

Pengaruh Besaran Energi Inisiasi Bridge-Wire Detonator terhadap Karakteristik Perambatan Gelombang Detonasi dari Pembakaran Hidrogen-Oksigen

Danardono Agus Sumarsono, Jayan Sentanuhady, Mitra Wisnu Hargono dan Yulianto Sulistyono Nugroho

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Jawa Barat, Indonesia

Email: danardon@eng.ui.ac.id

Abstrak

Penelitian tentang Bridge-Wire Detonator merupakan hal yang penting karena detonator jenis ini paling sering digunakan pada industri militer dan pertambangan. Pengaruh dari besaran energi inisiasi yang diberikan oleh Bridge-Wire Detonator dapat diamati melalui karakteristik dari perambatan gelombang detonasi dari hasil pembakaran campuran bahan bakar-oksidator di dalam Pipa Uji Detonasi. Penelitian perambatan gelombang detonasi dilakukan dengan Pipa Uji Detonasi yang dilengkapi dengan *pressure transducer*, *ion probe sensor* dan *soottrack record*. Variasi tegangan listrik pada *Bridge-Wire Detonator* dari 90 volt hingga 120 volt dengan interval 10 volt, tekanan awal campuran bahan bakar-udara dari 30kPa hingga 50 kPa dengan interval 10 kPa, sedangkan campuran bahan bakar-oksidator yang digunakan adalah hidrogen-oksigen. Hasil yang diperoleh berupa tekanan yang dihasilkan dari proses pembakaran serta visualisasi gelombang detonasi yang terekam pada *soottrack record* akan dapat menggambarkan pengaruh besaran energi inisiasi yang diberikan oleh Bridge-Wire Detonator terhadap karakteristik perambatan gelombang detonasi dari hasil pembakaran campuran bahan bakar-udara sehingga dapat digunakan sebagai dasar rancangan Bridge-Wire Detonator yang lebih efisien.

Kata kunci : *Bridge-Wire*, Detonator, Energi Inisiasi, Detonasi, Hidrogen, Oksigen

Latar belakang

Salah satu kebutuhan utama pada industri pertambangan dan militer adalah bahan peledak dan detonatornya. Dalam industri pertambangan, penggunaan bahan peledak merupakan salah satu cara yang paling efektif dalam mengeksplorasi hasil tambang, misalnya pada tambang mineral atau pada sumur-sumur minyak dan gas karena prosesnya lebih cepat dan hemat biaya. Sedangkan dalam industri militer, bahan peledak digunakan dalam melindungi wilayah kedaulatan negara dari serangan pihak luar maupun gangguan keamanan dari dalam.

Jenis detonator yang umum digunakan pada dunia pertambangan dan militer adalah Detonator *Bridge-Wire* (DBW). DBW menggunakan arus listrik bolak-balik (AC) yang dikonversi menjadi arus searah (DC) sebagai sumber energi. Pengubahan arus bolak-balik menjadi arus searah sebagai sumber energi pada detonator dilakukan karena *output* arus AC yang tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya *misfire* atau gagal menyala. Hal ini sangat membahayakan karena

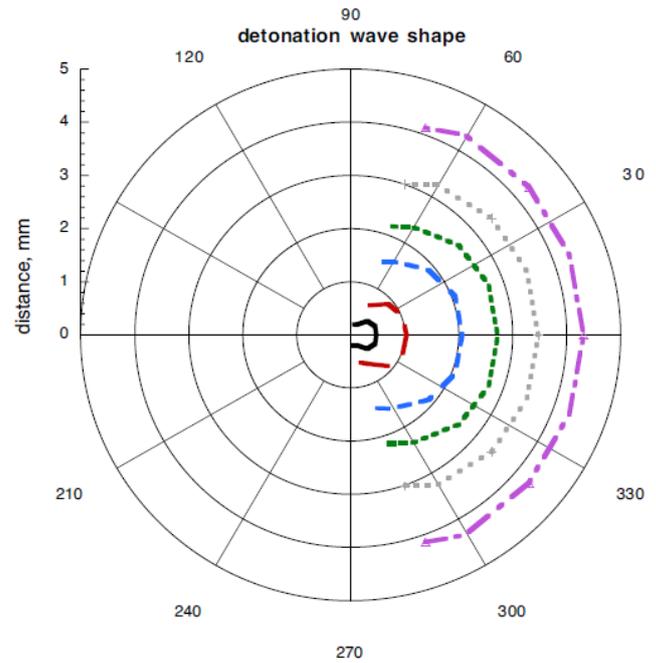
campuran bahan bakar dan udara beresiko bisa menyala sewaktu-waktu tanpa bisa diprediksi[1].

Pada penelitian ini akan dilakukan proses simulasi proses detonasi dengan menggunakan Pipa Uji Detonasi (PUD) di Laboratorium Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada. Bahan bakar yang akan digunakan berupa Hidrogen sedangkan oksidator yang akan digunakan berupa Oksigen dan udara. Pemilihan Hidrogen sebagai bahan bakar dilakukan karena Hidrogen merupakan zat yang sangat reaktif serta diketahui memiliki nilai energi kalor sekitar 3 kali lebih besar dibandingkan dengan bensin [2]. Dengan karakteristik tersebut, maka diharapkan proses detonasi dapat terjadi pada semua kondisi eksperimen saat dilakukan simulasi detonasi di dalam PUD. Sehingga pengaruh energi inisiasi dari DBW terhadap karakteristik detonasi di dalam PUD dapat diamati.

