

EFEK TEKANAN AWAL *DRIVER SECTION* TERHADAP KARAKTERISTIK GELOMBANG DETONASI PADA KONDISI INISIASI LANGSUNG DENGAN BAHAN BAKAR CAMPURAN *LIQUIFIED PETROLEUM GAS* DAN OKSIGEN

Jayan Sentanuhady¹, Eswanto²

Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jalan Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia. Telepon & Fax 0274-581855
Email: jayan@ugm.ac.id

Abstrak

Proses perambatan gelombang detonasi mulai dari deflagrasi hingga terjadinya detonasi tidak terlepas dari pengaruh tekanan awal dari driver sectionnya yang dimulai dari reaksi pembakaran campuran bahan bakar dan oksidizer. Apabila perambatan api sudah menjadi gelombang detonasi maka akan terbentuk shock wave yang berada tepat di depan reaction wave. Shock wave yang dihasilkan tersebut dapat mencapai tekanan hingga 20 kali tekanan awal gas. Tekanan yang sangat besar tersebut walaupun sesaat, sangat membahayakan sistem dan lingkungan sekitarnya. Sukses tidaknya proses pembakaran dari campuran bahan bakar gas menjadi gelombang detonasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi gas-gas dalam campuran dan juga tekanan campuran gas tersebut. Sehingga hal-hal tersebut di atas sangat dipengaruhi sistem keselamatan pada industri atau rumah tangga yang menggunakan gas. Disatu sisi penggunaan bahan bakar gas untuk keperluan industri maupun rumah tangga pada masa mendatang akan semakin meningkat. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari karakteristik campuran bahan bakar LPG dan oksigen akibat dari pengaruh tekanan awal pada driver section pipa uji detonasi terhadap kemungkinan terjadinya gelombang detonasi. Peralatan yang digunakan adalah pipa uji detonasi dengan panjang 6000 mm dan diameter dalam 50 mm. Kenaikan tekanan shock wave diamati melalui empat unit sensor tekanan, sedangkan waktu kedatangan flame front di deteksi oleh empat unit ion probe yang dipasang pada pipa uji detonasi secara bersebrangan. Gelombang detonasi direkam dengan soot track record yang bertujuan untuk mengetahui jejak gelombang detonasi dan ukuran sel detonasi. Proses pengisian campuran bahan bakar gas dikontrol dengan high-precision digital pressure sensor supaya mendapatkan tingkat keakuratan yang lebih baik. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah campuran LPG dan oksigen. Campuran bahan bakar pada driven section dikondisikan stoichiometri pada tekanan 100 kPa, sedangkan pada driver section tekanan awal dikondisikan secara variable dengan tekanan 20-100 kPa dengan interval 10 kPa pada suhu ruangan. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa inisiasi langsung pada driver section dapat berpengaruh secara signifikan terhadap perambatan gelombang detonasi pada driven section. Pada daerah upstream dari driven section tampak bahwa gelombang detonasi masih belum stabil sebagaimana terlihat pada soot track record yang besarnya sel detonasi ukurannya tidak sama, gelombang detonasi yang stabil baru terlihat ketika gelombang pembakaran telah melewati daerah downstream dari driven section, kondisi tersebut terlihat dari hasil rekaman soot track record dengan ukuran sel detonasi yang relatif konstan. Peningkatan tekanan awal campuran dapat memperpendek jarak DDT dari ignition point dan akan memperkecil ukuran lebar sel detonasi akibat naiknya kecepatan reaksi pembakaran. Kenaikan tekanan paling tinggi adalah 3145 kPa yaitu 31.45 kali tekanan awal dengan lebar sel detonasi $\lambda = 1.14$ mm dan ukuran sel detonasi akan bertambah besar jika tekanan inisiasi awalnya semakin berkurang.

Keyword: *detonasi, DDT, pembakaran, sel detonasi, shock wave.*

1. Pendahuluan

Penggunaan *Liquified Petroleum Gas* (LPG) untuk industri maupun masyarakat pada masa mendatang semakin meningkat seiring dengan rencana pemerintah yang akan membatasi pemakaian konsumsi bahan bakar

minyak. Bagi kalangan dunia industri, penanganan produksi LPG selama proses produksi maupun dalam penyimpanannya merupakan sebuah rangkaian terpenting, mengingat karakteristik dari LPG yang sangat reaktif dan mudah terbakar bila bercampur

dengan udara. Oleh sebab itu perlu dilakukan penelitian terhadap karakteristik mekanisme dari pembakaran bahan bakar gas LPG tersebut. Proses perambatan gelombang detonasi hingga terjadinya detonasi tidak terlepas dari pengaruh tekanan awal pada *driver section*, dimulai dari reaksi pembakaran campuran bahan bakar dan oksidizer. Apabila perambatan pembakaran sudah menjadi detonasi maka akan terbentuk *shock wave* yang berada tepat di depan *reaction wave*. *Shock wave* yang dihasilkan tersebut mampu menaikkan tekanan hingga mencapai 20 kali dari tekanan awal gas. Tekanan yang sangat besar tersebut walaupun sesaat dapat membahayakan sistem dan lingkungan sekitarnya. Sukses tidaknya proses pembakaran dari campuran bahan bakar gas menjadi detonasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi gas-gas yang ada dalam campuran dan juga tekanan campuran gas tersebut. Campuran bahan bakar gas akan sangat sensitif jika campurannya dalam kondisi *stoichiometri*, dimana pada kondisi ini besarnya sel detonasi akan lebih kecil. Peningkatan ukuran sel detonasi akan terjadi apabila campuran bahan bakar gas tersebut dalam kondisi miskin atau kaya pada tekanan awal yang rendah dan kondisi ini juga berpengaruh terhadap proses perubahan deflagrasi ke detonasi (*Deflagration to Detonation Transition – DDT*). Phenomena yang terjadi pada proses DDT sangat penting diamati karena melibatkan banyak hal dalam mekanisme pembakaran bahan bakar gas tersebut. Dimana DDT terjadi akibat perubahan dari deflagrasi ke detonasi, proses DDT dimulai dari pelepasan kalor (*heat release*) dari sumber api ke campuran bahan bakar (*premix*). Pada saat pelepasan kalor tersebut temperatur *premix* akan meningkat di sekitar sumber api hingga mencapai suhu tinggi yang dapat memacu reaksi dari *premix* itu sendiri (*auto-ignition mechanism*). Reaksi kimia *premix* tersebut akan merubah dari kondisi laminar menjadi turbulen 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 suhu dan tekanan *premix* di belakang *blast wave*. Sehingga ketika peningkatan suhu dan tekanan ini berlangsung dalam waktu yang lebih cepat (kurang dari 1 *microsecond*) terjadilah detonasi dimana kecepatan reaksi melebihi kecepatan suara dan *blast wave* berubah menjadi *shock wave*.

Beberapa penelitian sudah dilakukan diantaranya adalah oleh Ludan Wilson (2002) dimana pada penelitiannya melakukan investigasi tentang *detonation driver* untuk meningkatkan *performances shock tube* yang disebabkan oleh ekspansi helium dan juga udara untuk campuran berbagai bahan bakar gas. Penelitian ini menyimpulkan bahwa proses perambatan gelombang detonasi sudah dimulai sejak hilir sampai transisi dalam *shock wave* dibagian *driven* walaupun masih pada kondisi belum stabil, dan fenomena ini salah satunya disebabkan oleh pengaruh kondisi dari tekanan awalnya.

Makoto Komatsu et al (2007) melakukan investigasi tentang efek bekas yang ditinggalkan dari gelombang detonasi berbentuk bola, dimana hal tersebut dilaporkan bekas yang ditinggalkan di permukaan akibat gelombang detonasi dari proses inisiasi langsung dan kemudian divisualisasikan menghasilkan bahwa dengan keberadaan *micro-fragments* energi kritis adalah minimum.

Pada tahun (2011) Sentanuhady J. at al melakukan penelitian tentang karakteristik perambatan api campuran bahan bakar LPG - Oksigen yang dilewatkan melalui celah sempit, hasil dari 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 pembakaran. Selain itu dengan memperkecil lebar celah maka rugi-rugi kalor yang terjadi akan semakin besar sehingga dapat membuat kecepatan perambatan api menurun.

Penelitian ini bertujuan untuk dapat mempelajari karakteristik campuran bahan bakar LPG dan oksigen akibat dari pengaruh tekanan awal pada *driver* pipa uji detonasi terhadap kemungkinan terjadinya gelombang detonasi.

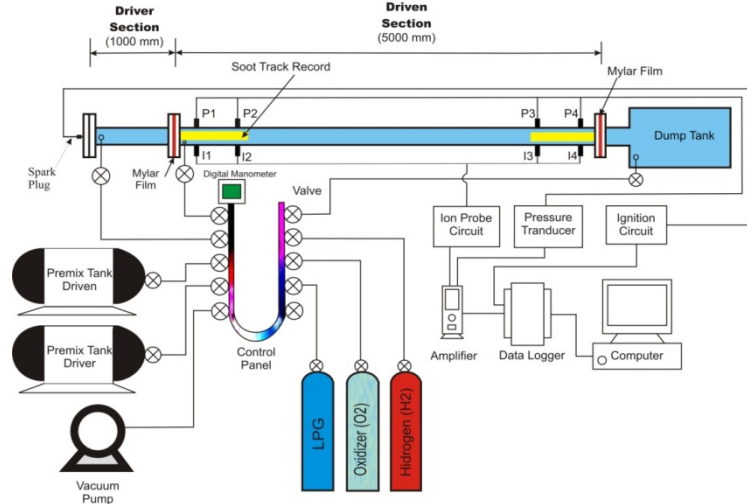
2. Metode penelitian.

Penelitian ini menggunakan pipa uji (*test tube*) detonasi dengan panjang total 6000 mm, diameter dalam 50 mm yang dipasang pada posisi *horizontal* yang dibagi dalam 2 bagian, yaitu bagian *driver* dan bagian *driven*. Pipa uji yang berfungsi sebagai *driver* panjangnya 1000 mm dan pipa uji yang berfungsi sebagai *driven* sepanjang 5000 mm. Untuk meredam efek refleksi *shock wave* pipa uji detonasi dihubungkan dengan *dump tank* yang selalu dikondisikan dalam keadaan vakum sebelum pengujian berlangsung. Gelombang detonasi

merambat dari *test tube* ke arah *dump tank* (gambar 1).

Empat unit sensor tekanan-PCB,model 113A24) di pasang pada posisi (P1,P2,P3,P4) sepanjang *driven tube* yang berfungsi untuk merekam semua profil tekanan ketika

gelombang detonasi merambat, dan untuk mendeteksi waktu kedatangan *reaction front*, empat buah sensor *ionisasi*(I1,I2,I3,I4)juga dipasang pada *driven tube* yang posisinya berlawanan dengan posisi sensor tekanan.



Gambar 1. Skematik pipa uji detonasi dan peralatan pendukung yang lainnya

Tabel 1. Kondisi eksperimen.

PARAMETER	DRIVER	DRIVEN
Bahan bakar	Hidrogen (H_2)	LPG
Oxidizer	Oksigen (O_2)	Oksigen (O_2)
Tekanan awal (kPa)	20 – 100 (Interval 10)	100
Equivalence ratio (Φ)	1	
Temperatur ($^{\circ}C$)	Suhu ruangan	

Dengan menggunakan sensor-sensor diatas, kecepatan rata-rata dari gelombang detonasi dapat dihitung dengan tepat. Sensor tekanan dan sensor *ionisasi* tersebut dihubungkan dengan *amplifier* dan *digital data recorder* sehingga dapat diperoleh data pengujian yang kemudian diolah dan dianalisis dengan computer.

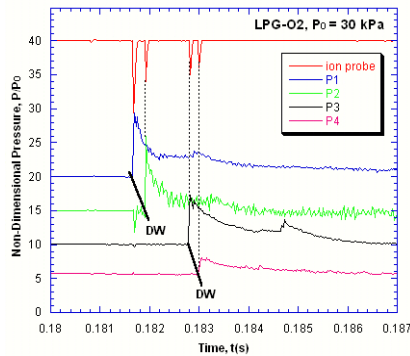
Busi dan unit coil dari kendaraan bermotor digunakan sebagai sumber energi untuk mengawali proses pembakaran dalam *driver section*. Metode visualisasi kondisi terjadinya gelombang detonasi dari proses pembakaran direkam dengan teknik *soot track record* yaitu sebuah metode menggunakan plat dari bahan material aluminium dengan ketebalan 0.3 mm, kemudian dilapisi jelaga minyak tanah yang berfungsi untuk mendapatkan gambaran sel detonasi di dalam pipa, sehingga karakteristik dari gelombang detonasi dapat dipahami. Proses pengisian campuran bahan bakar gas ke dalam pipa uji detonasi (PUD) dikontrol

dengan *high-precision digital pressure sensor* sehingga didapatkan keakuratan pada proses pencampuran bahan bakar gas.

Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah LPG produksi Pertamina dengan campuran yang terdiri dari gas 30% *Propane* dan 70% *Butane*. Sedangkan oksidizer yang digunakan adalah oksigen. Bahan bakar dan oksidizer tersebut sebelum dilakukan pengujian dicampur dengan keadaan *stoichiometri* selama 12 jam guna untuk menjamin homogenitasnya. Supaya campurannya antara pipa bagian *driver* dengan pipa bagian *driven* dan juga antara bagian *driven* dengan bagian *dump tank* yang selalu dikondisikan dalam keadaan vakum sebelum pengujian. Kondisi campuran bahan bakar pada penelitian ini dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu bagian *driver* dan bagian *driven*. Pada suhu ruangan yaitu berkisar $27^{\circ}C$ - $33^{\circ}C$. Detail dari kondisi eksperimen dapat dilihat pada tabel 1. Pada bagian *driver* campuran bahan bakarnya adalah Hidrogen - Oksigen pada kondisi *stoichiometri* dan tekanan awal mulai dari 20 – 100 kPa dengan interval 10 kPa. Sedangkan pada bagian *driven* campuran bahan bakar adalah LPG – Oksigen pada kondisi *stoichiometri* dan tekanan awal konstan 100 kPa.

3. Hasil penelitian dan pembahasan.

3.1. Kenaikan Tekanan.



Pada Gambar 2 adalah profil tekanan *shock wave* dan *reaction wave* disepanjang bagian *driven tube* dimana sensor-sensor tersebut dipasang. Sumbu horizontal adalah merupakan waktu kedatangan gelombang pembakaran dan sumbu vertikal merupakan tekanan *shock wave* non-dimensional (P/P_0).

Gambar 2 adalah kondisi dengan tekanan awal 30 kPa terlihat bahwa ketika gelombang pembakaran sampaididaerah *upstream* pada jarak 1000mm – 1150 mm dari *ignition point* masih belum teridentifikasi gelombang detonasi, kondisi tersebut ditunjukkan dari hasil rekaman *soot track record*. Gelombang detonasi baru teridentifikasi pada jarak 1220mm didaerah *upstream* dimana hal ini terlihat dari hasil *soot track record* yang telah terekam oleh gelombang detonasi dan saat gelombang detonasi sampai pada titik P1 pada jarak 1250mm dari *ignition point* barulah terlihat bentuk sel detonasi dengan ukuran yang terbentuk belum stabil. Pada gambar 3 memperlihatkan rekaman *soot track record* dari sel detonasi yang dipasang pada daerah *upstream* dan *downstream* hal ini dimaksudkan untuk mengetahui bagaimana fenomena gelombang detonasi setelah keluar dari ujung *driver section* dan juga fenomena ketika sebelum memasuki fase keluaran *driven section*.

