

Effect of Early Pressure on Induction Distance Detonation Hydrogen-Oxygen Mixture with Schelkin Spiral

Willie Prasadha^{1,*}, Jayan Sentanuhady¹, Davin Demas Sanchohan¹ dan Taufiq Hidayat¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada – Yogyakarta

*Korespondensi: willie.prasadha@mail.ugm.ac.id

Abstract. The detonation phenomenon occurs because the burning fuel will produce a burning wave that propagates with very high speed and the energy that propagates with it is also very high, this can be a favorable or disadvantageous thing. This study focused on developing a relationship between the detonation induction distance and the initial pressure of the hydrogen-oxygen mixture with the schelkin spiral. The study used a horizontal 50-mm diameter detonation test tube with a total length of 2000 mm equipped with a schelkin spiral with a pitch of 15 mm. The hydrogen-oxygen mixture was injected into the test tube with an initial pressure variation of 30 kPa to 100 kPa. From the results of the study it was found that the increase in initial pressure affects the distance of detonation induction distance where at a pressure of 100 kPa by using the schelkin spiral the detonation induction distance was 8.5 cm and for the pressure of 30 kPa was 17 cm. As for the detonation induction distance without schelkin spiral with initial pressure of 100 kPa and 30 kPa respectively are 70 cm and 115 cm.

Abstrak. Fenomena detonasi terjadi karena bahan bakar yang terbakar akan menghasilkan gelombang pembakaran yang merambat dengan kelajuan sangat tinggi serta energi yang merambat bersamanya juga sangat tinggi, hal ini dapat menjadi hal yang menguntungkan atau merugikan. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan hubungan antara jarak induksi detonasi dengan tekanan awal campuran hidrogen-oksigen dengan schelkin spiral. Penelitian ini menggunakan pipa uji detonasi (PUD) horizontal berpenampang lingkaran berdiameter 50 mm dengan panjang total 2000 mm yang dilengkapi dengan schelkin spiral yang memiliki pitch 15 mm. Campuran hidrogen-oksigen diinjeksikan ke dalam PUD dengan variasi tekanan awal 30 kPa hingga 100 kPa. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa peningkatan tekanan awal mempengaruhi jarak induksi detonasi (detonation induction distance - DID) dimana pada tekanan 100 kPa dengan menggunakan schelkin spiral jarak induksi detonasi adalah 8,5 cm dan untuk tekanan 30 kPa adalah 17 cm. Sedangkan untuk jarak induksi detonasi tanpa schelkin spiral dengan tekanan awal 100 kPa dan 30 kPa masing-masing adalah 70 cm dan 115 cm.

Kata kunci: detonasi, detonation induction distance, schelkin spiral

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Pembakaran sebagai salah satu upaya ekstraksi energi berguna akan meninggalkan suatu permasalahan yang cukup serius dalam hal keselamatan personil serta keamanan instalasi industri yang terlibat. Permasalahan keamanan dan keselamatan kerja yang terkait dengan pembakaran yaitu bahwa pada proses pembakaran dapat terjadi fenomena yang disebut detonasi. Fenomena detonasi terjadi karena bahan bakar yang terbakar akan menghasilkan gelombang pembakaran yang merambat dengan kelajuan sangat tinggi (di atas kecepatan suara lokal) mengikuti *shock wave*, energi yang merambat bersamanya juga sangat tinggi. Hal tersebut dapat menjadi sumber bahaya bagi keselamatan personil pada industri dan keamanan instalasi pada industri tersebut karena dapat berujung pada terjadinya ledakan yang berujung pada *total loss* bagi sektor industri yang bersangkutan.

Namun pada aplikasi lain, munculnya gelombang detonasi sangat diharapkan seperti pada sistem *pulse detonation engine*. Pada sistem ini diharapkan detonasi yang konsisten dalam jarak yang pendek. Salah satu cara untuk memperpendek jarak induksi detonasi adalah dengan *turbulizing element*. *Turbulizing element* adalah elemen fisik yang mempengaruhi turbulensi pembakaran dan pada akhirnya dapat mempercepat laju pembakaran itu sendiri.