Penelitian yang akan dilakukan kali ini difokuskan pada pengaruh besaran energi inisiasi dari detonator DBW terhadap karakteristik perambatan gelombang detonasi pembakaran Hidrogen-Oksigen dan Hidrogen-udara. Besaran

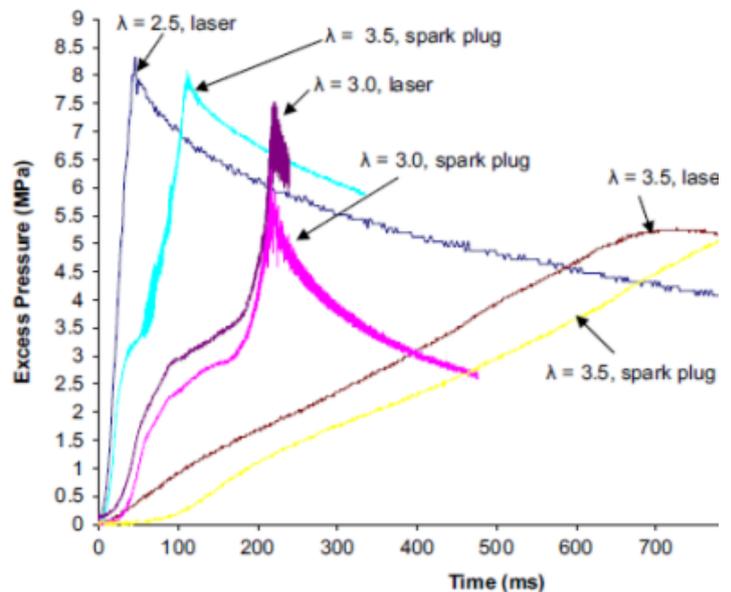
energi inisiasi ditentukan oleh nilai tegangan listrik (V) pada rangkaian *DBW*. Nilai tegangan listrik tersebut divariasikan dari 80 volt sampai dengan 120 volt dengan interval 10. Tekanan awal campuran divariasikan dari 30 hingga 80 kPa dengan interval 10. Sedangkan campuran bahan bakar-oksidator yang digunakan terdiri dari dua macam campuran, yaitu campuran Hidrogen-Oksigen dan campuran Hidrogen-udara. Selanjutnya dapat diketahui nilai kapasitas kapasitor yang paling optimal untuk menghasilkan detonasi.

Penelitian mengenai *flammability limit* pembakaran Hidrogen-udara dilakukan dengan menggunakan Pipa Uji Detonasi (PUD) berpenampang segiempat ukuran 25 x 30 mm dan panjang 3 meter [3].



Gambar 2 Bentuk Gelombang Detonasi Sebagai Fungsi Jarak dari *Bridge-Wire* dengan Nol Derajat Terletak pada Sumbu dari Detonator (Roeske dan Benterou, 2003)

Penelitian tentang karakteristik pembakaran campuran Hidrogen-udara dengan menggunakan *laser ignition* [5] dilakukan untuk meneliti pengaruh dari penggunaan *laser ignition*.



Gambar 3 Data Tekanan Campuran Hidrogen-udara di Dalam Ruang Bakar Setelah Proses Penyalaan dengan *Laser Ignition* dan *Spark Plug*. ($\lambda=2.5-3.5$, tekanan awal = 3 MPa, temperatur awal = 323 K) (Srivastava, 2008)

Dengan menggunakan data-data klasifikasi dan dengan bantuan hasil visualisasi dengan teknik *soot track record*, batas-batas deflagrasi (*flammability*) dan detonasi (*detonability*) dapat digambarkan pada grafik segitiga dimana konsentrasi hidrogen, udara dan argon dapat ditampilkan, seperti pada gambar 1.

Penelitian tentang profil breakout dari gelombang detonasi yang berkembang di dekat *bridge-wire* pada detonator dilakukan untuk mengetahui bentuk dari gelombang detonasi pada jarak yang bervariasi sepanjang pembentukan [4] dengan hasil sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.

dibandingkan dengan saat menggunakan *spark plug*.

Zona reaksi kimia pada pembakaran biasa disebut *flame zone*, *flame front* atau *reaction wave* [6]. Dalam penelitian ini istilah *flame front* yang akan digunakan. Ada dua jenis *flame*.

- *Premixed flame*. Reaktan (bahan bakar dan *oxidizer*) telah tercampur secara homogen sebelum terjadi reaksi pembakaran.
- *Diffusion flame*. Reaktan saling berdifusi satu sama lain selama terjadinya reaksi pembakaran.

Berdasarkan kecepatan perambatan *flame front* pembakaran *premixed flame* dapat dibedakan menjadi dua:

- Deflagrasi
Merupakan *premixed flame* dimana *flame front* merambat dengan kecepatan subsonik.
- Detonasi
Merupakan *premixed flame* dimana *flame front* merambat dengan kecepatan supersonik.

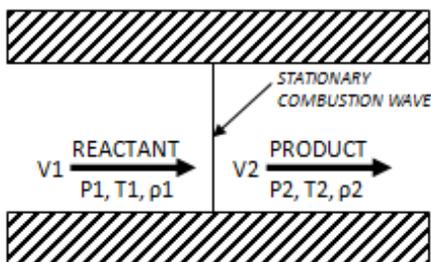
Kecepatan sonik sendiri dapat disebut dengan kecepatan suara merupakan kecepatan perambatan gelombang tekanan yang sangat kecil pada media tertentu, dimana nilainya berbeda-beda untuk masing-masing media dan dapat dihitung dengan rumus

$$C = \sqrt{kRT} \quad (1)$$

Parameter berkaitan dengan kecepatan sonik yang sering digunakan adalah *Mach number* (M), yang merupakan rasio kecepatan aktual dari fluida dengan kecepatan perambatan suara pada fluida tersebut atau dapat ditulis sebagai berikut

$$M = \frac{v}{c} \quad (2)$$

Untuk menyelidiki karakteristik dari perambatannya, *flame front* diasumsikan sebagai sebuah gelombang *flat* 1 dimensi dengan kondisi *steady* (*timeindependent*) dimana *unburned gas* (reaktan), dan *burned gas* (produk) merupakan gas ideal. Dengan menggunakan asumsi di atas *flame front* dapat dimodelkan pada gambar



Gambar 4 Model *Stationary 1 Dimensional Combustion Wave*

Flame front dianggap stasioner, sehingga bisa dikatakan reaktan bergerak menuju *stationary*

combustion wave dengan kecepatan V_1 . Dari asumsi dan gambar di atas didapatkan persamaan konservasi massa, momentum, dan energi.

Konservasi Massa :

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (3)$$

Konservasi Momentum :

$$P_1 + \rho_1 V_1^2 = P_2 + \rho_2 V_2^2 \quad (4)$$

Konservasi Energi:

$$h_1 + \frac{1}{2} V_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} V_2^2 \quad (5)$$

Kombinasi dari persamaan konservasi massa dan konservasi momentum akan menghasilkan persamaan yang biasa disebut *Rayleigh line relation*

$$\dot{m}^2 = \frac{P_2 - P_1}{1/\rho_2 - 1/\rho_1} \quad (6)$$

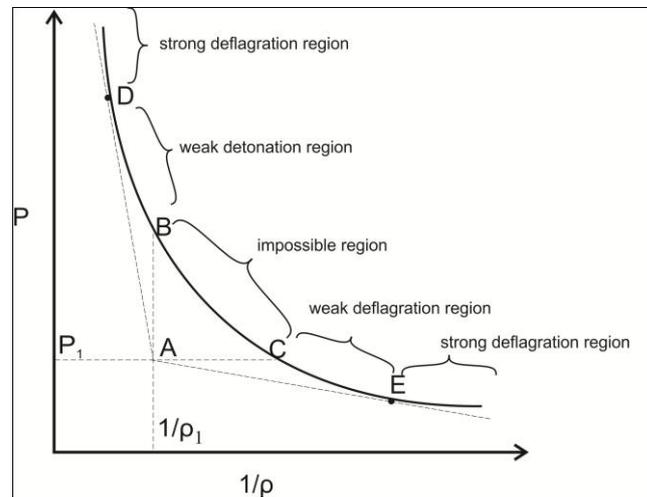
Selain itu persamaan lain yang dapat digunakan mengetahui karakteristik *flame front* adalah persamaan *Rankine-Hugoniot*:

$$\frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{P_2}{\rho_2} - \frac{P_1}{\rho_1} \right) - \frac{1}{2} (P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) = q \quad (7)$$

Persamaan (7) juga dapat dinyatakan dalam

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (8)$$

Persamaan (8) dapat digambarkan menjadi sebuah kurva p vs $1/\rho$ yang dikenal dengan nama (*Rankine-*) *Hugoniot Curve* seperti terlihat pada gambar 5.

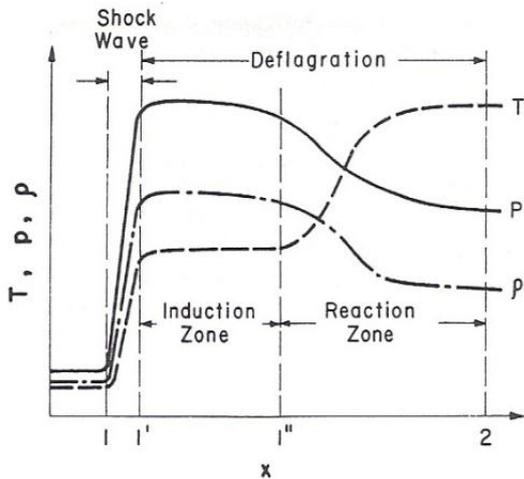


Gambar 5 *Hugoniot Curve* (Deiterding, 2005)

Titik A ($1/\rho_1, P_1$) biasa disebut *origin* dari *Hugoniot Plot*. Terdapat dua garis melalui titik A yang bersinggungan dengan *Hugoniot Curve* pada titik yang disebut *Chapman-Jouguet (CJ) Point* (titik D dan E), dimana pada titik ini *Mach number* bernilai 1. Titik D disebut *Upper Chapman-Jouguet (CJ) Point* dan titik E disebut *Lower Chapman-Jouguet (CJ) Point*. Selain itu terdapat garis vertikal dan horizontal melalui titik A yang memotong *Hugoniot Curve* pada titik B dan C yang kemudian kedua titik ini digunakan

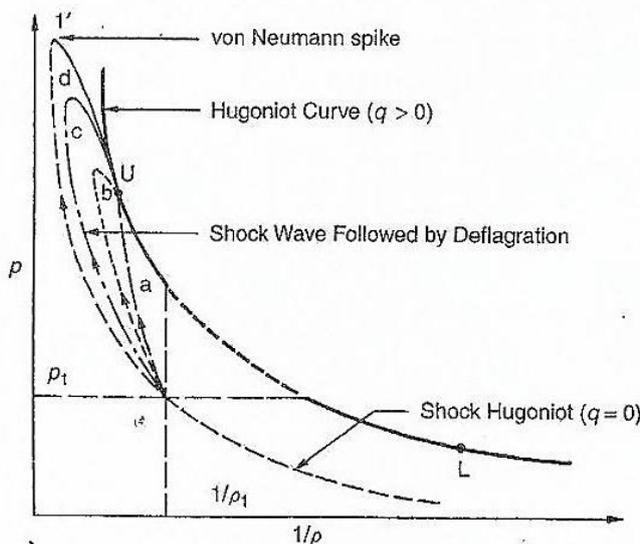
untuk membagi *Hugoniot Curve* menjadi beberapa *region*, seperti tercantum pada gambar 5

Zel'dovich, von Neumann, dan Doring mengembangkan teori CJ dengan mengasumsikan bahwa gelombang detonasi terdiri dari *shockwave* dan zona reaksi yang mengikuti di belakangnya [7]. Setelah melewati *shockwave* reaktan tidak langsung bereaksi namun melewati zona induksi dimana properties dari reaktan relatif konstan (gambar 6). Kemudian baru setelah melewati titik 1'' pada gambar 6. reaktan mulai bereaksi atau bisa dikatakan melewati zona reaksinya.



