

## Batas Detonasi dari Campuran Gas Hidrogen, Udara dan Argon

Jayan Sentanuhady

Jurusian Teknik Mesin dan Industri  
Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2 Kampus UGM Jogjakarta  
E-mail: [jayan@ugm.ac.id](mailto:jayan@ugm.ac.id)

### Absrak

Pada sistem detonasi, gelombang pembakaran (*reaction wave*) dan gelombang kejut (*shock wave*) selalu merambat dengan kondisi berimpit pada kecepatan supersonic. Shock wave yang memiliki tekanan tinggi akan membahayakan bagi keselamatan manusia jika kecelakaan detonasi terjadi. Dengan mengetahui batas detonasi, akibat-akibat kecelakaan karena detonasi akan dapat dihindarkan atau diminimalisir. Pada eksperimen ini, berbagai variasi konsentrasi campuran bahan bakar gas hidrogen dan oksidiser udara digunakan sebagai campuran bahan bakar utama dan ditambahkan argon untuk mengendalikan reaksi. Camburan bahan bakar tersebut di atas diuji pada pipa uji detonasi yang berpenampang segiempat pada suhu ruangan dan tekanan awal 100 kPa. Tiga kondisi pembakaran dapat dilihat dalam eksperimen ini yaitu detonasi, detonasi yang tidak stabil dan deflagrasi. Batas bawah dan atas detonasi dari campuran gas tanpa argon telah dapat ditentukan pada konsentrasi 23 % dan 50 % dari hydrogen.

Sedangkan jika bahan bakar hidrogen-udara dengan tambahan gas argon, batas detonasi akan semakin menyempit sebagai kompensasi penurunan reaksi kimia pembakaran. Untuk menjamin detonasi berubah menjadi deflagrasi, minimal konsentrasi argon adalah 27 %.

*Keywords:* detonasi, deflagrasi, shock wave, pembakaran

### Pendahuluan

Pemahaman proses perambatan detonasi, pembakaran yang merambat pada kecepatan supersonic, dari campuran bahan bakar gas di dalam pipa adalah hal yang sangat penting bagi industri kimia supaya dapat digunakan untuk memprediksi resiko-resiko dalam proses produksi. Pada tahun 1955, Zel'dovich melakukan investigasi tentang perambatan pembakaran dalam pipa dengan menggunakan rangka kerja proses perpindahan kalor dari zona reaksi ke dinding tabung sebagai sumber proses padamnya (quenching) detonasi. Rugi-rugi kalor dalam proses perambatan detonasi dipahami sebagai rugi-rugi langsung karena proses perpindahan kalor dari gas yang tertekan (compressed gas) ke shock wave dan proses perpindahan kalor dari aliran gas ke dinding tabung [1].

Sukses tidaknya proses pembakaran dari campuran bahan bakar gas menjadi detonasi sangat dipengaruhi oleh konsentrasi gas-gas dalam campuran dan juga tekanan campuran gas tersebut. Campuran bahan bakar gas akan sangat sensitive jika campurannya dalam kondisi stoichiometric, dimana saat itu besarnya cell dari detonasi akan relative lebih kecil. Ukuran cell detonasi akan meningkat jika campuran bahan bakar gas tersebut dalam kondisi miskin atau kaya atau pada tekanan awal yang rendah. Dengan menggunakan teknik pengukuran cell detonasi, diameter kritis pipa dan energi kritis untuk inisiasi, Guirao et al. pada tahun 1982 melakukan investigasi efek equivalence ratio (ER) dari campuran bahan bakar gas hidrogen dengan udara sedangkan Bull et al. menggunakan campuran bahan bakar gas hidrokarbon dengan udara [2, 3]. Campuran bahan bakar akan menjadi kurang sensitive untuk detonasi jika gas innert ditambahkan ke dalam campuran gas, sehingga teknik ini dapat digunakan untuk menghindari kecelakaan detonasi di industri kimia. Walaupun penambahan gas diluent seperti uap air, karbon dioksida, argon, nitrogen ke dalam campuran hidrogen-udara dapat membantu mengendalikan gelombang detonasi, tetapi pada temperature tinggi effektifitas gas diluent tersebut akan berkurang [4].

