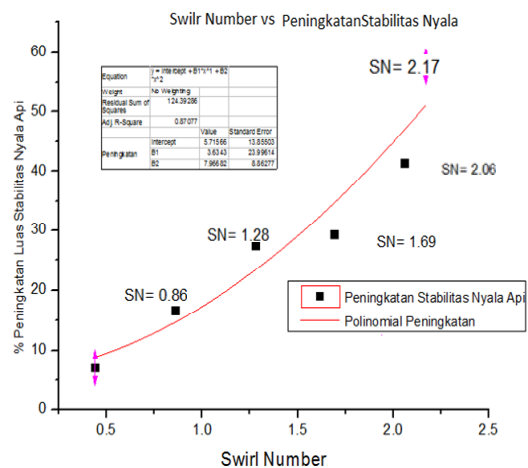
Gambar 5. Grafik perbandingan antara *Burning load* dan *AFR* pada saat terjadinya fenomena *yellow tip* dengan berbagai variasi *swirl number*

Pada grafik diatas terlihat bahwa garis *yellow tip* bergerak turun seiring dengan peningkatan *Swirl Number* atau aliran pusar. Hal ini disebabkan oleh efek peningkatan *swirl number* sebagai indikator aliran pusar menyebabkan peningkatan daerah stabilitas nyala api. Peningkatan aliran pusar memberikan efek pencampuran udara dan bahan bakar yang lebih baik atau semakin *homogen* sehingga memberikan efek kecepatan pembakaran yang semakin meningkat dan pembakaran terjadi semakin sempurna.



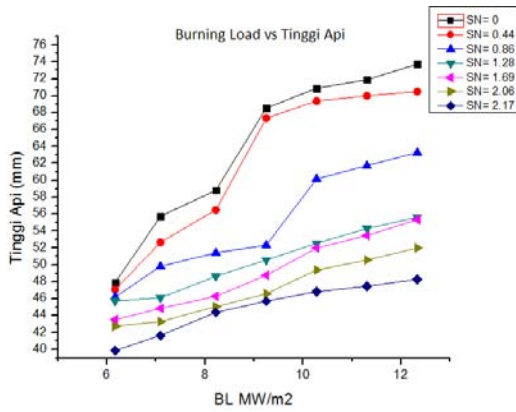
Gambar6. Grafik perbandingan antara *Burning load* dan *AFR* pada saat terjadinya fenomena *blow off* dengan berbagai variasi *swirl number*

Pada grafik diatas terlihat bahwa garis *blow off* bergerak keatas seiring dengan peningkatan *Swirl Number*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan aliran pusar memberikan efek pencampuran udara dan bahan bakar semakin *homogen* sehingga memberikan efek meningkatnya kecepatan pembakaran dan pembakaran terjadi semakin sempurna.

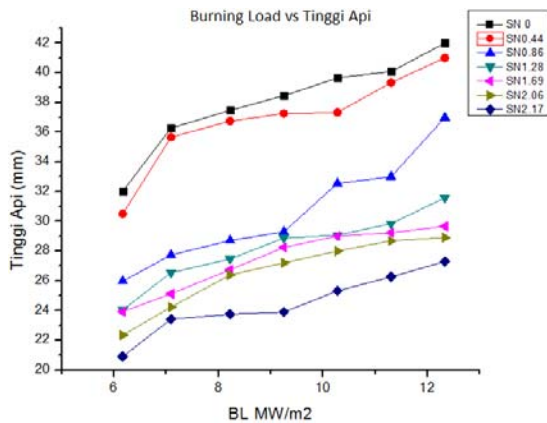


Gambar 7. Grafik perbandingan antara *swirl number* dengan peningkatan daerah stabilitas nyala api

Pada grafik diatas terlihat bahwa luas stabilitas nyala api semakin meningkat seiring dengan peningkatan burning load. Hasil ini sesuai dengan jurnal oleh J.M Cha dan S.H Sohrab, "Stabilization of Premixed of Flames on Rotating Bunsen Burner", *Combustion and Flame*, Elsevier Science Inc., 106; 467-447 (1996) [7]. Peningkatan terjadi dikarenakan penurunan luas fenomena dibawah garis yellow tip dan peningkatan luas dibawah garis blow off akibat kemampuan peningkatan kemampuan pembakaran pada kondisi lean dan rich bahan bakar



