

PENGARUH MODEL DIFRAKSI TERHADAP PERAMBATAN GELOMBANG DETONASI PADA CAMPURAN BAHAN BAKAR HIDROGEN-OKSIGEN DENGAN DILUENT ARGON

Bambang Puguh

Jurusan Teknik Konversi Energi - Politeknik Negeri Bandung

Email: bambang.energi@gmail.com

Abstrak

Pada sistem pembakaran supersonik, *shock wave* dan *reaction wave* merambat dengan kondisi berhimpit dengan kecepatan di bawah 1 mikro detik. *Shock wave* yang memiliki tekanan tinggi hingga mencapai 20 kali tekanan awal akan membahayakan bagi keselamatan manusia jika kecelakaan detonasi terjadi. Dengan demikian diharapkan kecelakaan yang diakibatkan oleh gelombang detonasi akan dapat dihindari atau diminimalisasi. Hal ini dilakukan dengan cara mengubah gelombang detonasi menjadi gelombang deflagrasi, yaitu memisahkan *shock wave* dengan *reaction wave* akibat proses ekspansi gelombang detonasi. Pada eksperimen ini, model diuji pada pipa uji detonasi (PUD) horizontal berpenampang lingkaran dengan diameter dalam 50 mm dan panjang 6.300 mm yang terdiri dari seksi driver sepanjang 1000 mm, seksi driven sepanjang 5300 mm. Pada seksi driven dipasang model facing step 50 % dengan bahan aluminium sepanjang 300 mm. Empat unit sensor tekanan yang berfungsi untuk merekam profil tekanan sepanjang proses pembakaran dan empat unit ionisation probe yang berfungsi untuk mendeteksi waktu kedatangan flame front, dipasang masing masing 2 unit di upstream dan 2 unit di downstream dari model dengan posisi saling berhadapan. Campuran bahan bakar untuk seksi driver yang digunakan pada eksperimen ini adalah campuran hidrogen dan oksigen dengan kondisi stokiometrik dan tekanan awal 100 kPa untuk menjamin terjadinya detonasi pada seksi driver, sedangkan pada seksi driven campuran bahan bakar yang digunakan adalah campuran hidrogen-oksigen dengan diluent argon pada variasi tekanan awal mulai 20 kPa hingga 100 kPa. Dari hasil penelitian diperoleh 3 mekanisme perambatan gelombang detonasi di belakang model facing step 50 %, yaitu a) Reinisiasi detonasi oleh adanya DDT, yaitu kondisi merambatnya kembali gelombang detonasi akibat proses deflagration to detonation transition di daerah downstream dari model setelah sebelumnya quenching detonasi akibat gelombang ekspansi, (b) Reinisiasi detonasi oleh adanya S-W, kondisi merambatnya kembali gelombang detonasi akibat adanya interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa, (c) transmisi detonasi, merupakan proses perambatan gelombang detonasi tanpa melalui proses quenching di daerah downstream dari model.

Kata kunci : detonasi, deflagrasi, shock wave, facing step.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Detonasi adalah gelombang pembakaran yang merambat pada kecepatan *supersonic*, dimana *shock wave* akan terbentuk tepat di depan *reaction wave*. Semakin cepat *reaction rate*, maka *shock wave* akan semakin dekat dengan *reaction wave* sehingga keduanya merambat berhimpit dengan jarak di bawah 1 μ s, dan pada kondisi ini terjadi detonasi. Fenomena detonasi ini memiliki tekanan yang sangat tinggi hingga bisa mencapai lebih dari 20 kali dari tekanan awal. Tekanan yang ekstrim tinggi ini berpotensi membahayakan keselamatan manusia dan dapat menghancurkan peralatan yang ada.

Untuk menghindari kecelakaan yang terjadi karena detonasi, maka pada sistem yang menggunakan bahan bakar yang sangat reaktif memerlukan alat pengaman yang berfungsi

untuk menghentikan proses perambatan detonasi. Cara mengendalikan detonasi ini hanya efektif jika perambatan *shock wave* dan *reaction wave* dapat dipisahkan. Salah satu teknik untuk mengendalikan perambatan detonasi adalah dengan menghambat laju gelombang detonasi. Cara inilah yang dipergunakan untuk mendesain alat pengaman detonasi (*detonation arrester*) yang keberadaannya dapat memberikan rasa aman di industri atau suatu sistem yang menggunakan pipa sebagai media untuk mengalirkan bahan bakar murni ataupun *premixed* untuk menunjang proses kerjanya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dan pola perambatan detonasi di belakang model *facing step* yang dapat digunakan sebagai metode dalam mendesain alat pengaman di industri yang menggunakan

bahan bakar hidrogen dengan diluent argon, sehingga jaminan keamanan dapat terpenuhi.

Dari penelitian ini diharapkan dapat diketahui mekanisme dan pola rambatan detonasi di belakang model *facing step* 50 % serta parameter-parameter apa saja yang mempengaruhi perambatan detonasi sehingga didapatkan data yang akurat untuk mendesain *detonation arrester* pada suatu sistem yang menggunakan bahan bakar hidrogen.

Tinjauan pustaka

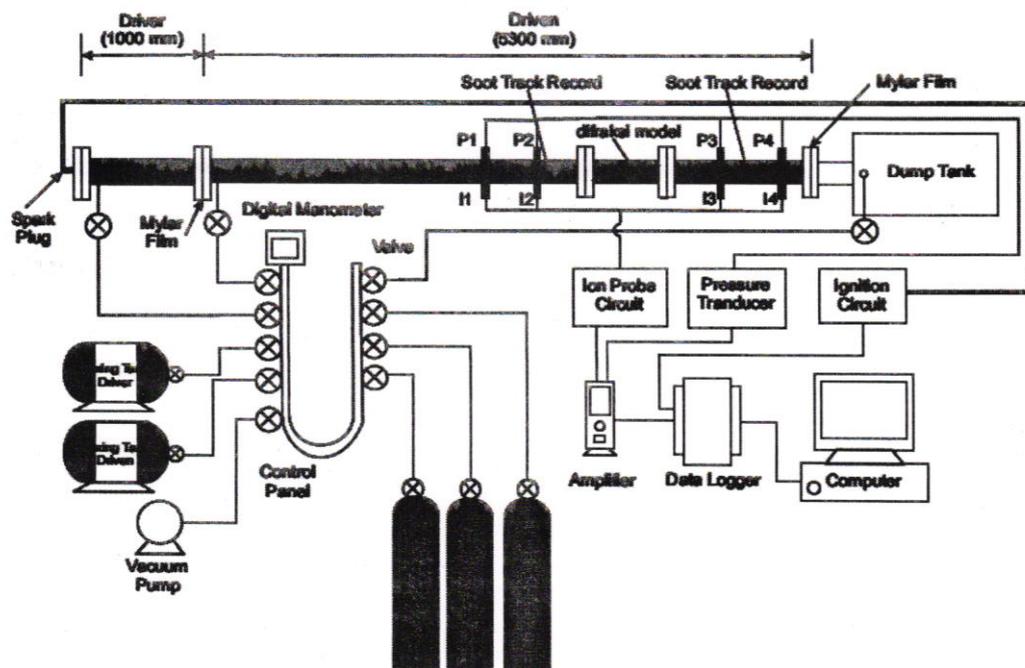
Quenching detonasi dapat tercapai jika perambatan gelombang detonasi mengalami fenomena difraksi yang melalui perubahan diameter pipa. Gelombang detonasi yang melalui *sudden enlargement* akan mengalami perubahan kecepatan, sehingga gelombang detonasi dapat dikendalikan menjadi deflagrasi.

Ohyagi et al. (2002) melakukan penelitian difraksi dan re-inisiasi detonasi melalui

backward-facing step yang menyimpulkan bahwa penghalusan gelombang yang dipancarkan dari sudut difraksi dapat mengurangi kekuatan *shock wave*, dimana semakin kecil tekanan awal bahan bakar mengakibatkan terjadinya kegagalan detonasi di belakang model.

Sedangkan berkaitan dengan unjuk kerja bahan bakar, Sentanuhady (2006) melakukan eksperimen menggunakan campuran bahan bakar gas hidrogen, udara dan argon. Hasil penelitian menunjukkan bahwa detonasi akan merambat dengan mudah jika campuran bahan bakar hidrogen udara dan argon sekitar 1,3.

