

## PENGARUH *EQUIVALENCE RATIO* DAN TEKANAN AWAL CAMPURAN HIDROGEN-OKSIGEN TERHADAP MEKANISME *DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION*

Jayan Sentanuhady, M. Zuhnir Piliang dan Dionysius Angga Baskoro  
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

### Abstrak

Penggunaan bahan bakar gas untuk industri maupun masyarakat pada masa mendatang semakin dibutuhkan seiring dengan kebijakan pemerintah mengurangi konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dan keterbatasan bahan bakar cair yang berasal dari fosil. Bagi kalangan industri, penanganan produksi gas hidrogen baik selama proses produksi, *delivery* maupun dalam penyimpanannya merupakan bagian terpenting, mengingat karakteristik gas hidrogen yang sangat reaktif dan mudah terbakar bila bercampur dengan udara. Oleh sebab itu perlu dilakukan penelitian terhadap karakteristik mekanisme pembakaran pada fase transisi dari deflagrasi menjadi detonasi. Penyelidikan tentang proses *deflagration-to-detonation transition* (DDT) pada pembakaran bahan bakar campuran gas hidrogen-oksigen telah dilakukan di dalam pipa uji detonasi dengan panjang 6 m dan diameter dalam 50 mm, campuran hidrogen-oksigen dengan *equivalence ratio* yang divariasikan antara 0,5 – 2,0 dan tekanan awal antara 40 – 100 kPa. Kenaikan tekanan selama proses DDT terjadi diamati melalui 2 (dua) buah sensor tekanan, sedangkan perubahan kecepatan perambatan api diamati melalui 2 (dua) buah ion probe yang terpasang pada pipa uji detonasi. Untuk mengetahui jarak detonasi dan ukuran sel detonasi pada bagian dalam pipa uji dipasang soot track record yang berfungsi merekam sel detonasi yang terbentuk setelah proses DDT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *equivalence ratio* dan tekanan awal campuran bahan bakar gas hidrogen-oksigen mempengaruhi proses atau mekanisme DDT. Jarak DDT lebih pendek dari *ignition point* pada kondisi campuran yang stoikiometri dan semakin jauh dari *ignition point* pada campuran miskin (*lean mixture*) dan kaya (*rich mixture*). Sedangkan peningkatan tekanan awal campuran dapat memperpendek jarak DDT dari *ignition point* dan akan memperkecil ukuran lebar sel detonasi. Kenaikan tekanan paling tinggi adalah 3500 kPa yaitu 35 kali tekanan awal campuran atau mendekati 2 kali tekanan CJ (1876 kPa) pada kondisi *equivalence ratio* 2,0. Ukuran sel detonasi yang terbentuk dari proses DDT akan semakin mengecil pada kondisi campuran stoikiometri dimana ukuran sel detonasi rata-rata,  $\lambda = 0,62$  mm dan ukuran sel detonasi akan bertambah besar pada kondisi campuran *lean mixture* dan *rich mixture*.

**Keyword:** *Equivalence ratio, DDT, Shock wave, reaction front, detonation cell*

### 1. Pendahuluan

Penggunaan bahan bakar gas untuk industri maupun masyarakat pada masa mendatang semakin dibutuhkan seiring dengan kebijakan pemerintah mengurangi konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dan keterbatasan bahan bakar cair yang berasal dari fosil. Dalam skenario energi mix nasional tahun 2025, sasaran penggunaan bahan bakar gas akan ditingkatkan dari 20,6 persen menjadi 30,6 persen energi nasional. Hal ini menunjukkan bahwa pada masa mendatang pemakaian bahan bakar gas semakin meningkat.