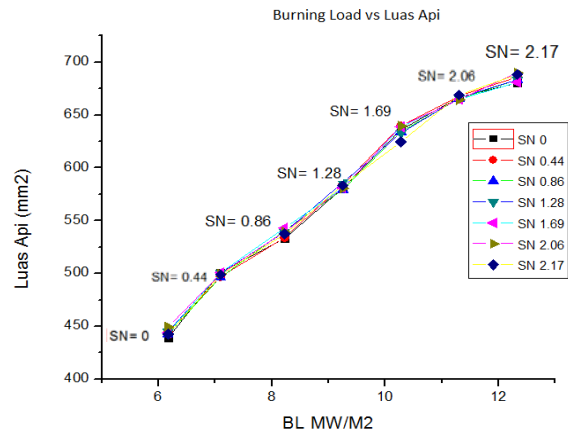
Gambar 8. Grafik perbandingan antara *burning load* dan tinggi nyala api yellow tip dengan berbagai variasi *swirl number*



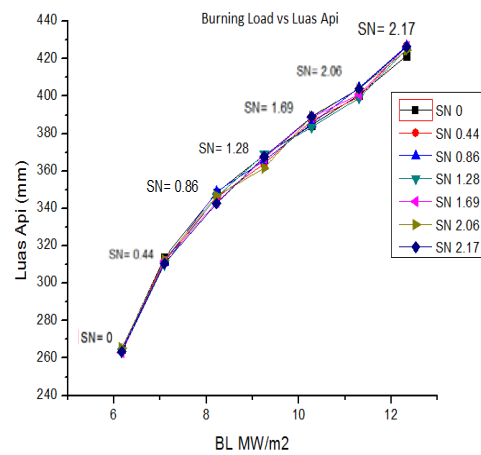
Gambar 9. Grafik perbandingan antara *burning load* dan tinggi nyala api blow off dengan berbagai variasi *swirl number*

Pada kedua grafik di atas terlihat bahwa, peningkatan burning load akan menyebabkan semakin meningkatnya tinggi api. Hal ini karena tinggi api berbanding lurus dengan energi yang dilepaskan atau energi input. Akan tetapi tinggi api akan menurun seiring dengan peningkatan *swirl number*. Hal ini menandakan dengan peningkatan *swirl number* akan memberikan efek peningkatan homogenitas campuran udara bahan

bakar dan semakin sempurna pembakaran sehingga akan mempercepat proses pembakaran sehingga akan memendek.

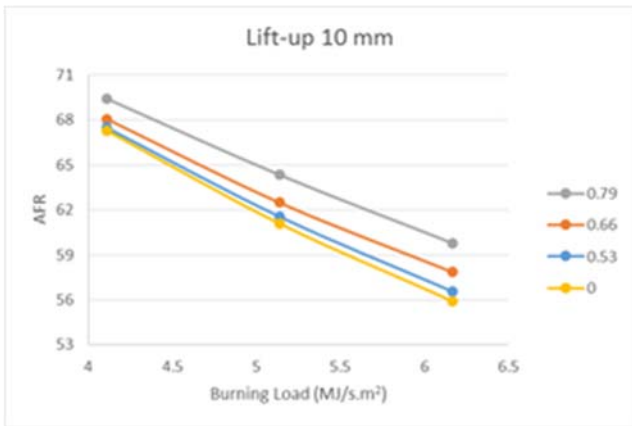


load dan luas nyala api yellow tip dengan berbagai variasi *swirl number*

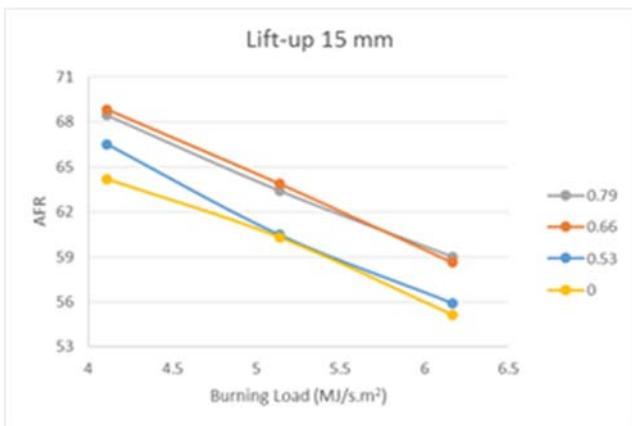


Gambar 11. Grafik perbandingan antara *burning load* dan luas nyala api blow off dengan berbagai variasi *swirl number*

