

**LAPORAN AKHIR TAHUN
PENELITIAN STRATEGIS NASIONAL
(Institusi)**



**Pengembangan Cold Storage Tenaga Surya untuk Meningkatkan Kapasitas
dan Kualitas Produksi Perikanan Nasional**

Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun

Tim Pengusul

I Nyoman Suamir, ST, MSc, PhD (Ketua)
NIDN: 0025036514

Sudirman, ST, MT (Anggota 1)
NIDN: 0013036704

I Nengah Ardita, ST, MT (Anggota 2)
NIDN: 0030116406

Dr. Gede Santanu, SE, MM (Anggota 3)
NIDN: 0024076006

Dibiayai oleh:
Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat
Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi
Sesuai dengan Kontrak Penelitian
Nomor: SP DIPA - 042.06.1.401516/2018

**POLITEKNIK NEGERI BALI
Oktober 2018**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : Pengembangan Cold Storage Tenaga Surya untuk Meningkatkan Kapasitas dan Kualitas Produksi Perikanan Nasional

Peneliti/Pelaksana
Nama Lengkap : I NYOMAN SUAMIR, S.T, M.MSc, Dr.Phil
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Bali
NIDN : 0025036514
Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
Program Studi : Teknik Pendingin Dan Tata Udara
Nomor HP : 081237594781
Alamat surel (e-mail) : nyomansuamir@pnb.ac.id

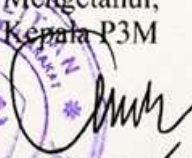
Anggota (1)
Nama Lengkap : SUDIRMAN S.T
NIDN : 0013036704
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Bali

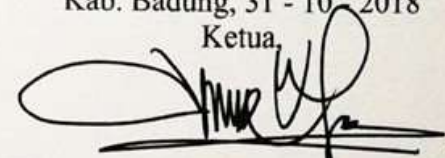
Anggota (2)
Nama Lengkap : I NENGAH ARDITA S.T, M.T
NIDN : 0030116406
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Bali

Anggota (3)
Nama Lengkap : Dr GEDE SANTANU S.E., M.M.
NIDN : 0024076006
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Bali

Institusi Mitra (jika ada)
Nama Institusi Mitra : PT. Gita Mandiri Tehnik (AICOOL)
Alamat : Cabang Bali, Jl. Raya Puri Gading 1 B1 no. 8 Bukit Jimbaran 80361, Bali

Penanggung Jawab : Pratama Wahyudi Mulyana
Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 1 dari rencana 3 tahun
Biaya Tahun Berjalan : Rp 125,000,000
Biaya Keseluruhan : Rp 584,900,000

Mengetahui,
Kepala P3M

(Dr. Ir. Lilik Sudiajeng, M.Erg)
NIP/NIK 195808161987122001

Kab. Badung, 31 - 10 - 2018
Ketua,

(I NYOMAN SUAMIR, S.T, M.MSc, Dr.Phil)
NIP/NIK 196503251991031002

Menyetujui,
Direktur PNB

(I Nyoman Abdi, S.E., M.eCom)
NIP/NIK 19651221199003003

RINGKASAN

Cold storage memiliki peran penting dalam mengurangi kerugian pasca panen, meningkatkan kapasitas dan kualitas produksi perikanan dan akuakultur serta menjaga kestabilan pasokan pangan ke masyarakat. Tetapi perkembangan *cold storage* secara umum khususnya untuk industri perikanan di Indonesia masih sangat kurang. Sebagai produsen perikanan tertinggi kedua di dunia setelah Cina, Indonesia hanya memiliki 2 dari total 6 pelabuhan perikanan samudera dilengkapi fasilitas *cold storage* dan hanya 4 dari total 14 pelabuhan perikanan nasional dengan fasilitas *cold storage*. Kurangnya fasilitas *cold storage* telah membatasi perkembangan industri perikanan di tanah air. Dalam situasi ini, teknologi yang dapat mendorong pengembangan infrastruktur termasuk *cold storage* di Indonesia akan meningkat seiring dengan pembangunan ekonomi yang semakin baik.

Proyek penelitian ini menyelidiki teknologi refrigerasi untuk aplikasi *cold storage* yang efisien dan ramah lingkungan serta mampu mendukung pembangunan infrastruktur ketahanan pangan nasional. Pendekatan penelitian yang dilakukan adalah menggabungkan keunggulan penggunaan refrigeran alami seperti CO₂ dan hidrokarbon pada sistem refrigerasi *cold storage* (*energy efficient refrigeration technology*) dan teknologi energi terbarukan (*renewable energy technology*) dan teknologi penyimpanan dingin (*cold thermal storage*) berbasis *vegetable oil phase change materials* (*bio-PCM*) sebagai *sustainable energy technology*. Sebuah prototipe *cold storage* bertenaga surya dirancang dan dibangun agar dapat dievaluasi dan dikaji kinerja energi, temperatur, dampak lingkungan serta keunggulan ekonomis pada aplikasi sebagai sistem penyimpanan produk perikanan nasional. Prototipe *cold storage* ini akan dibangun di Laboratorium Refrigerasi, Politeknik Negeri Bali.

Penelitian dilakukan secara bertahap selama 3 tahun. **Pada tahun-1** diawali dengan menemukan bahan bio-PCM dari bahan-bahan lokal. Kemudian melakukan pengujian untuk dapat diterapkan pada temperatur kerja dari -20°C sampai dengan -26°C. Beberapa pengujian juga dilakukan seperti *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) pengujian komposisi kimia, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan *T-history thermal analyses* pengujian sifat-sifat termal dari calon bio-PCM. Secara simultan juga dilakukan simulasi kinerja *Cold Storage* Tenaga Surya dengan menggunakan model numerik, kemudian membuat rancangan sesuai hasil simulasi numerik. Sebagian proses konstruksi yaitu *cold room* dari *cold storage* juga dapat dilakukan. Termasuk mempersiapkan bio-PCM dan penempatannya di dalam *cold room*.

Hasil yang diharapkan dari penelitian pada tahun 1 ini mencakup: penambahan material kekayaan hayati bio-PCM (-20 °C s.d. -26 °C), model, desain dan prototipe *cold storage* bertenaga surya terintegrasi, sebuah draft paten, 1 artikel pada jurnal nasional dan 1 artikel seminar internasional, dan laporan penelitian yang komprehensif tentang teknologi yang diusulkan, keunggulannya dengan sistem konvensional baik kinerja energi, dampak lingkungan maupun keunggulan ekonomis serta kajian pengaruhnya terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional. Jurnal nasional alternatif “Matrix” dan seminar internasional alternatif meliputi “*ICOMERA - International Conference on Mechanical Engineering Research and Applications*”, Unibraw, Malang, Oktober 2018 atau *ICAST - Internasiotinal Conference on Applied Science Technology*”, Manado, Oktober 2018.

Kata kunci: *teknologi energi terbarukan, cold storage, energi surya, konsumsi energi, dampak lingkungan, dan keunggulan ekonomis.*

PRAKATA

Laporan akhir tahun ke 1 penelitian hibah Penelitian Strategis Nasional ini yang berjudul “Pengembangan Cold Storage Tenaga Surya untuk Meningkatkan Kapasitas dan Kualitas Produksi Perikanan Nasional” disusun berdasarkan ‘Buku panduan pelaksanaan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat di perguruan tinggi yang diterbitkan oleh Kementerian Ristek Dikti tahun 2018.

Laporan ini menyajikan dan mendeskripsikan hasil yang telah dicapai pada tahun ke 1 kegiatan yang mencakup investigasi bahan bio-PCM dari bahan-bahan local melalui pengujian untuk dapat diterapkan pada temperatur kerja dari $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Beberapa pengujian juga dilakukan seperti *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) pengujian komposisi kimia, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan *T-history thermal analyses* pengujian sifat-sifat termal dari calon bio-PCM. Juga dari hasil kegiatan simulasi kinerja *Cold Storage* Tenaga Surya dengan menggunakan model numerik, beserta pembuatan rancangan sesuai hasil simulasi numerik. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat diusulkan untuk mendapatkan draft usulan paten serta dapat dipublikasikan pada jurnal nasional dan seminar internasional. Laporan ini juga menjelaskan rencana kegiatan selanjutnya untuk menyelesaikan seluruh rangkaian kegiatan penelitian yang ditargetkan.

Laporan akhir tahun ke 1 ini dapat disusun atas dukungan penuh dari tim peneliti dan Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat PNB, Teknisi serta mahasiswa yang sedang melakukan proyek akhir di Laboratorium Refrigerasi dan Tata Udara. Atas segala dukungan dan kerja samanya tersebut, peneliti menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya.

Badung, Oktober 2018
Ketua Tim Peneliti

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	iv
DAFTAR ISI	v
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Teknologi Refrigerasi dan Produksi Perikanan Nasional	4
2.2 Teknologi Berkelanjutan dan Ketahanan Pangan	4
2.3 Penelitian sebelumnya dan Pencapaiannya	5
2.4 Deskripsi Teknologi (<i>State of the Art</i>)	6
2.5 Road Map Penelitian	7
BAB 3 TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	9
3.1 Tujuan Penelitian	9
3.2 Manfaat Penelitian	9
BAB 4 METODE PENELITIAN	11
4.1 Jenis dan Rancangan Penelitian	11
4.2 Alur Penelitian dan Indikator Capaian	12
4.3 Identifikasi Variabel Penelitian	13
4.4 Instrumen Penelitian.....	14
4.5 Pengumpulan dan Analisis Data.....	14
BAB 5 HASIL YANG DICAPAI	16
5.1 Pengembangan PCM untuk cold storage	16
5.2 Perancangan dan pengembangan model solar cold storage	24
5.3 Pembuatan draft paten dan Publikasi ilmiah	25
BAB 6 RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA	26
BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN	28
7.1 Kesimpulan	28
7.2 Saran	28
DAFTAR PUSTAKA	29
LAMPIRAN-LAMPIRAN	31
Lampiran 1: Dukungan Sarana dan Prasarana Penelitian	32
Lampiran 2: Personalia tenaga peneliti.....	34
Lampiran 3: Artikel pada <i>ICOMERA - International Conference on Mechanical Engineering Research and Applications</i> ”, UNIBRAW, Malang, Oktober 2018	37
Lampiran 4: Artikel pada <i>ICAST - International Conference on Applied Science and Technology</i> ”, Manado, Oktober 2018	45
Lampiran 5: Artikel pada jurnal nasional Matrix	52

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Produk perikanan merupakan salah satu jenis pangan yang perlu mendapat perhatian terkait dengan keamanan dan keberlanjutan pangan (UU No. 18, 2012). Ikan merupakan bahan makanan yang mudah mengalami pembusukan. Penanganan ikan segar merupakan salah satu bagian penting dari mata rantai industri perikanan. Apalagi di daerah tropis seperti Indonesia yang temperatur dan kelembaban udaranya relatif tinggi. Walaupun demikian, kualitas ikan dapat dipertahankan dan umur penyimpanan ikan dapat diperpanjang dengan mendinginkan, bisa dengan menambahkan es atau menyimpannya di dalam *cold storage* (Opara *et al.*, 2007).

Tetapi perkembangan *cold storage* untuk industri perikanan di Indonesia masih jauh dari mencukupi. Sebagai produsen produk perikanan dan akuakultur tertinggi kedua di dunia setelah Cina (FAO, 2016), Indonesia hanya memiliki 2 dari total 6 pelabuhan perikanan samudera yang memiliki fasilitas *cold storage* dan hanya 4 dari total 14 pelabuhan perikanan nasional yang memiliki fasilitas *cold storage* (Putri dan Munaf, 2013). Indonesia masih tergolong dalam daftar negara dengan fasilitas *cold storage* yang rendah (Miller, 2016). Kurangnya fasilitas *cold storage* telah membatasi perkembangan industri perikanan. Dalam situasi ini, teknologi yang dapat mendorong pengembangan infrastruktur termasuk *cold storage* di negara ini sangat dibutuhkan. Sehubungan dengan hal tersebut, Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) telah mencanangkan bahwa hasil perikanan Indonesia harus dapat mengikuti Persyaratan Jaminan Mutu dan Keamanan Hasil Perikanan pada proses produksi, pengolahan dan distribusi (KepMen KP No. 52A, 2013). Salah satu persyaratannya adalah menerapkan pengendalian suhu dengan menjaga rantai dingin (*cold chain*) hasil perikanan sesuai spesifikasi produk melalui *cold storage*.

Ditinjau dari isu lingkungan, peningkatan konsumsi produk pangan berdampak juga pada emisi gas rumah kaca (GRK) atau pemanasan global akibat konsumsi energi. Di Indonesia, pemerintah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 26% (kalau dilakukan sendiri) dan 41% (dilakukan dengan dukungan internasional) pada tahun 2020. Emisi gas rumah kaca dari sektor komersial diperkirakan sekitar 0,7% (3,8 juta ton CO₂) dari emisi total sebesar 540 juta ton CO₂ (Sugiyono *et al.*, 2014). Mengurangi konsumsi energi sistem refrigerasi juga menjadi prioritas utama dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dari rantai pangan (*food chain*).

Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi dan dampak lingkungan dari sistem refrigerasi (*cold chain*) pada rantai pangan (*food chain*) adalah melalui penggunaan energi terbarukan

(*renewable energy*) sebagai penggerak sistem refrigerasinya. Indonesia adalah negara kepulauan yang luas yang terletak di ekuator dunia. Nilai iradiasi matahari di Indonesia berkisar antara 4,6 kWh/m² dan 7,2 kWh/m². Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki potensi energi surya yang tinggi (Rumbayan *et al.*, 2012; Veldhuis and Reinders, 2015). Total kapasitas pemanfaatan energi surya, terutama photo-voltaic, baru sekitar 42,78 MW. Kapasitas ini hanya 0,03% dari total konsumsi energi di Indonesia dan sekitar 0,41% dari total penggunaan energi terbarukan (Sugiyono *et al.*, 2014). Artinya porsi penggunaan energi surya masih kecil. Hal ini menjadikan teknologi *cold storage* yang digerakkan energi surya menjadi salah satu metode yang menjanjikan dan menarik dalam menerapkan teknologi terbarukan pada pulau-pulau di Indonesia.

Sampai saat ini belum banyak penelitian yang dilakukan dengan menggabungkan teknologi refrigerasi yang efisien energi (*energy efficient refrigeration technology*), teknologi energi berkelanjutan (*sustainable energy technology*) dan teknologi energi terbarukan (*renewable energy technology*) untuk mengurangi konsumsi energi dan dampak lingkungan dari rantai dingin (*cold chain*) di dalam rantai suplai pangan di Indonesia. Penelitian ini akan melakukan kajian dan evaluasi sebuah teknologi yang merupakan penerapan ketiga teknologi tersebut untuk diaplikasikan pada *cold storage* sebagai bagian dari *cold chain* pada *food chain* di Indonesia. Di samping itu teknologi yang diusulkan sejalan dengan amanat Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN, 2015-2019) serta Agenda Riset Nasional (ARN), di antaranya yaitu bidang pangan dan pertanian; energi, energi baru dan terbarukan. Kebijakan energi nasional saat ini telah menetapkan target meningkatkan peran energi baru dan terbarukan hingga 23% pada tahun 2025. Teknologi yang diusulkan juga sesuai Renstra KKP (2015-2019) yang mana salah satu arah kebijakan dan prioritas pembangunan kelautan dan perikanan adalah meningkatkan mutu, diversifikasi dan akses pasar produk kelautan dan perikanan melalui pembangunan infrastruktur rantai dingin (*cold chain*), salah satunya adalah *cold storage*.

1.2 Perumusan Masalah

Beberapa masalah telah diidentifikasi dan akan menjadi target solusi yang diusulkan untuk dapat dipecahkan melalui penelitian ini, yaitu:

- Adanya kebutuhan bahwa hasil perikanan Indonesia harus dapat mengikuti persyaratan jaminan mutu dan keamanan hasil perikanan (KepMen KP No. 52A, 2013) dengan menerapkan pengendalian suhu hasil perikanan melalui pengembangan *cold storage*.
- Penggunaan energi terbarukan dapat mengurangi pemanasan global terhadap lingkungan. Tetapi, masih sedikit sekali pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia.

- Adanya kebutuhan teknologi yang mengintegrasikan keunggulan penggunaan refrigeran alami seperti hidrokarbon (R-290) dan CO₂ (R-744); energi surya dan bio-PCM.
- Perlu adanya kajian bagaimana kinerja teknologi *cold storage* tenaga surya dibandingkan dengan sistem *cold storage* konvensional dengan refrigeran sintetis R-22 atau R-404A.
- Di Indonesia, hanya sedikit peneliti yang bekerja di bidang refrigerasi dan penerapannya di sektor pangan. Di sisi lain, negara ini sangat membutuhkan dukungan peneliti dalam mengimbangi pesatnya pertumbuhan kebutuhan pangan. Penelitian ini merupakan salah satu upaya yang bisa dilakukan untuk mengisi kesenjangan ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Refrigerasi dan Keamanan Pangan

Sistem refrigerasi sangat penting dalam sebuah rantai makanan (*food chain*). Sistem refrigerasi menjaga kualitas makanan (pangan) dan memungkinkan makanan dipasok dengan aman dan terjaga kualitasnya dari tempat-tempat produksi ke konsumen. Sistem refrigerasi membantu menstabilkan harga pasar dan menjaga kelancaran pasokan makanan ke konsumen dan juga memiliki peran penting dalam mengurangi kerugian pasca panen atau pasca tangkap ikan di laut. Kurang dari 10% bahan pangan yang mudah rusak pada kenyataannya saat ini dikondisikan menggunakan sistem refrigerasi dan diperkirakan kerugian pasca panen dunia saat ini mencapai 30% dari total produksi (Coulomb, 2008). IIR (2009) melaporkan bahwa total produksi pangan global adalah 5.500 juta ton, setidaknya 33% membutuhkan sistem refrigerasi namun hanya 7% yang dikondisikan. Sehingga sebagian besar bahan pangan tersebut terbuang karena rusak.

Indonesia sebagai salah satu negara dengan jumlah populasi 258,5 juta sedang membutuhkan jumlah pangan yang besar dan juga memerlukan sistem refrigerasi atau rantai dingin (*cold chain*) di dalam sebuah rantai pangan (*food chain*) untuk memenuhi kebutuhan pangan tersebut. Tetapi perkembangan rantai dingin (*cold chain*) di Indonesia masih sangat rendah. Pada tahun 2016, negara ini memiliki kapasitas *cold storage* di dalam rantai dinginnya sebesar 12,3 juta m³ atau kurang dari 0,05 m³ per kapita. Sebagai perbandingan kapasitas *cold storage* per kapita beberapa negara seperti UK 0,39 m³, USA 0,36 m³, Jepang 0,26 m³, India 0,10 m³, Brasil 0,08 m³, dan Cina 0,06 m³ per kapita. Dengan demikian Indonesia membutuhkan investasi yang masih sangat besar untuk sistem rantai dingin (Miller, 2016 dan IARW, 2016). Di samping itu, Indonesia merupakan produsen perikanan tertinggi kedua di dunia. Produksi perikanan di negara ini pada 2014 adalah 14,33 juta ton. Pada tahun 2016, produksi mencapai 23,03 juta ton, 27,6% berasal dari perikanan laut dan 72,4% dari akuakultur (MMAF-RI, 2016). Untuk meningkatkan ekonomi masyarakat perikanan membutuhkan usaha untuk mengembangkannya fasilitas yang tepat sehingga dapat meningkatkan kapasitas dan kualitas produk yang bisa dipasarkan di tingkat internasional. Hal ini sangat membutuhkan fasilitas *cold storage* (Putri dan Munaf, 2013).

2.2 Teknologi Energi Berkelanjutan dan Terbarukan pada *Cold Storage*

Proses pendinginan pada rantai pangan, mengkonsumsi cukup banyak energi. Untuk fasilitas gudang berpendingin (*refrigerated warehouse*) misalnya, 60-70% energi listrik yang digunakan adalah untuk sistem refrigerasinya (Evans dan Gigiel, 2010). Tassou, *et al.* (2009) mengkaji

potensi teknologi pendinginan berkelanjutan untuk mengurangi konsumsi energi dalam refrigerasi pangan. Kajian mereka difokuskan pada sistem: *tri-generation*, sistem refrigerasi siklus udara, sistem refrigerasi absorpsi, termoelektrik, siklus Stirling, refrigerasi termoakustik dan magnetik. Karakteristik dan potensi penerapan sistem tersebut juga diidentifikasi.

Optimasi sistem *cold storage* untuk meningkatkan kinerja energi juga dilaporkan oleh Kozak et al. (2016) secara eksperimental dan teoritis mempelajari sistem *cold storage* yang menggunakan *phase change material* (PCM). Sistem seperti ini dilaporkan dapat menjaga temperatur produk lebih stabil karena memanfaatkan panas laten dari PCM. Oró et al. (2014) juga melaporkan bahwa penerapan PCM dalam *cold storage* bisa mengurangi emisi CO₂ pada rentang antara 5% dan 22%. Teknologi berkelanjutan dengan menerapkan refrigeran sekunder CO₂ yang didinginkan dengan sistem refrigerasi ammonia pada aplikasi gudang pangan dingin telah dipublikasikan oleh Emerson Climate Technologies (2014). Teknologi refrigerasi berkelanjutan yang diterapkan sepenuhnya bebas dari refrigeran HFC (*hydro-fluoro carbon*). Refrigeran HFC berpotensi menimbulkan efek pemanasan global. Efisiensi dari sistem refrigerasi dengan teknologi ini 15% lebih baik dari sistem dengan menggunakan refrigeran HFC.

Pemanfaatan radiasi matahari untuk pendinginan bisa juga dijadikan sebagai teknologi berkelanjutan alternatif untuk mengurangi penggunaan energi dari bahan fosil pada rantai pangan. Penerapan energi surya (*renewable energy technology*) dalam *cold storage* yang pemanfaatannya untuk sistem termal dari refrigerasi absorpsi maupun untuk memproduksi listrik telah dilaporkan oleh Basu dan Ganguly (2016). Wang dan Dennis (2015) menyelidiki kinerja energi dari sistem refrigerasi tenaga surya baik yang menerapkan baterai maupun PCM. Dilaporkan bahwa sistem dengan PCM berkinerja lebih baik dan dapat memberikan penghematan energi dibandingkan sistem tanpa PCM. Tetapi sistem refrigerasi tenaga surya dengan baterai memberikan penghematan energi yang lebih tinggi daripada sistem dengan PCM.

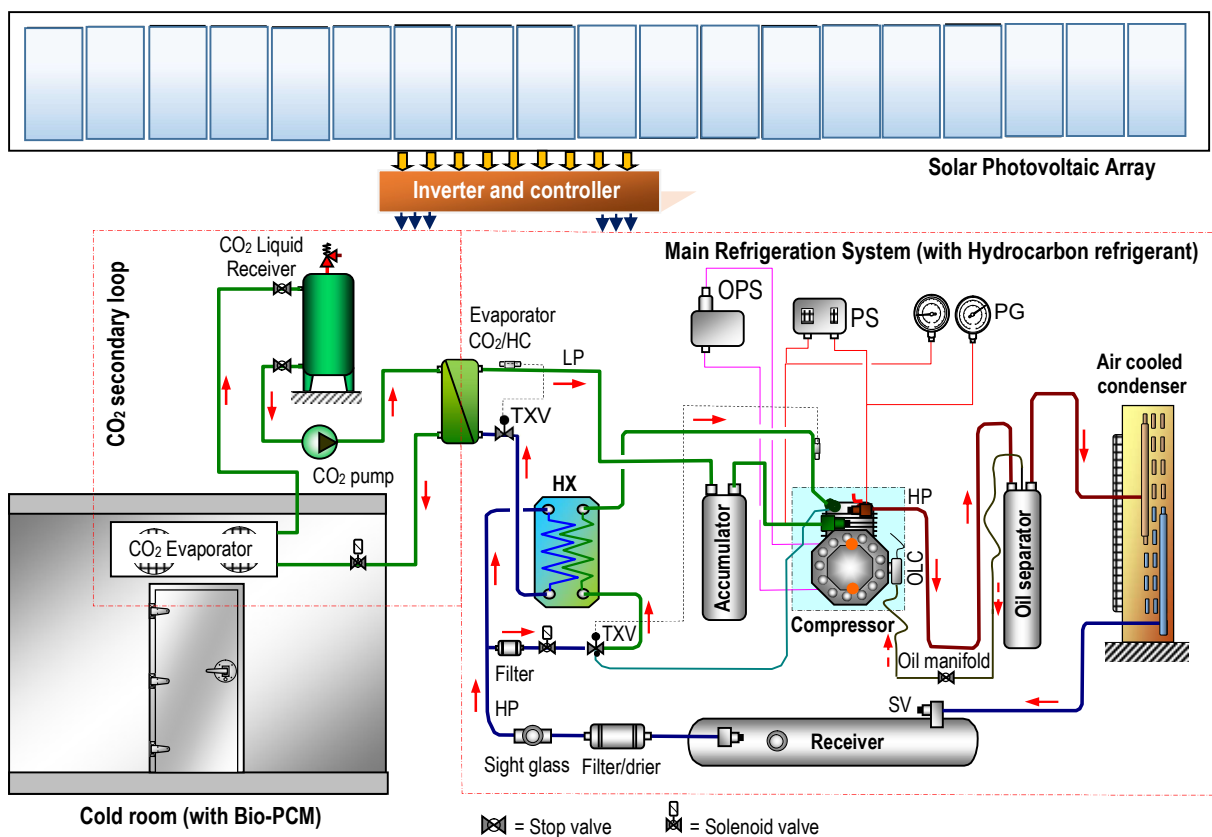
2.3 Penelitian Sebelumnya dan Pencapaiannya

Penelitian sebelumnya yang sudah dilakukan oleh peneliti utama lebih fokus pada kajian dan penerapan teknologi untuk energi berkelanjutan pada sektor pangan khususnya *supermarket*. Beberapa penelitian juga mengkaji teknologi energi berkelanjutan untuk aplikasi pada gedung komersial khususnya gedung hotel. Penelitian-penelitian yang berkaitan dengan penelitian yang diusulkan pada sektor pangan mencakup: “*Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation in the food industry*”; “*Integrated thermal energy storage (PCM) in food refrigeration equipment for energy and CO₂ emissions reduction*”;

“Application of hydrocarbon refrigerant R-1270 on a vertical multideck display cabinet”; “Investigation on CO₂ gas cooler for commercial refrigeration applications”; and “Temperature performance investigation on a serve-over display cabinet with CO₂ as refrigerant”. Sebagian penelitian sudah dipublikasi pada jurnal internasional dan konferensi internasional. Jenis-jenis publikasi yang telah dilakukan dapat dilihat lebih rinci pada Lampiran 1.

2.4 Deskripsi Teknologi (*State of the Art*)

Teknologi yang diusulkan menggabungkan keunggulan teknologi refrigerasi yang hemat energi (*energy efficient refrigeration technology*), teknologi energi terbarukan (*renewable energy technology*) dan teknologi energi berkelanjutan (*sustainable energy technology*). Sistem refrigerasi dari *cold storage* menggunakan dua jenis refrigeran yaitu hidrokarbon (R-290) dan CO₂ (R-744) yang terdiri dari sistem pendinginan utama dengan R-290 sebagai refrigeran utama dan sistem pendinginan sekunder dengan refrigeran R-744. Evaporator dari sistem refrigerasi utama mendinginkan refrigeran sekunder R-744 yang disirkulasikan ke *cold room* dari sistem *cold storage* menggunakan pompa CO₂. R-744 cair menyerap panas dalam evaporator (*flooded CO₂ evaporator*), kemudian kembali ke sistem refrigerasi utama.



Gambar 2.1 Skematik sistem *cold storage* tenaga surya dengan refrigeran R-290 dan R-744 dan *cool room* yang terintegrasi dengan bio-PCM

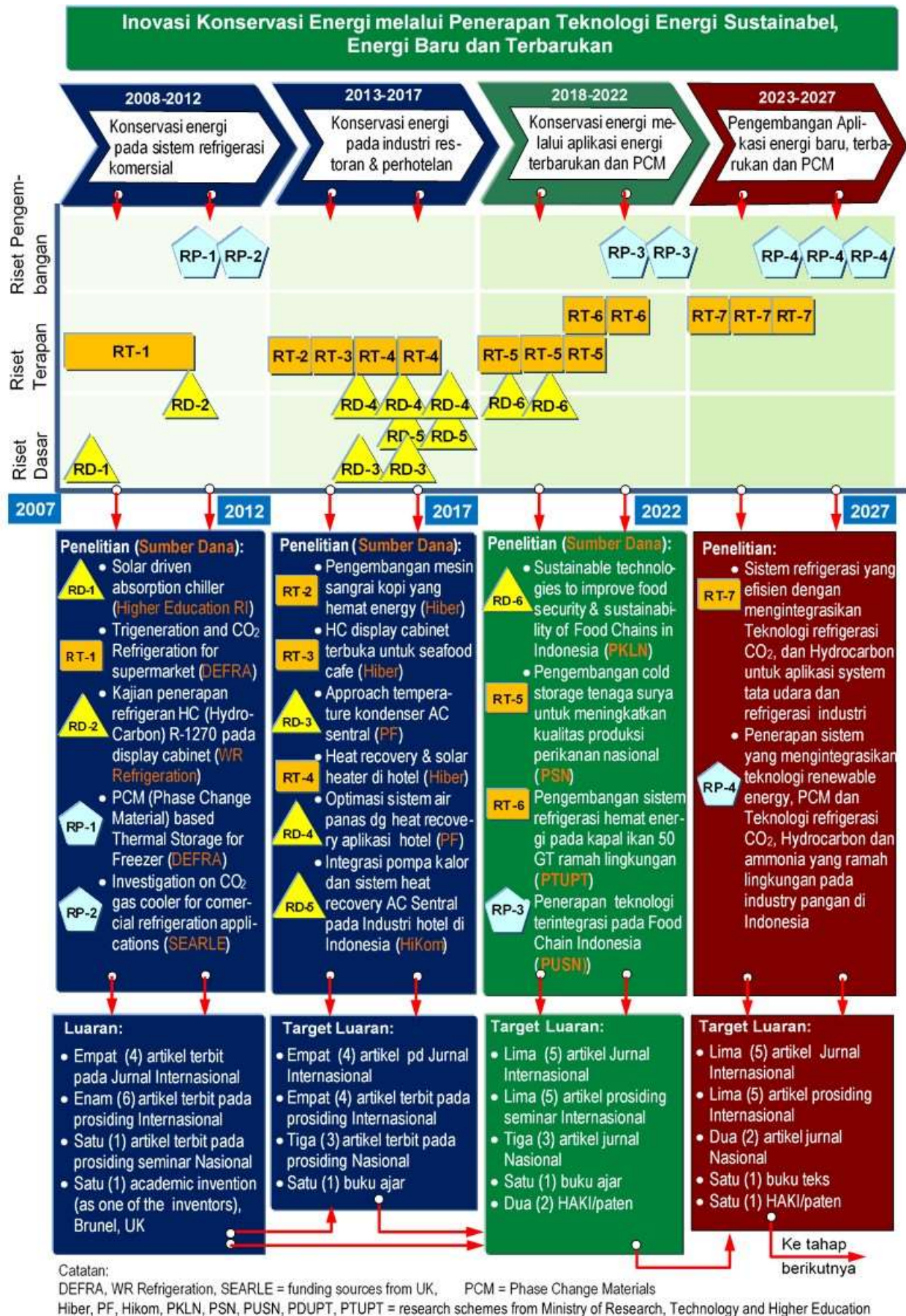
Sistem seperti ini memanfaatkan keunggulan sistem refrigerasi hemat energi dengan menggunakan refrigeran hidrokarbon (Suamir *et al.*, 2012a) dan sistem refrigeran sekunder CO₂ yang sangat efisien (Suamir *et al.*, 2012b). Sistem refrigerasi akan digerakkan dengan tenaga listrik yang dihasilkan oleh sebuah sistem *solar cell* (PV: *photo-voltaic cell*). Sistem solar PV akan menghasilkan listrik dari energi matahari dan menjadi penggerak utama sistem refrigerasi. Tidak akan ada baterai yang digunakan pada sistem yang diusulkan. Skematik sistem refrigerasi *cold storage* R-290/R-744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM dapat dilihat pada Gambar 2.1. Integrasi bio-PCM di dalam *cool room* akan dirancang agar *cool room* tetap dingin saat suplai listrik tidak tersedia dari sistem solar PV terutama pada saat malam hari atau *off cycle*. Bio-PCM akan menjaga temperatur *cool room* dan produk relatif stabil dengan menyerap *heat gain* yang masuk ke dalam *cool room*.

Teknologi yang diusulkan ini sangat fleksibel untuk aplikasi Indonesia. Karena bisa menjadi solusi yang sangat baik untuk daerah terpencil di pulau-pulau yang belum terjangkau jaringan listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN). Namun untuk pulau-pulau yang sudah mendapatkan suplai listrik yang memadai, teknologi *cold storage* R-290/R-744 terintegrasi dengan bio-PCM bisa menjadi sistem yang sangat andal dengan mode operasi sebagai sistem *hybrid cold storage* yang bisa dioperasikan dengan tenaga surya maupun dengan suplai listrik dari PLN pada malam harinya.

Penelitian ini juga akan menganalisis perbandingan antara teknologi *cold storage* R-290/R-744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM dan *cold storage* konvensional yang menggunakan sistem ekspansi langsung (*DX-system*) dengan refrigeran R-22 atau R-404A. Skematik dari sistem konvensional yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar D.1 (Lampiran D). Kajian komparatif juga akan dilakukan pada sistem konvensional dengan dua loop dan *propylene glycol* sebagai refrigeran sekunder. Sistem ini sering diaplikasikan pada sistem *cold storage* dengan kapasitas menengah dan besar.

2.5 Roadmap Penelitian

Road map penelitian dari ketua peneliti yang memetakan proyek-proyek penelitian yang telah selesai dilaksanakan termasuk yang sedang dikerjakan dan yang akan diusulkan untuk program penelitian selanjutnya disajikan pada Gambar 2.2. Secara umum road map penelitian dari ketua peneliti dikelompokkan menjadi empat (4) tema fokus penelitian dengan jangka waktu masing-masing tema selama 5 tahun dan semuanya berada pada satu bidang fokus penelitian “*Inovasi konservasi energi melalui penerapan teknologi energi berkelanjutan, baru dan terbarukan*”.



Gambar 2.2 Road map penelitian dari Ketua Peneliti

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan khusus penelitian yang diusulkan adalah untuk mengembangkan dan melakukan kajian sebuah teknologi konservasi energi pada *cold storage* yang menerapkan teknologi refrigerasi yang efisien energi, teknologi energi surya atau terbarukan (*renewable energy technology*) dan bio-PCM (*sustainable energy technology*) untuk mendukung ketahanan pangan nasional melalui peningkatan kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional. Adapun tujuan khusus lebih rinci dapat diuraikan sebagai berikut:

- Melakukan kajian bahan-bahan lokal sebagai bahan bio-PCM untuk aplikasi pada temperatur kerja *cold storage* dari -20°C sampai dengan -26°C .
- Mengembangkan model numerik dari teknologi yang diusulkan dan melakukan simulasi numerik tentang kinerja energi dan dampak lingkungan dari teknologi tersebut;
- Membuat rancangan dan membangun sebuah prototipe *cold storage* R-290/R744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM lengkap dengan sistem instrumentasi dan kontrol;
- Melakukan pengujian, evaluasi dan kajian kinerja energi, kinerja temperatur, dampak lingkungan dan keandalan ekonomis dari prototipe dan memvalidasi model numerik
- Melakukan kajian komparatif dari teknologi yang diusulkan dibandingkan dengan sistem konvensional dan kajian komprehensif tentang pengaruh teknologi *cold storage* yang diusulkan terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional.
- Publikasi dan membangun jaringan kerja sama penelitian lebih lanjut dengan industri terkait baik industri manufaktur maupun pengguna teknologi.

3.2 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan berkontribusi pada usaha-usaha untuk menurunkan konsumsi energi bersumber bahan bakar fosil dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan serta mengurangi emisi gas rumah kaca dalam rangka meningkatkan keamanan, kestabilan dan keberlanjutan suplai pangan nasional lebih khususnya untuk meningkatkan kapasitas dan kualitas produksi sektor perikanan nasional. Kontribusi dilakukan melalui penerapan teknologi *cold storage* R-290/R-744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM. Penelitian ini juga akan memberikan kontribusi khusus sebagai berikut:

1. Pendekatan teknologi dalam penelitian ini yang mengintegrasikan *energy efficient refrigeration*, *renewable energy* dan *sustainable energy technologies* akan meningkatkan

kepercayaan akan keandalan teknologi yang diterapkan pada sebuah konsep teknologi untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional.

2. Model yang dikembangkan dan pengetahuan yang diperoleh dari penelitian ini memudahkan untuk melakukan perancangan, menentukan kapasitas, dan optimasi sebuah *cold storage*.
3. Prototipe yang dibuat dapat membuka kesempatan untuk melakukan kajian yang lebih dalam dan optimasi komponen, optimasi sistem rancangan dan juga optimasi sistem kontrolnya.
4. Pengetahuan yang lebih luas dan dalam akan diperoleh dari tingkat kesulitan yang dihadapi pada saat integrasi *solar energy technology (solar cell tanpa back up baterai)* dan *sustainable energy technology (bio-PCM cold thermal storage)* sehingga diperoleh proses pendinginan yang terus menerus pada *cold storage* bahkan pada saat sistem refrigerasinya tidak beroperasi.

BAB 4. METODE PENELITIAN

4.1 Jenis dan Rancangan Penelitian

Jenis penelitian yang diusulkan merupakan kajian teoritik dan eksperimental suatu konsep teknologi “*Cold storage R-290/R744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM*”. Penelitian juga diawali dengan melakukan survei dan studi literatur untuk mengumpulkan data dan informasi yang diperlukan dalam kajian teoritis dan ekperimental. Kajian teoritis yang dilakukan menggunakan aplikasi numerik EES (*Engineering Equations Solver*), TRNSYS-16, RETScreen-4, dan Inventor mencakup 5 (lima) lingkup kajian yaitu:

- (i) Kajian kinerja teoritis sistem refrigerasi *cold storage* yang efisien energi dengan skematik seperti pada Gambar 2.1 (Bab 2). Kajian ini meliputi kinerja energi, estimasi pencapaian dan kestabilan temperatur produk, dan kajian aspek lingkungan yang ditentukan melalui banyaknya emisi gas rumah kaca (GRK) baik emisi langsung (akibat kebocoran refrigeran) maupun emisi tak langsung (akibat konsumsi energi). Sebagai perbandingan, kajian teoritis juga dilakukan terhadap sistem refrigerasi konvensional dari *cold storage*. Skematik sistem refrigerasi konvensional disajikan pada Gambar D.1 (Lampiran D). Kajian dilakukan dengan menerapkan kondisi cuaca di Indonesia dan mengacu pada BS EN 378-1 Standard (2012) dan ASHRAE Standard 72 (2005). Software yang diperlukan EES.
- (ii) Kajian berbagai alternatif pemasangan bio-PCM di dalam *cool room* dari sistem *cold storage* dan estimasi kapasitas *thermal energy storage* dari bio-PCM. Kajian ini mencakup simulasi teoritis kapasitas penyimpanan energi untuk menjaga dan mempertahankan temperatur *cool room* dan produk relatif stabil pada saat sistem refrigerasi tenaga surya tidak beroperasi akibat suplai energi listrik tidak ada (misalnya pada malam hari). Software EES dan Inventor.
- (iii) Kajian kinerja sistem solar PV mencakup estimasi kapasitas yang dibutuhkan untuk menggerakkan sistem *cold storage* temperatur rendah (*LT refrigeration*) menurut BS EN ISO 23953-2 Standard (2012). Simulasi fluktuasi kinerja harian dan tahunan sistem solar PV berdasarkan kondisi radiasi matahari di Indonesia (software TRNSYS-16 dan RETScreen-4).
- (iv) Simulasi kinerja teoritis sistem terintegrasi *cold storage R-290/R744 tenaga surya dengan bio-PCM*. Kajian ini menggunakan kombinasi software EES dan TRNSYS-16.
- (v) Kajian pengaruh penerapan *Teknologi cold storage R-290/R744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM* terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional dan dampaknya terhadap pencapaian target pemerintah Indonesia dalam menurunkan konsumsi energi berbasis *fossil fuel* dan menekan emisi gas rumah kaca (GRK) pada tahun 2020. Data produksi dan potensi perikanan nasional diperoleh melalui survei dan studi literatur.

Sedangkan untuk kajian eksperimental, sebuah prototipe *Teknologi cold storage R-290/R744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM* berkapasitas 5 kW akan dibangun di Laboratorium Refrigerasi Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali. Desain dari prototipe *cold storage* dibuat dengan mempertimbangkan hasil simulasi yang diperoleh menggunakan model numerik, dilanjutkan dengan perencanaan pelaksanaan penelitian experimental mencakup persiapan instrumentasi, kontrol dan sistem monitoring. Prototipe diuji dengan mengacu pada ASHRAE Standard 72 (2005). Pengujian yang dilakukan mencakup:

- (i) Pengujian kinerja energi sistem refrigerasi *cold storage*. Kinerja energi (*energy performance*) mencakup kapasitas pendinginan (*refrigeration capacity*), konsumsi daya (*power consumption*), COP (*Coefficient of Performance*), dan EER (*Economic Efficiency Ratio*).
- (ii) Pengujian kestabilan dan keseragaman temperatur produk dan efektifitas penggunaan bio-PCM. Dari hasil pengujian dapat dievaluasi distribusi dan fluktuasi temperatur produk selama 24 jam dan harus berada pada rentang yang diperbolehkan oleh ASHRAE Standard 72 (2005).
- (iii) Pengujian karakteristik pembangkitan energi listrik pada sistem solar PV. Data yang diperlukan seperti tegangan, arus listrik suplai yang dihasilkan, temperatur cell surya harus diukur, dicatat melalui perangkat *data logging system*, kemudian dievaluasi dan dianalisis kestabilan suplai listrik yang dihasilkan per hari.