Bagi kalangan industri, penanganan produksi gas hidrogen baik selama proses produksi, *delivery* maupun dalam penyimpanannya merupakan bagian terpenting mengingat karakteristik gas hidrogen yang sangat reaktif dan mudah terbakar bila bercampur dengan udara. Dibandingkan dengan bahan bakar gas lainnya Hidrogen memiliki *flammability range* paling tinggi yaitu 4 hingga 75 % volume campurannya dan pada kondisi atmosfer akan mudah terbakar oleh *ignition sources* seperti *sparks*, *flames* atau *high heat*. Oleh karena itu diperlukan pemahaman dan pengetahuan tentang karakteristik



pembakaran bahan bakar gas hidrogen sehingga dapat terhindar dari kemungkinan timbulnya resiko bahaya akibat ledakan yang berasal dari pembakaran gas hidrogen. Perlunya dilakukan pengkajian terhadap kondisi-kondisi yang menyebabkan terjadinya ledakan akibat penggunaan bahan bakar gas hidrogen sebagai akibat dari proses pembakaran pada fase transisi dari deflagrasi (*deflagration*) menjadi detonasi (*detonation*).

*Deflagration to Detonation Transition* (DDT) adalah proses perubahan dari deflagrasi (*subsonic combustion*) ke detonasi (*supersonic combustion*). Proses DDT itu sendiri dimulai dari pelepasan kalor (*heat release*) dari sumber api ke campuran bahan bakar (*premixed*). Pada saat pelepasan kalor tersebut temperatur *premixed* akan meningkat di sekitar sumber api hingga mencapai temperatur tertentu yang dapat memacu reaksi dari *premixed* itu sendiri (*auto-ignition mechanism*). Reaksi kimia dari *premixed* tersebut akan merubah kondisi laminar (*laminar flame*) menjadi turbulen (*turbulent flame*) dimana muka api (*flame front*) tidak rata (*planar*) lagi karena adanya pemanasan gas di belakang *flame front*. Akibat bertambahnya kecepatan reaksi hingga mencapai kecepatan suara, sehingga di depan *flame front* akan terbentuk *blast wave* yang akan meningkatkan temperatur dan tekanan *premixed* di belakang *blast wave*. Ketika peningkatan temperatur dan tekanan ini berlangsung dalam waktu yang lebih cepat (kurang dari 1 mikrosecond) terjadilah detonasi dimana kecepatan reaksi melebihi kecepatan suara dan *blast wave* berubah menjadi *shock wave*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *equivalence ratio* dan tekanan awal terhadap mekanisme DDT pada campuran bahan bakar gas hidrogen-oksigen sehingga diperoleh karakteristik dan pola perambatan api selama proses transisi dari deflagrasi menjadi detonasi.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menginvestigasi proses DDT. Oppenheim, Manson dan Wagner (1963) telah melakukan investigasi tentang mekanisme DDT dengan menggunakan *laser Schlieren photography* pada campuran *stoichiometric* antara gas hidrogen dan oksigen pada kondisi tekanan 0,3 atm dan temperatur ruang. Pembangkitan *pressure wave* dibagian *front wave* terjadi akibat adanya peningkatan kecepatan perambatan api (*acceleration flame*). Dari investigasi ini mekanisme DDT berawal dari adanya pembangkitan gelombang terkompresi dari percepatan api laminar, pembentukan *shock front* akibat penggabungan *compression wave*, hingga dihasilkannya kondisi *steady wave* yang establish. Sedangkan lokasi terjadinya mekanisme DDT tergantung pada kekuatan *pressure wave* yang dibangkitkan.

Guirao at. Al (1982) melakukan investigasi efek *equivalence ratio* (ER) dari campuran bahan bakar gas hidrogen dengan udara dengan menggunakan teknik pengukuran *cell* detonasi, diameter kritis pipa dan energi

kritis untuk inisiasi.

Campuran bahan akan kurang sensitif untuk detonasi jika gas *inert* ditambahkan ke dalam campuran gas. Sedangkan pada temperatur rendah, penambahan gas *diluent* seperti uap air, karbon dioksida, argon, nitrogen ke dalam campuran hidrogen-udara dapat membantu pengendalian gelombang detonasi secara efektif.