Karena batas-batas detonasi mengacu pada konsentrasi minimal dan maksimal dari bahan bakar dalam campuran bahan bakar dan udara dimana gelombang detonasi masih dapat merambat di dalam pipa, maka setidak-tidaknya gelombang detonasi harus mampu merambat dalam pipa dengan menggunakan satu cell detonasi. Kondisi ini akan lebih sulit untuk dianalisa karena pada kondisi detonasi merambat dengan satu cell, detonasi bisa juga merambat secara berputar (spin), seperti ditunjukkan oleh Wolanski yang menginvestigasi gelombang detonasi dalam pipa pada daerah

marginal dengan menggunakan campuran bahan bakar methane dan udara [5]. Kondisi detonasi yang merambat secara berputar ini menyebabkan sangat sulit untuk menetapkan batas limit dari detonasi secara eksperimen. Dan kondisi ini tidak dapat dijelaskan dengan teori klasik satu dimensi dari detonasi yang dikembangkan oleh Zel'dovich.

Dengan menggunakan pipa uji detonasi berpenampang segi empat, diharapkan kondisi spin dapat dieliminir, sehingga batas detonasi dapat dengan mudah ditentukan. Eksperimen ini dilakukan untuk menjelaskan batas-batas detonasi yang merambat dalam pipa dengan penampang segi empat dengan bahan bakar campuran hydrogen – udara dengan gas argon yang merupakan gas monoatomic. Penambahan argon dalam campuran bahan bakar gas diharapkan mempu merubah sifat-sifat termodinamika dari campuran bahan bakar seperti kalor spesifik, kapasitas kalor, dan konstanta gas sehingga energi aktivasinya juga berubah. Pada eksperimen ini, batas-batas stabil detonasi atau deflagrasi ditentukan berdasarkan keberadaan struktur cell detonasi pada permukaan alumunium yang dipoles dengan jelaga minyak tanah dan rekaman tekanan shock wave dan waktu kedadangan reaction wave.

### Metode Penelitian

Eksperimen ini menggunakan pipa uji detonasi dengan penampang segiempat ukuran 25 x 30 mm dan panjang 3 meter. Tabung uji detonasi dibagi dalam 2 bagian, yaitu bagian driver dan bagian driven (*test section*). Bagian driver diperlukan untuk menciptakan energi inisiasi yang besar, yang akan digunakan untuk menginisiasi reaksi di bagian driven. Karena komposisi gas di dalam Gambar 1 Skematik pipa uji detonasi dan peralatan pendukung yang lain

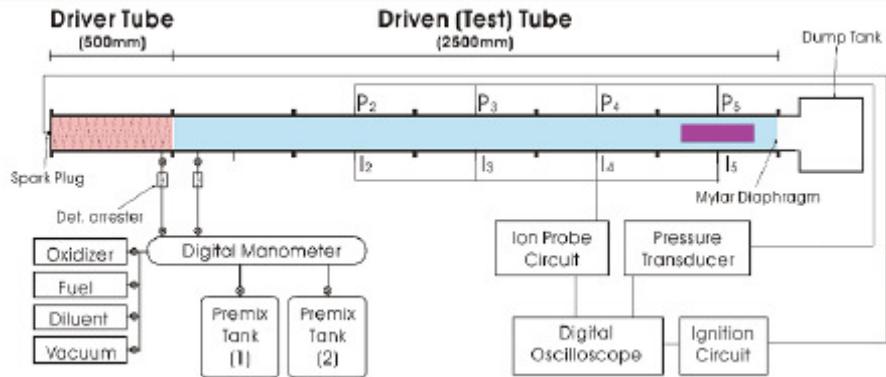
Tabel 1 Kondisi eksperimen untuk bahan bakar

Fuel	Driver Section	Driven Section
Fuel	Hidrogen	Hidrogen
Oxidizer	Oksigen	Udara
Diluent	-	Argon
Equiv. Ratio ( $\phi$ )	1.0	variasi
Init. Pressure (kPa)	100	100
Temperature (°C)	Suhu ruang	Suhu ruang

masing-masing bagian berbeda, maka pada sambungan kedua bagian tersebut dipasang mylar film yang berfungsi mencegah bercampurnya gas di dalam pipa uji detonasi. Kedua bagian dari pipa uji detonasi tersebut dihubungkan dengan tabung *premix* dimana gas hidrogen dan oksigen atau udara dicampurkan. Proses inputan gas premix ke dalam pipa uji detonasi dikendalikan dengan *digital pressure sensor* dengan presisi tinggi. Detail dari tabung uji detonasi dan peralatan lainnya ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada bagian driven, 4 sensor tekanan dengan merek PCB dan 4 sensor ionisasi dipasang secara berhadapan. Sensor tekanan ini digunakan untuk mendeteksi tekanan *shock wave* di depan *reaction wave*. Sedangkan sensor ionisasi digunakan untuk mendeteksi waktu kedadangan *reaction front* pada suatu posisi observasi. Data dari sensor tekanan dan sensor ionisasi direkam dengan menggunakan *digital oscilloscope* dengan merek Yokogawa. Hasil kedua sensor tersebut digunakan untuk menganalisa karakteristik proses pembakaran di dalam pipa uji detonasi. Pada bagian driven juga terdapat bagian *window* dimana cell detonasi dapat divisualisasikan dengan menggunakan teknik pemasangan alumunium yang telah dilapisi jelaga minyak tanah (*soot track record*).

Gas uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah campuran gas hidrogen - oksigen untuk bagian driver serta campuran gas hidrogen - udara untuk bagian driven yang masing-masing



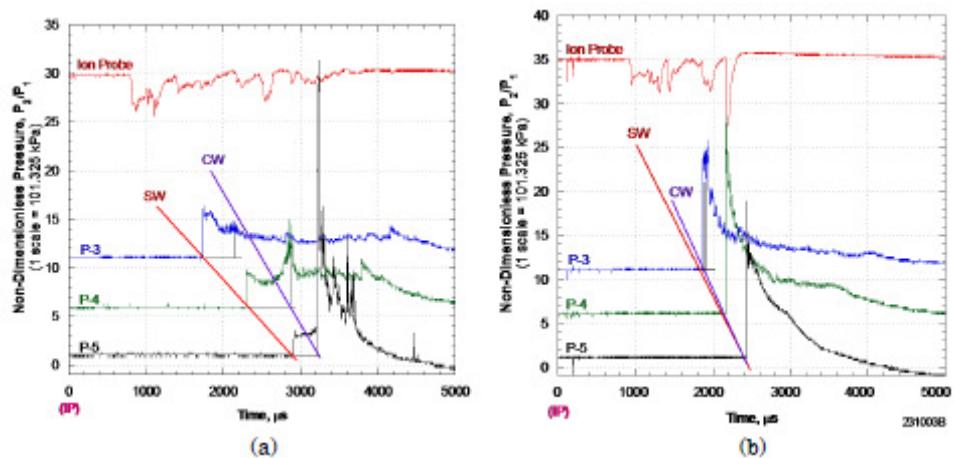
Gambar 1 Skematik pipa uji detonasi dan peralatan pendukung yang lain

dimasukkan dalam pipa uji detonasi dengan tekanan awal 100 kPa. Detail dari kondisi eksperimen dapat di lihat di tabel 1. Setelah gas driver dan driven diinjeksikan ke dalam pipa uji detonasi, inisiasi proses pembakaran dilakukan dengan menggunakan sistem pematik api otomotive yang di pasang pada ujung bagian driver. Setelah diinisiasi, pembakaran dalam kondisi subsonic atau supersonic akan merambat sepanjang pipa uji detonasi.

