

**PENGARUH PENAMBAHAN N-HEPTANA PADA *HYDROUS* DAN  
*ANHYDROUS ETANOL* TERHADAP KECEPATAN PEMBAKARAN**

***THE EFFECT OF ADDITIONAL N-HEPTANA IN *HYDROUS* AND  
*ANHYDROUS ETHANOL* ON BURNING VELOCITY***

**I Made Suarta<sup>1\*</sup>, I Ketut Widana<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali*

*\*E-mail: suarta@pnb.ac.id*

Diterima 06-10-2017	Diperbaiki 06-11-2017	Disetujui 13-11-2017
---------------------	-----------------------	----------------------

**ABSTRAK**

Dalam penelitian ini diuji kecepatan pembakaran hydrous dan anhydrous ethanol yang ditambah 30% n-heptane. Pengujian dilakukan dalam ruang bakar Cylindrical explosion chamber. Hasil pengujian menunjukkan pada anhydrous ethanol tidak ada perubahan karakteristik campuran bahan bakar. Kecepatan pembakaran campuran anhydrous etanol dengan n-heptane hanya dipengaruhi komposisi campuran. Sedangkan kecepatan pembakaran campuran hydrous etanol dengan n-heptane lebih rendah dari kecepatan pembakaran bahan bakar unsur utamanya. Hal ini disebabkan hilangnya sifat azeotropik hydrous etanol dan oksigenit dalam hydrous ethanol berubah menjadi kadar air yang memiliki kapasitas penyerapan panas tinggi. Pada hydrous ethanol memiliki jumlah molekul etanol lebih sedikit dibandingkan anhydrous ethanol pada komposisi campuran yang sama.

**Kata kunci:**kecepatan pembakaran, hydrous etanol, anhydrous etanol, n-heptane, azeotropik.

**ABSTRACT**

*In this study the burning velocity of hydrous and anhydrous ethanol added 30% n-heptane was tested. The test is performed in Cylindrical explosion combustion chamber. The results showed that in anhydrous ethanol there was no change in the fuel mixture characteristics. The laminar burning velocity of anhydrous ethanol mixture with n-heptane is only influenced by the composition of the mixture. While the burning velocity of hydrous ethanol mixture with n-heptane is lower than the burning velocity of the main fuel. This is due to the loss of azeotropic properties of hydrous ethanol and oxygenite in hydrous ethanol turned into moisture content which has a high heat absorption capacity. In hydrous ethanol it has fewer ethanol molecules than anhydrous ethanol in the same mixture composition.*

**Keywords:***burning velocity, hydrous etanol, anhydrous etanol, n-heptane, azeotropik*

**PENDAHULUAN**

Salah satu cara untuk memperoleh energi dalam jumlah yang besar dalam waktu yang singkat adalah dengan proses pembakaran. Kecepatan pembakaran merupakan parameter terpenting pada proses pembakaran bahan bakar. Kecepatan pembakaran dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti bahan bakar, perbandingan udara dan bahan bakarnya, tekanan dan temperatur awal pembakaran .

*Hydrous Etanol* (etanol dengan 4,0-4,9%v kadar air) secara intensive dikembangkan sebagai bahan bakar karena sifatnya *renewable*, emisi gas buang CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> rendah, meningkatkan tekanan kerja dan

mengurangi biaya roduksi [1,2,3,4]. Sejak tahun 2003 telah dipasarkan *Flex-Fuel vehicles* yang dapat dioperasikan dengan 100% *hydrous ethanol*. Pada kendaraan transportasi etanol dapat digunakan sebagai bahan bakar secara tersendiri, dicampur dengan bensin sebagai oktan *enhancer* dan oksigenit.

N-Heptane adalah salah satu bahan bakar referensi utama. Campuran n-heptane dengan iso-oktane dianggap sebagai komponen utama dari bahan bakar *gasolin*. Oleh karena itu referensi utama bahan bakar adalah campuran n-heptane dengan iso-oktane. Campuran n-heptane dan iso-oktane pada berbagai angka oktan juga telah banyak diteliti. Sayangnya n-heptane maupun iso-oktane

merupakan bahan bakar fosil yang bersifat *unrenewable* energi.