Sentanuhady *et al.* (2005) yang menginvestigasi *detonation limit* dari bahan bakar hidrogen-oksigen yang dicampur dengan argon sebagai *diluent*. Detonasi akan merambat dengan mudah jika campuran bahan bakar hidrogen-oksigen dan argon adalah sekitar 1,3. Kondisi campuran bahan bakar dengan *equivalence ratio* yang kurang dari 1,3 akan menyebabkan kecepatan reaksi menurun, sehingga tidak mampu mengejar *shock wave* yang merambat di depan *reaction wave*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh-pengaruh komposisi gas dan tekanan awalnya terhadap mekanisme perambatan api dari kecepatan subsonic ke kecepatan supersonic.

## 2. Metoda Penelitian

Gambar skema peralatan penelitian ini ditunjukkan pada gambar 1. Eksperimen ini menggunakan pipa uji (*test tube*) detonasi dengan panjang total 1 meter dan diameter dalam 50 mm. *Detonation wave* akan merambat dari *test tube* ke arah *dump tank*. (lihat gambar 1). Dua sensor tekanan ( $P_1$  dan  $P_2$ ) dipasang di sepanjang *test tube*. Untuk mendeteksi proses pembakaran pada suatu posisi, dua buah sensor *ionization* ( $I_1$  dan  $I_2$ ) juga dipasang pada *test tube* yang posisinya berlawanan dengan posisi sensor tekanan.

Dengan menggunakan sensor-sensor diatas, kecepatan rata-rata dari *detonation wave* akan dapat dihitung dengan tepat. Sensor tekanan dan sensor *ionization* tersebut dihubungkan dengan *amplifier* dan *digital data recorder* untuk memperoleh data yang dapat diolah dan divisualisasikan di komputer.

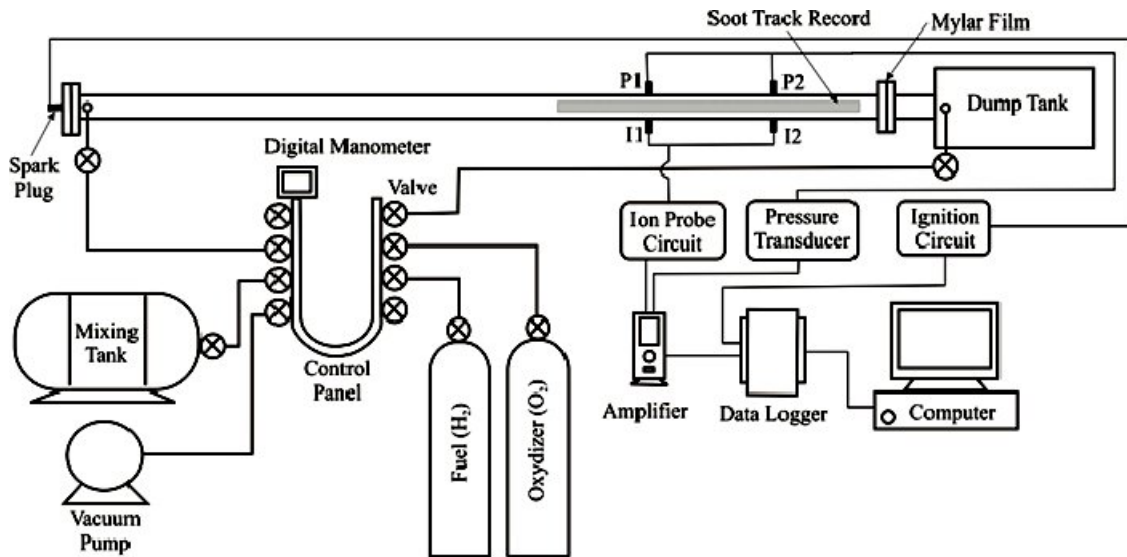
Busi (*spark plug*) dan unit coil dari kendaraan bermotor digunakan sebagai sumber energi untuk mengawali proses pembakaran dalam tube.

