



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**Profesor Ari Darmawan Pasek**

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI  
PENGHEMATAN ENERGI DAN  
PEMANFAATAN SUMBER ENERGI  
TERBAIK YANG RAMAH LINGKUNGAN**

27 Maret 2015  
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**  
27 Maret 2015

**Profesor Ari Darmawan Pasek**

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI  
PENGHEMATAN ENERGI DAN  
PEMANFAATAN SUMBER ENERGI  
TERBAIKAN YANG RAMAH LINGKUNGAN**



Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGHEMATAN ENERGI  
DAN PEMANFAATAN SUMBER ENERGI TERBAIKAN YANG  
RAMAH LINGKUNGAN  
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,  
tanggal 27 Maret 2015.

**Hak Cipta dilindungi undang-undang.**

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

**UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA**

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis  
Data katalog dalam terbitan

Ari Darmawan Pasek

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGHEMATAN ENERGI DAN  
PEMANFAATAN SUMBER ENERGI TERBAIKAN YANG RAMAH  
LINGKUNGAN  
Disunting oleh Ari Darmawan Pasek

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2015  
vi+54 h., 17,5 x 25 cm  
**ISBN 978-602-8468-77-0**  
1. Teknologi 1. Ari Darmawan Pasek

## KATA PENGANTAR

Pudji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia yang diberikan kepada kita semua sehingga kita berada dalam keadaan berkehidupan yang baik.

Merupakan suatu kehormatan bagi Penulis mendapat kesempatan menyampaikan Orasi ilmiah yang berjudul **Pengembangan Teknologi Penghematan Energi dan Pemanfaatan Sumber Energi Terabaikan yang Ramah Lingkungan** sesuai dengan keahlian kami di bidang Rekayasa Energi Industri.

Tulisan dalam buku ini terdiri dari empat bagian. Bagian pertama berisi upaya penghematan energi pada unit refrigerasi dan pengondisian udara (RAC) dengan cara mengganti refrigeran CFC atau HCFC yang digunakan menjadi refrigeran hidrokarbon. Konversi refrigeran ini selaras dengan kebijakan pemerintah dalam implementasi Protokol Montreal mengenai penghapusan Bahan Perusak Ozon. Pengembangan refrigeran hidrokarbon tak mudah menyala juga disampaikan pada bagian ini. Pada pertama ini dibahas pula upaya penghematan konsumsi energi listrik pada gedung dengan menerapkan prinsip-prinsip *green building*. Pada bagian kedua dibahas hasil studi pemanfaatan sumber energi terabaikan seperti air panas bumi bertekanan rendah untuk pembangkit tenaga listrik menggunakan sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC). Manfaat dan kendala pemanfaatan *brine* pada PLTP disampaikan pada bagian ini. Pada bagian ketiga dibahas hasil-hasil penelitian pemuliaan dan pemanfaatan limbah biomassa (sampah kota dan tandan kosong kelapa sawit) untuk bahan bakar pembangkit listrik. Karakteristik

sampah kota dan hasil-hasil pemuliaan sampah organik dengan proses hidrotermal disampaikan pada bagian ini. Rencana penelitian dan pengembangan teknologi dibidang penghematan energi dan pemanfaatan sumber-sumber energi terabaikan untuk pembangkit tenaga listrik diulas pada bagian keempat.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung (ITB) yang telah memberi kesempatan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah dan menerbitkannya dalam buku ini.

Semoga ulasan yang disampaikan dalam orasi ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi masyarakat luas.

Bandung, 27 Maret 2015

**Ari D. Pasek**

## DAFTAR ISI

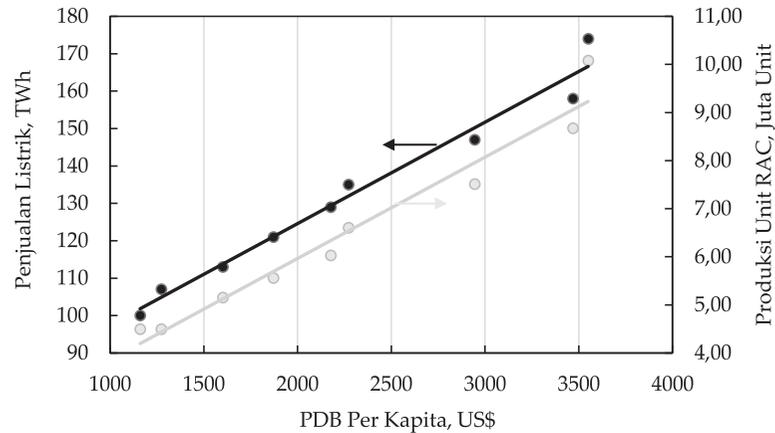
|  |     |
|--|-----|
| KATA PENGANTAR .....   | iii |
| DAFTAR ISI .....   | vii |
| 1. PENDAHULUAN .....   | 1   |
| 2. PENGEMBANGAN REFRIGERAN HIDROKARBON UNTUK<br>PENGHEMATAN ENERGI DI SEKTOR RAC ..... | 4   |
| 2.1. Refrigeran Hemat Energi dan Ramah Lingkungan .....                                | 4   |
| 2.2. Konversi unit CFC dan HCFC ke refrigeran HC.....                                  | 7   |
| 2.3. Prefrigeran hidrokarbon tak mudah menyala .....                                   | 10  |
| 2.4. Standar operasi dan standar keamanan .....  | 14  |
| 2.5. Implementasi Konsep Hijau pada Bangunan ( <i>Green Building</i> )                 | 17  |
| 3. PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK DARI SUMBER<br>ENERGI YANG 'TERABAIKAN' .....       | 20  |
| 3.1. Penggunaan Sistem Organic Rankine Cycle (ORC) .....                               | 22  |
| 3.2. Pemanfaatan Limbah Biomassa .....   | 28  |
| 3.2.1. Karakteristik sampah kota .....   | 29  |
| 3.2.2. Proses hidrotermal .....  | 32  |
| 3.3. Pengembangan dan produksi Turbin Radial .....                                     | 35  |
| 4. KEGIATAN RISET DAN PENGEMBANGAN SELANJUTNYA ...                                     | 37  |
| 5. UCAPAN TERIMA KASIH .....   | 43  |
| DAFTAR PUSTAKA .....   | 45  |
| CURRICULUM VITAE .....   | 49  |

# PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGHEMATAN ENERGI DAN PEMANFAATAN SUMBER ENERGI TERBAIKAN YANG RAMAH LINGKUNGAN

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk dan ekonomi membutuhkan ketersediaan energi, termasuk energi listrik. Dengan demikian, peningkatan pertumbuhan ekonomi selalu diiringi oleh peningkatan kebutuhan dan konsumsi energi. Gambar 1 menunjukkan peningkatan Pendapatan Domestik Bruto (PDB) per Kapita dengan besarnya energi listrik terjual di Indonesia. Pada tahun 2004 PDB perkapita Indonesia hanya US\$ 1.160, dan energi listrik terjual pada tahun tersebut adalah sekitar 100 TWh. PDB perkapita Indonesia meningkat menjadi 3551 US\$ pada tahun 2012, dan pada tahun tersebut energi listrik terjual juga meningkat menjadi 174 TWh.

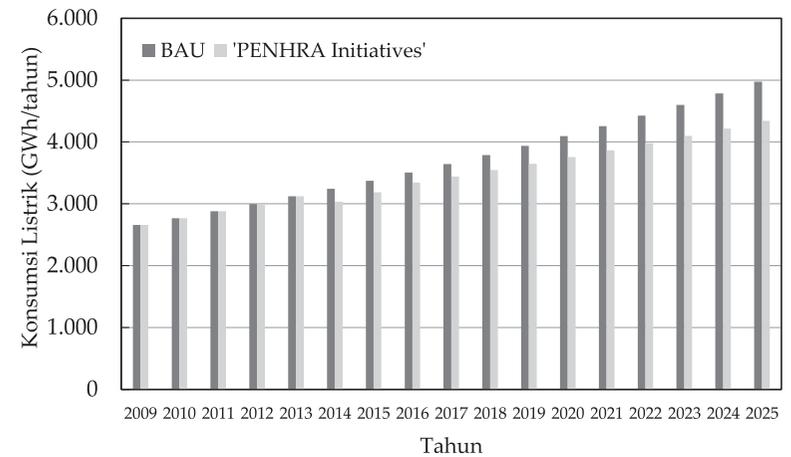
Sebaliknya kesejahteraan yang disebabkan oleh adanya pertumbuhan ekonomi akan meningkatkan belanja barang untuk kenyamanan seperti mesin refrigerasi dan pengondisian udara (RAC), baik untuk keperluan rumah tangga, maupun untuk keperluan komersial dan industri, yang pada akhirnya akan meningkatkan konsumsi energi listrik. Pada Gambar 1 ditunjukkan pula peningkatan jumlah produksi mesin refrigerasi dan pengondisian udara di Indonesia terhadap PDB perkapita. Dalam kurun waktu 2004 - 2012 jumlah unit RAC yang diproduksi lokal di Indonesia meningkat dua kali lipat dari sekitar 5 juta unit di tahun 2004 menjadi 10 juta unit di tahun 2012. Jumlah ini belum termasuk unit RAC yang diimpor.



**Gambar 1.** PDB Perkapita, penjualan listrik, dan produksi lokal unit refrigerasi dan pengondisian udara (RAC) di Indonesia (diolah dari data World Bank [1] dan Statistik PLN 2012 [2], dan UNDP [3] untuk tahun 2004 - 2012)

Unit RAC yang diproduksi di Indonesia mempunyai COP rata-rata sekitar 2,70 [3] atau setara dengan *Energy Efficient Ratio* (EER) 9,2 BTU/Wh. EER ini lebih rendah dari EER minimum rata-rata sebesar 10,5 BTU/Wh yang dipersyaratkan oleh ASHRAE [4]. Rendahnya efisiensi energi unit RAC akan menyebabkan pemborosan penggunaan energi. Dengan kata lain penggunaan unit RAC dengan EER yang tinggi dapat menurunkan konsumsi energi listrik pada sektor ini. Prediksi konsumsi energi disektor RAC komersial, dan industri diperlihatkan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut dapat terlihat konsumsi energi di sektor yang disebutkan di atas terus meningkat karena meningkatnya penjualan unit RAC. Untuk menekan peningkatan konsumsi di sektor ini, Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) bekerjasama dengan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK),

UNDP dan GEF berencana untuk melaksanakan program yang disebut *Promoting Energy Efficiency for Non-HCFC Refrigeration and Air Conditioning* (PENHRA). Sejumlah insentif akan diberikan kepada manufaktur RAC lokal dengan persyaratan dapat meningkatkan EER unit yang diproduksinya sebesar 8% pada tahun 2014 - 2017, dan kemudian setiap tahun naik sebesar 2%. Sejumlah regulasi akan dibuat untuk memastikan unit RAC yang dipasarkan mempunyai efisiensi energi yang tinggi (PENHRA Initiatives [3]).



**Gambar 2.** Prediksi Pertumbuhan konsumsi energi listrik di sektor RAC komersial dan industri, kasus BAU dan dengan intervensi PENHRA [3]

Pada Gambar 2 diperlihatkan pula pengaruh peningkatan EER seperti yang disebutkan di atas terhadap konsumsi energi di sektor RAC. Konsumsi energi akan berkurang dibanding dengan tanpa adanya upaya peningkatan EER. Namun konsumsi akan tetap meningkat karena pertumbuhan penjualan yang pesat (5%).

Berdasarkan pembahasan diatas, untuk memenuhi kebutuhan energi dimasa yang akan datang, selain perlu dilakukan upaya konservasi energi perlu juga dilakukan pembangunan pembangkit listrik baru. Agar upaya penghematan dan penyediaan energi listrik tersebut tidak menimbulkan kerusakan lingkungan, maka harus digunakan teknologi yang ramah lingkungan.

Dalam tulisan ini dibahas pengembangan teknologi berbasis hidrokarbon untuk penghematan energi di sektor RAC dan pembangkit listrik dengan memanfaatkan sumber energi terabaikan dalam upaya penyediaan kebutuhan listrik untuk masa depan yang lebih baik. Pengembangan refrigeran hidrokarbon untuk meningkatkan efisiensi energi pada unit RAC akan dibahas pada bagian awal. Pada bagian selanjutnya akan disampaikan hasil evaluasi pembangkit listrik Siklus Rankine Organik (*Organic Rankine Cycle*) dengan sumber panas air geotermal yang selama ini tidak dimanfaatkan. Kemudian akan dibahas hasil-hasil penelitian pemanfaatan limbah biomassa untuk bahan bakar pembangkit listrik.

## **2. PENGEMBANGAN REFRIGERAN HIDROKARBON UNTUK PENGHEMATAN ENERGI DI SEKTOR RAC**

### **2.1. Refrigeran Hemat Energi dan Ramah Lingkungan**

Pemerintah Indonesia telah meratifikasi Konvensi Wina dan Protokol Montreal tentang perlindungan lapisan ozon pada tahun 1992. Pada awalnya, pelarangan penggunaan Bahan Perusak Ozon (BPO) di sektor RAC hanya mencakup Chloro Fluoro Carbon (CFC). Pelarangan ini

meliputi pelarangan impor bahan CFC dan barang mengandung CFC mulai 31 Desember 2007 [5]; dan pelarangan memproduksi barang yang mengandung CFC, mulai 30 Juni 2008 [6]. Namun akhirnya pelarangan tersebut juga mencakup refrigeran dari jenis Hydro Chloro Fluoro Carbon (HCFC) [7, 8, 9]. Pelarangan produksi unit RAC yang menggunakan CFC dan HCFC secara tidak langsung merupakan dorongan dan sekaligus perlindungan terhadap produk baru yang tidak menggunakan BPO. Oleh sebab itu perlu disiapkan unit RAC dengan refrigeran baru yang karakteristiknya sesuai dengan rekomendasi Protokol Montreal yaitu disamping tidak merusak ozon (nilai *Ozone Depletion Potential*, ODP, nol), juga tidak secara signifikan menimbulkan efek pemanasan global (nilai *Global Warming Potential*, GWP, rendah).