Dari hasil penelitian ini umumnya untuk semua kondisi tekanan awal dari yang paling rendah hingga tertinggi (20kPa – 100kPa) telah teridentifikasi terjadinya gelombang detonasi, yang ditandai dengan berimpitnya antara *shock wave* dan *reaction wave* walaupun tiap kondisi tekanan awal di daerah

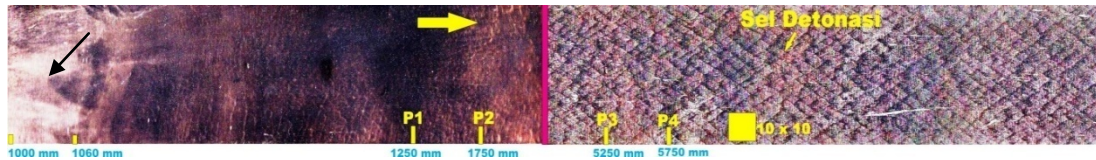
Gambar 2. Profil tekanan *shock wave* dan *reaction wave* pada tekanan awal 30 kPa

yang teridentifikasi mulai gelombang detonasi berbeda-beda posisinya, sebagaimana terlihat pada gambar 2 dan gambar 4. Kondisi tersebut menandakan bahwa setiap diberikan tekanan awal yang semakin besar di bagian *driver section*nya maka efek yang ditimbulkan oleh gelombang detonasi tersebut juga semakin besar yang hal ini berdampak terhadap kenaikan sensor tekanan dan bahkan ketika tekanan awalnya adalah minimum yaitu 20 kPa gelombang detonasi sudah terbentuk. Gelombang detonasi kemungkinan tidak terjadi ketika tekanan awalnya di bawah 20 kPa, hal tersebut dimungkinkan karena energi inisiasinya yang rendah.

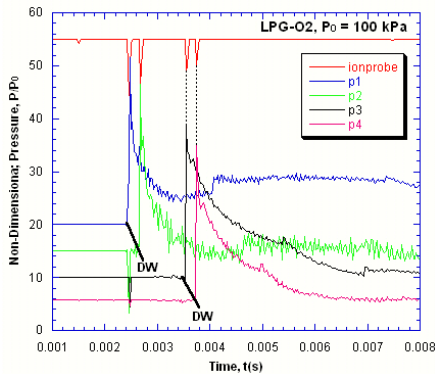
Pola perambatan gelombang pembakaran sebagaimana terlihat pada gambar 2, menjelaskan bahwa pada umumnya untuk semua P1 sampai P4 telah teridentifikasi terjadinya gelombang detonasi, dimana pada gambar tersebut memperlihatkan adanya kenaikan profil sensor tekanan dan ini juga seiring dengan perambatan sensor ionisasi yang bergerak secara bersamaan (*coupling*). Proses ini dimulai dari P1 yang sudah teridentifikasi gelombang detonasi dan kemudian terlihat jelas pada sensor tekanan yang terakhir (P4), kondisi ini dibuktikan dengan bentuk sel detonasi pada gambar 3 yang terekam pada jarak 5750mm dari *ignition point* dengan lebar *detonation cell*, $\lambda = 8.20$ mm dan kenaikan tekanan mencapai 347.6 kPa atau 11.59 kali tekanan awal. Dengan menggunakan perhitungan berbasis teori Chapman-Jouguet (C-J), dengan kondisi yang sama kecepatan detonasinya mencapai 2340 m/s.



Gambar 3. Rekaman bentuksel detonasi pada kondisi inisiasi awal 30 kPa.



Gambar 4. Rekaman bentuk sel detonasi pada kondisi inisiasi awal 100 kPa



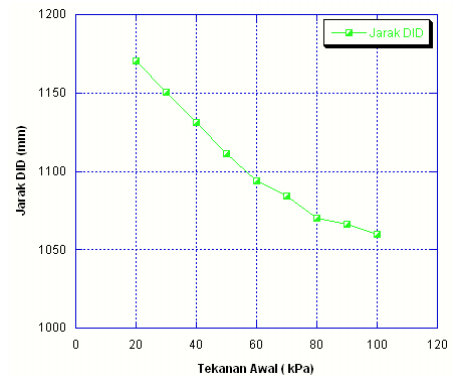
Gambar 5. Profil tekanan *shock wave* dan *reaction wave* pada kondisi inisiasi awal 100 kPa.