*Flow field* dari proses pembakaran direkam dengan teknik *soot track record* untuk mendapatkan gambaran *detonation cell* di dalam pipa, sehingga mekanisme dari

Tabel 1. Kondisi Eksperimen

Parameter	Kondisi
Bahan Bakar	Hidrogen
Oksidiser	Oksigen
<i>Equivalence ratio</i>	0,5 – 2,0
Tekanan awal (kPa)	40 – 100
Suhu	Suhu ruangan





Gambar 1. Skematik aparatus pada penelitian ini

DDT dapat dipahami.

Gas uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas hidrogen-oksigen dengan *equivalence ratio* yang bervariasi dan campuran bahan bakar tersebut disimpan selama minimal 12 jam sebelum digunakan untuk eksperimen guna menjamin homogenitas yang baik.

Proses pengisian (*filling*) campuran bahan bakar gas (premixed gas) ke dalam *detonation tube* dikontrol dengan *high-precision digital pressure sensor* (KEYENCE) sehingga didapatkan keakuratan tekanan awal (*initial pressure*) campuran bahan bakar gas di dalam *detonation tube*. Tekanan awal campuran bahan bakar di dalam *detonation tube* di variasikan antara 40 kPa sampai 100 kPa. Sedangkan temperatur dimana eksperimen ini dilaksanakan berada pada temperatur ruangan yaitu sekitar 27 – 33 °C. Secara detail, bahan bakar dan kondisi eksperimen ditampilkan pada tabel 1.

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1. Mekanisme DDT



Gambar Rekaman proses pembentukan DDT

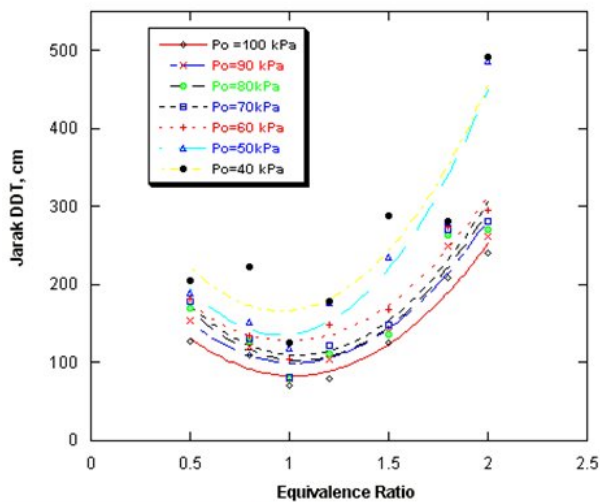
Gambar 2 adalah proses rekaman terjadinya

phenomena deflagration to detonation (DDT) selama pembakaran campuran gas hidrogen dan oksigen berlangsung di dalam pipa uji. Proses DDT diawali dari adanya perambatan *reaction wave* pada kecepatan subsonik (*deflagration*) kemudian meningkat menjadi supersonik (*detonation*) yang ditandai oleh perubahan bentuk api laminar (*laminar flame*) menjadi api turbulen (*turbulent flame*). Pada tahap ini pembentukan DDT selalu ditandai oleh adanya pembentukan garis bertekanan tinggi yang diikuti oleh pembentukan sel detonasi yang relatif kecil dan belum stabil (*unstable detonation*), kemudian membesar dan relatif stabil ukuran cellnya (*stable detonation*).

Dalam suatu pembakaran campuran gas, proses menuju *stable detonation* sangat ditentukan oleh kecepatan perambatan gelombang detonasi yang dihasilkan. Sebuah detonasi yang stabil akan cepat dicapai dan ukuran sel detonasi yang dihasilkan sudah merata bila kecepatan perambatan gelombang detonasinya tinggi dan sebaliknya tercapainya detonasi yang stabil akan berlangsung lama bila kecepatan perambatan gelombang detonasinya rendah.