Pada tahun 2007, Zhu et al. meneliti menggunakan *perforate plate* sebagai pembangkit difraksi pada gelombang detonasi, menyimpulkan bahwa batas kritis terjadinya detonasi yang disebut CJ deflagrasi merupakan setengah kecepatan CJ detonasi.



Gambar 1. Skema pipa uji detonasi horizontal, panjang total L = 6300 mm dan diameter dalam $\varnothing = 50$ mm. Model facing step 50% berada di antara P2 dan P3. Soot track record dipasang di *upstream* dan *downstream* model facing step.

METODE PENELITIAN

Pada Gambar 1 menunjukkan skematik eksperimen, dimana pipa uji detonasi (PUD) dan alat-alat pendukung lainnya diinstal. PUD dengan panjang total 6.300 mm dan diameter dalam 50 mm dibagi dalam 2 bagian, yaitu

bagian pertama disebut seksi *driver* dan bagian kedua disebut seksi *driven*. Seksi *driver* berfungsi memberikan energi inisiasi yang besar ke dalam seksi *driven* sehingga sebelum *upstream* dari model diharapkan gelombang detonasi sudah terbentuk dengan stabil.

Gelombang detonasi akan merambat dari seksi *driver* melewati seksi *driven* yang dipasang model *facing step* 50 % menuju ke arah *dump tank*.

Dalam penelitian ini, model *facing step* terbuat dari alumunium dengan panjang 300 mm, diameter 50 mm dan disayat sebesar 50 % digunakan sebagai model untuk mengetahui mekanisme dan karakteristik gelombang detonasi serta efek dari variasi tekanan terhadap *perambatan detonation*.

Empat sensor dipasang sepanjang seksi *driven* dimana masing-masing 2 sensor tekanan dipasang di daerah *upstream* (P_1 dan P_2) dan *downstream* (P_3 dan P_4) dari model *facing step*.

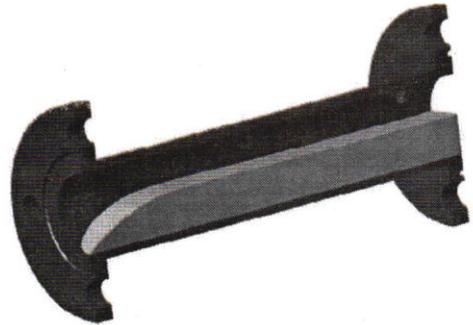
Tabel 1. *Experimental conditions*

Parameter	Driver tube	Driven
Fuel	Hydrogen (H_2)	Hydrogen (H_2)
Oxidizer	Oxygen (O_2)	Oxygen (O_2)
Diluent	-	Argon (Ar)
Equivalence ratio, ϕ	1 (stoichiometric)	1 (stoichiometric)
Initial pressure (kPa)	100	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Temperature	Room temp	Room temp

Hal ini diperlukan karena untuk mendapatkan profile tekanan *shock wave* di daerah *upstream* dan *downstream* dari model *facing step*. Untuk mendeteksi proses pembakaran pada suatu posisi, empat *ionization probe* juga dipasang pada seksi *driven* yang posisinya berhadapan dengan posisi sensor tekanan dan dipasang pada posisi I_1, I_2, I_3 , dan I_4 . Dengan menggunakan sensor-sensor di atas, kecepatan rata-rata dari *shock wave* dan *reaction wave* akan dapat dihitung dengan tepat. Sensor tekanan dan *ionization probe* tersebut dihubungkan dengan *amplifier* dan *digital data recorder*, untuk kemudian datanya dapat diolah dan divisualisasikan di komputer.

Proses pengisian campuran bahan bakar gas ke dalam PUD dikontrol dengan *high-precision digital pressure sensor* (KEYENCE) sehingga didapatkan keakuratan tekanan awal campuran bahan bakar gas di dalam PUD.

Busi dan *unit coil* dari kendaraan bermotor digunakan sebagai sumber energi untuk mengawali proses pembakaran di dalam seksi *driver*. Proses pembakaran di daerah *upstream* dan *downstream* direkam dengan teknik *soot track record* untuk mendapatkan gambaran sel detonasi di sekitar model *facing step*, sehingga mekanisme dari perambatan detonasi dan *quenching* detonasi dapat dipahami.