Gambar 6 Variasi dari Physical Properties pada Gelombang Detonasi ZND (Kuan-yun Kuo, 1986)

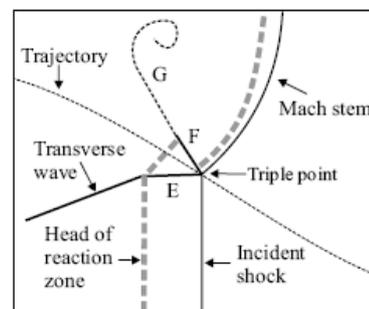
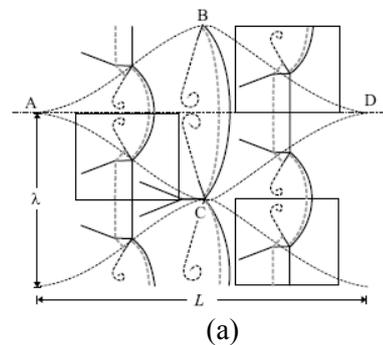
Pada awalnya, reaktan akan mengalami proses kompresi oleh *shockwave*, akan tetapi ketika tekanan reaktan mencapai tekanan CJ, reaktan masih belum terbakar karena belum tercapai temperatur yang cukup tinggi untuk menginisiasi reaksi. Kondisi ini ditunjukkan oleh jalur a pada gambar 7 Sehingga pembentukan gelombang detonasi melalui jalur a bisa dikatakan tidak mungkin terjadi.



Gambar 7 Struktur Detonasi ZND pada Grafik p vs $1/\rho$ (Kuan-yun Kuo, 1986)

Yang terjadi adalah tekanan akan terus naik hingga melebihi nilai tekanan pada titik CJ yang kemudian dilanjutkan dengan terjadinya reaksi pembakaran dan percepatan flame front menuju ke upper CJ point (U), seperti ditunjukkan oleh jalur b, c, dan d pada gambar 7. Jalur b terjadi pada *campuran fuel-oxidizer* dengan kinetik kimia yang cepat, sedangkan c dan d terjadi pada kinetik kimia yang lebih lambat. Tekanan tertinggi yang dapat dicapai sebelum terjadi detonasi disebut Von-Neumann Spike dan ditunjukkan angka 1' pada gambar 7.

Beberapa peneliti telah menemukan konsep mengenai gelombang detonasi 3 dimensi sejak 1926 [7]. Sampai pada tahun 1959 kemudian Denisov dan Troshin mempelajari struktur 3 dimensi dari gelombang detonasi secara detail untuk pertama kali. Denisov dan Troshin menggunakan metode *smoked-foil* pada penelitiannya, menemukan bahwa detonasi dapat meninggalkan jejak perambatannya pada suatu film *coated wall*. Selanjutnya diketahui bahwa, jejak perambatan ini disebabkan *collision* antara oleh *triple point*, yaitu persimpangan antara gelombang *Mach stem*, *Incident Shock*, dan *Reflected Shock* (garis E pada gambar 8b).

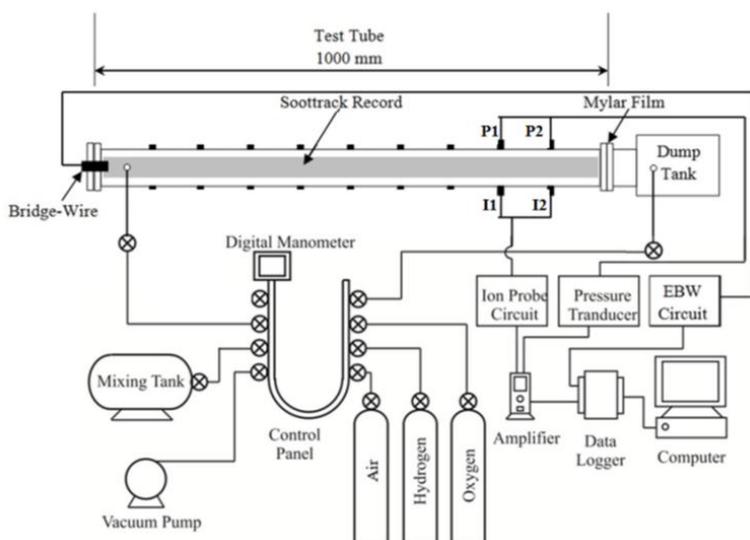


Gambar 8 Gelombang Detonasi 3 Dimensi (a) *Detonation Cell* (b) Skema Terbentuknya *Triple Point* (Kuan-yun Kuo, 1986)

Dua triplepoint bergerak pada lintasan trajectory dari titik A menuju titik B dan C, seiring dengan merambatnya Mach Stem dan Shock Front. Ketika mencapai titik B dan C, gerakan triple point berubah arah dan pada titik ini shock front berubah menjadi incident shock, selanjutnya energi dari shock ini terus berkurang hingga pada akhirnya benar-benar menghilang di titik D. Pada titik D dua triple point menyatu, kemudian selanjutnya terbentuk dua triple point baru setelah titik D. Proses ini terjadi terus menerus sehingga detonation cell terbentuk secara continue selama proses perambatan gelombang detonasi.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan Pipa Uji Detonasi dengan skematik ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9 Skematik Alat Uji

Untuk mengukur tekanan yang dihasilkan di dalam PUD serta mendeteksi perambatan *shockwave* digunakan dua unit sensor tekanan yang dipasang pada jarak 800mm dari posisi DBW dengan jarak antar sensor sebesar 100 mm. Sedangkan untuk mendeteksi perambatan *flame arrival* digunakan sensor *ion probe* yang dipasang pada PUD dengan posisi berlawanan dengan posisi sensor tekanan. Selanjutnya sensor tekanan dihubungkan dengan *integrator* dan *data recorder* sehingga data dapat diolah dan divisualisasikan di komputer.

Untuk mendukung data dari sensor tekanan dan *ion probe*, digunakan teknik visualisasi gelombang detonasi menggunakan *soottrack record* yang dibuat dari plat aluminium setebal 0,4 mm sepanjang 1000 mm yang permukaannya

diberi lapisan *film* dari jelaga pembakaran minyak tanah kemudian diletakkan di dalam *test tube* PUD.