#### 3.2. Pengaruh *Equivalence ratio*

Fenomena DDT yang terjadi pada pembakaran gas campuran hidrogen-oksigen sangat dipengaruhi oleh kondisi campuran. Proses DDT lebih cepat terjadi pada kondisi stoikiometri dan tekanan awal yang tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3 yang menunjukkan bahwa pada tekanan awal 100 kPa dan *Equivalence ratio* campuran 1,0 (stoikiometri) DDT terjadi pada jarak 70 cm dari *igniton point*. Dari gambar 3 tersebut tampak bahwa DDT yang terjadi pada pembakaran gas campuran hidrogen-oksigen sangat dipengaruhi oleh kondisi campuran gas. Proses DDT lebih cepat terjadi

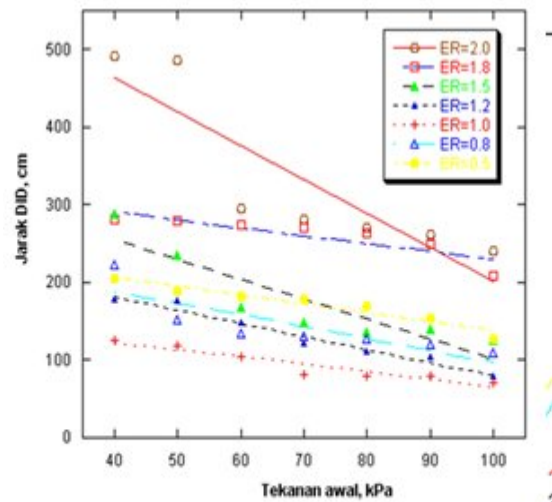


Gambar 3 Perubahan jarak DDT terhadap Equivalent ratio

pada kondisi stoikiometri dan tekanan awal yang tinggi. Fenomena ini menjelaskan bahwa ketika tekanan awal pembakaran gas cukup tinggi dan kondisi campurannya stoikiometri, kecepatan perambatan api meningkat lebih cepat sehingga juga terjadi percepatan perambatan api dari deflagrasi menjadi detonasi.

Hal ini dapat difahami bahwa pada kondisi stoikiometri ini gas hidrogen dan oksigen molekul-molekulnya mempunyai *ratio* yang tepat untuk berlangsungnya pembakaran secara sempurna, sehingga kecepatan reaksi pembakarannya cukup tinggi dan mampu menghasilkan akselerasi api menjadi supersonik.

Terlihat adanya kecenderungan bahwa proses DDT akan lebih lama terjadi saat tekanan awal campuran diperkecil dimana campuran bahan bakar pada kondisi kondisi *lean mixtures* dan *rich mixtures* yang ditandai oleh bertambahnya jarak DDT. Bertambahnya jarak DDT pada kondisi *lean mixture* disebabkan berkurangnya kecepatan detonasi akibat tereduksinya *energy release* oleh molekul-molekul oksigen. Sedangkan ketika kondisi *rich mixture*, peningkatan jarak DDT yang disebabkan oleh berkurangnya kecepatan rambat gelombang detonasi akibat *energy release* diserap oleh molekul-molekul gas hidrogen. Pada kedua kondisi ini dapat dikatakan bahwa proses pembakaran gas-gas reaktan menjadi produk tidak sempurna sehingga akselerasi perambatan api menjadi lambat.



Gambar 4. Jarak DDT terhadap Tekanan awal campuran gas

Pada kondisi *rich mixture* jarak DDT terjauh yang dicapai adalah 491 cm sedangkan saat *lean mixture* jarak DDT berada 206 cm dari *ignition point*. Dari sini dapat disimpulkan bahwa pada pembakaran gas hidrogen dan oksigen, proses DDT akan berlangsung lambat bila campuran bahan bakar *lean mixture* dan *rich mixture*. Sebaliknya proses DDT akan semakin cepat berlangsung bila campuran bahan bakarnya pada kondisi stoikiometri.