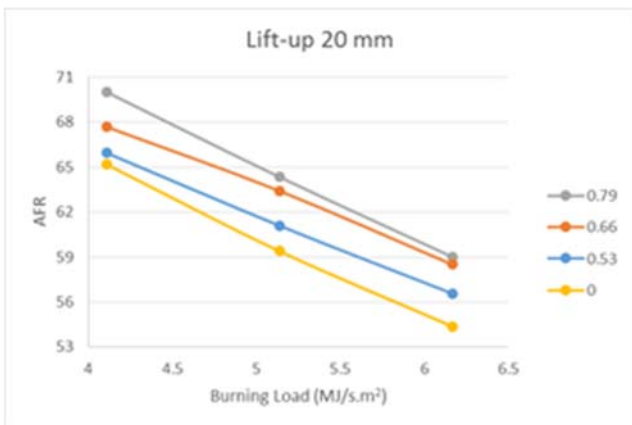
Pada grafik di atas terlihat bahwa peningkatan burning load akan menyebabkan semakin meningkatnya luas api. Hal ini karena luas api merupakan indikator heat release atau kalor yang dilepaskan pada pembakaran. *Heat release* akan meningkat seiring dengan peningkatan burning load dikarenakan kita menambahkan energi input bahan bakar. Akan tetapi relative konstan pada peningkatan swirl number karena peningkatan Swirl number hanya melakukan peningkatan pencampuran udara dan bahan bakar sehingga peningkatannya tidak terlalu signifikan.



Gambar 12. Grafik kestabilan nyala apilift-up pada X = 10 mm



Gambar 13. Grafik kestabilan nyala apilift-up pada X = 15 mm



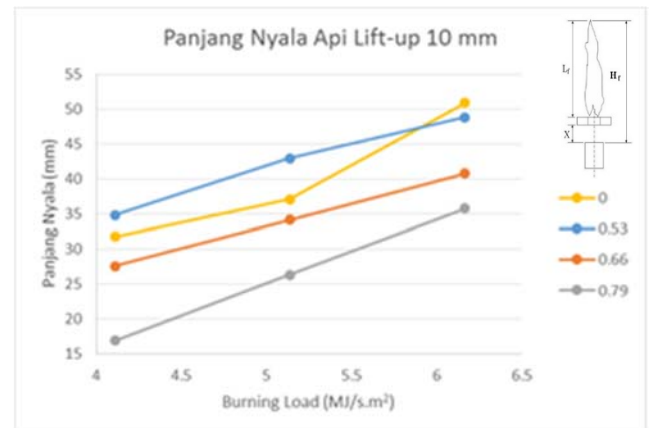
Gambar 14. Grafik kestabilan nyala apilift-up pada X = 20 mm

Ketiga grafik di atas merupakan grafik kestabilan nyala apilift-up. Dapat terlihat bahwa kestabilan nyala apilift-up semakin menurun dengan adanya kenaikan nilai *burning load* (BL). Hal ini disebabkan oleh adanya penambahan jumlah bahan bakar yang mengalir ke dalam

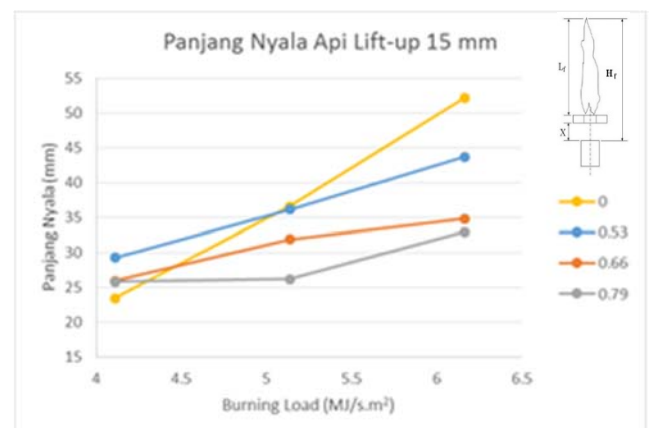
*burner*. Dengan adanya peningkatan laju bahan bakar, maka reaksi pun akan menjadi semakin lambat pada laju udara tetap dan berdampak pada turunnya kestabilan nyala api *lift-up*.