Data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis serta dibuat kajian experimental yang komprehensif mencakup kinerja energi, pencapaian dan kestabilan temperatur produk, kajian dampak lingkungan dan keunggulan ekonomisnya.

4.2 Alur Penelitian dan Indikator Capaian

Penelitian dilakukan melalui beberapa tahap kegiatan yang dapat dijabarkan sebagai berikut (Alur kegiatan penelitian dalam bentuk diagram *Fishbone* disajikan pada Gambar 4.1):

Kegiatan Penelitian Tahun-1: Kegiatan penelitian terdiri dari dua kegiatan utama yaitu:

- (i) *Mengumpulkan data dan informasi melalui survei dan penelusuran literatur yang mencakup:* ketersediaan infrastruktur *refrigerated storage* pada bidang pangan dan perikanan, kondisi produksi perikanan nasional (kapasitas, kualitas, distribusi) di berbagai daerah di Indonesia, potensi perikanan, kebijakan pengembangannya di masa yang akan datang, aplikasi teknologi tenaga surya, alternatif bahan-bahan lokal sebagai bahan bio-PCM;
- (ii) *Pengembangan model numerik, simulasi dan desain meliputi:* Mengembangkan model numerik dari teknologi terintegrasi yang diusulkan; melakukan simulasi numerik tentang kinerja energi dan membuat rancangan atau desain teknologi yang diusulkan.

Sebagian kegiatan pengadaan bahan untuk bio-PCM, *cool room*, dan komponen sistem refrigerasi juga akan dilakukan pada tahun-1. Untuk publikasi dan pelaporan, akan dipersiapkan dua buah artikel pada jurnal nasional dan internasional serta satu buah artikel untuk seminar internasional. Juga akan dipersiapkan laporan kemajuan dan laporan akhir tahun-1.

Indikator Capaian Penelitian Tahun-1: Sebuah material kekayaan hayati *Phase Change Material* (bio-PCM) untuk aplikasi refrigerasi temperatur rendah: -20 °C s.d. -26 °C; Model numerik dan sebuah desain *cold storage* tenaga surya; artikel ilmiah pada jurnal nasional tak terakreditasi-1, seminar internasional-1 dan laporan kemajuan Tahun-1.

4.3 Identifikasi Variabel Penelitian

Variabel penelitian terdiri atas variabel terikat dan variabel bebas. Variabel terikat mencakup: konsumsi energi, kapasitas pendinginan, COP, EER, efisiensi kompresor, efisiensi pompa, efisiensi solar PV, kapasitas penyimpanan panas bio-PCM, emisi GRK atau CO₂ equivalen, dan *payback period*. Sedangkan variabel bebas meliputi: temperatur dan tekanan evaporator dan kondensor, temperatur dan tekanan refrigeran sekunder, temperatur produk, temperatur dan kelembaban udara di dalam *cool room*, temperatur lingkungan dan kelembabannya, laju aliran refrigeran primer dan sekunder, tegangan listrik dan kuat arus listrik. Variabel bebas ditentukan dengan melakukan pengukuran langsung dengan sistem data logger yang telah dipersiapkan dan atau menggunakan data sekunder dari hasil survei serta studi literatur.

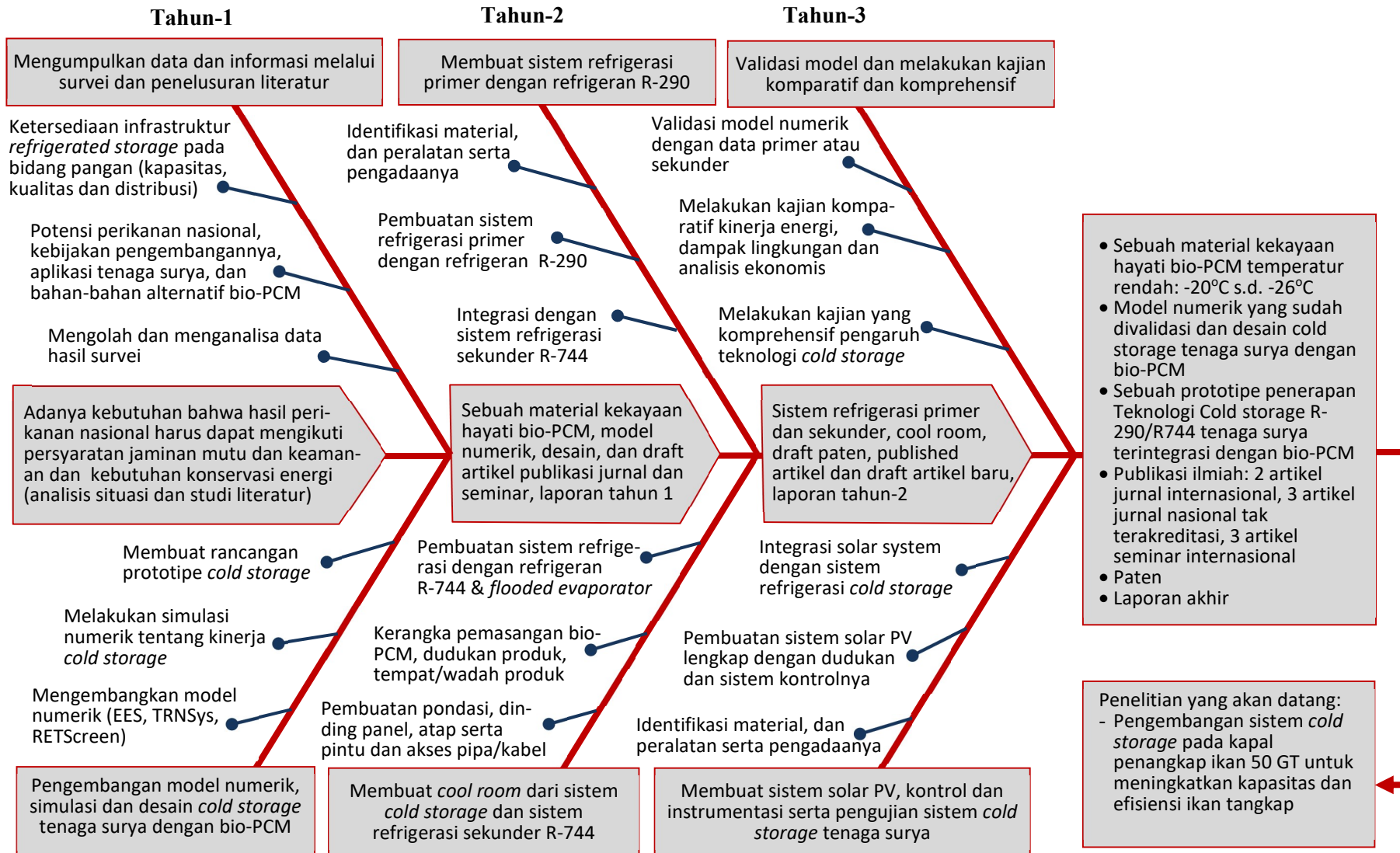
4.4 Instrumen Penelitian

Untuk kajian numerik diperlukan perangkat software meliputi: program EES (dengan lisensi) sudah tersedia di PNB, TRNSys (lisensi) diusahakan melalui penelitian ini, *spread sheet program*, RETScreen (*free software*) dan Inventor (tersedia di PNB). Sedangkan untuk eksperimental diperlukan instrumen dan perlengkapan seperti: sensor temperature & tekanan dan sistem data logger, *energy meter* dan *flow meter*. Sistem data logger yang digunakan adalah Datascan 7000 series lengkap dengan Datascan processor 7320 dan expansion modules 7020 (tersedia di PNB). Pengujian bio-PCM dilakukan dengan metode *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) pengujian komposisi kimia, *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) dan *T-history thermal analyses* pengujian sifat-sifat termalnya. Pengujian GCMS dan DSC akan dilakukan di **Sentra Teknologi Polimer – BPPT Tangerang Selatan, Banten**. Sedangkan *T-history thermal analyses* dilakukan di Politeknik Negeri Bali (PNB) karena alat uji *T-history* sudah tersedia.

4.5 Pengumpulan dan Analisis Data

Data yang diperlukan dapat berupa data sekunder yang diperoleh dari hasil survei dan studi literatur. Data sekunder juga bisa diperoleh dari program aplikasi seperti EES, TRNSys 16, atau RETScreen-4. Sedangkan data primer diperoleh melalui pengujian dan pengukuran. Untuk memperkecil *uncertainty* dari hasil pengukuran, semua sensor dan transduser dikalibrasi.

Pengolahan dan analisis data baik data primer maupun sekunder menggunakan software Spread Sheet dan EES. Analisis komparatif disimulasikan melalui model numerik berbasis EES yang sudah dibuat. Model terlebih dahulu divalidasi dengan menggunakan data hasil pengujian. Untuk mengidentifikasi tingkat penyimpangan dari perhitungan numerik terhadap output variabel terikat, dilakukan analisa kesalahan (*error analysis*) dengan menggunakan program EES.



Gambar 4.1 Alur penelitian yang diusulkan dalam diagram fish-bone

BAB 5. HASIL YANG DICAPAI

5.1 Pengembangan PCM untuk Cold Storage

Rencana produk unggulan yang akan dihasilkan melalui penelitian ini sebagai kontribusi kebaruaran dapat dijelaskan sebagai berikut:

Pilihan Bahan PCM

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air keran dan ester minyak alami sebagai nukleasi yang dihasilkan dari esterifikasi minyak jagung. Ester minyak alami kemudian disebut sebagai ester minyak jagung. Ini mengandung metil ester sebagai komposisi kimia utamanya. Metil ester adalah ester kecil dengan rantai karbon tunggal. Ester kecil larut dalam air. Selain itu, kelarutan ester kecil dalam air seperti ester minyak jagung juga dapat dijelaskan bahwa molekul asam tertentu dari ester dalam larutan air yang memiliki gugus OH^- terionisasi dengan melepaskan atom hidrogen untuk membuat ion H^+ . Meskipun ester tidak dapat mengikat hidrogen dengan diri mereka sendiri tetapi ester dapat mengikat hidrogen dengan molekul air. Atom hidrogen positif individu dalam molekul air dapat tertarik ke salah satu pasangan tunggal pada salah satu atom oksigen dalam ester untuk membentuk ikatan hidrogen. Selain itu, ada juga gaya dispersi dan atraksi dipol-dipol antara ester dan molekul air yang melepaskan energi. Ini membantu untuk memasok energi yang diperlukan untuk memisahkan molekul molekul air dan ester dari yang lain sebelum mereka dapat bercampur. Ini jelas menjelaskan mengapa ester minyak jagung larut dalam air.

Ester minyak jagung dipilih sebagai agen nukleasi untuk tujuan memperoleh PCM biaya rendah yang dianggap sebagai salah satu faktor penting untuk skala aplikasi PCM. Saat ini, harga pasar ester asam lemak relatif tinggi. Hal ini karena biaya produksi ester asam lemak lebih tinggi daripada ester minyak jagung karena jalur produksi ester asam lemak termasuk proses pemurnian. Sedangkan ester minyak jagung dapat digunakan tanpa pemurnian lebih lanjut.

Larutan Corn-oil ester di dalam air sebagai bahan PCM Cold Storage

Menetapkan konservasi energi pada suhu di bawah $0\text{ }^\circ\text{C}$ melalui implementasi Phase Change Materials (PCM), dua jenis zat dapat dicampur dalam proporsi eutektik mereka untuk mencapai suhu eutektik terendah, yaitu suhu perubahan fasa. Dalam penelitian ini, untuk mengurangi suhu perubahan fasa air murni, ester minyak jagung diaplikasikan sebagai fase terdispersi dan air keran sebagai fase berkelanjutan dari larutan. Larutan disiapkan pada konsentrasi yang berbeda (volume%) dari ester minyak jagung dalam air, yaitu: 15%, 20% dan 25%. Konsentrasi lain seperti

5%, 7,5%, dan 10% juga telah diteliti untuk aplikasi pendinginan suhu sedang tetapi mereka tidak termasuk dalam makalah ini. Untuk tujuan pengujian, volume setiap sampel PCM disiapkan untuk 10 ml dan dimasukkan ke dalam tabung gelas.

Komposisi kimia ester minyak jagung secara individual diuji dengan Gas Chromatography Mass Spectrometry (GCMS). Metode pengujian terdiri dari analisis ester minyak jagung yang dilakukan pada GC-MS Shimadzu tipe QP 2010 dengan split/split injector yang lebih sedikit. Pemisahan dicapai menggunakan kolom kapiler Agilent J% W DB-1 (30 mx 0,25 mm ID). Helium digunakan sebagai gas pembawa dengan tekanan awal 12,0 kPa, kecepatan linier konstan 26,6 cm/detik, aliran kolom: 0,54 mL/menit dan rasio split 1: 21,2. Suhu injektor adalah 300 °C. Suhu oven diprogram pada 50 °C dengan tahan selama 10 menit dan dinaikkan menjadi 280 °C pada kecepatan 5 °C/menit dan tahan pada suhu akhir selama 49 menit. Parameter MS: sampel dianalisis dalam mode full scan dengan kecepatan scan 2.000 unit massa atom (amu)/detik dan rentang massa 28-610 m/z; antarmuka dan temperatur sumber ion masing-masing 250 °C dan 305 °C. Puncak ester minyak jagung MS diidentifikasi dengan membandingkan waktu retensi mereka dengan NIST62 dan WILEY229 perpustakaan.