Saat ini masalah cadangan bahan bakar fosil dan isu lingkungan sering dibicarakan, sehingga meningkatkan minat menggunakan bahan bakar alternatif *renewable* yang ramah lingkungan. *Hydrous* dan *anhydrous ethanol* yang merupakan bahan bakar yang dapat diperbaharui dan dengan *oktan number* yang lebih tinggi dari iso-oktane. Sampai saat ini *hydrous ethanol* dianggap sebagai kandidat untuk dijadikan aditif maupun pengganti bahan bakar fosil. Hal ini disebabkan *hydrous ethanol* dapat dengan mudah dicampur dengan hydrocarbon dan dapat diproduksi dengan proses sederhana.

Formulasi bahan bakar pengganti untuk campuran ini jelas memerlukan data *eksperiment* mendasar terhadap kecepatan pembakaran laminarnya. Kecepatan pembakaran laminar yang diukur pada suhu dan tekanan atmosfer cukup baik untuk data hasil pengujian kecepatan pembakaran bahan bakar.

Pengujian kecepatan pembakaran campuran n-heptane dengan ethanol telah dilakukan oleh [5,6]. Pada penelitiannya menunjukkan kecepatan pembakaran etanol lebih tinggi dari n-heptane baik pada campuran miskin, stoikiometri maupun kaya. Kecepatan pembakaran campuran n-heptane dan etanol berada diantara keduanya. [5] menemukan pencampuran etanol dengan n-Heptane menyebabkan kecepatan pembakaran berada diantara kecepatan kedua bahan bakar tersebut. [6] menyatakan penambahan alkohol tidak mempengaruhi dekomposisi bahan bakar hidrokarbon. Penambahan alkohol pada n-Heptane kecil pengaruhnya terhadap perubahan interaksi kimia bahan bakar.

Pengujian campuran etanol dengan n-Heptane digunakan langsung sebagai bahan bakar pada mesin dilakukan oleh [7,8,9,10]. Hasilnya penelitian [7] menunjukkan bahwa etanol memiliki prospek yang lebih baik dalam mesin karena memiliki panas laten penguapan yang lebih tinggi dan memiliki molekul oksigen yang lebih banyak. Hasil penelitian [8] menunjukkan bahwa, ketika sistem menggunakan bahan bakar etanol / n-heptane, penundaan pengapian meningkat sangat tinggi tapi suhu dan tekanan di silinder turun drastis pada *rasio* lebih besar. Tapi dari beberapa penelitian yang telah ada belum ada data mendasar yang mengungkap perilaku pembakaran campuran *hydrous* dan *anhydrous ethanol* dengan n-heptane terutama yang

berhubungan dengan kecepatan pembakaran laminar. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh data baru tentang kecepatan pembakaran laminar dari campuran *anhydrous ethanol* (99,7%v) dan *hydrous ethanol* (95,5%v) dengan n-Heptane pada komposisi bervariasi pada campuran miskin ( $\phi=0,9$ ), stoichiometri ( $\phi=1$ ), kaya ( $\phi=1,1$ ) dan sangat kaya ( $\phi=1,2$ ). Hal ini dimotivasi oleh karakteristik dari bahan bakar *hydrous ethanol* yang lebih baik dari *anhydrous ethanol* pada campuran stoichiometry, kaya dan sangat kaya. Campuran etanol/n-Heptane dapat mengkombinasikan antara bahan bakar *renewable* dengan bahan bakar fosil.

## METODOLOGI

Kecepatan pembakaran *premixed* diamati pada ledakan dalam ruang bakar berbentuk silinder. Model ini telah digunakan pada penelitian saya sebelumnya [11]. Model ini juga telah digunakan dalam [12,13]. *Anhydrous ethanol* dengan kemurnian 99,7%v digunakan sebagai bahan bakar dan *ethanol hydrous* 95,5%v dibuat di Laboratorium kimia analitik. Pengujian dilakukan pada tekanan atmosfer dan suhu ruang 305°K.

Operasionalisasi, udara dan bahan bakar dicampur dalam *mixing chamber* dengan perbandingan sesuai *equivalence ratio* ( $\phi$ ). Reaktan yang telah bercampur *homogen* dimasukkan kedalam ruang bakar untuk diuji kecepatan pembakarannya. *Radius* nyala divisualisasikan dari ujung depan ruang bakar yang terbuat dari transparan glas. Sebelum pemantik dinyalakan camera di dinyalakan terlebih dahulu dengan diseting pada kecepatan 420 *fps*.