### 3.3. Pengaruh Tekanan Awal

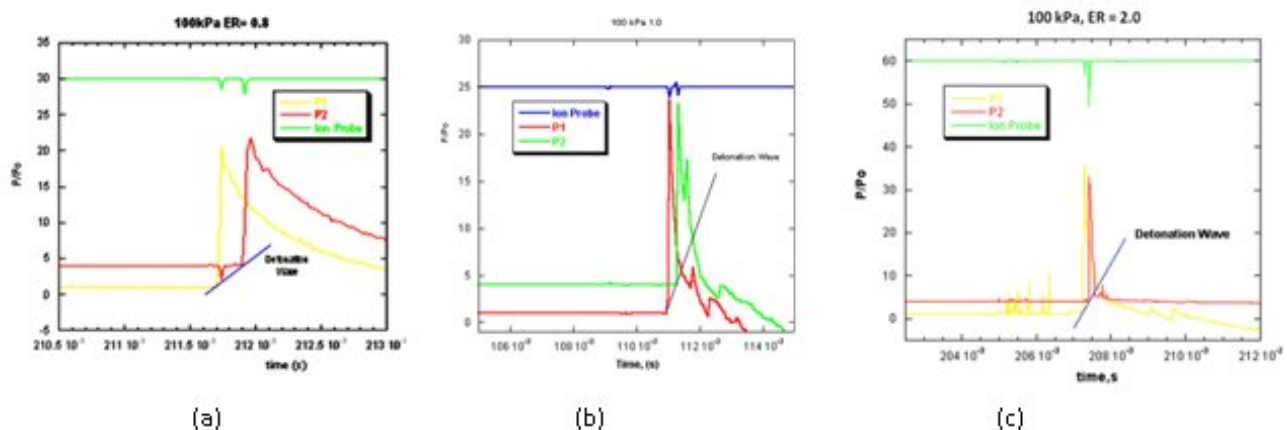
Gambar 4 adalah grafik jarak DDT terhadap tekanan awal campuran gas, mulai dari tekanan awal 40 kPa sampai dengan 100 kPa dengan interval 10 kPa. Dari gambar 4 dapat dilihat dengan jelas bahwa jarak DDT semakin berkurang bila tekanan awal campuran ditingkatkan. Jarak DDT paling pendek terjadi ketika tekanan awal campuran 100 kPa dan kondisi stoikiometri. Namun secara umum dapat disebutkan bahwa berkurangnya jarak DDT yang dihasilkan pada masing-masing kondisi campuran akibat peningkatan tekanan awal berlangsung secara linier. Hal ini dapat dilihat pada saat kondisi campuran miskin ( $ER = 0,5$ ) ketika tekanan awal campuran dinaikkan dua kali dari 40 kPa menjadi 80 kPa, jarak DDT berkurang dari 206 cm menjadi 170 cm atau hanya tereduksi sekitar 36 cm.

Ketika tekanan awal campuran ditingkatkan maka terjadi peningkatan *heat release* yang memicu naiknya temperatur *unburnt gas* menuju *auto ignition temperature* sehingga proses pembakaran akan berlangsung cepat atau *reaction time* akan lebih pendek. Dengan demikian peningkatan laju kinetik reaksi akan terjadi sebanding dengan peningkatan tekanan awal campuran dan oleh sebab itu proses perubahan dari *subsonic combustion wave* menjadi *supersonic combustion wave* akan lebih cepat dan lokasinya





semakin mendekati *ignition point*.



Gambar 5 Grafik kenaikan tekanan pada tekanan awal 100 kPa (a) ER=0.8, (b) ER=1.0, (c) ER=2.0