Hal yang berbeda terjadi ketika adanya kenaikan nilai *swirl number*, di mana kestabilan nyala semakin meningkat untuk setiap *burning load* yang tetap. Hal ini disebabkan karena campuran udara-bahan bakar menjadi lebih homogen sehingga reaksi pembakaran menjadi lebih sempurna. Dengan demikian, kenaikan *swirl number* ini dapat memungkinkan reaksi pembakaran akan tetap terjadi walaupun dengan kondisi campuran udara-bahan bakar yang lebih miskin.

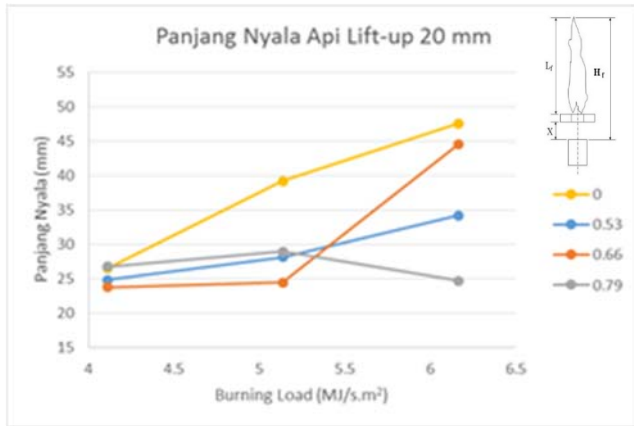
Untuk perubahan jarak *ring stabilizer* dari ujung *nozzle*, juga turut mempengaruhi kestabilan nyala apilift-up. Jika jarak *ring stabilizer* semakin jauh dari ujung *nozzle*, maka kestabilan nyala apilift-up pun akan turun, walaupun tidak sebesar pengaruh yang diberikan oleh variasi *burning load* dan *swirl number*.



Gambar 15. Panjang nyala apilift-up ( $L_r$ ) pada X = 10 mm

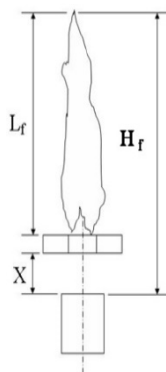


Gambar 16. Panjang nyala apilift-up ( $L_r$ ) pada X = 15 mm



Gambar 17. Panjang nyala apilift-up ( $L_f$ ) pada  $X = 20$  mm

Grafik-grafik di atas menjelaskan perubahan panjang nyala apilift-up. Dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai *burning load* (BL) akan menyebabkan naiknya panjang nyala api lift-up ( $L_f$ ). Hal ini disebabkan karena kenaikan *burning load* dipengaruhi oleh kenaikan laju aliran bahan bakar. Selain itu, perubahan panjang nyala apilift-up juga dipengaruhi faktor lainnya, yaitu variasi *swirl number* yang berbanding lurus dengan kecepatan putaran kipas (rpm). Dengan adanya peningkatan besarnya nilai *swirl number* akan menyebabkan penurunan pada panjang nyala api ( $L_f$ ). Hal ini disebabkan karena semakin tinggi *swirl number* akan menyebabkan campuran udara-bahan bakar akan semakin homogen dan mudah terbakar sehingga reaksi pembakaran yang terjadi lebih sempurna. Hasil ini sesuai dengan hasil yang didapat oleh M. S. Cha, D. S. Lee, dan S. H. Chung pada jurnal internasional yang berjudul “*Effect of Swirl on Lifted Flame Characteristics in Nonpremixed Jets*” [6]. Hal ini tentunya akan jauh lebih menguntungkan karena kemungkinan terbentuknya gas hasil pembakaran yang tidak sempurna, yaitu karbon monoksida (CO) akan semakin kecil.



Gambar 18. Tinggi nyala keseluruhan ( $H_f$ ), panjang nyala ( $L_f$ ), dan jarak *ring* dari *nozzle* ( $X$ )

Perubahan jarak *ring stabilizer* juga turut mempengaruhi panjang nyala apilift-up. Hal ini dikarenakan untuk setiap *burning load* yang tetap, energi yang dihasilkan juga tetap, sehingga tinggi nyala api keseluruhan ( $H_f$ ) dari ujung *nozzle* dianggap konstan. Dengan semakin jauhnya jarak *ring stabilizer* dari ujung *nozzle*, maka tentu akan mengurangi panjang nyala api lift-up karena tinggi nyala api keseluruhan ( $H_f$ ) telah berkurang oleh jarak *ring stabilizer* dari ujung *nozzle*.