## PENGOLAHAN DATA

G. Broustail *et al.* [12], J. Beeckmann, L. Cai, H. Pitsch [13] dan Zunhua Zhang *et al.* [14] meneliti karakteristik pembakaran laminar dari berbagai bahan bakar dalam *spherical combustion bomb* dan dikembangkan teori bola api mengembang. Berdasarkan teori tersebut *the stretched laminar flame propagation Speed* ( $S_n$ ) dapat dihitung dari pengukuran permukaan jari-jari nyala  $r_n$  terhadap waktu  $t$

Kecepatan nyala mulur,  $S_n$ , dapat dihitung mengikuti persamaan 1 yaitu:  $S_n = dr/dt$ . Dimana  $r$  adalah jari-jari permukaan bola api dan  $t$  adalah waktu saat jari-jari api dihitung. Laju mulur ( ) dari bola api didapat disetiap rekaman gambar pada permukaan dari nyala seperti

persamaan 2:  $\frac{d(\ln A)}{dt} = \frac{d(A/A)}{dt} = \frac{dA}{A \cdot dt}$ . Dimana A adalah luas permukaan nyala. Pada kasus pertumbuhan nyala seperti bola, laju mulur nyala dapat dihitung dengan:  $\frac{dA}{A \cdot dt} = \frac{2}{r} \left( \frac{dr}{dt} \right) = \frac{2}{r} S_n$ . Hubungan linier antara kecepatan nyala tidak mulur ( $S_s$ ) dan kecepatan nyala mulur telah dilakukan oleh [14, 15, 16] seperti persamaan 3.  $S_s - S_n = L_b$ . Dari persamaan 3 dapat dilihat bahwa  $S_s$  sama dengan  $S_n$  pada saat  $t = 0$ . Laminar burning velocity ( $S_L$ ) diturunkan dari  $S_s$  seperti persamaan 4:  $S_L = \left( \frac{\rho_b}{\rho_u} \right) S_s$ . Dimana  $\rho_b$  dan  $\rho_u$  adalah densitas gas hasil pembakaran dan densitas reaktan.  $\rho_b$  dihitung pada temperatur nyala adiabatik.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Kecepatan Pembakaran Laminar dari *hydrous* dan *Anhydrous ethanol* dan campurannya dengan n-Heptane telah diukur dari foto nyala api pada berbagai *equivalence ratio* ( $\phi$ ), Nilai panas, Temperatur nyala adiabatik dan densitas bahan bakar tersebut

dipengaruhi oleh penambahan n-Heptane dan kadar air dari bahan bakar.

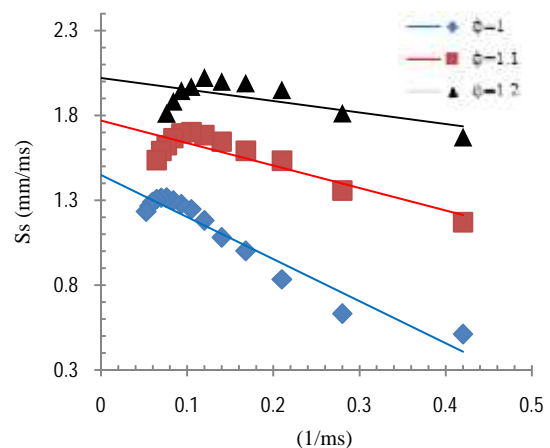
*Low heating value* (LHV) dari *Hydrous ethanol* dihitung berdasarkan kadar air dari ethanol. LHV dari *hydrous ethanol* didapat dengan mengalikan prosen massa dari *hydrous ethanol* dengan LHV dari *anhydrous ethanol* yang nilainya, 26,8 MJ/kg, LHV dari n-Heptane adalah 44,50 MJ/kg [8,9]. Sedangkan LHV dari campuran *hydrous* dan *anhydrous ethanol* dengan n-Heptane didapat dengan merata-ratakan kedua nilai LHV bahan bakar tersebut. Temperatur adiabatik nyala dihitung menggunakan persamaan pada [17].

Setelah campuran bahan bakar dan udara diisikan dalam ruang bakar selanjutnya *sparker (igniter)* dipantikkan ditengah ruang bakar, api selanjutnya menyebar kearah reaktan searah jari-jari ruang bakar. Gambar 1 menunjukkan perkembangan bola api dari *hydrous, anhydrous ethanol* setelah dicampur n-heptane dan n-heptane murni dengan peningkatan diameter setiap 2,381ms.