Gambar 2. Model *facing step* 50 %

Campuran bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas hidrogen dengan *oxidizer* oksigen pada kondisi stoikiometrik. Campuran bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas hidrogen dengan *oxidizer* oksigen pada kondisi stoikiometrik.

Campuran bahan bakar tersebut disimpan selama minimal 12 jam sebelum digunakan dalam eksperimen untuk menjamin homogenitas yang lebih lebih baik. Tekanan awal campuran bahan bakar di dalam PUD disetting pada tekanan 10 kPa sampai 100 kPa dan dilakukan pada suhu ruangan berkisar antara 27- 33°C seperti dalam Tabel 1.

Dari tahapan di atas, diharapkan parameter-parameter termodinamika yang mempengaruhi perambatan detonasi bisa didapatkan dan digambarkan dengan jelas. sehingga dengan mudah dapat diimplementasikan dalam proses desain *detonation arrester* untuk sistem berbahan bakar hidrogen.

HASIL PENELITIAN

Dari hasil penelitian ini didapatkan data tekanan gelombang kejut, ionisasi api pembakaran dan sel detonasi, maka perambatan gelombang detonasi dapat diklasifikasikan menjadi tiga

kondisi perambatan *shock wave* dan *reaction wave* setelah melalui *facing step* yaitu, (a) Reinisiasi detonasi oleh adanya DDT, (b) Reinisiasi detonasi oleh adanya S-W, (c) Transmisi detonasi . Masing-masing pola rambatan akan dijelaskan berikut ini.

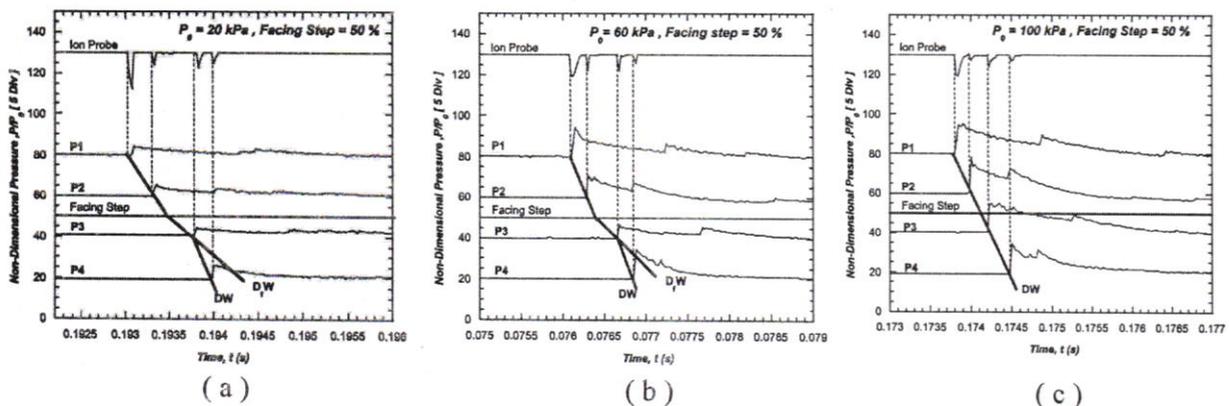
Dari pengujian pada tekanan awal 20 kPa, gelombang detonasi merambat pada kondisi stabil pada P_1 dan P_2 seperti terlihat pada gambar 3a, Setelah melalui *facing step*, gelombang detonasi ter-difraksi menjadi gelombang deflagrasi yang disebabkan karena *sudden enlargement*.

Di daerah dimana sensor P_3 ditempatkan, kenaikan tekanan P_3 tidak bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi, sehingga dapat dikatakan bahwa pada daerah ini perambatan pembakaran dikategorikan gelombang deflagrasi. Hal ini diperkuat dengan besarnya kenaikan tekanan pada sensor P_3 hanya 4 kali tekanan awal (80 kPa) dimana tekanan ini jauh lebih kecil dari tekanan teoritis CJ detonasi, $P_{CJ} = 350$ kPa. Gelombang deflagrasi ini cenderung menjadi lebih cepat dari posisi ke posisi dan akhirnya melalui proses DDT menjadi gelombang detonasi dengan ditandai adanya deteksi naiknya tekanan di sensor P_4 bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi.