### Kesimpulan

1. Peningkatan putaran atau peningkatan swirl number, memberikan efek peningkatan daerah stabilitas nyala api sebesar 7.09 %, 16.67% , 27.50 %, 29.41 %, 41.43 %, 57.65 % dengan peningkatan SN 0.44, 0.86, 1.28, 1.69, 2.06, dan 2.17.
2. Peningkatan putaran atau peningkatan swirl number memberikan efek penurunan tinggi api yellow tip dan blow off sebesar 1.07 % s/d 34.9 %.
3. Peningkatan luas api terjadi sebesar 48.78 mm<sup>2</sup> s.d 156.8 mm<sup>2</sup> seiring dengan peningkatan *burning load*, namun luas api relatif konstan seiring dengan peningkatan swirl number.
4. Batasan swirl number di mana fenomena lift-up masih terjadi pada penelitian ini adalah 0 – 0.79
5. Kestabilan nyala api lift-up meningkat ketika swirl number ditingkatkan.
6. Panjang nyala api lift-up menurun ketika ada peningkatan pada swirl number dan jarak *ring stabilizer*.
7. Panjang nyala api lift-up semakin bertambah seiring dengan kenaikan *burning load*.

### Referensi

- [1] Turns, Stephen R. 1996. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- [2] Chigier, Norman. 1981. *Energy, Combustion, and Environment*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Cengel, Yunus A., Boles, Michael A. 2002. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill.
- [4] Kuo, Kenneth Kuan-Yun. 1986. *Principle of Combustion*. John Wiley & Sons.
- [5] Drysdale, Dougal. 1998. *An introduction to fire dynamics*. England: John Wiley & Sons.
- [6] Cha, M. S., Lee, D. S., Chung, S. H. 1999. Effect of Swirl on Lifted Flame Characteristics in Nonpremixed Jets. *Combustion and Flame*, 117: 636-645.

- [7] J.M Cha dan S.H Sohrab, “*Stabilization of Premixed of Flames on Rotating Bunsen Burner*”, *Combustion and Flame*, Elsevier Science Inc., 106; 467-447 (1996)
- [8] N. A. Chigier, and J. M. Bedr. 1964. *J. Basic Eng.* 788-796.
- [9] H.J. Sheen, W.J. Chen, S.Y. Jeng, T.L. Huang. 1996. *Experimental Thermal and Fluid Science* (12) 444-451.
- [10] Sonju, O. K., Hustad, J. Poitiers, France 1983., AIAA, 1984. *An experimental study of turbulent jet diffusion flames*. 9th ICODERS.
- [11] Rokke, Nils A. 1986. *A Study of Partially Premixed Unconfined Propane Flames*. *Combustion and Flame*, 97, 88-106.
- [12] Fujii, S., Gomi, M., Eguchi, K. 1978. *Cold flow tests of a bluff-body flame stabilizer*. *ASME, Transactions, Journal of Fluids Engineering*, 100, 323-332.
- [13] Nemoda, Stevan., Bakic, Vukman., Oka, Simeon., Zivkovic, Goran., Crnomarkovic, Nenad. 2005. *Experimental and numerical investigation of gaseous fuel combustion in swirl chamber*. *International Journal of Thermal Sciences*, 44, Issue 10, 973-985.
- [14] Shanbhogue, Santosh J., Husain, Sajjad., Lieuwen, Tim. 2005. *Lean blow off of bluff body stabilized flames: scaling and dynamic*. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35, 98-120.
- [15] Kalghatgi, G.T. 1984. *Lift-off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Diffusion Flames in Still Air*. *Combust. Sci Tech.* 41: 17-29.
- [16] Walsh, Kevin T., Fielding, Joseph., Smooke, Mitchell D., Long, Marshall B., Linan, Amable. 2005. *A comparison of computational and experimental of lift-off heights of coflow laminar diffusion flames*. *Proceeding of the Combustion Institute*, 30, 357-365.
- [17] Mahandari, Cokorda Prapti. 2010. *Fenomena Flame Lift-Up pada Pembakaran Gas Propana*. Disertasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia.