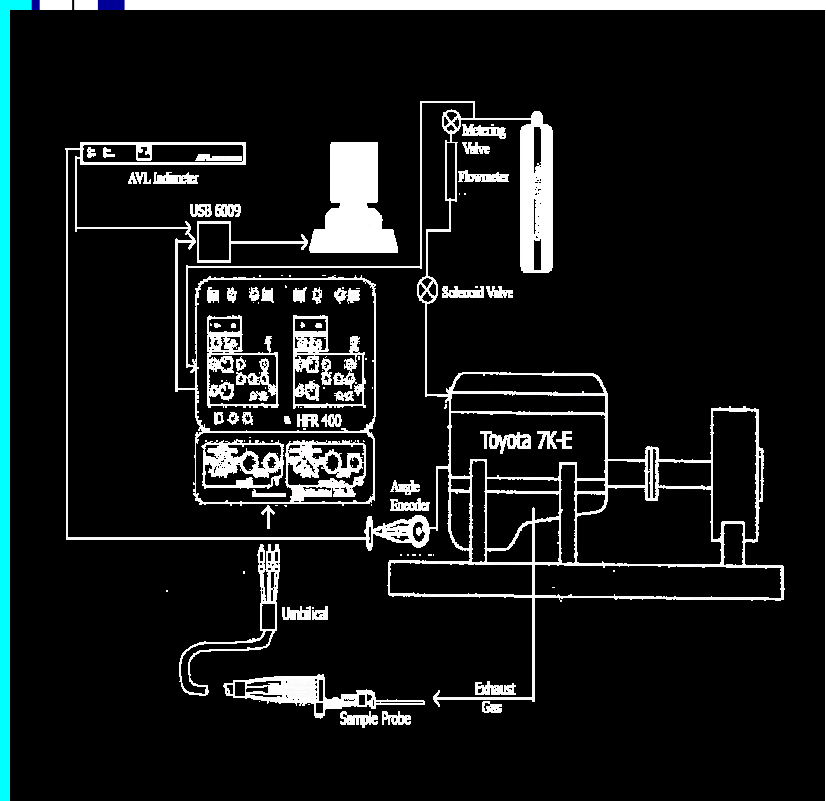


Jurnal Teknik Mesin

Volume 22, No.2, Oktober



EDITOR

B. Sutjiatmo (Ketua)
A. Suwono
D. Suharto
K. Bagiasna
S. D. Jenie
S. S. Brodjonegoro
Abdurrachim
I. Nurhadi
R. Suratman
P. S. Darmanto

MITRA BESTARI

Ign. P. Nurprasetio (ITB)
I. S. Putra (ITB)
A. I. Mahyuddin (ITB)
Y. Yuwana M (ITB)
Z. Abidin (ITB)
P. Sutikno (ITB)
T. Hardianto (ITB)
T. A. F. Soelaiman (ITB)
N. P. Tandian (ITB)
S. Wiryolukito (ITB)
A. Basuki (ITB)

REDAKSI PELAKSANA

A. D. Pasek (Ketua)
I M. Astina
I. G. N. W. Puja
Indrawanto
W. Adriansyah
A. Wibowo
I N. Diasta

ALAMAT REDAKSI

Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jln. Ganesa 10, Bandung 40132
Tel. : (022)-2504243
Fax: (022)-2534099
E-mail: ari@termo.pauir.itb.ac.id
yadi@tu.ms.itb.ac.id

Terbit 2 (dua) kali dalam satu tahun
bulan April dan Oktober.

EDITORIAL

Jurnal Mesin Vol. 22 no. 2 merupakan edisi terakhir tahun 2007. Pada edisi ini enam makalah diterbitkan yang mencakup berbagai disiplin ilmu dalam Teknik Mesin dan Dirgantara.

Makalah pertama ditulis oleh Chan Sarin dan para pembimbingnya dari Program Studi Teknik Mesin ITB dan Fakultas Sain dan Teknologi Universitas Keio, Jepang. Makalah ini membahas mengenai pengembangan persamaan tingkat keadaan untuk memprediksi sifat-sifat termodinamika normal butana. Persamaan yang dikembangkan merupakan turunan dari persamaan Hemholtz dan mempunyai jumlah suku-suku yang lebih sedikit di bandingkan dengan persamaan-persamaan tingkat keadaan yang ada saat ini. Hasil prediksi dari persamaan ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian yang dilakukan oleh peneliti lain. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa tingkat kesalahan persamaan tidak lebih dari 1 %.

Makalah kedua ditulis oleh Ari Darmawan Pasek dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini membahas sifat mampu nyala dan performansi refrigeran campuran propana (R-290) dan R-22. Dari hasil pengujian sifat mampu nyala diketahui bahwa pencampuran R-20 dengan R-22 dapat menurunkan sifat mampu nyala R-290. Pada komposisi R-290 40% dan R-22 60 % sampai R-290 59% / R-22 41 % campuran mempunyai batas penyalan bawah yang lebih besar dari 3,5% sehingga refrigeran tersebut dapat di kategorikan sebagai refrigeran kelas A2. Refrigeran campuran tersebut mempunyai massa optimum yang lebih sedikit dari R-22 dan mempunyai COP lebih baik dari R-22 tetapi lebih buruk dibanding R-290 murni. Refrigeran campuran tersebut diketahui bersifat azeotropik.

Makalah yang ditulis oleh Sigit Yoewono dan Adriansyah dari Kelompok Keahlian Teknik Produksi membahas mengenai optimasi proses pemesinan EDM *Wire Cut*. Dalam metode optimasi ini yang diusulkan adalah Algoritma Genetik, dengan menggunakan algoritma tersebut diperoleh kombinasi nilai variabel input mesin yang menghasilkan kondisi pemotongan optimum dengan *feed rate* dan kekasaran permukaan sebagai parameter optimasi. Variabel input yang dimaksud adalah *no load voltage*, *capacitor*, *on time*, *off time*, dan *servo voltage*. Dengan membandingkan hasil optimasi dengan metode lain dapat terlihat bahwa metode algoritma genetik menghasilkan kondisi optimal yang baik.

Makalah keempat ditulis oleh Arief Haryanto dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini metode pengurangan gas HC di saat start pada motor bensin. Pengurangan gas HC dilakukan dengan cara menambahkan gas hidrogen ke dalam ruang bakar. Penambahan gas hidrogen ini akan menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna sehingga HC dapat dikurangi. Makalah ini juga membahas hasil pengujian untuk mendapatkan jumlah gas hidrogen yang optimum.

Makalah kelima ditulis oleh Yuli Setyo Indartono dkk dari Kelompok Keahlian Konversi Energi ITB. Makalah ini membahas pengaruh penambahan aditif surfactant terhadap pertumbuhan partikel Trymethylolthane (TME). Suspensi TME ditambahkan dengan maksud untuk menambah kapasitas termal refrigeran sekunder (brine), sedangkan surfactant ditambahkan agar friksi pada saluran dapat dikurangi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya penambahan surfactant akan mempengaruhi pertumbuhan kristal TME, untuk mengatasi hal tersebut harus ditambahkan pula counter ion dengan konsentrasi tertentu.

Makalah terakhir yang ditulis oleh Indra Djodikusumo dkk dari Kelompok Keahlian Teknik Produksi ITB berisi informasi mengenai proses reverse dan forward engineering yang dilakukan kelompoknya dalam pembuatan turbin Francis untuk pembangkit mini hidro. Cerita sukses dan langkah-langkah pengembangan selanjutnya dari proses engineering tersebut dapat dibaca dalam makalah ini.

Akhir kata Redaksi mengucapkan selamat membaca semoga makalah-makalah dalam Jurnal Mesin memberi informasi dan pengetahuan yang bermanfaat.

MESIN

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 2, Oktober 2007

ISSN 0852-6095

Diterbitkan oleh : Program Studi Teknik Mesin,
Fakultas Teknologi Industri - ITB
Surat ijin : STT No. 964/DIT-JEN/PPG/STT/1982.

DAFTAR ISI

<i>Thermodynamic property model of wide-fluid phase n-butane.</i> Chan Sarin, I Made Astina, Prihadi Setyo Darmanto dan Haruki Sato	44-54
<i>Sifat mampu nyala dan massa optimum refrigeran campuran R-290/R-22 Sebagai alternatif pengganti R-22</i> Ari Darmawan Pasek, Aryadi Suwono, Novianti Nugraha dan Usman Rosyadi	55-61
<i>Optimisasi proses pemesinan EDM wire cut untuk modus gerak sirkular menggunakan algoritma genetik.</i> Sigit Yoewono Martowibowo dan Adriansyah	62-68
<i>Effects of hydrogen addition into intake air on hydrocarbon emission of gasoline engines at cold start condition.</i> Arief Haryanto, Wiranto Arismunandar dan Gerard George Engel	69-72
<i>Particle size distribution and rheological characteristic of trimethylolethane treated by cationic surfactant.</i> Yuli Setyo Indartono, Hiromoto Usui, Hiroshi Suzuki, Satoshi Tanaka, Kousuke Nakayama, Yohiyuki Komada dan Tetsu Itotagawa.	73-80
<i>Pemanfaatan system CAD/CAM/CAE dalam reverse dan forward engineering untuk turbin Francis.</i> Indra Djodikusumo, Lukman Santoso dan Rahmat Haris.	81-89

M E S I N

Jurnal Teknik Mesin

Vol. 22, No. 2, Oktober 2007

ISSN 0856-6095

SIFAT MAMPU NYALA DAN MASSA OPTIMUM REFRIGERAN CAMPURAN R-290/R-22 SEBAGAI ALTERNATIF PENGGANTI R-22

Ari D. Pasek⁽¹⁾, Aryadi Suwono⁽¹⁾, Novianti Nugraha⁽²⁾ dan Usman Rosyadi⁽²⁾

⁽¹⁾Kelompok Keahlian Konversi Energi, FTI- Institut Teknologi Bandung,

⁽²⁾Jurusan Teknik Mesin, FTI – ITENAS Bandung

Ringkasan

Dengan semakin dibatasinya penggunaan Bahan Perusak Ozon (BPO) seperti refrigeran CFC dan HCFC di Indonesia, diperlukan usaha-usaha untuk menemukan refrigeran alternatif pengganti. Refrigeran hidrokarbon R-290 (propana) kini mulai banyak digunakan sebagai pengganti R-22. Sifat R-290 yang ramah lingkungan, hemat energi dan dapat digunakan langsung membuat refrigeran ini dapat dianggap sebagai salah satu refrigeran alternatif pengganti HCFC. Namun demikian R-290 memiliki sifat yang mudah terbakar, termasuk refrigeran kelas A3 yang penggunaannya dibatasi oleh standar keamanan. Oleh sebab itu perlu dilakukan usaha-usaha untuk menurunkan sifat mampu nyala refrigeran ini sehingga penggunaannya dapat lebih luas. Pencampuran R-290 dengan R-22 pada komposisi tertentu diharapkan dapat menurunkan sifat mampu nyala refrigeran R-290. Berdasarkan hasil pengujian flammability yang dilakukan dalam penelitian ini, campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,4/0,6; 0,5/0,5 dan 0,59/0,41 fraksi mol mempunyai batas penyalan bawah yang lebih besar dari 3,5%, sehingga dapat dikategorikan sebagai refrigeran kelas A2. Sedangkan berdasarkan hasil pengujian massa optimum, refrigeran campuran ini membutuhkan muatan refrigeran yang lebih sedikit dibandingkan dengan refrigeran R-22. Refrigeran campuran R-290/R-22 bersifat azeotrope dan dapat digunakan langsung pada sistem refrigeran R-22 tanpa harus melakukan penggantian komponen. COP sistem dengan refrigeran campuran ini dapat lebih tinggi dari COP sistem dengan R-22 tetapi lebih kecil dari COP sistem dengan refrigeran R-290 murni.

Abstract

The limited application of ozone depleting substance (ODS) such as CFC and HCFC refrigerants has encourage researchers to find a new alternative refrigerant. Hydrocarbon refrigerant such as R-290 (propane) has been widely used because it is environmentally friendly, save energy, and drop-in substitute. However, hydrocarbon refrigerants are flammable and categorized as A3 class refrigerant, so that the application of the refrigerants are limited by safety standard. In this research, an effort to lower the flammability of R-290 has been carried out. Series of flammability test have been done to proof that the flammability of R-290 is reduced by mixing it with R-22. Mixture of R-290/R-22 at molar fraction 0.4/0.6, 0.5/0.5, 0.59/0.41 has Lower Flammability Limit (LFL) above 3.5%, so that it can be classified as A2 class refrigerant. The optimum refrigerant charges of the refrigerant mixtures that give the highest COP have also been investigated. The results show that the optimum refrigerant charge of the mixture is lower than R-22 but higher than pure R-290. The system COP of R-290/R-22 mixture is higher than that of R-22 but lower than R-290 system.

Keywords: refrigerant, hydrocarbon, flammability,.

1. PENDAHULUAN

Sejak ditemukannya zat perusak ozon pada refrigeran senyawa halokarbon, pada tahun 1981 United Nations Environment Programme (UNEP) menghimpun negara-negara di dunia dalam pengembangan langkah-langkah internasional untuk melindungi lapisan ozon. Langkah negosiasi tersebut mencapai puncaknya dengan tersusunnya Konvensi Wina tentang Perlindungan Lapisan Ozon yang disahkan pada bulan Maret 1985. Konvensi ini mendorong terbentuknya Protokol Montreal tentang Bahan-bahan Perusak Ozon (BPO), yang ditandatangani pada bulan September 1987.

Protokol Montreal kemudian telah mengalami penyempurnaan melalui penetapan amandemennya dalam pertemuan di London (1990), Copenhagen (1992), Montreal (1997), dan Beijing (1999)[1].

Refrigeran R-22 merupakan salah satu jenis HCFC yang memiliki indeks ODP (*Ozone Depletion Potential*) sebesar 0,055 dan GWP (*Global Warming Potential*) sebesar 1700[2]. Meskipun R-22 memiliki perlu dilakukan usaha-usaha untuk mencari refrigeran pengganti R-22.

R-290 adalah refrigeran alami yang merupakan salah satu jenis refrigeran hidrokarbon (HC) yang kini mulai banyak digunakan sebagai pengganti R-22. Sifat R290 yang ramah lingkungan baik dari segi kerusakan ozon, maupun pemanasan global membuat refrigeran ini dapat dianggap sebagai salah satu refrigeran alternatif pengganti HCFC. Disamping sifatnya yang ramah lingkungan, R-290 juga dapat menggantikan langsung refrigeran R-22 tanpa harus mengganti komponen mesin refrigerasi R-22 dan dapat menurunkan konsumsi pemakaian energi sampai dengan 30%[3]. Namun demikian R-290 dapat menyala (*flammable*) dengan *Lower Flammability Limit* (LFL) dan *Upper Flammability Limit* (UFL), masing-masing sebesar 2,1% dan 9,6% volume di udara[4], sehingga termasuk dalam refrigeran kelompok A3 (LFL<3,5% volume di udara), yaitu kelompok refrigeran yang tidak beracun, namun dapat menyala.

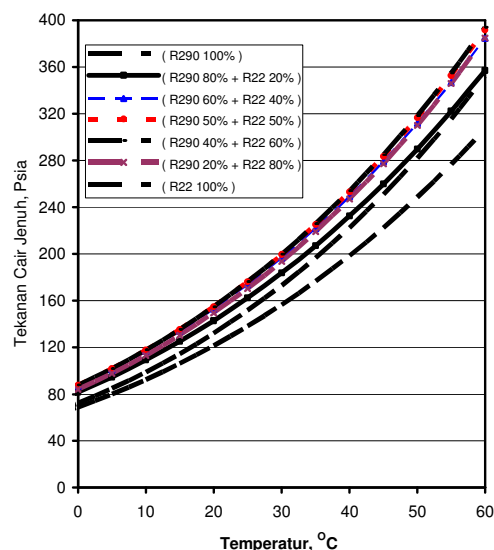
Berkaitan dengan kondisi permasalahan di atas, beberapa pengembangan lebih lanjut diperlukan sebagai upaya untuk menurunkan sifat mampu nyala refrigeran R-290. Cara yang dapat ditempuh untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan mencampur R-290 dengan refrigeran lain yang memiliki sifat mampu nyala yang lebih rendah. Refrigeran HCFC seperti R-22 dapat saja digunakan sebagai refrigeran pencampur. Karena R-22 merupakan fraksi dari refrigeran campuran, maka nilai ODP dan GWPnya pun menjadi lebih kecil.