Tabel 1 memperlihatkan beberapa ODP dan GWP refrigeran alternatif dan perbandingannya dengan refrigeran CFC dan HCFC. Dari tabel ini terlihat bahwa refrigeran hidrokarbon (HC) memiliki sifat-sifat ramah lingkungan yang unggul karena nilai ODP nol dan GWP paling rendah di antara beberapa refrigeran lainnya.

Dari aspek lingkungan refrigeran ini memiliki prospek yang baik, karena beberapa negara maju mulai menerapkan batas minimum GWP refrigeran yang boleh digunakan. Meskipun secara regulasi belum dinyatakan batas minimum GWP yang diperkenankan, namun refrigeran HFC yang memiliki nilai ODP nol tetapi memiliki nilai GWP yang relatif tinggi akan terancam dihapuskan penggunaannya. Selain ramah lingkungan, refrigeran hidrokarbon dapat diproduksi di dalam negeri, karena bahan bakunya berupa gas LPG tersedia di Indonesia.

**Tabel 1.** Beberapa Refrigeran dan nilai ODP dan GWP nya

| REFRIGERAN |            | ODP [10]         | GWP [11] |
|------------|------------|------------------|----------|
| CFC        | R-12       | Tunggal          | 10900    |
| HCFC       | R-22       | Tunggal          | 0,055    |
| HFC        | R-134a     | Tunggal          | 0,0      |
|            | R-410A     | <i>Azeotrope</i> | 0,0      |
|            | R-407C     | <i>Zeotrope</i>  | 0,0      |
|            | R-407F     | <i>Zeotrope</i>  | 0,0      |
|            | R-407A     | <i>Zeotrope</i>  | 0,0      |
|            | R-32       | Tunggal          | 0,0      |
|            | HFO-1234ze | Tunggal          | 0,0      |
|            | HFO-1234yf | Tunggal          | 0,0      |
| HC         | R-290      | Tunggal          | 0,0      |
|            | R-600a     | Tunggal          | 0,0      |
|            | R-600      | Tunggal          | 0,0      |

Berdasarkan hal tersebut di atas, pada tahun 1997 pengembangan sistem produksi dan penggunaan refrigeran hidrokarbon mulai dilakukan di Laboratorium Termodinamika, Pusat Rekayasa Industri ITB [12]. Refrigeran hidrokarbon yang dikembangkan pada awalnya adalah Propana (R-290) sebagai pengganti R-22 dan campuran Propana/Butana (R-290/R-600/R-600a) sebagai pengganti R-12. Tabel 2 memperlihatkan perbandingan beberapa sifat termodinamika dari refrigeran tersebut.

**Tabel 2.** Perbandingan beberapa sifat termodinamika Refrigeran CFC, HCFC dan HC pada titik didih normal

| Refrigeran         | Titik didih Normal (°C) | Massa Jenis (kg/m <sup>3</sup> ) | Panas Laten (kJ/kg) |
|--------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------|
| R-22               | -40,8                   | 1.285                            | 233,2               |
| R-290              | -42,1                   | 523                              | 424,3               |
| R-12               | -29,8                   | 1.396                            | 165,8               |
| R-290/R-600/R-600a | -27,0                   | 551                              | 395,0               |

Dihimpun dari berbagai sumber

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa R-290 mempunyai titik didih yang hampir sama dengan R-22, hal ini menunjukkan kemungkinan R-290 dapat diisikan langsung ke sistem R-22 (*drop in*). Massa jenis R-290 yang hanya setengah dari R-22 menyebabkan jumlah muatan refrigeran yang diisikan pada unit menjadi hanya setengah dari muatan R-22. Namun karena panas laten R-290 dua kali lebih besar dari R-22, maka unit dengan R-290 akan menghasilkan kapasitas pendinginan yang sama seperti unit yang diisi R-22. Dengan demikian biaya refrigeran dapat lebih murah. Hal yang sama juga terjadi pada campuran R-290/R-600/R-600a sebagai pengganti R-12. Namun campuran tersebut bersifat zeotropik sehingga memiliki *glide temperature* yang cukup besar, yaitu sekitar 8°C, sehingga pada suatu tekanan yang tetap refrigeran menguap atau mengembun pada temperatur yang bervariasi. Hal ini akan menyebabkan temperatur evaporator dan kondensor tidak seragam. *Glide temperature* yang besar akan menyebabkan terjadinya *fractionation* yaitu perbedaan konsentrasi campuran di fasa uap dan fasa cairan. Kedua fenomena tersebut di atas akan menyebabkan buruknya kinerja unit RAC.

## 2.2. Konversi unit CFC dan HCFC ke refrigeran HC

Setelah berhasil mengembangkan perangkat produksi R-290 dan campuran R-290/R-600/R-600a dari LPG lokal, selanjutnya dilakukan uji coba kinerja unit RAC yang semula berisi refrigeran CFC atau HCFC kemudian di konversi menjadi unit dengan refrigeran hidrokarbon (HC). Pengujian dilakukan di laboratorium maupun di lapangan pada unit kapasitas kecil sampai dengan kapasitas besar (*chiller*). Tabel 3 memperlihatkan hasil pengujian konversi refrigeran pada unit AC

kapasitas kecil di Supermarket Ratu Luwes, Surakarta. Hasil pengujian tersebut menunjukkan penurunan konsumsi energi dari unit yang semula menggunakan R-22, kemudian dikeluarkan dan diganti dengan R-290 tanpa ada modifikasi apapun. Penghematan konsumsi listrik sebesar 22,23% diperoleh pada unit berkapasitas 1 hp. Penghematan akan berkurang pada unit kapasitas yang lebih besar.

**Tabel 3.** Hasil pengujian kinerja unit pengondisian udara (AC) kapasitas kecil sebelum dan setelah di konversi ke refrigeran HC di Supermarket Ratu Luwes, Surakarta, 15 - 28 Desember 2005

| Parameter                 | hp     | 1      | 2      | 4      |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                           | BTU/hr | 9000   | 18000  | 25500  |
| <b>R-22</b>               |        |        |        |        |
| Arus listrik kompresor, A |        | 4.3    | 7.9    | 12.2   |
| Peva., psig               |        | 70     | 70     | 70     |
| Temperatur udara, °C      |        | 13,8   | 15,9   | 8,2    |
| <b>R-290</b>              |        |        |        |        |
| Arus listrik kompresor, A |        | 3.3    | 6.5    | 10.8   |
| Peva., psig               |        | 68     | 65     | 61     |
| Temperatur udara, °C      |        | 13,0   | 14,9   | 7,9    |
| Selisih, %                |        | -22,23 | -17,72 | -11,47 |

Hasil pengujian unit *chiller* kapasitas 420 TR (Ton Refrigerasi) di Hotel Grand Melia, Jakarta diperlihatkan pada Tabel 4. Pengujian dilakukan pada dua unit *chiller* yang identik, satu menggunakan refrigeran R-22 sedangkan yang lain menggunakan R-290 (Propana). Dari tabel ini dapat dilihat konsumsi energi unit *chiller* yang menggunakan R-290 lebih rendah (125.088 kWh) meskipun jam operasinya lebih tinggi (5213 jam), di banding dengan unit yang menggunakan R-22. Unit *chiller* yang menggunakan R-290 lebih hemat sekitar 9%. Pada waktu itu harga pembelian listrik adalah Rp. 410 per kWh pada beban normal dan Rp. 575 pada beban

puncak, dengan demikian diperoleh penghematan sebesar Rp 5,4 juta per bulan. Dengan adanya penghematan yang cukup signifikan ini, akhirnya seluruh unit *chiller* di hotel tersebut di ganti refrigerannya dengan hidrokarbon.

**Tabel 4.** Hasil pengujian kinerja unit *chiller* kapasitas 420 TR sebelum dan setelah di konversi ke refrigeran HC, di Gran Melia Hotel, Jakarta

| Parameter                    | R-22                    | R-290     |
|------------------------------|-------------------------|-----------|
| Tanggal pengamatan           | 25/12/2002 sd 27/1/2003 |           |
| kWh meter, kWh               | 137.440                 | 125.088   |
| Σ jam operasi, jam           | 4610                    | 5313      |
| Konsumsi energi listrik, kW  | 194,40                  | 161,82    |
| Beda pemakaian listrik, kW   |                         | 32,58     |
| Penghematan per bulan, ΔkWh  |                         | 12,352    |
| ΔkWh x Rp./kWh               |                         | 5,421,276 |
| Penghematan pada Januari, Rp |                         | 5,421,276 |

Hasil konversi refrigeran yang memberikan penghematan konsumsi energi listrik yang cukup signifikan ini telah banyak menarik perhatian investor lokal untuk memproduksi refrigeran hidrokarbon dan penyediaan jasa konversi refrigeran. Dalam kurun waktu 2000 – 2012, beberapa perusahaan didirikan untuk memproduksi refrigeran hidrokarbon sekaligus penyedia jasa konversi refrigeran. Refrigeran hidrokarbon lokal tersebut antara lain, Hycool (PT. Citra Total Buana Biru), Petrozon, Musicool, Breezon (PT. Pertamina), Artek (PT. Greenstar Artek Indonesia). Namun saat ini hanya PT. Pertamina yang masih memproduksi refrigeran hidrokarbon sedangkan jasa konversi refrigeran dilakukan oleh ratusan bengkel kecil dan besar yang tersebar di seluruh Indonesia. Mereka tergabung dalam Komunitas Refrigeran Hidrokarbon Indonesia (KHRI).



**Gambar 3.** Pembangunan pabrik refrigeran hidrokarbon di PT. Citra Total Buana Biru, Tambun, tahun 2000.

Hambatan yang dihadapi oleh pengembang refrigeran hidrokarbon antara lain adalah isu keamanan karena hidrokarbon mudah terbakar; adanya keberatan dari para produsen unit RAC terhadap kegiatan konversi refrigeran pada produk mereka; dan tidak adanya jaminan keamanan dan keselamatan dari pemberi jasa pada unit yang telah dikonversi. Kedepan para produsen refrigeran hidrokarbon harus berkolaborasi dengan produsen unit RAC lokal untuk membuat unit RAC khas hidrokarbon yang memenuhi standar keamanan internasional.

### 2.3. Refrigeran hidrokarbon tak mudah menyala

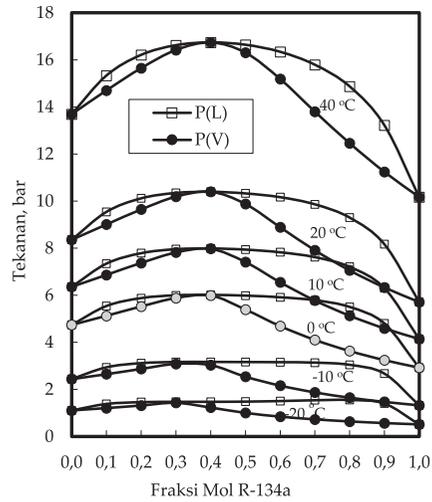
Disamping keunggulan refrigeran hidrokarbon yang dibahas di atas yaitu hemat energi dan dapat digunakan langsung tanpa modifikasi pada unit yang semula menggunakan refrigeran jenis CFC dan HCFC, refrigeran hidrokarbon juga mempunyai kelemahan yaitu mudah terbakar, atau diklasifikasikan sebagai refrigeran A3 [13], salah satunya karena *Lower Flammability Limit* (LFL) dari refrigeran ini lebih kecil dari 3,5% fraksi volume dalam udara (atau  $< 0,1$  kg refrigeran/m<sup>3</sup> udara). Oleh sebab itu, pemakaiannya menjadi terbatas dan/atau harus dilengkapi

peralatan keamanan yang menyebabkan meningkatnya biaya unit. Agar refrigeran hidrokarbon dan manfaatnya dapat diperoleh dalam lingkup aplikasi yang lebih luas, dilakukan penelitian untuk menemukan refrigeran baru berbasis hidrokarbon yang memiliki sifat nyala yang lebih rendah dari refrigeran hidrokarbon biasa dan dapat diklasifikasikan sebagai refrigeran A2 [13] sehingga diperlakukan seperti halnya refrigeran kelas A1.

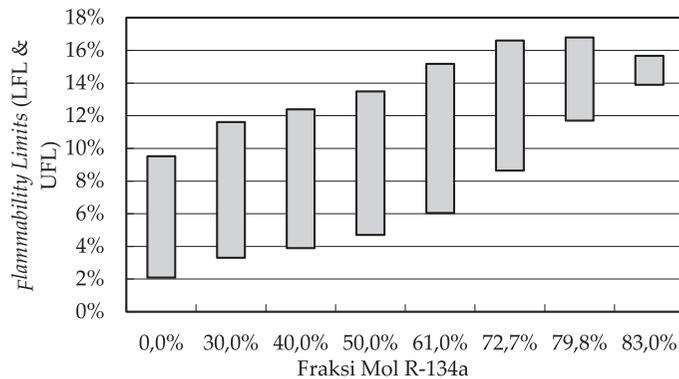
Dalam penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan LFL, refrigeran hidrokarbon dicampur dengan refrigeran yang tidak mudah terbakar [14]. Sebagai contoh misalnya campuran R-290 dan R-134a sebagai pengganti R-22. Campuran R-290 dan R-134a dengan komposisi yang tepat akan mempunyai tekanan jenuh yang sama seperti tekanan jenuh R-22 padahal tekanan jenuh R-290 dan R-134a masing-masing lebih rendah dari R-22. Gambar 3 menunjukkan tekanan jenuh campuran R-290/R-134a pada berbagai komposisi dan temperatur. Dari gambar ini terlihat bahwa campuran ini bersifat *azeotrope* pada komposisi 60% fraksi mol R-290, yaitu bersifat seperti zat tunggal, mengembun dan menguap pada tekanan/temperatur yang sama, sehingga tidak menimbulkan fenomena *glide temperature* dan *fractionation*. Oleh sebab itu campuran dengan fraksi mol 0,6 R-290 + 0,4 R-134a dipilih sebagai refrigeran pengganti R-22.

