

Pengaruh *Air Fuel Ratio* Terhadap Kecepatan Rambat Api dan Emisi Gas Buang Berbahan Bakar LPG Pada Ruang Bakar *Model Helle-Shaw Cell*

I GustiNgurahPutuTenaya^a, I Made EkaAstina^a, Made Hardiana^a

^aJurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana
Kampus Bukit Jimbaran Badung – Bali 80361 Telp/Faks: 0361-703321

Abstrak

Meningkatnya jumlah penduduk Indonesia sangat berpengaruh terhadap konsumsi bahan bakar khususnya di bidang transportasi. Mengingat cadangan bahan bakar Indonesia khususnya minyak bumi sudah menipis maka untuk mengantisipasi kekurangan minyak bumi tersebut telah digunakan bahan bakar gas salah satunya Liquefied Petroleum Gas (LPG). Cadangan LPG yang dimiliki oleh negeri kita cukup besar maka berbagai penelitian mengenai pemanfaatan dan penggunaan secara lebih efisien masih perlu dilaksanakan. Dalam kesempurnaan pembakaran ada tiga hal yang mempengaruhi seperti perbandingan udara dan bahan bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*), kehomogenan pencampuran dan temperatur pembakaran. Sempurna atau tidaknya proses pembakaran bisa dilihat dari kecepatan rambat api dan kandungan emisi gas buangnya, maka dari itu penulis melakukan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh *AFR* terhadap kecepatan rambat api dan emisi gas buang berbahan bakar LPG.

Pengujian ini menggunakan ruang bakar model Helle-Shaw Cell berukuran 55 x 20 x 1 cm, yang terbuat dari bahan acrylic. Variasi *AFR* yang diuji adalah 14:1, 15:1, 16:1, 17:1, 18:1, 19:1, 20:1, dan 21:1. Untuk kecepatan rambat api, data yang terukur berupa gambar perambatan api yang direkam dengan handycam. Hasil rekaman dengan handycam disimpan dengan format file WMV kemudian dengan menggunakan software Pinnacle 8, diextract menjadi beberapa frame gambar. Untuk menampilkan bentuk atau pola rambat api digunakan software Adobe Photoshop CS 3. Hasil gambar dari Adobe Photoshop CS 3 diberi ukuran menggunakan software Autocad 2007 sehingga mendapatkan suatu jarak dari setiap nyala api. Sedangkan untuk emisi gas buang data yang di amati adalah CO, CO₂, O₂, dan HC dengan menggunakan alat gas analyzer. Hasil pengukuran selanjutnya diolah dengan Microsoft Excel untuk mendapatkan tabel dan grafik kecepatan rambat api dan emisi gas buangnya.

Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa *AFR* stoichiometry untuk bahan bakar LPG adalah 20:1. Semakin mendekati *AFR* stoichiometry, warna api berubah dari warna kemerahan menjadi merah yang pudar, biru kemerahan, biru, dan terakhir biru cerah. Dengan menaikkan *AFR* dari 14:1 sampai 20:1 kadar CO, O₂, dan HC menurun sedangkan CO₂ meningkat setelah itu pada *AFR* 21:1 kadar CO, O₂, dan HC sedikit mengalami peningkatan sedangkan CO₂ sedikit mengalami penurunan. Pada *AFR* stoichiometry terjadi kecepatan rambat api maksimum, kecepatan rambat api rata-rata maksimum, emisi gas buang CO, O₂, HC minimum dan emisi gas buang CO₂ maximum.

Kata kunci: bahan bakar LPG, air fuel ratio, kecepatan rambat api, emisi gas buang, helle-shaw cell

Pendahuluan

Meningkatnya jumlah penduduk Indonesia sangat berpengaruh terhadap konsumsi masyarakat akan bahan bakar khususnya di bidang transportasi. Mengingat cadangan minyak bumi sudah menipis maka untuk mengantisipasi dan menghadapi kekurangan bahan bakar tersebut telah digunakan bahan bakar gas, salah satunya LPG (*Liquefied Petroleum Gas*), dimana LPG merupakan senyawa hydrocarbon yang terbentuk dari unsur C₃H₈ (propana) dan C₄H₁₀ (butana), diberikan tekanan sampai dengan 300 *psi* sehingga unsur tersebut berubah fase menjadi cair. Perbandingan komposisi

propana dengan butana adalah 30 : 70. LPG tidak memiliki sifat pelumasan pada material yang terbuat dari logam dan juga tidak mengandung racun. Karena LPG merupakan gas yang tidak berbau maka untuk keselamatan, LPG komersial perlu ditambahkan zat ordon yaitu Ethyl Mercaptane yang berbau menyengat.

Cadangan LPG yang dimiliki oleh negeri kita cukup besar maka berbagai penelitian mengenai pemanfaatan dan penggunaan secara lebih efisien masih perlu dilaksanakan.