Untuk mengetahui perubahan batas penyalan pada campuran R-290 yang telah ditambahkan R-22 pada suatu komposisi tertentu maka uji *flammability* perlu dilakukan. Pengujian ini dimaksudkan untuk mendapatkan komposisi campuran R-290 + R-22 yang memiliki batas penyalan bawah (LFL) > 3,5%, sehingga refrigeran campuran tersebut dapat dikategorikan sebagai refrigeran kelas A2, yang aturan keamanan penggunaannya lebih ringan dibandingkan dengan refrigeran kelas A3. Untuk mengetahui banyaknya refrigeran yang dibutuhkan dalam suatu mesin pendingin, maka diperlukan pengujian massa optimum refrigeran campuran R-290+R-22 pada komposisi yang telah diuji batas penyalannya.

2. TEKATAN DAN TEMPERATUR JENUH REFRIGERAN CAMPURAN R-290/R-22

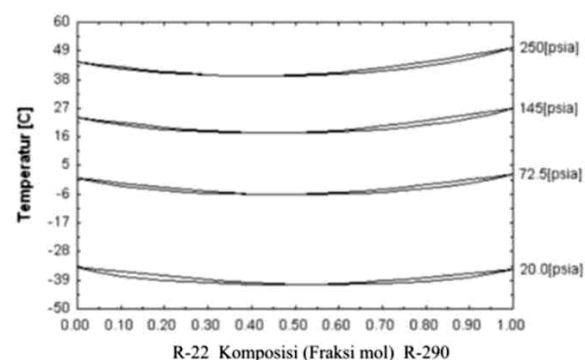
Dengan menggunakan bantuan sebuah perangkat lunak, dapat dicari tekanan jenuh campuran R-290 dengan R-22 yang mendekati tekanan jenuh R-22. Propana murni memiliki kurva titik didih yang lebih rendah dari R-22, tetapi pencampurannya dengan R-22 pada perbandingan fraksi molar tertentu akan menyebabkan tekanan jenuh campuran R-290 + R-22 menjadi lebih tinggi dari tekanan jenuh R-290 maupun R-22, atau dapat juga menghasilkan tekanan jenuh campuran setara R-22. Kurva tekanan terhadap temperatur jenuh di berbagai komposisi campuran R-290 + R-22 untuk fasa cair dapat dilihat pada Gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa komposisi campuran yang memiliki tekanan

jenuh mendekati R-22 adalah campuran yang memiliki fraksi molar propana antara 20% - 80%.



Gambar 1. Kurva cair jenuh berbagai fraksi molar campuran R-290/R-22.

Keisitimewaan lain dari campuran refrigeran ini adalah, pada temperatur evaporasi dan kondensasi sekitar 0°C dan 45°C, ditemukan campuran *azeotrop* di sekitar 40% - 60% propana. Fenomena tersebut dapat dilihat pada Gambar 2[5].

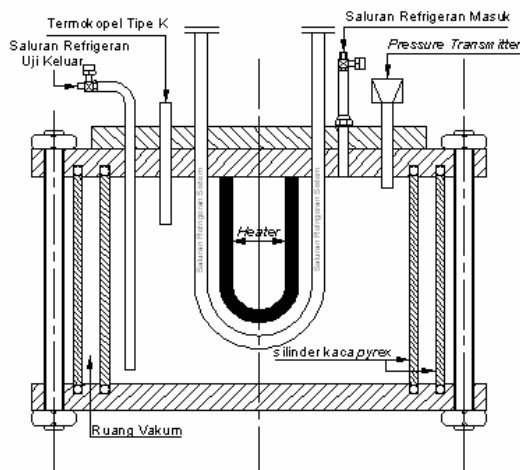


Gambar 2. Kurva tekanan terhadap komposisi molar campuran R-290/R-22 [6].

3. VALIDASI PERHITUNGAN TEKATAN DAN TEMPERATUR JENUH

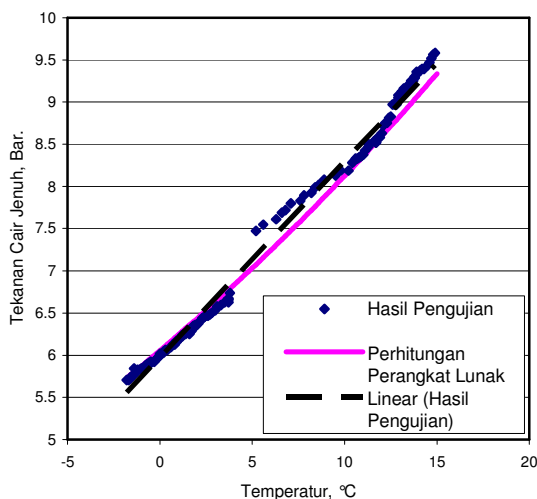
Hasil perhitungan tekanan dan temperatur jenuh yang dihasilkan oleh perangkat lunak di atas kemudian divalidasi pada pengujian. Alat pengujian yang digunakan berupa tabung uji yang terbuat dari gelas dan berdinding ganda. Diantara dinding tersebut terdapat ruang vakum yang berfungsi sebagai isolator. Alat uji tersebut dilengkapi dengan sensor temperatur (*thermocouple*) dan sensor tekanan (*pressure transducer*). Alat uji yang dimaksud secara skematik dapat dilihat pada Gambar 3.