Berbagai komposisi campuran R-290 dan R-134a diuji pembakaran untuk mencari nilai *Lower Flammability Limit* (LFL) dan *Upper Flammability Limit* (UFL) nya. Uji pembakaran dilakukan sesuai dengan ASTM-681-85 [15], hasilnya diperlihatkan pada Gambar 4. Dari gambar ini terlihat bahwa LFL meningkat dengan meningkatnya komposisi R-134a. Namun

kenaikan LFL ini juga diikuti oleh kenaikan UFL, setelah komposisi R-134a di atas 73% barulah daerah kritis pembakaran ini menyempit. Dari gambar ini terlihat pula bahwa refrigeran campuran ini pada komposisi terbaik mempunyai LFL sebesar 4%, dan dapat dikategorikan sebagai refrigeran A2 (*slightly flammable*).

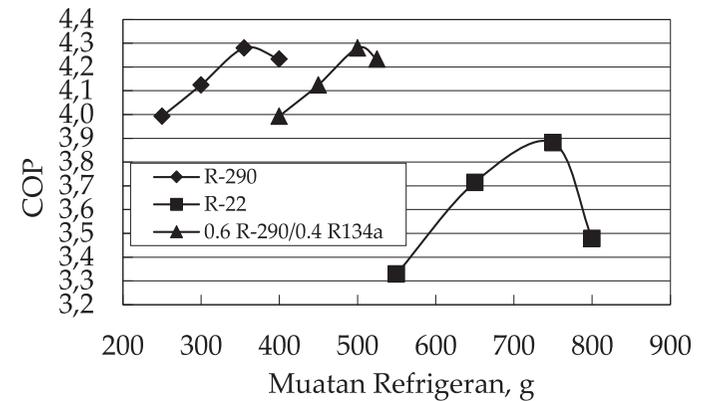


Gambar 4. Kurva jenuh campuran R-290+R-134a [14]



Gambar 5. Perubahan LFL dan UEL dengan peningkatan jumlah R-134a pada campuran R-290+R-134a [14]

Refrigeran campuran dengan komposisi 0,6 R-290 dan 0,4 R-134a kemudian diuji pada perangkat uji pengondisian udara di Laboratorium Termodinamika, Pusat Rekayasa Industri ITB untuk mendapatkan muatan refrigeran optimum, yaitu muatan refrigeran yang memberikan efisiensi energi (COP) maksimum. Gambar 5 menunjukkan muatan refrigeran optimum dari tiga buah refrigeran yaitu R-22, R-290, dan campuran 0,6 R-290 + 0,4 R-134a pada perangkat uji yang sama. Dari gambar tersebut terlihat muatan refrigeran optimum R-22 adalah yang terbesar dan yang terkecil adalah R-290. Sesuai dengan yang diharapkan masa optimum dari campuran 0,6 R-290 + 0,4 R-134a, berada diantara keduanya. COP tertinggi dicapai oleh R-290 dan nilainya hampir sama dengan COP campuran 0,6 R-290 + 0,4 R-134a. Sedangkan COP unit dengan R-22 adalah yang terendah.



Gambar 6. Perbandingan muatan refrigeran R-290, R-22, dan R-290+R-134a pada temperatur evaporator 6° C, [14]



**Gambar 7.**

Kantor SIRIM Berhad, 2002

Penemuan refrigeran campuran ini di daftarkan patennya secara nasional dan internasional [16] pada tahun 2000, namun baru tahun 2010 diberikan hak patennya untuk lingkup nasional [17]. Pemasaran refrigeran ini dilakukan tidak saja dalam negeri tetapi juga ke Malaysia. Serangkaian tes telah dilakukan di Laboratorium SIRIM Berhad, Shah Alam, Selangor, dan sertifikasi telah diperoleh untuk dapat dipasarkan di Malaysia.

#### 2.4. Standar operasi dan standar keamanan refrigeran

Teknologi RAC berbasis hidrokarbon dapat diterima pasar apabila masyarakat dapat diyakinkan akan keunggulan dan keamanan refrigeran ini. Untuk itu perlu dilakukan penelitian-penelitian tentang resiko keselamatan refrigeran hidrokarbon dan refrigeran mudah terbakar lainnya. Kemudian merangkum hasilnya dalam standar keselamatan penanganan refrigeran dan unit yang mencakup mulai dari tahap produksi, transportasi, penyimpanan, pemasangan, pengoperasian, perawatan/perbaikan, pembuangan, dan penghancuran. Hal ini perlu dilakukan karena refrigeran baru pengganti R-22 yang akan dipasarkan di Indonesia seperti R-32, dan HFO lebih mudah terbakar dibanding refrigeran CFC dan HCFC, meskipun refrigeran-refrigeran tersebut dikategorikan sebagai refrigeran A2L (*A2 Low*) [18]. Cara lain untuk

mempercepat penerbitan standar adalah mengadopsi standar internasional atau negara lain. Tabel 5 menunjukkan standar penanganan refrigeran dan unit RAC pada seluruh tahapan. Standar Indonesia sebenarnya sudah ada pada tiap tahapan namun standar yang sudah ada ini kurang spesifik, tidak tepat, dan kadaluarsa. Perlu upaya penambahan, perbaikan dan pengkinian standar RAC di semua tahapan.

**Tabel 5.** Standar penanganan refrigeran dan unit RAC pada seluruh tahapan

| Tahapan                          | Internasional   | USA                        | Eropah  | Indonesia  |
|----------------------------------|---|----------------------------|---|--|
| Produksi Refrigeran dan Unit     | ISO817(2005), (2014)<br>ISO5149(1993), (2014)<br>IEC60335-2-40, ed 4.0 (2002), 4.1 (2005), 4.2 (2005) | ASHRAE34(2010)<br>ASHRAE15 | EN817<br>EN378<br>ATEX<br>Pressure equipment directive (PED)  | SNI IEC 60335-1:2009<br>SNI IEC 60335-2-40:2009<br>SNI IEC 60335-2-24:2009<br>SNI 7647:2010  |
| Transportasi Refrigeran dan Unit | GHS(←UNRTDG)<br>IATA(Air)<br>IMDG (Marine)  | DOT                        | GHS<br>ADR (Road transport)<br>IMDG (Marine)<br>RID (Railway) | SNI 06-6501.1-2000<br>SNI 13-3619-1994   |
| Penyimpanan Refrigeran dan Unit  |   |                            |   | SNI 06-6501.1-2000<br>SNI 19-1959-1990   |
| Pemasangan                       | IEC60335-2-40(2002)   | ASHRAE15                   | EN378<br>ATEX   | SNI 06-6500-2000   |
| Pengoperasian                    |   | ASHRAE15<br>UL1995         | EN60335-2-40<br>EN378<br>ATEX                                 | SNI 19-6713-2002<br>SNI 03-6390-2000   |
| Perawatan, Perbaikan             | IEC60335-2-40, ed 4.0 (2002), 4.1 (2005), 4.2 (2005), 2-40(2002)                                      | CAA608<br>ASHRAE147        |   | SNI 06-6500-2000<br>SNI 06-6501.2-2000<br>SNI IEC 60335-2-40:2009<br>SNI IEC 60335-2-24:2009 |
| Pembuangan, Penghancuran         |   | CAA608                     |   |  |

Mencermati standar internasional dan standar pada kebanyakan negara, secara umum standar tersebut tidak memberi peluang kehadiran teknologi RAC berbasis hidrokarbon. Untuk itu diperlukan peran Pemerintah Indonesia untuk mengubah standar internasional di forum ISO (*International Organization for Standardization*). Upaya yang dilakukan Pemerintah Jepang dalam mengubah standar nasional dan internasional dalam upaya memasarkan R-32 sebagai pengganti R-22 perlu ditiru. Sebelumnya di dalam negerinya sendiri R-32 dikategorikan sebagai refrigeran yang mudah terbakar sehingga pemakaiannya menjadi terbatas.

Namun setelah industri RAC Jepang sepakat untuk mengembangkan R-32, maka segera dilakukan analisis resiko keselamatan dan mengubah semua standar terkait untuk memungkinkan penggunaan R-32 secara luas, dan dapat memasarkan unit RAC R-32 di dalam maupun di luar negeri. Berdasarkan analisis resiko keselamatan yang dibuatnya, Pemerintah Jepang aktif melobi negara lain untuk mengubah ISO 817 dan ISO 5149 dan mengkategorikan R-32 ke dalam kelompok refrigeran tidak mudah terbakar. Meskipun ratifikasi standar ISO yang baru (ISO 817:2014 dan ISO 5149: 2014) bergantung kepada kebijakan masing-masing negara, namun upaya ini telah berhasil menekan standar internasional lainnya yaitu IEC-60335-2-40 untuk mengadopsi ISO 817 dan ISO 5149 yang baru. IEC-60335-2-40 adalah standar keamanan yang penting karena dirujuk oleh World Trade Organization (WTO) untuk dapat dipenuhi agar unit RAC dapat diperdagangkan antar negara.

Dukungan terhadap penggunaan teknologi berbasis hidrokarbon sebenarnya mulai muncul. Negara-negara Eropah mulai memberlakukan *F-Gas Regulation* [19], yaitu regulasi tentang pengurangan emisi gas-gas

rumah kaca seperti refrigeran sintetis Hydro Fluoro Carbon (HFC). Dengan adanya regulasi ini kedepan refrigeran yang dapat diterima adalah refrigeran dengan nilai GWP lebih kecil dari 150. Hal ini akan mendorong penggunaan teknologi RAC dengan refrigeran alamiah seperti hidrokarbon, CO<sub>2</sub>, dan amonia yang memiliki nilai GWP sangat rendah. Negara besar lain yang mendukung teknologi hidrokarbon adalah Tiongkok, pabrik unit RAC dengan refrigeran hidrokarbon telah didirikan di negara tersebut. Negara-negara Eropah dan Tiongkok ini dapat dijadikan mitra untuk melobi perubahan standar internasional.

Berdasarkan pembahasan diatas dapat disimpulkan bahwa upaya pengembangan teknologi yang dimulai dari inovasi hingga menjadi produk yang mempunyai nilai ekonomi memerlukan keterlibatan semua pihak tidak saja para peneliti dan perguruan tingginya, tetapi juga industri, asosiasi profesi, dan pemerintah. Baik peruguruan tinggi, asosiasi profesi, maupun industri harus berkiprah tidak hanya secara nasional tetapi juga internasional, sehingga disegani dan mempunyai pengaruh di forum-forum nasional maupun internasional.

## 2.5 Implementasi Konsep Hijau pada Bangunan (*Green Building*)

Peningkatan efisiensi energi di unit pengondisian udara belumlah signifikan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan energi di gedung secara keseluruhan. Untuk penghematan energi yang menyeluruh, saat ini telah banyak diimplementasikan konsep bangunan hijau. Sertifikasi *green building* oleh lembaga sertifikasi nasional seperti *Green Building Council Indonesia* (GBCI) telah banyak dilakukan. Prinsip-prinsip *green ship* dapat dilihat di situs GBCI ([www.gbciindonesia.org](http://www.gbciindonesia.org)).

