

## KARAKTERISTIK PERAMBATAN API MELALUI CELAH SEMPIIT DENGAN BAHAN BAKAR CAMPURAN LPG DAN OKSIGEN

Jayan Sentanuhady, Eko Prabowo dan Tri Agung Rochmat

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada  
Jalan Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia. Phone & Fax 0062-274-513668  
Email: jayan@ugm.ac.id

### ABSTRACT

Perambatan api yang melalui celah sempit akan mengalami rugi-rugi kalor yang besar akibat perpindahan kalor. Jika rugi-rugi kalor ini lebih besar daripada energi yang dihasilkan dari proses pembakaran, api yang merambat akan mengalami penurunan suhu. Penurunan suhu yang menyebabkan suhu api berada di bawah autoignition temperature campuran akan menyebabkan api padam (*flame quenching*). Percobaan dilakukan dengan melewati api campuran LPG dan oksigen melalui celah sempit yang terbuat dari aluminium. Pengukuran dilakukan terhadap tekanan ruang sebelum celah sempit (*upstream*) dan ruang setelah celah sempit (*downstream*). Selain pengukuran tekanan dilakukan juga pengambilan data gambar dengan *high speed video camera*. Hasil dari penelitian ini memperlihatkan bahwa dengan memperkecil lebar celah maka rugi-rugi kalor yang terjadi akan semakin besar hingga dapat membuat kecepatan perambatan api menurun. Terdapat dua kondisi yang dapat diobservasi dalam penelitian ini, reaksi pembakaran berhasil merambat melalui celah sempit dan pembakaran pada *downstream* akibat *jet ignition*. Selain itu didapat pula hasil bahwa tekanan awal campuran berpengaruh terhadap kecepatan perambatan api. Semakin besar tekanan awal campuran maka semakin besar pula kecepatan api yang dihasilkan.

**Keyword:** *Flame propagation, jet ignition, celah sempit*

### 1. Pendahuluan

Perambatan api dimulai dari terjadinya reaksi pembakaran campuran bahan bakar dan oksidizer di sekitar sumber panas. Api yang tercipta akan merambat dengan kecepatan *subsonic* (deflagrasi). Perambatan deflagrasi ini jika diberikan waktu dan jarak yang cukup akan dapat berubah menjadi detonasi. Pada saat itu kecepatan perambatan api yang terjadi adalah *supersonic*. Apabila perambatan api sudah menjadi detonasi maka akan terbentuk *shock wave* yang berada tepat di depan *reaction zone*. *Shock wave* yang dihasilkan tersebut mampu menaikkan tekanan 10 – 30 kali dari tekanan awal gas. Tekanan yang sangat besar tersebut walaupun sesaat, sangat membahayakan sistem dan lingkungan sekitarnya.

Dalam perambatannya hingga menjadi detonasi, api memerlukan energi panas untuk dapat mempertahankan perambatannya. Energi panas yang digunakan berasal dari hasil reaksi pembakaran. Apabila api melewati celah sempit dimana akan terjadi rugi-rugi kalor yang besar sehingga suhu api akan mengalami penurunan.

Penurunan suhu api hingga melebihi batas bawah suhu *flamability* akan membuat api padam.

*Propane* dan *butane* yang sebagai inti dari gas LPG produksi PERTAMINA adalah gas-gas yang *flame propagation*-nya dapat melebihi kecepatan *supersonic* pada jarak tertentu, sehingga *shock wave* akan dihasilkan tepat di depan *reaction front*, seperti yang telah dilaporkan oleh Rashidi et al. (1992), Tarzhanov et al. (2006) dan Li et al. (2006).

*Shock wave* yang merambat tepat di depan *reaction wave (flame front)* memiliki tekanan yang sangat tinggi hingga bisa mencapai 20 kali dari tekanan awal. Tekanan yang ekstrim tinggi ini berpotensi menghancurkan apa saja yang ada di depan *shock wave* tersebut sehingga sangat membahayakan bagi keselamatan manusia. Liu et al. (1984), Ciccarelli et al. (1998), Jayan et al. (2005) menggunakan teknik lokalisasi dengan menggunakan *orifice* untuk mengendalikan *detonation*, akan tetapi pengendalian dengan menggunakan *orifice* tidak efektif karena terjadinya proses *re-initiation* dari *detonation* setelah *detonation* dapat dikendalikan.