Pengujian dimulai dengan mengisi tabung dengan cairan jenuh refrigeran campuran, kemudian tekanan dan temperaturnya diamati setelah refrigeran berada pada kondisi stedi. Pengujian dilakukan pada refrigeran campuran R-290/R-22 dengan fraksi molar 50%/50%.



Gambar 3. Alat uji tekanan dan temperatur cair jenuh.

Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara kurva tekanan jenuh hasil prediksi dengan hasil pengujian. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil prediksi dengan perangkat lunak memberikan hasil yang dekat dengan hasil pengujian. Dengan demikian campuran yang dihasilkan dapat dikatakan mendekati kurva jenuh R-22 murni yang akan digantikan dengan deviasi rata-rata 2%.



Gambar 4. Perbandingan hasil pengujian dan hasil prediksi kurva cair jenuh campuran dengan komposisi molar 50% R-290 dan 50% R-22

4. PENGUJIAN *FLAMMABILITY* REFRIGERAN CAMPURAN R-290/R-22

Tujuan dari pengujian *flammability* adalah untuk mendapatkan komposisi R-290/R-22 dengan sifat mampu nyala yang masuk dalam kategori refrigeran A2 (yaitu $LFL > 3,5\%$).

4.1. Prediksi LFL Campuran R-290/R-22

Nilai LFL campuran R-290/R-22 dapat diprediksi dengan persamaan Le Chatelier [7]:

$$LFL_m = \frac{100}{\frac{P_{R-290}}{LFL_{R-290}} + \frac{P_{R-22}}{LFL_{R-22}}} \quad (1)$$

Dimana:

P_{R-290} : Persentase komposisi R-290 dalam campuran (% mol),

P_{R-22} : Persentase komposisi R-22 dalam campuran (% mol),

LFL_m : Batas penyalaan bawah campuran R-290/R-22 (% mol),

LFL_{R-290} : Batas penyalaan bawah R-290 dalam campuran (% mol),

LFL_{R-22} : Batas penyalaan bawah R-22 dalam campuran (% mol).

Berdasarkan SNI 06-6500-2000, besarnya LFL untuk komponen murni R-290 adalah sebesar 2,1% volume di udara. Sedangkan komponen murni R-22 termasuk ke dalam golongan refrigeran A1, sehingga komponen ini tidak memiliki batas nyala baik LFL maupun UFL. Oleh karena itu, komponen murni R-22 tidak disertakan (dianggap nol) pada perhitungan LFL. Prediksi LFL R-290/R-22 disajikan dalam Tabel 1.

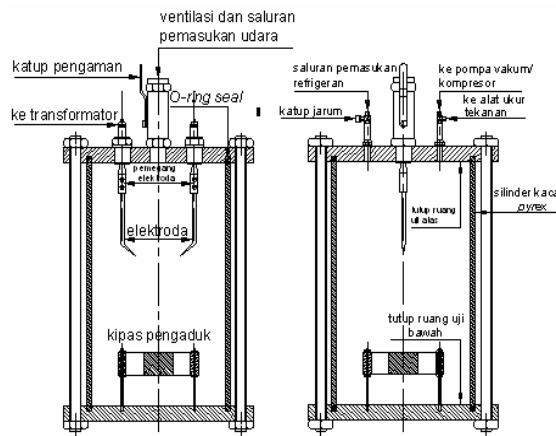
Tabel 1. Prediksi LFL campuran pada berbagai komposisi molar.

% R-290	% R-22	% LFLcampuran
100	0	2,1
90	10	2,33
80	20	2,625
70	30	3
60	40	3,5
59	41	3,56
50	50	4,2
40	60	5,25
30	70	7
20	80	10,5
10	90	21

Dari tabel tersebut, dapat dilihat bahwa refrigeran campuran yang dapat memiliki $LFL > 3,5\%$ adalah refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi molar 0,4/0,6; 0,5/0,5 dan 0,59/0,41. Dengan demikian pengujian *flammability* dilakukan hanya pada komposisi tersebut.

4.2. Pengujian *Flammability*

Alat uji untuk pengujian sifat *flammability* secara skematik dapat dilihat pada Gambar 5. Alat uji terbuat dari tabung kaca yang diberi penutup flens logam. Pada flens dipasang elektroda pemantik api. Kipas udara kecil diletakkan dalam tabung untuk mengaduk campuran udara-refrigeran. Tabung uji juga dilengkapi dengan sensor tekanan vakum akurasi tinggi, saluran masuk berkatup untuk alur masuk refrigeran dan udara, saluran pompa vakum, dan katup pengaman. Tabung mula-mula divakum hingga tekanan udara dalam tabung mencapai tekanan vakum tertentu, kemudian refrigeran uji diisikan ke dalam tabung. Pengisian dilakukan hingga konsentrasi uji yang diinginkan tercapai. Hal ini dapat dilihat dari pengamatan kenaikan tekanan dalam tabung. Kenaikan tekanan dalam tabung merupakan tekanan parsial refrigeran, dan besarnya dianggap sebanding dengan fraksi mol.