Detonator *Bridge-Wire* (DBW) merupakan sumber energi inisiasi untuk mengawali proses pembakaran pada PUD. *Flame front* serta *shockwave* akan timbul pada jarak tertentu dari DBW dan merambat ke arah *dump tank*. Sumber energi listrik yang digunakan DBW berasal dari listrik arus bolak-balik (AC) PLN bertegangan 220 volt yang ditingkatkan tegangannya oleh transformator. Energi potensial listrik tersebut disimpan di dalam kapasitor yang kemudian akan dilepaskan menuju *bridge-wire* pada PUD saat trigger DBW dipicu.

Proses pengisian bahan bakar-oksidizer 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.

Kondisi eksperimen ditampilkan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 *Experimental Condition*

<i>Fuel</i>	Hidrogen
<i>Oksidizer</i>	Oksigen
<i>Equivalence Ratio</i>	1
<i>Mixing</i>	<i>Premixed</i>
<i>Initial Pressure (kPa)</i>	30-50, interval 10
<i>Kapasitansi Kapasitor (µf)</i>	940
<i>Tegangan Listrik (volt)</i>	90-120, interval 10
<i>Material bridge-wire</i>	Tembaga
<i>Temperatur (°C)</i>	25 (Suhu ruang)

Dengan memasukkan nilai ΔV ke dalam persamaan

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (9)$$

Dengan nilai $C = 940 \mu f$ maka diperoleh nilai energi inisiasi (E_i) untuk masing-masing nilai ΔV yang ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 1 Nilai Energi Inisiasi untuk Setiap ΔV

ΔV (Volt)	Energi Inisiasi (Joule)
90	3,807
100	4,700
110	5,687
120	6,768

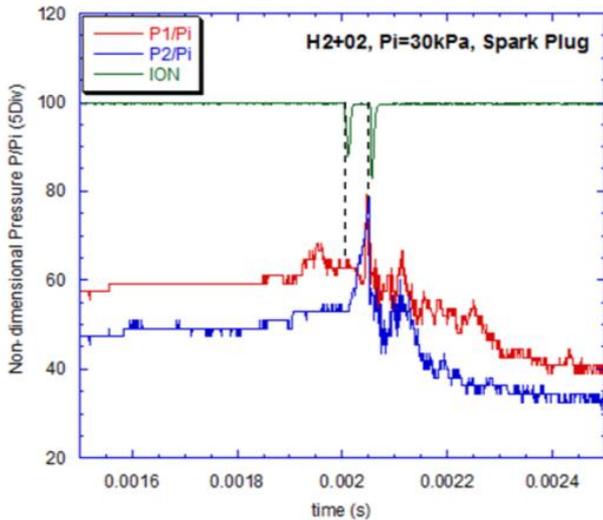
Masalah yang dihadapi pada saat dilakukan penelitian ini adalah lamanya proses set-up peralatan dan kalibrasi sensor-sensor yang digunakan, khususnya sensor pressure transducer.

Hal ini disebabkan karena kondisi sensor yang kurang optimal dan waktu penelitian yang relatif terbatas. Untuk menghindari hal tersebut pada penelitian selanjutnya, maka penulis menyarankan untuk memperhitungkan waktu penelitian dengan baik sehingga persiapan penelitian bisa dilakukan secara lebih optimal.

Hasil dan Analisis

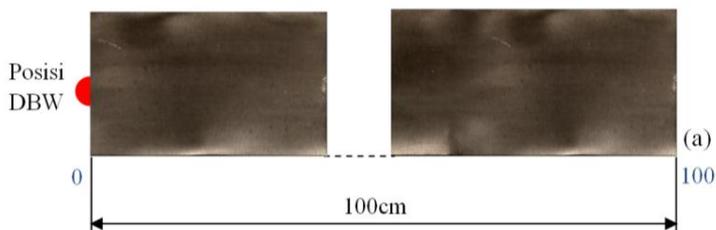
Hasil dari proses pembakaran pada semua kondisi penelitian untuk campuran Hidrogen-Oksigen dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Deflagrasi



Gambar 10 Grafik Tekanan Non-dimensional P/Pi (5Div) vs. waktu (s) pada kondisi H2+O2, Pi=30kPa, Ei=1joule.

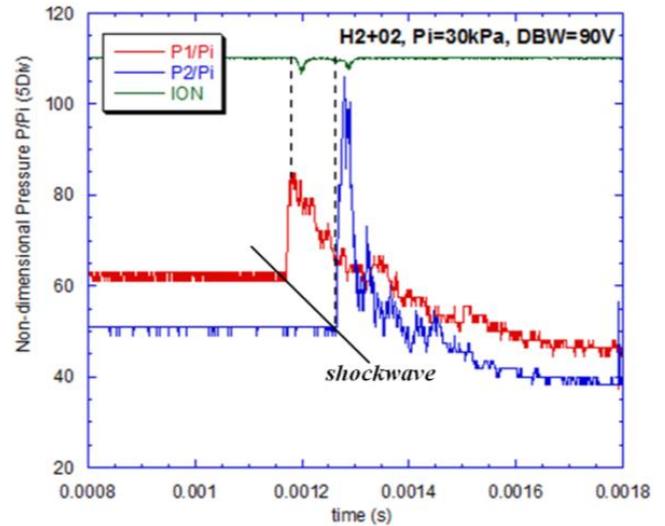
Dari gambar 10 dapat diamati bahwa deflagrasi terjadi pada tekanan awal 30 kPa dengan energi inisiasi sebesar 1 Joule. Hal ini terbukti dari grafik yang dihasilkan ion probe (ION) tidak berhimpit dengan grafik yang dihasilkan pressure transducer (P1 dan P2). Visualisasi proses deflagrasi tersebut pada *soottrack* ditunjukkan pada gambar 11 di mana tidak terdapat *detonation cell* sepanjang *soottrack*.