Karena proses terjadinya *detonation* membutuhkan jarak dan proses yang cukup panjang, mulai *laminar flame* hingga *turbulence flame*, maka akan lebih efektif jika proses pembakaran dikendalikan sebelum *detonation* terjadi yaitu ketika proses pembakaran masih dalam kondisi *laminar*.

Iida et al. (1985) yang menginvestigasi mekanisme *quenching* dari *laminar flame* pada *channel* dengan parameter bentuk *inlet* mendapatkan kondisi bahwa bentuk, sudut dan kekasaran dari *inlet* suatu *channel* sangat signifikan mempengaruhi perambatan dari *flame* di dalam *channel*. *Local turbulence* yang mungkin terjadi setelah daerah *inlet* akibat dari *vortex* yang timbul diduga sebagai penyebab proses pembakaran dapat bertahan hingga jarak yang panjang. Bentuk *inlet* yang mampu menghasikan *vortex* yang tinggi akan membuat *flame* dapat merambat hingga jarak yang panjang dalam *channel*. Hal ini diperkuat juga oleh hasil penelitian Jaronski (1993) yang juga menghubungkan mekanisme perambatan pembakaran dengan *flame thickness*. Dimana perubahan bentuk *inlet* dari *channel* tidak efektif untuk menghambat laju pembakaran dalam *channel*.

Nishina et al. (2006) yang menggunakan bahan material *steenlees steel* sebagai material celah sempit membuat hipotesis bahwa untuk celah yang relatif panjang, *heat transfer* akan menjadi sangat dominan untuk proses penghambatan *flame propagation* dalam celah sempit.

Karena proses *heat transfer* antara dinding celah sempit dengan *flame* adalah hal yang signifikan berpengaruh pada *flame propagation*, maka selain dimensi celah sempit (lebar dan panjang), material dari celah sempit juga akan berpengaruh terhadap *flame propagation* pada khususnya dan *flame behaviour* pada umumnya.

Penelitian ini dimaksudkan untuk dapat mempelajari karakteristik api campuran LPG dan oksigen yang dilewatkan celah sempit. Dengan adanya data-data karakteristik dan pola pembakaran LPG diharapkan dapat digunakan dalam perancangan alat pengaman (*flame arraster*) kompor gas yang digunakan untuk keperluan rumah tangga maupun industri.

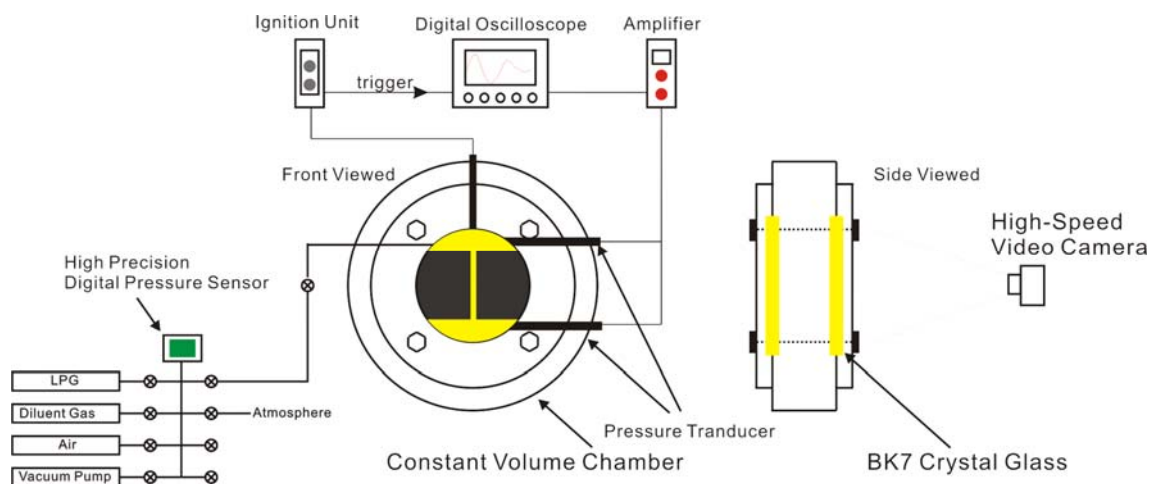
## 2. Metoda Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Gambar 1 adalah skematik alat-alat penelitian yang terdiri dari *constant volume chamber* (CVC) yang dilengkapi dengan glass BK7 pada kedua sisinya sehingga fenomena pembakaran dapat direkam dengan menggunakan video kamera kecepatan tinggi. Pada CVC dilengkapi dengan 2 sensor tekanan merek PCB pada bagian *upstream* dan *downstream* untuk mendapatkan data profile tekanan pada bagian *upstream* dan *downstream* selama proses pembakaran.