Gambar 5 Skema alat uji *flammability*

Setelah tabung terisi refrigeran, kipas udara dijalankan beberapa menit. Setelah itu semua katup dibuka, sensor vakum presisi dicabut, dan elektroda dinyalakan. Kemudian diamati apakah terjadi propagasi penyalan. Apabila tidak terjadi propagasi penyalan, maka pengujian diulangi dengan konsentrasi/tekanan parsial refrigeran yang lebih tinggi. Apabila pada suatu tekanan parsial tertentu terjadi propagasi nyala, maka tekanan parsial sampel pada kondisi itu dicatat dan dinyatakan dengan (L_1), sedangkan pada kondisi sebelumnya yang tidak terjadi propagasi nyala dinyatakan dengan (L_2). Tekanan parsial sampel untuk batas bawah penyalan (*LFL*) diperoleh dari [8]:

$$L_p = \frac{1}{2}(L_1 + L_2) \quad (3)$$

Batas bawah penyalan (*LFL*) diperoleh dengan perhitungan [8]:

$$LFL_n = \frac{L_p}{P_{atm}} \quad (4)$$

Untuk mendapatkan hasil pengujian dengan keterulangan yang baik, pengujian *LFL* dilakukan beberapa kali pada tekanan parsial sekitar kondisi terjadinya propagasi penyalan. Nilai *LFL* yang

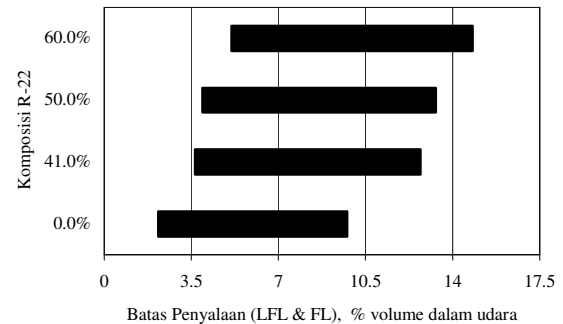
diperoleh dengan merata-ratakan nilai *LFL* dari masing-masing pengujian.

$$LEL = \frac{1}{n}(LEL_1 + LEL_2 + LEL... + LEL_n) \quad (5)$$

Metoda perhitungan yang digunakan untuk mencari nilai *UFL* juga sama dengan metoda pencarian nilai *LFL*. Namun pada penentuan *UFL*, tekanan parsial terbesar, U_1 , merupakan tekanan parsial dimana campuran tidak menyala, dan tekanan parsial terkecil, U_2 , merupakan tekanan parsial dimana campuran masih dapat menyala dan terjadi propagasi.

4.3. Hasil Pengujian *Flammability* dan Perbandingan dengan Hasil Perhitungan

Gambar 6 menunjukkan hasil pengujian batas penyalan atas dan bawah campuran R-290/R-22 pada beberapa komposisi molar. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa penambahan R-22 dalam campuran R-290/R-22 dapat menaikkan batas penyalan bawah (*LFL*). Sedangkan batas penyalan atas (*UFL*) campuran mengalami peningkatan juga seiring dengan meningkatnya fraksi mol R-22.



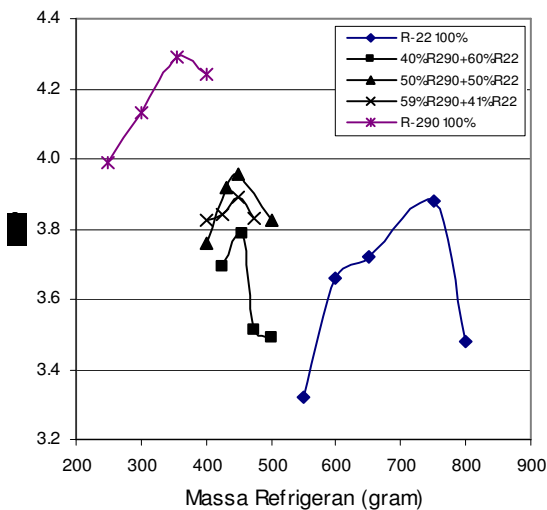
Gambar 6. Pengaruh komposisi molar R-22 terhadap batas penyalan campuran R-290/R-22.

Gambar 6 juga menunjukkan refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi molar 0,4/0,6; 0,59/0,41 dan 0,5/0,5 memiliki batas penyalan bawah lebih dari 3,5%, sehingga refrigeran campuran dengan komposisi tersebut dapat dikategorikan sebagai refrigeran kelas A2.

Perbandingan hasil pengujian dengan hasil prediksi dengan menggunakan persamaan *Le Chatelier* diperlihatkan dalam Tabel 2. Pada tabel ini terlihat bahwa nilai *LFL* hasil pengujian mendekati hasil prediksi. Nilai *UFL* refrigeran campuran tidak dapat diprediksi dengan Persamaan *Le Chatelier*. Nilai *UFL* hasil pengujian dan prediksi sangat jauh berbeda.