Gambar 11 Visualisasi Gelombang Pembakaran pada *Soottrack Record* pada kondisi H2+O2, Pi=30kPa, Ei=1joule.

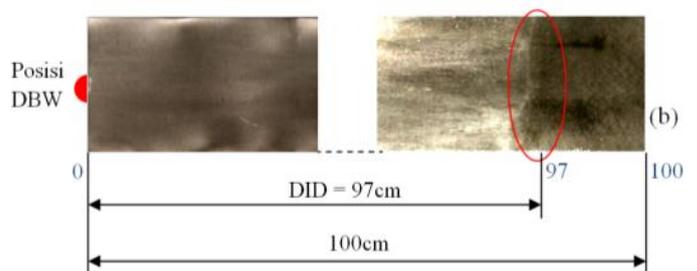
2. Detonasi Tidak Stabil (*Unstable Detonation*)

Dari gambar 12 dapat diamati bahwa detonasi mulai terjadi pada tekanan awal 30 kPa dengan energi inisiasi sebesar 3,807 Joule. Hal ini terbukti dari grafik yang dihasilkan *ion probe* (ION) berhimpit dengan grafik yang dihasilkan *pressure transducer* (P1 dan P2).



Gambar 12 Grafik Tekanan Non-dimensional P/Pi (5Div) vs. waktu (s) pada kondisi H2+O2, Pi=30kPa, Ei= 3,807 joule

Proses detonasi yang masih belum stabil mulai terjadi tersebut ditunjukkan pada gambar 13 di mana *detonation cell* mulai terbentuk pada jarak 97cm dari posisi DBW (bagian yang diberi lingkaran merah) dengan ukuran yang relatif berbeda. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan nilai energi inisiasi mampu mengubah karakteristik gelombang detonasi pada nilai tekanan awal yang sama.

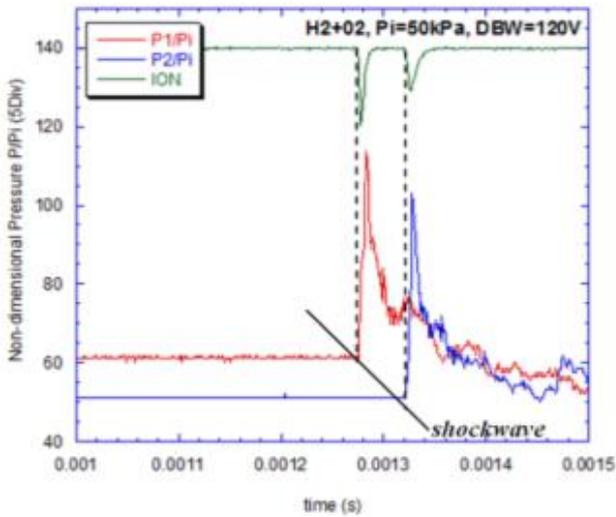


Gambar 13 Visualisasi Gelombang Pembakaran pada *Soottrack Record* pada kondisi H2+O2, Pi=30kPa, Ei= 3,807 joule.

3. Detonasi Stabil (*Stable Detonation*)

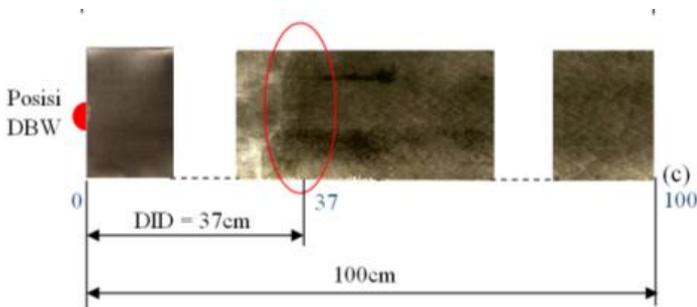
Dari gambar 14 dapat diamati bahwa terjadi detonasi stabil (*stable detonation*) pada tekanan awal 50kPa pada saat kondisi energi inisiasi maksimum sebesar 6,768 Joule. Hal ini terbukti dari grafik yang dihasilkan *ion probe* (ION)

berhimpit dengan grafik yang dihasilkan *pressure transducer* (P1 dan P2).



Gambar 14 Grafik Tekanan Non-dimensional P/Pi (5Div) vs. waktu (s) pada kondisi H₂+O₂, Pi=30kPa, Ei= 6,768 joule

Di samping itu, hasil visualisasi *soot-track record* juga menunjukkan terjadinya *detonation cell* pada jarak 37cm dari posisi DBW dengan ukuran λ yang relatif seragam sebagaimana ditunjukkan pada gambar 15.



Gambar 15 Visualisasi Gelombang Pembakaran pada *Soottrack Record* pada kondisi H₂+O₂, Pi=30kPa, Ei= 6,768 joule.

Adapun data lengkap pengukuran DID dari hasil penelitian pada kondisi Hidrogen-Oksigen ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2 *Detonation Initiation Distance* H₂+O₂

Pi	DID (cm)				
	1	3.807	4.7	5.687	6.768
30	-	97	92	88.5	86
40	87	83	78	59	50.5
50	83	82.5	53.5	50	37

Keterangan:
■ : Deflagration
■ : Unstable Detonation
■ : Stable Detonation

Dengan menggunakan software CJ dapat diperoleh nilai teoritis dari kecepatan CJ atau V CJ (m/s) dan nilai tekanan CJ atau P CJ (kPa) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

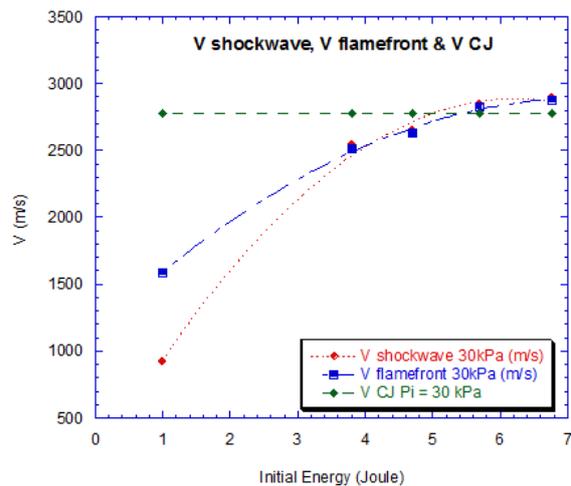
Tabel 3 V CJ dan P CJ untuk kondisi H₂+O₂