Penelitian ini berupaya untuk mendapatkan pemahaman terhadap salah satu karakteristik LPG yang sangat berpengaruh terhadap kesempurnaan pembakara

n. Dalam kesempurnaan pembakaran ada tiga hal yang mempengaruhinya seperti perbandingan udara dan bahan bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR), kehomogenan campuran, dan temperatur pembakaran. Pada *air fuel ratio* terdapat campuran kaya dan campuran kurus. Campuran kaya adalah campuran dimana jumlah bahan bakar lebih banyak dibandingkan dengan udara, sedangkan campuran kurus adalah campuran yang kekurangan bahan bakar atau kelebihan udara. Antar campuran kaya dan campuran kurus terdapat campuran *stoichiometry*, yaitu campuran dimana perbandingan antara udara dengan bahan bakar dalam keadaan setimbang. Perbandingan bahan bakar dengan udara yang kurang sempurna akan berdampak pada kesempurnaan pembakaran. Sempurna atau tidaknya proses pembakaran dapat dilihat pada kecepatan rambat api dan emisi gas buangnya. Untuk itu, agar mendapatkan hasil yang baik diperlukan perbandingan campuran antara bahan bakar dan udara yang sempurna. Beberapa peneliti yang melakukan penelitian tentang fenomena pembakaran adalah Hartman (1931) yang meneliti tentang pengaruh *air fuel ratio* terhadap kecepatan penyalaan, menyatakan bahwa untuk bahan bakar *hydrocarbon* puncak dari kecepatan api terjadi pada campuran *stoichiometry*. Suatu eksperimen yang dilakukan oleh Broda, *et.al.* (1998) terhadap dinamika pembakaran pada turbin gas. Pada penelitian tersebut diamati pengaruh *equivalence ratio* (Φ) atau perbandingan antara *air fuel ratio* teoritis ($AFR_{teoritis}$) dengan *air fuel ratio* aktual (AFR_{aktual}) dan tekanan kompresi ruang bakar terhadap emisi gas buang terutama NOx dan CO. Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa untuk Φ antara 0,52 – 0,60 menghasilkan emisi gas NOx dan CO sangat rendah, sedangkan $\Phi = 0,60$ keatas menghasilkan emisi gas NOx dan CO sangat tinggi. Adi Winarta (2007) juga melakukan penelitian tentang pengaruh perbandingan campuran udara dengan bahan bakar terhadap kecepatan rambat api dengan menggunakan bahan bakar gas (BBG), hasil penelitian menunjukkan bahwa *stoichiometry* untuk pembakaran BBG adalah pada AFR 8 : 1 dan kecepatan rambat api maksimum dicapai pada campuran *stoichiometry*. Mengingat belum ada yang meneliti tentang pengaruh *air fuel ratio* terhadap kecepatan rambat api sekaligus terhadap emisi gas buang bahan bakar LPG dan untuk mendukung upaya diversifikasi bahan bakar LPG sebagai bahan bakar kendaraan bermotor maka perlu dilakukan penelitian dasar mengenai hal tersebut di atas.

Metoda Eksperimen

• Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana.

• Variabel Penelitian

Variabel yang diamati dalam penelitian ini adalah kecepatan rambat api dan emisi gas buang yaitu: CO, CO₂, O₂, dan HC pada ruang bakar model *Helle-shaw cell*, sedangkan perlakuan yang diberikan adalah variasi *air fuel ratio* yaitu: 14:1, 15:1, 16:1, 17:1, 18:1, 19:1, 20:1, 21:1 dengan penyalaan dari atas.

• Alat dan Bahan

Ruang bakar model *Helle-shaw cell* seperti gambar 1, dengan ukuran 55 x 20 x 1 cm yang terbuat dari 2 buah bahan acrylic dengan ukuran 61 cm x 26 cm x 1 cm dan 1 buah acrylic ukuran yang sama dengan lubang di dalamnya yang berukuran 55 cm x 20 cm x 1 cm. Bahan bakar gas yang digunakan diambil dari gas LPG yang diproduksi dan dipasarkan oleh PT. Pertamina.

• Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Instalasi

Keterangan:

1. Ruang bakar model *helle-shawcell*.
2. Pemantik.
3. Tabung pelimpahan.
4. Tabung LPG.
5. Kompresor.
6. Selang udara & LPG.
7. Katup.
8. *Handycam*.
9. Komputer.
10. *Gas analyzer*.

• Metode Pengambilan Data

Untuk mendapatkan perbandingan udara dengan bahan bakar (*air fuel ratio*) yang diinginkan, diperoleh dengan membagi volume dari ruang bakar. Misalnya untuk *air fuel ratio* 20:1, maka volume ruang bakar dibagi menjadi 21 bagian lalu bahan bakar LPG dialirkan ke ruang bakar sampai menempati 1 bagian volume tersebut sisanya 20 bagian diisi udara.