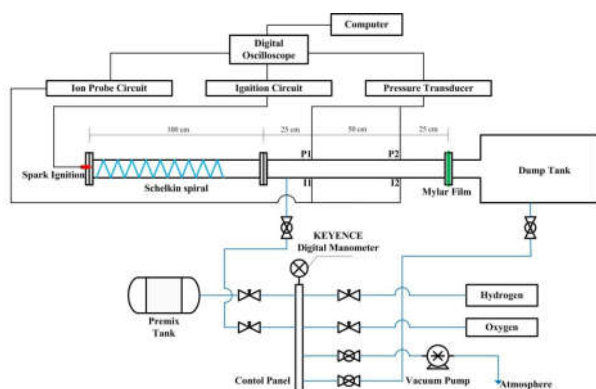
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengamati pola dan karakteristik detonasi yang berhubungan dengan tekanan awal dan jarak induksi detonasi. Sentanuhady et al. (2014) telah melakukan penelitian tentang karakteristik perambatan gelombang detonasi marginal (gelombang detonasi yang merambat hanya dengan satu sel detonasi saja (*single cellular detonation*) pada campuran hidrogen dengan udara. Dari hasil penelitian tersebut

diketahui pada campuran hidrogen-udara dapat merambat dengan stabil walaupun hanya terdapat 1 sel detonasi. Zhang et al. (2011) mendapatkan perbandingan jarak induksi detonasi dengan tekanan awal detonasi untuk campuran H_2-N_2O dan H_2-O_2 . Penelitian menggunakan *8 in spherical explosion chamber direct initiation*. Dari hasil penelitian diketahui untuk setiap kenaikan tekanan awal maka jarak induksi gelombang detonasi akan semakin pendek. Meyer et al. (2002) menggunakan *shchelkin spiral, extended cavity*, dan *co-annulus* sebagai alat eksperimennya serta bantuan *high speed digital imaging camera* sebagai media bantu untuk merekam perbedaan densitas akibat adanya *shock wave*. Mereka mendapatkan bahwa *shchelkin spiral* yang dipasang pada pipa uji detonasi mengakibatkan api berputar membentuk *helical* dan terakselerasi secara berkelanjutan disepanjang spiral tersebut, baik selama DDT (*deflagration to detonation*) terjadi maupun setelah DDT.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan jarak induksi detonasi dengan perubahan tekanan awal serta karakteristik detonasi pada campuran hidrogen-oksigen dengan *shchelkin spiral*. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan ilmu pengetahuan tentang detonasi yang berguna pada sistem keselamatan kerja serta sistem pendorong pada mesin-mesin tertentu.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pipa uji detonasi (PUD) horizontal berpenampang lingkaran berdiameter 50 mm dengan panjang total 2000 mm. PUD dilengkapi dengan *dump tank* untuk mencegah terjadinya *back pressure* yang dapat merusak hasil visualisasi *detonation cell* pada *soot track record*. Pada penelitian ini akan diambil data dengan dan tanpa *shchelkin spiral*. Skema alat penelitian ditunjukkan pada gambar 1. Sedangkan *shchelkin spiral* yang dimasukkan dalam PUD memiliki panjang 40 cm, diameter 50 mm, dan pitch 15 mm seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 1. Skema alat penelitian



Gambar 2. Shchelkin Spiral

Dua unit sensor tekanan dipasang sepanjang PUD untuk mengukur tekanan yang dihasilkan di dalam PUD serta mendeteksi perambatan *shock wave*. Sedangkan untuk mendeteksi perambatan *flame arrival* digunakan *ion probe* yang dipasang pada PUD dengan posisi berlawanan dengan posisi sensor tekanan. Selanjutnya sensor tekanan dihubungkan dengan *amplifier* dan *data recorder* sehingga data dapat diolah dan divisualisasikan di komputer.

Proses pengisian bahan bakar-oksikator ke PUD diatur dari *control panel* yang dilengkapi *high precision digital pressure sensor*. Sensor ini bermanfaat untuk memastikan nilai tekanan gas yang dialirkan ke PUD akurat dengan nilai yang ditentukan. Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah hidrogen sedangkan oksidatornya adalah oksigen yang keduanya dicampur pada kondisi stoikiometris. Campuran hidrogen-oksigen tersebut dimasukkan ke dalam *mixing tank* dan dibiarkan selama 24 jam untuk proses homogenisasi *premix fuel* tersebut. Detail kondisi eksperimen pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Kondisi eksperimen

Parameter	Kondisi
Bahan Bakar	Hidrogen
Oksidator	Oksigen
Equivalence Ratio	1 (<i>stoichiometric</i>)
Takanan Awal (kPa)	30 - 100

Visualisasi gelombang detonasi menggunakan teknik *soot track record* juga digunakan pada penelitian ini untuk mendukung data tekanan *shock wave* dan data *flame arrival* dari gelombang reaksi. *Soot track record* dibuat dari plat aluminium setebal 0,4 mm yang permukaannya diberi lapisan jelaga pembakaran minyak tanah kemudian dipasang di dalam PUD.

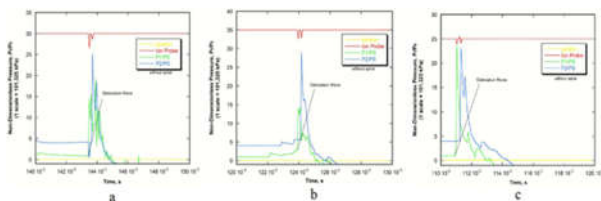
Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini membahas karakteristik detonasi campuran hidrogen-oksigen akibat pengaruh tekanan awal saat *shchelkin spiral* tidak terpasang maupun terpasang di dalam PUD. Karakteristik dan pengaruh yang dimaksud, adalah meliputi kenaikan tekanan, tahapan terjadinya DDT, perubahan ukuran sel detonasi, kecepatan rata-rata gelombang

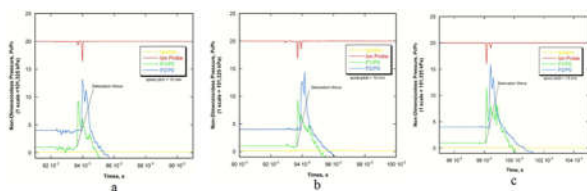
detonasi, dan yang utama adalah jarak induksi detonasi.

Kenaikan Tekanan. Pada kondisi tekanan awal 30 kPa (*low pressure*), dimana PUD tanpa *shchelkin spiral* didapatkan tekanan *shock wave* pada posisi P1 mencapai 14 kali tekanan awal dan tekanan *shock wave* pada posisi P2 mencapai 22 kali tekanan awal. Sedangkan pada saat *shchelkin spiral* dipasang pada PUD, kenaikan tekanannya pada posisi P1 dan P2 lebih kecil. Pada tekanan awal 60 kPa (*middle pressure*), dimana PUD tanpa *shchelkin spiral* didapatkan tekanan *shock wave* pada posisi P1 mencapai 14 kali tekanan awal dan pada posisi P2 mencapai 26 kali tekanan awal. Sedangkan pada saat *shchelkin spiral* dipasang pada PUD, kenaikan tekanan *shock wave* mencapai 10 kali tekanan awal pada posisi P1 maupun P2. Pada saat tekanan awal 100 kPa (*high pressure*) pada posisi P1 terbaca kenaikan tekanan *shock wave* mencapai 23 kali tekanan awal dan pada posisi P2 tekanan *shock wave* mencapai 20 kali tekanan awal. Sedangkan pada saat *shchelkin spiral* terpasang pada PUD tekanan *shock wave* mencapai 10 kali tekanan awal pada posisi P1 dan P2.

Dari grafik tekanan menunjukkan bahwa pada saat *shchelkin spiral* tidak dipasang maka tekanan detonasi yang dihasilkan tidak segera stabil sehingga pada posisi P1 dan P2 tekanan yang terbaca adalah tekanan tinggi sesaat seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Sedangkan pada saat *shchelkin spiral* dipasang, tekanan *shock wave* lebih cepat stabil sehingga pada posisi P1 dan P2 terbaca lebih rendah dan sama. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pemasangan *shchelkin spiral* akan membuat jarak dan waktu detonasi menjadi stabil lebih cepat dan pendek.



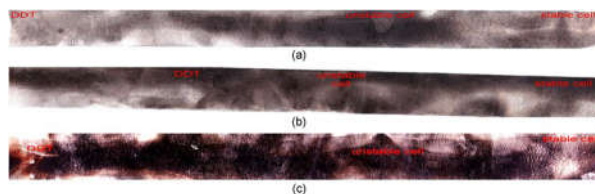
Gambar 3. Pressure histories dari *shock wave* dan *signal reaction wave* tanpa *shchelkin spiral* pada tekanan awal (a) 30 kPa, (b) 60 kPa, (c) 100 kPa



Gambar 4. Pressure histories dari *shock wave* dan *signal reaction wave* dengan *spiral shchelkin* pada tekanan awal (a) 30 kPa, (b) 60 kPa, (c) 100 kPa

Tekanan awal tidak mempengaruhi peningkatan tekanan *shock wave* pada PUD yang dipasang dengan *shchelkin spiral*, hal tersebut ditunjukkan hasil peningkatan tekanan *shock wave* sama untuk setiap tekanan awal yaitu 10 kali tekanan awal seperti ditunjukkan pada gambar 4.

Proses Terjadinya DDT. Dari pengamatan sel detonasi, DDT selalu diawali garis tekanan tinggi yang selalu tampak pada *soot track record*. Garis ini menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan tekanan *blast wave* menjadi tekanan *shock wave* yang ekstrim tinggi, kemudian mulai tampak sel detonasi dengan ukuran yang kecil pada *soot track record*. Fenomena ukuran sel detonasi yang kecil menandakan bahwa telah terjadi kecepatan reaksi sesaat yang tinggi pada saat terjadinya DDT yang mungkin juga bersamaan dengan kenaikan tekanan tinggi sesaat. Akan tetapi ukuran sel detonasi dengan cepat menjadi lebih besar dan merata. Hal ini mengindikasikan telah terjadi penurunan kecepatan reaksi beberapa saat setelah DDT seperti tampak pada bagian sebelah kanan *soot track record* pada gambar 5.



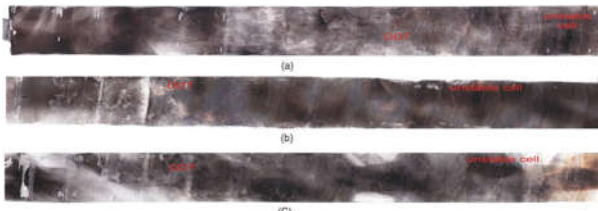
Gambar 5. DDT yang terekam pada percobaan tanpa *shchelkin spiral* (a) 40 kPa, (b) 70 kPa, (c) 100 kPa

Daerah pada *soot track record* tepat sebelum DDT terjadi merupakan gelombang deflagrasi yang tidak meninggalkan jejak. Sedangkan sesaat setelah DDT terjadi, gelombang detonasi meninggalkan jejak sel detonasi. Semakin kecil tekanan awal pembakaran maka jarak DDT semakin jauh dari *ignition point*. Kestabilan sel detonasi menandakan bahwa kecepatan detonasi juga sudah berlangsung stabil.

Pada percobaan dengan menggunakan *shchelkin spiral* banyak sekali bentuk sel detonasi yang besar dan kecil ukurannya yang terekam diantara ruangan yang tertutup oleh *shchelkin spiral* meskipun nantinya berubah menjadi stabil. Hal ini mengindikasikan bahwa disepanjang *shchelkin spiral*, sel detonasi belum masuk pada kondisi stabil karena efek spiral yang menyebabkan akselerasi dan momentum pada gelombang detonasi. Hasil dari *soot track record* dengan *shchelkin spiral* ditunjukkan pada gambar 6.

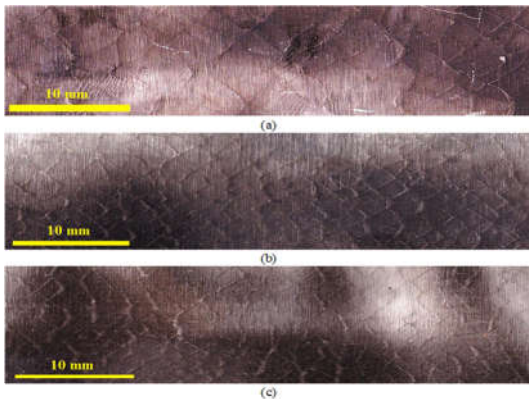
Dari pembahasan ini dapat dipahami bahwa fenomena DDT secara garis besar terjadi dalam 3 tahap, dimulai dengan adanya garis vertikal akibat *blast wave*, lalu pembentukan sel detonasi yang

tidak stabil dan berakhir dengan pembentukan sel detonasi yang stabil.

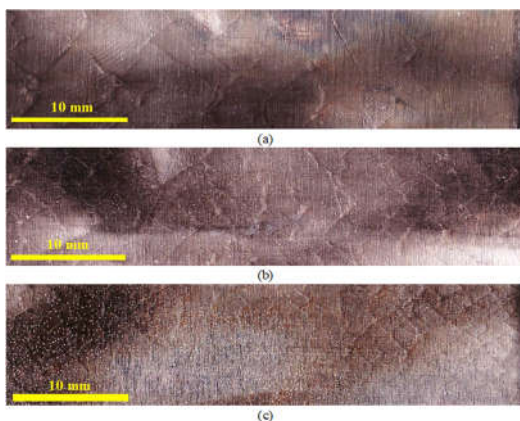


Gambar 6. DDT yang terekam pada percobaan dengan *shchelkin spiral* (a) 40 kPa, (b) 70 kPa, (c) 100 kPa

Ukuran Sel Detonasi. Pada penelitian ini tampak bahwa lebar sel detonasi (λ) sangat tergantung dengan tekanan awal campuran gas. Pada tekanan awal campuran gas 30 kPa, lebar sel detonasi rata-rata adalah 3,6 mm sedangkan pada tekanan awal campuran gas 50 dan 70 kPa masing-masing adalah 1,85 mm dan 1,75 mm. Perubahan lebar sel detonasi terhadap tekanan awal campuran gas dapat dipahami bahwa semakin besar tekanan awal campuran gas maka kecepatan reaksi juga akan semakin tinggi, hal ini akan membuat *collision of triple point* dari *shock wave* akan menjadi lebih cepat sehingga sel detonasi akan terlihat menjadi lebih kecil.



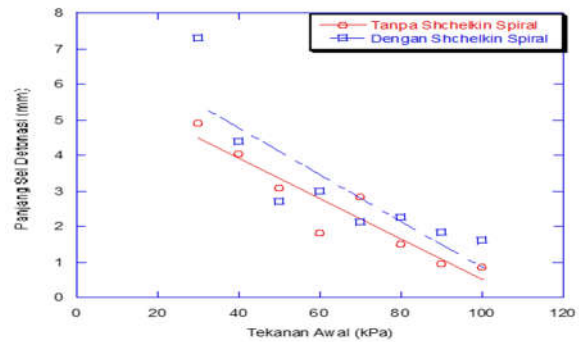
Gambar 7. Ukuran sel detonasi yang terekam pada *soot track record* tanpa *shchelkin spiral* (a) 30 kPa, (b) 50 kPa, (c) 70 kPa



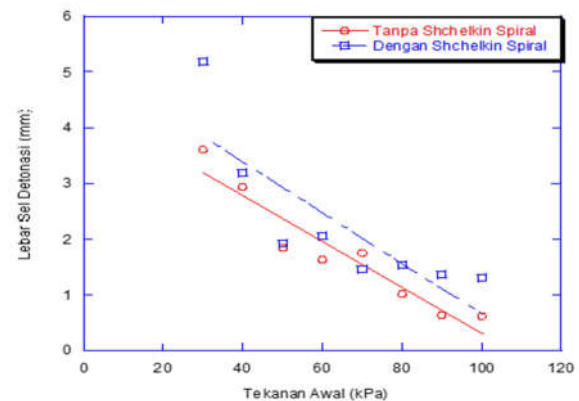
Gambar 8. Ukuran sel detonasi yang terekam pada *soot track record* dengan spiral (a) 30 kPa, (b) 50 kPa, (c) 70 kPa

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 7 dan 8, lebar dan panjang dari *detonation cell* mengalami perubahan pada setiap tekanan awal campuran gas yang diinjeksikan. Ukuran keduanya menjadi semakin membesar jika tekanan awal bahan bakar yang diinjeksikan semakin rendah. Akan tetapi, pada saat kondisi *shchelkin spiral* terpasang lebar sel detonasi menjadi semakin besar.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan perubahan ukuran panjang dan lebar dari sel detonasi. Ukuran paling kecil diperoleh pada saat tekanan campuran gas yang diinjeksikan adalah 100 kPa dan dengan tidak menggunakan *shchelkin spiral* sebagai *turbulizing element*, lalu didapatkan $L = 0,85$ mm dan $\lambda = 0,62$ mm. Untuk ukuran terbesar pada penelitian ini diperoleh pada saat tekanan campuran gas yang diinjeksikan 30 kPa dengan menggunakan *shchelkin spiral* dengan ukuran yang diperoleh $L = 7,3$ mm dan $\lambda = 5,18$ mm.



Gambar 9. Grafik perubahan panjang sel

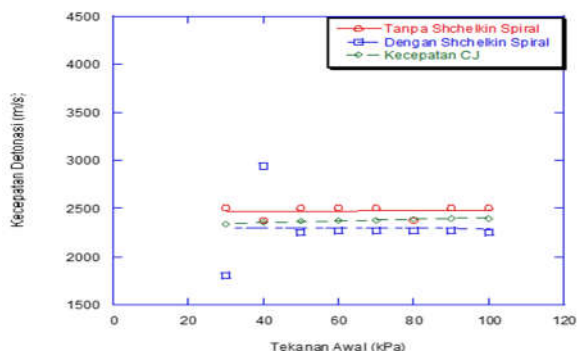


Gambar 10. Grafik perubahan lebar sel

Kecepatan Rata-Rata. Pada penelitian ini, kecepatan rata-rata detonasi diperoleh dari jarak antara kedua sensor (0,5 m) dibagi dengan selang waktu tempuh dari kedua sensor. Karena kondisi pada sensor P1 dan sensor P2 sudah terjadi detonasi semua maka nilai kecepatan rata-rata dapat dengan mudah dihitung.

Pada masing-masing eksperimen kecepatan rata-rata yang terjadi sudah mencapai fase supersonik. Hal ini sesuai dengan syarat dari fenomena detonasi

dimana kecepatan yang dihasilkan mendekati kecepatan CJ (gambar 11). Pada kondisi eksperimen ini, secara khusus nilai kecepatan rata-rata detonasi yang terjadi pada keadaan stabil cenderung konstan pada 2500 m/s dimana *shchelkin spiral* tidak terpasang pada PUD. Pada saat pemasangan *shchelkin spiral* di dalam PUD kecepatan rata-rata yang dihasilkan lebih rendah dari kecepatan rata-rata tanpa *shchelkin spiral*. Diperkirakan kondisi ini akibat *shchelkin spiral* menghambat laju *flame front* atau pada saat *shchelkin spiral* tidak terpasang, kecepatan yang terbaca adalah kecepatan tinggi sesaat dimana detonasi belum stabil.

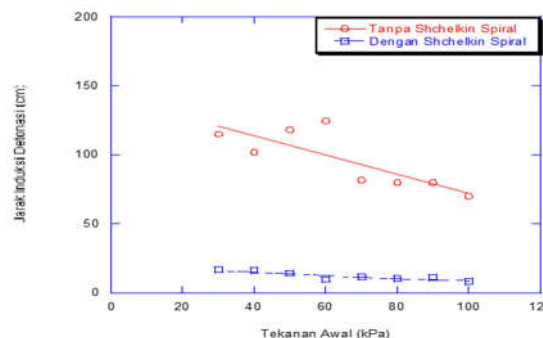


Gambar 11. Grafik kecepatan detonasi

Jarak Induksi Detonasi. Jarak induksi detonasi untuk kasus tanpa *shchelkin spiral* sangat tinggi yaitu antara 70 hingga 115 cm, sedangkan bila menggunakan *spiral shchelkin* jarak DID antara 8,5 hingga 17 cm pada tekanan 30 kPa sampai 100 kPa. Diketahui bahwa dengan menambahkan *spiral shchelkin* pada pipa uji detonasi dapat mempercepat terjadinya proses DDT. Dengan peningkatan tekanan awal pada pipa uji detonasi yang di dalamnya dipasang *shchelkin spiral*, *flame front* akan dengan cepat berubah dari *laminar flame* menjadi *turbulent flame* karena adanya *obstacle* berupa spiral tersebut, sehingga proses perubahan menjadi detonasi akan lebih cepat. Perubahan menjadi *turbulent flame* dengan sangat cepat mengindikasikan bahwa penambahan *shchelkin spiral* pada pipa uji detonasi menyebabkan kecepatan reaksi menjadi lebih cepat, sehingga DDT dapat dicapai dengan lebih cepat dan jarak induksi menjadi lebih pendek.

Pada tekanan awal 100 kPa pada pipa uji detonasi dengan *shchelkin spiral* menghasilkan jarak induksi detonasi paling pendek dari *ignition point*. Hal ini dapat dipahami karena spiral membuat api bergerak *spin* dengan mudah sehingga terbentuk api turbulen yang mampu mengejar *shock front* dengan cepat lalu menghasilkan gelombang detonasi dan peningkatan tekanan awal akan meningkatkan energi pembakaran sehingga *energy release* meningkat dan pembentukan *shock wave*

yang kuat. Grafik perubahan jarak induksi detonasi dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Grafik perubahan jarak induksi detonasi

Kesimpulan

Pada penelitian ini, diketahui bahwa karakteristik terjadinya DDT merupakan kejadian yang berurutan, diawali dari munculnya garis tekanan tinggi yang menunjukkan telah terjadi perubahan tekanan *blast wave* menjadi tekanan *shock wave* yang ekstrim tinggi lalu tampak sel detonasi berukuran kecil kemudian dengan cepat menjadi lebih besar dan merata menjadi stabil yang menunjukkan bahwa detonasi sudah stabil.

