



**PERAN INTERAKSI MOLEKULAR TERHADAP SIFAT AZEOTROP  
DAN PERILAKU PEMBAKARAN DROPLET CAMPURAN ETANOL  
ISO-OKTAN**

**DISERTASI**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN  
MINAT KONVERSI ENERGI**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Doktor Teknik**



**BUDI WALUYO  
NIM. 157060200111011**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
M A L A N G  
2018**



DISERTASI

**PERAN INTERAKSI MOLEKULAR TERHADAP SIFAT AZEOTROP  
DAN PERILAKU PEMBAKARAN DROPLET CAMPURAN ETANOL  
ISO-OKTAN****BUDI WALUYO****NIM. 157060200111011**

Telah dipertahankan didepan komisi pengujian  
pada tanggal 22 Nopember 2018  
dinyatakan telah memenuhi syarat  
untuk memperoleh gelar Doktor Teknik

**Komisi Pembimbing**

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping 1

Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D  
NIP. 19590703 198303 1 002

Dr. Eng. Lilis Yulianti, S.T., M.T.  
NIP. 19750702 200003 2 001

Pembimbing Pendamping 2

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, S.T., M.T.  
NIP. 19740930 200012 1 001

Malang, Nopember 2018

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin  
Ketua Program Doktor Teknik Mesin

Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D  
NIP. 19590703 198303 1 002

**IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI**

**JUDUL DISERTASI** : PERAN INTERAKSI MOLEKULAR TERHADAP  
SIFAT AZEOTROP DAN PERILAKU  
PEMBAKARAN DROPLET CAMPURAN  
ETANOL ISO-OKTAN

Nama Mahasiswa : Budi Waluyo

NIM : 157060200111011

Program Studi : Program Doktor Teknik Mesin (PDTM)

Minat : Konversi Energi

**KOMISI PEMBIMBING** :

Pembimbing Utama : Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D

Pembimbing Pendamping 1 : Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T.

Pembimbing Pendamping 2 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, S.T., M.T.

**TIM DOSEN PENGUJI** :

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng.

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.

Dosen Penguji 3 :

Tanggal Ujian : 22 Nopember 20018

SK Penguji :



## PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah disertasi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Disertasi ini dibatalkan serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Nopember 2018

Mahasiswa,

Materai

Budi Waluyo

NIM. 157060200111011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada:

1. Kemenristekdikti atas beasiswa studi S3 melalui BPP-DN dan hibah Penelitian Disertasi Doktor (PDD);
2. Rektor Universitas Muhammadiyah Magelang yang menugaskan studi dan memberikan dukungan pembiayaan;
3. Ayah dan Ibunda, atas restu dan doanya;
4. Istrinda dan anak anak tercinta atas motivasi, support dan dukunganya;
5. Para editor dan para reviewer jurnal yang telah membantu dalam penerbitan artikel;
6. Rekan dosen Program Studi Mesin Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang yang telah memberikan dukungan selama studi;
7. Keluarga besar Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Magelang; dan
8. Para pihak yang juga telah membantu penyelesaian studi ini.

Malang, Desember 2018

Penulis

**RIWAYAT HIDUP**

Budi Waluyo, Temanggung, 27 Mei 1977, putra ke-empat dari pasangan Kabul dan Suzaenab. Menempuh pendidikan SD (MI Ma'arif I Gesing Kandangan Temanggung) lulus 1989, SMP (SMP N 1 Kandangan Temanggung) lulus 1992 dan SMA (SMA N 1 Temanggung) lulus tahun 1995. Tahun 1995, melanjutkan S1 Teknik Mesin Universitas Diponegoro Semarang lulus tahun 2001. Pada tahun 2011 melanjutkan ke Magister Teknik Mesin Universitas Diponegoro lulus tahun 2013. Bekerja sebagai dosen di Program Studi Mesin Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang dari tahun 2006 sampai sekarang.

Malang, Desember 2018

Penulis

## RINGKASAN

**Budi Waluyo**, Program Doktor Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Nopember 2018, Peran interaksi molekular terhadap sifat azeotrop dan perilaku pembakaran droplet campuran etanol iso-oktan, Dosen Pembimbing: ING Wardana, Lilis Yuliati, Mega Nur Sasongko.

Pemahaman makroskopis terhadap sebuah fenomena sering terbentur pada variable-variable yang tidak/belum terdefinisi namun memiliki peran yang besar didalam fenomena tersebut. Penelitian ini mencoba melihat fenomena campuran etanol polar dan iso-oktan non-polar sebagai representasi dari gasolin secara mikroskopis. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki pemahaman ilmiah konsep campuran khususnya campuran iso-oktan non-polar dan etanol polar pada kondisi (*near*) azeotropnya. Penjelasan ilmiah yang memadai terkait pola interaksi molekular campuran iso-oktan non-polar sebagai zat tunggal yang merepresentasikan gasolin dengan etanol polar yang mewakili alkohol, akan menjembatani pemahaman yang lebih rumit penyimpangan tekanan uap alkohol dan gasolin yang multi-substance.

Penelitian ini dilakukan melalui dua tahapan penelitian. Tahapan penelitian yang pertama adalah mengidentifikasi perubahan temperatur pendidihan dan laju penguapan berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan dengan menggunakan alat destilasi sederhana. Sebuah labu pemanas digantungkan pada sebuah load cell untuk merekam pengurangan masa campuran bahan bakar yang di panaskan, sementara sebuah thermokopel tipe K yang dicelupkan pada campuran etanol iso-oktan yang dipanaskan digunakan untuk merekam perubahan temperatur selama proses pemanasan berlangsung. Tahapan penelitian yang kedua adalah dengan pengujian pembakaran single droplet berbagai campuran etanol iso-oktan. Sebuah droplet dari masing masing fraksi campuran dibakar pada sebuah ujung sensor thermokopel ukuran 0.1 mm. Evolusi perubahan diameter droplet dan kejadian mikro-eksplosi selama proses pembakaran droplet direkam menggunakan sebuah kamera DSLR 50 fps. Perubahan temperatur droplet selama proses pembakaran juga direkam oleh sensor thermokopel tersebut kemudian dikirim ke personal computer melalui data aqusisi. Analisa interaksi molecular etanol dan iso-oktan dilakukan untuk mengungkap peristiwa mikroskopis selama pemanasan campuran baham bakar dengan alat destilasi maupun selama proses pembakaran single droplet.

Dari analisis interaksi molecular menunjukkan bahwa molekul etanol polar mampu menginduksi iso-oktan (hidrokarbon) non-polar dan berpotensi membentuk klaster molekul (etanol iso-oktan) dengan sifat fisika (temperatur pendidihan) yang berbeda dengan sifat fisik masing masing molekul penyusunnya. Sementara durasi dan intensitas puffing droplet selama pembakaran single droplet campuran etanol polar dengan iso-oktan non-polar dipengaruhi oleh total gaya interaksi molekuler dalam gugus molekul yang terbentuk. Jumlah molekul bebas yang tidak membentuk klaster molekul cenderung menghasilkan mikro-eksplosi pada tahap akhir pembakaran single droplet. Sementara peningkatan fraksi etanol pada klaster molekul campuran etanol iso-oktan, cenderung menurunkan konstanta laju pembakaran secara eksponensial

**Kata kunci:** Campuran etanol iso-oktan, interaksi molekular, klaster molekul.

## SUMMARY

**Budi Waluyo**, Doctoral Program in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, November 2018, *The role of molecular interactions on the azeotropic and droplets combustion behavior of ethanol iso-octane blends*, Supervisor: ING Wardana, Lilis Yuliati, Mega Nur Sasongko.

The macroscopic understanding of a phenomenon often collides on variables that have not been defined but have a significant role in the phenomenon. This study tries to look at the phenomenon of the mixture of polar ethanol and non-polar iso-octane as a representation of gasoline microscopically. This study aims to improve the scientific understanding of the concept of mix especially the non-polar iso-octane mixture and polar ethanol in its (near) azeotropic condition. An adequate scientific explanation regarding the molecular interaction pattern of non-polar iso-octane mixture as a single substance representing gasoline with polar ethanol representing alcohol will bridge a more complicated understanding of multi-substance alcohol and gasoline vapour deviations.

This research was conducted through two stages of research. The first stage of research was to identify changes in boiling temperature and the rate of evaporation of various fractions of iso-octane ethanol mixtures using a simple distillation device. A heating flask is suspended from a load cell to record a reduction in the heat of the fuel mixture, while a type K thermocouple dipped in a heated mixture of ethanol iso-octane is used to record changes in temperature during the heating process. The second research stage is testing a single droplet combustion of various iso-octane ethanol blends. A droplet from each mixture fraction was burned at the end of a 0.1 mm thermocouple sensor. The evolution of changes in droplet diameter and micro-explosion events during the droplet combustion process was recorded using a 50 fps DSLR camera. The thermocouple sensor also recorded changes in droplet temperature during the combustion process and then sent to personal computers via acquisition data. Analysis of molecular ethanol and iso-octane interactions was carried out to uncover microscopic events during the heating mixture and to burn with distillation devices and during the single droplet combustion process.

From the analysis of molecular interactions shows that polar ethanol molecules are capable of inducing non-polar iso-octane (hydrocarbons) and have the potential to form molecular clusters (iso-octane ethanol) with physical properties (boiling temperature) that are different from the physical properties of each constituent molecule. The duration and intensity of puffing droplets during the combustion of a single droplet of polar ethanol mixture with non-polar iso-octane is influenced by the total molecular interaction force in the formed molecular group. The number of free molecules that do not form molecular clusters tends to produce micro-explosions at the final stage of single droplet combustion. While increasing the ethanol fraction in the molecular cluster of iso-octane ethanol mixtures, tends to decrease the firing rate constant exponentially.

**Keywords:** a mixture of iso-octane ethanol, molecular interactions, molecular clusters.

## PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah, kami panjatkan kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat, taufik dan hidayah hingga penulis dapat menyelesaikan proposal disertasi ini. Disertasi ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya, Malang. Judul yang diangkat dalam disertasi ini adalah *Peran Interaksi Molekular Terhadap Sifat Azeotrop dan Perilaku Pembakaran Droplet Campuran Etanol Iso-oktan*.

Penyelesaian disertasi ini telah dibantu dan diarahkan oleh pembimbing utama dan para pembimbing pendamping. Oleh karena itu diucapkan terimakasih kepada :

1. Prof. Ir. ING Wardana, M. Eng., Ph.D., selaku pembimbing utama sekaligus Ketua Program Doktor Teknik Mesin Universitas Brawijaya
2. Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping 1,
3. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, S.T., M.T, selaku pembimbing pendamping 2,
4. Keluarga besar Universitas Muhammadiyah Magelang, dan
5. Semua sahabat dan rekan diskusi dalam penyelesaian disertasi saya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan disertasi ini masih banyak kelemahan dan kekurangan. Karena itu, penulis mengharapkan masukan, koreksi dan saran untuk memperkuat kelemahan dan melengkapi kekurangan tersebut.

Malang, Desember 2018

Budi Waluyo





## DAFTAR ISI

SAMPUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
IDENTITAS TIM PENGUJI DISERTASI.....	v
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	vii
UCAPAN TERIMAKASIH .....	ix
RIWAYAT HIDUP .....	xi
RINGKASAN.....	xiii
<i>SUMMARY</i> .....	xv
PENGANTAR .....	xvii
DAFTAR ISI.....	xix
DAFTAR GAMBAR .....	xxi
DAFTAR TABEL.....	xxiii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.1. Latar Belakang .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.2. Perumusan masalah.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.3. Tujuan Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
1.4. Manfaat Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.1. Bahan Bakar SI Engine .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.2. Etanol Sebagai Bahan Bakar .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.3. Etanol Sebagai Bahan Bakar pada SI Engine .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.4. Campuran Polar Etanol dengan Non-polar Hidrokarbon.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.5. Volatilitas Bahan Bakar .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.6. Campuran Azeotrop .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.7. Single Droplet Combustion.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.8. Mikro-Eksplosi.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.9. Elektronegativitas dan Dipol Molekul .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.10. Interaksi Molekular.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB 3. KERANGKA KONSEP PENELITIAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.1. Kerangka teoritis.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



3.2.	Kerangka Konsep Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
3.3.	Hipotesis.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB 4.	METODE PENELITIAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.1.	Tahapan Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.2.	Material dan peralatan penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.3.	Pengujian Temperatur Destilasi dan Laju Penguapan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.4.	Pengujian pembakaran single droplet.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.5.	Penyajian Data Hasil Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB 5.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.1.	Temperatur Destilasi Campuran Etanol Iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.2.	Laju penguapan campuran etanol iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.3.	Temperatur didih campuran etanol iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.4.	Potensi interaksi molekuler campuran etanol iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.5.	Pembentukan kluster molekul campuran etanol iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.6.	Evolusi area droplet selama proses pembakaran singgel droplet.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
5.7.	Konstanta laju pembakaran berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
BAB 6.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.1.	Kesimpulan.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
6.2.	Saran.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	DAFTAR PUSTAKA.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Lampiran 1. Luaran Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Lampiran 2. Instrumen Penelitian.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
	Lampiran 3. Sertifikat Bebas Plagiasi.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>



## DAFTAR GAMBAR

**Gambar 2.1** Efek azeotrop campuran alkohol pada gasolin ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.2** Kurva temperatur pendidihan berbagai fraksi campuran etanol-air..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.3** Skema pembakaran single droplet ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.4** Visualisasi evolusi fenomena mikro eksplosion pembakaran droplet .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.5** Arah perubahan keelektronegativitas unsur ... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.6** Muatan parsial dan momen dipol molekul air **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.7** Pembentukan dipol sesaat molekul non-polar **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.8** Interaksi molekul oksigen dengan air ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.9** Interaksi hidrasi senyawa NaCl dalam air..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.10** Interaksi molekuler dipol-dipol terjadi pada HCl ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 2.11** Model ikatan hydrogen molekul air ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.1** Susunan molekul etanol ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.2** Susunan molekul iso-oktan ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.3** Set up penelitian untuk pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.4** Contoh pengesetan pengiriman data di DAQ MASTER ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.5** Kalibrasi load cell dan persamaan masa terkalibrasi vs masa terdisplay **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 4.6** Setup pengujian pembakaran single droplet . **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.1** Temperatur destilasi fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40, dan 50 v/v..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.2** Temperatur destilasi fraksi etanol 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 v/v..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.3** Laju penguapan campuran fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40, dan 50 v/v **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.4** Laju penguapan campuran fraksi etanol 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 v/v **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.5** Rerata laju penguapan campuran etanol iso-oktan..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.6** Temperatur didih berbagai campuran etanol iso-oktan. **Error! Bookmark not defined.**



**Gambar 5.7** Model tumpukan molekul cairan etanol polar. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.8** Model tumpukan molekul cairan iso-oktan non-polar. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.9** Hasil pembakaran single droplet untuk frasi etanol 10 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.10** Hasil pembakaran single droplet untuk frasi etanol 15 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.11** Model klaster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 10.5658 % v/v; B : 15.0535 % v/v, C : 26.1678 % v/v..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.12** Hasil pembakaran single droplet untuk frasi etanol 25 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.13** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 20 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.14** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 30 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.15** Model klaster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 41.4810 % v/v; B : 51.5332 % v/v..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.16** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 40 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.17** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 50 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.18** Model klaster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 58.6382% v/v; B : 71.2723% v/v ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.19** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 60 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.20** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 70 % v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.21** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 80% dan 90% v/v. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Gambar 5.22** Hubungan konstanta laju pembakaran versus fraksi etanol..... **Error! Bookmark not defined.**



## DAFTAR TABEL

**Tabel 2.1** Perbandingan karakter fisik etanol dan iso-oktan **Error! Bookmark not defined.**

**Tabel 2.2** Karakter fisik etanol ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Tabel 4.1** Peralatan utama penelitian ..... **Error! Bookmark not defined.**

**Tabel 5.1.** Distribusi sifat muatan parsial atom etanol. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Tabel 5.2.** Distribusi sifat muatan parsial atom etanol. .... **Error! Bookmark not defined.**

**Tabel 5.3.** Fraksi etanol iso-oktan yang memiliki potensi membentuk gugus molekul **Error! Bookmark not defined.**



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Trend peningkatan konsumsi energi dunia yang sangat besar dalam dekade terakhir berdampak pada ancaman krisis energi dunia dan permasalahan pencemaran lingkungan hidup. Pemanfaatan bahan bakar nabati sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan menjadi orientasi yang logis untuk mengatasi permasalahan diatas (Awad et al., 2018). Sementara itu, Pemerintah Indonesia dalam Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) 2017, salah satunya memfokuskan kepada pengembangan sumber energi baru dan terbarukan. Sebagai negara agraris, pengembangan sumber bahan bakar nabati merupakan kebijakan yang sangat strategis untuk mengatasi permasalahan krisis energi dan sekaligus pengendalian pencemaran udara. Belajar dari keberhasilan Brazil dalam mengembangkan bahan bakar nabati khususnya etanol, sangat relevan untuk di adopsi di Indonesia dalam mengatasi permasalahan energi khususnya untuk sektor transportasi (Andersen, Anderson, Wallington, Mueller, & Nielsen, 2010).

Sampai saat ini, penggunaan etanol sebagai sumber energi baru dan terbarukan banyak digunakan sebagai campuran bahan bakar fosil (gasolin) terutama untuk menaikkan angka oktan bahan bakar (Surisetty, Dalai, & Kozinski, 2014). Sementara, etanol sebagai bahan bakar nabati memiliki sifat fisika dan kimia yang berbeda dengan bahan bakar fosil. Etanol merupakan zat tunggal yang bersifat polar, sedangkan gasolin merupakan campuran dari berbagai senyawa hidrokarbon yang bersifat non-polar (Zhen, Wang, & Liu, 2017). Sampai saat ini penelitian pencampuran etanol dan gasolin lebih banyak menelaah masalah aspek makroskopisnya (thermodinamika). Penelitian ini mencoba untuk menelaah campuran etanol polar dan hidrokarbon (iso-oktan) non-polar dari aspek mikroskopisnya. Analisa interaksi molekular diharapkan mampu menjebatani pemahaman yang lebih substansi pada setiap perubahan fisika dan kimia dari pencampuran bahan bakar nabati dan fosil tersebut.

Beberapa hasil laporan penelitian terkait penggunaan etanol adalah bahwa campuran etanol-gasolin pada SI Engine adalah untuk mengurangi emisi berbahaya (Awad et al., 2018). Laporan lain terkait penggunaan etanol sebagai bahan bakar adalah bahwa penggunaan etanol mampu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil dengan sumber energi yang terbarukan (Sangeeta et al., 2014). Walaupun etanol sebagai bahan bakar hanya memiliki dua

pertiga kandungan energi dari gasolin, namun etanol memiliki karakter yang bermanfaat untuk pembakaran pada motor pembakaran dalam (*IC engine*). Karakter yang bermanfaat tersebut adalah kecepatan perambatan api laminar dan angka oktan yang lebih tinggi dibandingkan dengan premium (Cooney, Yeliana, Worm, & Naber, 2009). Hasil penelitian Cooney menyatakan bahwa semakin tinggi kadar etanol semakin meningkatkan ketahanan terhadap knocking (*knock-limited compression ratio*). Cooney juga menyatakan bahwa etanol memiliki kecepatan pembakaran yang lebih tinggi dari premium pada semua jenis rasio campuran. Disamping mempunyai angka oktan yang tinggi, penggunaan etanol sebagai bahan bakar mempunyai sifat panas laten yang tinggi sehingga memberikan efek pendinginan dan efisiensi volumetrik yang baik (Jeuland, Montagne, & Gautrot, 2004).

Beberapa penelitian terkait penggunaan campuran etanol-gasolin kadar rendah pada SI engine menyatakan bahwa campuran ini cenderung meningkatkan efisiensi termal, menurunkan emisi CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub> sedangkan emisi HC cenderung meningkat dibandingkan menggunakan gasolin (Srinivasan & Saravanan, 2010). Khumbhar melakukan studi tentang penggunaan campuran etanol-premium kadar rendah pada putaran mesin uji antara 4000 - 8000 rpm. Hasil penelitian Khumbhar diperoleh kecenderungan hasil yang hampir sama, yaitu meningkatnya torsi, daya, konsumsi bahan bakar, tekanan efektif pada emisi CO<sub>2</sub> rata-rata meningkat, dan emisi HC dan CO menurun (Kumbhar, Pandhare, & Mane, 2012). Penelitian serupa dengan menggunakan campuran anhydrous etanol dan hydrous etanol dengan gasolin menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan pada semua hasil parameter emisi gas buang.

Campuran etanol-gasolin cenderung meningkatkan kandungan oksigen bahan bakar yang berdampak pada pembakaran yang lebih sempurna. Namun demikian, penggunaan campuran etanol-gasolin pada kadar tinggi pada umumnya akan memiliki efek negatif yaitu menimbulkan masalah start dingin dan operasi awal mesin (Monteiro Sales et al., 2012). Start dingin dan operasi awal mesin masih dalam kondisi baik pada penggunaan campuran etanol-premium sampai 20% (Liang, Ji, Gao, Liu, & Zhu, 2012). Masalah penggunaan campuran etanol-gasolin mulai muncul ketika campuran etanol melebihi 30% basis volume (Waluyo & Saifudin, 2014). Kondisi ini ditandai dengan emisi HC dan CO yang tinggi selama start dingin dan operasi awal mesin. Temperatur lingkungan yang semakin rendah akan cenderung meningkatkan emisi HC dan CO (Clairotte et al., 2013). Peningkatan emisi CO dan HC saat start dingin dan operasi awal mesin merupakan fungsi kadar etanol pada campuran etanol-gasolin (Iodice & Senatore, 2014).

Penelitian untuk memperbaiki kondisi start dingin dan operasi awal mesin penggunaan campuran etanol-gasolin pada Engine SI telah dilakukan oleh Sales (2012) dan Zhang (2015). Strategi pemanasan awal udara dan bahan bakar saat start dingin dan operasi awal mesin mampu mengurangi emisi CO dan HC secara signifikan (Monteiro Sales & Sodré, 2012). Strategi untuk menurunkan emisi HC dan CO pada penggunaan campuran etanol-gasolin pada saat start dingin juga bisa dilakukan melalui sistem *split injections* pada kendaraan berteknologi *electronic fuel injections* (EFI). Strategi *split injections* ini mampu mengkondisikan air fuel ratio yang disesuaikan dengan kecepatan rambat api di ruang bakar (Zhang, Yu, & Bai, 2015). Namun demikian penelitian lain menyebutkan adanya efek negatif penggunaan campuran etanol-gasolin pada konsentrasi etanol lebih dari 15 % akan mengakibatkan keausan mesin yang lebih cepat.

Sementara itu, salah satu parameter penting bahan bakar untuk mesin SI adalah volatilitas bahan bakar (Pospisil, Muzikova, & Sebor, 2007). Reid vapor pressure (RVP) adalah parameter lain yang digunakan untuk menilai volatilitas suatu zat. RVP didefinisikan sebagai tekanan uap pada temperatur 100 °F (37.8 °C) pada suatu tempat dengan rasio fase uap dan cairnya sebesar 4:1 dengan metode pengukuran yang spesifik (Andersen, Anderson, Wallington, Mueller, & Nielsen, 2010). Pada SI engine, kesempurnaan pembakaran di dalam ruang bakar ditentukan oleh homogenitas dan AFR campuran. Sementara homogenitas dan AFR campuran bahan bakar ditentukan oleh konstruksi sistem bahan bakar dan volatilitas bahan bakar. Sedangkan sifat campuran etanol-gasolin kadar rendah (5-10%) akan meningkatkan tekanan uap bahan bakar dari pada gasolin, sedangkan campuran yang lebih tinggi justru menurunkan tekanan uap bahan bakar dibandingkan dengan gasolin. Gambar 1.1 menunjukkan bahwa peningkatan kadar etanol cenderung menurunkan tekanan uap campuran etanol-gasolin (Pospisil et al., 2007).

Ada dua sifat campuran dari dua atau lebih zat pembentuk yaitu campuran zoetroop dan azeotrop. Azeotrop didefinisikan sebagai campuran dari dua atau lebih cairan, di mana dalam komposisi uap sama dengan komposisi campuran cairan. Campuran memiliki azeotrop positif jika volatilitas campuran lebih tinggi dari volatilitas zat pembentuknya, dan sebaliknya untuk azeotropik negatif. Azeotropik terjadi karena interaksi molekular antara pelarut dalam larutan (Johnson, 2008). Penelitian Andersen et al 2010 juga menyatakan bahwa sangat mungkin membentuk campuran beberapa gugus alkohol pada gasolin yang akan mempunyai RVP setara dengan gasolin (Andersen et al., 2010). Namun demikian penjelasan ilmiah terkait pola interaksi molekular antara gasolin (*non-polar hydrocarbon*) dan etanol (*polar alcohol*) sampai saat ini sangat belum memuaskan.

Studi ini bertujuan untuk mengungkap fenomena perubahan sifat fisika campuran etanol polar dengan hidrokarbon (iso-oktan) non-polar. Iso-oktan dipilih sebagai zat tunggal yang merepresentasikan gasolin karena memiliki sifat penting bahan bakar SI Engine (Broustail, Halter, Seers, Moréac, & Mounaïm-Rousselle, 2013). Iso-oktan, 2,2,4-trimethylpentane adalah isomer oktan ( $C_8H_{18}$ ) yang memiliki berat molekul 114,23 gram/mol dan titik didih 98-99 °C. Iso-oktan merupakan zat terpenting dalam bensin karena digunakan dalam proporsi yang relatif besar untuk meningkatkan ketahanan knocking bahan bakar (Oktavian, Amidelsi, Rasmito, & Wibawa, 2013). Pada penelitian ini sifat fisika terpenting campuran bahan bakar iso-oktan-etanol diwakili oleh temperatur pendidihan campuran bahan bakar. Penelitian ini menggunakan sistem distilasi sederhana untuk menghasilkan temperatur distilasi dan kurva penguapan campuran bahan bakar sehingga campuran (*near*) azeotrop yang diprediksi dapat ditentukan. Analisis interaksi molecular campuran etanol iso-oktan digunakan untuk menentukan kondisi azeotrop dari campuran isooktane-etanol. Pembakaran single droplet digunakan juga untuk mengungkap sifat fisika pembakaran pada berbagai kondisi fraksi campuran etanol iso-oktan. Pembakaran single droplet dianggap cara yang paling memuaskan dan murah dalam pengamatan selama proses pembakaran (Hoxie, Schoo, & Braden, 2014). Sementara analisis interaksi molecular digunakan untuk mengungkap fenomena mikroskopis campuran etanol iso-oktan selama proses pembakaran.

### 1.2. Perumusan masalah

1. Berapakah komposisi campuran antara isooktan non-polar dengan etanol polar yang berada pada kondisi (*near*) azeotrop secara prediktif eksperimental
2. Bagaimanakah pola interaksi molekular antara iso-oktan non-polar dengan etanol polar yang menyebabkan penyimpangan tekanan uap campuran.
3. Berapakah komposisi titik azeotrop campuran isooktan non-polar dengan etanol polar berdasarkan analisa interaksi molekular.
4. Bagaimanakah perilaku pembakaran single droplet campuran etanol dan polar iso-oktan non-polar pada berbagai fraksi campuran.



### 1.3. Tujuan Penelitian

Kegiatan penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki pemahaman ilmiah konsep campuran khususnya campuran non-polar isooktan dan polar etanol pada kondisi (near) azeotropnya. Penjelasan ilmiah yang memadai terkait pola interaksi molekular campuran iso-oktan non-polar sebagai zat tunggal yang merepresentasikan gasolin dengan etanol polar yang mewakili alkohol, akan menjembatani pemahaman yang lebih rumit penyimpangan tekanan uap alkohol dan gasolin yang *multi-substance*.

### 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dan dampak yang diharapkan dari kegiatan penelitian ini adalah untuk perbaikan karakter campuran bakar konvensional dan alkohol. Karakter dan konsep single boiling temperatur campuran bahan bakar (azeotrope) diharapkan menjadi pertimbangan baru dalam kajian rekayasa bahan bakar alternatif untuk memperbaiki karakter dan hasil pembakaran pada internal combustion engine.





## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Bahan Bakar SI Engine

Sampai saat ini bahan bakar yang dominan digunakan untuk SI engine adalah gasolin. Gasolin merupakan bahan bakar fosil yang tersusun dari campuran yang kompleks dengan puluhan senyawa hidrokarbon. Senyawa hidrokarbon pembentuk gasolin dapat dikelompokkan dalam parafanik (gugus alkana), naphtanik (gugus cyklana), olefinik (gugus alkena) dan aromatik. Gasolin ini memiliki unsur dari gugus karbon  $C_4 - C_{12}$  dan sedikit sulfur, oksigen dan senyawa nitrogen dan memiliki titik didih antara  $30-220^{\circ}C$  dengan kandungan (Setiyawan, 2012). Kandungan senyawa olefin dan aromatik dalam bahan bakar SI Engine memberikan dampak lingkungan yang negatif. Senyawa aromatik tersebut merupakan senyawa yang memiliki nilai oktan tinggi, namun cenderung menghasilkan emisi berbahaya (*unburned emission*). Senyawa aromatik juga berdampak pada meningkatnya emisi gas carbon monoksida (CO) yang sangat berbahaya. Sementara senyawa olefin dalam bahan bakar SI Engine cenderung meningkatkan emisi gas nitrogen oksida (NOx) yang sangat merusak ozon serta mengakibatkan gangguan pada sistem pernafasan (Masum et al., 2013).

Salah satu sifat penting dari bahan bakar untuk SI engine, selain kandungan energinya adalah kemudahan menguap (*volatile*). Volatilitas bahan bakar berkaitan dengan pembentukan campuran udara dan bahan bakar yang berpengaruh pada kehandalan operasi mesin kendaraan (*driveability*), kemudahan penyalaan engine pada saat dingin (*cold start engine*) (Clairotte et al., 2013), dan homogenitas campuran bahan bakar dan udara (Waluyo & Saifudin, 2014). Namun volatilitas yang terlalu tinggi akan menyebabkan *vapur lock* pada penyaluran bahan bakar. Sifat penting yang lain untuk SI engine adalah kemampuan bahan bakar untuk tidak terjadi detonasi selama proses pembakaran (*knocking*) (Heywood, 1988). Knocking merupakan salah satu fenomena pembakaran yang tidak normal yang akan mengakibatkan penurunan performansi engine dan akan menyebabkan kerusakan komponen engine. Peristiwa pembakaran normal pada SI engine, terjadi bila semua bahan bakar akan terbakar hanya oleh karena rambatan nyala / api (*flame propagation*) yang inisiasi oleh percikan api dari busi. Pada kondisi pembakaran tidak normal, bahan bakar yang terbakar tidak hanya oleh rambatan api dari busi, melainkan terbakar dengan sendirinya ketika

tekanan yang tinggi sehingga temperatur ruang bakar melampaui temperatur nyala (*flame point*) bahan bakar. Pembakaran tidak normal ini cenderung menimbulkan gelombang tekanan dengan frekuensi 5 sampai 10 kHz yang berakibat pada kerusakan komponen mesin (Heywood, 1988).

## 2.2. Etanol Sebagai Bahan Bakar

Etanol sebagai bahan bakar motor bensin sudah digunakan ketika Henry Ford membuat mobil pertamanya pada tahun 1896 (Canakci, Ozsezen, Alptekin, & Eyidogan, 2013). Namun demikian penggunaan etanol sebagai bahan bakar pada saat itu kurang populer sejak ditemukannya bahan bakar fosil yang memiliki kandungan energi yang lebih tinggi dan ongkos produksi yang lebih rendah. Argumentasi utama penggunaan etanol sebagai bahan bakar adalah emisi gas rumah kaca ( $\text{CO}_2$ ) dan gas berbahaya yang rendah, meningkatnya efisiensi energi secara keseluruhan dan alasan social termasuk peningkatan tenaga kerja sektor pertanian (Surisetty et al., 2011). Alasan lain perlunya pengembangan etanol sebagai bahan bakar nabati adalah pengembangan sumber energi terbarukan tanpa menyebabkan efek rumah kaca yang semakin memburuk (Sangeeta et al., 2014).

Etanol memiliki nama lain etil-alkohol, merupakan senyawa hidrokarbon rantai pendek dengan gugus hidroksil (OH) pada salah satu ujungnya. Etanol memiliki rumus kimia  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ . Dalam kondisi atmosferik, etanol bersifat cair, tidak berwarna, mudah menguap (*volatile*) dan mudah terbakar (Srinivasan & Saravanan, 2010). Etanol sebagai bahan bakar SI Engine mempunyai beberapa kelebihan yaitu angka oktan yang tinggi, mampu diperbaharui dan memiliki dampak polusi yang rendah (Setiyawan 2012). Akan tetapi etanol juga mempunyai beberapa kekurangan yaitu; nilai kalor yang lebih rendah dari gasolin, bersifat higroskopis, dan mudah sekali bercampur dengan air dalam semua perbandingan. Sementara keberadaan air yang terbawa oleh etanol menyebabkan terjadinya sparasi campuran ketika etanol bercampur dengan gasolin (Melo et al., 2012). Perbandingan karakter fisik etanol dan gasolin disajikan pada Table 2.1 berikut,

**Tabel 2.1** Perbandingan karakter fisik etanol dan iso-oktan

Karakter	Iso-oktan	Etanol
Kemurnian (%)	99.5	99.7
Formulasi kimia	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Temperatur didih ( $^{\circ}\text{C}$ )	98-100	78.3
Entalpi penguapan pada 25 $^{\circ}\text{C}$ (kJ/kg)	308	924.2
H/C ratio	2.25	3
O/C ratio	0	0.5

Karakter	Iso-oktan	Etanol
<i>Energy Density</i> (MJ/kg)	44.4	26.83
Berat molekul (gram/mole)	114.23	46.07
<i>Density</i> @ 20 °C (kg/L)	0.691-0.696	0.789-0.792
Keasaman	0.0003	0.0006
Tekanan uap pada 20 °C (kPa)	5.5	5.95
Kandungan oksigen (wt%)	0	34.73

Pemerintah Republik Indonesia telah membuat standarisasi etanol yang terbagi dalam dua jenis. Jenis tersebut adalah etanol teknis (SNI-06-3565-1994) dan etanol terdenaturasi atau sebagai *Fuel Grade Etanol* (SNI DT 27-0001-2006). Jenis etanol teknis mempunyai kandungan etanol antara 95% - 96.8% atau bisa disebut sebagai hydrous etanol. Etanol terdenaturasi mempunyai kadar etanol minimum sebesar 99.5% atau biasa disebut sebagai anhydrous etanol. Spesifikasi dari etanol sebagai bahan bakar SI engine dapat dilihat pada [Tabel 2.2](#) berikut,

**Tabel Error! No text of specified style in document.2** Karakter fisik etanol

Sifat	Unit, Min/Maks	Spesifikasi
Kandungan Etanol	%-V, min	99,5 (sebelum denaturasi ) 94,0 (setelah denaturasi)
Kandungan metanol	mg/l, maks	300
Kandungan air	%-V, maks	1
Kandungan denaturasi	%-V, min	2
	%-V, maks	5
Kandungan tembaga (Cu)	mg/kg, maks	0,1
Keasaman	mg/l, maks	30
Visualisasi		terang dan jernih
Kandungan ion klorida	mg/l, maks	40
Kandungan belerang	mg/l, maks	50
Kandungan <i>Gum</i>	mg/100 ml maks	5
pHe		6,5- 9

### 2.3. Etanol Sebagai Bahan Bakar pada SI Engine

Penelitian mengenai pengaruh air fuel ratio penggunaan campuran alkohol-gasolin pada SI Engine terhadap performansi dan emisi telah dilakukan oleh Hsieh *et al.*, (2002).

Penelitian Hsieh menggunakan etanol fraksi rendah yaitu; E0, E5, E10, E15, E20, E25 dan E30 pada putaran mesin 3000 dan 4000 rpm. Hasil penelitian Hsieh menunjukkan bahwa, secara umum penggunaan campuran etanol- gasolin akan meningkatkan torsi, namun *break specific heat consumptions* (bshc) tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Hasil lain

yang berkenaan dengan emisi bahwa emisi CO menurun, CO<sub>2</sub> dan HC meningkat sejalan dengan AFR dan kadar etanol yang cenderung memperkaya oksigen bahan bakar (Hsieh, Chen, Wu, & Lin, 2002).

Penelitian penggunaan campuran alkohol-gasolin kaitanya dengan parameter SI engine dan emisi pada SI engine dilakukan oleh Pukalskas & Grabys (2003). Penelitian Pukalskas & Grabys menunjukkan bahwa penggunaan campuran alkohol-gasolin akan menurunkan nilai kalor bahan bakar, walaupun nilai oktanya meningkat sebanding dengan peningkatan kadar alkohol (Pukalskas & Grabys, 2003). Hasil penelitian Pukalskas & Grabys (2003) terkait emisi menunjukkan hasil yang sama dengan penelitian Hsieh et al. (2002).

Penelitian lain terkait penggunaan campuran alkohol-gasolin pada berbagai rasio kompresi terkait hubungannya dengan performansi dan emisi engine dilakukan oleh Yücesu et al. (2006). Penelitian Yücesu juga menggunakan etanol pada fraksi campuran yang lebih tinggi yaitu pada E0, E10, E20, E30, E40 dan E60 dengan kondisi AFR dengan  $\lambda = 1$  (*stoichiometri*), beban penuh dan pada kondisi *minimum advance timing for best torque* (MBT). Hasil penelitian Yücesu menunjukkan bahwa, penambahan alkohol pada gasolin cenderung meningkatkan ketahanan terhadap knocking pada kompresi yang tinggi dan waktu pengapian yang semakin maju sejalan dengan kadar etanol, sehingga penambahan etanol menguntungkan untuk mencapai MBT. Peningkatan rasio kompresi dan fraksi etanol pada gasolin juga akan berpengaruh terhadap meningkatkan *brake spesific fuel consumptions* (BSFC) serta menurunkan temperatur gas buang (Yücesu, Topgül, Çinar, & Okur, 2006).

Review tentang penggunaan campuran alkohol-gasolin, kaitanya dengan rasio kompresi dan waktu pengapian terhadap karakteristik pembakaran dilakukan oleh Cooney et al. 2009. Hasil review Cooney yang juga menggunakan etanol menyatakan bahwa, walaupun etanol hanya memiliki dua per tiga kandungan energi dibandingkan dengan gasolin, namun etanol memiliki beberapa karakter yang sangat menguntungkan untuk IC Engine (Cooney et al., 2009). Keuntungan tersebut adalah nilai oktan yang lebih (gasolin; 91-99 RON, etanol 107 RON) dan kecepatan rambat api laminar yang lebih tinggi dari gasolin (gasolin 0,333 m/s, etanol 0,388 m/s). Sehingga, peningkatan kadar etanol pada gasolin semakin tidak berpengaruh sejalan dengan peningkatan rasio kompresi terhadap pencapaian MBT pada pemajuan waktu pengapian.

Penelitian tentang efek campuran alkohol dengan gasolin tanpa timbal terhadap performansi engine dan emisi gas buang pada SI engine dilakukan oleh Koç et al. (2009). Koç



menyatakan bahwa keuntungan penggunaan etanol sebagai bahan bakar adalah disamping merupakan bahan bakar yang terbarukan, etanol juga memiliki panas laten, nilai oktan dan temperatur nyala yang lebih tinggi dibanding dengan gasolin (Koç, Sekmen, Topgül, & Yücesu, 2009). Kondisi ini berpengaruh positif terhadap performansi engine dan penurunan emisi gas buang. Penelitian Koç dilakukan pada putaran mesin 1000-5000 rpm dan 2 kondisi rasio kompresi (10:1 dan 1:1) dan kondisi trottle terbuka penuh / *wide opened trottle* (WOT). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan alkohol pada gasolin tanpa timbal cenderung meningkatkan torsi, daya dan konsumsi bahan bakar serta ketahanan terhadap knocking serta cenderung menurunkan emisi CO, NOx dan HC (Koç et al., 2009).

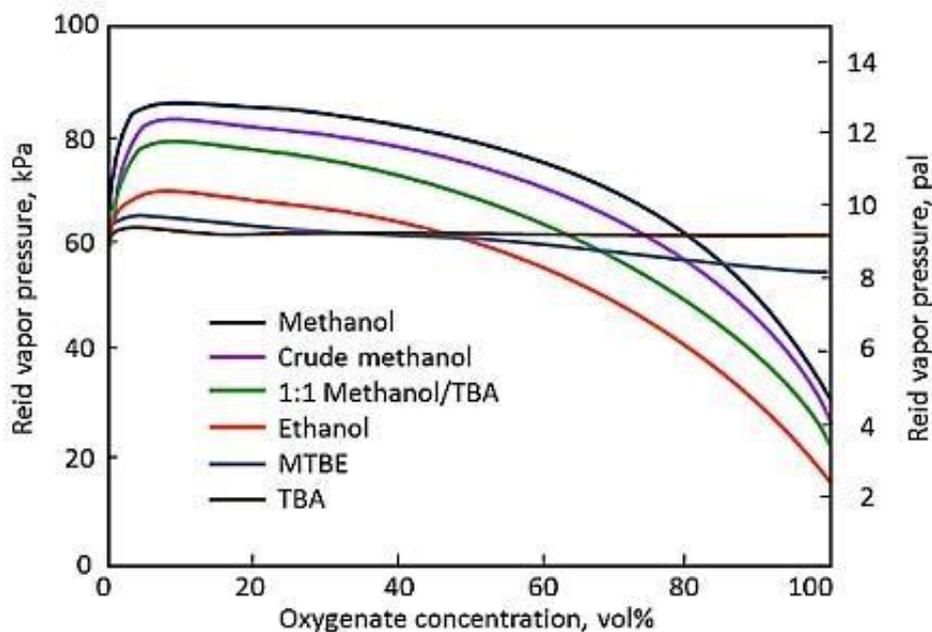
Namun demikian, dari beberapa keuntungan penggunaan campuran alkohol-gasolin diatas, pada kondisi start dingin terjadi beberapa masalah khususnya pada penggunaan campuran dengan kadar lebih dari 30 % basis volume (Chen, Chiang, Chen, & Lin, 2011). Penelitian Chen menyatakan bahwa pada penggunaan campuran etanol sampai 30 % masih menunjukkan kondisi start dingin yang stabil, namun mulai kadar alkohol 40 % start dingin dan putaran idle menunjukkan kondisi yang tidak stabil. Penelitian serupa juga dilakukan oleh B. Waluyo dan Saifudin (2014) yang menyatakan bahwa kemudahan start dingin penggunaan campuran alkohol-gasolin mulai terjadi masalah ketika campuran 30 % (Waluyo & Saifudin, 2014). Kadar alkohol yang semakin tinggi akan berdampak pada *air-fuel ratio* yang semakin kurus (*lean combustion*) dan berdampak juga pada penurunan *vapor pressure* bahan bakar. Kondisi ini yang menyebabkan kondisi start dingin tidak stabil pada campuran alkohol-gasolin kadar tinggi. Kondisi tidak stabil ini ditandai dengan tingginya emisi CO dan HC saat start dan putaran idle dingin.

Penelitian yang dilakukan oleh Sales & Sodr  (2012) untuk memperbaiki masalah start dingin adalah dengan memanaskan udara dan bahan bakar saat start dingin dengan menggunakan pemanas elektrik pada penggunaan campuran alkohol-gasolin pada *SI Engine* menunjukkan bahwa secara simultan terjadi penurunan emisi hidrokarbon dan karbonmonoksida khususnya pada 150 detik pertama setelah start dingin (Monteiro Sales & Sodr , 2012). Penelitian lain untuk memperbaiki kondisi start dingin penggunaan campuran gasolin-etanol dilakukan oleh Zhang et al. (2015). Perbaikan Zhang dilakukan melalui sistem split injections pada mesin yang sudah menggunakan teknologi *electronic fuel injections* (EFI). Sistem split injections ini mampu mengkondisikan campuran miskin dan campuran kaya yang disesuaikan dengan kecepatan rambat api di ruang bakar (Zhang et al., 2015).

## 2.4. Campuran Polar Etanol dengan Non-polar Hidrokarbon

Pensubstitusian dan pencampuran etanol dengan gasolin berdampak pada *engine performance* dan emisi gas buangnya (Awad et al., 2018). Perubahan tersebut tergantung dari fraksi campuran yang akan merubah sifat-sifat penting dari bahan bakar (Setiyawan 2012). Penggunaan etanol sebagai campuran atau substitusi bahan bakar memungkinkan dibuat engine dengan rasio kompresi lebih tinggi dan waktu pengapian yang besar. Rasio kompresi yang tinggi pada engine akan meningkatkan efisiensi thermal engine (Heywood, 1988). Campuran dan substitusi etanol dengan gasolin juga akan meningkatkan kadar oksigen bahan bakar, sehingga homogenitas campuran bahan bakar oksigen dan efisiensi volumetrik lebih baik. Hal ini akan mengakibatkan pembakaran yang lebih sempurna, sehingga cenderung menurunkan emisi HC dan CO (Jeuland, 2004). Panas laten dari proses evaporasi etanol mempunyai efek positif dalam proses *air cooling* yang berefek meningkatkan jumlah udara masuk ruang bakar, namun berefek buruk pada start awal (*cold start engine*) dan kondisi putaran idle dalam kondisi dingin (Farkade, H.S.; Panthre, 2012). Efek negatif lain dari pembakaran substitusi dan campuran etanol pada engine adalah dihasilkannya emisi *aldehyde* yang berefek buruk bagi kesehatan (Jeuland, 2004).

Pencampuran hidrokarbon dengan alkohol dengan gugus C rendah pada prosentase tertentu akan menyebabkan campuran azeotropika positif, dimana volatilitas atau tekanan uap dari campuran lebih besar dari tekanan uap komponen penyusunnya. Efek azeotropika campuran gasolin dengan berbagai senyawa hidrokarbon disajikan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.1** Efek azeotrop campuran alkohol pada gasolin

## 2.5. Volatilitas Bahan Bakar

Salah satu parameter penting dari sifat bahan bakar untuk SI Engine yang berhubungan dengan sifat volatilitas bahan bakar adalah  *Reid vapor pressure* (RVP) (Pospisil et al., 2007). Volatilitas sebuah zat cair berkorelasi negatif dengan temperatur pendidihannya. Semakin besar volatilitas suatu zat cair, semakin rendah temperatur pendidihannya. Sementara tekanan penguapan sebuah cairan berkorelasi dengan temperturnya. Semakin tinggi temperatur sebuah cairan, semakin besar juga tekanan uap yang dihasilkan oleh cairan tersebut.  *Reid vapor pressure* merupakan kondisi tekanan uap di atas permukaan cairan pada temperatur 100 ° F (37,8 ° C) dengan rasio volum fasa uap dan fasa cair dari cairan tersebut adalah 4: 1 (ASTM D 323) (Andersen et al. 2010). Tekanan uap dari suatu campuran ideal dapat didefinisikan menggunakan hukum Raoult's sebagaimana ditunjukkan pada [Persamaan 1](#), dimana P merupakan tekanan uap campuran,  $P_i$  tekanan uap cairan pembentuk i, dan  $x_i$  fraksi mol dari cairan pembentuk

$$P = \sum P_i \cdot x_i \quad (2-1)$$

Campuran polar etanol dengan non-polar hidrokarbon akan menyebabkan interaksi molekular. Interaksi molekular ini akan mengakibatkan penyimpangan dari kondisi campuran ideal yang disampaikan Raoult. Tekanan uap campuran akan lebih besar dari tekanan perhitungan Raoult khususnya pada daerah (*near*) azeotropnya. Efek ini direpresentasikan oleh koefisien aktifasi  $\gamma_i$  sehingga [Persamaan 1](#) menjadi,

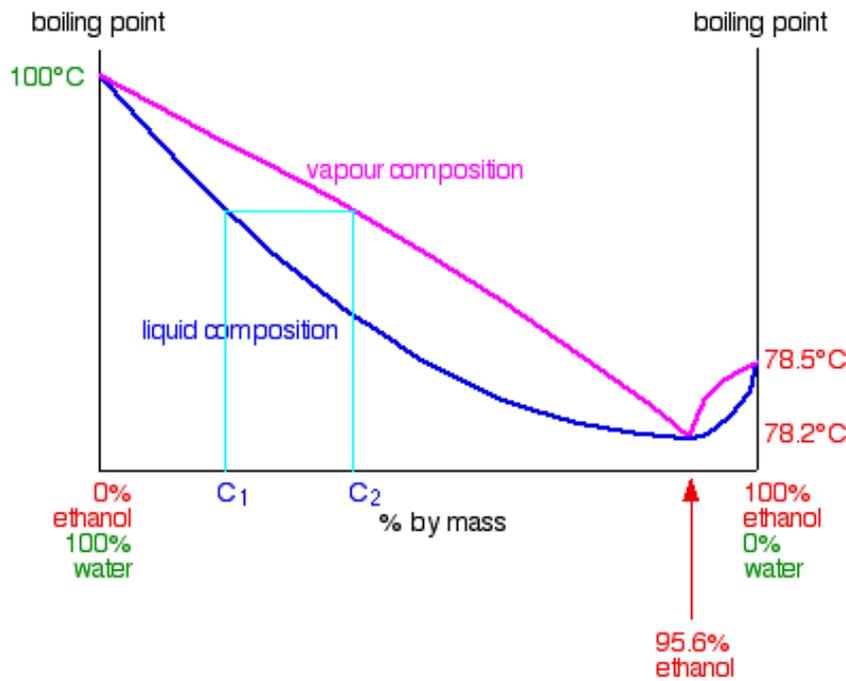
$$P = \sum \gamma_i \cdot P_i \cdot x_i \quad (2-2)$$

Koefisien aktifasi  $\gamma_i$  merupakan konstanta sebuah campuran yang diperoleh secara empiris.

## 2.6. Campuran Azeotrop

Campuran bersifat azeotrop apabila campuran tersebut memiliki volatilitas relatif dekat sehingga masing-masing unsur pembentuk campuran akan menguap pada saat yang hamper bersamaan (Andreatta, Charnley, & Brennecke, 2015). Sehingga campuran azeotrop merupakan kondisi dua campuran atau lebih zat cair yang komposisi uap campurannya sama dengan komposisi cairnya. Campuran azeotrop cenderung terbentuk antara zat yang bersifat pelarut dengan kelarutan yang berbeda karakteristik. Azeotrop muncul karena interaksi antara zat pelarut dalam sebuah larutan / campuran (Stavroudis, 2006). Di dalam campuran azeotrop, campuran akan memiliki parameter kelarutan anomali serta titik didih berkurang dan tekan uap meningkat. Campuran dalam kondisi azeotrop akan dianggap sebagai zat tunggal dengan sifat yang berbeda dengan zat-zat pembentuknya. Kebaikan dari campuran

azeotrop adalah campuran zeotrop, dimana ketika campuran zeotrope di panaskan, akan terjadi perbedaan komposisi uap dan fase cairnya (Gao & McCarthy, 2008). *Hydrous etanol* merupakan salah satu contoh campuran antara etanol dan air yang memiliki titik azotrop. Titik azeotrop *Hydrous etanol* terbentuk pada komposisi etanol 95,6 % g/g dan air 4,4 % g/g (Suarra, Wardana, Hamidi, & Wijayanti, 2016b). Kurva temperatur pendidihan berbagai fraksi campuran etanol air Gambar 2.2 berikut,



**Gambar 2.2** Kurva temperatur pendidihan berbagai fraksi campuran etanol-air

Pada tekanan atmosfer, Gambar 2.2 terlihat bahwa pendidihan air terjadi pada temperatur 100 oC, sementara etanol terjadi pada temperatur 78,5 oC. Namun pada fraksi campuran etanol 95,6 % g/g (titik azotrop) temperatur pendidihan campuran etanol air adalah 78,2 oC.

Pada titik ini campuran etanol air hanya memiliki satu temperatur pendidihan. Berbeda dengan kondisi zeotrop pada Gambar 2.2 diatas, ketika cairan pada komposisi C1, maka komposisi uapnya sebesar C2. Sehingga pada kondisi campuran zeotrop suatu cairan akan selalu menghasilkan komposisi uap yang berubah setiap waktu (Gao & McCarthy, 2008).

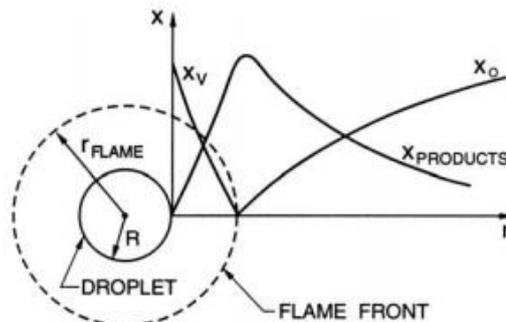
Oleh karena itu pemisahan campuran azeotrop tidak bisa dilakukan dengan system destilasi sederhana (Luyben, 2014).

## 2.7. Single Droplet Combustion

Kebanyakan para peneliti melakukan eksperimen dengan single droplet adalah untuk mengidentifikasi waktu tunda pengapian, karakteristik pembakaran seperti pembentukan jelaga, tingkat pembakaran, dan fenomena pembakaran mikro-eksplosi. Pembakaran single

droplet merupakan metode analisis yang sederhana, murah dan sangat bermanfaat untuk mengkarakterisasi fenomena selama proses pembakaran (Hoxie, Schoo, & Braden, 2014).

Skema pembakaran single droplet tersaji pada Gambar 2.2 berikut,



**Gambar 2.3** Skema pembakaran single droplet

Untuk ukuran droplet yang sangat kecil dari bahan bakar dengan volatilitas tinggi, penguapan droplet sudah berakhir pada saat awal proses pemanasan bahan bakar, namun proses pembakaran berikutnya tidak akan terlihat evolusi perubahan ukuran dropletnya. Pada droplet dengan ukuran yang lebih besar atau bahan bakar yang kurang stabil, penguapan droplet akan menjadi proses pengendali selama pembakaran melalui evolusi ukuran droplet (Cai & Pitsch, 2015). Pembakaran single droplet diawali dengan evaporasi/penguapan droplet, kemudian pembakaran melalui difusi luar uap bahan bakar dari permukaan tetesan dan difusi oksigen ke dalam (atau oksidan lainnya) dengan reaksi pada nyala api terluar (*front flame*) dengan jarak tertentu dari droplet. Dari Gambar 2.2, untuk analisa pembakaran droplet pada nyala api terluar (*flame front*) diasumsikan pembakaran terjadi pada kondisi kesetimbangan antara laju massa bahan bakar yang terbakar (laju penguapan) dan laju difusi oksigen yang masing-masing adalah  $\dot{m}_{fc}$  dan  $\dot{m}_{oc}$ , maka;

$$\dot{m}_{fc} = \dot{m}_{oc} \quad (2-3)$$

Sedangkan konstanta laju pembakaran (*burning rate*) dari single droplet dapat dijelaskan oleh D<sup>2</sup>-Law, yang menyatakan bahwa diameter kuadrat droplet akan berkurang secara linier terhadap waktu pembakaran. Persamaan 4 berikut merupakan hubungan antara konstanta burning rate (K) terhadap perubahan diameter droplet (Orzechowski & Weislik, 2014),

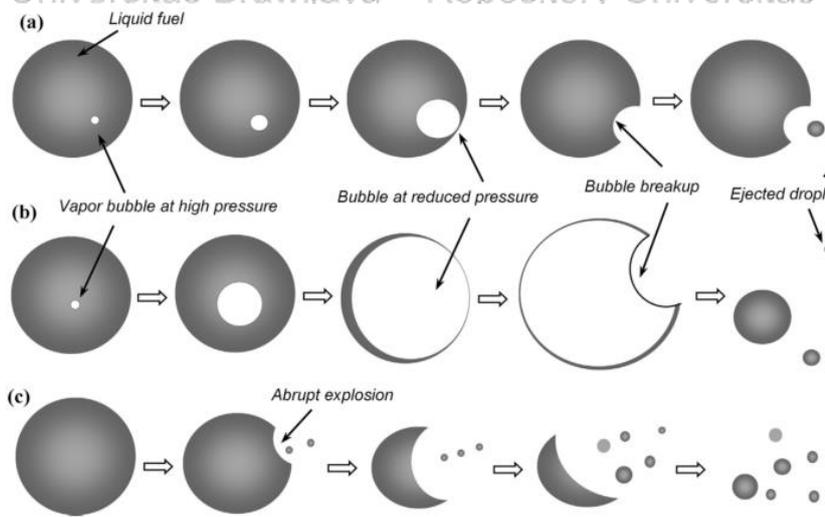
$$D^2(t) = D_0^2 - K_c \cdot t \quad (2-4)$$

Dimana D merupakan diameter akhir droplet (mm), D<sub>0</sub> adalah diameter awal droplet (mm)

dan  $K_c$  adalah konstanta burning rate serta  $t$  adalah waktu (s).

## 2.8. Mikro-Eksplosi

Konsep tentang mikro-eksplosi untuk pertama kali diungkapkan oleh Ivanov dan Nefedov pada tahun 1965. Mikro-eksplosi merupakan fenomena ledakan kecil yang muncul pada saat proses pembakaran droplet (induk) pada bahan bakar cair (Nur, Hamidi, & Yulianti, 2016). Beberapa peneliti meyakini bahwa micro explosion dalam suatu pembakaran, menghasilkan atomisasi sekunder (Mura, Calabria, Califano, Massoli, & Bellettre, 2014) sehingga pembakaran yang lebih sempurna. Hal ini disebabkan karena pada saat sebuah pembakaran droplet terjadi mikro-eksplosi, waktu pembakaran menjadi lebih singkat (Jeong, Lee, & Kim, 2008). Mikro-eksplosi sering menjadi salah satu fenomena yang diamati pada pengujian pembakaran single droplet. Visualisasi evolusi fenomena mikro eksplosi pada saat pembakaran single droplet tersaji pada Gambar 2.3 berikut,



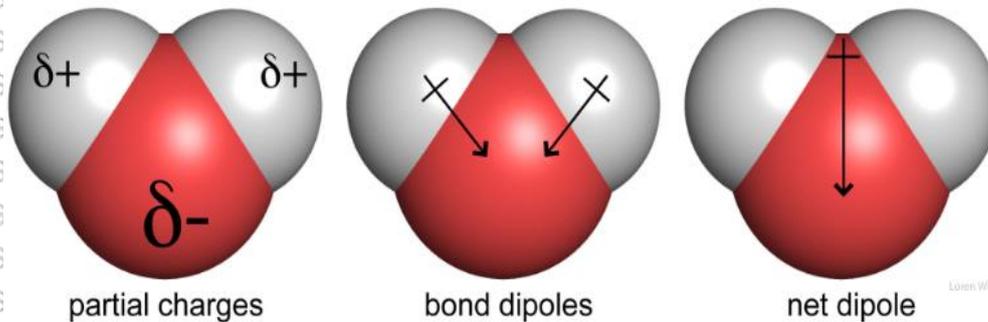
**Gambar 2.4** Visualisasi evolusi fenomena mikro eksplosi pada saat pembakaran droplet (Rao, Syam, Karmakar, & Joarder, 2017)

Mikro-eksplosi terjadi karena adanya perbedaan volatilitas (titik didih) yang besar antar komponen cairan pembentuk campuran (Coughlin & Hoxie, 2017). Kondisi ini mengakibatkan munculnya gelembung didalam droplet induk yang akan tumbuh dengan cepat dan berakhir pada keluarnya gelembung dari droplet dan membentuk atomisasi pada droplet induk (Yan et al., 2016). Intensitas mikro-eksplosi dalam sebuah droplet akan berpengaruh terhadap *burning rate* sebuah campuran bahan bakar.

## 2.9. Elektronegativitas dan Dipol Molekul



masing-masing sebesar 2,2 dan 3,5, sehingga dalam molekul air, atom H memiliki muatan parsial positif, sedangkan atom O memiliki muatan parsial negatif. Perbedaan muatan parsial inilah yang menyebabkan molekul air merupakan molekul polar karena memiliki perbedaan keelektronegativitas sebesar 1,3. Model dan arah dipol molekul air disajikan pada Gambar berikut.



**Gambar 2.6** Muatan parsial dan momen dipol molekul air

Dari Gambar 2.6 mendeskripsikan bahwa karena elektronegativitas atom oksigen lebih besar dari atom hydrogen maka atom oksigen cenderung menarik elektron yang ada pada atom hydrogen, sehingga terjadi arah dipol seperti pada Gambar 2.6 (tengah). Resultan momen molekul air ditunjukkan pada Gambar 2.6 (kanan). Karena air memiliki momen dipol yang permanen inilah yang menjadikan air bersifat polar.

Klasifikasi perbedaan elektronegativitasnya suatu molekul jika perbedaan elektronegativitasnya kurang dari 0,5 disebut ikatan kovalen non-polar. Sedangkan jika perbedaan elektronegativitasnya antara 0,5 sampai dengan 1,7 dikategorikan ikatan kovalen polar. Namun jika beda elektronegativitasnya lebih besar dari 1,7, maka ikatan molekul yang terbentuk adalah ikatan ionik (Rao et al., 2017).

### 2.10. Interaksi Molekular

Interaksi molekular dalam berbagai bidang ilmu memiliki peran yang sangat penting, seperti pada bidang kimia organik, kimia supramolekular, biokimia, farmakologi dan biologi molekular (Homocianu & Airinei, 2017). Interaksi molekular merupakan gaya tarik atau tolak antara molekul dan antar atom/molekul yang tidak berikatan. Interaksi molekular penting di berbagai bidang lipatan protein, desain obat, ilmu material, sensor, nanoteknologi, perpisahan, dan asal usul kehidupan (Yu, Lin, Wan, & Cao, 2017). Interaksi molekular juga dikenal sebagai interaksi non-kovalen atau intermolekular. Interaksi molekular sering dikaitkan dengan tingkat kepolaran suatu zat cair. Sementara tingkat kepolaran suatu molekul dipengaruhi oleh besarnya perbedaan keelektronegatifan antar atom-atom yang berikatan kovalen pada suatu molekul tersebut. Suatu cairan masuk dalam katagori zat polar

apabila memiliki beda keelektronegatifan antar atom penyusunnya sebesar 0,5 – 2,0. Namun demikian, selain keelektronegatifan, ketidaksimetrisan molekul juga berpengaruh pada tingkat kepolaran suatu zat cair. Ketidaksimetrian molekul menyebabkan muatan elektron yang tidak setimbang diantara atom dalam suatu molekul. Kondisi inilah yang mengakibatkan terjadinya polaritas muatan listrik, sehingga elektron-elektron pada ikatan kovalen tersebut akan tertarik lebih kuat ke salah satu atom penyusunnya.

Namun sebaliknya, sebuah molekul dikatakan bersifat non-polar jika tersusun dari atom sejenis dan muatannya distribusi secara simetris, seperti molekul metana ( $\text{CH}_4$ ) atau hidrogen ( $\text{H}_2$ ). Nilai keelektronegatifan atom-atom pada sebuah molekul non-polar hampir sama, sehingga memiliki muatan elektron yang terdistribusi secara merata (beda keelektronegatifan  $< 0,5$ ). Oleh Karena itu, molekul non-polar tidak membentuk polaritas (dipole). Pasangan senyawa non-polar mengakibatkan bentuk molekul simetris sehingga dipole-dipole pasangan atomnya saling meniadakan (Yu et al., 2017).

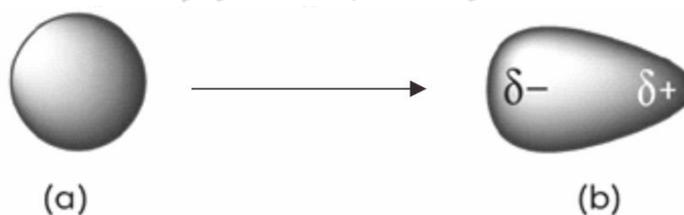
Gaya interaksi molekular berkaitan erat dengan sifat fisik khususnya titik didih sebuah zat. Pengelompokan ikatan molekular berdasar kekuatan gaya ikatnya adalah sebagai berikut,

#### 2.10.1. Ikatan Van der Waals

Ikatan Van der Waals dikenalkan pertama oleh Jhonnés Diderik Van der Waals pada awal abad XX. Ikatan molekular ini terbagi dalam dua jenis ikatan, yaitu ikatan karena gaya london dan gaya tarik dipol. (Leite, Bueno, Róz, & Ziemath, 2012).

##### A. Gaya London

Gaya London dikenalkan pertama oleh fisikawan asal Jerman yang bernama Fritz London pada tahun 1928. Gaya London merupakan gaya interaksi molekular non-polar akibat terjadinya perpindahan elektron dari satu lintasan electron (kulit) ke lintasan electron (kulit) yang lain dan membentuk dipol sesaat. Gaya London ini mengakibatkan molekul non-polar berubah jadi agak polar sesaat. Gambar 2.7 berikut model pembentukan dipol sesaat yang menghasilkan gaya London pada sebuah molekul.



**Gambar 2.7** Pembentukan dipol sesaat molekul non-polar

Kemudahan sebuah molekul untuk menghasilkan dipol sesaat sering disebut

dengan istilah polarisabilitas. Polarizabilitas ini dapat menginduksi ke molekul non-polar disekitarnya dan berubah menjadi polar. Tingkat polaritas sebuah molekul dipengaruhi oleh massa relatif ( $M_r$ ) dan geometri molekul. Semakin besar masa relatif sebuah molekul, maka semakin banyak elektron yang dimiliki, menyebabkan molekul tersebut semakin mudah mengalami polaritas sehingga gaya London semakin kuat. Namun demikian molekul yang memiliki masa relatif yang sama, molekul yang memiliki geometri lebih panjang akan lebih mudah mengalami polarisasi dibandingkan dengan molekul dengan geometri pendek. Sehingga percabangan dalam sebuah molekul, cenderung menurunkan kekuatan gaya London. Kondisi ini disebabkan adanya percabangan yang mempersempit luasan kontak (tegangan permukaan) antar molekul.

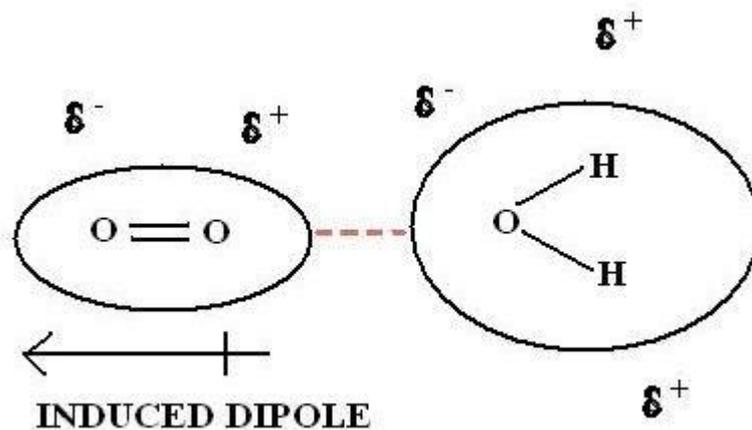
#### B. Gaya tarik dipol

Merupakan kecenderungan sebuah molekul untuk saling mendekat diantara molekul dengan polaritas positif dengan polaritas negatif molekul lainnya. Sebuah molekul yang memiliki momen dipol yang lebih besar, cenderung memiliki gaya Tarik dipol yang lebih besar. Sementara molekul yang mengalami gaya tarik dipol yang lebih besar, cenderung memiliki temperatur pendidihan yang lebih tinggi! Klasifikasi gaya tarik dipol dibagi menjadi tiga kategori sebagai berikut,

##### 1. Interaksi molekuler terinduksi (*Induced Dipole*)

Gaya interaksi molekuler terinduksi terjadi ketika sebuah molekul non-polar terinduksi oleh molekul polar kemudian kedua molekul tersebut saling berinteraksi.

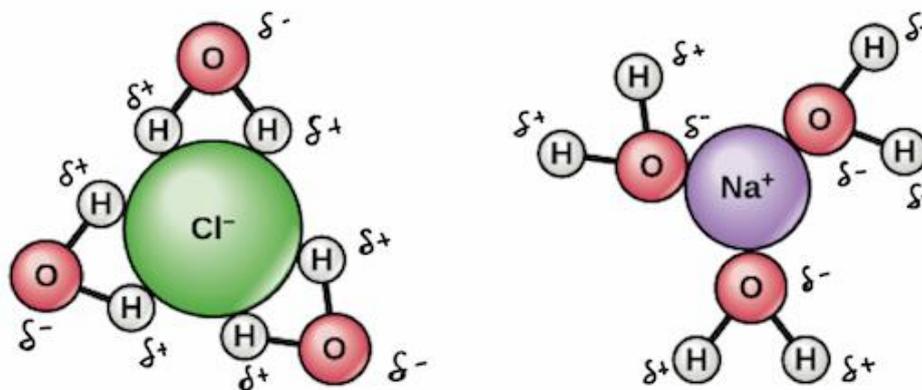
Dalam kehidupan sehari-hari, molekul air ( $H_2O$ ) yang bersifat polar mampu menginduksi molekul oksigen ( $O_2$ ) yang bersifat non-polar. Interaksi molekuler terinduksi inilah yang menyebabkan oksigen non-polar terlarut didalam air polar seperti terlihat pada Gambar 2.8 berikut,



**Gambar 2.8** Interaksi molekul oksigen dengan air

## 2. Interaksi Ion-Dipol

Interaksi ion-dipol merupakan interaksi antara sebuah ion positif maupun negative berinteraksi dengan molekul polar. Besarnya gaya interaksi ion-dipol ini ditentukan oleh besarnya muatan ion serta tingkat kepolaran dan geometri molekul. Contoh interaksi ion-dipol adalah larutan senyawa NaCl dalam air seperti tersaji pada Gambar 2.9 berikut,

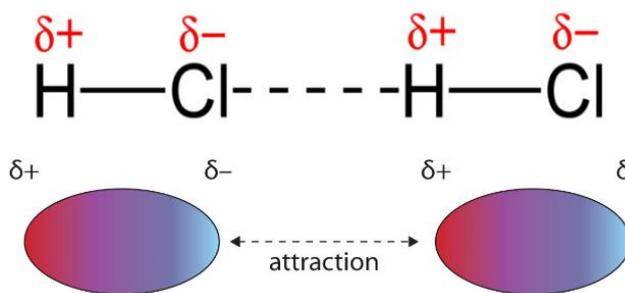


**Gambar 2.9** Interaksi hidrasi senyawa NaCl dalam air

Pada Gambar 2.9 diatas, atom-atom hidrogen pada molekul air yang memiliki muatan parsial positif ( $\delta^+$ ) berinteraksi dengan atom  $\text{Cl}^-$  (kation). Sementara atom  $\text{Na}^+$  (anion) berinteraksi dengan atom oksigen yang memiliki muatan parsial negatif ( $\delta^-$ ).

## 3. Interaksi Dipol-Dipol

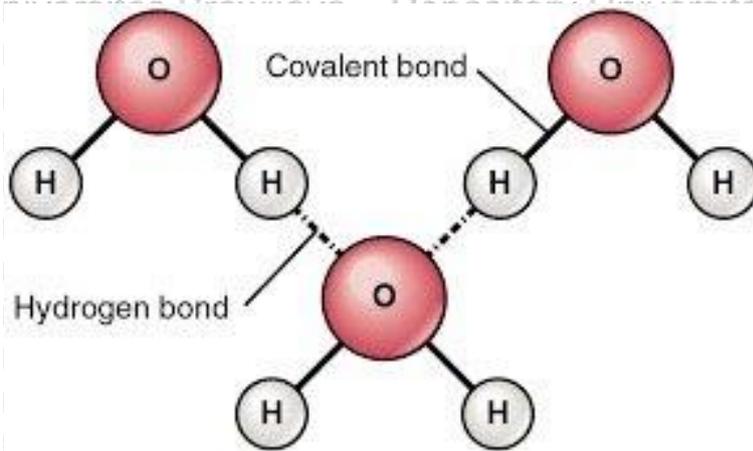
Gaya antar molekul terjadi pada molekul dengan ikatan ionik. Kutub positif dari molekul berinteraksi/berikatan dengan kutub negatif molekul lainnya. Gaya interaksi dipol-dipol lebih kuat dari gaya London. Contoh interaksi molekuler dipol-dipol yang terjadi pada HCl disajikan pada Gambar 2.10 berikut,



**Gambar 2.10** Interaksi molekuler dipol-dipol terjadi pada HCl

### 2.10.2. Ikatan Hidrogen

Gaya tarik molekuler karena ikatan hidrogen ini disebabkan oleh gaya tarik-menarik antar atom hydrogen dari molekul yang satu dengan atom molekul lain yang memiliki keelektronegatifan tinggi (nitrogen, oksigen, atau flourin)(Bermúdez-oria, Rodríguez-gutiérrez, Rodríguez-juan, González-benjumea, & Fernández-bolaños, 2018). Ikatan Hidrogen merupakan ikatan antar molekul yang terjadi pada molekul-molekul yang memiliki tingkat kepolaran tinggi sekaligus memiliki atom hydrogen. Contoh senyawa yang mempunya ikatan hydrogen adalah HF, H<sub>2</sub>O, dan NH<sub>3</sub>. Model ikatan hydrogen untuk air disajikan pada Gambar 2.11 berikut,



**Gambar 2.11** Model ikatan hydrogen molekul air

Didalam molekul air, atom oksigen memiliki elektronegativitas lebih besar dari molekul hidrogen, sehingga pasangan elektron antara atom oksigen dan atom hidrogen lebih tertarik ke arah atom oksigen. Oleh karena itu, atom hidrogen dalam molekul air yang memiliki parsial charge positif ditarik oleh pasangan elektron atom oksigen molekul lain yang memiliki parsial charge negatif dan membentuk ikatan hydrogen(Suarta, Wardana, Hamidi, & Wijayanti, 2016a). Namun demikian atom flourin (F) dan atom nitrogen (N) juga berpotensi berikatan kuat dengan atom hydrogen. Gaya interaksi molekuler akibat ikatan hidrogen ini jauh lebih besar dibandingkan dengan gaya interaksi akibat gaya Van der Waals. Suatu cairan yang molekul penyusunnya memiliki ikatan hidrogen (air) membutuhkan energi yang lebih besar untuk memutuskannya, sehingga cairan tersebut memiliki titik didih sangat tinggi (100 °C).

## BAB 3. KERANGKA KONSEP PENELITIAN

### 3.1. Kerangka teoritis

Semua campuran dari unsur liquid memiliki kekuatan tarik antar molekul penyusunnya (Prajapati et al., 2012). Etanol merupakan cairan polar yang mampu berinteraksi dengan beberapa hidrokarbon yang mengarah ke pembentukan campuran azeotrop (Jeuland et al., 2004). Azeotrop didefinisikan sebagai sebuah campuran fluida cair dari dua atau lebih zat, dimana komposisi uap campuran sama dengan komposisi cairannya. Pada kondisi ini, campuran hanya memiliki satu titik didih seperti *single substance*. Campuran mempunyai sifat azeotrop positif jika volatilitas campuran lebih tinggi dari volatilitas komponen penyusunnya, dan mempunyai sifat azeotrop negatif jika sebaliknya. Azeotrop muncul karena adanya interaksi antara molekul pelarut dalam larutan (Stavroudis, 2006).

Penambahan etanol polar pada hidrokarbon (gasolin) non-polar berpengaruh pada perubahan sifat campuran secara signifikan. Penambahan etanol pada gasolin juga berpengaruh pada karakter pembakaran karena akan merubah *Reid Vapor Pressure* (RVP), entalpi penguapan, *research octane number* (RON) dan nilai kalor (Setiyawan 2012). Sementara kesempurnaan proses pembakaran dalam ruang bakar sangat bergantung pada homogenitas dan rasio campuran bahan bakar dan udara (Heywood 1988). Ketika etanol polar dicampur ke hidrokarbon (iso-oktan) non-polar pada konsentrasi tertentu, molekul etanol polar berpotensi menginduksi molekul hidrokarbon (iso-oktan) sehingga gaya tarik menarik antara molekul terjadi perubahan konfigurasi. Sementara molekul hidrokarbon (iso-oktan) bersifat non-polar karena memiliki *partial charge* yang tersebar merata pada seluruh atom-atom penyusunnya. Sebaran yang merata inilah yang menyebabkan molekul hidrokarbon (iso-oktan) memiliki keseimbangan molekul sehingga momen dipolnya kecil. Namun demikian, molekul hidrokarbon (iso-oktan) dengan formulasi  $C_8H_{18}$  memiliki 26 atom memiliki potensi yang besar untuk berubah menjadi molekul hidrokarbon polar (*induced dipole*) jika mendapat induksi yang cukup dari molekul disekitarnya.

Sementara itu etanol merupakan molekul polar karena memiliki gugus hidroksil (OH) dengan beda muatan parsial (*partial charge*) yang cukup besar, yaitu pada atom oksigen memiliki muatan parsial negatif,  $\delta^- = -0,395$  dan atom hidrogen memiliki partial charge positif,  $\delta^+ = 0,209$ . Perbedaan keelektronegatifan inilah yang menyebabkan etanol memiliki

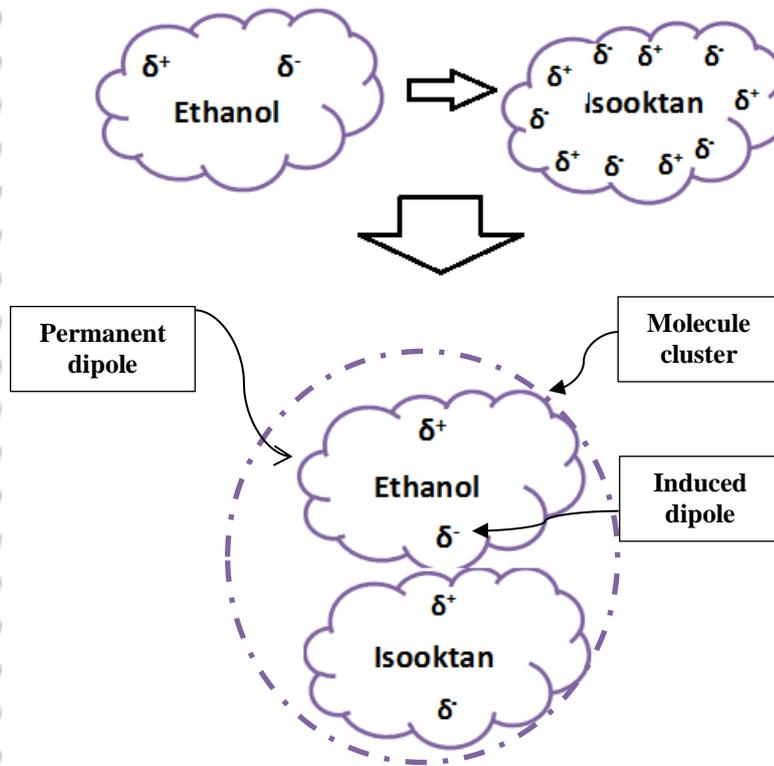
momen dipol yang permanen dan bersifat polar. Interaksi molekuler merupakan interaksi antara molekul satu dengan molekul yang lain sehingga terjadi gaya menarik atau menolak diantara molekul tersebut.

Analisa pembakaran single droplet sebagai pendekatan proses pembakaran didalam ruang bakar sampia saat ini masih dipercaya menghasilkan hasil analisa yang memuaskan. Fenomena spesifik yang sering terjadi pada pembakaran campuran bahan bakar (*non-single fuel substance*) adalah terjadinya fenomena mikro-eksplosion. Fenomena ini terjadi karena perbedaan tekanan uap (titik didih) komponen dalam campuran (Saroso, Hadi; Wardana, ING; Soenoko, Rudy; Hamidi, 2013). Mikro-eksplosion dalam pembakaran droplet menyebabkan pecahnya droplet induk menjadi beberapa droplet anakan yang ukuranya lebih kecil sehingga kejadian ini cenderung mempercepat laju pembakaran (Watanabe et al., 2010). Fenomena ini menguntungkan dalam proses pembakaran sebuah bahan bakar untuk terbakar lebih sempurna (Nur et al., 2016).

Namun demikian fenomena mikro-eksplosion yang terjadi di awal perambatan nyala api cenderung menyebabkan fenomena knocking dalam ruang bakar. Fenomena mikro-eksplosion yang terjadi dalam ruang bakar pada *Internal combustion engine* (IC Engine) cenderung merugikan jika piston belum melewati beberapa derajat setelah titik mati atas, namun menguntungkan jika terjadi setelahnya. Proses pembakaran terjadi lebih cepat pada pembakaran yang disertai dengan dengan mikro-eksplosion (Nur et al., 2016) sehingga berpotensi akan menghasilkan power yang lebih besar.

### 3.2. Kerangka Konsep Penelitian

Etanol merupakan salah satu gugus alkohol polar rantai pendek yang mampu berinteraksi dengan molekul hidrokarbon (iso-oktan) untuk menghasilkan campuran azeotrop (Jeuland et al., 2004). Pada kondisi ini, campuran etanol iso-oktan memiliki satu temperatur pendidihan seperti zat tunggal. Sementara, semua campuran dari unsur liquid memiliki kekuatan tarik antar molekul penyusunnya (Prajapati et al., 2012). Dari dasar konsep tersebut, interaksi molekuler etanol iso-oktan akan menghasilkan kluster molekul yang merupakan gabungan etanol iso-oktan. Sehingga kerangka konsep yang ditawarkan didalam penelitian ini secara bagan disampaikan pada Gambar 3.1 berikut,

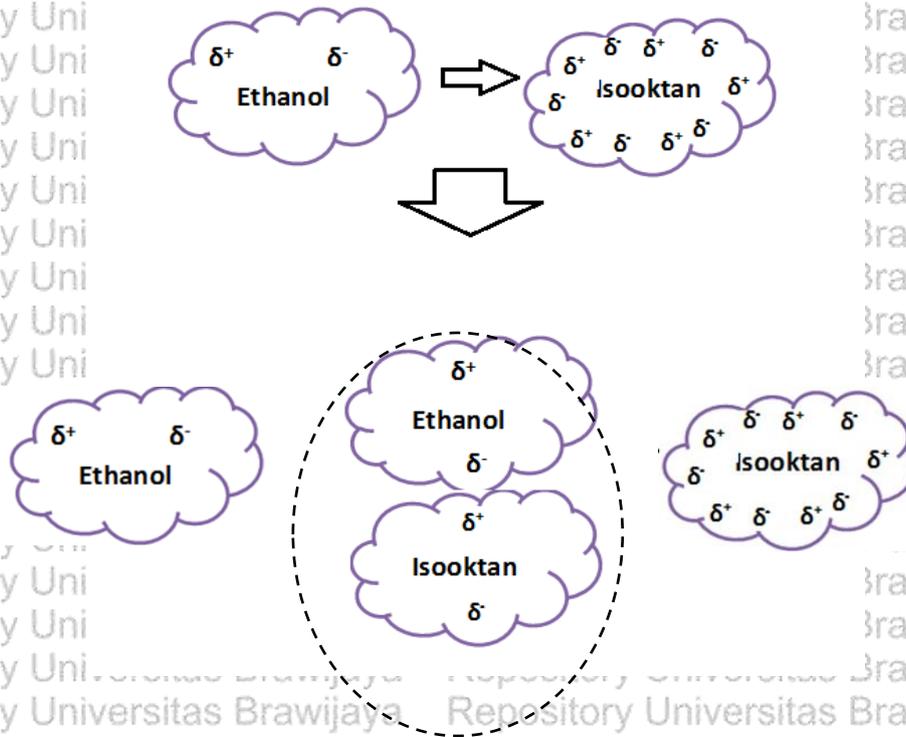


**Gambar 3.1.** Bagan kerangka konsep penelitian

Ketika molekul etanol polar yang memiliki permanen dipol dengan berdekatan dengan molekul iso-oktan non-polar, molekul etanol yang memiliki permanen dipol dengan muatan parsial positif  $\delta^+ = 0,209$  dan negatif  $\delta^- = -0,395$ , akan menginduksi molekul iso-oktan non-polar yang berada di lingkungannya. Muatan parsial iso-oktan yang pada kondisi sebelum terinduksi tersebar merata diseluruh atom penyusunnya akan mengalami polarisasi muatan parsialnya. Sementara sebuah molekul iso-oktan memiliki potensi muatan parsial positif dan negatif masing masing sebesar masing  $\delta^+ = 0,429$  dan  $\delta^- = -0,435$ . Potensi muatan parsial ini jauh lebih besar dari muatan parsial yang dimiliki oleh molekul etanol. Sehingga dalam kondisi terinduksi molekul iso-oktan akan bersifat polar kuat dan akan menarik dan memutus interaksi molekul antar etanol dan berpasangan dengan molekul iso-oktan untuk membentuk klaster molekul baru (etanol iso-oktan). Klaster molekul baru tersebut akan memiliki sifat fisika yang baru dan berbeda dengan sifat fisika molekul penyusunnya.

Pada kondisi campuran tertentu dimana tidak semua molekul etanol atau iso-oktan saling berpasangan, maka molekul-molekul tersebut akan tetap memiliki sifat fisika seperti sebelumnya. Sehingga kondisi campuran tersebut seolah-olah memiliki tiga macam sifat fisika, yaitu sifat fisika etanol, klaster molekul (etanol iso-oktan) dan iso-oktan. Gambaran pemodelan scientific disajikan pada

[Gambar 3.2](#) berikut,



**Gambar 3.2.** Model interaksi molekular dengan kelebihan molekul tak terkuster.

Molekul etanol dan iso-oktane tak terkuster masih memiliki sifat fisika seperti sifat sebelum bercampur.

Etanol polar polar masih berinteraksi dengan molekul etanol lainnya dengan ikatan hidrogenya (*hydrogen bonding*), sementara iso-oktane non-polar berinteraksi dengan molekul iso-oktane yang lain dengan gaya london. Sehingga pada fraksi campuran ini berpotensi menghasilkan *multi stage* kurva destilasi temperatur dan berpotensi terjadi ledakan mikro (*micro-explosion*) pada saat pembakaran droplet campuran.

### 3.3. Hipotesis

Berdasarkan teori yang ada dan konsep yang dibangun, terdapat empat hipotesis sebagai berikut:

1. Campuran etanol iso-oktane pada fraksi campuran tertentu bisa membentuk efek azeotrop yang memiliki RVP lebih tinggi dan temperatur didid rendah
2. Pada komposisi campuran tertentu, terdapat azeotrop point, dimana semua molekul etanol berpasangan/berinteraksi dengan melekul iso-oktane dan membentuk klaster-klaster molekular yang memiliki sifat fisika campuran berbeda dengan zat penyusunnya.
3. Pada pembakaran doplet campuran etanol iso-oktane berpotensi menghasilkan fenomena puffing droplet dan mikro-eksplasion karena kedua molekul pembentuk memiliki perbedaan titik didid yang besar yaitu  $99.8\text{ }^\circ\text{C}$  untuk iso-oktane dan  $78\text{ }^\circ\text{C}$  untuk etanol.
4. Pada saat komposisi campuran tertentu, dimana semua molekul etanol dan iso-oktane berpasangan/berinteraksi membentuk klaster molekular yang bersifat azeotrop sehingga



pada saat proses pembakaran (single droplet) tidak akan (kecil sekali) terjadi fenomena mikro-eksplosion.

5. Gaya interaksi antar molekul didalam klaster molekul campuran etanol iso-oktan berdampak pada fenomena puffing droplet saat pembakaran (single droplet).

## BAB 4. METODE PENELITIAN

### 4.1. Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian di Laboratorium Terpadu Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Magelang Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental sungguhan (*true experimental research*). Penelitian ini dilakukan melalui dua tahapan penelitian. Tahapan penelitian yang pertama adalah mengidentifikasi perubahan temperatur pendidihan dan laju penguapan berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan dengan menggunakan alat destilasi sederhana. Tahapan penelitian yang kedua adalah dengan pengujian pembakaran single droplet berbagai campuran etanol iso-oktan. Analisa model interaksi molekular etanol dan iso-oktan dilakukan untuk mengungkap peristiwa mikroskopis selama pemanasan campuran baham bakar dengan alat destilasi maupun selama proses pembakaran single droplet. Tahapan penelitian disajikan pada [Gambar 4.1](#) Berikut,

Tahap penelitian	Lingkup pekerjaan	Target luaran
Tahap Ke-1	Pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan dengan alat destilasi sederhana. Analisa pemodelan interaksi molekular untuk mengidentifikasi peran induksi etanol polar kepada iso-oktan non-polar	Publikasi 1 (Jurnal 1) tentang peran induksi etanol polar dengan iso-oktan non-polar dalam perubahan sifat fisiknya (temperatur pendidihan dan laju penguapan)
Tahap Ke-2	Identifikasi potensi pembentukan kluster molekul campuran etanol iso-oktan Pengujian pembakaran single droplet untuk memferifikasi fraksi campuran yang membetuk kluster molekul	Publikasi (Jurnal 2) tentang peran kluster molekul dan gaya interaksinya terhadap perilaku pembakaran single droplet (puffing droplet dan mikro-eksplon)

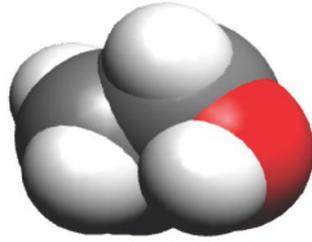
Gambar 4.1 Tahapan pelaksanaan penelitian

## 4.2. Material dan peralatan penelitian

### 4.3.1. Material Penelitian

#### A. Etanol kering/ anhydrous etanol

Etanol ( $C_2H_5OH$ ) yang digunakan untuk penelitian adalah etanol kering murni/ *pure anhydrous etanol* yang belum dilakukan proses denaturasi. Denaturasi (*Fuel grade Etanol*) merupakan proses penambahan sejumlah hydrocarbon tertentu ke dalam *anhydrous etanol*. Gambar molekul etanol disajikan pada Gambar 4.1 berikut,

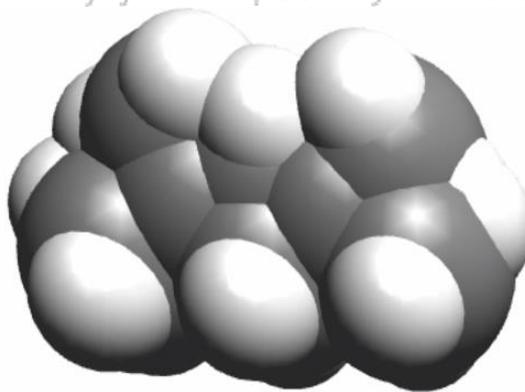


**Gambar 0.1** Susunan molekul etanol

Etanol yang digunakan dalam penelitian disuplai oleh Indo Lab Indonesia dan memiliki kemurnian 99.7 % dan mengandung air  $< 0.05$  %. Etanol ini memiliki massa 46.07 gram/mol dan titik didih  $78$  °C pada kondisi atmosferik.

#### B. Iso-oktan

Iso-oktan dipilih didalam penelitian ini sebagai zat tunggal yang merepresantasikan gasolin. Iso-oktan adalah zat non-polar yang merupakan salah satu isomer dari oktana ( $C_8H_{18}$ ) serta memiliki massa 114,23 gram/mol dan memiliki titik didih  $99,8$  °C pada kondisi atmosferik. Gambar molekul iso oktan disajikan pada Gambar 4.2 berikut,



**Gambar 0.2** Susunan molekul iso-oktan

Iso-oktan yang digunakan dalam penelitian ini disuplai oleh Merck, Jerman dan memiliki kemurnian 99,5 %.



### 4.3.2. Peralatan penelitian

Peralatan penelitian dalam penelitian ini akan digunakan untuk mendapatkan kurva destilasi temperatur dan pembakaran single droplet campuran etanol iso oktan. Peralatan utama dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1 berikut,

**Tabel 0.1** Peralatan utama penelitian

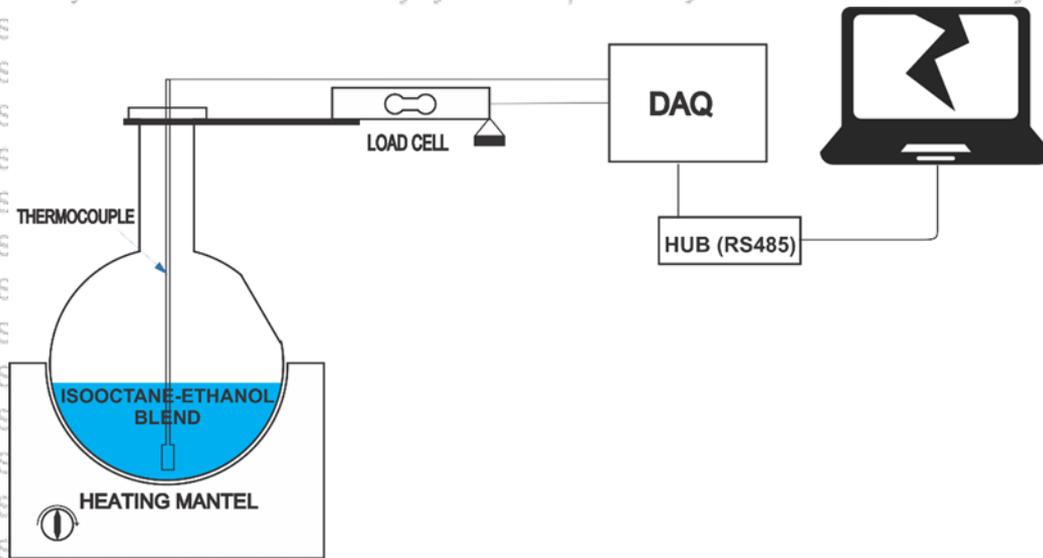
No	Peralatan Utama	Spesifikasi	Fungsi
1.	Electric heating mantel	1000 W	Pemanas bahan bakar
2.	Glass flask	500 cc	Tempat bahan bakar
3.	Thermocouple	Tipe-K	Sensor temperatur
4.	Thermocouple wire	Tipe-K, 0,1 mm	Sensor temperatur/ pemegang droplet
5.	Load cell	1000 gram	Mengukur laju penguapan
6.	Data Aqusisi	TM4-N2RB	Mengolah sinyal
7.	Personal Computer (PC)	DAQ Master V1.6.3	Display data hasil penelitian
8.	Coil heater	Nikelin	Pembakar droplet
9.	High speed video camera	60 fps	Merekam evolusi droplet
10.	Hub RS 485	SCM-US481	Mensuplai data dari DAQ ke PC
11.	Power suplay	12/24V 10 A- DC	Sumber energi listrik DC

### 4.3. Pengujian Temperatur Destilasi dan Laju Penguapan

Pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan berbagai campuran etanol iso-oktan bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan temperatur pendidihan dan perubahan laju penguapan berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan. Hasil pengukuran temperatur destilasi ini adalah sebuah kurva destilasi. Kurva destilasi merepresetasikan hubungan antara waktu pemanasan terhadap perubahan temperaturnya. Sedangkan kurva laju penguapan merupakan hubungan antara prosentase masa campuran bahan bakar selama proses pemanasan. Campuran dua zat bersifat zeotrop apabila campuran memiliki dua temperatur pendidihan, dan bersifat azeotrop jika campuran dua zat tersebut memiliki satu temperatur pendidihan.

#### 4.3.1. Setup pengujian pengukuran temperatur destilasi dan laju penguapan

Pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan dalam penelitian ini menggunakan sistem destilasi sederhana (*simple destilation system*). Set-up penelitian untuk pengujian eksperimental temperatur destilasi dan laju penguapan campuran etanol iso-oktan disajikan pada Gambar 4.3 berikut,

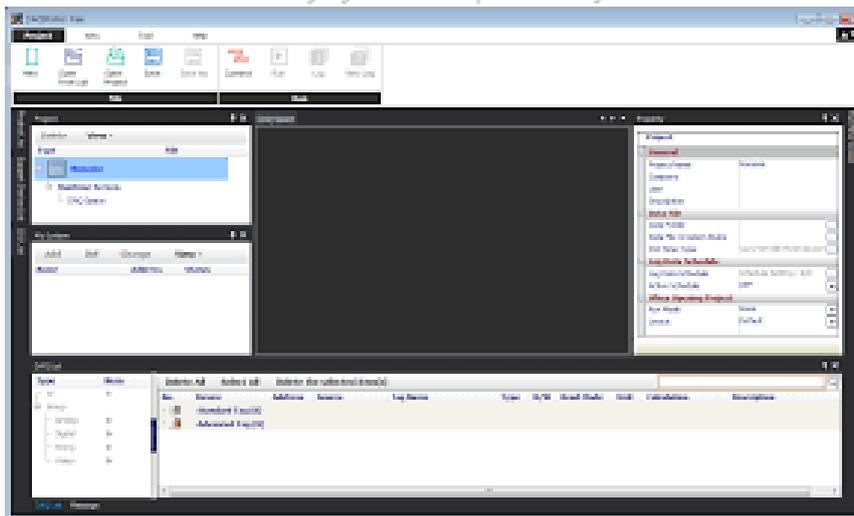


**Gambar 0.3** Set up penelitian untuk pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan

Mantel pemanas elektrik digunakan untuk mensuplay panas ke campuran bahan bakar yang diuji. Campuran bahan bakar ditempatkan didalam sebuah labu (flask) kapasitas 500 cc. Sebuah termocouple tipe K ditempatkan didalam labu untuk mensensor evolusi temperatur selama pemanasan campuran bahan bakar. Ujung sensor thermocouple ditempatkan dengan posisi 1 mm diatas dinding dasar labu untuk memastikan tidak bersentuhan dengan dinding labu. Labu diset dengan posisi tergantung pada lengan load cell dan diset sekitar 1 mm diatas permukaan mantel pemanas untuk mengukur laju penguapan campuran bahan bakar selama pemanasan berdasar laju penurunan masa bahan bakar. Sinyal perubahan masa dan evolusi temperatur campuran bahan bakar diproses oleh data aqusisi (autonic) dan selanjutn ditampilkan di personal komputer melalui sebuah hub (RS 485).

#### 4.3.2. Pengambilan dan pengolahan data pengujian temperatur destilasi dan laju penguapan

Pengambilan data hasil pengujian temperatur dan laju penguapan dilakukan dalam satu tahapan pengambilan data. Volume campuran etanol iso-oktan ditetapkan sebesar 200 cc setiap pengambilan data uji. Mantel pemanas elektrik diset tetap pada skala 6 dari 12, untuk memastikan bahwa pemberian fluks panas ke cemua fraksi campuran tetap. Data aqusisi diset untuk mengirimkan perubahan temperatur dan masa campuran bahan bakar setiap 5 detik. Pengesetan pengiriman data ini dilakukan melalui program DAQ MASTER pada personal computer, seperti terlihat pada [Gambar 4.4](#) berikut,



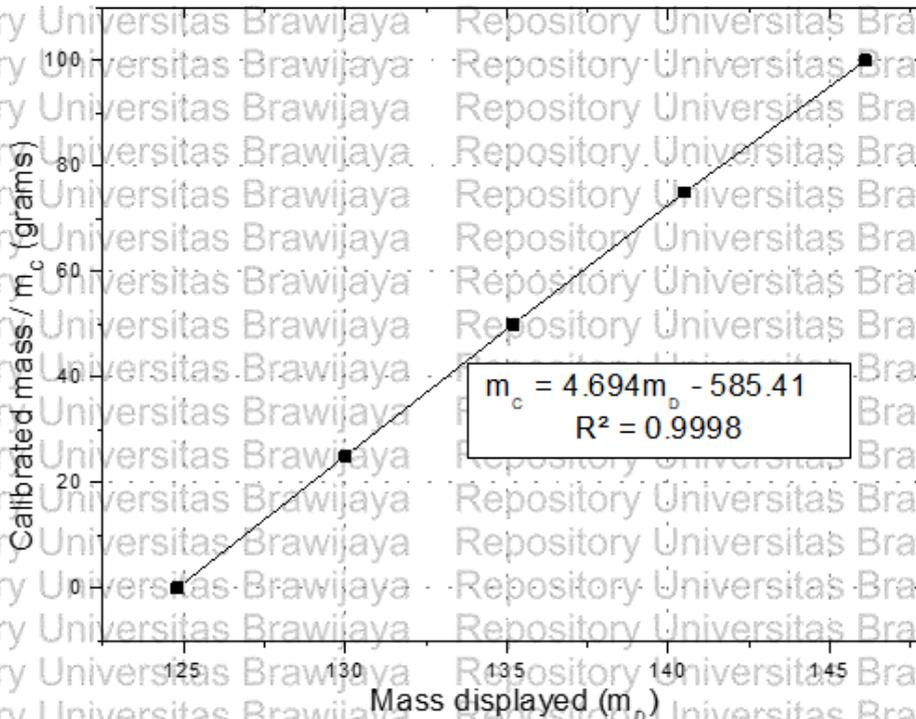
**Gambar 0.4** Contoh pengesetan pengiriman data di DAQ MASTER

Pengambilan data temperatur destilasi dan laju penguapan dilakukan sampai volume sisa campuran bahan bakar sebesar  $\pm 30$  cc (15%). Hal ini dilakukan untuk keamanan labu pemanas dari pemanasan yang berlebih jika dilakukan pengambilan data sampai habis semua campuran bahan bakar.

Hasil rekaman DAQ Master Autonic pada personal computer disimpan dalam bentuk file CSV (comma-separated value), yang bisa di buka melalui program excel. File csv ini kemudian diolah dengan program excel dan origin 6.0 untuk menampilkan grafik dengan kualitas dan tampilan yang lebih jernih.

#### 4.3.3. Kalibrasi load cell

Instrumen yang digunakan untuk merekam perubahan masa campuran bahan bakar dalam penelitian ini adalah menggunakan sebuah load cell ([Gambar 4.1](#)). Load cell tidak langsung memberikan sinyal massa ke dalam data aqusi melainkan hanya sebuah sinyal yang berupa tegangan listrik (beda potensial). Kalibrasi load cell dilakukan dengan menggunakan sebuah pemberat yang telah terdefinisi masanya yaitu 0, 25, 50, 75, dan 100 gram secara bertahap dan merekam setiap respon yang ditampilkan pada personal computer. Hasil plot grafik kalibrasi load cell disajikan pada [Gambar 4.5](#) berikut,



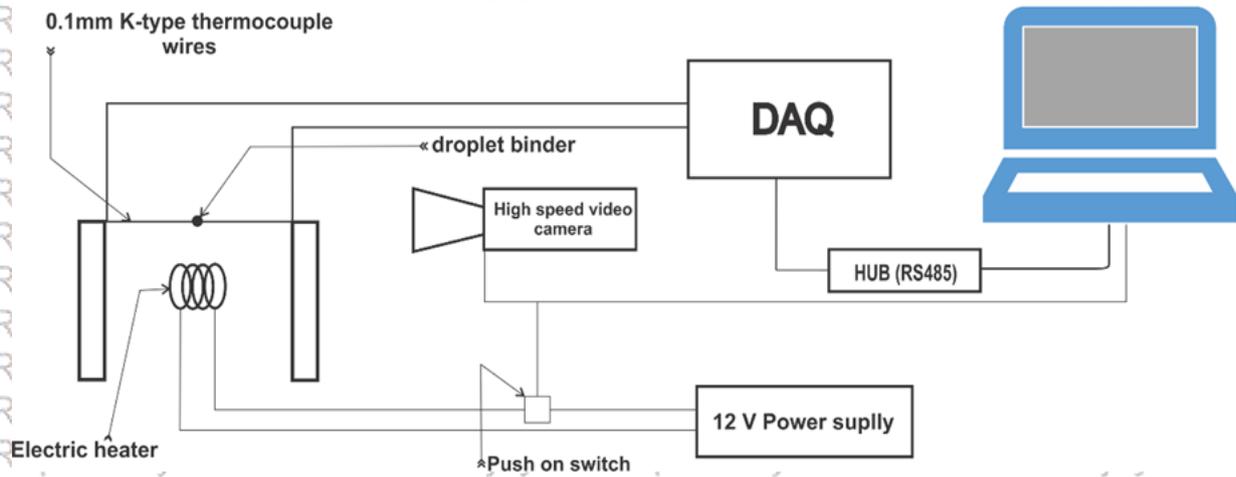
**Gambar 0.5** Kalibrasi load cell dan persamaan masa terkalibrasi vs masa terdisplay

Dari Gambar 4.6 tergambar bahwa load cell yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan linieritas yang baik dengan  $m_c = 4,694 m_d - 585,41$ , dengan  $R^2 = 0,9998$ . Dimana  $m_c$  merupakan masa terkalibrasi (sesungguhnya), sedangkan  $m_d$  merupakan masa yang diluncurkan langsung oleh data aqusisi di PC.

#### 4.4. Pengujian pembakaran single droplet

##### 1.4.1. Setup pengujian pengukuran temperatur destilasi dan laju penguapan

Pembakaran single droplet merupakan salah satu analisis yang menarik untuk mengkaji fenomena pembakaran bahan bakar (Hoxie et al., 2014). Lingkungan pengambilan data untuk pembakaran droplet ini dilakukan pada ruangan dengan pengkondisian udara menggunakan AC window dan diset pada temperatur 22° C. Set up penelitian untuk pembakaran single droplet disajikan pada Gambar 4.6 berikut,



**Gambar 0.6** Setup pengujian pembakaran single droplet.

Kawat termokopel tipe K dengan diameter 0,1 mm dibentangkan secara horisontal dan ditopang oleh dua buah penyangga seperti pada gambar. Sensor termokopel sekaligus digunakan sebagai pemegang droplet (droplet binder) digunakan untuk merekam evolusi temperatur selama pembakaran droplet. Sebuah lilitan nikelin dengan diameter 0,5 mm digunakan sebagai pemanas untuk menginisiasi pembakaran campuran bahan bakar. Video kamera kecepatan tinggi diset dengan jarak tertentu dan tetap untuk merekam perubahan droplet dan visualisasi fenomena pembakaran droplet campuran bahan bakar secara konsisten.

#### 1.4.2. Analisa interaksi molecular campuran etanol iso-oktan.

Berdasarkan hipotesis bahwa etanol polar mampu menginduksi iso-oktan non-polar, maka Analisa intermolekuler berbagai fraksi campuran diperlukan untuk memprediksi komposisi pasangan pembentuk kluster molekul. Komposisi prediksi pasangan molekul pembentuk kluster kemudian harus di konversi menjadi berbasis volume. Dengan asumsi bahwa pencampuran dilakukan pada temperatur kamar (25 °C) dan tekanan atmosferik, dengan masa relatif,  $M_r$   $C_8H_{18}$  dan  $M_r$   $C_2H_5OH$  masing-masing sebesar 114,23 gram/mol dan 46,07 gram/mol, dengan masa iso-oktan dan etanol masing-masing sebesar 0,696 kg/L dan 0,792 kg/L, maka campuran satu molekul iso-oktan dan satu molekul etanol sebanding dengan 164,1236 v/v dan 58,1692 v/v. Sehingga pasangan kluster satu molekul iso-oktan dan satu molekul etanol sebanding dengan fraksi 73,8322 % v/v iso-oktan dan 26,1679 % v/v etanol.

#### 1.4.3. Pengujian pembakaran single droplet.

Pembentukan droplet bahan bakar dilakukan secara manual menggunakan *Conventional Insulin Syringe* (1 mL) dengan 100 strip yang menunjukkan volume cairan didalam syringe, sehingga setiap satu strip menunjukkan 10 $\mu$ L (0,00001 L). Untuk meminimalisir ketidakpastian

hasil dan data, ukuran droplet ditetapkan pada diameter  $1.0 \pm 0,1$  mm. Campuran etanol iso-oktan yang digunakan dalam pembakaran single droplet ini adalah menggunakan fraksi etanol 10, 15, 20, 25, 30, 40 50, 60, 70, 80, dan 90 % v/v (basis volume).

Inisiasi pembakaran yang akan digunakan dalam penelitian pembakaran droplet ini adalah menggunakan pemanas nikelin dengan diameter 0,5 mm dengan sumber listrik DC 12 Volt, 10 A. Pengendalian heater dilakukan dengan sebuah sakelar push on (*push on switch*) yang sekaligus untuk mengaktifasi kamera kecepatan tinggi untuk mulai merekam nyala api dari pembakaran droplet.

#### 4.5. Penyajian Data Hasil Penelitian

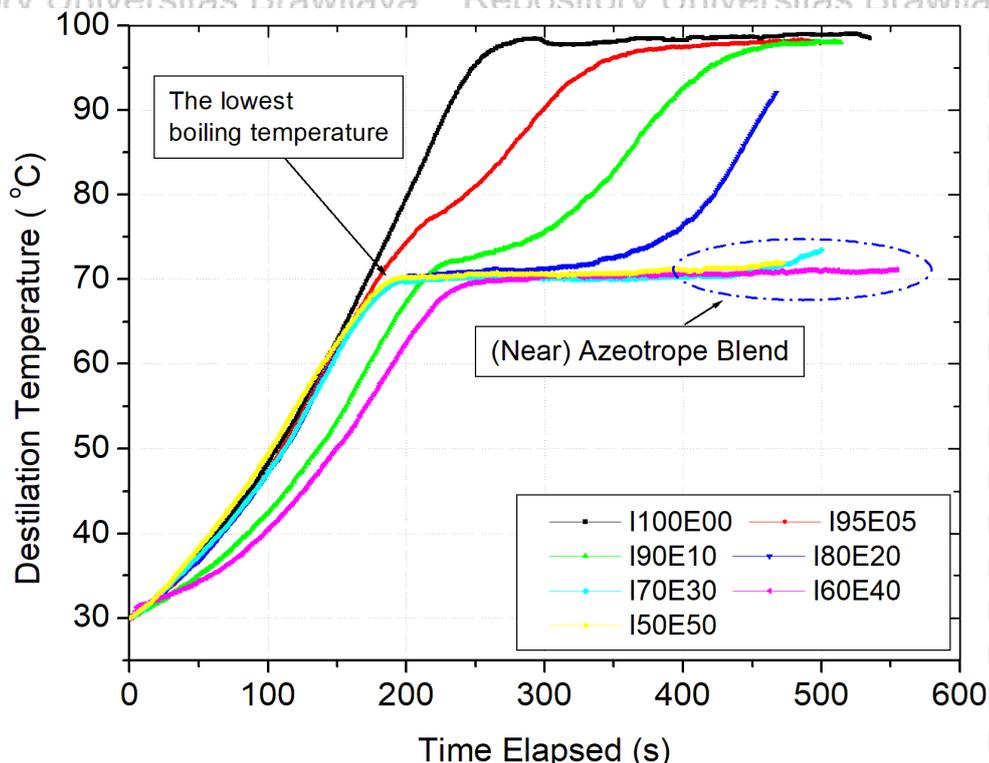
Hasil pengukuran dan perhitungan disajikan dalam bentuk grafik menggunakan software Origin 6.0. Origin 6.0 dipilih karena kemampuannya untuk menampilkan grafik dengan kualitas visual gambar yang jernih (OriginLab, 2003). Software *Video to JPG Converter* juga digunakan untuk mengolah data dari rekaman video menjadi beberapa gambar format JPG. Software Corel Draw X7 dan ImageJ juga digunakan untuk menscale-up gambar JPG dan mengukur perubahan diameter droplet dan nyala api pembakaran.

Sementara untuk penggambaran model molekular campuran bahan bakar dan mengidentifikasi sifatnya menggunakan software Avogadro versi 1.0.1 dan chemdoodle versi online. Analisa Interaksi molekular diharapkan mampu mengungkap fenomena perubahan sifat fisika dan karakter dari berbagai fraksi campuran bahan bakar. Perhitungan Analisa hubungan interaksi molekular menggunakan program Microsoft Excell 2016.

## BAB 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1. Temperatur Destilasi Campuran Etanol Iso-oktan

Pengujian temperatur destilasi campuran etanol iso-oktan ini bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan sifat fisika khususnya temperatur didih campuran etanol iso-oktan. Pengujian dilakukan memberika panas ke dalam campuran etanol iso-oktan yang dimasukan didalam labu sebesar 200 cc. Panas yang diberikan disuplai oleh pemanas elektrik (*electric heater mantel*) dengan level panas dipertahankan konstan. Pengukuran temperatur campuran etanol iso-oktan selama proses pemanasan dengan menggunakan termokopel tipe K yang dicelupkan ke cairan campuran bahan bakar namun dijaga untuk tidak menempel didinding labu (*Gambar 4.3*). Campuran yang digunakan dalam pengujian ini adalah fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 % v/v (basis volume). Hasil pengujian temperatur destilasi campuran etanol iso-oktan disajikan pada *Gambar 5.1* dan *5.2* berikut,



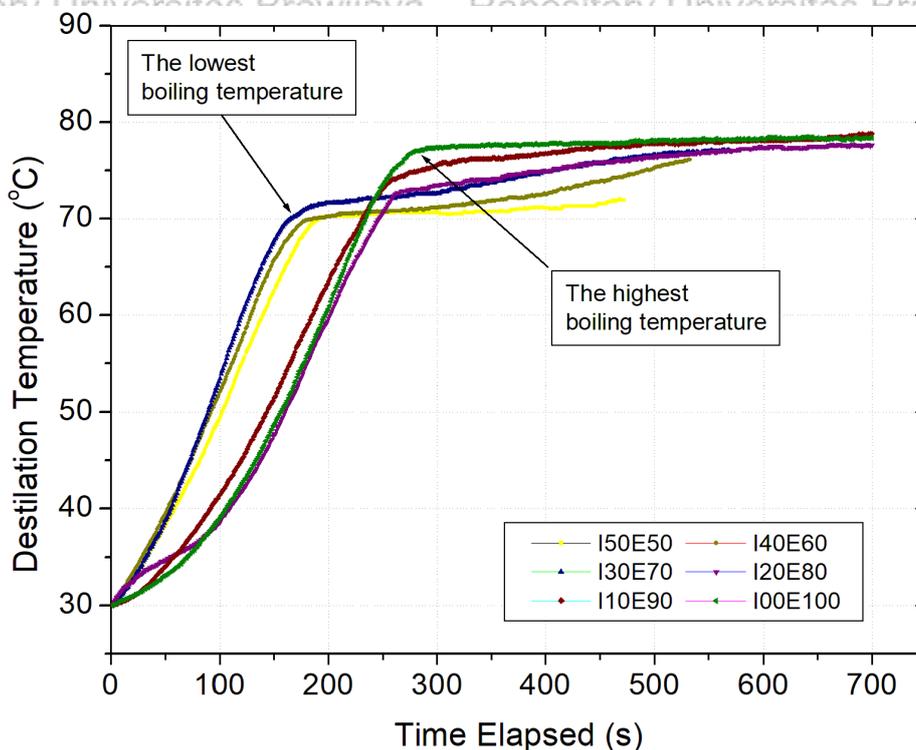
**Gambar 5.1** Temperatur destilasi fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40, dan 50 v/v

*Gambar 5.1* menunjukkan kurva temperatur distilasi fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40 dan 50% v/v. Dari *Gambar 5.1* tersebut menunjukkan bahwa campuran etanol 5, 10 dan 20% v/v memiliki dua temperatur pendidihan. Tempertur pendidihan pertama terjadi pada area

temperatur pendidihan etanol, sementara pendidihan kedua terjadi pada area temperatur pendidihan iso-oktan. Fakta-fakta ini menunjukkan bahwa campuran etanol hingga 20% adalah zoetrope. Sementara campuran etanol 30, 40 dan 50% berada dalam kondisi (*near*) azeotrop karena nampaknya memiliki titik didih yang konstan. Fenomena tersebut relevan dengan penelitian Jeuland (2004), yang menyatakan bahwa campuran azeotrop dari dua atau lebih zat menghasilkan suhu didih rendah dan konstan (Jeuland et al., 2004).

Pada campuran etanol 30%, 40% dan 50% terlihat kemiripan sifat fisika campuran yaitu campuran bahan bakar mulai mendidih dibawah area temperatur pendidihan etanol (78 °C) yaitu sekitar 70° C. Pada fraksi campuran ini menunjukkan bahwa terjadi perubahan sifat fisika (temperatur pendidihan) campuran yang lebih rendah dari temperatur pendidihan kedua zat penyusunnya.

Hasil pengukuran temperatur distilasi untuk etanol fraksi tinggi (50%, 60%, 70%, 80%, 90% & 100%) disajikan pada Gambar 5.2 berikut,



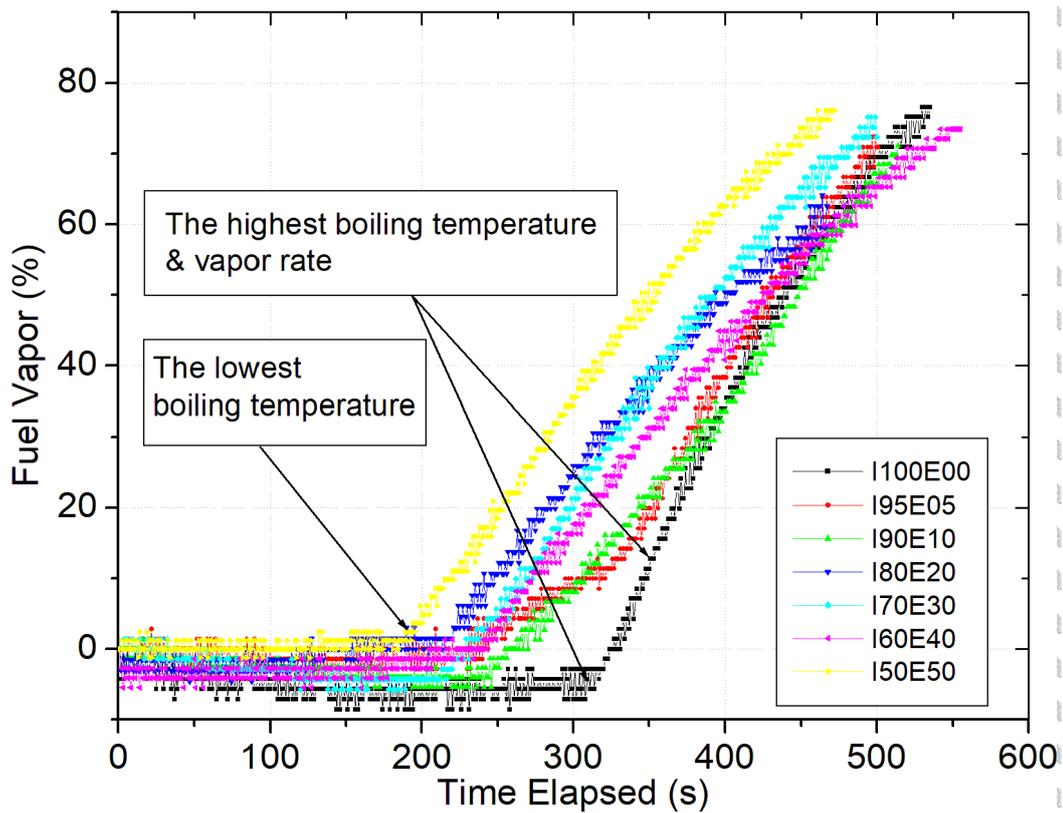
**Gambar 5.2** Temperatur destilasi fraksi etanol 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 v/v

Dari Gambar 5.2 menjelaskan bahwa pada campuran etanol fraksi tinggi terlihat fenomena efek (*near*) azeotrop pada semua fraksi campuran. Namun demikian, Gambar 5.2 juga menunjukkan bahwa sedikit terjadi peningkatan temperatur pendidihan pada campuran etanol fraksi tinggi selama proses pendidihan. Pada konsentrasi tinggi ini, temperatur didih campuran etanol iso-oktan terlihat tidak konstan meskipun tidak menunjukkan dua tahap proses pendidihan. Gambar 5.1 dan 5.2 memberikan kesimpulan informasi bahwa semua

pada fraksi campuran tinggi (lebih dari 30%) temperatur pendidihan campuran etanol iso-oktan lebih rendah dari temperatur pendidihan kedua zat penyusunnya.

## 5.2. Laju penguapan campuran etanol iso-oktan

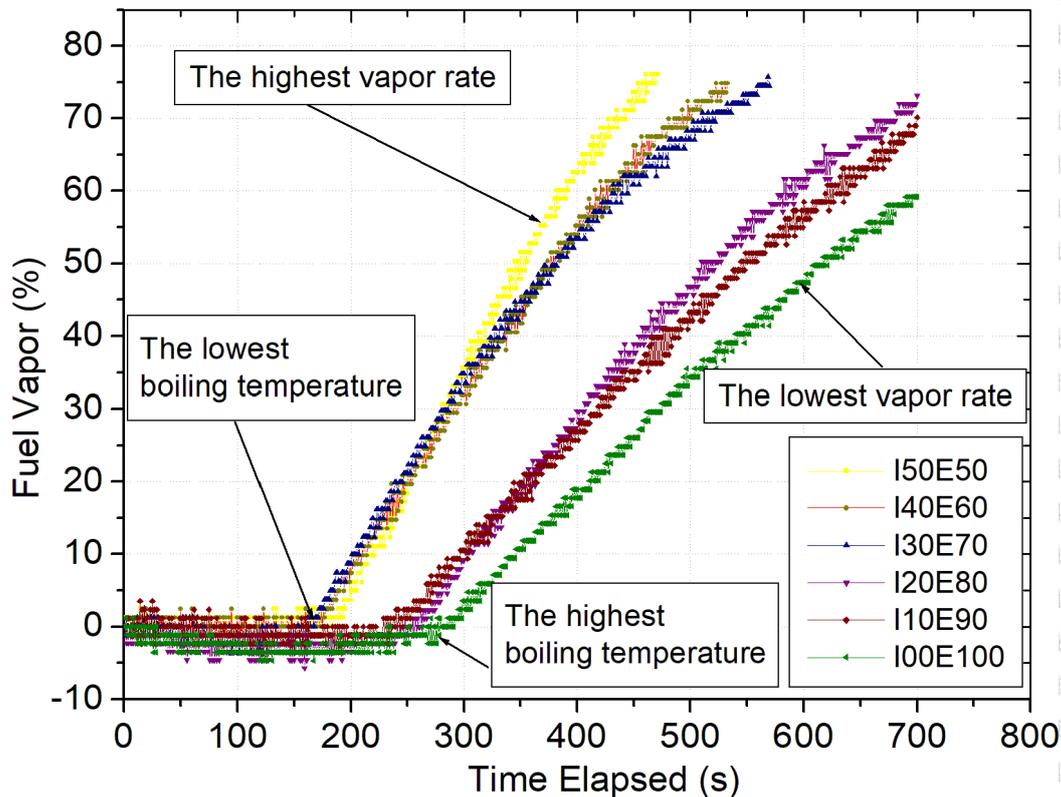
Penguapan merupakan fenomena hilangnya atau putusnya gaya interaksi antar molekul dalam cairan. Kekuatan gaya ikatan antara molekul cairan ditentukan oleh jenis ikatan interaksi antar molekul. Hasil pengujian laju penguapan bahan bakar dari campuran etanol iso-oktan dikelompokkan menjadi campuran fraksi etanol rendah dan tinggi, yaitu, 0-50% v/v dan 50-100% v/v. Grafik laju penguapan campuran etanol fraksi rendah disajikan pada Gambar 5.3 sedangkan yang tinggi disajikan pada Gambar 5.4, berikut,



**Gambar 5.3** Laju penguapan campuran fraksi etanol 0, 5, 10, 20, 30, 40, dan 50 v/v

Gambar 5.3 menunjukkan bahwa iso-oktan murni (I100 E00) memiliki rejim pemanasan sensible yang paling panjang dan laju penguapan tertinggi. Karakteristik ini berkorelasi dengan temperatur pendidihan dan entalpi penguapan dari campuran bahan bakar (Tabel 2.1). Penambahan etanol 10% sampai 50% v/v ke dalam iso-oktan cenderung menurunkan rejim pemanasan sensible campuran bahan bakar. Namun demikian campuran fraksi etanol sampai dengan 20% menunjukkan laju penguapan yang kurang stabil. Hal ini terlihat pada Gambar 5.3 pada garis miring (laju penguapan) yang tidak lurus.

Laju penguapan campuran etanol iso-oktan untuk fraksi tinggi disajikan pada Gambar 5.4 berikut,

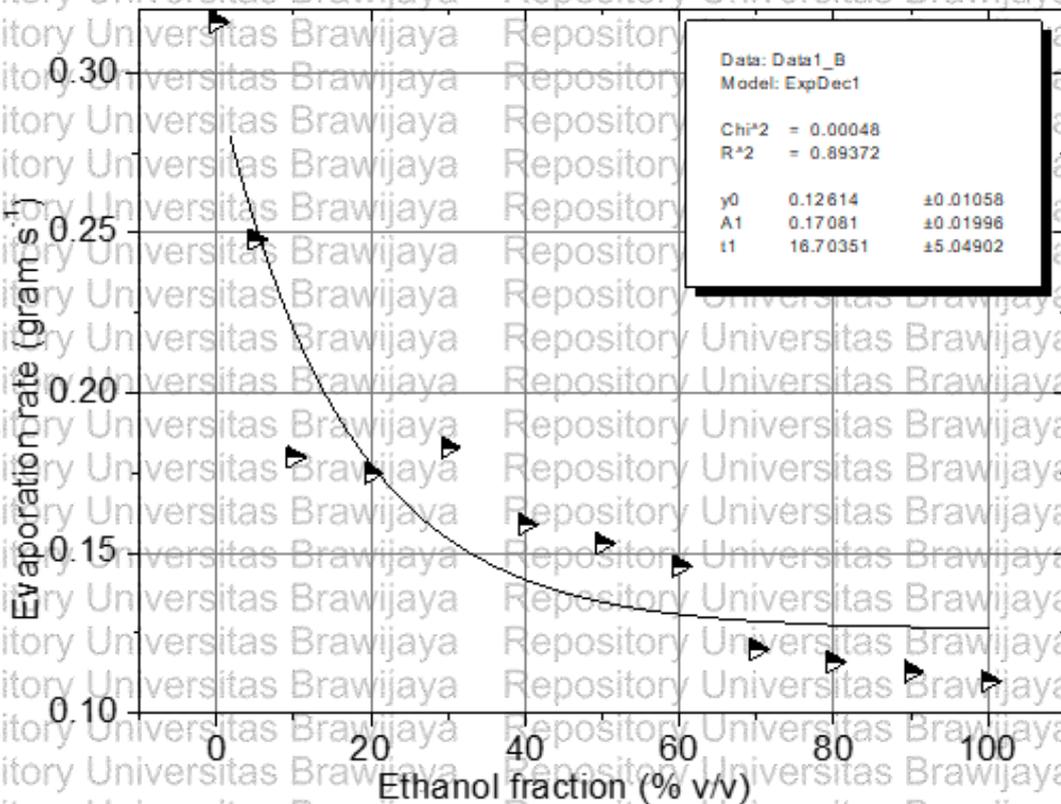


Gambar 5.4 Laju penguapan campuran fraksi etanol 50, 60, 70, 80, 90, dan 100 v/v

Gambar 5.4 menunjukkan bahwa etanol murni menghasilkan laju penguapan terendah. Fenomena ini karena etanol memiliki entalpi penguapan tinggi 924,2 kJ/kg (Tabel 2.1) sementara iso-oktan memiliki entalpi penguapan 308 kJ/kg. Gambar 5.4 juga menunjukkan bahwa meningkatnya fraksi etanol cenderung memperpendek rejim pemanasan sensible. Terdapat dua kelompok fraksi campuran yaitu fraksi etanol antara 50-70% v/v menunjukkan laju penguapan yang lebih besar dari kelompok fraksi etanol 80-100 % v/v. Namun demikian Gambar 5.4 juga menunjukkan laju penguapan untuk fraksi 50 % v/v memperlihatkan laju penguapan yang paling besar dan menurun sejalan dengan peningkatan fraksi etanol.

Dari Gambar 5.3 dan 5.4 dapat diambil kesimpulan bahwa pencampuran etanol iso-oktan cenderung memperpendek rejim pemanasan sensible. Hal ini juga berkorelasi dengan simpulan dari pembahasan temperatur destilasi campuran bahwa pencampuran etanol iso-oktan cenderung menurunkan temperatur pendidihan dibawah temperatur pendidihan kedua zat penyusunnya. Sementara laju penguapan campuran etanol iso-oktan berkorelasi dengan entalpi penguapannya. Laju penguapan campuran etanol iso-oktan menurun sejalan dengan meningkatnya fraksi campuran etanol.

Laju penguapan campuran etanol iso-oktan untuk berbagai fraksi campuran ditunjukkan pada Gambar 5.5 berikut,

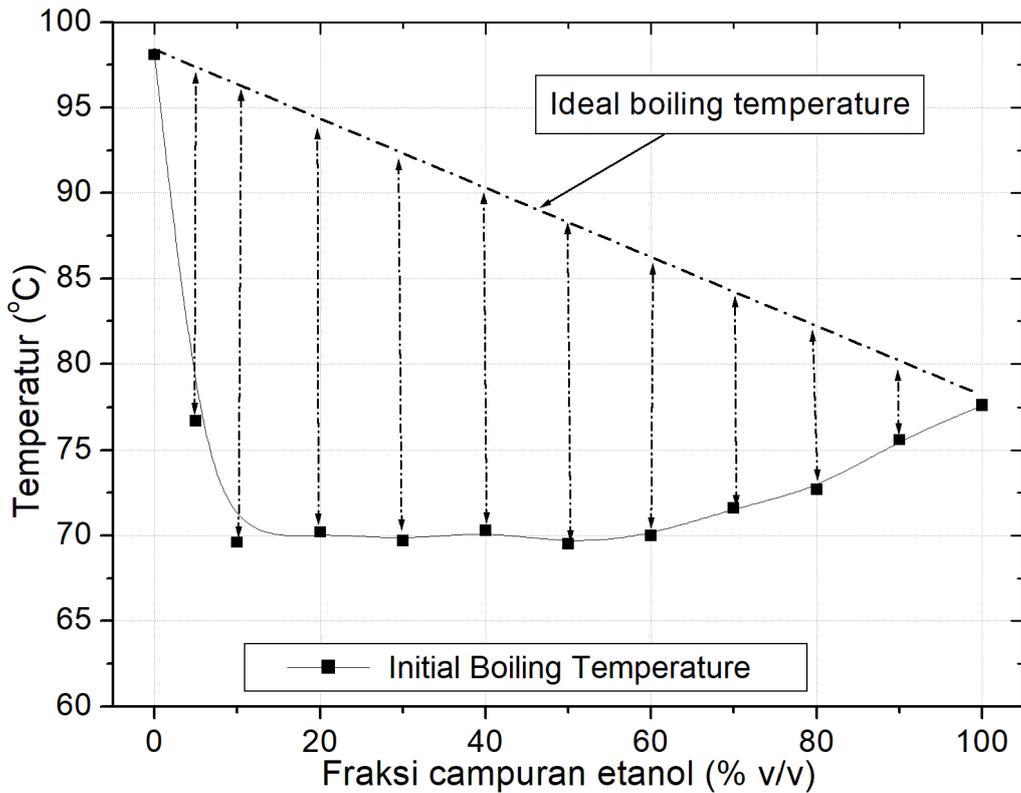


**Gambar 5.5** Rerata laju penguapan campuran etanol iso-oktan

Gambar 5.5 menunjukkan bahwa laju penguapan campuran etanol iso-oktan menurun secara eksponensial sejalan dengan naiknya fraksi etanol campuran. Entalpi penguapan etanol yang tinggi (924,2 kJ/kg) dibanding dengan iso-oktan (308 kJ/kg) memerlukan energi yang lebih banyak untuk menguapkan tiap satuan unit masa. Sementara energi yang diberikan kedalam campuran etanol iso-oktan dipertahankan konstan, sehingga campuran dengan fraksi etanol tinggi membutuhkan satuan unit waktu yang lebih banyak. Namun demikian penurunan laju penguapan tidak menunjukkan hubungan yang linier terhadap kenaikan fraksi etanol melainkan menurun secara eksponensial.

### 5.3. Temperatur didih campuran etanol iso-oktan

Temperatur didih berbagai campuran etanol iso-oktan ditentukan ketika ada perubahan drastis dalam kurva uap bahan bakar (Gambar 5.1 dan Gambar 5.1). Temperatur didih berbagai fraksi campuran iso-oktan etanol ditunjukkan pada Gambar 5.5 berikut,



**Gambar 5.6** Temperatur didih berbagai campuran etanol iso-oktan

Pencampuran etanol dengan iso-oktan sampai 20% menunjukkan efek yang sangat signifikan terhadap penurunan temperatur didih. Fakta ini selaras dengan hasil dari Oktavian dkk. (2013) dan Anderson dkk. (2010) yang menyatakan bahwa tekanan uap iso-oktan meningkat secara signifikan dengan penambahan sedikit etanol (Andersen et al., 2010; Oktavian et al., 2013).

Gambar 5.6 mengilustrasikan bahwa terjadi penyimpangan hukum Raoult (Persamaan 1) untuk campuran etanol polar dalam iso-oktan non-polar. Gambar 5.6 juga menunjukkan bahwa deviasi terbesar dari temperatur campuran ideal terjadi pada 10 hingga 20% v/v campuran etanol. Hasil ini menyimpang dari temuan Andersen et al. (2010) tentang tekanan uap dari campuran yang menyatakan bahwa penyimpangan terbesar terjadi pada konsentrasi campuran sekitar 50% (Andersen et al., 2010). Namun, hasil ini sesuai dengan penelitian Chen & Stone (2011) yang melaporkan bahwa penyimpangan temperatur terbesar terjadi ketika pencampuran etanol dalam iso-oktan pada fraksi etanol 15-20% v/v (L. Chen & Stone, 2011). Penyimpangan ini terjadi karena Andersen dkk. (2010) menggunakan campuran bensin-etanol Namun demikian, Gambar 11 menunjukkan suhu terendah yang terjadi pada fraksi campuran etanol 40% v/v., Sedangkan bensin merupakan bahan bakar cair yang tersusun oleh multi-zat, sehingga memiliki rentang temperatur pendidihan yang lebar.

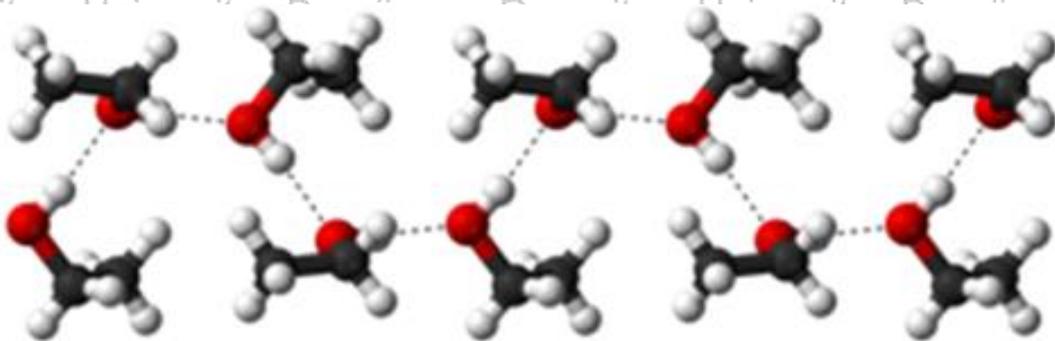
#### 5.4. Potensi interaksi molekuler campuran etanol iso-oktan

Interaksi molekuler sangat dipengaruhi oleh kekuatan menarik atau menekan antara molekul atau atom non-ikatan. Interaksi molekuler disebut interaksi non-kovalen atau intermolekul, sehingga interaksi molekuler bukanlah ikatan. Cairan yang memiliki suhu didih tinggi memiliki interaksi molekuler yang kuat. Sementara etanol merupakan hidrokarbon polar karena memiliki gugus hidroksil pada salah satu ujungnya, sedangkan iso-oktan adalah hidrokarbon non-polar. Gugus hidroksil ini menyebabkan etanol menjadi polar karena memiliki muatan parsial yang tinggi pada masing-masing atom O dan H (Tabel 5.1) menyebabkan ikatan hidrogen antara molekul etanol (Gambar 5.7). Distribusi muatan parsial atom-atom dalam molekul etanol dan model interaksi molecular yang dihasilkan software Avogadro disajikan pada Table 5.1 dan Gambar 5.7 berikut,

**Tabel 5.1.** Distribusi sifat muatan parsial atom etanol.

	Type	Element	Valence	Formal Charge	Partial Charge
Atom 1	C3	C	4	0	-0.042
Atom 2	C3	C	4	0	0.041
Atom 3	HC	H	1	0	0.025
Atom 4	HC	H	1	0	0.025
Atom 5	HC	H	1	0	0.025
Atom 6	O3	O	2	0	-0.395
Atom 7	HC	H	1	0	0.055
Atom 8	HC	H	1	0	0.055
Atom 9	HO	H	1	0	0.209

Tabel 5.1 menunjukkan bahwa atom O memiliki muatan parsial negative ( $\delta^-$ ) sebesar -0.395 dan atom H gugus hidroksil (atom 9) memiliki muatan parsial positif ( $\delta^+$ ) sebesar 0.209. Perbedaan polaritas yang besar ini (0.604) yang menyebabkan etanol bersifat polar, sehingga menghasilkan model tumpukan molekul seperti Gambar 5.7 berikut,



**Gambar 5.7** Model tumpukan molekul cairan etanol polar.

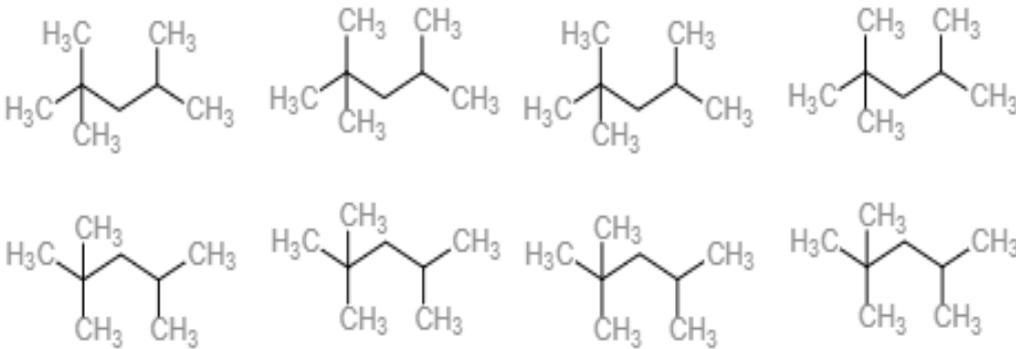
Dari Gambar 5.7 menunjukkan bahwa semua molekul etanol memiliki interaksi (*hidrogen bonding*) dengan molekul etanol yang lain. Fenomena inilah yang menyebabkan etanol memiliki temperatur didih yang jauh lebih tinggi disbanding dengan gugus hidrokarbon dengan rantai C yang sama. Sementara molekul iso-oktan memiliki sifat yang berbeda dengan molekul etanol. Muatan parsial molekul iso-oktan tersebar merata di seluruh atom-atom penyusun molekul iso-oktan seperti terlihat pada Table 5.2 berikut,

**Tabel 5.2.** Distribusi sifat muatan parsial atom etanol

	Type	Element	Valence	Formal Charge	Partial Charge
Atom 1	C3	C	4	0	0.060
Atom 2	C3	C	4	0	-0.037
Atom 3	HC	H	1	0	0.023
Atom 4	CH	H	1	0	0.023
Atom 5	HC	H	1	0	0.023
Atom 6	C3	C	4	0	-0.046
Atom 7	C3	C	4	0	-0.046
Atom 8	HC	H	1	0	0.027
Atom 9	HC	H	1	0	0.027
Atom 10	C3	C	4	0	-0.063
Atom 11	HC	H	1	0	0.023
Atom 12	HC	H	1	0	0.023
Atom 13	HC	H	1	0	0.023
Atom 14	C3	C	4	0	-0.060
Atom 15	HC	H	1	0	0.023
Atom 16	HC	H	1	0	0.023
Atom 17	HC	H	1	0	0.023
Atom 18	C3	C	4	0	-0.060
Atom 19	HC	H	1	0	0.023
Atom 20	HC	H	1	0	0.023
Atom 21	HC	H	1	0	0.023
Atom 22	C3	C3	4	0	-0.063
Atom 23	HC	H	H	0	0.030
Atom 24	HC	H	H	0	0.023
Atom 25	HC	H	H	0	0.023
Atom 26	HC	H	H	0	0.023

Molekul iso-oktan memiliki dua puluh enam atom dengan muatan parsial tersebar merata di seluruh atom seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.2. Akibatnya, iso-oktan merupakan kelompok non-polar dari rantai panjang hidrokarbon (2,2,4-Trimethylpentane) karena memiliki perbedaan muatan parsial kecil. Temperatur didih yang tinggi dari iso-oktan

adalah karena rantai panjangnya ( $C_5$ ) menciptakan gaya van der Waals yang menarik molekul satu sama lain seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 5.8](#). Namun, [Tabel 5.2](#) menunjukkan bahwa iso-oktan memiliki potensi muatan parsial yang besar ( $\delta^+ = 0,429$  dan  $\delta^- = -0,435$ ) yang berasal dari jumlah masing-masing muatan parsial positif dan negatif. Muatan parsial potensial yang besar ini bisa muncul ketika iso-oktan terinduksi oleh molekul yang memiliki momen dipol yang besar.