Satu-satunya gedung kampus yang telah mendapat sertifikat *green building* dengan *rating gold* adalah Gedung A Kampus Institut Teknologi dan Sains Bandung (ITSB). Gedung ini terdiri dari 4 lantai dengan luas lantai dasar 1.353 m<sup>2</sup>. Luas area gedung adalah 16.325 m<sup>2</sup> yang terdiri dari 6.471 m<sup>2</sup> area perkerasan dan sisanya adalah area tanpa perkerasan. Gedung ini mempunyai 4 buah *sub-metering* listrik masing-masing untuk meter listrik sistem pengondisian udara dan ventilasi, meter listrik untuk sistem tata cahaya, meter listrik untuk peralatan kantor dan laboratorium, dan meter listrik untuk utilitas seperti lift dan pompa, sehingga konsumsi pada masing-masing bagian dapat diketahui dan tindakan penghematan pada bagian yang tepat dapat dilakukan jika diperlukan. Unit pengondisian udara hanya dipasang pada ruang kantor ruang pertemuan dan kelas, sedangkan ruang terbuka dan kantin menggunakan ventilasi alamiah. Unit pengondisian udara (AC) yang digunakan adalah unit R-22 dengan EER 1,22 kW/TR atau setara dengan 9,83 BTU/Wh. Unit pengondisian udara ini terdiri dari *AC split* untuk ruang kelas dan AC dengan *Variable Refrigerant Flow* (VRF) untuk ruang pertemuan dan aula. Untuk mengurangi panas matahari yang masuk ke dalam gedung, orientasi gedung dibuat sedemikian rupa sehingga dinding kaca menghadap ke selatan dan menghadap ke utara. Kaca yang digunakan adalah jenis kaca tunggal 8 mm *blue stopsole* dengan koefisien pelindung 0,4. Disebagian dinding kaca diberi *shelves* peneduh (*GRC fins*) dengan cat *elastomeric* sehingga berfungsi sebagai pemantul cahaya sehingga dinding bagian dalam ruangan tetap mendapat cahaya alami, dengan demikian mengurangi jumlah lampu yang digunakan. Atap gedung mempunyai

struktur dan material yang dapat memperkecil asupan panas ke dalam gedung. Dengan struktur dan material khusus tersebut *albedo* atap gedung kurang dari 0,3. Perhitungan yang dilakukan berdasarkan SNI 03-6389-2000 tentang Konservasi Energi Selubung Bangunan, diperoleh total OTTV (*Overall Thermal transfer Value*) adalah 40,32 W/m<sup>2</sup>. Agar tercipta *micro climate* yang sejuk, disekeliling gedung ditanam 171 buah pohon terdiri dari berbagai jenis. Disamping itu, dibangun juga *living wall* seluas 552 m<sup>2</sup> dan kolam mini dengan volume 655 m<sup>3</sup>. Limpasan air hujan, 91 % di tampung dalam kolam buatan tersebut dan bak penampung bawah tanah (27 m<sup>3</sup>). Air hujan ini digunakan untuk perawatan tanaman. Kualitas udara dalam ruangan dijaga dengan larangan merokok pada semua ruangan dan besarnya kebutuhan udara ventilasi sesuai SNI 6390 – 2011 disuplai oleh sistem ventilasi mekanik yang dijalankan secara kontinu apabila ruangan berpenghuni. Alat monitor digunakan untuk mengukur kadar CO<sub>2</sub> dalam ruangan pertemuan dan ruang dosen. Apabila kadar CO<sub>2</sub> dalam udara mencapai 1000 ppm maka alat akan mengeluarkan bunyi alarm, dan jumlah udara ventilasi akan ditambah secara manual dengan mengaktifkan jumlah fan yang beroperasi atau mempercepat putaran fan.

Pemakaian energi listrik di gedung tersebut telah diukur oleh PT. Narama Mandiri, Jakarta, konsultan bidang audit energi, hasilnya ditampilkan pada Tabel 6. Pemerintah menganggap konsumsi energi listrik 126,9 kWh/m<sup>2</sup>/tahun adalah sangat rendah dibandingkan dengan konsumsi energi listrik pada gedung lain, oleh sebab itu pada tahun 2013 gedung ini mendapat Penghargaan Efisiensi Energi Nasional dari Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral.

**Tabel 6.** Pengukuran konsumsi energi listrik di Gedung A kampus ITS

| No. | Deskripsi                    | Unit                      | Pengukuran |
|-----|------------------------------|---------------------------|------------|
| 1   | Sistem VAC + udara ventilasi | kWh/tahun                 | 244.663,05 |
| 2   | Sistem tata cahaya           | kWh/tahun                 | 76.623,59  |
| 3   | Plug Load                    | kWh/tahun                 | 4.504,40   |
| 4   | Utilities                    | kWh/tahun                 | 40.513,38  |
| 5   | Total Konsumsi energi        | kWh/tahun                 | 366.304,42 |
| 6   | Energy Efficiency Index      | kWh/m <sup>2</sup> /tahun | 126,90     |

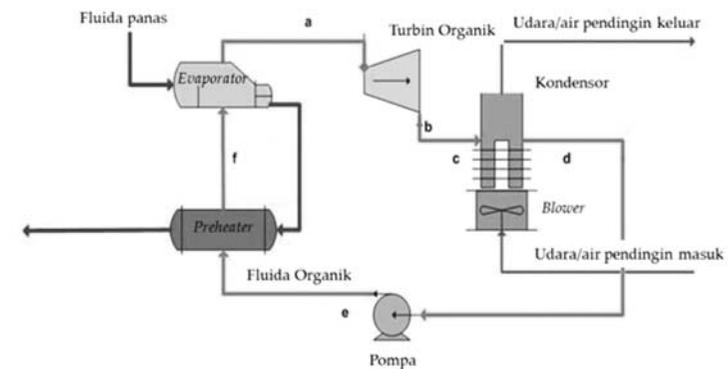
Upaya-upaya peningkatan efisiensi energi di gedung ini perlu ditingkatkan; studi dan penelitian kearah tersebut perlu dikembangkan dan diimplementasikan pada berbagai gedung dengan tujuan untuk mengurangi konsumsi energi listrik dan meningkatkan intensifikasi energi listrik di Indonesia.

### 3. PENGEMBANGAN PEMBANGKIT LISTRIK DARI SUMBER ENERGI YANG 'TERBAIKAN'

Pengurangan subsidi listrik secara perlahan mengakibatkan kenaikan harga listrik, padahal untuk meningkatkan daya saing dan pertumbuhan ekonomi diperlukan sumber-sumber energi listrik yang murah. Meskipun harga batubara dan minyak bumi saat ini sedang murah relatif terhadap harga pada tahun-tahun sebelumnya, peningkatan produksi listrik secara masif dengan menggunakan bahan bakar fosil tanpa dilengkapi alat pengolahan gas buang akan menimbulkan pencemaran lingkungan. Oleh sebab itu, perlu dikembangkan pemanfaatan sumber-sumber energi yang

selama ini terabaikan, seperti penggunaan pembangkit listrik Siklus Organik Rankine (*Organic Rankine Cycle, ORC*) dengan air panas geotermal, dan pembakaran biomassa sebagai sumber panas yang emisi netto CO<sub>2</sub> nya dapat diabaikan.

Sistem pembangkit listrik siklus ORC terdiri dari turbin organik, kondensor berpendingin air atau udara, pompa, pemanas awal (*preheater*), dan evaporator. Fluida organik yaitu fluida yang senyawanya terdiri dari atom C dan/atau H digunakan sebagai fluida kerja. Fluida ini dipanaskan kemudian diuapkan di pemanas awal dan penguap (evaporator) dengan menggunakan fluida panas yang berasal dari geotermal, surya, atau panas buangan lainnya. Uap organik kemudian dialirkan ke turbin yang terhubung dengan generator listrik; uap organik yang keluar dari turbin diembunkan di kondensor; kondensat kemudian di pompakan kembali ke pemanas dan penguap (Gambar 8). Fluida organik yang biasa digunakan beserta kisaran temperatur dan daya keluarannya diperlihatkan pada Tabel 7.



**Gambar 8.** Sistem pembangkit ORC

Tabel 7. Fluida kerja sistem ORC

| No | Fluida organik | Kisaran Temperatur Pemanas, K | Kisaran Daya Keluaran |
|----|----------------|-------------------------------|-----------------------|
| 1. | R-134a         | 365 – 395                     | 500 kW – 30 MW        |
| 2. | R-245fa        | 445 - 465                     | 65 kW – 30 MW         |
| 3. | R-123          | 465 - 500                     | 400 W                 |
| 4. | n-pentana      | 465-500                       | 60 kW                 |
| 5. | Iso-butana     | 420-445                       | sd 11 MW              |
| 6  | Propana, R-290 | 365-395                       | Tidak ada informasi   |

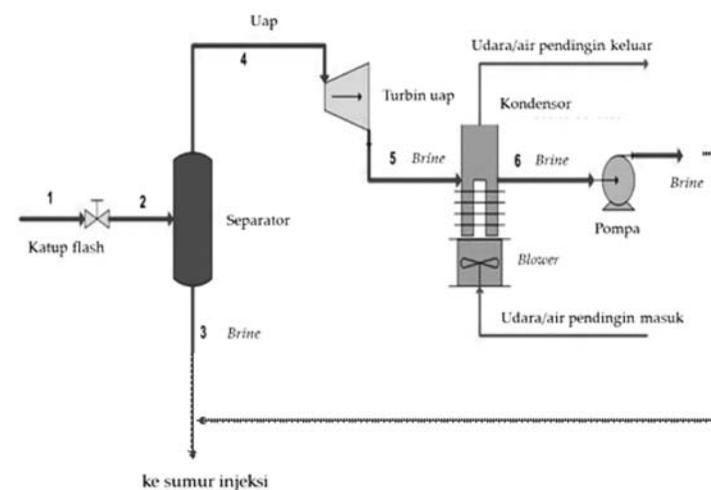
Disusun dari berbagai sumber

### 3.1 Penggunaan Sistem Organic Rankine Cycle (ORC)

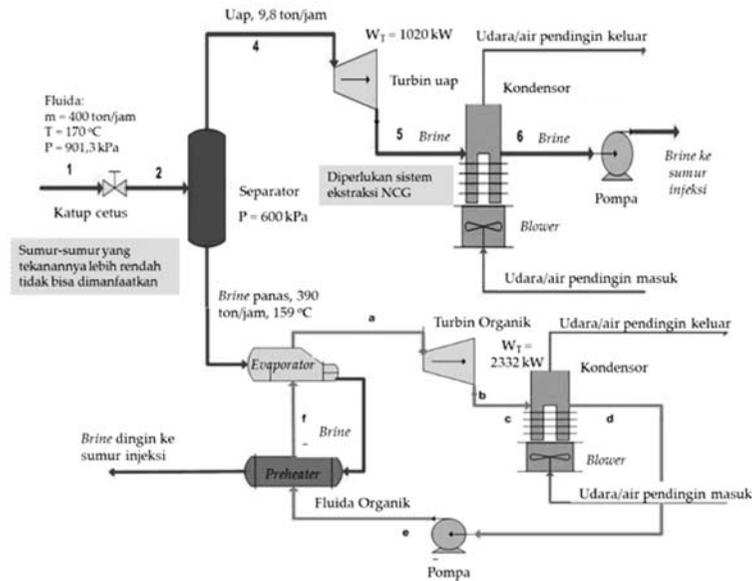
Sumur geotermal pada umumnya mengeluarkan fluida dua fasa dan didominasi oleh fasa cair [20]. Jenis sistem Pembangkit Tenaga Listrik Panas Bumi (PLTP) yang digunakan di Indonesia pada umumnya masih menggunakan Sistem Uap Cetus Tunggal (*Single Flash Steam System*). Pada sistem ini fluida kerja adalah uap, dengan demikian cairan (*brine*) atau fluida dua fasa dari sumur geotermal diekspansi dan dipisahkan dalam separator. Uapnya dialirkan ke turbin uap untuk memutar generator listrik sedangkan cairannya diinjeksikan kembali kedalam bumi. Uap yang keluar dari turbin juga diembunkan dan diinjeksi ke dalam bumi (Gambar 9). *Brine* dari separator meskipun memiliki temperatur yang tidak terlalu tinggi, sebenarnya energinya masih dapat dimanfaatkan. Salah satu cara memanfaatkan panas dari *brine* ini adalah dengan menggunakan Siklus Rankine Organik (*Organic Rankine Cycle, ORC*). Sistem ini dapat dikombinasikan dengan Sistem Uap Cetus Tunggal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Dengan sistem gabungan ini

memanfaatkan uap dan cairan yang keluar dari sumur geotermal dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik.

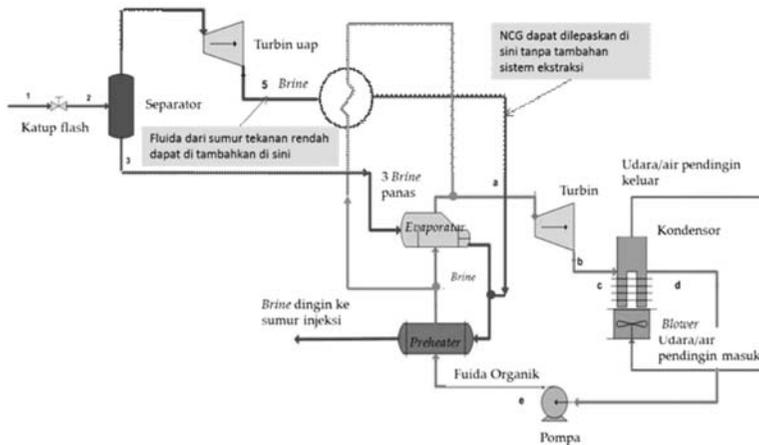
Tekanan fluida yang keluar dari sumur-sumur dalam suatu *Cluster* lokasi geotermal tidak seragam. Siklus uap dengan kondensor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10 tersebut hanya dapat memanfaatkan sumur bertekanan tinggi, dengan demikian sumur-sumur bertekanan rendah tidak digunakan. Selain uap dan cairan, fluida yang keluar dari sumur geotermal juga mengandung gas-gas tak dapat dikondensasi (*Non Condensable Gas, NCG*). NCG akan meningkatkan tekanan kondensor dan mengurangi keluaran daya turbin. Oleh sebab itu sistem siklus uap dengan kondensor harus dilengkapi dengan peralatan ekstraksi NCG.



Gambar 9. Sistem Uap Cetus Tunggal (*Single Flash Steam System*)



**Gambar 10.** Sistem kombinasi siklus uap dengan kondensor dan siklus ORC, fluida organik: n-pentana [23]



**Gambar 11.** Sistem kombinasi siklus uap tanpa kondensor dan siklus ORC

Untuk mengatasi kelemahan sistem siklus uap tersebut di atas, digunakan sistem siklus uap tanpa kondensor seperti yang diperlihatkan pada Gambar 11. Sistem ini dapat memanfaatkan sumur tekanan rendah dengan memasukkan uap tekanan rendah tersebut ke saluran keluaran turbin. Karena tidak memiliki kondensor maka NCG dapat dilepaskan ke udara (*purging*) tanpa peralatan ekstraksi tambahan.