### Hasil Penelitian dan Pembahasan

Gambar 2a dan 2b menunjukkan rekaman tekanan *shock wave* dan profil *reaction front* disepanjang bagian driven. Gambar 2a adalah menunjukkan kondisi detonasi yang belum stabil sebagaimana ditandai dengan tidak berimpitnya *shock wave* dengan *reaction wave*. Akan tetapi *reaction wave* memiliki tendensi merambat lebih cepat dan mampu merambat mendekati *shock wave* di ujung bagian driven. Hal ini menandakan bahwa detonasi hampir saja terbentuk di ujung bagian driven. Kondisi ini akan berubah menjadi detonasi yang stabil jika pipa di bagian driver lebih panjang dari 2.5 meter. Pada kasus pada gambar 2b, *shock wave* dan *reaction wave* merambat secara berimpit pada hingga ujung bagian driven. Hal ini menunjukkan bahwa detonasi telah terbentuk dengan sempurna pada bagian driven.

Gambar 3 menunjukkan tipikal struktur cell detonasi pada kasus bahan bakar dengan 30 % vol. H<sub>2</sub>, 60 % vol. udara dan 10 % vol. Ar. Dari pengukuran didapatkan bahwa ukuran cell rata-rata untuk kasus ini adalah 11 mm dan strukturnya tidak reguler karena ukuran cell antara bagian upstream (kiri) dengan bagian downstream (kanan) berbeda. Bagian upstream



Gambar 2 Profil tekanan shock wave dan reaction wave pada kasus unstable detonation dan stable detonation

ukuran cell-nya lebih besar dari pada bagian downstream, hal ini menandakan bahwa pada bagian upstream detonasi merambat pada kecepatan yang lebih lambat dari pada bagian downstream. Proses

percepatan rambat detonasi ini menunjukkan bahwa proses deflagration to detonation transmision (DDT) telah terjadi beberapa centimeter sebelum window dimana soot track record diletakkan. Dari data-data hubungan tekanan shock wave dan waktu kedatangan reaction wave pada suatu posisi, serta dengan bantuan keberadaan cell detonasi pada daerah window, klasifikasi proses perambatan pembakaran dapat dilakukan. Pada eksperimen ini, empat klasifikasi proses perambatan pembakaran dalam pipa uji dapat dilihat, seperti pada gambar 4.

Gambar 4a menunjukkan bahwa hanya shock wave yang merambat pada bagian driven tanpa diikuti oleh reaction wave. Hal ini menunjukkan bahwa proses pembakaran pada bagian driven tidak terjadi, karena besarnya energi aktivasi untuk melakukan proses reaksi. Shock wave yang merambat pada bagian driven adalah shock wave yang diterbentuk pada bagian driver dan kemudian merambat pada bagian driven. Kasus-kasus seperti ini diklasifikasikan sebagai kondisi tanpa reaksi (no reaction).

Gambar 4b adalah kondisi dimana reaction wave juga merambat mengikuti shock wave pada bagian driven, akan tetapi kencenderungannya jarak antara shock wave dan reaction wave saling menjauh disepanjang bagian driven pipa uji detonasi. Hal ini mengindikasikan bahwa proses pembakaran dalam bagian driven terjadi dalam skala yang kecil dan reaksi tersebut tidak mampu mengakselerasi hingga kecepatan shock wave. Kasus-kasus dengan kondisi seperti ini digolongkan sebagai deflagrasi (deflagration).