Hasil tes GCMS disajikan pada Tabel 5.1. Tabel ini menunjukkan bahwa ester minyak jagung tersusun terutama oleh metil ester 38,54%. Ester minyak juga mengandung benzena (17,45%), 1,3-sikloheksadiena (8,29%), beta-sesquiphellandrene (23,83%) dan lainnya sekitar 11,89%. Ester adalah molekul polar yang memiliki peran sangat penting pada kelarutan minyak jagung dalam air.

Tabel 5.1 Komposisi kimia dari corn-oil ester

Nama Komponen	Formula	Kandungan (%)
3-Isopropoxy-1,1,1,7,7,7-hexamethyl-3,5,5-tris (trimethylsiloxy)	C ₁₈ H ₅₂ O ₇ Si ₇	0.61
Benzene, 1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)	C ₁₅ H ₂₂	17.45
1,3-Cyclohexadiene, 5-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)	C ₁₅ H ₂₄	8.29
Copaene	C ₁₅ H ₂₄	0.28
8-Nonenoic acid, 5,7-Dimethylene-, methyl ester	C ₁₂ H ₁₈ O ₂	0.50
Cyclohexene, 1-methyl-4-(5-methyl-1-methylene-4-hexenyl)	C ₁₅ H ₂₄	8.45
Dodecanoic acid, methyl ester	C ₁₃ H ₂₆ O ₂	10.92
Beta-sesquiphellandrene	C ₁₅ H ₂₄	23.83
Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	13.28
3-Butoxy-1,1,1,7,7,7-hexamethyl-3,5,5-tris (trimethylsiloxy)	C ₁₉ H ₅₄ O ₇ Si ₇	0.68
Dodecanoic acid, (2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-yl) methyl ester	C ₁₈ H ₃₄ O ₄	
Hexadecanoic acid, (2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-yl) methyl ester	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	2.95
2-Heptadecanone, 1- (2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-yl) methoxy	C ₂₃ H ₄₄ O ₄	
Anodendroside G, monoacetate	C ₃₂ H ₄₂ O ₁₁	0.48

Nama Komponen	Formula	Kandungan (%)
9-Octadecenoic acid (Z), methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	
7-Hexadecenoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	6.21
9-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	
Cyclopropanebutanoic acid	C ₂₅ H ₄₂ O ₂	1.38
Oxiraneoctanoic acid, 3-octyl, methyl ester, trans	C ₁₉ H ₃₆ O ₃	
Heptasiloxane, hexadecamethyl ester	C ₁₆ H ₄₈ O ₆ Si ₇	1.63
Octadecanoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	1.99
Heptasiloxane, hexadecamethyl ester	C ₁₆ H ₄₈ O ₆ Si ₇	1.06

DSC and T-history thermal analyses

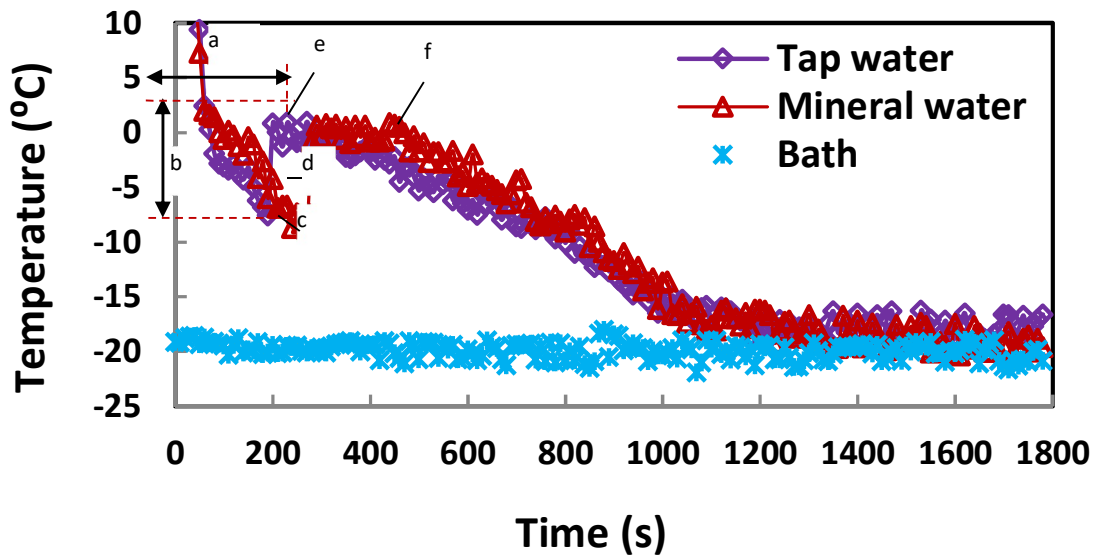
Sifat termal dari kandidat PCM (dari ester minyak jagung dalam campuran air) diukur dengan kalorimeter pemindaian diferensial (Perkin Elmer Jade DSC). Sifat-sifat termasuk meleleh dan suhu beku dan panas laten leleh dan beku. Analisis dilakukan pada suhu antara 25 °C dan -100 °C untuk pendinginan dan dari -100 °C hingga 25 °C untuk pemanasan pada 2 °C per menit pendinginan dan laju pemanasan. Analisis juga dilakukan di bawah aliran gas nitrogen konstan pada laju aliran 20 mL per menit. Akurasi suhu adalah ± 0,01 °C dan pengulangan aliran panas adalah 0,2 μW. Sampel 30 mg kandidat PCM disegel dalam panci aluminium. Titik leleh dan kristalisasi diambil sebagai suhu awal. Panas laten kandidat PCM ditentukan oleh integrasi numerik dari daerah transisi panas puncak.

Analisa Super-cooling

Super-cooling terjadi ketika suhu cairan diturunkan di bawah titik beku tanpa menjadi padat. Gambar 5.1 menunjukkan bahwa air keran dan air mineral didinginkan hingga mencapai -7,5 °C dan -8,5 °C masing-masing sebelum proses pembentukan es dimulai. Proses kristalisasi es melibatkan kombinasi nukleasi dan pertumbuhan kristal es dalam struktur kristal. Transformasi air menjadi kristal membutuhkan nukleus sebagai pemicu kristalisasi. Diperlukan penggabungan molekul yang tepat dalam ukuran yang cukup untuk menyediakan inti bagi pertumbuhan kristal. Pembentukan kristal es terjadi setelah nukleasi, di mana molekul air bergabung dengan inti yang sudah terbentuk.

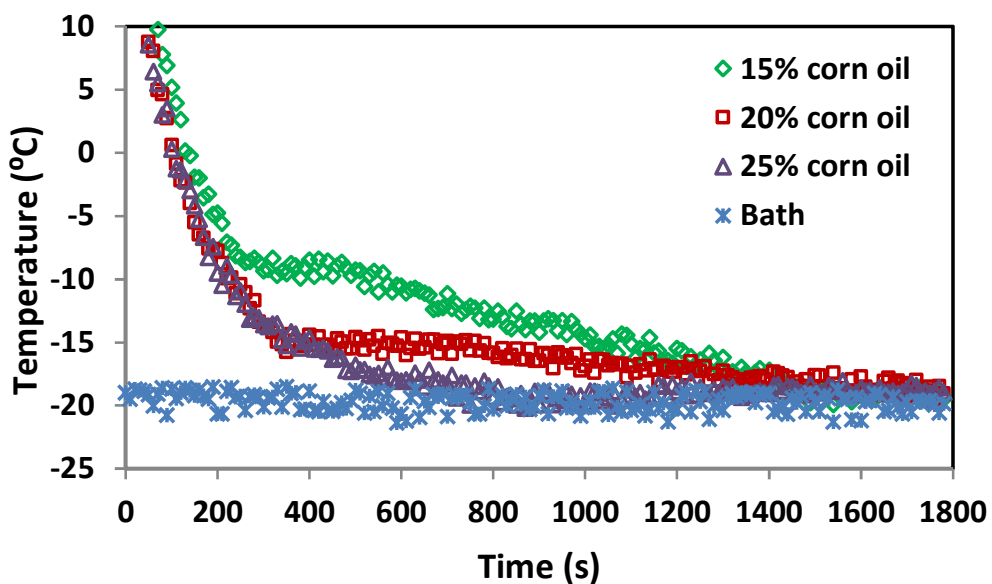
Gambar 5.2 menunjukkan bahwa kandidat PCM dengan konsentrasi ester minyak jagung yang berbeda dapat memulai pembentukan inti es dengan cepat pada suhu yang agak lebih tinggi daripada titik beku larutan yang mendekati. Penambahan 15%, 20% dan 25% ester jagung-minyak pada kandidat PCM dapat menurunkan titik beku air keran sampai -10 °C, -15 °C dan -19,5 °C masing-masing. Mereka juga dapat mengurangi tingkat pendinginan super hingga 0,75 K, 0,4 K

dan 0 K masing-masing. Molekul air, yang bergabung dengan inti yang terbentuk dalam larutan, meningkatkan laju pertumbuhan kristal sampai pada keadaan stabil dari larutan. Keadaan stabil dari solusi tercapai ketika tidak ada lagi kristal yang terbentuk. Penambahan ester minyak jagung sebagai partikel terlarut ke dalam air keran sebagai pelarut menghasilkan beberapa ion yang berkontribusi terhadap gaya antarmolekul antara partikel pelarut dan zat terlarut.



a. Ice nucleation delay, b. Super-cooling degree, c. Ice nuclei, d. Growth ice crystal, e. Initial formation of solid ice layer, f. Complete formation of solid ice layer

Gambar 5.1 Temperatur dari sampel pada pengujian T-history



Gambar 5.2 Proses pendinginan 15%; 20%; and 25% larutan corn-oil ester di dalam air

Selama proses pendinginan, gaya tarik antara partikel pelarut dan zat terlarut melepaskan lebih banyak panas sehingga titik beku larutan diturunkan. Oleh karena itu, solusi ester minyak jagung mampu mengurangi atau bahkan menghilangkan pendinginan super karena: (i) nukleasi lebih cepat dan (ii) titik beku lebih rendah. Peran larutan ester minyak jagung, oleh karena itu, mampu menghilangkan dan mengurangi titik beku dalam batas tertentu sesuai dengan konsentrasi larutan, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.2.

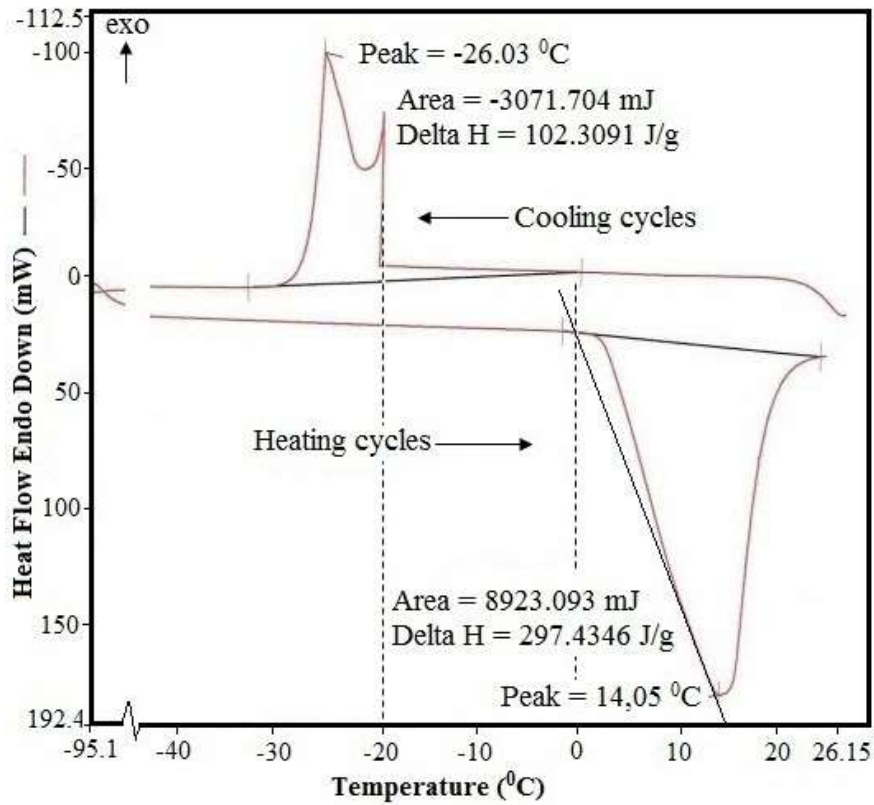
Tabel 5.2 Properti thermal dari PCM hasil uji DSC

Samples (Vol. %)	DSC			
	Heating process		Cooling process	
	Melting temp. (T_m , °C)	Latent heat of melting (ΔH_m , J/g)	Freezing temp. (T_f , °C)	Latent heat of freezing (ΔH_f , J/g)
Tap water	0	297.4346	-19.5	-102.3901
Mineral water	-	-	-	-
15/85 (O/W)	-10.5	124.9906	-27	-113.1630
20/80 (O/W)	-15	107.3320	-33	-109.7693
25/75 (O/W)	-20	85.0207	-36	-91.7049