### 3.4. Kenaikan Tekanan

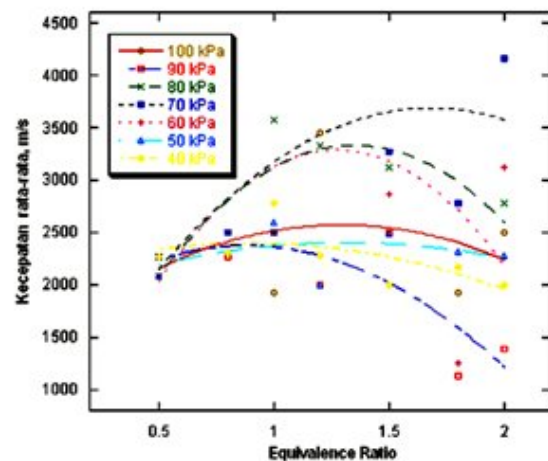
Gambar 5 adalah karakteristik kenaikan tekanan pada pembakaran bahan bakar campuran gas hidrogen-oksigen untuk berbagai variasi *equivalence ratio*. Pada gambar 5a kondisi campuran dengan *equivalence ratio* 0,8 (*lean mixture*) terlihat bahwa kenaikan tekanan yang dimonitor oleh sensor  $P_1$  dan  $P_2$  mengalami kenaikan mencapai 21 kali tekanan awalnya.

Sedangkan dari gambar 5c saat pembakaran berlangsung pada tekanan awal yang sama tetapi kondisi campuran lebih kaya (*rich mixture*) dapat dilihat bahwa kenaikan tekanan mencapai 35 kali tekanan awal atau 3500 kPa. Kenaikan tekanan saat kondisi stoikiometri (ER = 1) dicapai sebesar 24 kali tekanan awalnya. Sesungguhnya pada kondisi stoikiometri dimana pembakaran berlangsung secara sempurna dan *energy release* yang dihasilkan paling tinggi akan mempunyai nilai kenaikan tekanan yang paling tinggi pula.

Kondisi kenaikan tekanan seperti yang terlihat pada gambar 5b, diduga disebabkan oleh keterbatasan kemampuan *data logger* yang hanya memiliki kemampuan deteksi data pada *sample rate* sekitar 15000 data per detik, sehingga kenaikan tekanan yang terdeteksi oleh sensor  $P_1$  dan  $P_2$  belum mencapai tekanan puncaknya (*Von Neumann Spike point*).

Secara teoritis kenaikan Tekanan CJ tertinggi adalah 1872 kPa yaitu 18,72 kali tekanan awal diperoleh pada kondisi campuran dengan *equivalence ratio* ER = 1,0. Sedangkan dari hasil pengujian yang dilakukan seperti tampak pada gambar 5, kenaikan tekanan paling tinggi adalah 3500 kPa atau 35 kali tekanan awal, atau hampir 2 kali tekanan CJ yang diperoleh pada kondisi campuran dengan *equivalence ratio* ER = 2,0.

### 3.4. Kecepatan Detonasi Rata-rata



Gambar 6.Kecepatan rata-rata terhadap *equivalence ratio*

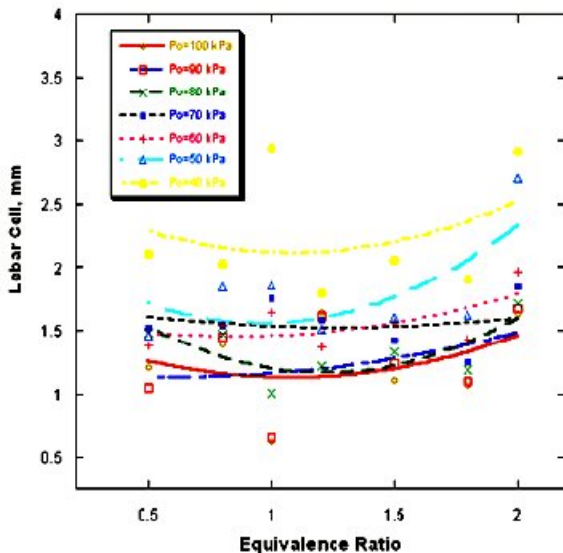
Gambar 6 adalah kecepatan rata-rata detonasi terhadap *equivalence ratio*. Dari gambar tersebut tampak bahwa kecepatan detonasi rata-rata paling tinggi pada saat kondisi campuran stoikiometri dan kecepatan detonasi rata-rata akan semakin berkurang ketika campuran miskin dan kaya. Hal ini dapat difahami karena pada saat kondisi campuran stoikiometri, *heat release* dari pembakaran sangat tinggi sehingga kecepatan perambatan *detonation wave* semakin meningkat dan sebaliknya terjadi ketika kondisi campurannya miskin dan kaya.