Urutan pelaksanaan pengambilan data adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengisi ruang bakar dengan air hingga penuh melalui kran atas.
3. *Handycam* diatur dudukan di atas *threepod*.
4. Penyala dihubungkan pada terminal bagian atas.
5. Memasukkan bahan bakar LPG dan udara secara bergantian melalui kran atas sesuai dengan *air fuel ratio* yang diinginkan.
6. Menghubungkan alat uji gas buang (*gas analyzer*) dengan ruang bakar melalui kran atas.
7. *Handycam* dihidupkan.
8. Tombol pemantik ditekan.
9. Setelah pembakaran selesai dan gambar rambatan api terekam, *handycam* kemudian dimatikan.
10. Gas hasil pembakaran dikeluarkan dengan membuka kran atas.
11. Mengukur gas buang hasil pembakaran pada *gas analyzer*.
12. Kemudian dilakukan langkah-langkah seperti di atas untuk tiap-tiap variasi *air fuel ratio*.

• Metode Pengolahan Data

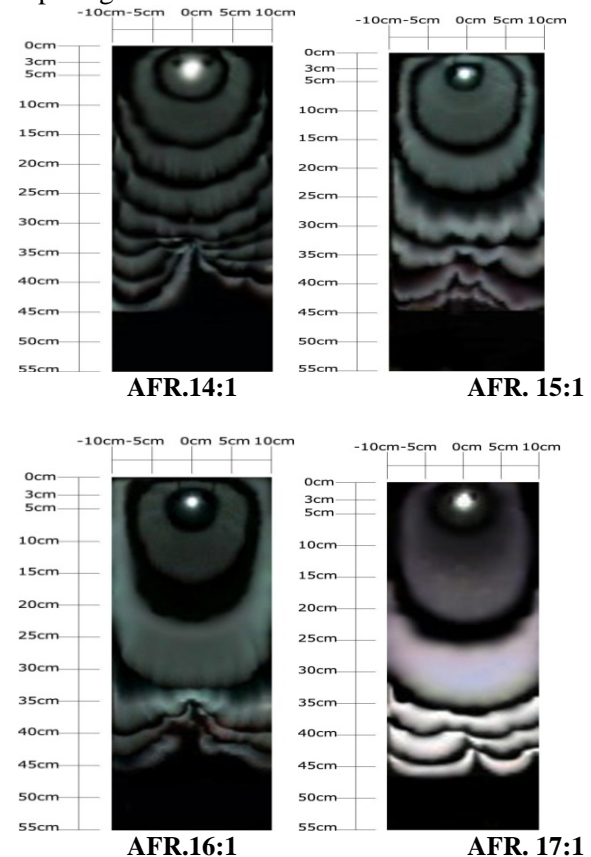
Untuk kecepatan rambat api, data yang terukur berupa gambar perambatan api yang direkam dengan *handycam*. Hasil rekaman dengan *handycam* disimpan dengan format file WMV kemudian dengan menggunakan *software Pinnacle 8*, diextract

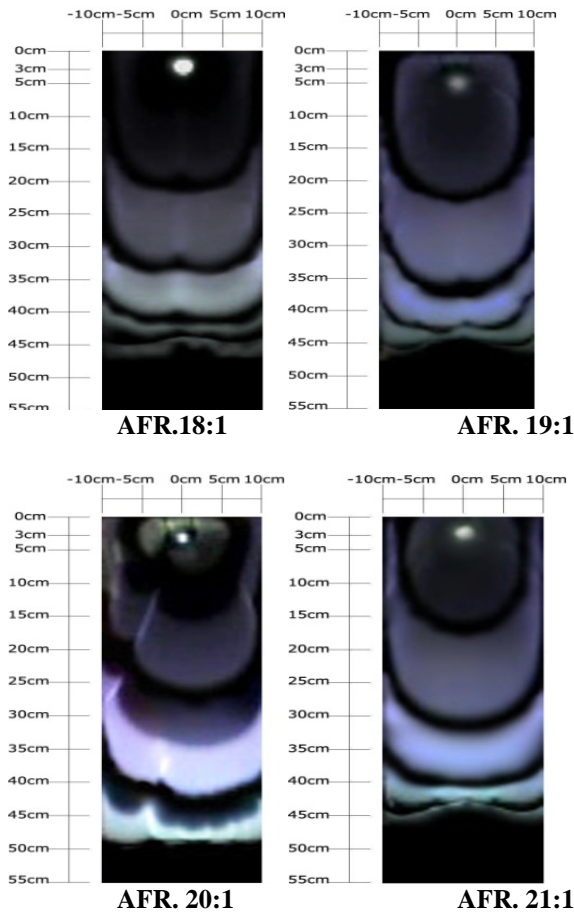
menjadi beberapa *frame* gambar. Untuk menampilkan bentuk atau pola rambat api digunakan *software Adobe Photosop CS 3*. Hasil gambar dari *Adobe Photoshop CS 3* diberi ukuran menggunakan *software Autocad 2007*, dimana sebelumnya sudah ditetapkan suatu skala yang diketahui sebagai acuan sehingga jarak api ke arah *vertical* yang dicari bisa diperoleh. Kecepatan kamera yang digunakan adalah 25 *frame/detik*, maka waktu yang diperlukan untuk satu *frame* adalah 1/25 detik. Dengan demikian kecepatan rambat api bisa didapat dengan jalan membagi jarak api ke arah *vertical* pada setiap *frame* dengan waktu. Sedangkan untuk emisi gas buang data yang di amati adalah CO, CO₂, O₂, dan HC dengan menggunakan alat *gas analyzer*. Hasil pengukuran selanjutnya diolah dengan *Microsoft Excel* untuk mendapatkan tabel dan grafik kecepatan rambat api dan emisi gas buangnya pada setiap variasi *air fuel ratio*.