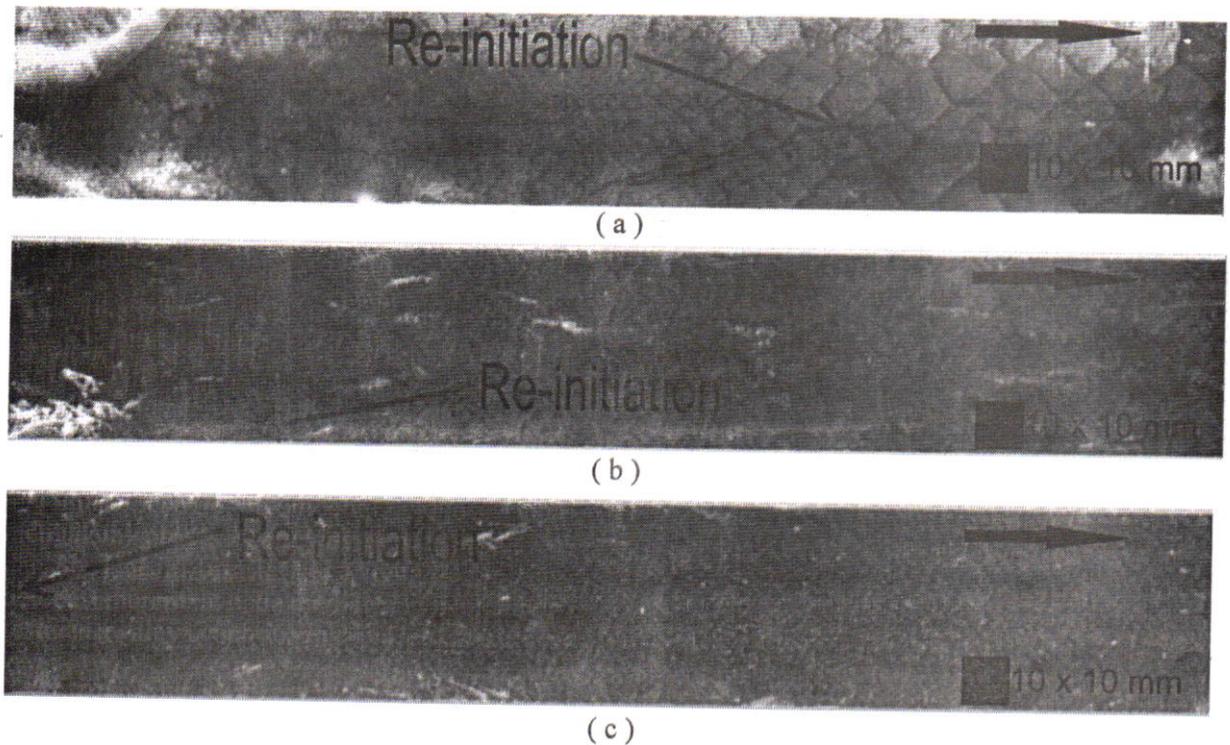
Bila dilihat dari *soot track record* pada kondisi yang sama seperti tampak pada Gambar 4a, pada daerah setelah model tidak terdapat sel relatif kecil dan berubah menjadi lebih besar

detonasi tetapi pada jarak 160 mm dari model mulai tampak sel detonasi dengan ukuran yang dan merata. Ukuran sel detonasi yang stabil dan merata ini menunjukkan bahwa setelah proses re-inisiasi gelombang detonasi merambat pada kondisi yang stabil. Kondisi ini diklasifikasikan sebagai re-inisiasi gelombang pembakaran akibat proses DDT.