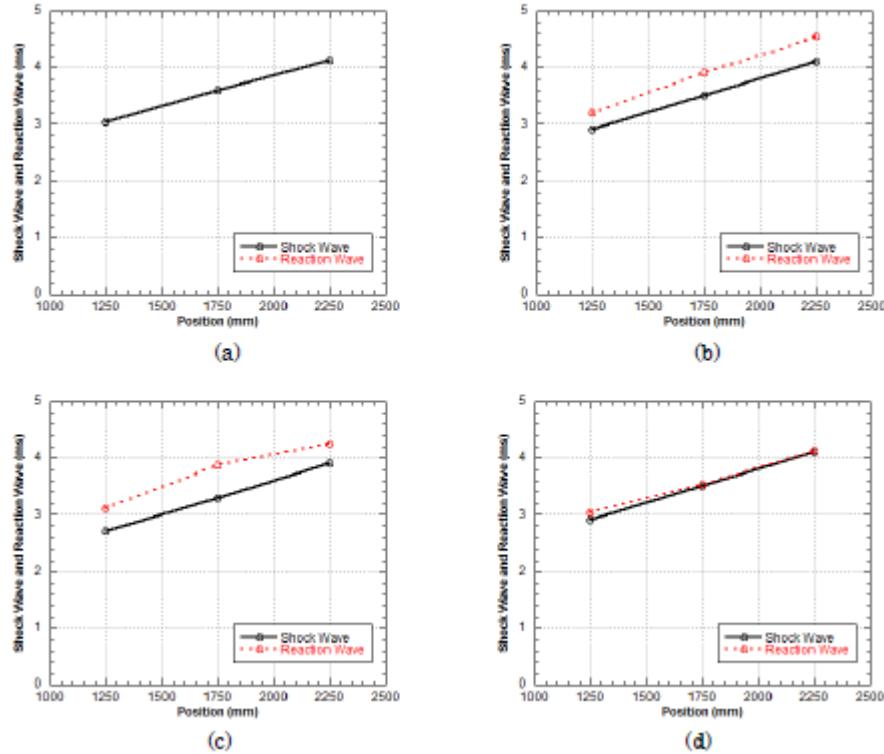
Gambar 4c menggambarkan kondisi yang sama dengan kasus 3a dimana reaction wave merambat mengikuti shock wave, tetapi pada kasus ini ada kecenderungan bahwa reaction wave merambat lebih cepat dari posisi ke posisi di bagian driven. Pada kondisi ini ada tendensi bahwa reaction wave mampu merambat secara berimpit dengan shock wave sebagai



Gambar 3 Struktur cell detonasi dengan diluen argon pada kasus 30 % vol. H<sub>2</sub>, 60 % vol. Udara dan 10 % vol. Ar

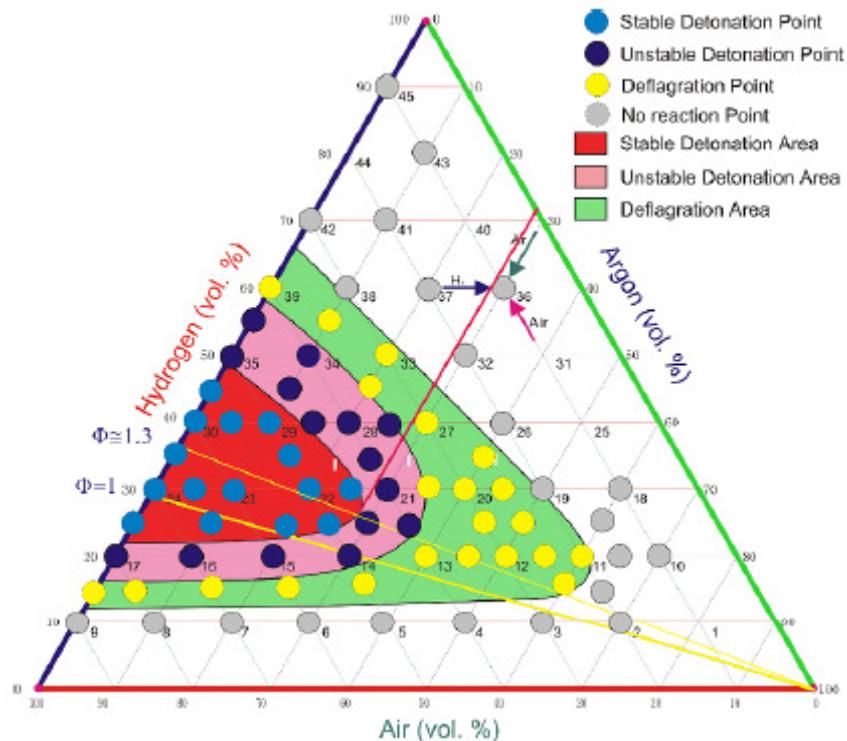
gelombang detonasi. Akan tetapi pada eksperimen ini panjang bagian driven hanya 2,5 meter, sehingga proses kopling antara reaction wave dan shock wave tidak dapat direkam. Kondisi-kondisi seperti ini, diklasifikasikan sebagai detonasi yang tidak stabil (unstable detonation). Gambar 4d menunjukkan kondisi dimana reaction wave dan shock wave merambat secara berimpit pada pertangahan bagian driven hingga ujung bagian driven. Ini mengindikasikan bahwa proses DDT terjadi pada pertangahan bagian driven. Kasus-kasus seperti ini cell detonasi akan terbentuk sehingga diklasifikasikan sebagai detonasi yang stabil (stable detonation).