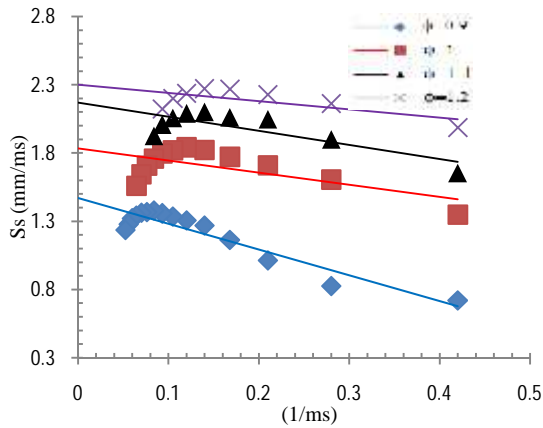


Gambar. 1. Foto model pertumbuhan radius nyala interval waktu 2.381 ms ( $\phi = 1.1$ ,  $T = 305$  K,  $P = 1$  atm) terhadap: a. *Hydrous ethanol*(95,5%v +30%v n-heptane), b. *Anhydrous ethanol* (99,7%v+ 30%v n-heptane, c. n-Heptane

Berdasarkan perkembangan bola api dari gambar 1 kecepatan nyala mulur ( $S_n$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 1. *Unstretched flame speed* ( $S_s$ ) didapat dengan mengekstrapolasi nilai  $S_n$  pada  $\phi = 0$ . Pada gambar 2 ditunjukkan nilai  $S_s$  pembakaran *hydrous ethanol* setelah ditambah 30% v n-Heptane, gambar 3 menunjukkan *anhydrous ethanol* setelah ditambah n-heptane pada campuran kurus, stoikhiometri dan kaya. Setelah ditambah 30% v n-Heptane pada *hydrous ethanol* campuran bahan bakar dengan udara tidak dapat menyala pada campuran miskin.



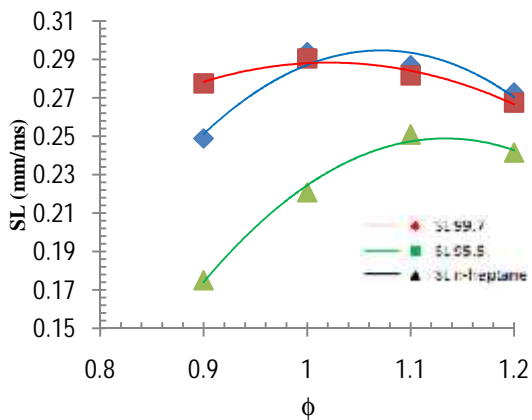
Gambar 2. Kecepatan nyala terhadap peregang *hydrous ethanol* ditambah 30%v n-Heptane



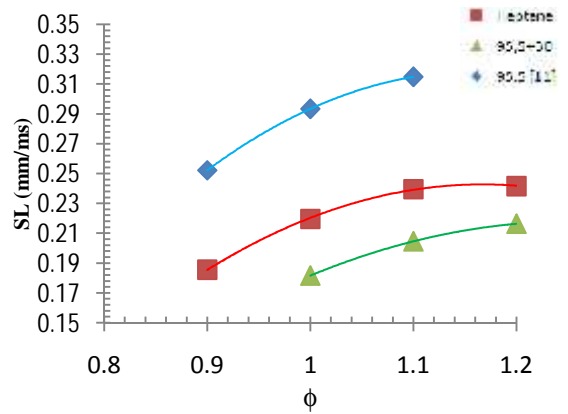
Gambar 3. Kecepatan nyala terhadap peregang anhydrous ethanol ditambah 30% v n-Heptane.

Hasil penelitian [12] kecepatan pembakaran laminar bahan bakar murni untuk *hydrous*, *anhydrous ethanol* dan n-Heptane dapat dilihat pada gambar 4. Sesuai dengan *trend* nilai *Ss*, kecepatan pembakaran *hydrous* dan *anhydrous ethanol* ditambah 30% n-heptane pada masing-masing *equivalence ratio* dapat dilihat pada gambar 5 dan 6. Pada gambar 5 ditunjukkan kecepatan pembakaran laminar *hydrous ethanol* setelah ditambah 30% n-Heptane berada dibawah kecepatan masing-masing bahan bakar murninya. Bahkan penambahan 30% v n-heptane pada campuran kurus reaktan tidak dapat terbakar.