Fenomena re-inisiasi detonasi oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa ditunjukan pada Gambar 4b yang terjadi pada kondisi eksperimen pada tekanan awal $p_o = 60$ kPa. Dampak dari adanya model *facing step* menyebabkan terjadinya perlambatan pembakaran, karena gelombang detonasi terdifraksi menjadi gelombang deflagrasi yang ditandai dengan tidak terbentuknya sel detonasi setelah model *facing step*. Melalui interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa, gelombang deflagrasi terinisiasi dan berubah menjadi gelombang detonasi pada jarak sebelum sensor P_3 , sehingga sensor P_3 dan P_4 mendeteksi adanya perambatan gelombang detonasi dengan ditandai naiknya sinyal tekanan bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi. Hal ini diperkuat dengan terbentuknya sel detonasi yang terlihat pada Gambar 4b dengan ukuran sangat kecil mulai dari bagian sisi tepi berangsur-angsur merata di seluruh permukaan dengan ukuran yang stabil. Besarnya tekanan gelombang kejut hampir konstan mencapai 14.7 kali tekanan awal yaitu 882 kPa dimana tekanan ini sedikit lebih kecil dari tekanan teoritis CJ detonasi $P_{CJ} = 1092$ kPa.



Gambar 3. Profil gelombang reaksi dan tekanan gelombang kejut pada kondisi (a) re-inisiasi katena DDT, $P_o = 20$ kPa (b) re-inisiasi detonasi karena S-W, $P_o = 60$ kPa. (c) transmisi detonasi $P_o = 100$ kPa,

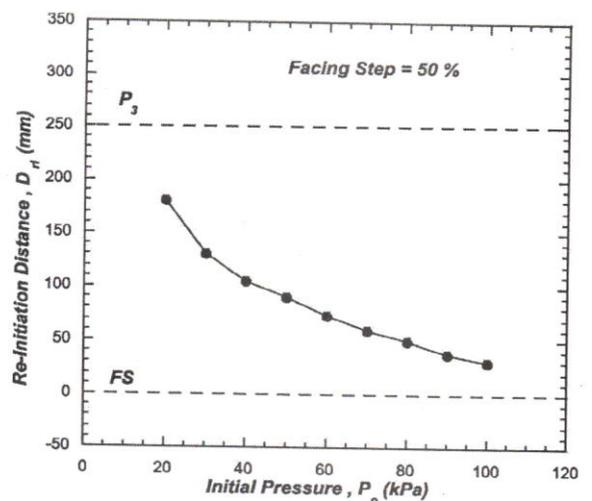


Gambar 4. Rekaman *soot track record* di belakang facing step pada kondisi (a)) Reinisiasi detonasi oleh proses DDT (b) Reinisiasi detonasi oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa (c) Transmisi detonasi

Jika tekanan awal gas dinaikkan kembali menjadi 100 kPa, maka kondisi di *upstream* dari model adalah gelombang detonasi yang stabil seperti tampak pada gambar 3c dan setelah gelombang detonasi tersebut melalui model *facing step* gelombang pembakaran tetap merambat sebagai gelombang detonasi tanpa mengalami proses *quenching* seperti kasus 3a dan 3b. Hal ini bisa terjadi karena gelombang detonasi merambat pada media yang lebih tinggi tekanan awalnya yang sebenarnya lebih reaktif.

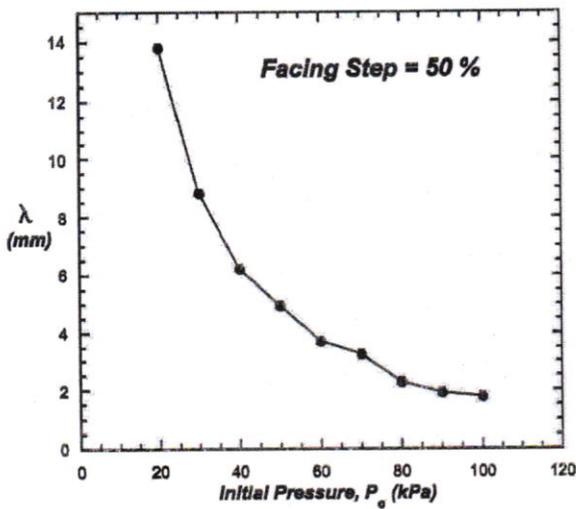
Bila dilihat pada *soot track record* pada Gambar 3c tampak bahwa proses transmisi detonasi terjadi tanpa didahului proses *quenching* yang masif. Sel detonasi tampak merata di daerah *downstream* dari model dengan ukuran yang merata dan stabil tanpa adanya daerah tanpa sel detonasi. Tipikal gelombang pembakaran seperti ini pada umumnya terjadi pada tekanan awal campuran gas yang tinggi.