Tabel 2. Perbandingan *LFL* Hasil Pengujian dan Hasil Prediksi Persamaan *Le Chatelier*

Komposisi Campuran		Prediksi <i>Le Chatelier</i>	Hasil Pengujian	
% R-290	% R-22	% <i>LFL</i>	% <i>LFL</i>	% <i>UFL</i>
100	0	2,1	2,18	9,76
59	41	3,56	3,65	12,7
50	50	4,2	3,95	13,32
40	60	5,25	5,15	14,80

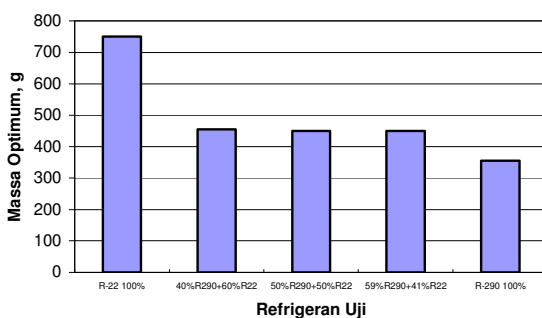


Gambar 9. Perbandingan COP terhadap penambahan massa refrigeran.

Dari Gambar ini dapat dilihat bahwa, penambahan massa refrigeran akan menimbulkan kenaikan nilai COP sistem, namun pada suatu nilai massa tertentu COP sistem menunjukkan kecenderungan untuk berkurang seiring dengan ditambahkannya massa refrigeran. Penambahan sedikit refrigeran ke dalam sistem akan mengakibatkan penurunan COP yang cukup besar. Pengisian refrigeran yang berlebihan akan menyebabkan tingginya daya kompresi dan tidak sebanding dengan kapasitas refrigerasi yang dihasilkan.

5.2 Analisis Hasil Pengujian Massa Optimum

Massa optimum refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,4/0,6; 0,59/0,41 dan 0,5/0,5, diperlihatkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perbandingan massa optimum setiap refrigeran uji.

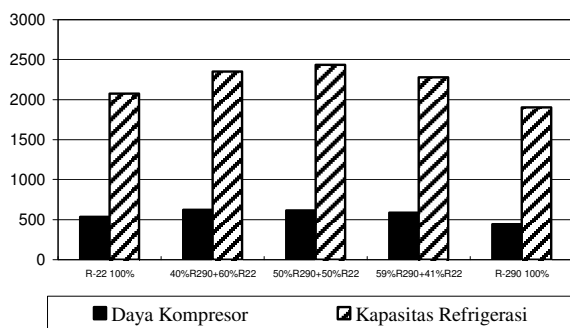
Massa optimum terendah dengan COP yang tertinggi dihasilkan oleh refrigeran R-290, hal tersebut disebabkan oleh kecilnya konsumsi energi yang dibutuhkan kompresor akibat pengisian refrigeran yang lebih sedikit dari R-22 dan refrigeran campuran. Walaupun jumlah refrigeran yang bersirkulasi sedikit, refrigeran R-290 memiliki panas laten penguapan yang dua kali lebih besar dibandingkan dengan R-22, sehingga perbandingannya dengan daya kompresor yang rendah menghasilkan COP yang tinggi.

Massa optimum refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,5/0,5; 0,59/0,41 dan 0,4/0,6 relatif sama. Jika dibandingkan dengan massa optimum R-290, refrigeran campuran memiliki massa optimum lebih besar. Meskipun demikian, massa optimum refrigeran campuran masih lebih kecil dari massa optimum R-22.

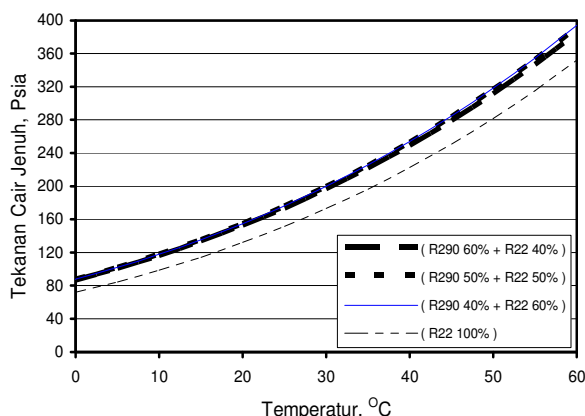
Dari Gambar 9 terlihat bahwa COP sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 lebih kecil dari COP sistem apabila menggunakan R-290 murni. Hal ini disebabkan oleh lebih kecilnya daya kompresor yang dikonsumsi oleh sistem dengan refrigeran R-290 (lihat Gambar 11), sebagai akibat massa optimum refrigeran R-290 yang lebih kecil dibandingkan dengan massa optimum refrigeran campuran.

Dari Gambar 9 dapat dilihat pula bahwa COP sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 dipengaruhi oleh kandungan R-22. Pada campuran yang kandungan R-22nya lebih besar COP akan mengecil. Pada komposisi R-22 40% COP sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 masih lebih besar dibandingkan dengan COP R-22, tetapi kemudian menjadi lebih kecil dari COP R-22 dengan bertambahnya kandungan R-22. Hal ini disebabkan oleh daya kompresor sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 lebih besar dibandingkan dengan jika menggunakan R-22. Sedangkan kapasitas refrigerasi refrigeran campuran yang meskipun lebih tinggi dari R-22, tidak mampu meningkatkan COP kecuali pada komposisi campuran 50% R-22.