Hasil dan Pembahasan

• Bentuk Rambatan Api

Setelah video rekaman di *extract* menggunakan *software Pinnacle 8*, kemudian hasil *frame-frame* tersebut digabungkan dengan menggunakan *software Adobe Photoshop CS 3*, maka akan didapatkan gambar bentuk serta pola rambatan api seperti gambar 2 berikut.





Gambar 2. Pola rambatan api dengan variasi AFR

Bentuk rambatan api yang dihasilkan akibat variasi AFR yang dilakukan ternyata menunjukkan perubahan bentuk yang berbeda-beda, seperti gambar 2 terlihat bahwa:

Dari bentuk *framennya*, pada AFR 14:1 pola rambat berbentuk parabola terjadi sampai *frame* ke tiga, untuk AFR 15:1, 16:1, 17:1 pola rambat berbentuk parabola terjadi sampai *frame* kedua, untuk AFR 18:1, 19:1 terjadi pada *frame* pertama, untuk AFR 20:1 tidak ada pola rambat berbentuk parabola besar, namun langsung pecah menjadi parabola kecil-kecil, dan untuk AFR 21:1 terjadi pada *frame* pertama dan kedua. Pola rambat berbentuk parabola kecil-kecil pada AFR 14:1 mulai terjadi pada *frame* keempat, untuk AFR 15:1, 16:1, 17:1 mulai terjadi pada *frame* ketiga, untuk AFR 18:1, 19:1 mulai terjadi pada *frame* kedua, sedangkan untuk AFR 20:1 langsung dari *frame* pertama, dan untuk AFR 21:1 mulai terjadi pada *frame* keempat.

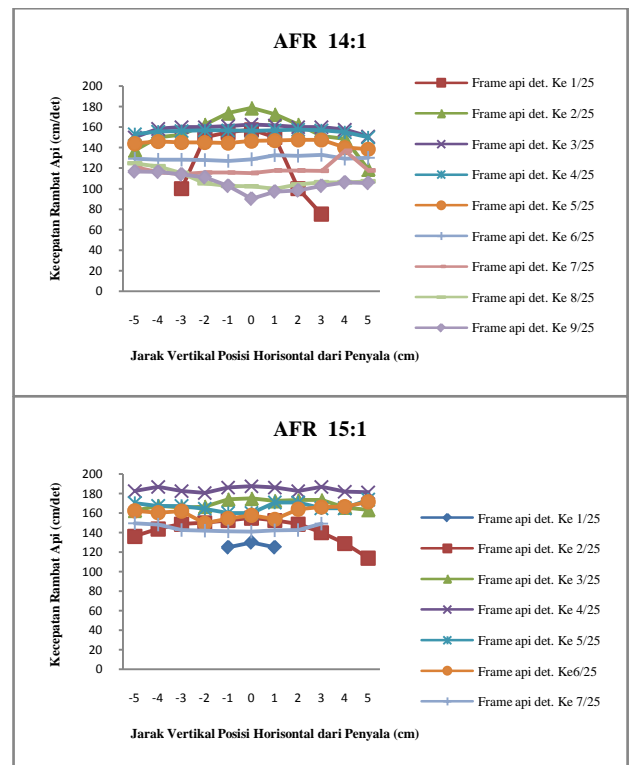
Dari jumlah *frame*, semakin mendekati *stoichiometry* jumlah *framennya* menjadi berkurang seperti pada AFR 14:1 jumlahnya 9, pada AFR 15:1 jumlahnya 7, pada AFR 16:1, 17:1, 18:1, 19:1, 21:1 jumlahnya 6, dan pada AFR 20:1 jumlahnya 4. Dari warna apinya, pada AFR 14:1 sampai AFR 21:1 warna apinya pada umumnya berwarna sedikit

