

Uji kinerja pembakaran Campuran Gas CNG - Oksigen dengan Diluent Argon

Iwan Gunawan

Universitas Khairun, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Indonesia
giwangiwan@gmail.com

Abstract

Gas CNG (*Compressed Natural Gas*) disusun sebagian besar oleh metana dan sejumlah gas lain dalam jumlah kecil seperti etana, propana, butana. Heating value dari minyak dan gas semisal CNG berbeda jauh, dimana heating value dari CNG (*Compressed Natural Gas*) lebih tinggi dibandingkan dengan minyak (*premium*). Hal ini akan memberikan dampak bahwa jika terjadi kecelakaan akibat kesalahan manusia maupun kesalahan alat akan menyebabkan terjadinya ledakan, sehingga penting sekali untuk mengetahui flammability limit dari campuran CNG dengan oksigen. Pada penelitian ini campuran untuk bahan bakar adalah gas hidrogen dan oksidiser berupa gas oksigen digunakan sebagai bahan bakar pada driver untuk inisiasi awal, sedang pada driven digunakan bahan bakar CNG dengan oksidiser oksigen. Campuran bahan bakar tersebut diuji pada pipa uji flammability limit horisontal berpenampang lingkaran dengan panjang total 6000 mm (1000 mm pada bagian driver dan 5000 mm pada bagian driven), diameter dalam pipa 50 mm pada suhu ruangan dan tekanan pada driver 100 kPa. Pada driven tekanannya tetap 100 kPa dan konsentrasi CNG bervariasi serta tekanan total campuran 100 kPa. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa daerah flammability limit CNG-oksigen antara 2 kPa pada lower flammability limit dan 70 kPa pada upper flammability limit. Pada range < 2 kPa dan > 70 kPa CNG tidak terjadi reaksi pembakaran, dan pada range 2-10 dan 50-70 terjadi pembakaran deflagrasi serta 20-40 terjadi detonasi.

Kata kunci: flammability limit, upper flammability limit, lower flammability limit, detonasi, deflagrasi

PENDAHULUAN

Gas alam dibentuk jutaan tahun yang lalu melalui proses dekomposisi dari tumbuhan dan binatang. Telah ditemukan lebih dari satu mil dibawah permukaan bumi dalam bentuk batuan keropos, gas alam disusun sebagian besar oleh metana dan sejumlah gas lain dalam jumlah kecil seperti etana, propane, butane. Kita ketahui bahwa heating value dari premium dan gas semisal CNG berbeda jauh, dimana heating value dari CNG (*Compressed Natural Gas*) lebih tinggi dibandingkan dengan minyak (*premium*). Hal ini akan memberikan dampak bahwa jika terjadi kecelakaan akibat kesalahan manusia maupun kesalahan alat akan menyebabkan terjadinya ledakan. Oleh sebab itu, penggunaan alat pengaman di tabung gas mutlak diperlukan agar dapat menghentikan atau menggagalkan ledakan yang mungkin terjadi.

Flammability limit adalah batas reaksi pembakaran dari suatu campuran bahan bakar dengan Oksidiser. Fenomena yang terjadi pada proses flammability limit sangat penting diamati karena melibatkan banyak hal dalam mekanisme pembakaran bahan bakar gas. Pada penelitian ini pengamatan dititikberatkan pada perubahan kecepatan api laminar (*laminar burning velocity*) menjadi kecepatan api

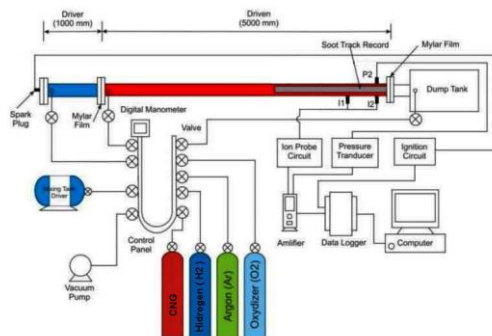
turbulen (*turbulent flame*) yang diakibatkan oleh pengaruh equivalence ratio, konsentrasi dan tekanan awal campuran bahan bakar gas CNG-udara dan Argon sebagai diluent. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menginvestigasi pola dan karakteristik Flammability limit dari gas CNG, seperti Liao et al. (2003) meneliti juga pengaruh dari equivalence ratio pada kecepatan laminar pembakaran. Pada penelitian tersebut digunakan campuran natural gas-udara dengan equivalence ratio dari 0.6 hingga 1.4. dari penelitian ini didapatkan bahwa semakin equivalence ratio mendekati satu maka kecepatannya semakin tinggi. Berdasarkan penelitian tersebut campuran natural gas-Udara mencapai kecepatan 39.1 cm/s untuk equivalence ratio sama dengan satu. Liao S.Y. et al. (2005) melakukan eksperimen flammability limit natural gas dengan Udara, Lower Flammability Limit (LFL) didapat 5% dan Upper Flammability Limit (UFL) adalah 15,6% . Liao S.Y. et al. (2005) melakukan eksperimen dengan menggunakan variasi campuran natural gas dengan oksidiser udara, dengan meneliti efek kenaikan tekanan dan temperatur mempengaruhi peningkatkan daerah flammability limit, dan ternyata daerah flammabilitynya lebih besar dari pada gas Propana (C_3H_8). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh

perubahan konsentrasi dari campuran CNG – oksigen, equivalence ratio terhadap flammability limit pada campuran bahan bakar CNG – oksigen serta batas dari flammability limit campuran gas CNG-oksigen.

METODOLOGI

Eksperimen ini menggunakan alat Pipa Uji Detonasi (PUD) dengan panjang total 6 meter dan diameter dalam 50 mm dibagi dalam 2 bagian, bagian pertama disebut *driver tube* dan bagian kedua disebut *test tube*. *Driver tube* berfungsi untuk memberikan energi inisiasi yang besar ke dalam *test tube*. *Detonation wave* akan merambat dari *driver tube* ke arah *dump tank*. (Gambar 1).

Satu sensor tekanan yang dipasang di sepanjang *test tube* dimana sensor tekanan dipasang di daerah *downstream* (P_2) dari model. Untuk mendeteksi proses pembakaran pada suatu posisi, dua buah sensor ionisasi juga dipasang pada *test tube* yang posisinya berlawanan dengan posisi sensor tekanan. Dengan menggunakan sensor-sensor diatas, kecepatan dari *detonation wave* akan dapat dihitung.



Gambar 1. Instalasi Alat Uji

Sensor tekanan dan sensor ionisasi tersebut dihubungkan dengan *amplifier* dan *digital data recorder* untuk memperoleh data yang dapat diolah dan divisualisasikan di komputer. Busi (*spark plug*) dan unit coil dari kendaraan bermotor digunakan sebagai sumber energi untuk mengawali proses pembakaran dalam *driver tube*. Medan aliran dari proses pembakaran di daerah *downstream* dari model direkam dengan teknik *soot track record* untuk mendapatkan gambaran sel detonasi di sekitar model, sehingga mekanisme dari *flammability limit* dapat dipahami. Gas uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas CNG, Oksigen dan Argon dengan *equivalence ratio* yang bervariasi dan

campuran bahan bakar tersebut disimpan selama minimal 12 jam sebelum digunakan untuk eksperimen guna menjamin homogenitas yang baik.

Proses pengisian (*filling*) campuran bahan bakar gas (*premixed gas*) ke dalam *detonation tube* dikontrol dengan *high-precision digital pressure gage* (Festo) sehingga didapatkan keakuratan tekanan awal (*initial pressure*) campuran bahan bakar gas di dalam *detonation tube*. Tekanan awal campuran bahan bakar di dalam *detonation tube* tetap yaitu 100 kPa, tekanan pada *driven tube* tetap 100 kPa dan di *driven tube* divariasikan persentase volume dari CNG, Oksigen dan Argon yang mengacu kondisi yang umum digunakan pada sistem saluran bahan bakar roket cair. Sedangkan temperatur dimana eksperimen ini dilaksanakan berada pada temperatur ruangan yaitu sekititar 27 – 32 °C.

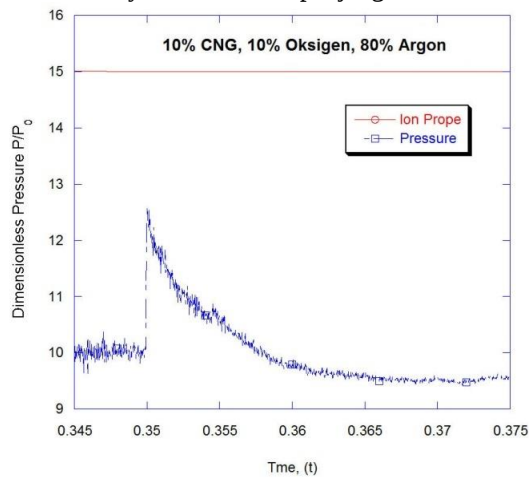
Tekanan awal campuran bahan bakar di dalam *detonation tube* tetap yaitu 100 kPa, tekanan pada *driven tube* tetap 100 kPa dan di *driven tube* divariasikan persentase volume dari CNG, Oksigen dan Argon yang mengacu kondisi yang umum digunakan pada sistem saluran bahan bakar roket cair. Sedangkan temperatur dimana eksperimen ini dilaksanakan berada pada temperatur ruangan yaitu sekititar 27 – 32 °C. Secara detail, bahan bakar dan kondisi eksperimen ditampilkan pada Tabel 1. Dari tahapan Tabel 1 diharapkan parameter-parameter yang mempengaruhi mekanisme *flammability limit* pada campuran bahan bakar CNG, Oksigen, Argon dalam pipa dapat diketahui.

Tabel 1 Experimental Condition

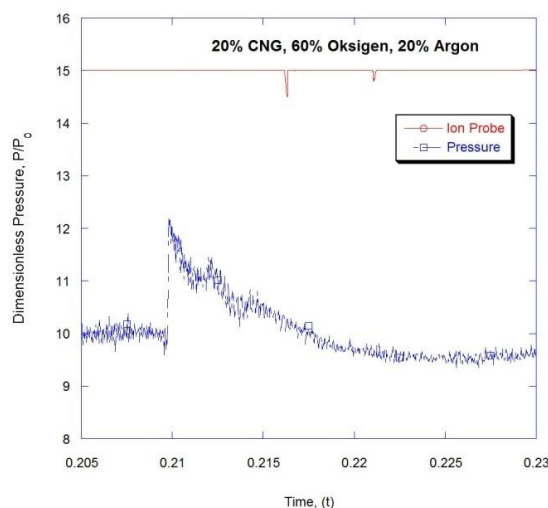
Parameter	Driver	Driven
Fuel	Hidrogen	CNG (% Vol)
Oxidizer	Oksigen	Oksigen (% Vol)
Equivalence ratio	1 (Stoichiometry)	Variasi
Initial Pressure (kPa)	100	100
Temperature	Suhu ruangan	Suhu ruangan
Diluent	-	Argon (% Vol)
mixing	Premixed	Direct Mixing

HASIL DAN PEMBAHASAN

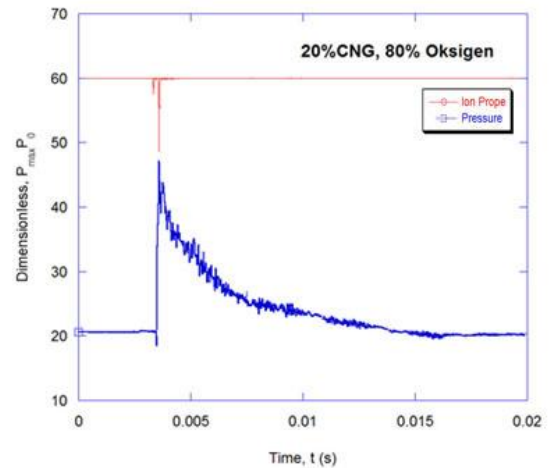
Gambar 2a, 2b dan 2c menunjukkan rekaman tekanan shock wave dan reaction front disepanjang bagian driven. Gambar 2a menunjukkan terjadinya kondisi tanpa reaksi pembakaran dimana sensor ion probe tidak menunjukkan adanya pergerakan sensornya, kondisi ini akan bisa berubah apabila ignition energy lebih besar lagi jika mencapai titik auto ignition pada bahan bakar CNG. Gambar 2b menunjukkan adanya deflagrasi yang menunjukkan shock wave berada di depan reaction front yang diukur melalui ion probe. Kondisi pada gambar 2b kemungkinan bisa terjadi detonasi apabila tabung pipa uji flammability limit semakin panjang.



(a)



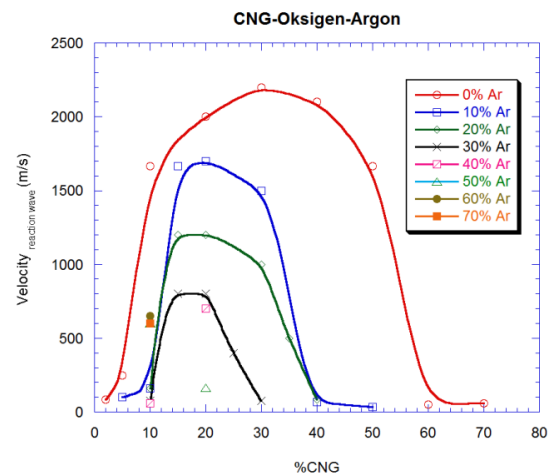
(b)



(c)

Gambar 2. Profil tekanan pada (a) tidak terjadi pembakaran pada konsentrasi 10% CNG, 10 % oksigen, 80% Argon (b) deflagrasi pada konsentrasi 20% CNG, 60 % oksigen, 20% Argon (c) detonasi pada konsentrasi 20% CNG, 80 % oksigen

Gambar 2c menunjukkan adanya detonasi yang menunjukkan shock wave dan reaction front berimpit.



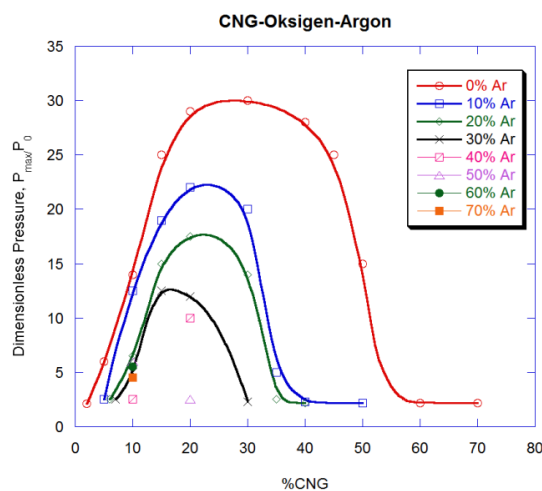
Gambar 3. Grafik pengaruh variasi CNG dan variasi Argon dengan oksidiser Udara terhadap perubahan kecepatan gelombang reaksi.

Dari Gambar 3. terlihat bahwa grafik pada garis 0% Ar menunjukkan garis yang mengalami kenaikan kecepatan dari kondisi deflagrasi kemudian berubah menjadi detonasi dan selanjutnya kecepatannya turun menjadi deflagrasi. dalam kondisi ini Argon berperan sebagai gas diluent dimana semakin banyak

Argon ditambahkan maka besar kecepatannya berkurang demikian juga lebar mampu bakarnya juga menyempit hal ini disebabkan Gas Argon mengurangi konsentrasi dari Gas CNG dalam ruang uji.

Dari Gambar 4. terlihat bahwa grafik pada garis 0% Ar menunjukkan garis yang mengalami kenaikan tekanan dari kondisi deflagrasi kemudian berubah menjadi detonasi dan selanjutnya tekanan turun menjadi deflagrasi. dalam kondisi ini Argon berperan sebagai gas diluent dimana semakin banyak Argon ditambahkan maka besar tekanan berkurang hal ini disebabkan Gas Argon mengurangi konsentrasi dari Gas CNG dalam ruang uji.

Dalam Gambar 3 dan Gambar 4 merupakan fenomena ini menunjukkan bahwa semakin banyak tambahan gas diluent Argon maka lebar *flammability limit* semakin kecil atau terjadi penyempitan batas pembakaran. Pada campuran ini menggunakan oksidiser murni Oksigen di mana sifat Oksigen adalah mudah bereaksi dengan bahan bakar CNG berbeda apabila ditambahkan gas Argon yang mana akan mengurangi sifat reaktif dari campuran bahan bakar CNG dan oksigen.

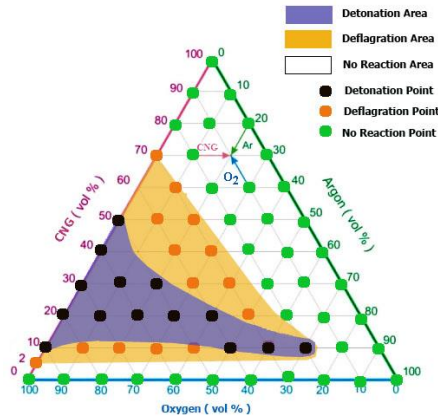


Gambar 4. Grafik pengaruh variasi CNG dan variasi Argon dengan oksidiser Udara terhadap perubahan tekanan.

Pada pembakaran hidrokarbon, api akan merambat lebih cepat ketika konsentrasi bahan bakar pada kondisi stoikiometris atau keadaan sedikit campuran kaya bahan bakar (*rich mixture*) sampai pada batas *Upper Flammability Limit* (UFL) akan *terquencing* begitu pula sebaliknya, jika campuran miskin bahan bakar maka api akan melambat sampai

pada *Lower Flammability Limit* (LFL) dan kemudian tidak dapat merambat dan *terquencing*. Pada keadaan campuran sangat kaya (*rich*) atau sangat miskin (*lean*), api tidak akan merambat karena terlalu sedikitnya bahan bakar atau oksidiser untuk mempertahankan gelombang deflagrasi yang konstan.

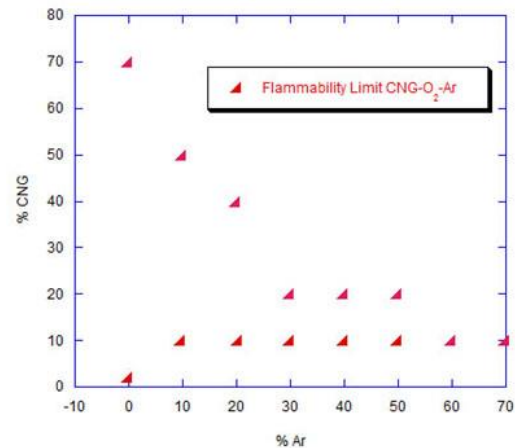
Detonasi, merupakan *premixed flame* dimana kecepatan rambat *reaction zone* atau api yang terjadi adalah kecepatan *supersonic*. Api bermula dari sumber panas dan merambat dengan lapisan tipis. Api akan terus merambat dengan kecepatan laminar atau deflagrasi. Di dalam *reaction zone* radikal-radikal aktif akan terbentuk dan akan terdifusi memanaskan campuran bahan bakar yang belum terbakar. Jika perambatan api ini dilakukan pada tabung dengan ujung terbuka maka api akan terus merambat dengan kecepatan konstan dan tidak akan dipercepat menjadi detonasi. Namun jika pembakaran dilakukan pada tabung dengan ujung tertutup maka gas panas yang bereaksi akan seperti piston yang mendorong api ke gas yang belum terbakar. Api seperti ini akan dipercepat dan berubah menjadi detonasi. Perubahan keadaan dari deflagrasi menjadi detonasi bermula dari rusaknya bentuk halus dari api laminar dan menjadi bergelombang. Bentuk seperti ini akan mengakibatkan lebih besarnya permukaan efektif dari api, dan kecepatan api akan dipercepat terhadap campuran yang belum terbakar. Radikal-radikal hasil pembakaran yang rendah yang akan bergerak lebih cepat dari *reaction zone* secara perlahan akan memanaskan gas didepan api. Gas yang terus menerus dipanaskan suatu saat akan mencapai titik *autoignition* temperaturnya dan ketika keadaan itu tercapai akan terjadi *local explosions*. Gelombang yang bergerak lebih cepat dari api merupakan gelombang detonasi disebut gelombang retonasi. Pada saat perambatan api sudah mencapai detonasi, kecepatan api meningkat menjadi sekitar 1000 kali dari kecepatannya ketika masih bergerak dalam keadaan laminar. Kecepatan detonasi ini lebih besar untuk campuran *fuel-oxygen mixture* dibandingkan *fuel-air mixture* karena adanya gas *inert* didalam Udara. Sedangkan untuk tekanan, pada saat detonasi sudah terbentuk tekanan yang terjadi adalah 25 sampai 35 kali lebih besar dari tekanan awal campuran.