**Gambar 5.8** Model tumpukan molekul cairan iso-oktan non-polar.

Dari deskripsi potensi interaksi molekuler di atas dapat disimpulkan bahwa molekul polar etanol yang memiliki dipol permanen akan menginduksi molekul non-polar iso-oktan, dan merubah sifat fisika iso-oktan dari cairan non-polar menjadi cairan polar (*induce dipole*). *Induce dipole* dari molekul iso-oktan memiliki potensi tingkat ke-polaran yang besar karena memiliki potensi beda keelektronegatifan sebesar 0,864 ( $\delta^+ = 0,429$  dan  $\delta^- = -0,435$ ).

### 5.5. Pembentukan klaster molekul campuran etanol iso-oktan berdasar analisis mol

Pembahasan pada [Sub-bab 5.4](#) menjelaskan bahwa interaksi molekul etanol polar dengan iso-oktan non-polar, memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul yang memiliki fisik yang berbeda dengan sifat fisik molekul pembentuknya. Berdasarkan propertis etanol pada [Bab 2](#), diketahui bahwa masa relatif molekul etanol dan iso-oktan adalah 46,07 gram. Mol<sup>-1</sup> dan 114,23 gram.mol<sup>-1</sup>, dengan kerapatan cairan pada suhu kamar dan tekanan atmosfer masing-masing sebesar 0,792 kg.L<sup>-1</sup> dan 0,696 kg.L<sup>-1</sup>. Perhitungan mol ( $n$ ) menggunakan [Persamaan 5](#) berikut,

$$n = \frac{Mr}{m} \quad (5-5)$$

Dimana,  $Mr$  adalah masa relatif molekul dan  $m$  adalah masa molekul. Sementara perhitungan volume ( $V$ ) dirumuskan dengan [Persamaan 6](#) berikut,

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (5-6)$$

Dimana  $\rho$  merupakan kerapatan cairan (kg/L), sehingga untuk 1 mol etanol dan iso-oktan diperoleh perhitungan sebagai berikut,

Untuk perhitungan masa untuk 1 mol etanol,

$$n_{\text{etanol}} = \frac{Mr_{\text{etanol}}}{m_{\text{etanol}}}$$

$$m_{\text{etanol}} = \frac{Mr_{\text{etanol}}}{1} = \frac{46,07}{1} = 46,07 \text{ gram}$$

Sedangkan untuk perhitungan volume untuk 1 mol etanol,

$$V_{\text{etanol}} = \frac{m_{\text{etanol}}}{\rho_{\text{etanol}}} = \frac{46,07 \text{ gram}}{792 \text{ gram/L}} = 0,0582 \text{ L}$$

Sementara, untuk perhitungan masa untuk 1 mol iso-oktan,

$$n_{\text{iso-oktan}} = \frac{Mr_{\text{iso-oktan}}}{m_{\text{iso-oktan}}}$$

$$m_{\text{iso-oktan}} = \frac{Mr_{\text{iso-oktan}}}{1} = \frac{114,23}{1} = 114,23 \text{ gram}$$

Maka, untuk perhitungan volume untuk 1 mol iso-oktan,

$$V_{\text{iso-oktan}} = \frac{m_{\text{iso-oktan}}}{\rho_{\text{iso-oktan}}} = \frac{114,23 \text{ gram}}{696 \text{ gram/L}} = 0,1641 \text{ L}$$

Sehingga fraksi etanol untuk perbandingan 1 mol etanol dengan 1 mol iso oktan adalah sebagai berikut,

$$\text{Fraksi etanol \%} = \frac{V_{\text{etanol}}}{V_{\text{etanol}} + V_{\text{iso-oktan}}} \times 100 = \frac{0,0582}{0,0582 + 0,1641} \times 100 = 26,1678 \%$$

Fraksi campuran tersebut merupakan fraksi campuran yang diprediksi membentuk kluster molekul. Sementara dalam data eksperimen pengukuran dilakukan dengan ukuran 25 % v/v, maka terjadi error fraksi etanol adalah  $26,1678 \% - 25 \% = 1,16783 \% \text{ v/v}$ . Perhitungan analitik dilakukan perhitungan yang sama untuk semua perbandingan mol. Secara lengkap perhitungan analitik potensi pembentukan gugus molekul karena interaksi etanol iso-oktan molekul disajikan pada [Tabel 5.3](#) berikut,

**Tabel 5.3.** Fraksi etanol iso-oktan yang memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul

Mole iso-octane	Mole etanol	Etanol fraction (v/v)	Etanol fraction approach (v/v)	Error fraction
3	1	10.5658	10	0.56585
2	1	15.0535	15	0.05350
-	-	-	20	-
1	1	26.1678	25	1.16783
-	-	-	30	-
1	2	41.4810	40	1.48099

Mole iso-octane	Mole etanol	Etanol fraction (v/v)	Etanol fraction approach (v/v)	Error fraction
1	3	51.5332	50	1.53323
1	4	58.6382	60	1.36175
1	7	71.2723	70	1.27231
1	12	80.9635	80	0.96354
1	25	89.8586	90	0.21048

Analisis interaksi molekuler pada Tabel 5.3 diatas didasarkan pada konsep bahwa jumlah molekul yang berinteraksi adalah bilangan bulat (*integer*). Tabel 5.3 di atas menunjukkan bahwa semua fraksi campuran memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul kecuali 20 dan 30% v/v dari fraksi campuran. Campuran fraksi etanol 15% v/v menunjukkan kesalahan fraksi terendah sedangkan campuran etanol 50% v/v adalah yang tertinggi. Campuran error fraksi dalam membentuk gugus molekul pada Tabel 5.3 menunjukkan persentase molekul iso-oktan bebas di luar klaster molekul. Sementara gugus molekul campuran etanol polar dan non-polar iso-oktan (hidrokarbon) menghasilkan sifat fisik yang berbeda dengan zat penyusunnya. Error Fraksi ini menyebabkan terjadinya dua titik didih dalam campuran etanol iso-oktan.

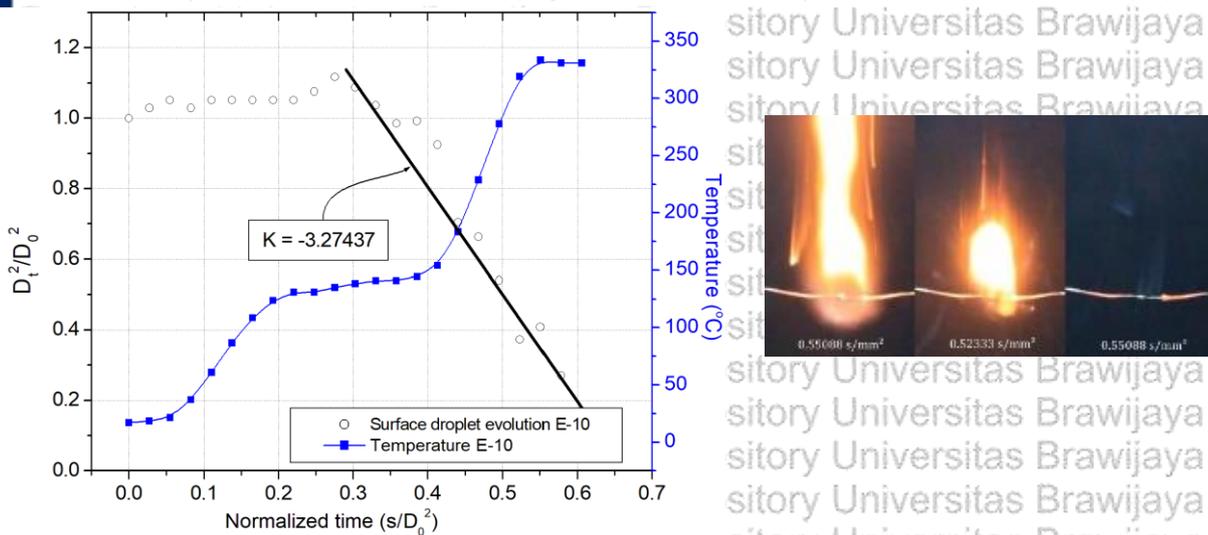
### 5.6. Evolusi area droplet selama proses pembakaran singgel droplet

Pada penelitian ini single droplet dari berbagai campuran etanol iso-oktan ditempatkan pada ujung sambungan kawat termokopel. Pengujian pembakaran singgel droplet ini dilakukan untuk mengidentifikasi perilaku pembakaran campuran etanol iso-oktan. Evolusi diameter droplet setiap campuran dicatat selama proses pembakaran. Mikro-eksplosi merupakan fenomena pecahnya sebagian atau seluruh droplet, sementara puffing droplet adalah kejadian mengembangnya (ekspansi) droplet tetapi tidak sampai pecah. Kejadian mikro-eksplosi selama proses diyakini membantu meningkatkan efisiensi pembakaran (Won, Baek, & Kim, 2018).

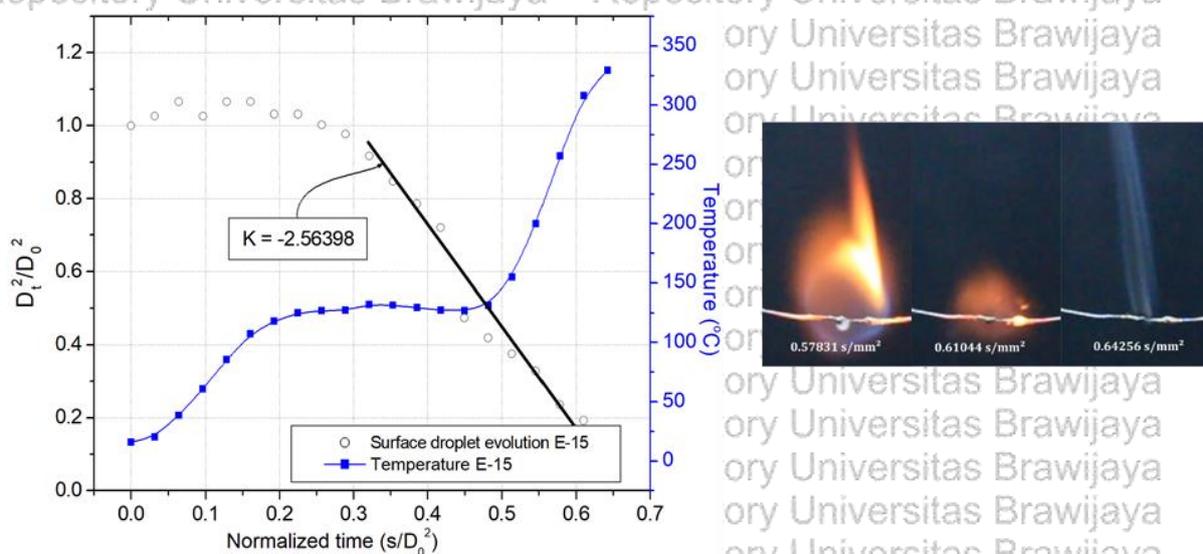
Penyajian hasil evolusi area droplet selama pembakaran single droplet direpresentasikan oleh perbandingan perubahan diameter kuadrat selama proses pembakaran ( $D_t^2$ ) terhadap diameter awal kuadratnya ( $D_0^2$ ). Waktu yang dibutuhkan untuk pembakaran single droplet dinormalisasikan dengan diameter awal kuadratnya ( $s/D_0^2$ ) untuk mengkompensasi pengaruh perbedaan diameter awal droplet. Perubahan temperatur droplet selama pembakaran juga direkam untuk mengidentifikasi rejim pemanasan sensible dan laten selama pembakaran. Evolusi area droplet selama pembakaran direkam oleh sebuah kamera DSLR, dan file video dari kamera dikonversi menjadi file gambar (JPG) dengan

menggunakan software *Video to JPG Converter*. Perhitungan luasan droplet diperoleh dengan menghitung luasan masing-masing file yang sudah terkonversi menjadi file gambar (JPG) dengan menggunakan software ImageJ. Dalam penyajian visual pembakaran single droplet, hanya menyajikan kejadian mikro-eksposis selama pembakaran masing-masing fraksi campuran. Konstanta laju pembakaran / *burning rate constant* ( $K$ ) didapatkan dari analisis data pada software pengolahan data Origin 6.0 dengan asumsi penurunan area droplet dibandingkan dengan area awal dengan trend linier.

Hasil evolusi droplet selama proses pembakaran untuk fraksi campuran 10 dan 15 % v/v, disajikan pada [Gambar 5.9](#) dan [5.10](#) berikut,



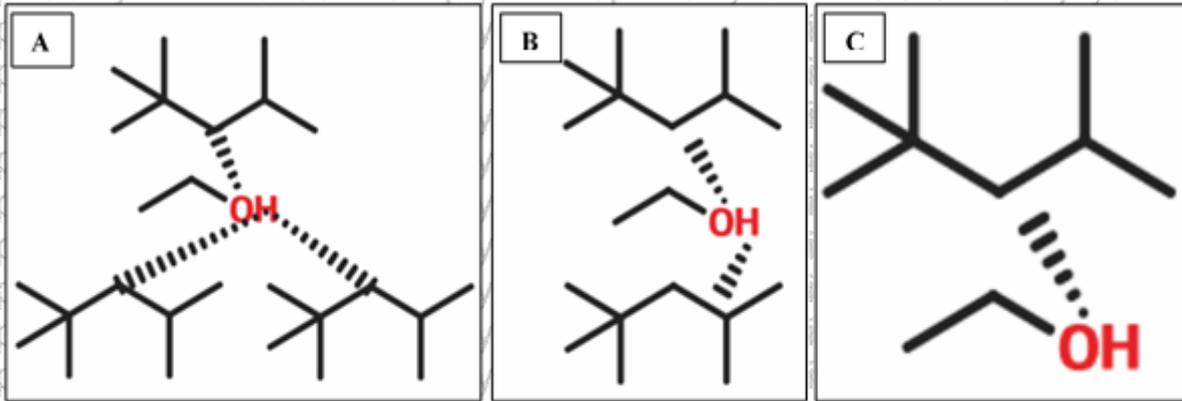
**Gambar 5.9** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 10 % v/v.



**Gambar 5.10** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 15 % v/v.

Pembakaran singgel droplet untuk fraksi etanol sampai 20% v/v (fraksi rendah)

menunjukkan perilaku yang sama, terutama pada tahap awal dan tahap akhir pembakaran droplet seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 5.9](#) dan [5.10](#). Pada tahap awal, kejadian puffing droplet terjadi sampai 0,3 waktu normalisasi. Dalam campuran fraksi etanol rendah, jumlah molekul oktan oktan non-polar lebih tinggi dari molekul etanol polar ini. Sehingga, gaya antarmolekul dalam model kluster molekuler ([Gambar 5.11](#)) sangat lemah sehingga cenderung menghasilkan ledakan mikro pada tahap akhir pembakaran droplet campuran bahan bakar.

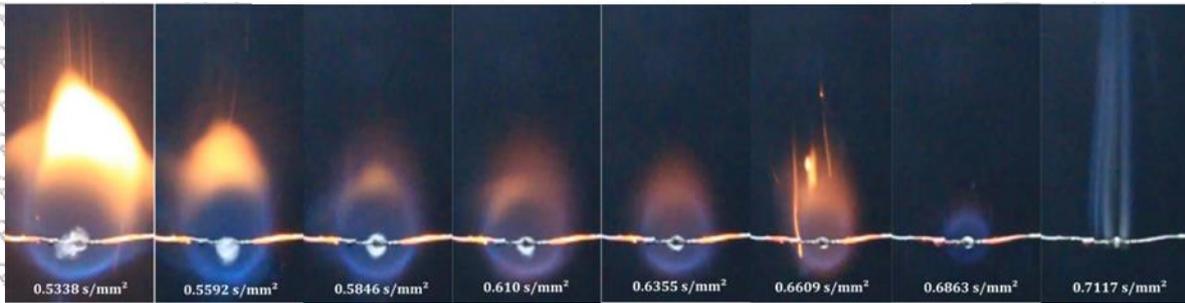
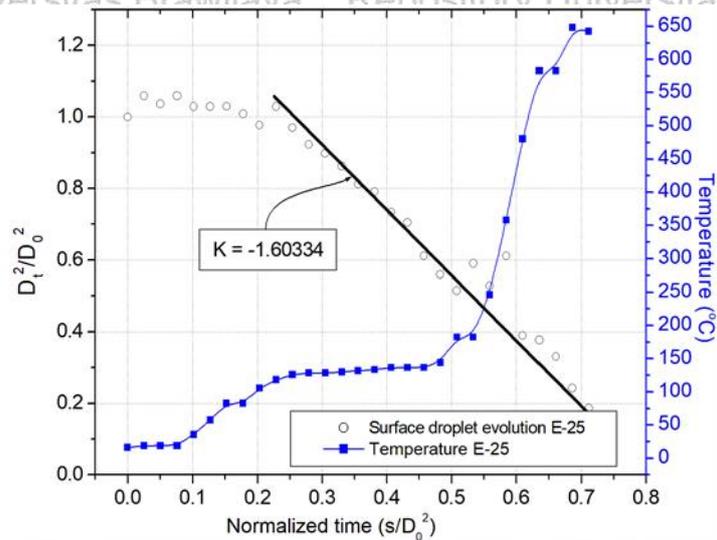


**Gambar 5.11** Model kluster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 10,5658 % v/v; B : 15,0535 % v/v, C : 26,1678 % v/v

[Gambar 5.11 A](#) dan [B](#) menunjukkan model kluster molekul untuk fraksi campuran etanol 10,5658% dan 15,0535% v/v. Dari [Gambar 5.11 A](#) dan [B](#), Satu molekul etanol menginduksi tiga dan dua molekul iso-oktan masing-masing. Jadi, satu muatan parsial dari gugus etanol hidroksil memiliki beban menginduksi tiga dan dua molekul iso-oktan, sehingga kekuatan interaksi fraksi campuran ini lebih lemah dari pada yang lain. Namun, dari [Gambar 5.9](#) dan [Gambar 5.10](#) dapat dilihat bahwa mikro-eksplorasi droplet untuk fraksi etanol 15% v/v lebih kecil dari fraksi etanol 10% v/v. Hal ini disebabkan oleh error fraksi 10% v/v dalam membentuk kluster molekul lebih besar dari fraksi 15% v/v.

Fraksi etanol 26,1678 v/v ([Gambar 5.11 C](#)) menunjukkan bahwa satu molekul etanol dalam gugus hidroksilnya menginduksi satu molekul iso-oktan. Gaya interaksi molekul dalam fraksi campuran 26,1678% v/v lebih besar daripada fraksi etanol 10,5658% dan 15,0535% v/v. Namun, fraksi 25% v/v ([Gambar 5.12](#)) memiliki kesalahan yang lebih besar dalam membentuk gugus molekul, yang sama dengan 1,16783 % v/v ([Tabel 5.3](#)), sehingga intensitas ledakan mikro dalam droplet lebih tinggi ([Gambar 5.12](#)). [Gambar 5.12](#) juga menunjukkan bahwa pada tahap awal pembakaran hanya sejumlah kecil kejadian tetesan puffing droplet yang terjadi sampai sekitar 0,2 waktu normalisasi. Fenomena ini juga menunjukkan bahwa gaya interaksi gugus molekul lebih kuat dari pada fraksi etanol 10%

dan 15% v/v.



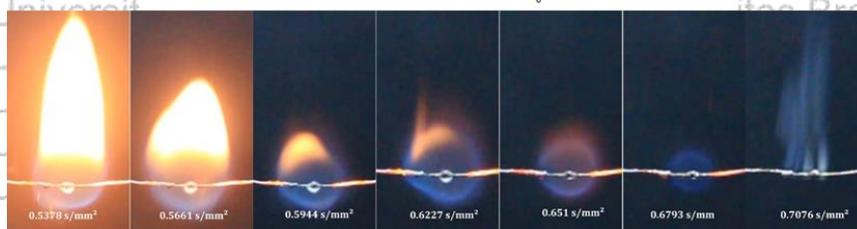
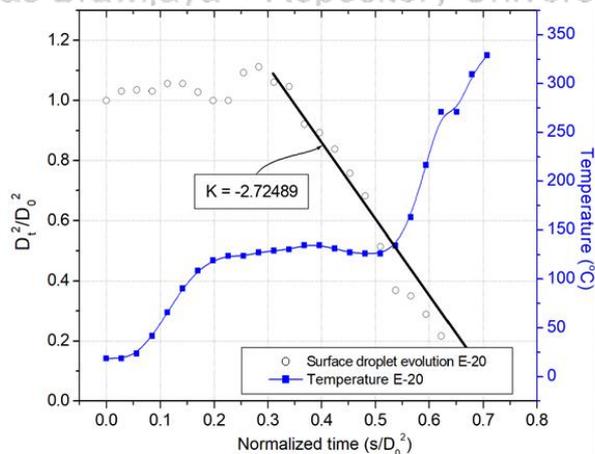
**Gambar 5.12** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 25 % v/v.

Dari uraian pembahasan fraksi etanol sampai 25% v/v (tingkat rendah) yang terkait dengan gaya interaksi molekul mengkonfirmasi bahwa etanol polar dapat menginduksi (hidrokarbon) iso-oktan non-polar dan cenderung membentuk kluster molekul yang mengubah sifat fisik dari masing-masing pembentuk campuran.