Besarnya daya kompresor pada refrigeran campuran di dapat disebabkan oleh lebih rendahnya tekanan di evaporator, yang disebabkan oleh lebih kecilnya bukaan katup ekspansi. Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa refrigeran campuran R-290/R-22 pada semua komposisi memiliki tekanan jenuh yang lebih tinggi dari R-22 maupun R-290. Besarnya tekanan jenuh refrigeran campuran seharusnya akan menyebabkan tekanan evaporasi yang lebih besar pula. Namun, karena refrigeran penggerak katup ekspansi yang digunakan dalam *sensing bulb* adalah R-22, sedangkan refrigeran uji yang bersirkulasi pada sistem adalah refrigeran campuran yang memiliki tekanan jenuh lebih besar dari R-22 maka bukaan katup ekspansi yang terjadi menjadi lebih kecil dari yang seharusnya. Dengan demikian laju aliran massa refrigeran di dalam evaporator menjadi lebih sedikit, dan tekanan dan temperatur evaporasi menjadi lebih rendah dari kondisi operasi yang seharusnya. Akibatnya perbandingan kompresi yang menjadi beban kompresor menjadi lebih besar. Oleh karena itu sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 memiliki daya kompresor yang lebih besar dibandingkan jika menggunakan R-22.



Gambar 11. Perbandingan kapasitas pendinginan dan daya kompresor untuk masing-masing jenis refrigeran uji.



Gambar 12. Perbandingan tekanan jenuh refrigeran yang diuji (fasa cair).

6. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan dalam pengujian *flammability*, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Hasil pengukuran *LFL* dan *UFL* untuk komponen murni R-290 masing-masing adalah sebesar 2,18 dan 9,76% volume di udara. Hasil tersebut tidak terlalu jauh dari data SNI 06-6500-2000 yakni 2,1 dan 9,6% volume di udara, sehingga alat uji *flammability* ini dipandang cukup akurat untuk mengukur batas penyalan.
- Refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi molar 0,4/0,6; 0,59/0,41 dan 0,5/0,5, memiliki batas penyalan bawah/*LFL* lebih dari 3,5% sehingga pada komposisi tersebut campuran yang diuji dapat dikategorikan sebagai refrigeran kelas A2.
- Penambahan *LFS* berupa R-22 dalam campuran R-290/R-22 dapat menurunkan sifat mampu nyala campuran tersebut yang ditunjukkan dengan semakin naiknya batas penyalan bawah (*LFL*) refrigeran campuran.
- *LFL* hasil pengujian relatif sama dengan *LFL* perediksi menggunakan persamaan *Le Chatelier*, namun persamaan tersebut tidak dapat digunakan untuk memprediksi *UFL*.
- Refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,4/0,6; 0,59/0,41 dan 0,5/0,5 lebih aman dari R-290

karena memiliki sifat lebih tidak mudah terbakar (kelas A2).

Sedangkan berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan dalam pengujian massa optimum refrigeran, dapat disimpulkan bahwa campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,4/0,6; 0,59/0,41 dan 0,5/0,5 fraksi mol dapat langsung menggantikan refrigeran R-22 pada suatu sistem refrigerasi kompresi uap tanpa melakukan penggantian komponen. Keunggulan penggunaan refrigeran campuran tersebut dalam sistem pendingin adalah:

- Lebih hemat bahan
Massa optimum refrigeran campuran R-290/R-22 pada komposisi 0,5/0,5 dan 0,59/0,41 hanya 60% dari massa optimum R-22.
- Lebih hemat energi
COP sistem dengan refrigeran campuran R-290/R-22 dapat lebih besar dari sistem dengan R-22, tetapi lebih kecil dari COP sistem yang menggunakan R-290.

DAFTAR PUSTAKA

1. Unit Ozon, *Program Perlindungan Lapisan Ozon Dan Bahan-Bahan Perusak Ozon*, Deputi Bidang Pelestarian Lingkungan Kementerian Lingkungan Hidup, www.menlh.go.id, 2005.
2. EPA (Environmental Protection Agency), *The Scientific Assessment of Ozone Depletion*, a report of the World Meteorological Association's Global Ozone Research and Monitoring Project, 2002.
3. A.D. Pasek, N.P. Tandian, dan A. Suwono, Less Flammability Hydrocarbon Refrigerant as an Alternative Refrigerant For Energy Conservation in Refrigeration System. *Proceeding of The International Conference On Fluid and Thermal Energy Conservation*. 2003.
4. SNI (Standar Nasional Indonesia). SNI 06-6500-2000, *Refrigeran: Pemakaian Pada Instalasi Tetap*, Badan Standarisasi Nasional, 2000.
5. C.P. Arora, *Refrigeration and Air Conditioning 2nd Edition*, Mc Graw Hill Book Co., Singapore, 2001.
6. REFPROP®, *Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerant and Refrigerant Mixture*, NIST Standard Reference Database 23 – Version 6.01, 1998.
7. K.K. Kuo, *Principles of Combustion*, John Wiley & Sons. New York, 1986.
8. ASTM E 681 - 94, *Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
9. Wiranto Arismunanadar dan Heizo Sato. *Penyegaran Udara*. Pradnya Paramita, Jakarta, 1986.
10. Adrian, Kaji Eksperimental Sifat Mampu Nyala dan Performansi Refrigeran Campuran R-290+R-134a Sebagai Alternatif Pengganti R-22, *Tesis*, Jurusan Teknik Mesin ITB, Bandung, 2006.