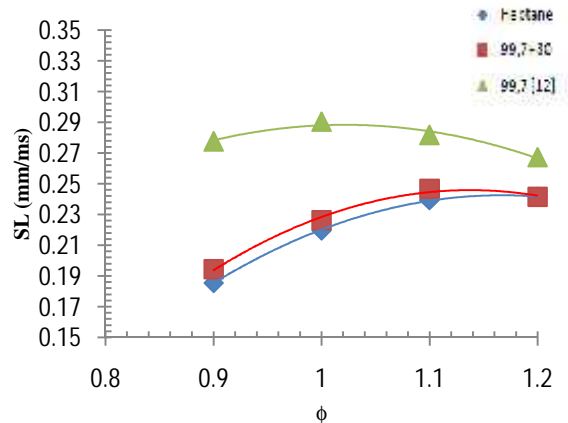
Pada gambar 6, kecepatan pembakaran campuran *anhydrous ethanol* dengan n-Heptane menurun dari kecepatan etanol. Kecepatan pembakaran campuran bahan bakar berada diantara kecepatan kedua jenis bahan bakar tersebut. Kecepatan pembakaran menurun sebanding dengan peningkatan volume dari n-Heptane.



Gambar 4. Kecepatan pembakaran laminar bahan bakar *hydrous*, *anhydrous ethanol* dan n-Heptane

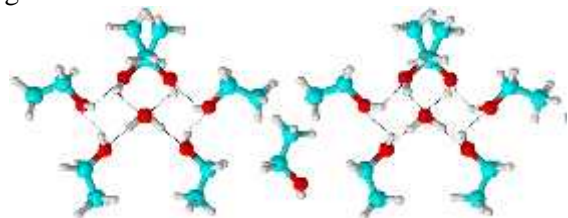


Gambar 5. Kecepatan pembakaran laminar *hydrous ethanol* ditambah 30% n-Heptane



Gambar 6. Kecepatan pembakaran laminar *anhydrous ethanol* ditambah 30% n-Heptane

Kecepatan pembakaran bahan bakar sangat dipengaruhi oleh nilai kalor, panjang rantai dan struktur molekul bahan bakar. Rantai karbon lebih pendek pada bahan bakar sejenis akan meningkatkan kecepatan pembakaran [18]. Pada penelitian sebelumnya [11] kecepatan pembakaran maksimum *hydrous ethanol* terjadi pada komposisi 95,5%v dengan struktur molekul seperti gambar 7.

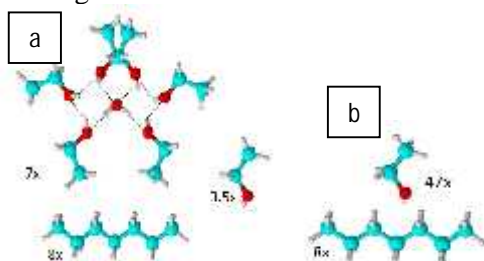


Gambar 7. Struktur molekul bahan bakar etanol 95,5%v.

Kecepatan pembakaran laminar *hydrous ethanol* menurun tajam dengan penambahan n-heptane. Hal ini disebabkan terjadi perubahan komposisi molekul bahan bakar. Walaupun kehadiran molekul n-heptane

dalam bahan bakar *hydrous ethanol* 95,5%v menaikkan nilai kalor tetapi molekul n-heptane mengganggu sifat azeotropik *hydrous ethanol* dalam larutan bahan bakar.

Sebagai ilustrasi jika *hydrous ethanol* 95,5%v ditambah 30%v n-heptane maka dalam larutan bahan bakar yang memiliki 8 molekul n-heptane terdapat 7 molekul etanol 95,5%v. Molekul etanol komposisi 95,5 terdiri dari 1 *cluster* (6 molekul etanol mengelilingi 1 molekul air) dan 0,5 etanol bebas maka komposisi campuran 70%v etanol 95,5%v dengan 30%v n-heptane terdiri dari 45,5 molekul etanol, tujuh molekul air dan 8 molekul n-heptane. Komposisi ini dapat digambarkan pada gambar 8a. Jika *anhydrous ethanol* ditambahkan 30%v n-heptane maka dalam 47 molekul etanol akan terdapat 8 molekul n-heptane. Komposisi ini ditunjukkan dalam gambar 8b.