Analisis yang telah dilakukan terhadap pembangkit geotermal skala kecil (5 MW) dengan sistem kombinasi uap dan ORC, untuk laju fluida geotermal 400 ton/jam, dihasilkan daya listrik 1,02 MW dari siklus uap dan 2,33 MW dari siklus ORC (Gambar 10)[21].

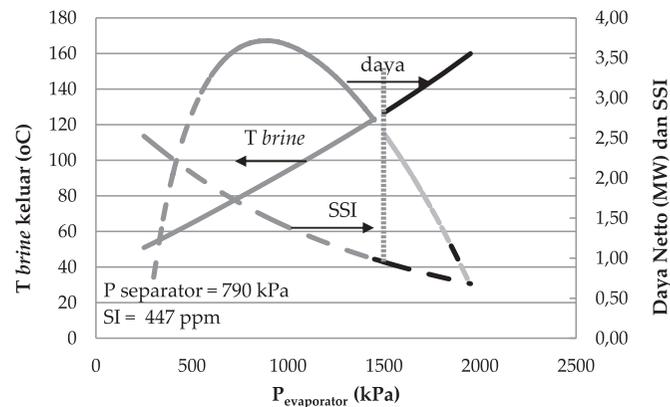
Besarnya daya keluaran dari sistem ORC yang disebutkan di atas adalah daya maksimum yang mungkin dapat diambil. Besarnya daya keluaran ini bergantung kepada jumlah panas yang di serap oleh evaporator. Semakin besar panas dapat dilepaskan di evaporator semakin tinggi tekanan fluida organik dan semakin rendah temperatur *brine* (cairan) yang keluar dari evaporator. *Brine* yang keluar dari sumur geotermal Indonesia umumnya banyak mengandung silika terlarut. Kelarutan silika dalam *brine* bergantung pada tingkat keasaman (pH) dan temperatur. Silika akan mengendap dan membentuk kerak pada dinding saluran apabila temperatur *brine* lebih rendah dari temperatur kritiknya. Akibatnya jumlah panas yang dapat digunakan untuk menguapkan fluida organik di evaporator menjadi terbatas. Temperatur kritik pengendapan dapat dihitung dengan berbagai metoda, salah satunya adalah metoda *Silica Scaling Index* (SSI). Nilai SSI dihitung dari:

$$SSI = \frac{S_1}{s} \quad (1)$$

$S_1$  adalah konsentrasi silika dalam *brine* (ppm),  $T$  = temperatur keluar *brine* (K), dan  $s$  adalah kelarutan silika yang bergantung pada temperatur dan dihitung dari:

$$\log s = -6,116 + 0,01625T - 1,758 \times 10^{-5}T^2 + 5,257 \times 10^{-9}T^3 \quad (2)$$

Nilai  $s$  yang diperoleh harus dikalikan dengan 58400 agar diperoleh nilai dengan satuan ppm. Jika nilai  $SSI > 1$  maka akan terbentuk kerak. Gambar 12 menunjukkan perubahan  $SSI$  *brine*, yang memiliki kandungan silika awal ( $S_1$ ) 447 ppm, dengan temperatur keluar *brine* pada sistem gabungan siklus uap uap dengan kondensor dan siklus ORC, [21]. Ditunjukkan pula perubahan tekanan evaporator dan daya keluaran yang dihasilkan pada tekanan separator 790 kPa.



**Gambar 12.** Perubahan  $SSI$ , tekanan evaporator, dan daya keluaran terhadap temperatur keluar *brine*, pada sistem gabungan siklus uap dengan kondensor dan siklus ORC, untuk *brine* dengan kandungan silika 447 ppm, pada tekanan separator 790 kPa [21].

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa kerak akan terbentuk ( $SSI > 1$ ) jika temperatur *brine* keluar dari sistem ORC berada di bawah temperatur  $123^\circ\text{C}$ . Dengan demikian, meskipun secara teoritik sistem gabungan dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 3,7 MW, yaitu pada temperatur keluar *brine*  $88,3^\circ\text{C}$ , namun karena pertimbangan kemungkinan terjadinya kerak hal tersebut tidak dapat terwujud. Pada temperatur keluar *brine* yang lebih rendah daya yang dihasilkan menurun karena menurunnya tekanan evaporator.

Pembentukan kerak silika dapat dicegah dengan penambahan basa untuk meningkatkan pH. Fluida geotermal rata-rata memiliki  $\text{pH} = 8$ , dengan penambahan basa seperti  $\text{NaOH}$  dengan  $\text{pH} = 14$ , misalnya, mampu menaikkan pH fluida menjadi 11 dan pembentukan kerak dapat dicegah.

Semua analisis siklus ORC yang dibahas di atas termasuk pencegahan pembentukan kerak telah disimulasikan untuk kondisi nyata dan berskala industri dalam suatu studi yang dilakukan oleh PT. Pertamina (Persero) dan PT. Imeco Inter Sarana [22]. Namun data-data hasil simulasi tidak dapat disajikan dalam tulisan ini, karena sebagai salah satu anggota tim pengkajian, penulis terikat perjanjian kerahasiaan yang melarang mempublikasikan data maupun hasil studi sekurang-kurangnya 5 tahun sejak akhir studi yaitu tahun 2012. Namun hasil studi tersebut menyimpulkan bahwa secara teknologi dan finansial siklus gabungan uap dan ORC sangat layak diterapkan untuk PLTP di Indonesia. Untuk mewujudkannya secara nyata diperlukan keberanian pengambilan keputusan oleh pihak terkait.

### 3.2 Pemanfaatan Limbah Biomassa

Indonesia sebagai negara tropik yang kaya akan keanekaragaman hayati memiliki limbah biomassa yang besar. Limbah biomassa tersebut berasal dari limbah hutan produksi, limbah tanaman pangan, maupun sampah kota. Biomassa pada umumnya mengandung senyawa lignoselulosa yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Senyawa yang mengandung atom-atom C, H, dan O ini dapat digunakan menjadi bahan bakar. Dalam bagian ini, disampaikan kajian mengenai karakteristik sampah kota dan tandan kosong kelapa sawit, dalam upaya menjadikan kedua limbah biomassa tersebut sebagai bahan bakar pembangkit listrik baik dengan cara pembakaran langsung atau melalui peningkatan kualitas terlebih dahulu. Proses peningkatan kualitas adalah proses yang dapat meningkatkan rasio C/O dan C/H sehingga biomassa mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi. Kedua limbah biomassa tersebut merupakan sumber energi yang selama ini terabaikan. Kota besar seperti Jakarta, misalnya memproduksi sampah sekitar 6000 ton/hari, jika dianggap nilai kalor sampah yang tersisa adalah 2500 kJ/kg, maka kandungan energi yang tersimpan adalah 15,1 GJ/hari atau potensi produksi energi listrik sebesar 52,5 MW. Demikian juga dengan limbah kepala sawit, tidak kurang dari 9 juta ton per tahun Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dihasilkan dari 11 juta ha kebun sawit di Indonesia. Dengan nilai kalor sekitar 17.000 kJ/kg, maka potensi produksi energi listrik dari TKKS adalah sekitar 1,5 GW.

#### 3.2.1 Karakteristik sampah kota

Yang dimaksud karakteristik sampah kota adalah komposisi komponen sampah, unsur-unsur proksimat dan ultimat, dan nilai kalor yang menunjukkan potensinya sebagai bahan bakar. Studi dilakukan di kota Bandung dengan mengamati jenis komponen sampah dan menimbang dan menghitung fraksi berat dan fraksi volume komponen sampah tersebut di 23 Tempat Pembuangan Semetara (TPS) yang ada di kota Bandung. Jenis komponen dan komposisi sampah dapat dilihat pada Tabel 8 [23]. Dari Tabel ini terlihat sampah di kota Bandung sebagian besar adalah material organik dan sisa makanan. Komponen plastik meskipun fraksi beratnya kecil, namun fraksi volumenya cukup besar. Komponen-komponen sampah seperti keramik, plastik dapat daur ulang, gelas, logam dan komponen elektronik pada umumnya masih memiliki nilai ekonomi dan diambil oleh pemulung, komponen sampah sisanya yang dibuang di Tempat Pembuangan Akhir (TPA).



a. Sampah Kota



b. Tandan Kosong Kelapa Sawit

**Gambar 13.** Limbah sampah dan tandan kosong kelapa sawit merupakan sumber energi yang terabaikan

**Tabel 8.** Komposisi Sampah Kota [23]

| Komponen                         | Fraksi Massa (%) | Fraksi Volume (%) |
|----------------------------------|------------------|-------------------|
| Material Organik                 | 35.58            | 44.51             |
| Sisa Makanan                     | 22.58            | 11.75             |
| Kertas                           | 13.67            | 14.24             |
| Plastik bisa di daur ulang       | 7.06             | 15.30             |
| Plastik tidak bisa di daur ulang | 5.69             | 4.91              |
| Gelas                            | 3.19             | 2.58              |
| Logam                            | 3.31             | 1.61              |
| Tekstil                          | 1.94             | 0.92              |
| Karet                            | 0.68             | 0.36              |
| Foam                             | 0.25             | 0.83              |
| Limbah elektronik                | 0.56             | 0.4               |
| Lainnya                          | 5.49             | 2.59              |

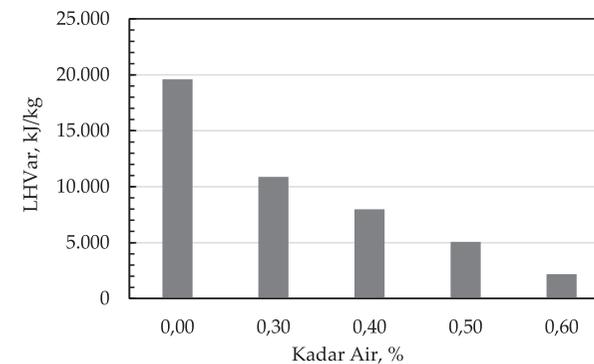
Komponen-komponen sampah tersebut kemudian di uji kandungan proksimat, ultimat dan nilai kalornya di Laboratorium Batubara milik TEKMIIRA. Metoda pengujian dapat dilihat pada Tabel 9, sedangkan hasil pengujian unsur proksimat dan ultimat dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 14. Dari tabel ini dapat terlihat bahwa sampah sisa memiliki kandungan Karbon tetap dan zat terbang yang memadai untuk dapat terbakar sendiri dalam tungku insinerasi. Kandungan Sulfur masih lebih rendah dari kandungan Sulfur batubara Indonesia, dan kandungan Khlorin masih dalam batas aman yang diperkenankan [23]. Sampah segar yang diangkat dari TPS umumnya mempunyai kandungan air di atas 50% khususnya pada saat musim hujan. Oleh sebab itu, jika akan dibakar langsung dalam tungku insinerasi, sampah harus ditiriskan terlebih dahulu, hingga kandungan airnya berkurang. Umumnya sampah akan terbakar dengan baik jika kadar airnya di bawah 40%, namun saat ini tungku insinerasi dapat membakar sampah dengan nilai kalor 800 kcal/kg (3300 kJ/kg), tanpa penambahan bahan bakar dari luar.

**Tabel 9.** Standard pengujian yang digunakan di TekMIIRA [23]

| Component    | Standard              |
|--------------|-----------------------|
| Kadar Air    | ISO 11722 ASTM D.3173 |
| Abu          | ISO 1171 ASTM D.3174  |
| Zat terbang  | ISO 562               |
| Karbon tetap | 100%-M-Ash-VM         |
| Karbon       | ISO 625 ASTM D.3178   |
| Hidrogen     | ISO 625 ASTM D.3178   |
| Nitrogen     | ISO 332 ASTM D.3179   |
| Sulfur       | ASTM D.4239           |
| Oksigen      | 100%-C-H-N-S-Ash      |
| Nilai kalor  | ASTM D.5865           |

**Tabel 8.** Komposisi Sampah Kota [23]

| Proximate     |       | Ultimate |       |
|---------------|-------|----------|-------|
| Komponen      | %     | Komponen | %     |
| Zat Terbang   | 71.19 | Karbon   | 48.46 |
| Karbon tetap  | 15.41 | Oksigen  | 41.98 |
| Kandungan Air | 8.04  | Hidrogen | 6.58  |
| Abu           | 5.36  | Nitrogen | 1.49  |
|               |       | Khlorin  | 1.23  |
|               |       | Sulfur   | 0.26  |

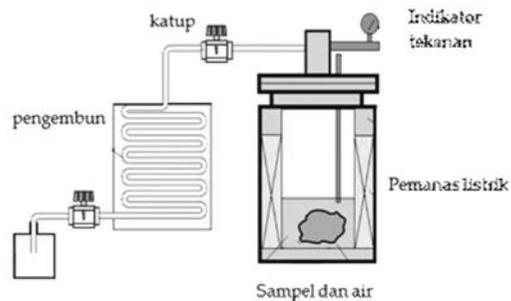


**Gambar 14.** Perubahan nilai kalor sampah sisa terhadap kadar air [23]

### 3.2.2 Proses hidrotermal

Proses hidrotermal secara sederhana dapat dikatakan sebagai proses penguraian dengan menggunakan air pada tekanan dan temperatur yang tinggi. Temperatur yang tinggi akan membantu penguraian struktur lignoselulosa sehingga diharapkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar akan meningkat, sedangkan tekanan tinggi berfungsi untuk menjaga agar air tetap berada dalam fasa cair.