Pada gambar 5 menunjukkan profil sensor tekanan dengan tekanan awal 100 kPa. Dalam grafik tersebut terlihat bahwa sensor P1 sampai P2 terjadi kenaikan tekanan yang sangat signifikan dan kecenderungan bila diperhatikan kenaikan tekanan tersebut dapat dikatakan merata atau sama. begitu juga untuk sensor ionisasi dan sensor tekanan menunjukkan pola perambatan secara bersamaan, maka hal ini dapat dikatakan gelombang detonasi sudah terbentuk yang terlihat mulai dari posisi sensor P1.

Proses teridentifikasinya gelombang detonasi ini juga dapat dibuktikan dengan struktur sel detonasi yang terbentuk oleh gelombang pembakaran campuran *Liquid Petroleum Gas* dengan oksigen sebagaimana dapat dilihat pada gambar 4 yang menunjukkan bahwa ketika gelombang pembakaran bergerak dari *ignition point* dan sampai di daerah *upstream* hal ini belum terlihat adanya tanda-tanda terbentuknya jejak sel detonasi. Phenomena teridentifikasinya struktur sel detonasi mulai terlihat dan terbentuk sebelum memasuki fase daerah titik sensor P1 yaitu pada jarak 1060 mm dan setelah sampai pada titik P1 tepatnya pada jarak 1250 mm dari *ignition point* barulah struktur sel detonasi sudah terlihat walaupun pada daerah ini masih dalam kondisi belum stabil. Gelombang detonasi pada inisiasi awal yang besar ini (100 kPa) dimulai dengan fenomena DDT yaitu sejak gelombang

pembakaran keluar dari ujung *driver section* menuju *driven*, dengan kenaikan tekanan paling tinggi mencapai 3145 kPa atau 31.45 kali tekanan awal inisiasi pada *driver section*nya dan kecepatan Chapman-Jouguet yang diperoleh yaitu $V_{cj} = 2397$ m/s. hal tersebut diperlihatkan dalam rekaman *soot track record* yang dihasilkan pada gambar 4.

3.2. Efek Tekanan awal pada inisiasi langsung

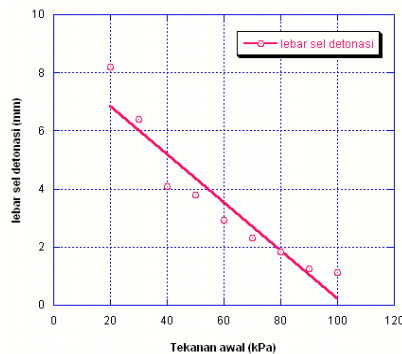


Gambar 6. Jarak DID terhadap efek inisiasi awal

Pada gambar 6 diatas adalah grafik hubungan antara jarak *Detonation Induction Distance* (DID) terhadap tekanan awal campuran bahan bakar *liquid petroleum gas* dengan oksigen, dimulai dari tekanan awal yang paling rendah yaitu 20 kPa sampai yang paling tinggi yaitu 100 kPa dengan interval 10 kPa. Dari gambar 6 dapat dilihat dengan jelas bahwa jarak DID semakin berkurang bila tekanan awal ditingkatkan. Jarak DID paling pendek terjadi pada saat tekanan awal 100 kPa, namun secara umum dapat disebutkan bahwa berkurangnya jarak DID yang dihasilkan pada masing-masing inisiasi awal yang diberikan akibat dari peningkatan tekanan awal berlangsung secara linier. Ketika diberikan tekanan awal campuran yang semakin ditingkatkan maka terjadi peningkatan *heat release* yang hal ini akan memicu naiknya *temperature unburnt gas* menuju *auto ignition temperature* sehingga proses pembakaran akan berlangsung cepat atau waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya

proses reaksi pembakaran akan semakin 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 akan semakin mendekati *ignition point* dari proses pembakaran tersebut.

3.3. Sel Detonasi



Gambar 7. Perubahansel detonasi terhadap efek tekanan awal.