Gambar 8 Struktur molekul etanol ditambah 30%v n-heptane. a. *hydrous ethanol* b. *anhydrous ethanol*

Kecepatan pembakaran *anhydrous ethanol* menurun dengan penambahan n-heptane. Kecepatan pembakaran campuran menurun sebanding dengan penambahan komposisi n-heptane. Kecepatan pembakaran berada diantara kecepatan pembakaran *anhydrous ethanol* dan n-heptane. Hal ini disebabkan rantai *anhydrous ethanol* yang memiliki ikatan hidrogen menjadi rantai panjang yang memiliki struktur hampir sama dengan rantai ikatan n-heptane. Jadi kecepatan pembakarannya hanya dipengaruhi oleh kecepatan pembakaran masing-masing bahan bakar. Penelitian [6] menyatakan penambahan alkohol tidak mempengaruhi dekomposisi efek kimia dari bahan bakar hidrokarbon.

Penambahan n-heptane pada *hydrous ethanol* 95,5%v menyebabkan penurunan kecepatan yang sangat tajam dibandingkan dengan penambahan pada *anhydrous ethanol*. Hal ini disebabkan oleh: 1. Sifat azeotropik dengan oksigenit terpusat sangat terganggu dengan kehadiran dari n-heptane. Oksigenit dalam azeotropik etanol berubah menjadi

kadar air bahan bakar karena sifat dari n-heptane lebih mendominasi. 2. Adanya perbedaan jumlah molekul etanol dalam komposisi campuran yang sama. Pada *hydrous ethanol* jumlah molekul etanol lebih sedikit dari jumlah molekul etanol dalam *anhydrous ethanol* pada komposisi campuran yang sama dengan n-heptane. Hal ini dapat dilihat dari gambar 8(a,b). Struktur molekul etanol yang ditambahkan 30%v n-heptane. Pada *hydrous ethanol* 95,5%v terdapat 45,5 molekul etanol yang memiliki nilai kalor. Sedangkan pada *anhydrous*, terdapat 47 molekul etanol setiap 8 molekul n-heptane. 3. Dalam *hydrous ethanol* terdapat 7 molekul air tidak memiliki nilai kalor dan memiliki kapasitas penyerapan panas tinggi.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian kecepatan pembakaran campuran *hydrous* dan *anhydrous ethanol* dengan n-heptane didapat kesimpulan sebagai berikut:

-Setelah ditambah 30%v n-heptane pada *hydrous ethanol* kecepatan pembakarannya menurun. Kecepatan pembakarannya berada dibawah kecepatan pembakaran bahan bakar unsur utamanya.

-Penurunan kecepatan pembakaran *hydrous ethanol* setelah ditambah 30%v diakibatkan hilangnya sifat azeotropik dan adanya oksigenit dalam bahan bakar berubah menjadi kadar air bahan bakar.

-Pada campuran 30%v n-heptane setiap 8 molekul n-heptane terdapat 45,5 molekul etanol dan 7 molekul air pada *hydrous*, sedangkan pada *anhydrous* ada 47 molekul etanol.

## SARAN

Ekplorasi terhadap bahan bakar baru dan terbaharukan harus terus dilakukan untuk menambah sumber-sumber energi untuk menjawab tantangan terhadap kelangkaan energi fosil.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih saya ucapkan kepada pimpinan Politeknik Negeri Bali atas bantuan dananya sehingga saya dapat mengikuti seminar nasional di SNITT POLTEKBA.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Samveg Saxena, Silvan Schneider, Salvador Aceves, Robert Dibble. "Wet

- ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels". *Applied Energy* 98 (2012) 448–457.
- [2] Tadeu C. Cordeiro de Melo, Guilherme B. Machado, Carlos R.P. Belchior, Marcelo J. Colaço, José E.M. Barros, Edimilson J. de Oliveira, Daniel G. de Oliveira. "Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine". *Fuel* 97 (2012) 796–804.
- [3] I. Schifter, L. Diaz, J.P. Gómez, U. Gonzalez. "Combustion characterization in a single cylinder engine with mid-levels hydrated ethanol-gasoline blended fuel"s. *Fuel* 103 (2013) 292–298.
- [4] Rodrigo C. Costa, José R. Sodr . "Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: Engine performance and emissions". *Fuel* 89 (2010) 287–293
- [5] J.P.J. van Lipzig, E.J.K. Nilsson, L.P.H. de Goey, A.A. Konnov. "Laminar burning velocities of n-heptane, iso-octane, ethanol and their binary and tertiary mixtures". *Fuel* 90 (2011) 2773–2781
- [6] Hanjun Xu, Chunde Yao, Guanglan Xu, Zhandong Wang, Hanfeng Jin. "Experimental and modelling studies of the effects of methanol and ethanol addition on the laminar premixed low-pressure n-heptane/toluene flames". *Combustion and Flame* 160 (2013) 1333–1344
- [7] Yong Qian, Linqi Ouyang, Xiaole Wang, Lifeng Zhu, Xingcai Lu. "Experimental studies on combustion and emissions of RCCI fueled with n-heptane/alcohols fuels". *Fuel* 162 (2015) 239–250
- [8] Yong Qian, Xiaole Wang, Lifeng Zhu, Xingcai Lu. "Experimental studies on combustion and emissions of RCCI (reactivity controlled compression ignition) with gasoline/n-heptane and ethanol/n-heptane as fuels". *Energy* 88 (2015) 584-594
- [9] P. Saisirirat, C. Togbe, S. Chanchaona, F. Foucher, C. Mounaim-Rousselle, P. Dagaut. "Auto-ignition and combustion characteristics in HCCI and JSR using 1-butanol/n-heptane and ethanol/n-heptane blends". *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2011) 3007–3014
- [10] David Vuilleumier, Darko Kozarac, Marco Mehl, Samveg Saxena, William J. Pitz, Robert W. Dibble, Jyh-Yuan Chen, S. Mani Sarathy. "Intermediate temperature heat release in an HCCI engine fueled by ethanol/n-heptane mixtures: An experimental and modeling study". *Combustion and Flame* 161 (2014) 680–695
- [11] I Made Suarta, I. N. G. Wardana, N. Hamidi, W. Wijayanti. "The role of molecule clustering by hydrogen bond in hydrous ethanol on laminar burning velocity." *Journal of Combustion, Hindawi*. Volume 2016(2016) article ID 5127682.
- [12] IMade Suarta, I. N. G. Wardana, Nurkholis Hamidi, Widya Wijayanti. "The Role of Hydrogen Bonding on Laminar Burning Velocity of Hydrous and Anhydrous Ethanol Fuel with Small Addition of n-Heptane". *Journal of Combustion, Hindawi*. Volume 2016, Article ID 9093428, 8 pages
- [13] G. Broustail, P. Seers, F. Halter, G. Mor ac, C. Mounaim-Rousselle. "Experimental determination of laminar burning velocity for butanol and ethanol iso-octane blends". *Fuel* 90 (2011) 1–6
- [14] J. Beeckmann, L. Cai, H. Pitsch. "Experimental investigation of the laminar burning velocities of methanol, ethanol, n-propanol, and n-butanol at high pressure". *Fuel* 117 (2014) 340–350
- [15] Zunhua Zhang, Gesheng Li, Lin Ouyang, Zhixiang Pan, Fubing You, Xiaohong Gao. "Experimental determination of laminar burning velocities and Markstein lengths for 75% hydrous-ethanol, hydrogen and air gaseous mixtures". *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011) 13194-13206
- [16] R.J. Johnston, J.T. Farrell. "Laminar burning velocities and Markstein lengths of aromatics at elevated temperature and

- pressure”. Proceedings of the Combustion Institute 30 (2005) 217–224
- [17] Xiao Qin, Yiguang Ju. “Measurements of burning velocities of dimethyl ether and air premixed flames at elevated pressures”. Proceedings of the Combustion Institute 30 (2005) 233–240
- [18] J. M. Smith, H. C. Van Ness, and M. M. Abbott, “Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics”, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2001.
- [19] E. Ranzi, A. Frassoldati, R. Grana, A. Cuoci, T. Faravelli, A.P. Kelley, C.K. Law. “Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels”, Progress in Energy and Combustion Science 38 (2012) 468-501