Gambar 5. Pemetaan *flammability limit* pada segitiga api untuk campuran CNG-Oksigen-Argon.

Luasan detonasi diperoleh dengan menghubungkan titik titik hitam sehingga diperoleh luasan detonasi, luasan deflagrasi diperoleh dengan menghubungkan titik titik jingga sehingga diperoleh luasan deflagrasi. Titik yang berada di daerah kuning berarti titik tersebut mengandung konsentrasi campuran gas yang berada pada kondisi deflagrasi, sedangkan titik yang berada pada daerah putih berarti titik tersebut mengandung konsentrasi campuran gas yang berada dalam kondisi tanpa reaksi.

Di sini muncul daerah warna warna Ungu dikarenakan bahwa pada campuran ini menggunakan Oksigen murni sehingga reaksinya menjadi sangat reaktif sehingga daerah yang berada pada stokiometri dan sekitarnya terjadi detonasi dimana kondisi ini mempunyai tekanan *shock wave* dan kecepatan *reaction wave* yang besar. Untuk oksidiser murni Oksigen tanpa tambahan Argon merupakan campuran yang sangat reaktif sehingga berakibat timbul *shock wave* dan *reaction wave* sehingga tekanannya dan kecepatannya besar. Apabila Argon kita tambahkan maka sifat reaktifnya akan menurun diakibatkan kadar Oksigennya akan berkurang sehingga luas daerah deflagrasi dan detonasi juga menjadi menurun.



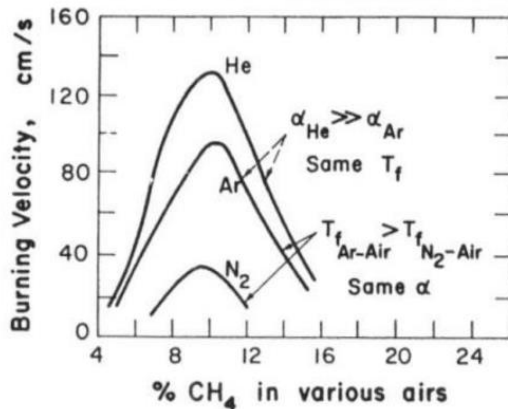
Gambar 6. Batas *flammability limit* campuran CNG - Oksigen dan gas Argon

Pada campuran CNG-Oksigen-Argon maka semakin kadar Argon bertambah maka *upper flammability limit* semakin menyempit mulai dari penambahan 10% Argon sampai 70% Argon, selanjutnya pada 80% Argon tidak terjadi pembakaran. Dari keterangan diatas bisa kita katakan bahwa gas Argon yang merupakan gas mulia merupakan gas diluents yang baik untuk menurunkan *flammability limit* dari gas CNG khususnya dan bahan bakar gas pada umumnya. Hal inilah yang membuat mengapa grafik untuk oksidiser Udara lebih sempit dibanding dengan yang menggunakan Oksigen murni sehingga fenomena penyempitan *flammability limit*, munculnya detonasi, tekanan *sock wave* tinggi dan kecepatan *reaction wave* adalah dikarenakan dalam oksidiser kadar Oksigennya berbeda sehingga pengujian ini menggunakan Argon sebagai usaha untuk menurunkan sifat reaktif campuran yang menggunakan bahan bakar hidrokarbon seperti CNG.

Pengaruh difusivitas termal terhadap kecepatan perambatan api dapat dilihat dari pene litian oleh Clingman et al. (diambil dari Kuan-yun Kuo, 1986), grafik berikut merupakan hasil dari penelitian tersebut.