Proses hidrotermal dilakukan dalam bejana tekan (*autoclave*) yang memiliki pemanas. Biomassa yang akan diproses dimasukkan ke dalam *autoclave*, dan diberi air dengan perbandingan masa air dan biomassa yang tertentu. Kemudian *autoclave* dipanaskan sehingga tekanan dan temperaturnya naik mencapai nilai yang diinginkan. *Autoclave* skala laboratorium yang digunakan berukuran 0,5 dan 2,5 liter, pemanas yang digunakan adalah pemanas listrik. Gambar 15 menunjukkan secara skematik *autoclave* kecil yang digunakan di laboratorium. *Autoclave* skala industri yang dikembangkan di Laboratorium Termodinamika, Pusat Rekayasa Industri ITB, berukuran 600 liter dan panas diberikan oleh uap dan pemanas listrik. *Autoclave* besar dilengkapi pengaduk yang membantu penghancuran biomassa yang diproses.



**Gambar 15.** Skema *autoclave* untuk proses hidrotermal [24]

Contoh hasil proses hidrotermal diperlihatkan pada Gambar 16. Seperti kulit buah-buahan lainnya, kulit pisang termasuk biomassa yang sulit terdegradasi secara alamiah. Dengan proses hidrotermal proses penghancuran dilakukan hanya dalam waktu beberapa menit saja. Perubahan sifat pembakaran kulit pisang sebelum dan setelah hidrotermal diperlihatkan pada Tabel 11. Sifat ini diperoleh dari sampel yang telah dikeringkan di udara terbuka (*air dried based, adb*). Pengujian proksimat dilakukan di Laboratorium Batubara TEKMIIRA.



a. Sebelum proses hidrotermal



b. Setelah proses hidrotermal

**Gambar 16.** Hasil proses hidrotermal limbah biomassa [24]

Dari Tabel 11 dapat dilihat bahwa proses hidrotermal meningkatkan sifat pembakaran. Kadar abu berkurang hampir 50%, zat terbang (*volatile matter*) cenderung tetap, kadar karbon meningkat 10,59%, dan nilai kalor meningkat 12,57%. Kadar air produk bergantung pada jumlah air dan temperatur. Semakin banyak air dan semakin tinggi temperatur, semakin baik proses penghancuran dan pada akhir proses akan menghasilkan produk yang lebih kering.

Proses hidrotermal juga dapat digunakan untuk biomassa lain, seperti TKKS. Proses hidrotermal tidak saja bisa menghancurkan dan meningkatkan sifat pembakarannya namun juga dapat menghilangkan potasium hingga

**Tabel 11.** Unsur proksimat dan nilai kalor kulit pisang (*air dried based*) [24]

| Perbandingan biomassa dan air g/ml | Waktu Tinggal Menit | Unsur proksimat (adb) |       |           |          | Nilai kalor (adb) HHV MJ/kg |
|------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------|-----------|----------|-----------------------------|
|                                    |                     | Air %                 | Abu % | Volatil % | Karbon % |                             |
| Tanpa proses                       |                     | 3.31                  | 8.97  | 68.47     | 19.25    | 16.669                      |
| 1/5                                | 30                  | 5.07                  | 4.65  | 69.07     | 21.21    | 17.471                      |
|                                    | 60                  | 4.05                  | 5.37  | 68.90     | 21.68    | 17.565                      |
|                                    | 90                  | 5.14                  | 5.50  | 67.80     | 21.56    | 17.182                      |
|                                    | 120                 | 5.13                  | 5.17  | 66.54     | 23.16    | 17.289                      |
| 1/7.5                              | 30                  | 4.44                  | 4.55  | 71.73     | 19.28    | 17.699                      |
|                                    | 60                  | 4.10                  | 4.86  | 70.28     | 20.76    | 17.709                      |
|                                    | 90                  | 3.28                  | 4.60  | 69.13     | 22.99    | 18.047                      |
|                                    | 120                 | 2.97                  | 5.02  | 69.74     | 22.27    | 18.013                      |
| 1/10                               | 30                  | 4.24                  | 4.19  | 72.04     | 19.53    | 17.875                      |
|                                    | 60                  | 2.35                  | 4.49  | 71.67     | 21.49    | 18.373                      |
|                                    | 90                  | 3.94                  | 5.00  | 70.39     | 20.67    | 17.715                      |
|                                    | 120                 | 2.67                  | 2.92  | 73.12     | 21.29    | 18.765                      |

50% dengan cara yang lebih efektif. Kandungan Potasium tidak diinginkan dalam bahan bakar, karena akan menyebabkan timbulnya kerak pada dinding tungku pembakaran dan pipa-pipa yang dilewati oleh gas hasil pembakaran. Perbandingan sifat antara TKKS hasil hidrotermal dengan batubara diperlihatkan pada Tabel 12. Dari tabel ini dapat terlihat bahwa sifat TKKS hasil proses hidrotermal mirip dengan sifat batubara sub-bituminus C.

**Tabel 12.** Perbandingan Karakteristik Produk Hidrotermal dan Batubara [25]

| Bahan  | HHV (kal/gram) | % VM (adb) | %FC (adb)   |
|--|----------------|------------|-------------|
| Tandan Kosong Kelapa Sawit hasil Hidrotermal | 4.200-4.400    | 85 – 92    | 5 – 12      |
| Lignit A                                     | 3.500-4.600    | Di atas 45 | Di bawah 55 |
| Sub-bituminus C                              | 4.600-5.300    | 15-20      | 80-85       |

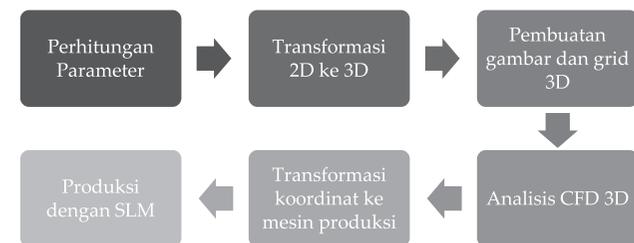
VM = *volatile matter*, FC = *fix carbon*

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa proses hidrotermal dapat meningkatkan kualitas biomassa menjadi setara batubara.

### 3.3 Pengembangan dan produksi Turbin Radial

Karena fluida kerja sistem ORC adalah sama dengan refrigeran yang digunakan pada unit RAC, maka dengan sedikit modifikasi komponen-komponen mesin refrigerasi dapat digunakan untuk sistem ORC. Kompresor mesin refrigerasi dari jenis sentrifugal tak berpelumas dengan bantalan magnetik dapat dimodifikasi untuk menjadi turbin sistem ORC. Saat ini banyak industri refrigerasi yang mengembangkan bisnisnya ke bisnis ORC, termasuk industri refrigerasi di Indonesia.

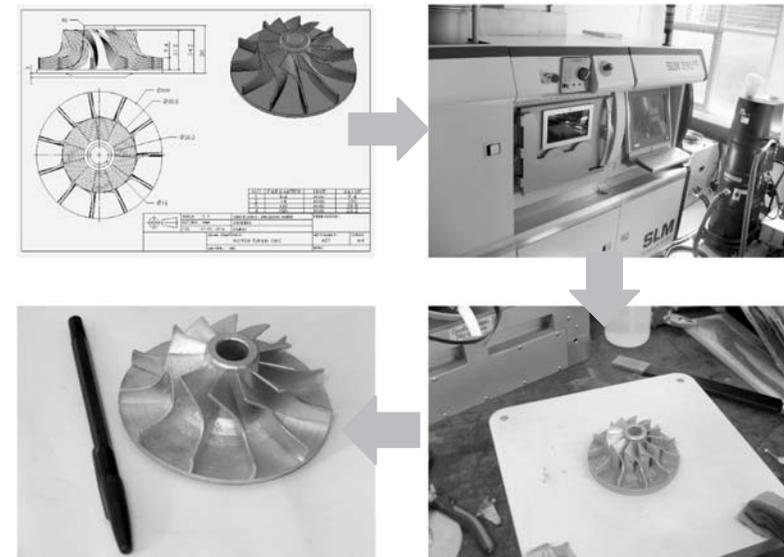
Meskipun komponen-komponen sistem ORC dengan mudah dapat diperoleh, tidak ada salahnya jika kemampuan pembuatan turbin sistem ORC juga dikembangkan di dalam negeri. Turbin yang sesuai untuk sistem ORC adalah turbin radial aliran keluar. Pengembangan rancangan dan pembuatan rotor turbin radial untuk sistem ORC telah dilakukan bekerjasama dengan Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika LIPI [26]. Tahapan desain dan pembuatan rotor turbin radial ini diperlihatkan pada Gambar 17.



**Gambar 17.** Tahapan proses pembuatan rotor turbin radial ORC

Parameter geometri dan aliran fluida dalam rotor dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan yang diusulkan dalam buku teks [27, 28]. Data masukan yang diperlukan untuk perhitungan ini adalah tingkat keadaan termodinamika fluida organik pada saat masuk dan keluar turbin. Untuk mendapatkan hal tersebut, jenis fluida organik harus dipilih dan kemudian dilakukan analisis energi pada sistem ORC dengan besarnya daya atau besarnya input panas yang telah ditentukan. Terdapat 58 parameter yang dihitung untuk menentukan geometri rotor. Data dua dimensi ini kemudian di transformasi menjadi bentuk rotor 3D. Hal ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Vista RTD dan BLADEGEN. Bentuk 3D kemudian bisa di ekspor ke perangkat lunak CAD seperti Solid Work untuk pencetakan gambar, dan bisa juga diekspor ke perangkat lunak CFD yang dimulai dengan pembuatan *grid*. Pembuatan *grid* untuk rotor 3D dapat dipermudah dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS-Turbo Grid. Kemudian analisis CFD dan visualisasi medan aliran, dan perpindahan panas dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ANSYS-cfx. Dari analisis CFD dapat diketahui kinerja rotor, apabila diperlukan parameter-parameter dapat diubah untuk mendapatkan kinerja terbaik dari rotor. Jika kinerja rotor secara teoritik sudah dianggap memadai, maka koordinat rotor 3 D diekspor ke perangkat lunak untuk produksi yaitu MAGIC14. Pada perangkat ini dirancang bentuk benda yang akan dibuat termasuk penopang dan tambahan geometri yang diperlukan agar tidak terjadi deformasi pada saat pembuatan akibat beban termal. Selanjutnya pembuatan rotor dilakukan dengan menggunakan mesin *Selective Laser Melting* (SLM), operasi mesin ini dipandu melalui perangkat lunak MarcamSLM Autofab.

Rotor yang berdiameter 10 cm, dan tinggi 3,8 cm dibuat dalam waktu sekitar 8 jam. Gambar 18 memperlihatkan dimensi rotor turbin, mesin SLM dan rotor yang selesai dibuat.



Gambar 18. Turbin radial ORC yang dibuat

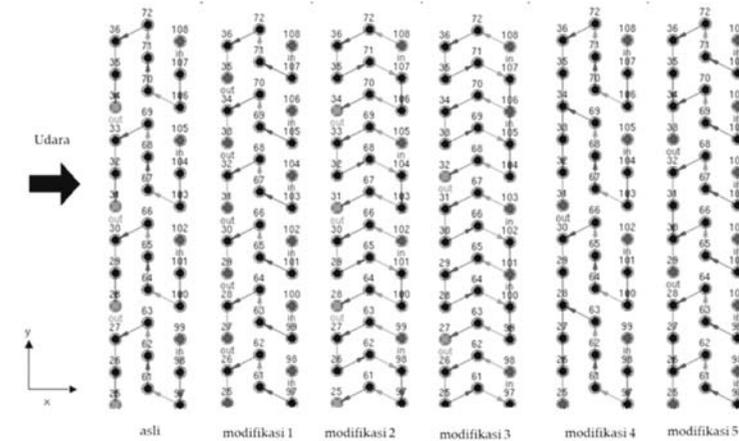
Dengan adanya kemampuan pembuatan rotor turbin radial ini maka penerapan pembangkit listrik dengan sistem ORC menjadi lebih terbuka dan mudah. Kemampuan mesin SLM untuk membuat benda yang rumit dapat dimanfaatkan untuk membuat turbin jenis lainnya baik turbin uap, turbin air atau komponen mesin lainnya.

#### 4. KEGIATAN RISET DAN PENGEMBANGAN SELANJUTNYA

Seperti telah dibahas sebelumnya, agar teknologi refrigeran

hidrokarbon dapat berkembang di Indonesia, maka perlu ada manufaktur RAC yang mengembangkan dan memproduksi unit-unit RAC dengan refrigeran hidrokarbon. Manufaktur perlu didorong untuk memproduksi unit RAC hidrokarbon secara mandiri, dan mempunyai kemampuan desain dan rekayasa yang memadai agar dapat menanggulangi masalah-masalah yang muncul dilapangan. Kerjasama dengan industri akan dilakukan untuk membantu industri membuat unit RAC berbasis hidrokarbon yang memenuhi standar keamanan internasional yang baru (ISO 817 dan ISO 5149). Optimasi dimensi kondensor dan evaporator perlu dilakukan agar muatan refrigeran dapat seminimal mungkin dengan kapasitas semaksimal mungkin. Upaya optimasi penukar kalor bisa dimulai dengan dengan mengevaluasi lintasan aliran refrigeran seperti yang disarankan oleh Daniel Coulburn (d.colbourne@rephridge.co.uk). Contoh modifikasi lintasan diperlihatkan pada Gambar 19. Konfigurasi lintasan asli dapat dimodifikasi dengan berbagai kemungkinan. Perhitungan, simulasi dan pengujian perlu dilakukan untuk membuktikan muatan refrigeran refrigeran lebih sedikit namun efektivitas penukar kalor tetap atau bertambah. Disamping itu penggunaan penukar kalor *mini channel* untuk RAC hidrokarbon perlu diteliti. Mesin-mesin pembuat penukar kalor kompak ini perlu diupayakan bersama dengan memanfaatkan dana insentif dari Multi Lateral Fund - Protokol Montreal, baik yang disalurkan melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, maupun yang melalui Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral. Disamping itu, penyusunan standar keamanan dan standar operasi yang meliputi seluruh tahapan mulai dari produksi sehingga penghancurannya perlu

dibuat, agar manufaktur, bengkel servis dan masyarakat mempunyai rujukan yang sama dalam penanganan unit RAC berbasis hidrokarbon. Kerjasama yang sudah terwujud antara pemerintah, industri RAC dan perguruan tinggi dalam penghapusan CFC dan HCFC dapat dijadikan modal untuk mengembangkan industri RAC unggul di Indonesia.