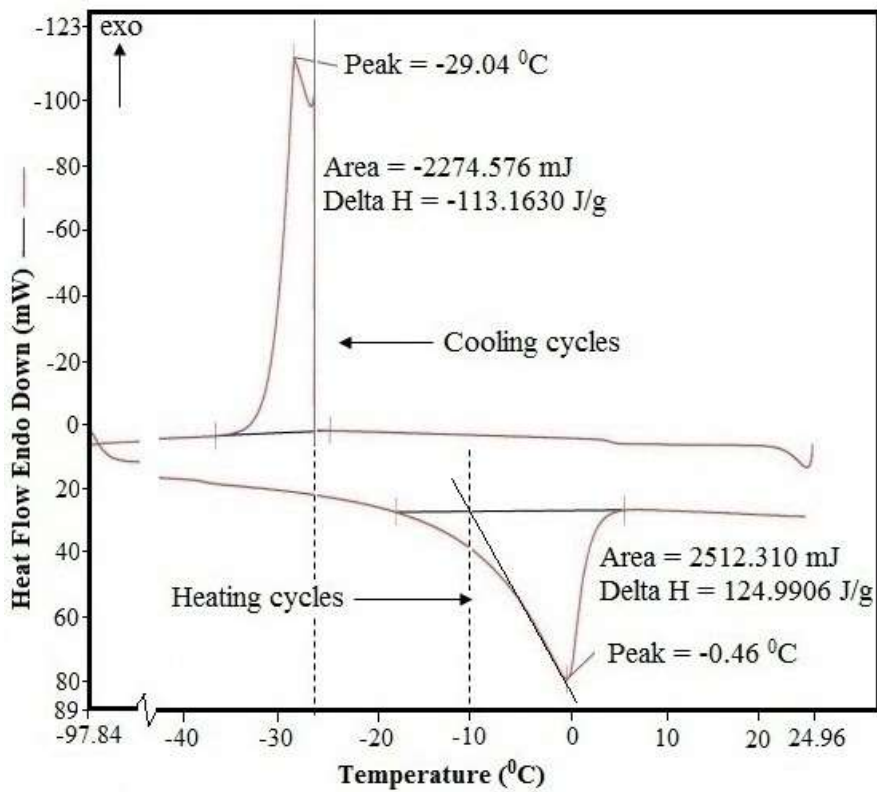
O/W = Corn-oil ester in water

Thermal properti dari PCM

Untuk membandingkan sifat termal dan fenomena dalam proses peleburan dan pembekuan kandidat PCM, kurva DSC untuk proses peleburan dan pembekuan air keran juga disajikan dalam makalah ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3. Gambar menunjukkan bahwa ada tingkat pendinginan super, seperti yang ditunjukkan oleh dua puncak eksotermik yang intens selama siklus pendinginan. Suhu leleh dan beku dari air keran yang dihasilkan dari DSC adalah 0 °C dan -19,5 °C, dan panas laten leleh dan pembekuan masing-masing adalah 297,4 J/g dan 102,4 J/g. Perlu dicatat bahwa, berapa pun ukuran sampel, es mencair pada 0 °C. Sebaliknya, pembekuan terjadi pada temperatur yang berbeda, tergantung pada ukuran sampel air [36]. Dari teori nukleasi, telah ditunjukkan bahwa semakin kecil volumenya, semakin rendah suhu pembekuan. Untuk air curah, pembekuan terjadi pada -14 °C untuk volume 1 cm³ dan sekitar -24 °C untuk volume 1 mm³, sedangkan untuk tetesan mikro berukuran (1 μm³) pembekuan ditemukan sekitar -39 °C. Energi yang dilepaskan selama proses pembekuan dibuktikan pada hasil DSC sebagai puncak eksotermik dengan bentuk lonceng yang tidak sempurna bila dibandingkan dengan proses peleburan.



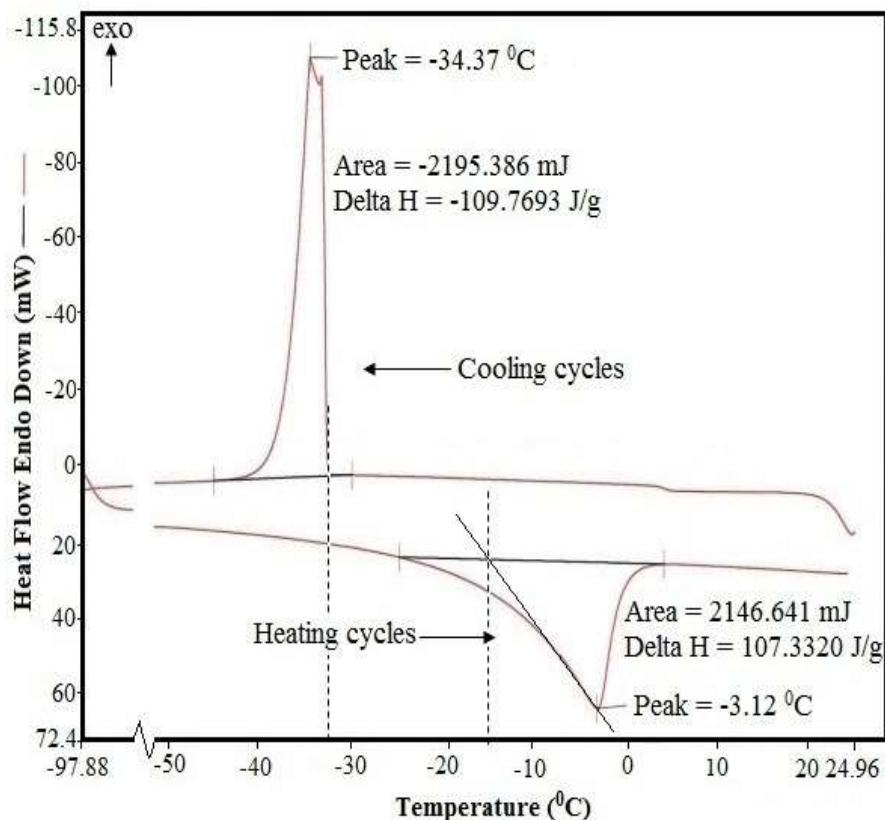
Gambar 5.3 Hasil uji DSC dari air keran



Gambar 5.4 Hasil uji DSC PCM dengan campuran 15% corn-oil ester di dalam air

Perbedaan suhu antara dua puncak eksotermik selama siklus pendinginan mungkin berkorelasi dengan jumlah derajat pendinginan super yang tergantung pada kondisi permukaan, laju pendinginan, volume cairan dan agen nukleat. Dalam fenomena peleburan tidak ada penundaan, semua air mencair pada suhu yang sama, yaitu 0 °C, yang merupakan suhu ekuilibrium termodinamika antara es dan air.

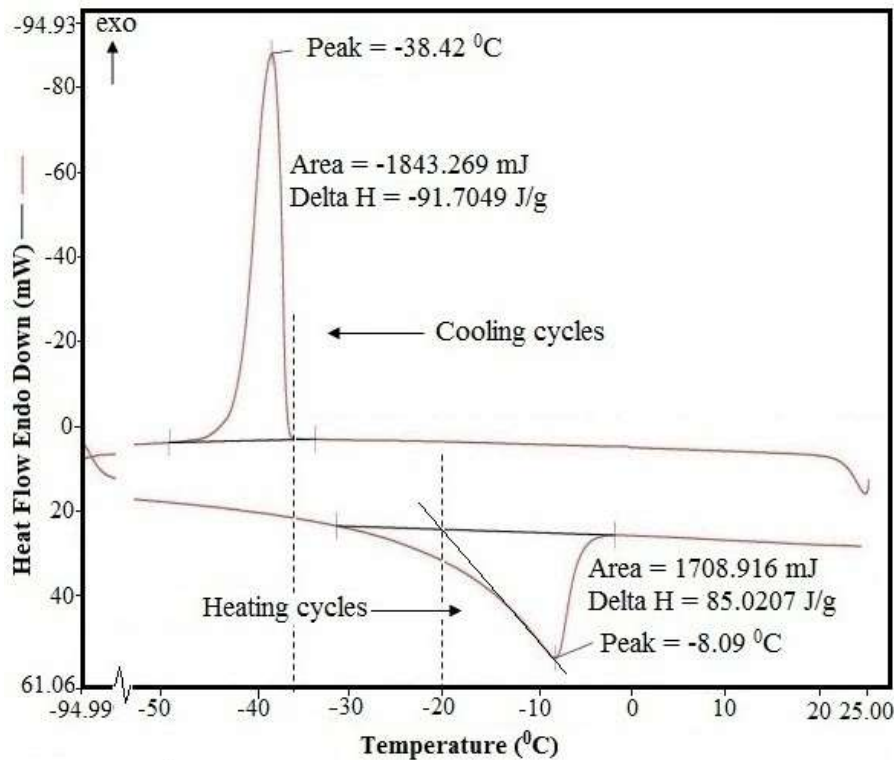
Sifat termal kandidat PCM yang mengandung air keran dan berbagai komposisi ester minyak jagung dapat dilihat dalam Gambar 5.6. Gambar 5.4 menunjukkan sifat termal dari calon PCM dengan 15% ester minyak jagung. Dari angka itu dapat dilihat bahwa penambahan 15% ester minyak jagung ke dalam air keran masih menunjukkan terjadinya pendinginan super. Meningkatkan konsentrasi ester minyak jagung hingga 20% (Gambar 5.6) menyebabkan tingkat pendinginan super dari solusi PCM menurun. Derajat pendinginan super benar-benar hilang karena konsentrasi ester minyak jagung mencapai 25%. Ini ditunjukkan oleh bentuk lonceng yang sempurna yang ditunjukkan pada Gambar 5.6.



Gambar 5.5 Hasil uji DSC PCM dengan campuran 20% corn-oil ester di dalam air

Hasilnya juga menunjukkan bahwa proses kristalisasi yang lengkap, yang dapat dilihat dalam Gambar 5.3-5.6, sangat cepat karena hanya dengan satu inti dapat memulai solidifikasi dan

nukleasi secara bersamaan terjadi. Oleh karena itu, sejumlah besar energi dilepaskan dalam waktu yang sangat singkat, dan itulah alasan mengapa bagian pertama dari puncak pembekuan eksotermik begitu tajam. Suhu beku bervariasi dari satu sampel ke sampel lainnya, karena nukleasi adalah fenomena stokastik.



Gambar 5.6 Hasil uji DSC PCM dengan campuran 25% corn-oil ester di dalam air

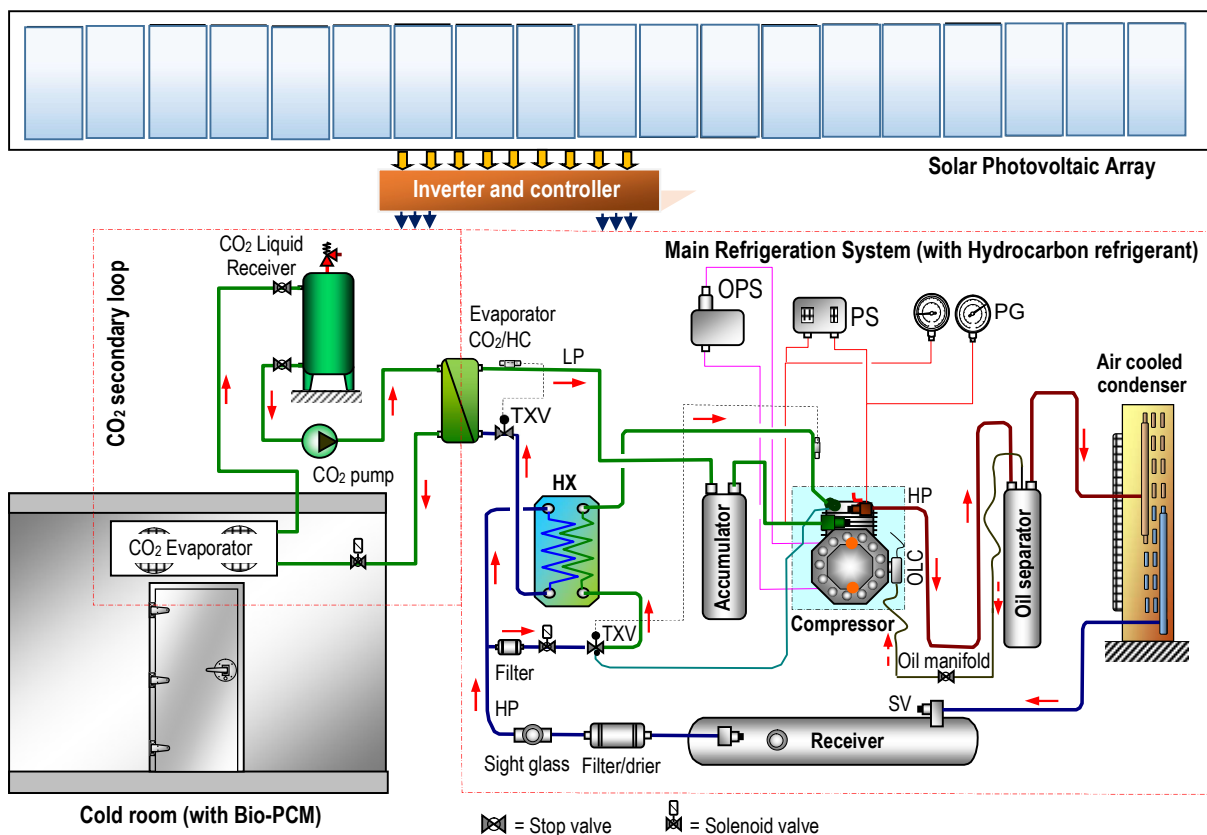
Hasil metode uji DSC dan T-history juga dirangkum dalam Tabel 5.2. Tabel tersebut dengan jelas menunjukkan bahwa suhu leleh calon PCM lebih rendah daripada suhu keran dan air mineral. Tabel 5.2 juga menunjukkan suhu pembekuan air yang diperoleh dari T-history adalah 0 °C. Suhu leleh dan beku ester minyak jagung dalam larutan air konsentrasi 15%, 20% dan 25% (berdasarkan volume) berkisar dari -10 °C hingga -20 °C. Sedangkan panas laten leleh dan beku bervariasi dari 85-125 J/g hingga 92-113 J/g masing-masing. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan meningkatkan konsentrasi ester minyak jagung dalam larutan air dapat mengurangi suhu leleh dan meminimalkan atau bahkan meniadakan pendinginan super. Sifat-sifat ini membuat solusi potensial menjadi PCM dengan panas laten yang besar dan suhu fase perubahan yang sesuai untuk aplikasi pendinginan suhu rendah.