Kedua sensor tekanan tersebut dihubungkan dengan amplifier dan juga data logger untuk merubah data analog menjadi digital dan menyimpannya dalam bentuk data digital. Kemudian data tersebut dioleh dengan menggunakan software grafik di komputer sehingga dapat tertampil profil tekanan selama proses pembakaran.

Pada bagian *upstream* dari CVC dipasang *spark plug* untuk menginisiasi proses pembakaran di bagian *upstream*. *Spark plug* ini ada *hand made* untuk menghindari noise yang besar bila menggunakan *spark plug* yang ada di pasaran.



Gambar 1. Skematik aparatus pada penelitian ini



Tabel 1. Kondisi penelitian

Parameter	Condition
Bahan bakar	LPG (campuran <i>propane</i> dan <i>buthane</i> )
Oksidizer	Oksigen
<i>Equivalence ratio</i>	1 ( <i>stoichiometric condition</i> )
Tekanan Awal (kPa)	20 – 60
Lebar celah (mm)	0,4 – 1,6

Tabel 2. Hasil penelitian

Peristiwa		Kondisi campuran	
		Lebar celah	Tekanan awal
Pembakaran melalui celah sempit		1,6 mm	60 kPa-20 kPa
		1,3 mm	60 kPa-20 kPa
		0,9 mm	60 kPa-30 kPa
		0,5 mm	60 kPa-50 kPa
Pembakaran akibat <i>jet ignition</i>	Campuran gas pada <i>upstream</i> terbakar sebagian	0,9 mm	20 kPa
		0,5 mm	40 kPa-30 kPa
	Campuran gas pada <i>upstream</i> terbakar total	0,4 mm	60 kPa-40 kPa
		0,5 mm	20 kPa
		0,4 mm	30 kPa dan 20 kPa

Pada bagian tengah dari CVC diinstall model celah sempit seperti tampak pada gambar 1 yang dinyatakan dengan blok hitam. Lebar celah divariasikan mulai dari 0,5 mm hingga 1,6 mm.

Untuk mendapatkan proses pembakaran di bagian *upstream* dan *downstream* dari CVC, pengambilan gambar dengan menggunakan high speed video camera juga dilakukan di penelitian ini. High speed video camera menggunakan Phantom dengan kecepatan 500 frame per detik.

Penelitian ini menggunakan bahan bakar gas LPG produksi Pertamina dengan kandungan 30 % gas *propane* dan 70 % gas *butane*, sedangkan oksidizer yang digunakan adalah oksigen. Campuran LPG dan oksigen dicampur dengan keadaan *stoichiometric*, dengan tekanan awal campuran yang divariasikan antara 20 kPa – 60 kPa. Detail kondisi penelitian ditampilkan dalam Tabel 2.