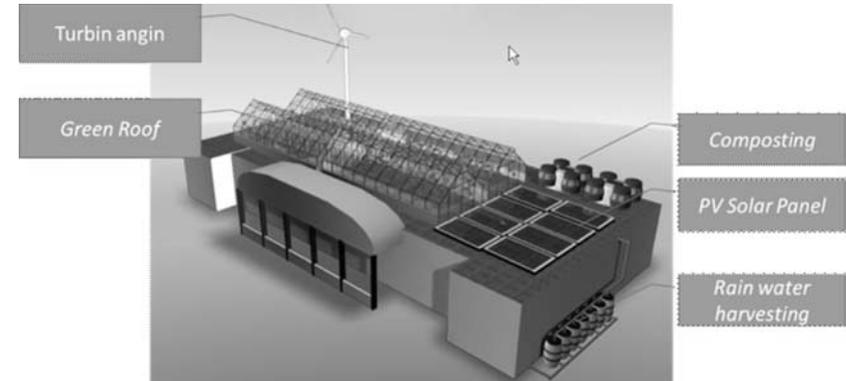


Gambar 19. Alternatif lintasan refrigeran pada kondensor unit RAC hidrokarbon

Beberapa manufaktur RAC di Indonesia juga telah merintis untuk mengembangkan unit pembangkit tenaga listrik ORC skala kecil. Sangat diharapkan industri ini tidak saja menjual unit ORC yang diproduksi di luar negeri, tetapi sejalan dengan pengembangan pasar di Indonesia, pengembangan komponen sistem ORC juga harus dilakukan untukantisipasi perubahan fluida kerja akibat adanya penghapusan bahan-bahan yang merusak lingkungan. Penelitian dan pengembangan pembuatan rotor turbin radial ORC akan terus dilakukan bekerjasama dengan Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika LIPI. Desain dan

pembuatan selubung rotor termasuk nosel dan difusor akan dilakukan dalam waktu dekat. Pengaruh sifat fluida kerja terhadap geometri turbin akan diteliti, agar dihasilkan turbin yang spesifik untuk setiap jenis fluida kerja.

Penelitian mengenai *Energy Efficient Building* akan dilakukan di Pusat Penelitian Energi baru dan Terbarukan ITB. Pada tahun 2015 ini hibah penelitian telah diberikan oleh DIKTI untuk topik penelitian diatas melalui skema program Hibah Penelitian Kerjasama Luar Negeri dan Publikasi Internasional. Penelitian akan dilakukan bersama Dr.Ir. Yuli Setyo Indartono. Penelitian akan meliputi pengembangan refrigeran sekunder untuk aplikasi refrigeran hidrokarbon pada sistem pendingin gedung, material penyimpan termal, dan pengaruh *green roof* terhadap asupan panas ke dalam gedung. Penggunaan material penyimpan panas pada refrigeran sekunder dan material gedung yang dikembangkan pada penelitian sebelumnya akan diaplikasikan pada bangunan hemat energi. Pengaruh jenis tanaman terhadap *albedo* atap akan diteliti. Kemungkinan mengembangkan *green roof* yang berkelanjutan akan dijajagi. Konsep *green roof* berkelanjutan diperlihatkan pada Gambar 20. Listrik untuk menjalankan pompa air penyiram diperoleh dari panel PV atau kincir angin, air yang digunakan untuk menyiram adalah hasil penadahan air hujan (*rain harvesting*), dan pupuk yang digunakan adalah dari hasil proses kompos limbah tanaman itu sendiri. Penelitian ini juga dilakukan dalam rangka mengisi program kerjasama Pemerintah Indonesia dan Australia.



Gambar 20. Konsep Sustainable Green Roof

Pengembangan proses pemuliaan limbah biomassa dengan proses hidrotermal akan dilanjutkan. Selama dua tahun terakhir penelitian dibidang ini dilaksanakan telah mendapat dukungan finansial dari hibah penelitian *Colaborative Research Program with Industri AUN/SEED-Net*. Pelaksanaan penelitian dibantu oleh Dr. Ir. Pandji Prawisudha. Kerjasama penelitian dengan Prof. Yoshikawa dari Tokyo Institute of Technology telah dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini. Pihak industri yang terlibat dalam penelitian ini dan juga memberikan dukungan finansial adalah PT. Pacific Green Energy – Jakarta. Dalam penelitian ini telah dikembangkan *autoclave* skala industri yang dapat melakukan proses hidrotermal kapasitas besar (Gambar 21). Pada tahun ini penelitian di bidang hidrotermal akan dipimpin oleh Dr. Ir. Pandji Prawisudha yang telah mendapat hibah penelitian dari DIKTI melalui skema Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi. Penelitian akan dilakukan di Pusat Rekayasa Industri ITB.



**Gambar 21.** Autoclave untuk proses hidrotermal skala industri

Pengembangan tungku pembakaran sampah (*incinerator*) juga dilakukan di Pusat Rekayasa Industri ITB, pengembangan ini mendapat dukungan dana dari Hibah Penelitian Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan ITB. Tungku pembakaran yang dikembangkan dari jenis *chain grate* (Gambar 22). Pada tungku ini sampah diletakkan dalam corong kemudian masuk secara otomatis ke dalam tungku karena adanya pergerakan rantai (*Chain*). Pengamatan akan dilakukan terhadap distribusi temperatur dalam tungku, kualitas abu yang dihasilkan, dan komposisi gas buang yang terjadi, untuk kecepatan *grate* dan jenis sampah yang bervariasi. Pembuatan tungku pembakaran ini dilakukan secara bertahap sesuai dengan jumlah dana penelitian yang diterima.



**Gambar 22.** Chain grated incinerator yang dikembangkan

## 5. UCAPAN TERIMA KASIH

Pudji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayahNya yang tak terhingga.

Ucapan terima kasih tak terhingga penulis sampaikan kepada kedua orang tua kami yaitu Drs. H. Nyoman Pasek dan Hj. Asiah Aliudin yang telah membesarkan, mendidik dan yang selalu mendoakan saya. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada istri kami Nyayu Damayani Gani yang telah setia dan penuh pengertian mendampingi dan mendoakan kami selama 28 tahun dan dengan penuh sabar membesarkan kedua anak kami Andri Rizki Aminullah dan Khairul Rizky Adlinullah. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada kedua anak kami yang telah memberi insiprasi doa dan semangat dalam menjalani kehidupan sehari-hari.

Kepada mertua kami Bapak Ki Agus Syukur Gani Thamin (alm), dan Ibu Hj. Nani Machdaniar Gani dan seluruh keluarga besarnya, kepada keluarga kakak kami Ir. Wiyawan Pasek (alm), istrinya Nyayu Muthia Gani beserta anak-anaknya kami ucapkan terima kasih atas dukungan, doa dan perhatiannya.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Aryadi Suwono yang telah menjadi pembimbing sejak mahasiswa, mendorong saya untuk selalu produktif, mengajari saya untuk selalu meneliti dan mengembangkan produk sampai ke tingkat industri, dan memberikan dukungan dan rekomendasi kepada kami untuk menjadi Guru Besar.

Terima kasih kami sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Djoko Santoso

(Direktur Jenderal Pendidikan Tinggi 2011 – 2014) atas perhatian dan bantuan yang diberikan. Kami sampaikan pula terima kasih dan penghargaan kami kepada Prof. Dr. Ir. Djoko Suharto, Prof. Dr. Ir. Widyo Nugroho Sulasdi (ITB), Prof. Dr. Ir. Indra Nurhadi (ITB), Prof. Dr. Ir B. Kombaitan (ITB), Prof. Dr. Zaki Suud (ITB), Prof. Fu Jen Wang (National Chin Yi University of Technology, Taiwan), Prof. Hanshik Chung (Geyongsang National University, Korea), Prof. Kunio Yoshikawa (Tokyo Institute of Technology, Jepang) atas dukungan dan rekomendasi yang diberikan untuk menjadi Guru Besar.

Kepada Dekanat Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Prof. Yatna Yuwana Martawirya, Dr. Ir. Hari Muhammad, Dr. Ir. Ign. Pulung Nurprasetio, Tim TPAK Fakultas, dan TIM TPAK ITB Pusat, Senat Akademik ITB, Majelis Guru Besar ITB, kami juga sampaikan terima kasih atas bantuan yang diberikan.

Kepada rekan-rekan di Pusat Rekayasa Industri ITB, Pusat Penelitian Energi Baru dan Terbarukan ITB, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, beserta karyawan dan teknisi kami sampaikan terima kasih atas segala diskusi dan kerjasama yang diberikan.

Kepada para mahasiswa/mahasiswi kami sampaikan terima kasih atas dedikasinya dalam mengerjakan Tugas Akhir dan penelitian.

Kepada Bapak/Ibu/Saudara yang telah hadir dalam acara Pidato Guru Besar hari ini, kami sampaikan terima kasih dan penghargaan yang tinggi atas waktu yang diluangkan.

Ucapan terima kasih kami sampaikan juga kepada Forum Guru Besar ITB, yang dipimpin oleh Prof. Roos Akbar MSc. PhD. (Ketua), dan Prof. Dr.

Salman A.N MSi (sekretaris) yang telah memberi kesempatan kepada kami untuk menyampaikan Pidato ini.

Dengan ini kami juga menyampaikan permohonan maaf bila ada kesalahan dalam buku ini dan/atau kata-kata kami yang tidak berkenan. Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada Bapak/Ibu/Saudara sekalian.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. The World Bank, IBRD, IDA, DATA, GDB Per Capita (current US\$), <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?page=1>, (diunduh tanggal 2 Maret 2015)
2. Sekretariat Perusahaan PT. PLN (Persero), *Statistik PLN 2012*, <http://www.pln.co.id/dataweb/STAT/STAT2012IND.pdf> (diunduh tanggal 2 Maret 2015)
3. United Nation Development Programme, *Promoting Energy Efficiency for Non-HCFC Refrigeration and Air Conditioning (PENHRA)*, Project Document, 2014.
4. ASHRAE, ASHRAE 90.1 Table, <http://bipac.net/lennox/ashrae901.pdf>, (diunduh tanggal 2 Maret 2015)
5. Republik Indonesia. 2006, Peraturan Menteri Perdagangan No.24/M-DAG/PER/6/2006 tentang Ketentuan Impor Bahan Perusak Ozon. Kemneterian Perdagangan, Jakarta.
6. Republik Indonesia. 2007, Peraturam Menteri Perindustrian No. 33/M-IND/PER/4/2007 tentang Larangan Memproduksi Bahan Perusak Ozon Serta Memproduksi Barang yang Menggunakan Bahan Perusak Ozon. Kementerian Perindustrian, Jakarta.

7. Republik Indonesia. 2012, Peraturan Menteri Perdagangan No. 3/M-DAG/PER/1/2012 tentang Ketentuan Impor Bahan Perusak Ozon (BPO). Kementerian Perdagangan, Jakarta.
8. Republik Indonesia. 2014, Peraturan Menteri Perindustrian No. 41/M-IND/PER/5/2014 tentang Larangan Penggunaan HCFC di Bidang Perindustrian. Kementerian Perindustrian, Jakarta.
9. Republik Indonesia. 2014, Peraturan Menteri Perdagangan No. 55/M-DAG/PER/9/2014 tentang Impor barang Berbasis Pendingin. Kementerian Perdagangan, Jakarta.
10. WMO (World Meteorological Organization), *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52*, 516 pp., Geneva, Switzerland, 2011.
11. IPCC, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp, 2007.
12. Tandian, N.P., Suwono, A., Sylva, C.A., Pasek, A.D., Application of Propane-Butane Mixtures as Refrigerant in a Milk Cooling Unit, Proceedings of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion '97, Yogyakarta, Indonesia, July 21-24, 1997
13. Badan Standarisasi Nasional, *SNI 06-6500-2000, Refrigeran: Pemakaian pada Instalasi Tetap*, Jakarta, 2000.
14. Ari Darmawan Pasek, Aryadi Suwono: "Application of Hydrocarbon Based Refrigerants for Air Conditioning in Indonesia", International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Vol. 19, No. 4,

Desember 2011. p.303-309. <http://www.worldscinet.com/IJACR>.