Dengan menggunakan data-data klasifikasi di atas, dan dengan bantuan hasil visualisasi dengan teknik soot track record, batas-batas deflagrasi atau flammability dan detonasi (detonability) dapat digambarkan pada grafik segitiga dimana konsentrasi hidrogen, udara dan argon dapat ditampilkan, seperti pada gambar 5.



Gambar 4 Hubungan antara waktu kedatangan shock wave dengan reaction wave pada suatu posisi pengukuran untuk kasus (a) 60 % vol. H<sub>2</sub>, 10 % vol. Udara, 30 % vol. Ar, (b) 40 % vol. H<sub>2</sub>, 40 % vol. Udara, 20 % vol. Ar, (c) 40 % vol. H<sub>2</sub>, 45 % vol. Udara, 15 % vol. Ar, (d) 25 % vol. H<sub>2</sub>, 65 % vol. Udara, 10 % vol. Ar

Gambar 5 adalah grafik segitiga batas deflagrasi dan detonasi dari campuran bahan bakar hidrogen, udara dan argon dengan konsentrasi yang berbeda-beda pada tekanan awal  $p_0 = 100$  kPa. Sumbu sebelah kiri menyatakan konsentrasi hidrogen, sumbu sebelah kanan menyatakan konsentrasi argon dan sumbu sebelah bawah menyatakan konsentrasi udara. Tanda lingkaran dengan warna biru, navy, kuning dan abu-abu adalah masing-masing mewakili kondisi stable detonation, unstable detonation, deflagration dan no reaction. Dan daerah yang ditandai dengan warna merah, pink dan hijau mengindikasikan sebagai daerah stable detonation, unstable detonation dan deflagration. Dalam kasus campuran bahan bakar tanpa argon, batas bawah detonasi (lower detonation limits-LDL) dan batas atas detonasi (upper detonation limits-UDL) dari detonasi yang stabil adalah 23 % vol. hidrogen dan 50% vol. hidrogen, sedangkan LDL dan UDL untuk detonasi yang tidak stabil adalah 16 % vol. hidrogen dan 58% vol. hidrogen. Hasil ini sedikit berbeda dengan hasil penelitian Ciccarelli (LDL = 18 % vol. hidrogen dan UDL = 58 % vol. hidrogen) dan juga Breton (LDL = 18.9 % vol. hidrogen dan UDL = 58.9 % vol. hidrogen) yang menggunakan pipa uji deonasi yang sangat besar dan panjang, sehingga mampu



Gambar 5 Segitiga batas detonasi dan deflagrasi dari campuran bahan bakar hidrogen-udara-argon pada tekanan awal  $p_0 = 100$  kPa

mengakomodasi ukuran cell yang besar pula [6]. Pada eksperimen ini, banyak sekali terjadi kasus dimana tanda-tanda DDT akan terjadi pada ujung bagian driven, akan tetapi proses DDT tidak bisa terjadi karena terbatasnya panjang bagian driven. Akan tetapi jika eksperimen ini menggunakan pipa uji yang lebih panjang, semua proses DDT akan sukses dan perambatan detonasi yang stabil akan dapat diamati.

Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan argon sebesar 63 % vol. Akan menyebabkan pembakaran tidak dilakukan karena besarnya energi aktivasi untuk mendukung proses pembakaran. Batas konsentrasi udara (minimum oxidizer concentration-MOC) dari eksperimen ini adalah 19 % vol., proses pembakaran tidak akan terjadi jika MOC kurang dari 19 % vol. Batas bawah deflagrasi (Lower flammability limits-LFL) dan batas atas deflagrasi (upper flammability limits-UFL) pada eksperimen ini adalah 12 % vol. hidrogen dan 67 % vol. hidrogen. Dibandingkan dengan data yang diperoleh oleh Coward dan Hustad dimana nilai LFL = 4 % vol. dan UFL = 75 % vol., hasil eksperimen ini lebih sempit [7, 8]. Hal ini dikarenakan alat uji pembakaran untuk kondisi deflagration yang digunakan pada eksperimen ini tidak standar untuk menguji batas deflagrasi sehingga proses perpindahan kalor dari reaction front ke dinding pipa uji detonasi tidak dapat dieliminasi. Pada kasus kecepatan reaksi sangat tinggi, rugi-rugi akibat perpindahan kalor dapat relatif kecil.