Semakin besar tekanan awal campuran gas maka kecepatan reaksi juga akan semakin tinggi, hal ini akan *membuat collision of triple point* dari *shock wave* akan menjadi lebih cepat, sehingga lebar sel detonasi (λ) akan terlihat menjadi lebih kecil dan jarak induksi detonasi lebih pendek. Pemasangan *shchelkin spiral* akan memperpendek jarak induksi detonasi dari pada tanpa penggunaan *shchelkin spiral*. *Shchelkin spiral* memiliki efek mempersingkat waktu terjadinya DDT sehingga jarak DDT menjadi lebih dekat dengan *ignition point* hingga 8 kali lebih pendek daripada tanpa memasang *shchelkin spiral* pada PUD. Hal tersebut disebabkan karena spiral membuat api mampu bergerak spin dengan lebih cepat sehingga terbentuknya api turbulen yang mampu mengejar *shock front* juga akan lebih cepat.

Referensi

- [1] Cohen, N., 1992, Flammability and Explosion Limits of H₂ and H₂/CO: A Literature Review, Space and Environment Technology Center Technology Operations, Los Angeles.
- [2] Gao, Y. dkk., 2016, An Experimental Investigation of Detonation Limits in Hydrogen-Oxygen-Argon Mixtures, International Journal of Hydrogen Energy 41, 6076-6083.

- [3] Kamenskihs, V., Ng, H.D. dan Lee, J.H.S., 2010, Measurement of Critical Energy for Direct Initiation of Spherical Detonations in Stoichiometric High-Pressure H₂-O₂ Mixtures, *Combustion and Flame* 157, 1795-1799.
- [4] Khan, F.I., Abbasi, S.A., 1999, Major Accidents in Process Industries and An Analysis of Causes and Consequences, *J Loss Prev Process Ind*, 12: 361-378.
- [5] Kuffel, E., Zaengl, W.S. dan Kuffel, J., 2000, High Voltage Engineering Fundamentals Second Edition, Butterworth-Heinemann, ISBN 0 7506 3634 3.
- [6] Kuo, K.K., 1986, Principles of Combustion, Wiley, New York.
- [7] Kuo, K.K., 2005, Principles of Combustion Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [8] Lee, J.H.S., 2008, The Detonation Phenomenon, Cambridge University Press, New York.
- [9] Meyer, T.R. dkk., 2002, Experimental Study of Deflagration to Detonation Enhancement Techniques in a H₂/Air Pulsed Detonation Engine, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno.
- [10] Niibo, T. dkk., 2015, Numerical Study on Direct Initiation of Cylindrical Detonation in H₂/O₂ Mixture : Influence of Higher Order Scheme, 25th ICDERS 2015, Leeds, UK.
- [11] Oosthuizen, P.H. dan Carscallen, W.E., 1997, Compressible Fluid Flow, McGraw-Hill Series In Mechanical Engineering.
- [12] Pekalski, A.A. dkk., 2005, A Review of Explosion Prevention and Protection Systems Suitable As Ultimate Layer of Protection in Chemical Process Installations, *Process Safety and Environmental Protection*, 83(B1), 1-17.
- [13] Sentanuhady, J. dan Prasetyo, A.D., 2014, Gelombang Detonasi Marginal Campuran Bahan Bakar Hidrogen dan Udara Dengan Gas Pengencer Argon, SNTMUT – 2014.
- [14] Sentanuhady, J. Dan Tuasikal, J.A., 2013, Comubstion Wave Characteristics of LPG-Oxygen Mixture Behind Porous Media Model, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII), ISBN 978 979 8510 61 8.
- [15] Shapiro, A.H., 1953, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow Volume 1, John Wiley & Sons, Inc.
- [16] Sumarsono, D.A. dkk., 2014, Pengaruh Besaran Energi Inisiasi Bridge-Wire Detonator terhadap Karakteristik Perambatan Gelombang Detonasi dan Pembakaran Hidrogen-Oksigen, Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII), ISBN 978 602 9841237.
- [17] Turns, R.S., 2000, An Introduction To Combustion: Concept and Applications Second Edition, McGraw-Hill Series In Mechanical Engineering.
- [18] Zhang, B. dkk., 2011, Critical Energy for Direct Initiation of Spherical Detonations in H₂/N₂O/Ar Mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 5707-5716.