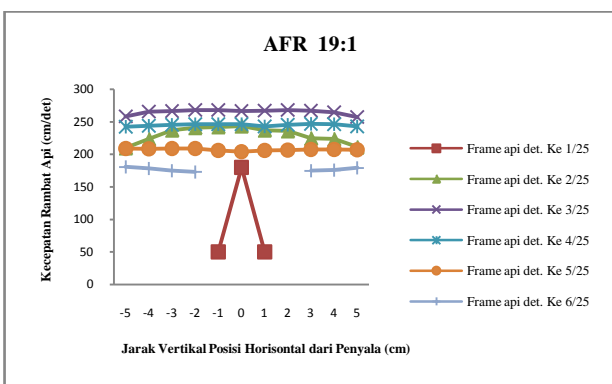
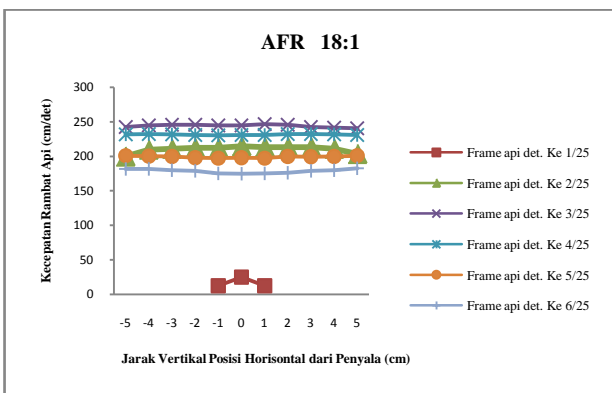
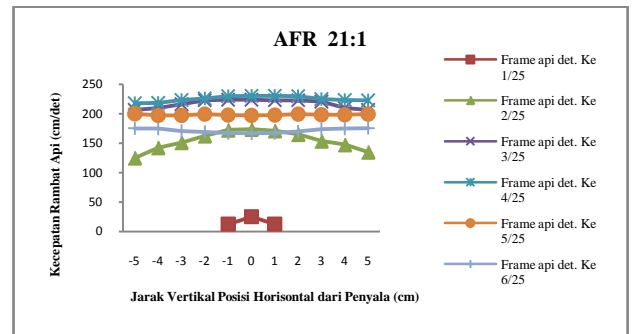
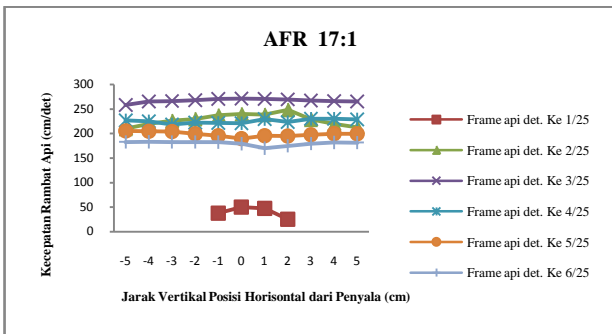
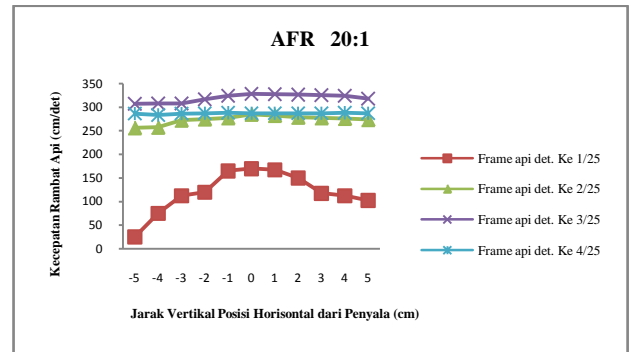
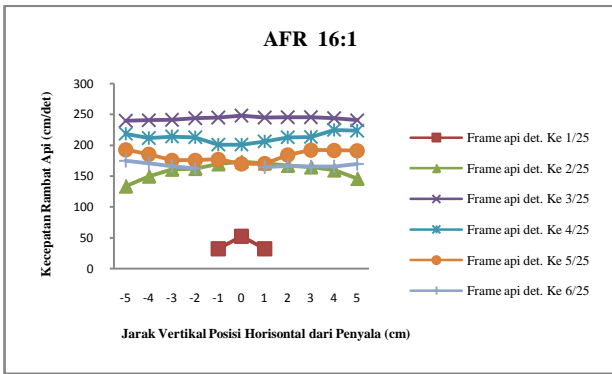
merah tetapi pada saat mendekati *stoichiometry* warna merahnya semakin pudar, dan berganti menjadi warna biru. Tetapi warna birunya berbeda-beda dari biru tua menjadi biru yang cerah.

Warna api merah agak kehitaman disebabkan oleh kondisi campuran yang kaya akan bahan bakar, karena *stoichiometry* untuk pembakaran LPG adalah pada AFR 20:1. Dengan AFR yang mendekati *stoichiometry* warna api akan berubah, dari warna kemerahan menjadi merah yang pudar, biru kemerahan, biru, terakhir berwarna biru cerah, hal ini menunjukkan proses pembakaran yang terjadi berlangsung lebih sempurna. Seperti pada AFR 14:1, warna api merah pudar dan agak kehitaman, ini menunjukkan bahan bakar belum terbakar sempurna, masih terdapat sedikit bahan bakar di dalam ruang bakar. Berbeda dengan AFR 20:1, warna api biru cerah, hal ini menunjukkan semua bahan bakar di dalam ruang bakar habis terbakar. Dengan AFR yang tepat, menyebabkan jumlah *frame* yang berkurang, ini menunjukkan kecepatan rambat apinya semakin cepat. Perbandingan antara udara dan bahan bakar yang tepat dapat meningkatkan kecepatan rambat api, sehingga proses pembakaran akan berlangsung lebih sempurna.