Gambar 5 juga menunjukkan bahwa detonasi akan merambat dengan mudah pada media dengan campuran hidrogen - udara dengan diluent argon jika equivalence ratio (ER) campuran tersebut sekitar 1.3. Nilai ini sama dengan nilai yang didapatkan oleh Ciccarelli yang menggunakan campuran hidrogen-udara dengan diluent uap air (Ciccarelli, 1997) [6]. Pada campuran gas hidrokarbon - udara, detonasi dapat merambat dengan mudah jika equivalence ratio sekitar 1. Dan jika diluent ditambahkan pada media maka, nilai ER ini akan bergeser dan demikian juga aktivasi energi dari campuran bahan bakar juga akan berubah.

## Kesimpulan

Eksperimen ini mendemonstrasikan bahwa penambahan gas innert ke dalam campuran bahan bakar hidrogen - udara dapat merubah parameter termodinamika sehingga menurunkan kecepatan

pembakaran secara signifikan. Empat pola hubungan antara *shock wave* dan *reaction wave* yang dapat diamati dalam eksperimen ini, yaitu:

- a. tanpa reaksi, tidak ada reaksi dalam bagian driven
- b. deflagrasi, ada reaksi akan tetapi sangat lemah
- c. detonasi yang tidak stabil, ada reaksi yang semakin cepat
- d. detonasi yang stabil, *shock wave* dan *reaction wave* merambat secara berimpit.

Detonasi akan merambat dengan mudah jika ER dari campuran bahan bakar hidrogen – udara dan argon adalah sekitar 1.3. Kondisi campuran bahan bakar dengan ER yang jauh dari nilai 1.3 akan menyebabkan kecepatan reaksi menurun, sehingga tidak mampu mengejar *shock wave* yang merambah di depan *reaction wave*.

Guna menghindari proses pembakaran dapat dilakukan dengan mengurangi udara dalam campuran bahan bakar hingga kurang dari 19 % vol. atau menambahkan argon lebih dari 63 % vol.

## Daftar Pustaka

- Ohyagi S, Ochiai T, Yoshihashi T, Harigaya Y (1988) Detonation Cells Size of Hydrogen Oxygen Mixture (Relationship between Induction of Reaction Zone and Critical Initiation Energy). 3559-3564.
- Guirao CM, Knystautas R, Lee JH, Benedick W, Berman M (1982) Hydrogen-Air Detonations, Proceedings of the 19th Combustion Institute, 583-590.
- Bull DC, Elsworth JE, Shuff PJ, Metcalfe E (1982) Detonation cell structures in fuel-air mixtures, Combustion and Flame, 45:7-22.
- D.W. Stamps and S.R. Tieszen(1991) The influence of initial pressure and temperature on hydrogen-air-diluent detonations. Combust. Flame, 83(3):353-364.
- P. Wolanski, C.W. Kauffman, M. Sichel, and J.A. Nicholls. Detonation of methane-air mixtures. In 18th Symp. Int. Combust. Proc., pages 1651-1660, 1981.
- Ciccarelli G, Ginsberg T, Boccio JL (1997) The influence of Initial Temperature on the Detonability Characteristics of Hydrogen-Air-Steam Mixtures. Combustion Science and Technology, 128:181-196.
- Coward HF, Jones GW (1952) Limits of flammability of gases and vapors. Bureau of Mines Bulletin, 503:130-134.
- Hustad JE, Sønju OK (1988) Experimental studies of lower flammability limits of gases and mixtures of gases at elevated temperatures. Combustion and Flame, 71:283–294.