Dari Gambar 7 tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan perambatan api campuran argon (Ar)-udara lebih rendah dibandingkan campuran helium (He)-udara. Hal ini disebabkan oleh lebih besarnya nilai difusivitas termal dari helium dibandingkan argon karena berat molekul helium lebih ringan. Pada perbandingan nitrogen (N_2) dengan argon, argon memiliki kecepatan perambatan yang lebih besar dibandingkan nitrogen. Hal ini

terjadi karena argon merupakan gas monoatomik yang memiliki kalor jenis yang lebih rendah dibandingkan gas diatomik, sehingga menyebabkan suhu api yang dihasilkan oleh argon lebih besar pula daripada nitrogen.



Gambar 7. Pengaruh difusivitas termal terhadap kecepatan perambatan api

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dengan menggunakan sensor tekanan, sensor ionisasi dan soot track record, maka pengaruh perubahan konsentrasi dari campuran CNG- udara terhadap flammability limit sehingga diperoleh karakteristik dan pola perambatan api di dalam pipa diklasifikasikan menjadi 3, yaitu:

- Tanpa reaksi, kondisi tidak terjadi reaksi pembakaran dalam bagian driven dengan ditandai tidak terjadinya perambatan reaction wave.
- Deflagrasi, kondisi terjadi proses pembakaran pada bagian driven dimana perambatan shock wave diikuti dengan perambatan reaction wave pada jarak yang relatif jauh.
- Detonasi, kondisi yang menunjukkan shock wave dan reaction wave berimpit, pada kondisi ini tekanan yang ditimbulkan sangat besar antara 25 -35 kali tekanan awal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ciccarelli Ginsberg T, Boccio JL**, 1997, The Influence of Initial Temperature on the Detonability Characteristics of Hydrogen-Air-Steam Mixture, *Combustion Science and Technology*; 128:181-196
- Stamps D.W. and S.R. Tieszen**, 1991, The Influence of Initial Pressure and Temperature on Hydrogen-air-diluent

Detonations, *Combust Flame*, 83(3):353-364

Schultz E., E. Wintenberger, J. Sphered, Investigation of Deflagration to Detonation Transition for Application to Pulse Detonation Engine Ignition System, California Institute of Technology Pasadena, CA 91125 USA

Gary L. Borman, Kenneth W. Ragland, 1998, *Combustion Engineering*, McGraw-Hill Book Co-Singapore

Guirao CM, Knystautas R, Lee JH, Benedick W, Berman M, 1982, Hydrogen-Air Detonations, *Proceeding of the 19th Combustion Institute*, 583-590

Ishak, M.S. 2008. Determination of explosion parameters of LPG-air mixtures in the closed vessel. Universiti Malaysia Pahang

Kenneth Kuan-yun Kuo, 1986, *Principle of Combustion*, John Wiley & Sons, New York

Liao S.Y., D.M. Jiang a, Z.H. Huang, Q. Chengb, J. Gaoa, Y. Hua, 2005, Approximation of Flammability Region for Natural Gas-Air-Diluent mixture, Elsevier

Michael Liberman, 2003, *Flame, Detonation, Explosion-When, Where and How They Occur*, 3rd Int. Disposal Conf, Karlskoga, Sweden

Mishra D.P., Rahman A., 2002, An Experimental Study of Flammability Limits of LPG/Air Mixtures, Elsevier

Qiao L., Y. Gan. Nishiie, W.J.A. Dahm, E.S.Oran, 2007, Extinction of premixed methane/air flames in microgravity by diluents : Effects of radiation and Lewis number, Elsevier.

Sentanuhady .J, 2008, Batas Detonasi dari Campuran Hidrogen-Udara dan Argon, UGM, Indonesia

Stephen R. Turns, 2000, *An Introduction to Combustion*, McGraw-Hill USA.

Yiguang Ju , Sergey Minaev, 2002, Dynamics and Flammability Limit of Stretched Premixed Flames Stabilized By A Hot Wall, Volume 29 / pp. 949-956

Yunus A. Cengel, Michael A. Boles, 1998, *Thermodynamics An Engineering Approach*, McGraw-Hill USA.

Mihalik T.A, Lee J.H.S., 2002, The Flammability Limit of Gaseous Mixtures in Porous Media, Department of Mechanical Engineering McGill, University, Montreal, Kanada