Tabel 5.2 Thermal property dari PCM

Samples (Vol. %)	T-history	
	Cooling process	
	Freezing temp.(T_f , °C)	Super-cooling degree (K)
Tap water	0	7.5
Mineral water	0	8.5
15/85 (O/W)	-9.5	0.75
20/80 (O/W)	-15	0.4
25/75 (O/W)	-19.5	0

5.2 Perancangan dan Pengembangan Model Cold Storage Tenaga Surya

Teknologi yang diusulkan menggabungkan keunggulan teknologi refrigerasi yang hemat energi (*energy efficient refrigeration technology*), teknologi energi terbarukan (*renewable energy technology*) dan teknologi energi berkelanjutan (*sustainable energy technology*). Sistem refrigerasi dari *cold storage* menggunakan dua jenis refrigeran yaitu hidrokarbon (R-290) dan CO₂ (R-744) yang terdiri dari sistem pendinginan utama dengan R-290 sebagai refrigeran utama dan sistem pendinginan sekunder dengan refrigeran R-744.



Gambar 5.7 Skematik sistem *cold storage* tenaga surya dengan refrigeran R-290 dan R-744 dan *cool room* yang terintegrasi dengan bio-PCM

Evaporator dari sistem refrigerasi utama mendinginkan refrigeran sekunder R-744 yang disirkulasikan ke *cold room* dari sistem *cold storage* menggunakan pompa CO₂. R-744 cair menyerap panas dalam evaporator (*flooded CO₂ evaporator*), kemudian kembali ke sistem refrigerasi utama.

5.3 Pembuatan draft Paten dan Publikasi Ilmiah

Pada awal tahun ke 1 kegiatan lebih difokuskan pada penyelesaian pengumpulan *data dan informasi melalui survei dan penelusuran literatur yang mencakup*: ketersediaan infrastruktur *refrigerated storage* pada bidang pangan dan perikanan, kondisi produksi perikanan nasional (kapasitas, kualitas, distribusi) di berbagai daerah di Indonesia, potensi perikanan, kebijakan pengembangannya di masa yang akan datang, aplikasi teknologi tenaga surya, alternatif bahan-bahan lokal sebagai bahan bio-PCM. Juga pengembangan model numerik, simulasi dan desain meliputi: mengembangkan model numerik dari teknologi terintegrasi yang diusulkan; melakukan simulasi numerik tentang kinerja energi dan membuat rancangan atau desain teknologi yang diusulkan. Sebagian kegiatan pengadaan bahan untuk bio-PCM, *cool room*, dan komponen sistem refrigerasi juga akan dilakukan pada tahun-1.

Pada tahun ke 1 ini juga sudah dipersiapkan 2 artikel ilmiah pada sebuah seminar internasional yaitu “*ICOMERA - International Conference on Mechanical Engineering Research and Applications*”, Unibraw, Malang, Oktober 2018 atau *ICAST - Internasiotinal Conference on Applied Science Technology*”, Manado, Oktober 2018.” dan satu artikel untuk jurnal nasional terakreditasi. Artikel yang dimaksud disajikan pada **Lampiran**.

Satu draft paten sedang dipersiapkan yang berkenaan dengan alternatif bahan-bahan lokal sebagai bahan bio-PCM untuk aplikasi temperature cold storage.

BAB 6. RENCANA TAHAPAN BERIKUTNYA

Rencana produk unggulan yang akan dihasilkan melalui penelitian ini sebagai kontribusi kebaruan dalam pengembangan keilmuan dan penerapannya untuk meningkatkan ekonomi masyarakat:

- (i) Sebuah material kekayaan hayati *Phase Change Material* (bio-PCM) untuk aplikasi refrigerasi temperatur rendah: -20°C s.d. -26°C . Material ini dapat dimanfaatkan lebih luas untuk konservasi energi pada industri pengguna *low temperature refrigerated storage*.
- (ii) Sebuah prototipe *cold storage* tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM. Dengan kebaruan teknologi konservasi energi yang mengintegrasikan keunggulan teknologi refrigerasi yang efisien energi dan ramah lingkungan dengan refrigeran R-290 dan R-744 (*energy efficient refrigeration technology*), teknologi energi terbarukan dengan tenaga surya (*renewable energy technology*) dan teknologi keberlanjutan dengan bio-PCM (*Sustainable energy technology*). Teknologi ini kalau diterapkan lebih luas dapat membantu meningkatkan ekonomi masyarakat yang membutuhkan akses teknologi penyimpanan pangan dingin (*refrigerated food storage*) seperti nelayan, petani tambak; terutama di daerah atau pulau dengan infrastruktur dan suplai listrik yang terbatas. Untuk daerah atau pulau yang sudah mendapatkan suplai listrik memadai, teknologi *cold storage* ini dapat menjadi sistem yang sangat andal dengan mode operasi *hybrid cold storage* yang bisa dioperasikan dengan tenaga surya maupun dengan suplai listrik dari PLN pada malam harinya.
- (iii) Sebuah paten tentang teknologi *cold storage* tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM.

Untuk dapat mencapai target produk unggulan keseluruhan dari penelitian ini maka rangkaian penelitian pada tahun 1 dan diteruskan pada tahun 2 dan 3 sangat perlu untuk dilanjutkan:

Rangkaian kegiatan penelitian pada tahun ke 1 sebagian besar sudah dapat diselesaikan secara umum dan masih perlu penyelesaian draft paten yang akan diteruskan pada kegiatan tahun-2 untuk disubmit sebagai usulan paten sederhana.

Penelitian perlu dilanjutkan pada pelaksanaan Penelitian Tahun-2: Kegiatan penelitian terdiri dari dua kegiatan utama yaitu:

- (i) *Membuat cool room dan sistem refrigerasi sekunder R-744*: kegiatan mencakup pembuatan pondasi, dinding panel, atap serta pintu dan akses pipa dan kabel; kerangka pemasangan bio-PCM, dudukan produk, tempat produk; dan pembuatan sistem refrigerasi dengan refrigeran sekunder R-744 dan *flooded evaporator* di dalam *cool room*.
- (ii) *Membuat sistem refrigerasi primer (refrigeran R-290)*: mencakup identifikasi dan pengadaan komponen, perakitan sistem dan integrasi dengan sistem refrigerasi sekunder R-744.

Sebagian kegiatan pengadaan bahan untuk solar PV dan komponen instrumentasi juga akan dilakukan pada tahun-2. Untuk publikasi dan pelaporan, akan diselesaikan publikasi artikel-1 untuk jurnal internasional, artikel untuk jurnal nasional dan seminar internasional dan draft artikel baru untuk jurnal internasional. Draft paten mulai dipersiapkan, juga laporan tahun-2.

Adapun Indikator Capaian Penelitian Tahun-2: Sistem refrigerasi primer dan sekunder serta *cool room* dari prototipe sistem *cold storage*; artikel ilmiah pada jurnal nasional tak terakreditasi-2, jurnal internasional publish-1 dan draft-2, seminar internasional-2; draft paten; dan laporan kemajuan serta laporan akhir kegiatan penelitian Tahun-2.

Pada tahun ke 3 Kegiatan penelitian terdiri dari dua kegiatan utama yaitu:

- (i) *Membuat sistem solar PV, kontrol dan instrumentasi serta pengujian*: mencakup pembuatan sistem solar PV dan integrasinya dengan sistem refrigerasi dari *cold storage*; instalasi sistem instrumentasi dan kontrol; pengujian prototipe seperti yang dijelaskan pada sub-Bab 3.1;
- (ii) *Validasi model dan melakukan kajian komparatif dan komprehensif*: mencakup validasi model numerik; melakukan kajian komparatif kinerja energi, dampak lingkungan dan analisis ekonomis; melakukan kajian yang komprehensif pengaruh teknologi *cold storage* terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional.

Untuk publikasi dan pelaporan, akan diselesaikan pengusulan paten dan publikasi artikel-2 untuk jurnal internasional serta akan dibuat lagi artikel untuk jurnal nasional dan seminar internasional. Juga akan dipersiapkan laporan kemajuan dan laporan akhir tahun-3. Indikator Capaian Penelitian Tahun-3: Sebuah prototipe penerapan Teknologi Cold storage R-290/R744 tenaga surya terintegrasi dengan bio-PCM; sebuah paten; sebuah kajian komparatif keunggulan Cold storage tenaga surya; sebuah kajian yang komprehensif pengaruh teknologi *cold storage* tenaga surya terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional; artikel ilmiah pada jurnal nasional tak terakreditasi-3, jurnal internasional publish-2 dan artikel ilmiah seminar internasional-3; dan laporan kemajuan serta laporan akhir kegiatan penelitian Tahun-3.

BAB 7 KESIMPULAN DAN SARAN

7.1 Kesimpulan

Sampai Agustus 2018, kegiatan penelitian yang direncanakan pada tahun 1 sudah dapat diselesaikan seluruhnya yaitu 100% dari target kegiatan penelitian pada tahun ke 1. Hasil capaian kegiatan penelitian pada tahun 1 diuraikan pada Tabel 7.1.

Table 7.1: Luaran yang direncanakan dan capaian tahun 2018

No	Luaran yang Direncanakan tahun 1	Capaian Tahun 1 (2018)
1	Kajian bahan PCM natural untuk aplikasi cold storage	Kajian sudah dilakukan baik melalui DSC maupun T-history test.
2	Model numerik dan rancangan Cold Storage tenaga surya	Model dan rancangan sudah dipersiapkan
3	Artikel untuk publikasi ilmiah	Dua buah manuscript untuk publikasi pada “ <i>ICOMERA - International Conference on Mechanical Engineering Research and Applications</i> ”, Unibraw, Malang, Oktober 2018 atau <i>ICAST - Internasiotinal Conference on Applied Science Technology</i> ”, Manado, Oktober 2018 sudah dipresentasikan
		Satu buah manuscript untuk publikasi pada Journal nasional Matrix sudah submit
4	Draft Paten Sederhana	Sedang dipersiapkan dan dilanjutkan ke tahun 2
5	Laporan kemajuan dan akhir kegiatan tahun 1	Laporan kemajuan dan laporan akhir tahun untuk tahun 1 sudah dibuat

7.2 Saran

Perlu ditegaskan sistem administrasi keuangan dalam pelaksanaan penelitian sehingga dapat meringankan tugas-tugas penelitian yang sifatnya menunjang tetapi jauh lebih fokus pada pencapaian output penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASHRAE Standard 72. 2005. *Method of Testing Commercial Refrigerators and Freezers*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1791 Tullie Circle NE, Atlanta. 22 pp.
2. Basu, D.N., and A. Ganguly, A. 2016. Solar thermal–photovoltaic powered potato cold storage – Conceptual design and performance analyzes. *Applied Energy*. 165: 308-317
3. BS EN 378-1 Standard. 2012. Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements, Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria. 68 pp.
4. BS EN ISO 23953-2 Standard (2012). Refrigerated display cabinets, Part 2: Classification, requirements and test conditions. 96 pp.
5. Coulomb, D. 2008. Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. *Trends in Food Science & Technology*. 29: 413-417
6. Emerson Climate Technologies. 2014. *Cold storage warehouse improves efficiency with ammonia/pumped CO₂ system*. Available at: http://www.emersonclimate.com/Documents/Vilter/Product_Brochures/Cold-Storage-2013VM-15-R1-C.pdf
7. Evans, J.A., and Gigiél, A. 2010. Reducing energy consumption in cold storage rooms. *Proc. 1st IIR International cold chain conference, Sustainability and the Cold Chain*. Cambridge, UK: 9 pp.
8. FAO. 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all*. Rome. 200 pp.
9. IARW. 2016. *Global cold storage capacity report: Capacity and growth of refrigerated warehousing by country*. International Association of Refrigerated Warehouses.
10. IIR. 2009. The role of refrigeration in worldwide nutrition - 5th Informatory note on refrigeration and food. Paris. *International Institute of Refrigeration (IIR)*.
11. KepMen KP No. 52A. 2013. Keputusan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia Nomor 52A/Kepmen-KP/2013 Tentang Persyaratan Jaminan Mutu dan Keamanan Hasil Perikanan pada Proses Produksi, Pengolahan dan Distribusi. 30 pp.
12. Kozak, Y., Farid, M., Ziskind, G. 2016. Experimental and comprehensive theoretical study of cold storage packages containing PCM. *Applied Thermal Engineering*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.127>
13. Miller, J. 2016. Top Markets Report Cold Chain, International Trade Administration. Available at: http://trade.gov/topmarkets/pdf/Cold_Chain_Executive_Summary.pdf
14. MMAF-RI. 2016. Capture and aquaculture production 2012-2016. Ministry of Marine Affairs and Fisheries Republic of Indonesia. Available at: <http://statistik.kkp.go.id/sidatik-dev/2.php?x=2>
15. Opara, L.U., Al-Jufaili, S.M. and Rahman, M.S. 2007. Postharvest handling and preservation of fresh fish and seafood. In: *Handbook of Food Preservation*, Rahman, M. S. ed. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 151-202
16. Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Martin, V., Cabeza, L.F. 2014. Energy management and CO₂ mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport, *International Journal of Refrigeration*. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.03.002.
17. Perpres No. 3. 2016. Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 3 tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional. 40 pp.