Gambar 7 menunjukkan hasil dari perubahan ukuran tiap struktur sel detonasi yang terbentuk oleh gelombang detonasi akibat dari pengaruh tekanan awal pada *driver section*nya. Pada kasus pembakaran dengan kecepatan *supersonic* karakteristik detonasi dapat digambarkan dari struktur sel yang dihasilkan ketika proses pembakaran berlangsung. Proses pembentukan sel detonasi diawali oleh adanya interaksi antar *triple point* yaitu *shock wave*, *mach stem* dan *reflection wave*. Berdasarkan perhitungan ukuran lebar sel detonasi pada gambar 7 diatas terlihat bahwa ketika tiap kali diberikan tekanan awal yang besar maka ukuran lebar selnya juga akan semakin mengecil. Perubahan ukuran lebar sel detonasi tersebut disebabkan oleh pengaruh dari kecepatan perambatan gelombang detonasi yang berbeda-beda pada tiap-tiap tekanan awal yang berbeda. Akibat dari perbedaan kecepatan reaksi dari campuran bahan bakar gas tersebut, sehingga berakibat pada jarak tumbukan yang akan semakin cepat, maka struktur *detonation cell* yang

terbentuk akan semakin kecil bila kecepatan detonasi meningkat, hal tersebutlah beberapa diatara efek yang ditimbulkan oleh inisiasi langsung oleh *driver setion* dengan tekanan awal yang semakin besar.

4. Kesimpulan.

Sebuah proses awal dengan metode inisiasi langsung pada *driver section* dapat berpengaruh terhadap perambatan gelombang detonasi di daerah *upstream* atau tepatnya pada saat gelombang pembakaran sampai pada awal *input driven tube*. Pada daerah ini terlihat umumnya gelombang detonasi masih belum stabil dan bahkan saat diberikan tekanan awal yang rendah gelombang detonasi yang terbentuk melalui *detonation cell* belum terlihat tanda-tandanya dan akan mulai terlihat mendekati *input driven tube* ketika tekanan awal ditingkatkan sebagaimana terlihat pada rekaman *soot track record* gambar 3 dan 5 dengan ukuran *detonation cell* yang tidak sama. Detonasi yang stabil baru akan terlihat ketika gelombang pembakaran telah melewati daerah sensor P1 yang dibuktikan dalam rekaman *soot track record* pada pengujian ini diperoleh di daerah posisi sensor P4. Kondisi ini mengisyaratkan bahwa semakin panjang pipa uji detonasi (*detonation test tube*) maka akselerasi turbulensi rambat pembakarannya menjadi sempurna, sehingga gelombang detonasi yang terbentuk juga akan semakin sempurna.

Phenomena dari pembakaran campuran bahan bakar *liquified petroleum gas* dengan oksigen didalam pipa tertutup terdapat karakteristik fenomena DDT yang dipengaruhi oleh tekanan awal campuran, dimana jarak DDT akan semakin pendek terhadap *ignition point* ketika tekanan awal inisiasi ditingkatkan dan akan memperkecil ukuran lebar sel detonasi dengan lebar minimum *detonation cell* yang diperoleh adalah $\lambda_{min} = 1.14 \text{ mm}$ sedangkan ukuran lebar maksimum *detonation cell* $\lambda_{max} = 8.20 \text{ mm}$. Kenaikan tekanan paling tinggi mencapai 3145 kPa atau 31.45 kali tekanan awal inisiasi pada *driver section*nya, sehingga hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa ketika tekanan awalnya adalah minimum yaitu 20 kPa gelombang detonasi sudah terbentuk. Gelombang detonasi kemungkinan tidak terjadi ketika tekanan awalnya di bawah 20 kPa, hal tersebut dimungkinkan karena energi inisiasinya yang rendah.

Referensi

- Lu.F.K., dan Wilson. D.R., (2002), *Detonation driver for enhancing shock tube Performance* Aerodynamics Research Center, Mechanical Engineering Departement, University of Texas at Arlington, Arlington, TX 76019-0018, USA.
- Makoto Komatsu, Kazuyoshi Takayama, Kiyonobu Ohtani, Tsutomu Saito (2007), *effect of debris fragments on direct initiation of spherical detonation waves in stoichiometric oxygen/hydrogen mixtures*, Proceedings of the Combustion Institute 31 2437–2443 Japan.
- Sentanuhady, J., Prabowo, E. Rochmat, T.A., (2010) : *karakteristik perambatan api melalui celah sempit dengan bahan bakar campuran LPG-Oksigen*. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9 Palembang 2010, Palembang-Indonesia.