Pada Gambar 5 menunjukkan hubungan antara jarak re-inisiasi detonasi dengan tekanan awal campuran bahan bakar hidrogen dan oksigen dengan diluent argon.



Gambar 5. Hubungan antara jarak re-inisiasi detonasi D_{ri} dengan tekanan awal campuran bahan bakar

Sumbu vertikal merupakan jarak re-inisiasi detonasi D_{ri} dan sumbu horizontal merupakan tekanan awal campuran bahan bakar hidrogen dan oksigen dengan diluent argon. Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa dengan tekanan yang semakin kecil maka jarak re-inisiasi detonasi D_{ri} akan lebih panjang.



Gambar 6. Hubungan tekanan inisiasi, P_0 terhadap lebar sel detonasi λ .

Proses re-inisiasi detonasi yang disebabkan oleh adanya proses DDT terjadi pada tekanan awal 20-50 kPa, sedangkan fenomena re-inisiasi detonasi terjadi karena pengaruh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa (S-W) pada tekanan awal 60-100 kPa. Dari grafik gambar 5 tampak bahwa kondisi re-inisiasi detonasi umumnya selalu terjadi sebelum posisi P_0 , hal ini menunjukkan bahwa proses re-inisiasi selalu terjadi pada jarak yang sangat pendek dari model bila dihitung dari model.

Dan dari grafik ini juga mendemonstrasikan bahwa re-inisiasi detonasi sangat dipengaruhi oleh tekanan awal campuran gas, semakin tekanan awal campuran gas maka semakin pendek jarak re-inisiasinya.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara tekanan inisiasi dengan lebar sel detonasi λ . Sumbu vertikal merupakan lebar sel detonasi λ , sedangkan sumbu mendatar merupakan tekanan inisiasi (P_0). Dari grafik tersebut menunjukkan semakin besar tekanan inisiasi maka sel detonasi semakin kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa lebar sel detonasi λ , sangat bergantung dari tekanan inisiasi dimana semakin besar tekanan inisiasi maka lebar sel detonasi semakin kecil. Ohyagi S. et al. pada tahun 2002 melaporkan bahwa parameter detonasi tidak hanya bergantung pada tingkat kereaktifan gas mempengaruhi kekuatan dari gelombang kejut tetapi lebih pada ukuran sel detonasi.

KESIMPULAN

Tiga kondisi mekanisme perambatan gelombang pembakaran dapat diobservasi dari penelitian ini, yaitu, (a) Reinisiasi detonasi oleh adanya DDT, yaitu kondisi merambatnya kembali gelombang detonasi akibat proses *deflagration to detonation transition* di daerah *downstream* dari model setelah sebelumnya *quenching* detonasi akibat gelombang ekspansi, (b) Reinisiasi detonasi oleh adanya S-W, kondisi merambatnya kembali gelombang detonasi akibat adanya interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa

c) transmisi detonasi, merupakan proses perambatan gelombang detonasi tanpa melalui proses *quenching* di daerah *downstream* dari model.

Ketiga mekanisme perambatan gelombang yang dapat diobservasi sangat dipengaruhi oleh tekanan awal campuran gas. Tekanan awal campuran gas yang rendah akan membuat mekanismenya adalah *quenching* detonasi, tekanan awal menengah mekanismenya adalah re-inisiasi, sedangkan bila tekanan awalnya tinggi akan terjadi mekanisme transmisi gelombang detonasi.

Tekanan awal campuran gas sendiri juga sangat mempengaruhi jarak re-inisiasi gelombang detonasi pada kondisi re-inisiasi detonasi akibat DDT, semakin tinggi tekanan awal, maka semakin pendek jarak re-inisiasi detonasi-nya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ohyagi S., T. Obara, S. Hoshi, P. Cai, T. Yoshihashi, 2002, "Diffraction and re-initiation of detonations behind a backward-facing step", Shock Wave, v12.
- Sentanuhady J., Obara T., Tsukada Y., Ohyagi S., 2006: *Re-initiation processes of detonation wave behind slit-plate: influence of initial test gas pressure*. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser.B72, 3158–3165.
- Santoso T., Sentanuhady J., 2010: *Mekanisme Re-inisiasi Perambatan Gelombang Detonasi di Belakang Celah Sempit*. Proceedings Seminar Nasional Thermofluid 2010.