• **KecepatanRambatApi**

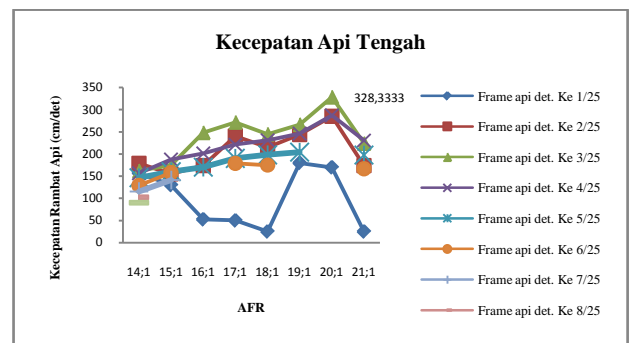
Dengan menggunakan piranti lunak *Excel* dan diperoleh grafik hubungan jarak dari penyalas secara horizontal dengan kecepatan rambat api pada setiap variasi *Air Fuel Ratio* (AFR) seperti gambar 3 berikut,





Gambar 3. Grafik kecepatan rambat api pada setiap variasi AFR.

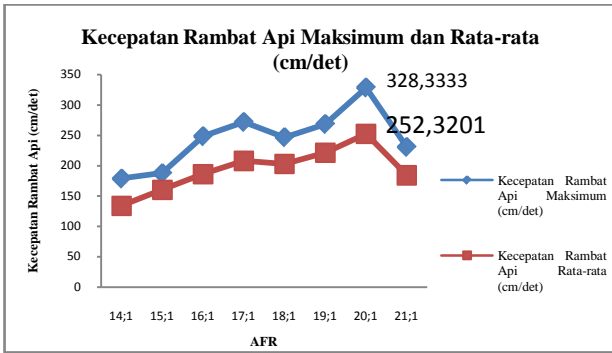
Dari data yang sama, dengan mengambil data kecepatan rambat api tengah pada setiap variasi AFR maka diperoleh grafik kecepatan seperti gambar 4.



Gambar 4. Grafik kecepatan rambat api tengah pada setiap variasi AFR

Berdasarkan data pada gambar 3, kecepatan rambat api yang dihasilkan akibat variasi AFR, ternyata menunjukkan perubahan yang berbeda-beda. Dari semua frame, menunjukkan peningkatan pada saat menuju AFR stoichiometry 20:1, dan menurun pada AFR 21:1. Kecepatan api tertinggi terjadi pada frame ke 3 dan detik ke 0,12.

Dari grafik pada gambar 4. diatas menunjukkan bahwa AFR sangat mempengaruhi kecepatan rambat api. Fenomena ini terjadi karena, dengan perbandingan udara dan bahan bakar yang tepat, akan membuat proses pembakaran lebih sempurna. Kecepatan rambat api maksimum dan rata-rata untuk semua variasi AFR dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik hubungan AFR terhadap kecepatan rambat api maximum dan rata-rata

Perbandingan udara dan bahan bakar yang semakin mendekati perbandingan stoichiometry akan menaikkan kecepatan rambat api, baik kecepatan rambat api maksimum maupun kecepatan rambat api rata-rata.

Pada AFR 14:1, 15:1, 16:1, 17:1, 18:1, 19:1, 20:1, dan 21:1 kecepatan rambat api maksimum masing-masing adalah 178,8 cm/det, 187,5 cm/det, 248,3 cm/det, 271,7 cm/det, 2246,7 cm/det, 268,3 cm/det, 328,3/cm/det, dan 230,6 cm/det. Sedangkan kecepatan rambat api rata-ratanya masing-masing adalah 134,0 cm/det, 160,3 cm/det, 186,1 cm/det, 207,9 cm/det, 202,8 cm/det, 221,2 cm/det, 252,3 cm/det, dan 184,3 cm/det seperti terlihat pada gambar .5. Dengan AFR yang stoichiometry yaitu pada AFR 20:1 akan menghasilkan kecepatan rambat api yang maksimum, dimana perbandingan udara dan bahan bakar yang tepat akan mempengaruhi proses pembakaran yang sempurna dan menghasilkan kecepatan rambat api yang maksimum, yaitu kecepatan 328,3 cm/det dan kecepatan rambat api rata-rata 252,3cm/det.