15. ASTM, ASTM E-681-85: *Standard Test Method for Concentration, Limits of Flammability of Chemicals*, The American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania (1994).
16. WIPO, Patent Application WO2001057155, Less Flammable Hydrocarbon Refrigerant As CFC-12 Substitute, <http://www.freepatentsonline.com/WO2001057155.html> (diakses tanggal 6 Maret 2015)
17. Aryadi Suwono, Nathanael Panagung Tandian, Ari Darmawan Pasek, Refrigeran Hidrokarbon Pengganti CFC-12 dan HCFC-22 Tak Mudah Terbakar, Sertifikat Paten No. Granted ID P 0024879 dari Direktorat Paten, Direktorat Jenderal HKI, Departemen Hukum dan HAM RI, Bandung, INA, 2010.
18. ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 34-2007, *Designation and Safety Classification of Refrigerants*, Atlanta, 2007.
19. The European Parliament and The Council of The European Union, *Regulation (EU) No. 517/2014 on Fluorinated Greenhouse Gases and Repealing Regulation (EU) No. 842/2006*, Brussel, 16 April 2014.
20. Neny Saptadji, Sekilas Tentang Panas Bumi, [http://geothermal.itb.ac.id/sites/default/files/public/Sekilas\\_tentang\\_Panas\\_Bumi.pdf](http://geothermal.itb.ac.id/sites/default/files/public/Sekilas_tentang_Panas_Bumi.pdf), diakses tanggal 10 Maret 2015.
21. Christian Gunawan, Ari Darmawan Pasek, Tubagus Ahmad Fauzi Sulaiman, *Thermodynamics Study of flash-binary cycle in geothermal power plant*, Journal International: Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15 Issue 9, Desember 2011, Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rsr](http://www.elsevier.com/locate/rsr), USA, 2011

22. PT. Pertamina, PT. Imeco Inter Sarana, *Pre-Feasibility Study on Development of Organic Rankine Cycle Power Plan in Pertamina Geothermal Fields*, Case Study: Tompaso Field, Study Report, Jakarta 2012.
23. Ari Darmawan Pasek, Kilbergen W. Gultom, Aryadi Suwono, *Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity*, Journal Engineering and Technolical Sciences, Vol. 45, No. 3, Desember 2013, pp. 241-256. ISSN: 2337-5779, DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2013.45.3.3, Bandung, INA, 2013.
24. Nhem Sophal, *Experimental Studies On The Production Of Solid Fuel From Municipal Solid Waste By Hydrothermal Process*, Tesis Master, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, 2012.
25. Achmad Rofi Irsyad, Pandji Prawisudha, Ari Darmawan Pasek, *Kaji Eksperimental Produksi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Proses Hidrotermal*, Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII), Depok, 15-16 Oktober 2014, ISBN 9786029841237, hal. 507-512., Depok, INA, 2014.
26. Maulana Arifin, Penentuan Geometri Rotor dan Analisis Parameter Kinerja Turbo - Ekspander Radial untuk Sistem Siklus Rankine Organik, Tesis Master, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Diegantara, Institut Teknologi Bandung, 2014.
27. N. C. Baines, *Axial and Radial Turbines*. CONCEPT NREC, 2003.
29. R. H. Aungier, *Turbine Aerodynamics: Axial-Flow and Radial-Flow Turbine Design and Analysis*. ASME Press, 2006.

## CURRICULUM VITAE



Nama : **Prof. Dr.Ir. ARI DARMAWAN PASEK, MSc.**  
 Tempat/tgl. lahir : Pontianak, 7 Mei 1959  
 NIP : 19590507 198702 1 001  
 Fakultas : Teknik Mesin dan Dirgantara  
 Kelompok Keahlian: Konversi Energi  
 Bidang Keahlian : Rekayasa Energi Industri  
 Jabatan/Pangkat : Guru Besar, Pembina Tk I/IVb

### I. RIWAYAT PENDIDIKAN

| Jenjang Pendidikan | S1           | S2                                | S3                                |
|--------------------|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Perguruan Tinggi   | ITB          | University of Southampton Inggris | University of Southampton Inggris |
| Tahun Lulus        | 1985         | 1989                              | 1992                              |
| Gelar              | Ir.          | MSc                               | Doktor                            |
| Bidang             | Teknik Mesin | Cryogenic                         | Cryogenic                         |

### II. RIWAYAT KEPANGKATAN

| NO. | PANGKAT           | GOLONGAN | TMT              |
|-----|-------------------|----------|------------------|
| 1.  | CPNS, Penata Muda | III/a    | 01 Februari 1987 |
| 2.  | PNS, Penata Muda  | III/a    | 01 Maret 1992    |
| 3.  | Penata Muda Tk I  | III/b    | 01 Oktober 1992  |
| 4.  | Penata            | III/c    | 01 April 1995    |
| 5.  | Penata Tk 1       | III/d    | 01 Oktober 1997  |
| 6.  | Pembina           | IV/a     | 01 Oktober 2000  |
| 7.  | Pembina Tingkat I | IV/b     | 01 April 2014    |

### III. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

| NO. | JABATAN FUNGSIONAL    | TMT               |
|-----|-----------------------|-------------------|
| 1.  | Asisten Ahli Madya    | 01 Maret 1988     |
| 2.  | Assisten Ahli         | 01 Juni 1992      |
| 3.  | Lektor Muda           | 01 Desember 1994  |
| 4.  | Lektor Madya          | 01 Juni 1997      |
| 5.  | Lektor                | 01 September 2000 |
| 6.  | Lektor Kepala, Inpass | 01 Januari 2001   |
| 7.  | Guru Besar            | 01 Oktober 2013   |

### IV. JABATAN DI ITB

| No. | Jabatan Struktural/non struktural                                      | Tahun         | Keterangan  |
|-----|--|---------------|---|
| 1.  | Ketua Kelompok Penelitian dan Pengembangan Ilmu Rekayasa dan Geoteknik | 2004          | SK Rektor No. 002/SK/K01/OT/2004                                  |
| 2.  | Kepala Pusat Rekayasa Industri   | 2005          | SK Rektor No. 099/SK/K01/OT/2005                                  |
| 3.  | Kepala Pusat Rekayasa Industri   | 2007-2008     | SK Rektor No. 225/SK/K01/KP/2007                                  |
| 4.  | Ketua Kelampok Keahlian Konversi Energi                                | 2014          | SK. Rektor No 273/SK/I1.A/KP/2013                                 |
| 5.  | Ketua KSPS FTMD  | 2014 dan 2015 | SK. Dekan FTMD No. 505/SK/K01.19/PP/2014<br>028/SK/I1.C08/KP/2015 |
| 6.  | Anggota tim TPAK FTMD  | 2015          | SK Dekan FTMD No. 027/SK/I1.C08/KP/2015                           |
| 7.  | Anggota tim TPAK ITB   | 2015          | SK. Rektor No. 006/SK/I1.A/KP/2015                                |

### IV. JABATAN DI LUAR ITB

| NO. | JABATAN   | TAHUN           |
|-----|---|-----------------|
| 1.  | Komisi Teknik Program Perlindungan Lapisan Ozon, Kementerian Lingkungan Hidup | 1994 - sekarang |
| 2.  | ASHRAE Indonesia Chapter:   |                 |
|     | - CTTC Chair  | 2009 - 2010     |
|     | - Vice President  | 2010 - 2013     |
|     | - President Elect   | 2014/2015       |
| 3.  | Rektor Institut Teknologi dan Sains Bandung                                   | 2010 - sekarang |

### VI. PENGHARGAAN

- Penghargaan "Medali Perak Inovasi Nasional 2001", Refrigeran Hidrokarbon Tak Mudah Terbakar, Aryadi Suwono, Ari D. Pasek, N.P. Tandian, Kementerian Riset dan Teknologi, Jakarta, Mei 2001.
- Satyalacana Karya Satya X tahun. Presiden R.I. 25 Maret 2002. SK Presiden RI No. 009/TK/Tahun 2002
- Penghargaan OZON dari Menteri Negara Lingkungan Hidup RI untuk Katagori Perorangan: Konsisten dalam melakukan penelitian, studi, dan sosialisasi tentang perlindungan lapisan ozon di Indonesia. Menteri Negara Lingkungan Hidup RI. Jakarta, 26 Maret 2006.
- Satyalancana Karya Satya XX Tahun. Presiden R.I.09-Agust-10. SK Presiden RI No. 35/TK/Tahun 2010.
- Penghargaan "103 Inovasi Paling Prespektif 2011" Torefaksi Sampah Perkotaan Menjadi Bahan Bakar Padat Berkalori Tinggi, Aryadi Suwono, Ari Darmawan Pasek, Toto Hardianto, Amrul. Kementerian Riset dan Teknologi, Jakarta, 2011.

## VII. PUBLIKASI

### 7.1. Dalam Jurnal Internasional Ber-referee (mitra bestari) dan Diakui

| No. | Pengarang, Judul Makalah  | Nama Jurnal, No. Publikasi, Vol./Tahun, ISSN, Tempat Publikasi   |
|-----|---|--|
| 1.  | <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Kilbergen W. Gultom, Aryadi Suwono, <i>Feasibility of Recovering Energy from Municipal Solid Waste to Generate Electricity</i>                    | ITB Journal: Journal of Engineering and Technological Science, Vol. 45B, 2013  |
| 2.  | Haryadi, Aryadi Suwono, Toto Hardianto, <b>Ari Darmawan Pasek</b> : <i>"Heating Value Improvement of Peat to Coal Level Through Torrefaction Process"</i>                     | International Journal of Energy Machinery, Vol. 3, No.1. Agustus 2010, p. 32-37. <a href="http://eco-energy.co.kr/.../IJEM(introduce)_new.do...">http://eco-energy.co.kr/.../IJEM(introduce)_new.do...</a> |
| 3.  | <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Aryadi Suwono: <i>"Application of Hydrocarbon Based Refrigerants for Air Conditioning in Indonesia"</i>   | International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Vol. 19, No. 4, Desember 2011. p.303-309. <a href="http://www.worldscinet.com, IJACR">http://www.worldscinet.com, IJACR</a>                    |
| 4.  | <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Tubagus Ahmad Fauzi Soelaiman, Christian Gunawan: <i>"Thermodynamics Study of flash-binary cycle in geothermal power plant"</i>                   | Journal International: Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 15 Issue 9, Desember 2011, Journal homepage: <a href="http://www.elsevier.com/locate/rser">www.elsevier.com/locate/rser</a> .         |
| 5.  | Yuli Setyo Indartono, Aryadi Suwono, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Alexander C., <i>Application of Phase Change Material to Save Air Conditioning Energy in Building, ASEAN</i> | Engineering Journal Part A Vol.3 No. 2, September 2013, p. 46-53. <a href="http://www.seed-net.org/ASEANEJ_A3-2.html">http://www.seed-net.org/ASEANEJ_A3-2.html</a> , Bangkok, THA, 2013                   |

### 7.2 Dalam Prosiding seminar internasional (3 tahun terakhir)

| No. | Pengarang, Judul Makalah   | Nama Seminar, Tahun, ISBN, Tempat Publikasi   |
|-----|--|---|
| 1.  | Nina Konitat S., <b>Ari Darmawan Pasek</b> , <i>Study of Utilization of Biomass Combustion Exhaust Gas for Organic Rankine Cycle Power Plant using Computational Fluid Dynamics.</i>           | Proceedings of 8 <sup>th</sup> International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion, FTEC 2013, Semarang, November, 8 -11, 2013.   |
| 2.  | Pandji Prawisudha, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Gea Fardias Mumin, <i>Plastic-impregnated Municipal Solid Waste Conversion into Green Solid Fuel by Lower Temperature Hydrothermal Process.</i> | Proceedings The 7 <sup>th</sup> AUN/SEED-Net Regional Conference in Mechanical and Manufacturing Engineering 2014 (RCMME 2014), Hanoi, October 9-10, 2014. ISBN: 978-604-911-942-2. p. 321-325., Hanoi, Vie, 2014 |

### 7.3 Dalam Prosiding seminar nasional (1 tahun terakhir)

| No. | Pengarang, Judul Makalah  | Nama Seminar, Tahun, ISBN, Tempat Publikasi  |
|-----|---|--|
| 1.  | Toto Hardianto, Aryadi Suwono, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , Amrul: <i>Konversi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat: Modifikasi Sistem Torefaksi Kontinu Unggun Terfluidisasi untuk Mengakomodasi Karakteristik Sampah.</i> | Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII), Bandar Lampung, 23-24 Oktober 2013., Bandar Lampung, INA, 2013                   |
| 2.  | Achmad Rofi Irsyad, Pandji Prawisudha, <b>Ari Darmawan Pasek</b> : <i>Kaji Eksperimental Produksi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan dari Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Proses Hidrotermal.</i>                    | Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII), Depok, 15-16 Oktober 2014, ISBN 9786029841237, hal. 507-512., Depok, INA, 2014 |

| No. | Pengarang, Judul Makalah   | Nama Seminar, Tahun, ISBN, Tempat Publikasi  |
|-----|--|--|
| 3.  | M. Irsyad, Aryadi Suwono, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , W.C. Mahendra, <i>Studi Karakteristik Garam Hidrat Sebagai Kandidat Refrigeran Sekunder Pada Sistem Pengkondisian Udara Jenis Chiller.</i> | Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII), Depok, 15-16 Oktober 2014, ISBN 9786029841237, hal. 513-517., Depok, INA, 2014 |
| 4.  | Gea Fardias Mumin, Pandji Prawisudha, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , <i>Kaji Eksperimental Pemisahan Lapisan Logam dalam Bungkus Plastik Berlapis Aluminium Menggunakan Proses Hidrotermal</i>      | Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII), Depok, 15-16 Oktober 2014, ISBN 9786029841237, hal. 518-523., Depok, INA, 2014 |

#### VIII. PATEN

| No. | Paten   | Bentuk Paten, Tahun   |
|-----|---|---|
| 1.  | Aryadi Suwono, Nathanael Panagung Tandian, <b>Ari Darmawan Pasek</b> , <i>Refrigeran Hidrokarbon Pengganti CFC-12 dan HCFC-22 Tak Mudah Terbakar,</i> | Sertifikat Paten No. Granted ID P 0024879 dari Direktorat Paten, Direktorat Jenderal HKI, Departemen Hukum dan HAM RI, Bandung, INA, 2010 |