### 3. Hasil Penelitian dan Diskusi

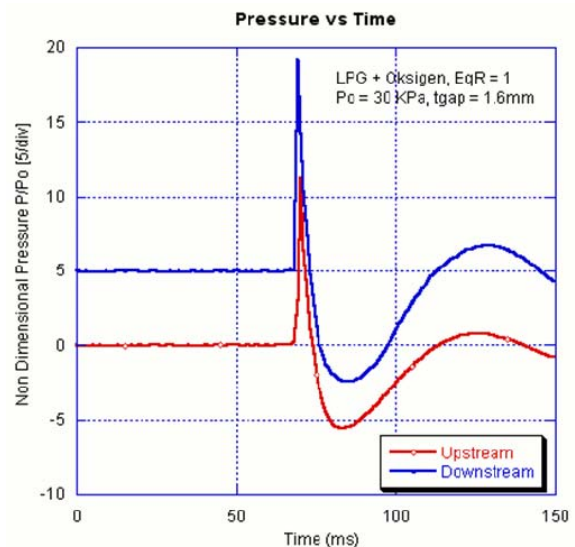
Dari data-data yang diambil dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dua kondisi dapat diobservasi yaitu pembakaran melalui celah sempit, dan pembakaran tidak mampu melalui celah sempit, tetapi pembakaran di *downstream* tetap terjadi akibat *jet ignition*. Detail hasil dari penelitian ini dapat dilihat di tabel 2.

#### a. Pembakaran melewati celah sempit

Gambar 2 merupakan grafik tekanan terhadap waktu dari campuran LPG dan oksigen pada tekanan awal 30 kPa dan lebar celah 1,6 mm. Sedangkan gambar 3 merupakan gambar urutan dari image hasil proses pembakaran dalam CVC pada kondisi yang sama dengan gambar 2.

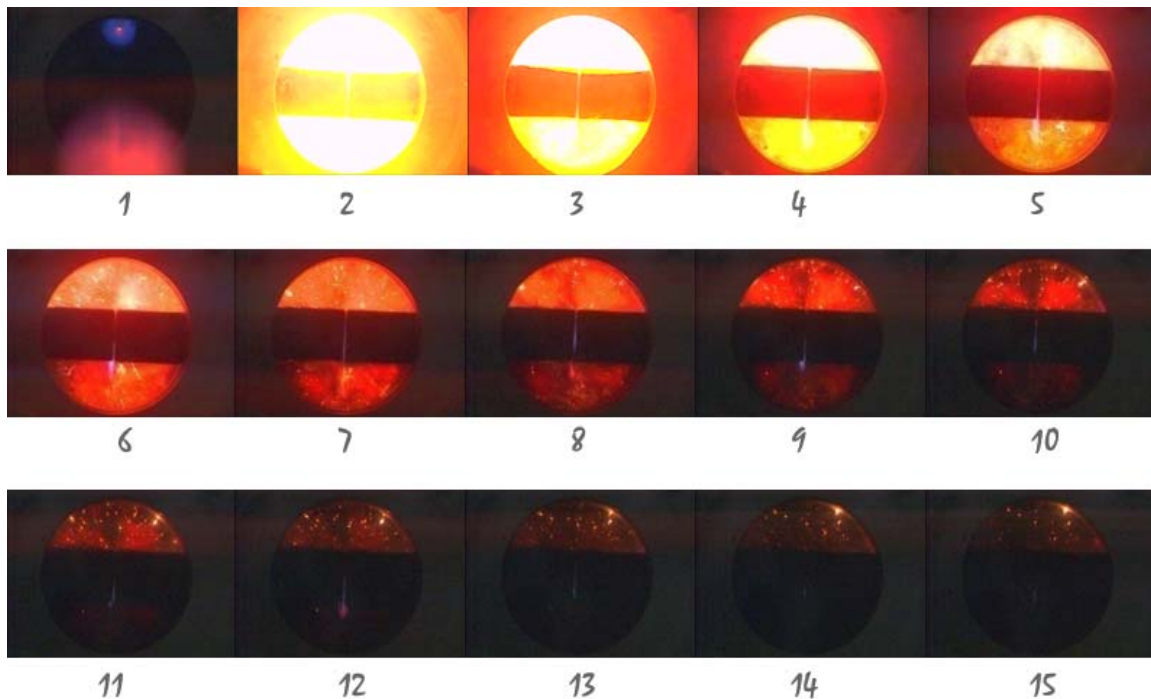
Pembakaran dimulai pada 0 ms. Dari gambar 3 no 1 dapat dilihat bahwa api pertama kali terjadi di sekitar sumber panas (busi). Api yang tercipta pada *upstream* berhasil merambat melalui celah sempit dan membuat pembakaran terjadi hampir bersamaan pada daerah *upstream* dan *downstream* seperti tampak pada gambar 2.