• **Emisi Gas Buang**

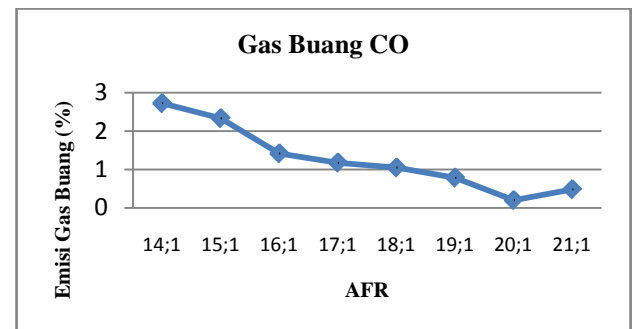
Tabel 1.Data gas buang berbahan bakar LPG dari beberapa *air fuel ratio* yang telah di rata-ratakan

Air Fuel Ratio	Kandungan Gas Buang			
	CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	HC (ppm)
14:1	2,724	8,35	23,57	562
15:1	2,334	9,44	23,42	515
16:1	1,418	10,74	23,29	460
17:1	1,179	11,36	22,91	379
18:1	1,050	12,15	22,68	307
19:1	0,788	13,16	21,98	260

20:1	0,202	14,47	20,78	136
21:1	0,484	13,85	21,62	236

Emisi Gas Buang CO

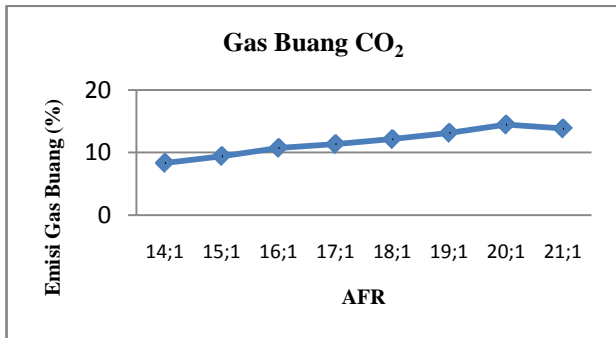
Dari perbandingan udara dan bahan bakar (*Air Fuel Ratio*/AFR) 14:1 sampai 21:1 terlihat bahwa pada AFR 14:1 kondisi gas buang CO-nya yang paling maksimum yaitu sebesar 2,724 %, selanjutnya terus mengalami penurunan sampai dengan AFR 20:1 sebesar 0,202 %, seperti gambar 6. Hal ini terjadi karena pada AFR 14:1 terjadi campuran kaya atau kelebihan bahan bakar atau udara yang masuk ke dalam ruang bakar masih sangat kecil sehingga sebagian unsur karbon yang terkandung dalam bahan bakar tidak terbakar atau terurai menjadi CO₂. Tetapi pada AFR 21:1 konsentrasi gas CO kembali mengalami peningkatan menjadi 0,484 %, peningkatan gas CO ini terjadi karena campuran agak kurus.



Gambar 6. Grafik hubungan antara AFR terhadap gas buang CO

Emisi Gas Buang CO₂

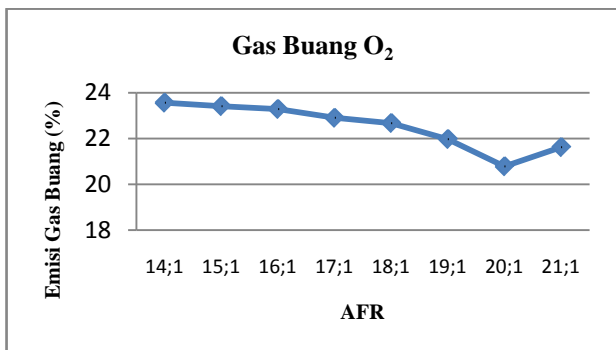
Dari gambar 7 terlihat bahwa dari AFR 14:1 sampai 21:1, pada AFR 14:1 emisi gas CO₂ mempunyai nilai terendah sebesar 8,35 % dan akan meningkat sampai AFR 20:1 sebesar 13,16 %. Hal ini terjadi karena pada AFR 14:1 terjadi campuran kaya atau kurangnya udara yang masuk ke dalam ruang bakar, sedangkan pada AFR 20:1 yaitu kondisi *stoichiometry* emisi CO₂ paling maksimum sebesar 14,47 % ini merupakan perbandingan udara dan bahan bakar paling ideal. Tetapi pada AFR 21:1 dimana kondisi *stoichiometry* telah terlewati sehingga konsentrasi emisi gas CO₂ kembali mengalami penurunan menjadi 13,85 %.



