

## RE-INISIASI DETONASI DI BELAKANG PLAT DENGAN ORIFIS GANDA 7 MM

Rizqi Fitri Naryanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 3 Oktober 2011, revisi masuk: 11 Januari 2012, diterima: 25 Januari 2012

### ABSTRACT

*Detonation waves are the combustion reaction waves that propagate at supersonic speeds. The phenomenon of detonation waves that have failed due to the diffraction process which can re-initiated was back into a detonation wave, interesting to understand that this problem related to the safety of hydrogen gas. This study aims to understand of failure mechanisms and re-initiation of detonation wave behind the plate with double orifices 7mm. This experiment use a Detonation Test Pipe (DTP) with 6 meters length, DTP is divided into two parts, namely 1 meter for the driver test pipe and 5 meters to the driven test pipe. Aluminum plate with double orifices diameter of 7 mm and the distance between the orifices 14 mm, 10 mm thickness on the driven test at 5 meters distance from the ignition point. Two mechanisms re-initiation behind the detonation wave propagation test models can be classified as follows: (1) Re-initiation detonation by DDT in down stream area. (2) Re-initiation detonation by shock-wall, re-initiation detonation by interaction between wall pipe and shock wave. Quenching detonation (deflagration) observed at initial pressure of 20kPa, while the initial pressure of 30 - 60kPa re-initiation detonation occurred in the presence of DDT process in the downstream. Re-initiation detonation wave due to interaction between shock wave with the inner wall pipe occurs at the initial pressure of 70-100kPa characterized by the formation of fine smaller detonation cells. To guaranty to make quenching detonation (deflagration), pressure must be in the low pressure at 20kPa to design detonation arrester.*

**Keywords:** *detonation, deflagration, re-initiation.*

### INTISARI

Gelombang detonasi adalah gelombang reaksi pembakaran yang merambat pada kecepatan supersonic. Fenomena gelombang detonasi yang telah gagal akibat proses difraksi yang dapat ter-re-inisiasi kembali menjadi gelombang detonasi, menarik untuk dipahami bahwa hal ini berkaitan dengan keselamatan dari gas hidrogen. Penelitian ini bertujuan untuk memahami mekanisme kegagalan dan re-inisiasi gelombang detonasi di belakang plat dengan orifis ganda 7mm. Eksperimen ini menggunakan pipa uji detonasi dengan panjang 6 meter terbagi menjadi dua bagian, yaitu 1 meter untuk bagian driver dan 5 meter untuk bagian driven. Plat aluminium dengan orifis ganda yang berdiameter 7mm dan jarak antar lubang orifis 14mm, tebal 10mm dipasang di bagian driven pada jarak 5 meter dari ignition point. Mekanisme re-inisiasi dibelakang plat dengan orifis ganda yaitu 1). Re-inisiasi detonasi karena adanya proses DDT di daerah downstream. 2). Re-inisiasi detonasi karena adanya interaksi antara gelombang kejut dengan dinding bagian dalam pipa (*shock-wall*). Quenching detonasi (*deflagrasi*) didapatkan pada tekanan awal 20kPa, sedangkan pada tekanan awal 30-60kPa terjadi re-inisiasi detonasi dengan adanya proses DDT di bagian downstream. Re-inisiasi detonasi karena adanya interaksi antara gelombang kejut dengan bagian dalam dinding pipa terjadi pada tekanan awal 70-100kPa ditandai dengan terbentuknya sel detonasi dengan ukuran yang lebih kecil. Untuk memastikan terjadinya quenching detonasi diperlukan tekanan yang rendah (20kPa) untuk mendesain piranti detonation arrester.

**Kata kunci:** *detonasi, deflagrasi, re-inisiasi*

<sup>1</sup> rizqi\_fitri99@yahoo.com

## PENDAHULUAN

Sesuai dengan Kebijakan Energi Nasional yang tertuang dalam Peraturan Presiden no 5 tahun 2006 diketahui bahwa peningkatan pemanfaatan bahan bakar gas sebagai sumber energi primer sesuai dengan sasaran kebijakan bauran energi nasional adalah 30,6 % ditahun 2025 dibanding pemakaian saat ini yang masih sekitar 28,57 % hal ini sudah mengalami sedikit kenaikan. Target ini terkait dengan pengurangan konsumsi energi primer minyak bumi dari 51,66 % saat ini menjadi hanya sekitar 20 % ditahun 2025. (Kebijakan Energi Nasional, Peraturan Presiden no 5 tahun 2006). Melalui regulasi tersebut di atas menunjukkan bahwa pada masa mendatang pemakaian bahan bakar gas akan semakin meningkat, oleh karena itu persiapan akan keamanan pada sistem perpipaannya juga harus mendapat perhatian cukup serius. Hal ini diperlukan sebagai langkah untuk menanggulangi kecelakaan yang tidak diinginkan karena kesalahan operasional pada proses eksplorasi maupun produksi karena *human error* ataupun kesalahan sistem yang mengakibatkan terjadinya ledakan dahsyat bahkan terjadinya detonasi yang sangat berbahaya.

Penggunaan gas hidrogen sebagai bahan bakar akan sangat banyak diaplikasikan karena sifat gas ini yang memiliki potensial energi yang tinggi dan hasil pembakarannya yang bersih karena menghasilkan uap air. Namun demikian hidrogen adalah jenis bahan bakar yang sangat reaktif dan mudah terbakar apabila bercampur dengan udara sehingga hal ini dapat memicu terjadinya detonasi karena mempunyai batas konsentrasi mampu bakarnya sangat luas yaitu 5-75% (*Colleg of The Dessert*), sehingga apabila terdapat kebocoran sedikit saja dan adanya kesalahan-kesalahan didalam proses produksi karena *human error* dan tidak berfungsinya sistem pengendali dapat menjadi potensi terjadinya ledakan yang dahsyat dengan dipicu terjadinya detonasi.

Semakin reaktif bahan bakar yang digunakan maka semakin cepat juga laju reaksi pembakaran terjadi, maka gelom-

bang reaksi akan semakin dekat dengan gelombang kejut. Pada fenomena detonasi, dimana *shock front* akan berhimpit dengan *reaction front* dengan jarak dibawah 1 $\mu$ s, sehingga pengendalian detonasi dengan teknik mekanikal seperti penggunaan pegas dan katup sudah tidak efektif lagi. Oleh karena itu perlu diobservasi teknik lainnya sebagai tindakan preventif untuk meminimalisir terjadinya kecelakaan detonasi pada sistem perpipaan untuk industri yang menggunakan bahan bakar yang reaktif. Teknik untuk menggagalkan detonasi ini adalah dengan cara mengendalikan perambatan *shock wave* dan *reaction wave*. Pengendalian ini dapat diperkirakan apabila gelombang detonasi mengalami difraksi, saat terdifraksi laju ekspansi produk pembakaran lebih unggul dari pada laju pelepasan energi gelombang reaksi sehingga membuat terjadinya proses pemisahan gelombang detonasi (kondisi dimana *shock front* dan *reaction front* terpisah).

Penelitian tentang teknik untuk menggagalkan detonasi dengan fenomena difraksi ini telah banyak dilakukan antara lain: Ciccarelli dan Boccio (1998) menggunakan orifis, Hayashi et al (2004) menggunakan nosel konvergen-difergen, Zhu et al (2007) menggunakan *perforate plate* dan Sentanuhady et al (2006) menggunakan *double slit plate* dan Sentanuhady et al (2010) menggunakan *narrow gap* (celah sempit). Untuk melengkapi dan menambah variasi yang sudah ada, penulis menggunakan model orifis ganda untuk membangkitkan fenomena difraksi..

Secara teknis teknik melokalisasi detonasi dengan merambatkan detonasi melalui plat dengan orifis ganda memanfaatkan perpindahan panas dari *reaction front* ke material orifis ganda, perpindahan panas yang signifikan ini menyebabkan penurunan suhu reaksi pembakaran, yang berakibat langsung pada penurunan kecepatan *shock wave*.

Hal ini mengakibatkan terlepasnya *shock front* dengan *reaction front* dengan jarak yang relatif jauh. Fenomena terpisahnya shock front dengan *reaction front* ini disebut *detonation quenching*. Walaupun pada proses *detonation*

*quenching* tidak menjamin proses *flame quenching*, namun proses ini memudahkan *flame* untuk dikendalikan.

Untuk menghindari kecelakaan yang terjadi karena ledakan, maka sistem produksi di industri yang menggunakan bahan bakar yang mudah terbakar (*reactive fuels*) memerlukan alat pengaman (*safety equipment*) yang berfungsi untuk menghentikan atau menggagalkan proses perambatan detonasi, sehingga kecelakaan detonasi dapat diantisipasi dan kerugian besar yang diakibatkan oleh ledakan dapat dihindari.

Dengan melakukan penelitian ini akan didapatkan karakteristik dan pola perambatan detonasi di belakang bahan material plat dengan orifis ganda yang dapat digunakan sebagai metode yang mendesain alat pengaman (*detonation arrester*) dalam sistem produksi di industri yang menggunakan bahan bakar hidrogen khususnya dan bahan bakar yang mudah terbakar (*reactive fuel*) pada umumnya sehingga jaminan keamanan dapat terpenuhi.

Teknik melokalisir detonasi ini hanya efektif jika perambatan *shock wave* dan *reaction wave* dapat dikendalikan. Salah satu teknik yang dapat digunakan untuk mengendalikan perambatan detonasi ini yaitu dengan melewati gelombang detonasi melalui material plat dengan orifis ganda. Gelombang detonasi yang melalui diameter lubang sempit akan mengalami ekspansi sehingga *shock wave* dan *reaction wave* terpisah yang pada akhirnya kecepatan rambat detonasi dapat dikendalikan menjadi deflagrasi (kondisi dimana *shock front* dan *reaction front* terpisah).

Dalam penelitian ini, material plat dengan orifis ganda terbuat dari aluminium dengan ketebalan 10 mm dengan diameter lubang 5 mm, dan jarak antar lubang dua kali diameter digunakan sebagai model untuk mengetahui mekanisme dan karakteristik gelombang detonasi serta efek dari variasi tekanan terhadap *detonation quenching*. Apabila segitiga pembakaran terpenuhi yaitu adanya *fuel* (bahan bakar) yang dalam hal ini hidrogen ( $H_2$ ), adanya *oxidizer* yaitu udara atau oksigen ( $O_2$ ) dan *heat*

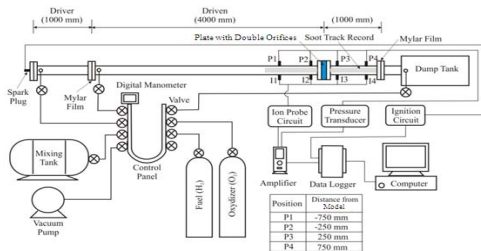
*source* yang didapat dari busi/spark plug maka terjadilah proses pembakaran. Dari sekian banyak bahan bakar yang digunakan dalam industri, hidrogen merupakan jenis bahan bakar yang sangat reaktif (*reactive fuels*) yang dapat memicu terjadinya detonasi. *Shock wave* yang merambat tepat di depan *reaction wave (flame front)* memiliki tekanan yang sangat tinggi hingga bisa mencapai 20 kali dari tekanan awal dan dapat mencapai 80 kali tekanan awal bila dalam kondisi proses *deflagration to detonation* (DDT). Tekanan yang ekstrim tinggi ini berpotensi menghancurkan apa saja yang ada di depan *shock wave* tersebut sehingga hal tersebut akan sangat membahayakan bagi keamanan keselamatan manusia dan juga dapat menghancurkan peralatan yang ada di depan *shock wave*.

## METODE

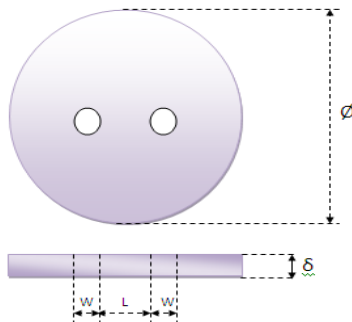
Langkah-langkah penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1 yang menunjukkan skematik eksperimen, yang memakai *horizontal detonation tube* dan alat-alat pendukung lainnya. Pipa detonasi (*detonation tube*) yang memiliki panjang total 6.000 mm dan diameter dalam 50 mm dibagi dalam 2 bagian. Bagian pertama disebut *driver tube* dan bagian kedua disebut *test tube (driven tube)*. *Driver tube* berfungsi memberikan energi inisiasi yang besar ke dalam *test tube* sehingga pada *test tube* sudah terjadi detonasi. Gelombang detonasi akan merambat dari *driver tube* melalui model plat dengan orifis ganda menuju ke arah *dump tank*.

Empat sensor dipasang pada sepanjang *test tube* dimana masing-masing 2 sensor tekanan dipasang di daerah *upstream* (P1 dan P2) dan *downstream* (P3 dan P4) dari model uji. Hal ini diperlukan karena untuk mendapatkan nilai perbedaan tekanan di daerah *upstream* dan *downstream* dari model uji. Untuk mendeteksi proses pembakaran (*detonation front*) pada suatu posisi, empat sensor *ionization* juga dipasang pada *test tube* yang posisinya berlawanan dengan posisi sensor tekanan dan dipasang pada I1, I2, I3 dan I4. Dengan menggunakan sensor-

sensor diatas, kecepatan rata-rata dari gelombang detonasi akan dapat dihitung dengan tepat. Sensor tekanan dan sensor *ionization* tersebut dihubungkan dengan *amplifier* dan *digital data recorder*, untuk kemudian datanya dapat diolah dan divisualisasikan di komputer.



Gambar 1. Skema Alat Uji Detonasi



Gambar 2. Model plat dengan orifis ganda 7 mm (*plate with double orifices 7 mm*).

Gambar 2 adalah model plat dengan orifis ganda (*plate with double orifices*) yang dibuat dari material aluminium yang dipasang di dalam *test tube* pada posisi antara P2 dan P3. Model plat dengan orifis ganda (*plate with double orifices*) dengan diameter lubang (*diameter of holes*) 7 mm (table 1) digunakan sebagai model uji, dengan menempatkan model plat dengan orifis ganda pada alat uji diharapkan dapat melihat kesinambungan terjadinya proses mulai dari *re-initiation detonation* sampai ke *detonation quenching* di belakang model uji.

Proses pengisian (*filling*) dari 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*. Busi (*spark plug*) dan *unit coil* dari kendaraan bermotor digunakan sebagai sumber energi untuk mengawali proses pembakaran di dalam *driver tube*. *Flow field* dari proses pembakaran di daerah *upstream* dan *downstream* dari model direkam dengan teknik *soot track record* untuk mendapatkan gambaran sel detonasi (*detonation cell*) disekitar model-model, sehingga mekanisme dari *detonation propagation* dan *detonation quenching* dapat dipahami.

Bahan bakar yang digunakan adalah gas hidrogen dengan *oxidizer* oksigen pada *equivalence ratio* = 1 (*stoichiometric*) dan campuran bahan bakar tersebut disimpan selama minimal 12 jam sebelum digunakan dalam eksperimen untuk menjamin proses homogenitas yang baik. Tekanan awal campuran bahan bakar di dalam *detonation tube* diset pada tekanan 20 kPa sampai 100 kPa dengan interval kenaikan 10 kPa. Eksperimen ini akan dilaksanakan pada suhu ruangan yaitu berkisar antara 27- 33°C.

Tabel 1. Konfigurasi dari plat orifis ganda (*Configuration of plate with double orifices*)

Parameter of Plate with Double Orifices	Dimension
Diameter of flange, Ø (mm)	145
Thickness, δ (mm)	14
Distance between orifices, L (mm)	2xW
Diameter of orifice, w (mm)	7
Material	Aluminum

Detail bahan bakar dan kondisi-kondisi eksperimen ditampilkan pada Tabel 2.

Dari tahapan yang telah disebutkan, maka diharapkan parameter-parameter termodinamika yang akan mempengaruhi *detonation quenching* bisa didapatkan dan digambarkan dengan jelas. Demikian halnya dengan parameter-parameter fisik seperti dimensi diameter lubang (*diameter of holes*), yang mempengaruhi *detonation quenching* dapat didefinisikan sehingga dengan mudah dapat diimplementasikan

dalam proses desain *detonation arrester* untuk sistem berbahan bakar hidrogen.

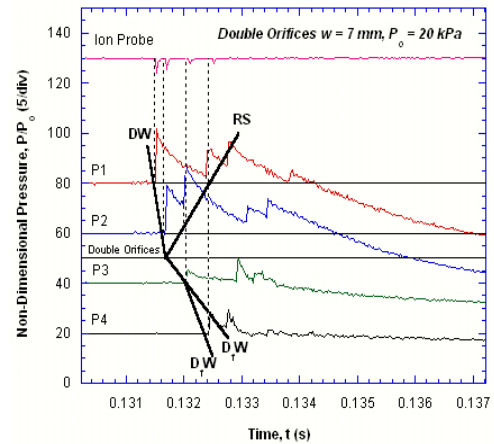
Tabel 2. Eksperimental conditions of driver and driven gas

Parameter	Driver tube	Driven (test tube)
Fuel	Hydrogen	Hydrogen
Oxidizer	Oxygen	Oxygen
Equivalence ratio, $\phi$	1	1
Initial pressure (kPa)	100	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Temperature	Room temperature	Room temperature

**PEMBAHASAN**

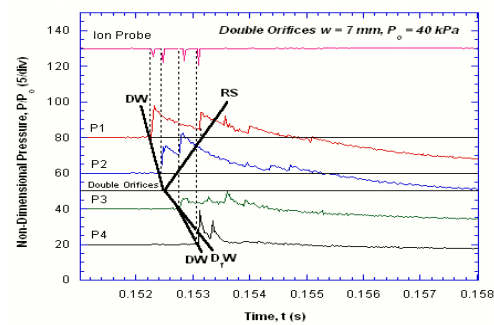
Mekanisme re-inisiasi perambatan gelombang detonasi setelah melalui plat dengan orifis ganda dapat dibagi menjadi 2 kategori yaitu: (1) Re-inisiasi detonasi karena proses DDT. (2) Re-inisiasi detonasi karena interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa. Masing-masing mekanisme re-inisiasi gelombang detonasi akan dijelaskan sebagai berikut. Gambar 3a, 3b dan 3c menunjukkan profil tekanan gelombang kejut dan kedatangan api gelombang reaksi untuk setiap kondisi eksperimen yang berbeda. Sumbu vertikal merupakan tekanan non-dimensi  $p/p_o$ , sedangkan sumbu horizontal merupakan waktu kedatangan gelombang pembakaran yang dihitung mulai dari posisi model plat dengan orifis ganda. Gelombang kejut dideteksi oleh sensor P1, P2, P3 dan P4 sedangkan api gelombang reaksi dideteksi oleh sensor *ion probe*. Model plat dengan orifis ganda dipasang di antara sensor P2 dan P3 untuk membangkitkan fenomena difraksi pada gelombang detonasi. DW merupakan *detonation wave*, DW<sub>r</sub> merupakan *deflagration wave* dan RS merupakan *reflected shock*.

Gambar 3a menunjukkan kondisi eksperimen pada tekanan awal gas  $p_o = 20$  kPa, model plat dengan orifis ganda  $w = 7$  mm, tampak bahwa gelombang detonasi yang stabil merambat di *upstream* dan di daerah *downstream*,



Gambar 3a. Profil gelombang reaksi dan tekanan gelombang kejut pada kondisi Quenching detonasi (deflagrasi)  $p_o = 20$  kPa,  $w = 7$  mm.

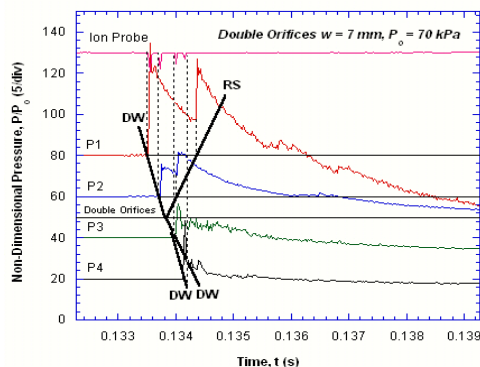
kemudian di belakang model dengan plat orifis ganda terjadi *quenching* detonasi mulai dari sensor P3 hingga sensor P4, dengan ditandai adanya kenaikan tekanan gelombang kejut bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi namun antara gelombang kejut (*shock wave*) dan gelombang reaksi (*reaction wave*) tidak berhimpit.



Gambar 3b. Profil gelombang reaksi dan tekanan gelombang kejut pada kondisi Re-inisiasi detonasi oleh DDT,  $p_o = 40$  kPa,  $w = 7$  mm.

Gambar 3b menunjukkan kondisi eksperimen pada tekanan awal gas  $p_o = 40$  kPa model plat dengan orifis ganda  $w = 7$  mm, tampak bahwa terjadinya gelombang refleksi seperti pada kondisi 3c. Setelah melalui celah pada plat dengan orifis ganda,

gelombang detonasi ter-*quenching* menjadi gelombang deflagrasi oleh adanya difraksi dan tidak langsung ter-re-inisiasi oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa melainkan ter-re-inisiasi oleh proses DDT (*deflagration to detonation transition*) pada jarak antara posisi sensor P3 dan P4. Kenaikan tekanan sensor P3 bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi dan besar kenaikan tekanan hanya 5 kali tekanan awal (200kPa) dimana tekanan ini jauh lebih kecil dari tekanan teoritis CJ detonasi,  $P_{CJ} = 726$  kPa sehingga perambatan pembakaran dikategorikan sebagai gelombang deflagrasi. Namun gelombang deflagrasi ini berkecenderungan mempercepat dari posisi ke posisi dan akhirnya melalui proses DDT menjadi gelombang detonasi dengan ditandai adanya deteksi naiknya tekanan di sensor P4 bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi dan besar puncak tekanan mencapai 19 kali tekanan awal (1330kPa) dimana lebih besar dari tekanan CJ detonasi  $P_{CJ}$ .



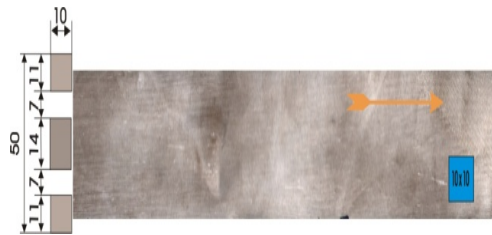
Gambar 3c. Profil gelombang reaksi dan tekanan gelombang kejut pada kondisi Re-inisiasi detonasi oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa,  $p_0 = 70$  kPa,  $w = 7$ mm.

Gambar 3c menunjukkan kondisi eksperimen pada tekanan awal gas  $p_0 = 70$ kPa model plat dengan orifis ganda  $w = 7$ mm. Ketika gelombang detonasi merambat mengenai model plat dengan orifis ganda terjadi pemantulan (refleksi) gelombang kejut ke arah daerah *upstream* yang ditandai dengan adanya kenaikan tekanan tanpa disertai turunnya sinyal ionisasi, hal ini menandakan bah-

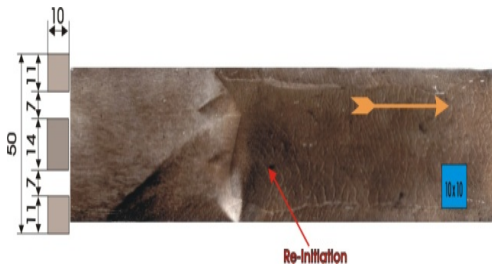
wa gelombang refleksi terjadi tanpa proses pembakaran. Setelah melalui model dengan plat orifis ganda, gelombang detonasi terdifraksi yang kemudian ter-re-inisiasi kembali pada jarak sebelum sensor P3 oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa (*shock-wall*) sehingga sensor P3 dan P4 mendeteksi adanya perambatan gelombang detonasi dengan ditandai naiknya sinyal tekanan bersamaan dengan turunnya sinyal ionisasi. Setelah terreinisiasi, gelombang detonasi cenderung mempercepat laju pembakarannya dengan ditandai adanya garis kenaikan sensor pada tekanan P3 dan P4 dengan sudut yang makin membesar dari posisi model plat dengan orifis ganda berada. Sensor P3 dan P4 mendeteksi besar tekanan gelombang kejut yang hampir konstan hingga mencapai 18 kali tekanan awal yaitu 1260 kPa dimana tekanan ini sedikit lebih kecil dari tekanan teoritis CJ detonasi  $P_{CJ} = 1293$ kPa. Tekanan teoritis  $P_{CJ}$  ini jauh lebih besar dari tekanan yang terdeteksi pada sensor P3 atau P4 karena adanya asumsi seperti viskositas campuran gas, *heat transfer* dan konduktifitas gas. Hal ini menandakan bahwa setelah ter-re-inisiasi, gelombang detonasi merambat dengan stabil di daerah *downstream*.

Gambar 4a, 4b dan 4c menunjukkan pola perambatan gelombang detonasi yang terbentuk pada *soot track record* di belakang model plat dengan orifis ganda seperti pada kondisi eksperimen Gambar 3a, 3b dan 3c. *Soot track record* merupakan suatu plat tipis terbuat dari bahan aluminium dengan ketebalan 0,3mm yang telah dilapisi jelaga dari proses pembakaran minyak tanah sehingga dapat menangkap sel detonasi ketika ada rambatan gelombang detonasi di permukaan *soot track record*.

Gambar 4a menunjukkan kondisi eksperimen seperti pada Gambar 3a. Pada Gambar 3a tampak bahwa sel detonasi terbentuk di daerah *upstream* terekam oleh sensor P1 dan P2, namun di daerah *downstream* tidak terbentuk sel detonasi sama sekali mulai dari sensor P3 hingga P4. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi *quenching* detonasi (deflagrasi) di belakang model plat dengan orifis ganda di daerah *downstream*.



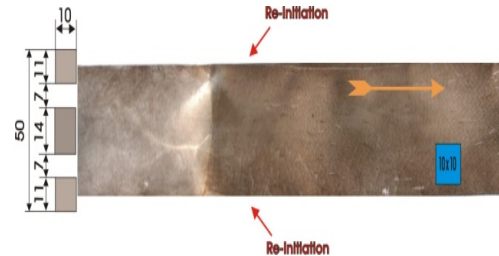
Gambar 4a. *Soot track record* di daerah *downstream* pada pipa uji detonasi di belakang plat dengan orifis ganda pada kondisi *Quenching* detonasi (deflagrasi),  $p_o = 20$  kPa,  $w = 7$  mm.



Gambar 4b. *Soot track record* di daerah *downstream* pada pipa uji detonasi di belakang plat dengan orifis ganda pada kondisi Re-inisiasi detonasi oleh DDT,  $p_o = 40$  kPa,  $w = 7$  mm.

Gambar 4b menunjukkan pola perambatan gelombang detonasi di belakang model plat dengan orifis ganda seperti pada kondisi eksperimen gambar 3b. Pada gambar 4b tampak bahwa setelah detonasi merambat keluar dari plat dengan orifis ganda, gelombang detonasi terdifraksi menjadi gelombang deflagrasi namun tidak langsung ter-reinisiasi oleh interaksi antara gelombang kejut dengan dinding pipa, melainkan oleh adanya proses DDT akibat pengaruh kekasaran dinding pipa yang membuat api menjadi aliran turbulen sehingga mengakselerasi api dan akhirnya mentransisi menjadi gelombang detonasi. Interaksi antara gelombang kejut dengan bagian dalam dinding pipa hanya menghasilkan *mild explosion* yang tidak mampu me-reinisiasi gelombang deflagrasi menjadi gelombang detonasi. Terjadinya re-inisiasi oleh DDT ditandai dengan pembentukan sel detonasi yang kecil-kecil dimulai dari tengah *soot track record* dan makin lama makin membesar yang akhirnya konstan di daerah *down-*

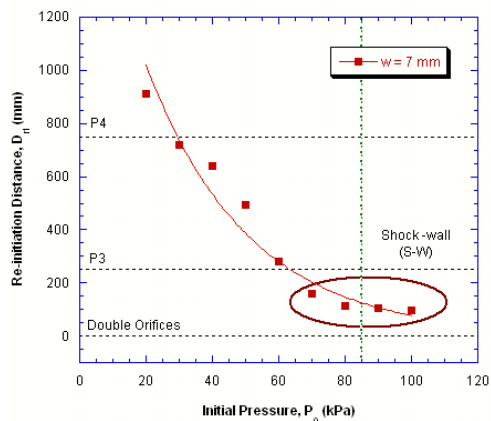
*stream*. Ketika DDT terjadi, kecepatan dan tekanannya membesar (*overdriven detonation*) dan akhirnya menuju kondisi CJ detonasi di daerah *downstream* model plat dengan orifis ganda.



Gambar 4c. *Soot track record* di daerah *downstream* pada pipa uji detonasi di belakang plat dengan orifis ganda pada kondisi Re-inisiasi detonasi oleh interaksi gelombang kejut dengan dinding pipa,  $p_o = 70$  kPa,  $w = 7$  mm.

Gambar 4c menunjukkan kondisi eksperimen seperti pada Gambar 3c. Pada Gambar 4c tampak sel detonasi yang konstan terbentuk di daerah *upstream* dan *downstream* mulai dari sensor P1 hingga P4. Terbentuknya sel detonasi yang konstan menandakan bahwa gelombang detonasi merambat dengan kecepatan dan tekanan yang konstan pula, sehingga dapat disimpulkan gelombang detonasi merambat stabil di daerah *upstream* dan *downstream* dari model plat dengan orifis ganda meski tampak pula bahwa setelah detonasi merambat melewati plat dengan orifis ganda, gelombang detonasi terdifraksi dan gelombang kejut dilemahkan oleh gelombang ekspansi yang dimulai dari permukaan plat dengan orifis ganda sehingga menyebabkan gagalnya proses *self sustained propagation* detonasi, lalu terjadi proses pemisahan antara gelombang kejut dengan gelombang reaksi dan perambatan pembakaran menjadi deflagrasi yang ditandai oleh adanya penghapusan jelaga di permukaan *soot track record*. Kemudian gelombang deflagrasi merambat terus ke arah *downstream* seiring dengan gelombang kejut yang terus membesar disebabkan mengenai dinding pipa dan menghasilkan *hot spot (local explosion)* sehingga menciptakan kembali proses *self sustained propagation* detonasi dengan ditandai adanya pem-

bentukan sel detonasi yang kecil-kecil dimulai dari kedua sisi *soot track record* dan makin lama makin membesar yang pada akhirnya konstan di daerah *downstream*.



Gambar 5. Hubungan antara jarak re-inisiasi detonasi *Dri* dengan tekanan awal campuran bahan bakar hidrogen dan oksigen  $P_o$ .

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara jarak re-inisiasi detonasi *Dri* dengan tekanan awal campuran bahan bakar hidrogen dan oksigen  $P_o$ . Sumbu ordinat (sumbu vertikal) merupakan jarak re-inisiasi detonasi *Dri* dan sumbu absis (sumbu horizontal) merupakan tekanan awal campuran bahan bakar hidrogen dan oksigen  $P_o$ . Tekanan awal yang diujikan pada bagian *driver* selalu konstan 100kPa untuk menjamin telah terjadinya proses detonasi pada bagian *driven* sebelum gelombang kejut (*shock wave*) merambat dan terdifraksi melewati model uji serta tekanan divariasikan di bagian *driven* mulai 20kPa sampai dengan 100kPa untuk mengetahui fenomena re-inisiasi detonasi di belakang model uji tersebut. Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa dengan tekanan yang semakin kecil maka jarak re-inisiasi detonasi *Dri* akan lebih panjang dimana proses re-inisiasi detonasi karena adanya proses DDT terjadi pada rezim 30 kPa- 60 kPa, sedangkan 20 kPa terjadi fenomena *quenching* detonasi begitu juga sebaliknya bila tekanan campuran bahan bakar oksigen-hidrogen (oksihidrogen) semakin besar maka jarak re-inisiasi detonasi *Dri* akan semakin pendek dan proses re-inisiasi detonasi kare-

na adanya interaksi antara gelombang kejut dengan dinding pipa (*shock - wall*) yang diakibatkan oleh adanya kekasaran pada dinding pipa terjadi pada rezim ini, yaitu pada tekanan 70–100kPa. *Node solid symbol* bujur-sangkar yang dilingkari menandakan proses terjadinya re-inisiasi detonasi, hal ini terjadi pada rezim sebelum P3 yang berarti re-inisiasi detonasi termasuk dalam proses transmisi detonasi dimana proses re-inisiasi detonasi terjadi dekat dengan model uji plat dengan orifis ganda dengan jarak re-inisiasi detonasi *Dri* yang lebih pendek

### KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki hubungan fenomena difraksi yang menggunakan model plat dengan orifis ganda terhadap mekanisme re-inisiasi detonasi di belakang plat dengan orifis ganda. Mekanisme re-inisiasi dibelakang plat dengan orifis ganda dapat dikategorikan menjadi dua yaitu :

Re-inisiasi detonasi karena adanya proses DDT di daerah *downstream*; Re-inisiasi detonasi karena adanya interaksi antara gelombang kejut dengan dinding bagian dalam pipa (*shockwall*).

*Quenching* detonasi (deflagrasi) didapatkan pada tekanan awal 20kPa, sedangkan pada tekanan awal 30kPa - 60kPa terjadi re-inisiasi detonasi dengan adanya proses DDT di bagian *downstream*. Re-inisiasi detonasi karena adanya interaksi antara gelombang kejut dengan bagian dalam dinding pipa terjadi pada tekanan awal 70-100kPa ditandai dengan terbentuknya sel detonasi dengan ukuran yang lebih kecil.

Untuk memastikan terjadinya *quenching* detonasi diperlukan tekanan yang rendah (20 kPa) untuk mendesain piranti *detonation arrester*.

### Ucapan Terimakasih

Terima kasih diucapkan kepada Dr. Eng. Jayan Sentanuhady, ST., M. Eng selaku pembimbing S-2, Laboratorium Konversi Energi Universitas Gadjah Mada, Penelitian ini dibiayai oleh Hibah Bersaing 2010, Hibah JTMI 2010.



**DAFTAR PUSTAKA**

- Ciccarelli, G., Boccio, J.L., 1998: *Detonation wave propagation through a single orifice plate in a circular tube*. In: Proceedings of Twenty seventh Symposium (International) (Combustion, Comb. Inst. pp. 2233–2239.
- Hayashi, K. H. Jotaki, J. Misawa, and H. Sato, 2004: *Detonation propagation structure in converging-diverging nozzle*. Symposium on Interdisciplinary Shock Wave Research. Sendai, Japan.
- Sentanuhady, J., Obara, T., Tsukada, Y., Ohyagi, S, 2006: *Re-initiation processes of detonation wave behind slit-plate—influence of initial test gas pressure* – (in Japanese). Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser.B72, 3158–3165.
- Sentanuhady, J., Santoso, T., 2010: *Mekanisme Reinisiasi Perambatan Gelombang Detonasi di Belakang Celah Sempit*. Proceedings Seminar Nasional Thermofluid 2010, Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Zhu, Y.J., Chao, J., Otsuka, T., Lee, J.H.S., 2007: *An Experimental Investigation of Propagation Mechanism of Critical Deflagration Waves that Lead to The Onset of Detonation*, Proc. Comb.Inst. 30, 1889-1897.