Dari gambar 2 dapat dilihat bahwa tekanan puncak di *downstream* adalah 15,2 kali dari tekanan awal (455 kPa), sedangkan tekanan puncak yang di *upstream* adalah 12,2 kali dari tekanan awal (366,2 kPa). Tekanan puncak di daerah *downstream* lebih besar dibandingkan tekanan puncak pada *upstream* karena dengan semakin



Gambar 2. Profil tekanan untuk lebar celah 1,6 mm dan tekanan awal 30 kPa





Gambar 3. Urutan image perambatan api kondisi lebar celah 1,6 mm dan tekanan awal 30 kPa

jauhnya tempat dari sumber panas yang menyebabkan proses pembakaran terjadi maka energi dari proses pembakaran sebelumnya akan terakumulasi dan menyebabkan tekanan pada *downstream* lebih besar dari *upstream*.

#### b. Pembakaran akibat *jet ignition*

##### b1. Campuran gas pada *upstream* terbakar sebagian

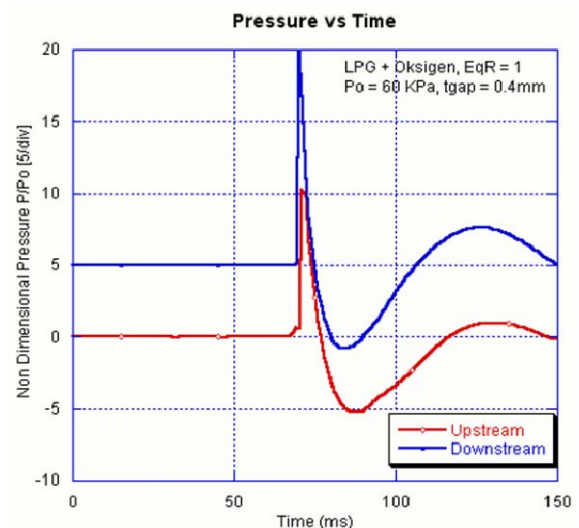
Gambar 4 merupakan grafik tekanan terhadap waktu dari campuran LPG dan oksigen pada tekanan awal 60 kPa dan lebar celah 0,4 mm. Sedangkan gambar 5 merupakan gambar proses pembakaran dalam CVC pada kondisi yang sama dengan gambar 4.

Bila dilihat dari gambar 4, grafik profil tekanan ini sangat identik dengan grafik tekanan pada gambar 2. Akan tetapi bila dilihat dari gambar urutan image high speed camera menunjukkan phenomena yang sedikit berbeda.

Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa sebelum api membakar campuran bahan bakar secara lengkap di daerah *upstream*, di daerah *downstream* sudah terjadi ledakan terlebih dahulu, seperti tambah pada gambar 5 nomer 2. Ledakan ini dipicu karena adanya *weak shock wave* yang merambat ke *downstream* dan melalui celah sempit. *Shock wave* ini akan menginisiasi proses membakar di daerah *downstream*.

Ledakan pada daerah *downstream* menyebabkan tekanan pada *downstream* meningkat drastis hingga mencapai tekanan puncaknya yaitu 16 kali dari tekanan awal (956 kPa). Tekanan yang besar ini menyebabkan terjadinya *back pressure* yang menuju *upstream* dan membakar gas yang belum terbakar di *upstream*.