### 3.5. Sel Detonasi

Karakteristik detonasi dapat digambarkan dari struktur sel yang dihasilkan ketika proses pembakaran gas hidrogen dan oksigen berlangsung. Proses pembentukan sel detonasi diawali oleh adanya interaksi (*collision*) antar *triple point* yaitu *shock wave*, *mach*



stem dan reflection wave. Berdasarkan perhitungan ukuran lebar sel detonasi pada gambar 7 terlihat bahwa ukuran lebar sel detonasi relatif konstan ketika kondisi



Gambar 7. Perubahan ukuran sel detonasi pada berbagai equivalence ratio

campurannya mendekati stoikiometri.

Sedangkan pada saat kondisi campurannya kaya dan miskin ukuran lebar sel-sel detonasi cenderung semakin bertambah. Perubahan ukuran lebar sel detonasi ini disebabkan oleh pengaruh kecepatan perambatan detonasi yang berbeda-beda pada tiap-tiap kondisi campuran gas hidrogen-oksigen. Akibat dari perbedaan kecepatan reaksi dari campuran bahan bakar tersebut, interval tumbukan akan semakin cepat, sehingga sel detonasi akan semakin kecil bila kecepatan detonasi meningkat.

#### 4. Kesimpulan

Pembentukan DDT selalu ditandai adanya pembentukan garis bertekanan tinggi yang diikuti oleh pembentukan sel detonasi yang belum stabil (*unstable detonation*) dan ukuran selnya masih kecil, kemudian membesar dan merata hingga mencapai detonasi yang stabil (*stable detonation*).

Pada pembakaran campuran gas hidrogen dan oksigen di dalam pipa terdapat karakteristik DDT yang dipengaruhi oleh perubahan *equivalence ratio* dan tekanan awal campuran dimana jarak DDT akan mendekati lokasi *ignition point* pada kondisi campuran stoikiometri dan akan semakin jauh bila kondisi campuran *lean mixture* dan *rich mixture*.

Sedangkan peningkatan tekanan awal campuran dapat memperpendek jarak DDT terhadap *ignition point* dan akan memperkecil ukuran lebar sel detonasi. Kenaikan tekanan paling tinggi adalah 3500 kPa mencapai 35 kali tekanan awal campuran atau

mendekati 2 kali Tekanan CJ (1876 kPa) pada kondisi equivalence ratio 2,0 hal ini terjadi pada kondisi ini sensor dapat merekam fenomena *Von Neumann Spike* dimana detonasi akan menjak drastis tekannya pada saat kondisi mendekati proses DDT.

Ukuran lebar sel detonasi yang terbentuk dari proses DDT akan semakin mengecil pada kondisi campuran stoikiometri dimana lebar sel detonasi minimum,  $\lambda_{\min} = 0,62$  mm dan lebar sel detonasi akan bertambah besar pada kondisi lean mixture dan kaya (*rich mixture*) yang mempunyai lebar sel maksimumnya  $\lambda_{\max} = 2,91$  mm.

#### Referensi

- Oppenheim K., Manson N., and Wagner H., Recent Progress in Detonation Research, AIAA J., Vol. 1, pp. 2243 – 2252, 1963
- Guirao CM, Knystautas R, Lee JH, Benedick W, Berman M, 1982, Hydrogen-Air Detonations, Proceeding of the 19<sup>th</sup> Combustion Institute, 583-590
- Sentanuhady J., Obara T., and Ohayagi S., Detonability Limits of Hydrogen Air Mixture Diluted by Argon, Proceeding of Japan Explosive Society, vol.-, pp.-, 2004