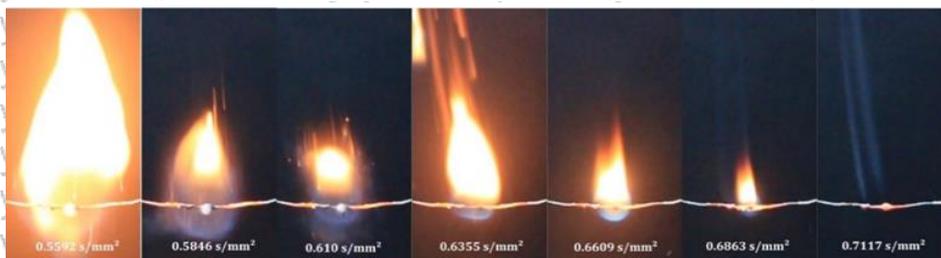
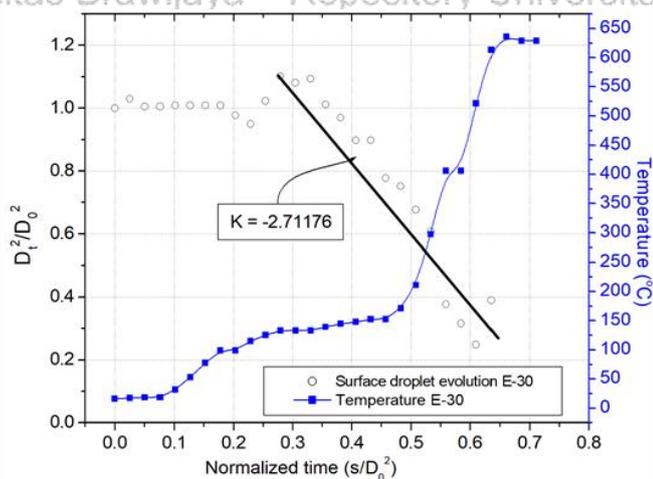
Sementara fraksi etanol 20% dan 30% v/v merupakan fraksi campuran etanol iso-oktan yang jauh dengan fraksi campuran yang memiliki potensi untuk membentuk kluster molekul. Gambar 5.13 dan 5.14 menunjukkan bahwa pada tahap awal pembakaran, tetesan puffing terjadi hingga 0,35 waktu normalisasi. Insiden tetesan engah lebih lama dari pada campuran 10%, 15% dan 25% v/v fraksi etanol. Dalam fraksi campuran 20% dan 30% v/v, membentuk gugus etanol iso-oktan etanol yang mendidih molekul rendah dan molekul bebas iso-oktan mendidih yang lebih tinggi. Dua titik didih yang berbeda ini menghasilkan potensi tetesan puffing yang lebih lama daripada campuran fraksi 10%, 15%, dan 25% dengan lebih sedikit molekul iso-oktan yang bebas.

Pada tahap akhir, pembakaran droplet campuran dengan fraksi etanol 20% dan 30% v/v menghasilkan intensitas mikro-ekspllosion yang lebih tinggi daripada fraksi campuran 10%, 15%, dan 25% v/v. Intensitas ledakan mikro-ekspllosion yang lebih tinggi ini

menghasilkan waktu pembakaran yang lebih pendek dengan konstanta laju pembakaran yang lebih besar. Namun, Gambar 5.13 dan 5.14 juga menunjukkan bahwa fraksi etanol 30% v/v memiliki intensitas ledakan mikro lebih tinggi daripada fraksi v/v 20%. Fenomena ini menegaskan pernyataan bahwa jumlah molekul bebas (tidak terikat dalam gugus molekul) cenderung menghasilkan intensitas mikro-eksplosi yang lebih tinggi.

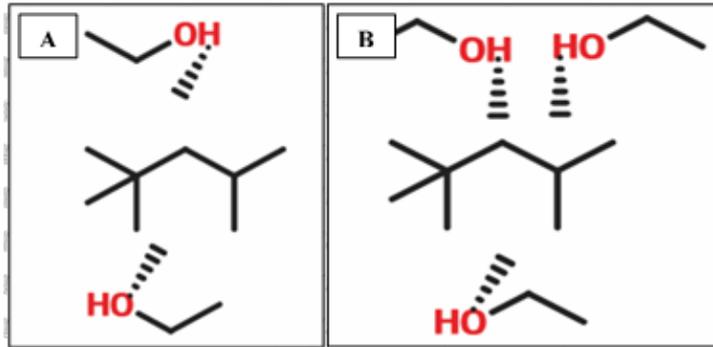


Gambar 5.13 Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 20 % v/v.



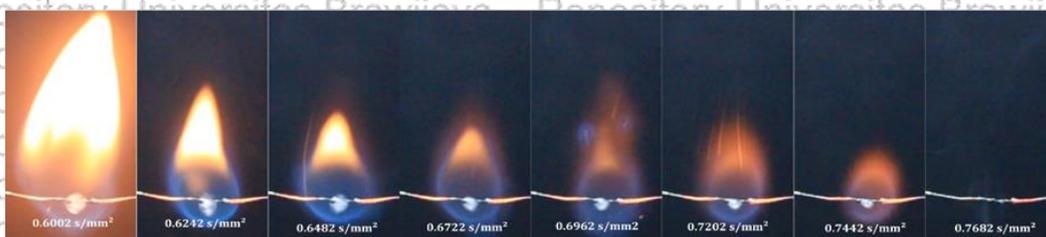
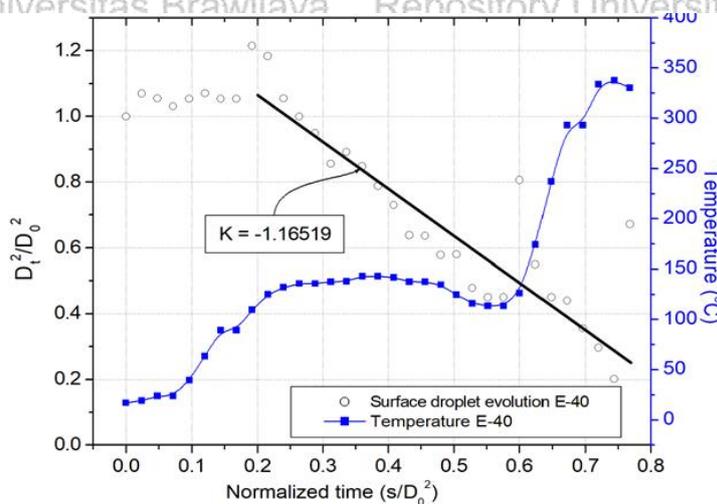
Gambar 5.14 Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 30 % v/v.

Gambar 5.15 dan 5.16 merupakan campuran dengan fraksi etanol 40% dan 50% v/v dengan fraksi cluster fraksi sebesar 1,48099% dan 1,53323%, masing-masing (Tabel 5.3). Model kluster molekul karena interaksi molekuler dalam fraksi ini disajikan pada Gambar 5.17 berikut.

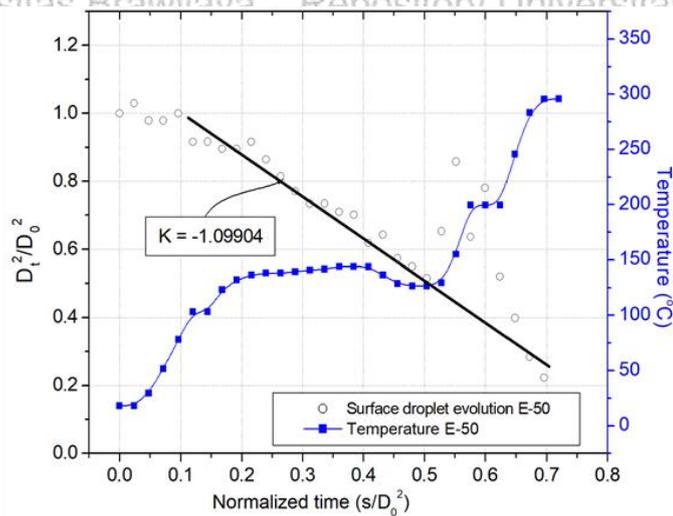


Gambar 5.15 Model kluster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 41,4810 % v/v; B: 51,5332 % v/v

Gambar 5.15 A dan B menjelaskan bahwa satu molekul iso-oktan diinduksi oleh dua dan tiga molekul iso-oktan pada setiap molekul kluster yang terbentuk. Model molekul kluster fraksi etanol Gambar 5.15 B (51,5332% v/v) memiliki gaya interaksi molekuler total yang lebih besar dari fraksi etanol yang lebih rendah. Sementara Gambar 5.15 dan 5.16 menunjukkan puffing droplet dari fraksi campuran ini, masing-masing terjadi sampai 0,15 dan 0,10 waktu normalisasi. Fakta ini menegaskan perubahan pada sifat fisik campuran bahwa semakin besar gaya interaksi molekul total dalam kluster molekul cenderung menyebabkan puffing droplet yang lebih rendah pada tahap awal pembakaran droplet.

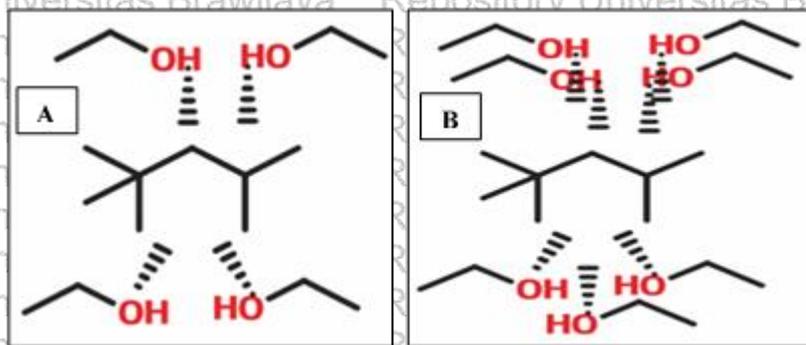


**Gambar 5.16** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 40 % v/v.



**Gambar 5.17** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 50 % v/v.

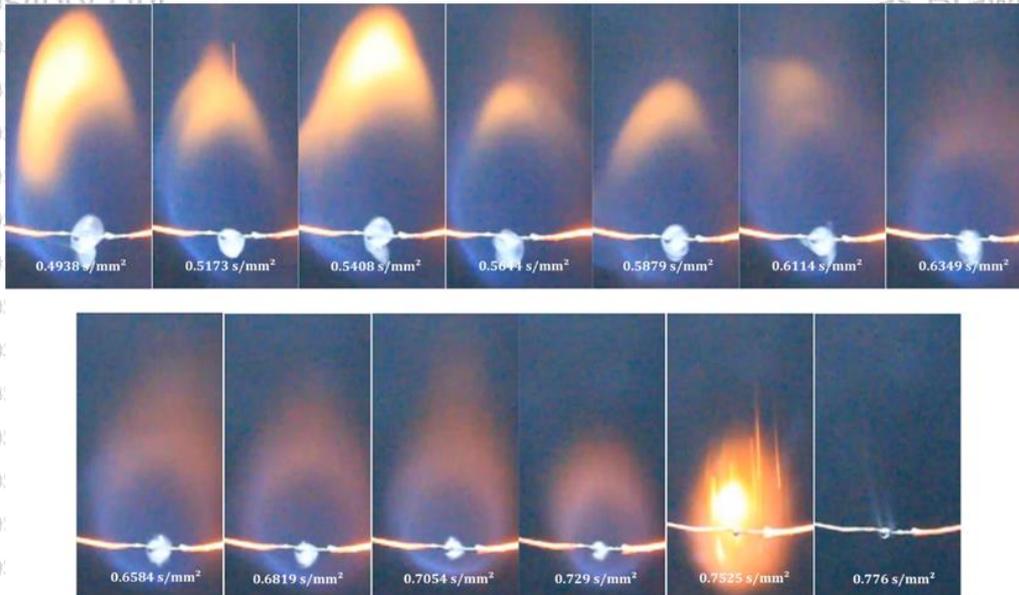
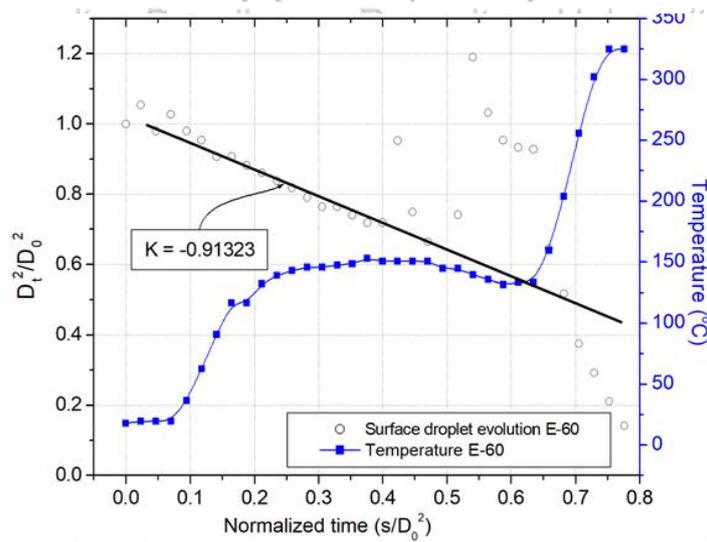
Sementara, pembakaran single droplet untuk fraksi etanol yang lebih tinggi ditunjukkan pada [Gambar 5.19](#) dan [5.20](#). Pada fraksi etanol tinggi, campuran bahan bakar memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul yang lebih besar karena melibatkan jumlah molekuler lebih banyak. Pemodelan kluster molekul untuk fraksi etanol 58.6382% dan 71.2723% v/v disajikan pada [Gambar 5.21](#) di bawah ini,



**Gambar 5.18** Model kluster molekul campuran etanol iso-oktan, A : 58.6382% v/v; B: 71.2723% v/v

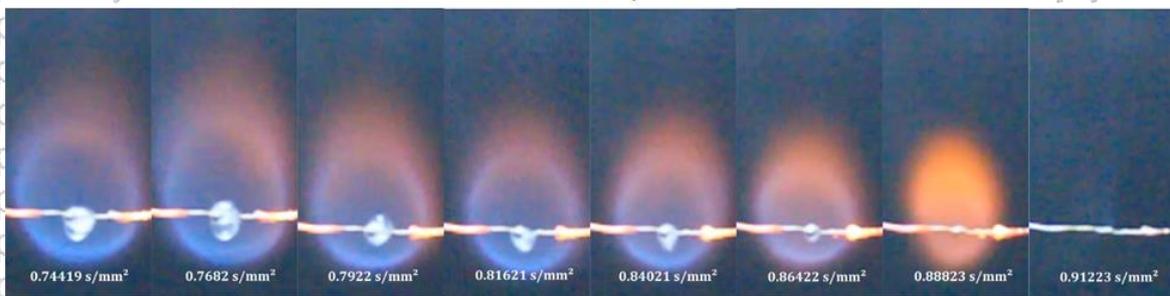
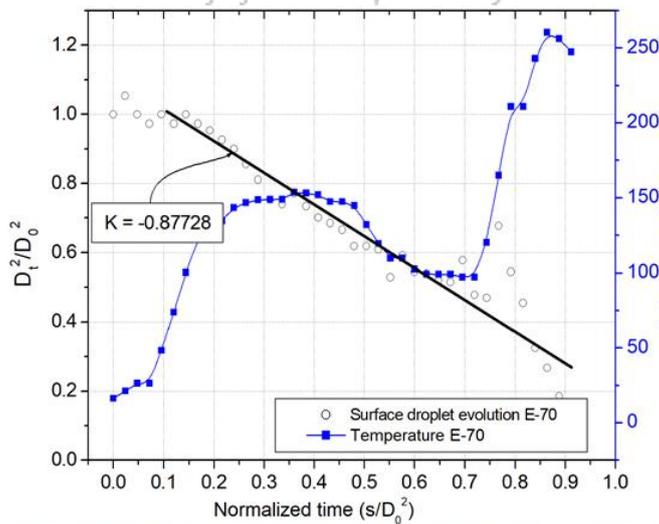
[Gambar 5.18 A](#) dan [B](#) menunjukkan bahwa dalam fraksi etanol 58.6382% dan 71.2723% v/v, satu molekul iso-oktan masing-masing diinduksi oleh empat dan tujuh molekul etanol. Jumlah gaya interaksi molekul di setiap kluster molekul untuk fraksi etanol yang lebih tinggi juga lebih tinggi. Namun, untuk fraksi etanol sebesar 58.6382% v/v lebih stabil karena

memiliki polaritas parsial yang lebih seimbang di kedua sisi.



**Gambar 5.19** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 60 % v/v.

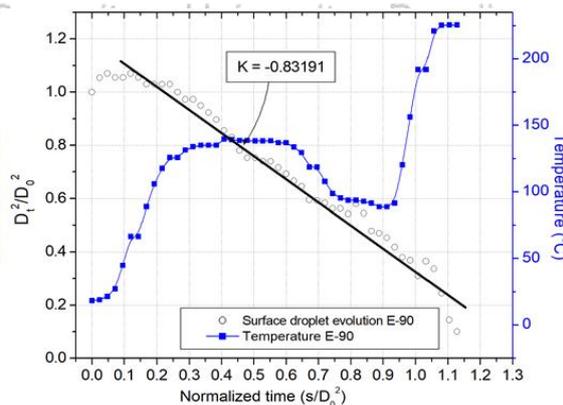
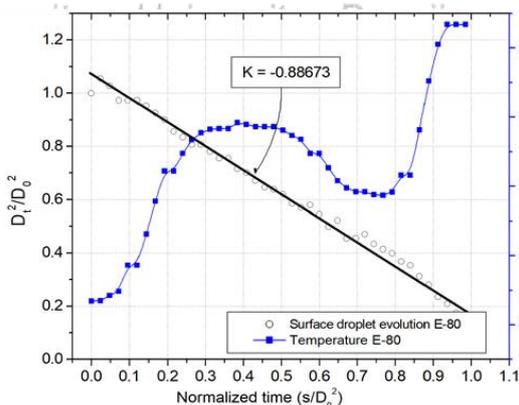
Gambar 5.19 dan 5.20 menunjukkan bahwa pada 60% dan 70% fraksi etanol, terjadi sedikit puffing droplet di awal tahap pembakaran single droplet. Namun, pada tahap akhir, pembakaran fraksi etanol 60% dan 70% v/v menghasilkan mikro-ledakan intensitas tinggi. Fenomena ini terjadi karena fraksi etanol 60% dan 70% v/v memiliki error fraksi pembentukan kluster molekul besar 1.36175% dan 1.27231% v/v, masing-masing (Tabel 5.3). Fraksi etanol yang tinggi cenderung menghasilkan ukuran gugus molekul yang lebih besar dan menghasilkan perbedaan titik didih yang lebih tinggi antara gugus molekul dan iso-oktan. Hasil penelitian ini sejalan dengan Wardana (2009) pernyataan, yang menyatakan bahwa perbedaan titik didih yang besar sebuah campuran bahan bakar cenderung menghasilkan fenomena mikro-eksplosion dalam pembakaran single droplet (Wardana, 2010).



**Gambar 5.20** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 70 % v/v.

**Gambar 5.21** menjelaskan evolusi luasan droplet selama pembakaran campuran etanol fraksi tinggi (80% dan 90% v/v). Fraksi tinggi ini menghasilkan kluster molekul yang besar karena satu molekul iso-oktan diinduksi oleh banyak molekul etanol (**Tabel 5.3**) sehingga jumlah gaya interaksi molekul pecahan dari kluster molekul gaya juga besar.

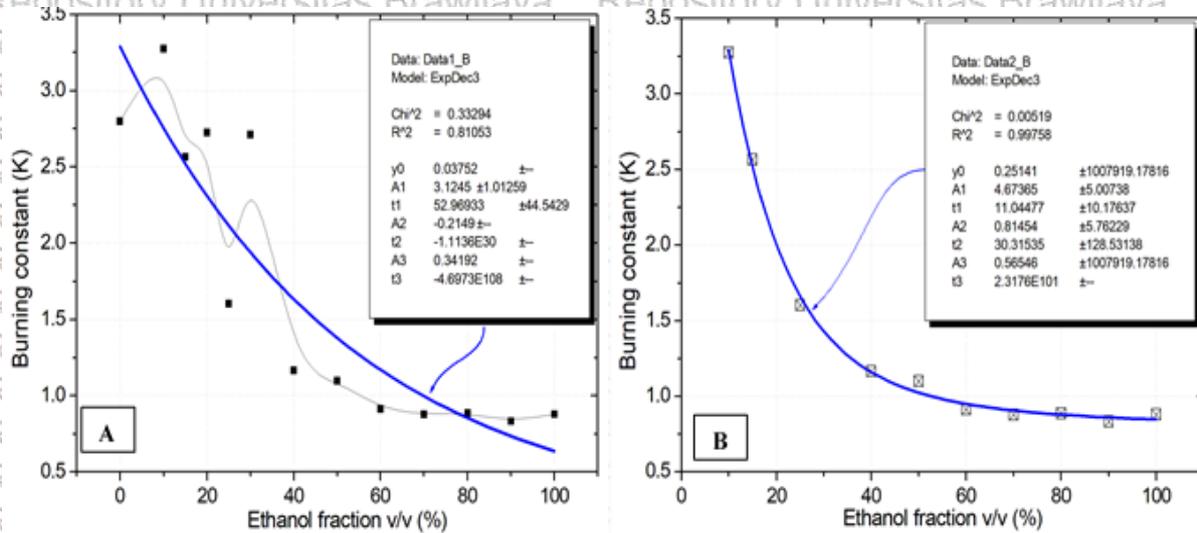
**Gambar 5.21** juga menegaskan bahwa pada tahap awal, cenderung sedikit terjadi puffing droplet. **Tabel 5.3** juga memberikan informasi bahwa error fraksi kluster molekul pada fraksi etanol 80%, dan 90% yang sangat kecil, yaitu masing-masing 0,96354% dan 0,21048% v/v. Error fraksi kluster molekul yang kecil ini menghasilkan pembakaran halus tanpa mikro-ledakan selama pembakaran single droplet.



**Gambar 5.21** Hasil pembakaran single droplet untuk fraksi etanol 80% dan 90% v/v.

### 5.7. Konstanta laju pembakaran berbagai fraksi campuran etanol iso-oktan

Laju pembakaran diestimasi menggunakan hukum  $D^2$ ,  $K = d(D^2)/dt$  (Li, Han, Liu, & Chen, 2015). Hasil rangkuman konstanta disajikan pada **Gambar 5.22** sebagai konstanta laju pembakaran ( $K$ ) versus berbagai fraksi etanol fraksi iso-oktan.



**Gambar 5.22** Hubungan konstanta laju pembakaran versus fraksi etanol

**Gambar 5.22 A** menunjukkan garis tren hubungan antara konstanta laju pembakaran untuk semua fraksi campuran, termasuk fraksi etanol 20% dan 30% v/v. Fraksi 20% dan 30% v/v memiliki error fraksi yang sangat besar dari fraksi campuran yang memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul sehingga juga berkorelasi dengan konstanta laju pembakaran selama pembakaran single droplet. **Gambar 5.22 B** merupakan garis tren konstanta laju pembakaran untuk fraksi etanol yang dekat dengan (error fraksi kecil) untuk komposisi campuran etanol iso-oktan yang berpotensi membentuk kluster molekul. Dari pendekatan garis tren eksponensial, dua grafik mengkonfirmasi hipotesis awal bahwa molekul etanol polar cenderung menginduksi molekul iso-oktan (hidrokarbon) non-polar dan memiliki potensi untuk membentuk gugus molekul yang mengubah sifat fisik dari molekul penyusunnya (etanol dan iso-oktan).