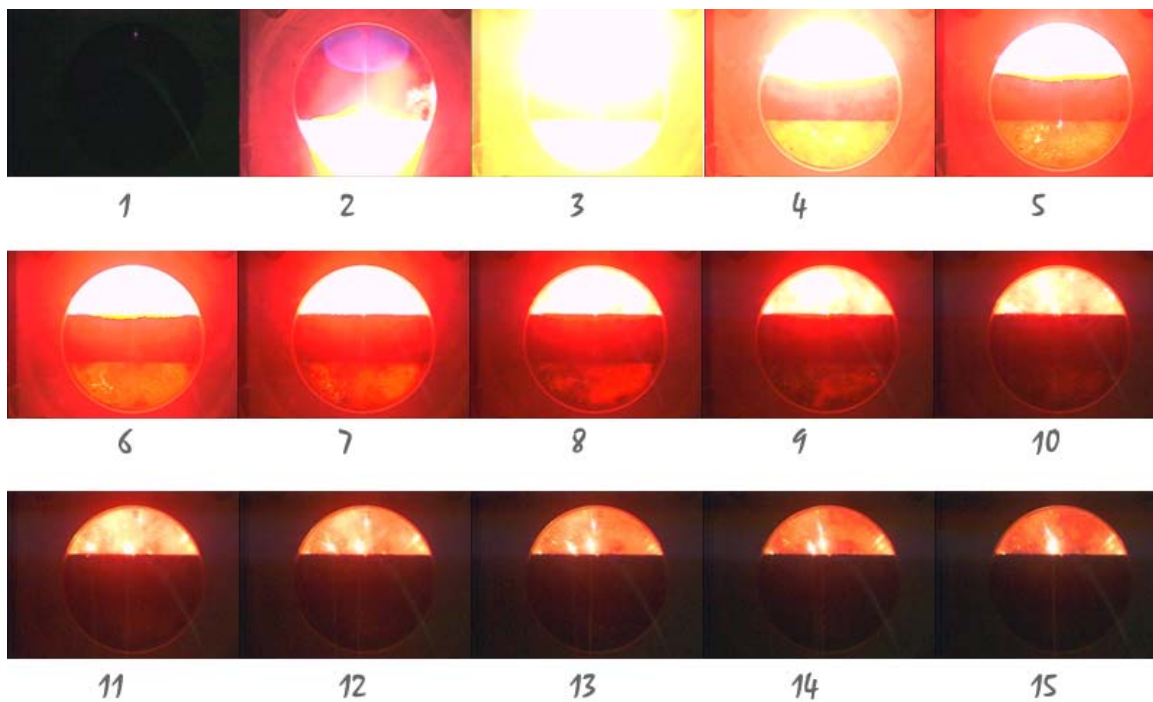
Keadaan ini membuat *upstream* mencapai puncak tekanan tertingginya yaitu 11,2 kali dari tekanan awal (674,2 kPa). Ledakan pada *upstream* yang terjadi setelah ledakan pada *downstream* inilah yang membuat pembakaran pada *upstream* lebih lama dibandingkan dengan pembakaran yang terjadi di daerah *downstream* hingga image nomer 15 gambar 5 api masih terlihat di daerah *upstream* sementara di daerah *downstream* api sudah tidak terlihat lagi.



Gambar 4. Profil tekanan untuk lebar celah 0.4 mm dan tekanan awal 60 kPa







Gambar 5. Urutan image perambatan api kondisi lebar celah 0,4 mm dan tekanan awal 60 kPa

### b2. Campuran gas pada *upstream* terbakar total

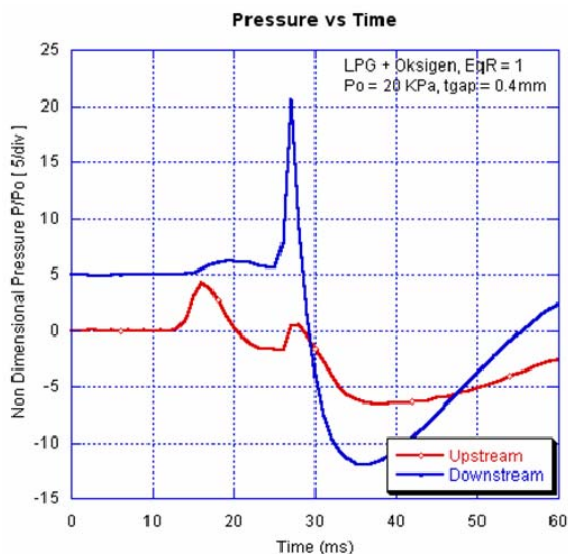
Bila kondisi gambar 4 dengan lebar celah 0,4 dan dengan tekanan awal 60 kPa, tekanannya diturunkan menjadi tekanan awal 20 kPa, maka didapati fenomena yang berbeda dengan kondisi gambar 4. Pada kondisi ini campuran gas pada *downstream* tetap terbakar akibat adanya *jet ignition* yang dihasilkan oleh *upstream*. Namun berbeda dengan kondisi gambar 4, pada kondisi ini api yang merambat dari *upstream* telah membakar