Pi (kPa)	V CJ (m/s)	P CJ (kPa)
30	2776	541.09
40	2791	732.01
50	2804	918.07

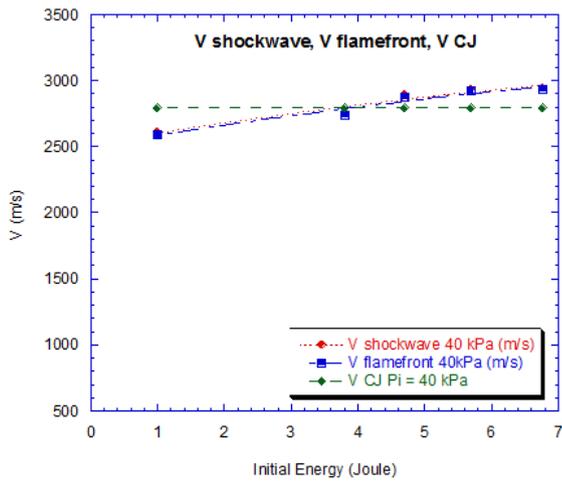
Nilai-nilai V CJ dan P CJ ini digunakan sebagai acuan nilai teoritis untuk dibandingkan dengan kecepatan detonasi dan tekanan detonasi yang dihasilkan dari proses pembakaran.

Dengan membandingkan nilai-nilai teoritis V CJ dari Tabel 3 dan nilai kecepatan detonasi hasil eksperimen, maka diperoleh grafik perbandingan nilai kecepatan detonasi dan nilai kecepatan teoritis CJ pada berbagai kondisi tekanan awal campuran Hidrogen-Oksigen sebagaimana ditunjukkan pada gambar 16 (a), (b) dan (c).

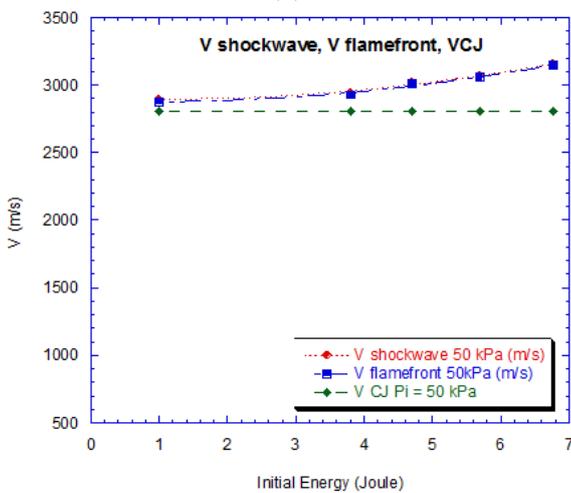
Dari gambar 16a dapat diamati bahwa nilai kecepatan *flame front* (V *flamefront*) lebih cepat dibandingkan kecepatan *shock wave* (V_{shockwave}) pada saat Pi = 30 kPa dan Ei = 1 Joule. Hal ini berarti bahwa *flamefront* bergerak lebih cepat dibandingkan *shockwave*, sehingga detonasi tidak terjadi pada kondisi ini yang dibuktikan dari tidak terdapatnya *detonation cell* pada *soottrack*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 16 Grafik Perbandingan Nilai Kecepatan *shockwave* (m/s), Nilai Kecepatan *flamefront* (m/s), dan Nilai Kecepatan CJ pada Kondisi (a) H_2+O_2 , $P_i=30$ kPa, (b) H_2+O_2 , $P_i=40$ kPa, (c) H_2+O_2 , $P_i=50$ kPa

Dari gambar 16a tersebut juga dapat diamati bahwa kecepatan *shockwave* pada saat $P_i = 30$ kPa dan $E_i = 1$ Joule; 3,807 Joule; 4,7 Joule lebih rendah bila dibandingkan kecepatan teoritis CJ saat $P_i = 30$ kPa. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya deflagrasi pada kondisi $E_i = 1$ Joule dan detonasi tidak stabil pada kondisi $E_i = 3,807$ Joule; 4,7 Joule.

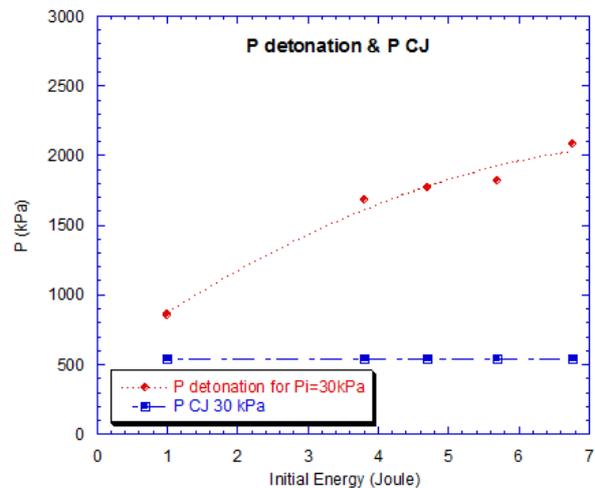
Dari gambar 16b dapat diamati bahwa nilai kecepatan *shockwave* pada saat $P_i = 40$ kPa dan $E_i = 1$ Joule; 3,807 Joule lebih rendah bila dibandingkan kecepatan teoritis CJ saat $P_i = 40$ kPa. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya detonasi tidak stabil pada kondisi $E_i = 3,807$ Joule; 4,7 Joule.