Gambar 7. Grafik hubungan antara AFR terhadap gas buang CO₂

Emisi Gas Buang O₂

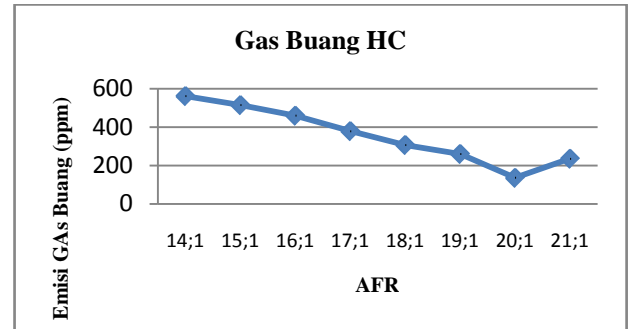
Ditinjau dari gambar 8 terlihat bahwa pada AFR 14:1 emisi gas O₂ sebesar 23,57 % dan terus mengalami penurunan sampai dengan AFR 20:1 sebesar O₂ 20,78 %. sedangkan pada AFR 21:1 kembali naik menjadi 21,62 % karena pada campuran miskin, udara berlebih ini tidak terbakar dalam proses pembakaran.



Gambar 8. Grafik hubungan antara AFR terhadap gas buang O₂

Emisi Gas Buang HC

Dari gambar 9 terlihat bahwa pada AFR 14:1 emisi gas HC merupakan nilai tertinggi sebesar 562 ppm dan akan menurun sampai AFR 20:1 sebesar 136 ppm. Hal ini terjadi karena pada AFR 14:1 terjadi campuran kaya atau udara semakin tidak cukup untuk membakar semua bahan bakar dalam proses pembakaran sehingga bahan bakar tidak habis terbakar sempurna dan bahan bakar yang belum terbakar akan keluar sebagai gas buang pada saluran buang dalam bentuk hidrokarbon. Sedangkan pada AFR 20:1 yaitu kondisi *stoichiometry* emisi gas HC paling minimum sebesar 136 ppm ini merupakan perbandingan udara dan bahan bakar paling ideal. Tetapi pada AFR 21:1 dimana kondisi *stoichiometry* telah terlewati sehingga konsentrasi emisi gas HC kembali mengalami peningkatan menjadi 236 ppm karena pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar berlangsung kurang sempurna akibat kelebihan udara.



Gambar 9. Grafik hubungan antara AFR terhadap gas buang HC

Kesimpulan

Dari hasil penelitian tentang kecepatan rambat api dan emisi gas buang berbahan bakar LPG pada ruang bakar model *Helle-ShawCell* dengan perbandingan udara dan bahan bakar, ada beberapa hal yang dapat disimpulkan:

1. Untuk bahan bakar LPG AFR *stoichiometry* adalah 20:1.
2. Semakin mendekati AFR *stoichiometry*, warna api berubah dari warna kemerahan menjadi merah yang pudar, biru kemerahan, biru, dan terakhir biru yang cerah, sedangkan bentuk api semakin mendatar dan terpecah menjadi parabola kecil-kecil.
3. Kecepatan rambat api maksimum terjadi pada saat AFR *stoichiometry* yaitu 328,3 cm/det.
4. Pada AFR *stoichiometry* emisi gas buang CO, O₂, HC adalah paling minimum sedangkan CO₂ adalah paling maximum.
5. Semakin tepat campuran antara udara dan bahan bakar maka proses pembakaran yang terjadi semakin baik atau sempurna sehingga konsentrasi atau kadar gas buangnya akan memenuhi standar baku mutu.

Referensi

Abid Mohammed, Sharif Jamal A, Ronney Paul D, (2001). Dynamics of Front Propagation in Narrow Channels, Department of Aerospace & Mechanical Engineering University of Southern California Los Angeles.

Adi Winarta (2007). Pengaruh Perbandingan Campuran BBG dan Udara Terhadap Pola dan Kecepatan Api *Premix*, Thesis Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang

Broda, J.C., Seo, S., Santoro, R.J., Shirhatli, G and Yang, V., (1998). An Experiment Study of Combustion Dynamics of a Premixed Swirl Injector, Twenty Seventh Symposium (International) on Combustion /The Combustion Institute, 1998/pp. 1849-1856.

Buckmaster, J. D., Kimolaitis, D. (1982). A Flammability-limit Model for Upward Propagation Through Lean Methane/Air Mixture in a Standard Flammability Tube, *Combust. Flame* 45, 109-119.

Dugger, G.L., Heimel, S., and Weast, R.C., (1955). *Ind. and Engrg. Chem.* Vol.47.p.144.

Hartmann, E. (1931). *Thesis*, Karlsruhe.
Keller, Edward. (1995). International Experience with Clean Fuel, SAE, no. 931831. pp. 37-40.

Kenneth Kuan-yun Kuo. (1986). Principles of Combustion, Distinguished Alumni Professor Department of Mechanical Engineering The Pennsylvania State University Park, Pennsylvania.

Patnaik, G., Kailasanath, K. (1992). Numerical simulation of the extinguishment of downward diffusion flame in microgravity, *Combustion Flame* 112. p.189-195.

Wardana, ING., (1995). Bahan Bakar dan Teknik Pembakaran, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

Zel'dovich, B. and Frank-Kamenetsky, D.A., (1938). *Comp. Rend. Acad. Sci. URSS*, vol. 19, p.693.