seluruh gas pada *upstream* terlebih dahulu sebelum proses pembakaran di *downstream* dimulai.

Gambar 6 merupakan grafik tekanan terhadap waktu dari campuran LPG dan oksigen pada tekanan awal 20 kPa dan lebar celah 0,4 mm. Sedangkan gambar 7 merupakan gambar proses pembakaran dalam CVC pada kondisi yang sama dengan gambar 6.

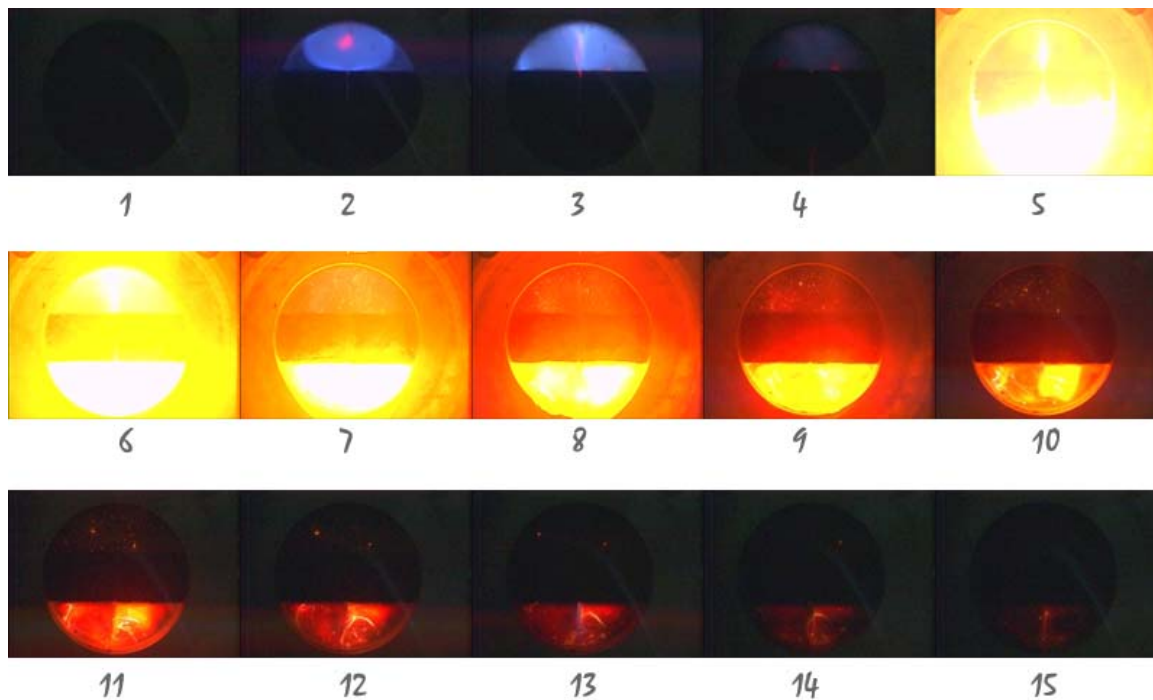
Api yang berasal dari percikan busi merambat di *upstream*. Dari gambar 7 dapat dilihat bahwa perambatan api pada *upstream* ini mengakibatkan terjadinya peningkatan tekanan pada *upstream* hingga mencapai puncak tekanan akibat perambatan api di 16 ms. Akibat peningkatan tekanan ini akan tercipta semburan jet yang menuju *downstream*.