Dengan membandingkan antara tabel 2 dengan gambar 11a, 11b dan 11c dapat diperoleh hubungan antara kecepatan relatif *shockwave*

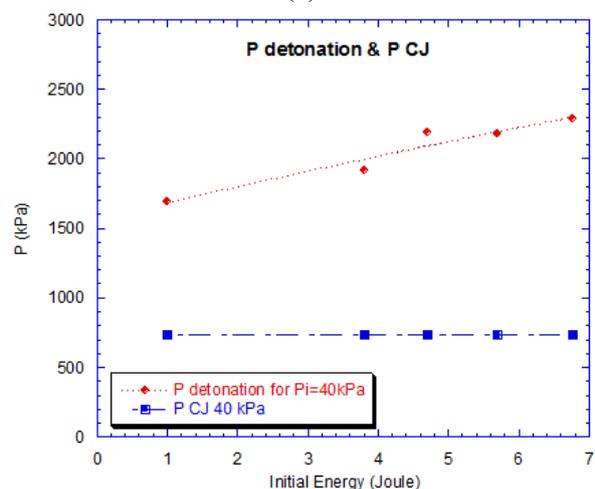
terhadap kecepatan teoritis CJ dengan proses detonasi yang terjadi. Bila kecepatan *shockwave* relatif lebih tinggi dibandingkan kecepatan CJ, maka detonasi stabil akan terjadi, bila kecepatan *shockwave* relatif sama atau sedikit lebih rendah dibandingkan kecepatan CJ, maka detonasi tidak stabil akan terjadi. Dan bila kecepatan *shockwave* jauh lebih rendah dibandingkan kecepatan CJ maka akan terjadi deflagrasi.

Untuk mengetahui pe Dengan membandingkan nilai-nilai teoritis P_{CJ} dari Tabel 3 dan nilai tekanan detonasi hasil eksperimen, maka diperoleh grafik perbandingan nilai tekanan detonasi maksimum dan nilai tekanan teoritis CJ pada berbagai kondisi tekanan awal campuran Hidrogen-Oksigen sebagaimana ditunjukkan pada gambar 17.

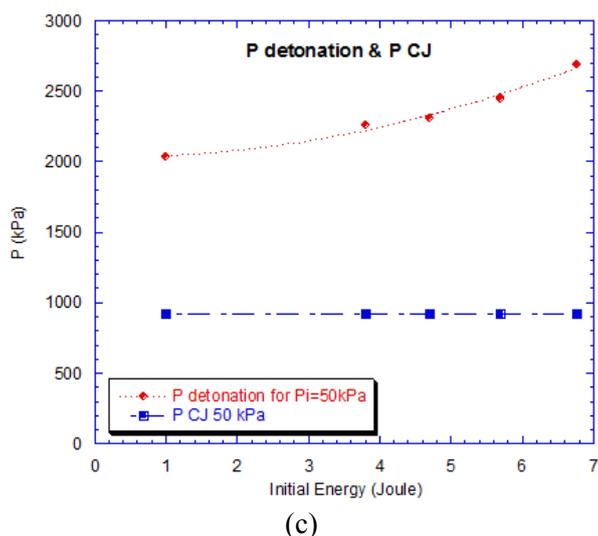
Dari gambar 17 dapat diamati bahwa nilai tekanan detonasi semakin besar saat nilai tekanan awal P_i dan energi inisiasi E_i semakin besar. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan nilai energi inisiasi dapat memberikan peningkatan pada nilai tekanan detonasi yang dihasilkan pada nilai tekanan awal (P_i) yang sama.



(a)



(b)



(c)
Gambar 17 Grafik Perbandingan Nilai Tekanan Detonasi Maksimum (kPa) dan Nilai Tekanan CJ pada Kondisi (a) H₂+O₂ P_i=30 kPa, (b) H₂+O₂ P_i=40 kPa dan (c) H₂+O₂ P_i=50 kPa

Hal ini terjadi karena semakin besar nilai energi inisiasi yang diberikan, maka proses pembakaran akan semakin cepat terjadi dan lebih sempurna sehingga dengan jumlah campuran bahan bakar-oksidator yang sama, akan dihasilkan energi berupa kalor dan tekanan yang lebih besar.

Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada saat nilai energi inisiasi dari DBW relatif kecil maka nilai DID akan relatif lebih besar. Bahkan pada kondisi tertentu (energi inisiasi sebesar 1 Joule saat menggunakan *spark plug* dan tekanan awal =30kPa), terjadi peristiwa deflagrasi yang dibuktikan dengan tidak terjadinya *detonation cell* pada *soottrack*. Semakin besar nilai inisiasi dari DBW maka nilai DID akan semakin kecil, Hal ini terjadi karena dengan nilai energi DBW yang lebih besar, energi yang akan digunakan untuk menginisiasi proses pembakaran akan semakin besar sehingga proses detonasi akan lebih cepat terjadi pada zona yang lebih dekat dari DBW.

Referensi

- [1] Leons, J., National Park Service Handbook for the Storage, Transportation, And Use of Explosives, U.S. Department of the Interior, 1999, pp. 98-106.
- [2] Verizoglu, T.N., Barbir, F., Solar-Hydrogen Energy System: the Choice of the Future, 1991.

[3] Sentanuhady, J., Batas Detonasi dari Campuran Gas Hidrogen, Udara dan Argon, Yogyakarta, 2008.

[4] Roeske, F., Benterou, J., Transition to Detonation in Exploding Bridgewire Detonators, *Proceedings of the Fifth International Symposium on Behaviour of Dense Media Under High Dynamic Pressures*, Saint-Malo, 2003.

[5] Srivastava, J.K., Weinrotter, Characterisation of laser ignition in hydrogen – air mixtures in a combustion bomb, *international journal of hydrogen energy*, Elsevier 34, 2008, 2475 – 2482.

[6] Deiterding, R., George B., High-resolution Simulation of Detonations with Detailed Chemistry, *Analysis and Numerics for Conservation Laws*, Springer, Berlin, 2005, pp. 69-91.

[7] Kuan-yun Kuo, K., Principle of Combustion, John Wiley & Sons, New York, 1986.