Semburan jet ini mengakibatkan terbakarnya campuran gas pada *downstream*. Terbakarnya campuran gas pada *downstream* ini mengakibatkan tekanan pada *downstream* meningkat drastis hingga mencapai tekanan maksimumnya yaitu sebesar 20,6 kali dari tekanan awal (331,2 kPa). Tekanan yang sangat besar pada *downstream* ini akan mengakibatkan terjadinya *back pressure* pada *upstream* yang mengakibatkan terjadinya kenaikan tekanan pada *upstream*. Berbeda dengan kasus sebelumnya dimana *back pressure* yang terjadi menyebabkan gas pada *upstream* terbakar, pada kasus ini gas di *upstream* telah terbakar semua sebelum terjadinya *back pressure*. Sehingga *back pressure* yang terjadi tidak menyebabkan terjadinya pembakaran pada *upstream*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 8 gambar no 5 dan 6 dimana pada daerah *upstream* hanya terjadi semburan-semburan api yang berasal dari *downstream*.



Gambar 6. Profil tekanan untuk lebar celah 0.4 mm dan tekanan awal 20 kPa





Gambar 7. Urutan image perambatan api kondisi lebar celah 0,4 mm dan tekanan awal 20 kPa

Pembakaran yang terjadi pada *downstream* karena adanya semburan jet yang berasal dari *upstream* menyebabkan pembakaran pada *downstream* terjadi lebih lama. Hingga gambar no 14 gambar 8 dapat dilihat bahwa sisa-sisa pembakaran pada *downstream* masih tampak sementara pada *upstream* sudah tidak ada lagi api.

#### 4. Kesimpulan

Dua kondisi pembakaran dapat melalui celah sempit dapat diobservasi dari penelitian ini, yaitu *flame* mampu melalui celah sempit dan membakar daerah *downstream* dan *flame* tidak mampu melalui celah sempit, tetapi *shock wave* dalam bentuk jet mampu menginisiasi pembakaran di daerah *downstream*.

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dalam penelitian ini tidak ditemukan kondisi dimana terjadi *flame quenching* di daerah *downstream*. Hal ini terjadi karena oksidizer yang digunakan pada penelitian ini adalah oksigen, sehingga tidak ada campuran gas *inert* yang menurunkan suhu dan laju pembakaran pembakaran.

Tekanan awal dari gas sangat mempengaruhi kecepatan rambat api, semakin tinggi tekanan awal campuran gas maka semakin tinggi pula kecepatan rambat api. Hal ini akan menyebabkan api mampu melewati celah sempit. Dan jika lebar celah terlalu sempit, maka pembakarannya daerah *downstream* akan terjadi karena jet ignition.

#### Referensi

Rashidi, F., Michels, H. J., 1992, Marginal detonation of

aliphatic natural gas constituents with O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Combustion and Flame, Vol. 91, pp. 373-381.

Tarzhanov, V. I., Telichko, I. V., 2006, Detonation of propane-air mixtures under injection of hot detonation products, Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 42, pp. 336-345.

Li, J., Lai, W. H., 2006, Tube diameter effect on deflagration-to-detonation transition of propane - oxygen mixtures, Shock Waves, Vol. 16, pp.109-117.

Liu Y.K., Lee, J.H., Knystautas, R., 1984, Effect of geometry on the transmission of detonation through an orifice. Combustion and Flame, 56:215-225.

Ciccarelli, G., Boccio, J.L., 1998, Detonation Wave Propagation through a Single Orifice Plate in a Circular Tube. Proceedings of the 27th Combustion Institute, 2233-2239.

Jayan, S., Tsukada, Y., Obara, T., Ohayagi, S., 2005, An Experimental Study on Gaseous Detonation Wave Propagating Through Small Holes. Proc. of Shock Wave Symposium, Sendai-Japan.

Iida, N., Kawaguchi, O., Sato, G. T., 1985, Premixed Flame Propagation into a Narrow Channel at a High Speed, Part 1 : Flame Behaviors in The Channel, Combustion and Flame, Vol. 60, pp. 245-255.

Jarosinski, J., 1983, Flame Quenching by a Cold Wall, Combustion and Flame, Vol. 50, pp. 245-25