18. Putri, I.M., and Munaf, D.R. 2013. Increasing fishery economic added value through post fishing program: Cold storage program, *International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*. 7(8): 2391-2394
19. Rumbayan, M., Abudureyimu, A., Nagasaka, K. 2012. Mapping of solar energy potential in Indonesia using artificial neural network and geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16: 1437-1449.
20. Suamir, IN., Tassou, S.A., Arrowsmith, P., Bushell, M. 2012a. Performance of integral hydrocarbon cabinets for supermarket applications. *Proc. 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants*. Delft. The Netherlands. 8 pp.
21. Suamir, IN., Tassou, S.A., Marriott, D. 2012b. Integration of CO₂ refrigeration and trigeneration systems for energy and GHG emission savings in supermarkets. *International Journal of Refrigeration*. 35 (2): 407-417.
22. Sugiyono, A., Anindhita, Boedoyo, M.S., Adiarso. 2014. *Indonesia Energy Outlook 2014*. Center for Energy Resources Development Technology. Agency for the Assessment and Application of Technology. 117 pp
23. Tassou, S.A., Lewis, J.S., Ge, Y.T., Hadawey, A., Chaer, I. 2009. A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*. 30: 263-276.
24. UU no. 18. 2012. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2012 tentang Pangan. 83 pp.
25. Veldhuis, A.J., and Reinders, A.H.M.E. 2015. Reviewing the potential and cost-effectiveness of off-grid PV systems in Indonesia on a provincial level. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 52: 757-769
26. Wang, X., and Dennis, M. 2015. Influencing factors on the energy saving performance of battery storage and phase change cold storage in a PV cooling system. *Energy and Buildings*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.008>

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Lampiran utama

1. Dukungan sarana dan prasarana penelitian
2. Personalia tenaga peneliti
3. Artikel untuk Publikasi “*ICOMERA - International Conference on Mechanical Engineering Research and Applications*”, Unibraw, Malang, Oktober 2018.
4. Artikel untuk *ICAST - Internasiotinal Conference on Applied Science Technology*”, Manado, Oktober 2018.
5. Artikel jurnal nasional Matrix

Lampiran 1: DUKUNGAN SARANA DAN PRASARANA PENELITIAN

Kegiatan penelitian akan dilakukan di lab Refrigerasi Terapan Politeknik Negeri Bali. Ada 1 lab dan 1 workshop juga akan mendukung proyek penelitian ini. Tetapi lab refrigerasi pada saat ini baru tersedia peralatan yang menggunakan teknologi refrigerasi yang belum menerapkan teknologi energi terbarukan dan berkelanjutan. Peralatan yang ada saat ini hanya bisa digunakan sebagai studi perbandingan dengan teknologi yang sedang diteliti. Peralatan yang belum ada akan diadakan melalui proyek penelitian ini.

Adapun dukungan peralatan dari lab dan workshop yang akan dilibatkan dalam penelitian ini termasuk ketersediaan ruangan untuk peralatan baru dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Lab Refrigerasi Terapan

Kegiatan pada lab ini akan mencakup: investigasi system konvensional dengan teknologi saat ini untuk studi komparatif.



Sistem Cold room yang ada sekarang



Sistem multitrack



Condensing unit system cascade



Mesin-mesin es

2. Lab Instrumentasi dan Kontrol

Kegiatan pada lab ini akan mencakup: Instalasi sistem instrumentasi dan kontrol dari cold storage dengan tenaga surya dan diintegrasikan dengan bio-PCM.



Sistem control otomatis



Ruang perakitan instrumentasi dan kontrol

3. Workshop Mekanik

Kegiatan mencakup: Fabrikasi paket bio-PCM dan juga system racking dari produk pada saat pengujian. Termasuk pembuatan system support dari solar panel (PV panels).



Mesin-mesin produksi



Mesin-mesin produksi

4. Ketersediaan Ruang untuk peralatan baru yang akan diperlukan untuk penelitian dan mesin pengujian untuk T-history PCM



Ruang yang tersedia untuk pengembangan peralatan



Alat uji T-history PCM

5. Lab Refrigerasi sudah dilengkapi dengan system instrumentasi yang memadai, walaupun masih perlu dikembangkan. Beberapa instrument yang tersedia di lab diperoleh dari penelitian sebelumnya.



Three phase power analyser 4-wire



Ultrasonic Flowmeter



Data logging system (DataScan Logger)

Lampiran 2: SUSUNAN TIM PENELITI DAN PEMBAGIAN TUGAS

Susunan Tim Peneliti

Susunan organisasi tim peneliti dan pembagian tugas utama disajikan dalam table di bawah ini.

No	Nama / NIDN	Bidang Ilmu	Alokasi Waktu (J/M)	Uraian Tugas
1	I Nyoman Suamir, ST, MSc, PhD	RHVAC, BS, SE	12	Koordinator, survei, literature review, modeling, kajian analitik, kajian experimental, validasi model, pembuatan artikel, publikasi, usulan paten, pelaporan.
2	Sudirman, ST, MT	Teknik Mesin (Instrumentasi dan control)	8	Survei, instalasi, pengujian, mengolah data dan analisa, kajian dampak lingkungan
3	I Nengah Ardita, ST, MT	Konversi energi	8	Instalasi, pengujian, mengolah data dan analisa, editing artikel, pelaporan
4	Dr. Gede Santanu, SE, MM	Ilmu ekonomi dan administrasi bisnis	8	Survei ketersediaan infrastruktur refrigerated storage, harga, kajian ekonomis

J/M = Jam per minggu

Instansi asal Politeknik Negeri Bali: Jurusan Teknik Mesin dan Jurusan Administrasi Bisnis

Pembagian Tugas

Ketua Peneliti : I Nyoman Suamir, ST, MSc, PhD
NIDN : 0025036514
Bidang Ilmu : Teknik Mesin (Refrigerasi dan Konservasi Energi)
Alokasi Waktu : 12 (jam/minggu)

Deskripsi tugas:

- Merencanakan dan mengatur pelaksanaan kegiatan penelitian
- Membuat model numerik teknologi cold storage tenaga surya dengan refrigeran hidrokarbon dan CO₂
- Melakukan simulasi teknologi dengan menggunakan model numerik menurut kebutuhan perancangan sistem
- Melakukan kajian analitik integrasi sistem refrigerasi hidrocarbon dan CO₂ dan cold room dengan bio-PCM dan sistem penggerak tenaga surya
- Membuat rancangan sistem cold room dari cold storage tenaga surya
- Membuat rancangan sistem refrigerasi dari cold storage tenaga surya
- Membuat rancangan sistem solar panel (PV panel) dari cold storage tenaga surya
- Merencanakan pengadaan bahan dan peralatan
- Membuat cold room lengkap dengan sistem pemasangan bio-PCM
- Membuat sistem refrigerasi dengan tenaga surya
- Merencanakan sistem instrumentasi, monitoring dan kontrol
- Merencanakan pengujian menurut ASHRAE Standard 72 (2005)
- Melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya tanpa bio-PCM
- Melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya dengan bio-PCM
- Melakukan pengolahan data dan analisis hasil pengujian
- Memvalidasi model numerik
- Melakukan kajian konsumsi energi
- Melakukan kajian dampak lingkungan

- Membantu kajian ekonomis dari sistem cold storage tenaga surya
- Melakukan kajian pengaruh teknologi yang diusulkan terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional
- Melakukan analisis komparatif energi dan temperatur performansi antara teknologi yang diusulkan dengan sistem konvensional yang digunakan saat ini
- Menyusun artikel untuk publikasi
- Mempersiapkan usulan HKI material hayati bio-PCM untuk temperatur kerja -20°C s.d -26°C
- Mempersiapkan usulan paten
- Melakukan publikasi melalui jurnal dan konferensi internasional
- Mempersiapkan dan membuat laporan kegiatan penelitian

Anggota Peneliti (1) : Sudirman, ST, MT
 NIDN : 0013036704
 Bidang Ilmu : Instrumentasi dan kontrol
 Alokasi Waktu : 8 (jam/minggu)

Deskripsi tugas:

- Melakukan survei kapasitas produksi perikanan nasional dan berbagai daerah di Indonesia
- Melakukan survei cara penanganan ikan hasil tangkap nelayan pesisir
- Melakukan survei ketersediaan cold storage pada pelabuhan perikanan nasional
- Mengolah data dan melakukan analisis hasil survei sebagai informasi pengembangan teknologi yang diusulkan
- Membantu merencanakan pengadaan bahan dan peralatan
- Membantu membuat cold room lengkap dengan sistem pemasangan bio-PCM
- Membantu membuat sistem refrigerasi dengan tenaga surya
- Membantu melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya tanpa bio-PCM
- Membantu melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya dengan bio-PCM
- Membantu melakukan pengolahan data dan analisis hasil pengujian
- Membantu melakukan kajian pengaruh teknologi yang diusulkan terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional
- Membantu melakukan analisis komparatif energi dan temperatur performansi antara teknologi yang diusulkan dengan sistem konvensional yang digunakan saat ini
- Membantu menyusun artikel untuk publikasi
- Membantu mempersiapkan usulan HKI material hayati bio-PCM untuk temperatur kerja -20°C s.d -26°C
- Membantu mempersiapkan usulan paten
- Membantu mempersiapkan dan membuat laporan kegiatan penelitian

Anggota Peneliti (2) : I Nengah Ardita, ST, MT
 NIDN : 0030116406
 Bidang Ilmu : Teknik Pendingin dan Tata Udara
 Alokasi Waktu : 8 (jam/minggu)

Deskripsi tugas:

- Melakukan penelusuran calon-calon bahan lokal yang dapat digunakan sebagai bio-PCM
- Melakukan pengujian bahan bio-PCM: T-History, DSC dan GCMS ke laboratorium yang memiliki fasilitas tersebut
- Merancang sistem packing dan pemasangan bio-PCM pada cool room
- Merancang dan membuat dudukan solar panel
- Mempersiapkan spesimen sebagai produk yang didinginkan untuk pengujian cold storage dan sistem penempatannya menurut ASHRAE Standard 72 (2005)

- Membantu merencanakan pengadaan bahan dan peralatan
- Membantu membuat cold room lengkap dengan sistem pemasangan bio-PCM
- Membantu membuat sistem refrigerasi dengan tenaga surya
- Membantu melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya tanpa bio-PCM
- Membantu melakukan pengujian sistem cold storage tenaga surya dengan bio-PCM
- Membantu melakukan pengolahan data dan analisis hasil pengujian
- Membantu melakukan kajian pengaruh teknologi yang diusulkan terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional
- Membantu melakukan analisis komparatif energi dan temperatur performansi antara teknologi yang diusulkan dengan sistem konvensional yang digunakan saat ini
- Membantu menyusun artikel untuk publikasi
- Membantu mempersiapkan usulan HKI material hayati bio-PCM untuk temperatur kerja -20°C s.d -26°C
- Membantu mempersiapkan usulan paten
- Membantu mempersiapkan dan membuat laporan kegiatan penelitian

Anggota Peneliti (3) : Dr. Gede Santanu, SE, MM

NIDN : 0024076006

Bidang Ilmu : Ilmu Ekonomi dan Administrasi Bisnis

Alokasi Waktu : 8 (jam/minggu)

Deskripsi tugas:

- Membuat kajian ekonomis dari sistem cold storage tenaga surya
- Membantu melakukan survei kapasitas produksi perikanan nasional dan berbagai daerah di Indonesia
- Membantu melakukan survei cara penanganan ikan hasil tangkap nelayan pesisir
- Membantu melakukan survei ketersediaan cold storage pada pelabuhan perikanan nasional
- Membantu mengolah data dan melakukan analisis hasil survei sebagai informasi pengembangan teknologi yang diusulkan
- Membantu melakukan kajian pengaruh teknologi yang diusulkan terhadap kapasitas dan kualitas produksi perikanan nasional
- Membantu melakukan analisis komparatif energi dan temperatur performansi antara teknologi yang diusulkan dengan sistem konvensional yang digunakan saat ini
- Membantu menyusun artikel untuk publikasi

Lampiran 3: ARTIKEL UNTUK PUBLIKASI “ICOMERA - INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING RESEARCH AND APPLICATIONS”, UNIBRAW, MALANG, OKTOBER 2018.

(Artikel dapat dilihat pada halaman berikutnya)

Experimental Study on the Influences of Air Flow in an Integral Hydrocarbon Display Cabinet to its Temperature and Energy Performances

I N Suamir^{1,*}, M E Arsana¹, and K M Tsamos²

¹Mechanical Engineering Department, Bali State Polytechnic, Bali, 80364, Indonesia

²Energy Efficient and Sustainable Technologies, Institute of Energy Futures, Brunel University, London, UB8 3PH, UK

*Email: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstract. This paper presents results on temperature energy performance tests of an integral refrigerated hydrocarbon (HC) display cabinet for retail food applications. Heat from the condensing unit of the cabinet is rejected to both ambient air and water/glycol mixture flowing in a closed water circuit. Air flow in the cabinet loaded with M-packages as test products was studied in order to analyze effects of air flow rate in the cabinet to its temperature and energy performances. The product and air temperatures as well as energy consumption of the cabinet were measured. The tests were conducted in a test chamber at climate class 3. It was found that the HC display cabinet with integral condensing unit was found to provide excellent energy performance with an Energy Efficiency Index below the requirement to qualify for enhanced capital allowances. The refrigeration system of the cabinet could also achieve a COP of 3.15. The study also found that higher air flow rate in the cabinet could make the product temperatures a little bit better, but the energy consumption increased approximately 7% when air flow rate was increased from 1200 m³ h⁻¹ to 1800 m³ h⁻¹. Air flow distribution in the cabinet was necessary to be optimized in order to comply with M0 classification cabinet.

Introduction

Vertical refrigerated display cabinets are commonly used in retail food stores to ensure safety of the food products. These cabinets keep and display food for the customers at different levels of temperature within the retail stores. Various types of vertical refrigerated display cabinets can be found in retail stores including the stand-alone or centralized systems. Stand-alone units are self-contained refrigeration systems. For the centralized applications, the display cabinet evaporators in sales area are fed by the centralized refrigeration system which located in the machinery room. With regards to their opening, there are two types of vertical refrigerated display cabinets: open-type and door type. The open-type refrigerated display cabinets are widely used in retail stores to attract the costumers and increase the sales. The absence of any physical obstacle like a glass door between the customer and product display area is preferred for commercial reasons. The main advantage of the open type refrigerated display cabinets over the door type ones is to allow consumers free access to food [1].

Retail refrigeration systems using HFC refrigerants are responsible for substantial greenhouse gas emissions from leakage of refrigerant to the ambient and indirect emissions from the electrical power used by the compressors, fans and other ancillary equipment [2]. One way to significantly reduce or completely eliminate direct emission is through the use of natural refrigerants, such as hydrocarbons, CO₂ and ammonia [3]. Considerable research has been carried out on the development and application of retail refrigeration systems employing natural refrigerants. Most systems are either trans-critical booster CO₂ systems, cascade all CO₂ systems, or subcritical CO₂ systems cascaded with a hydrocarbon system on the high pressure side for heat rejection [4-6]. An interesting approach also developed and applied by some retail chains involves the use of integral or stand-alone hydrocarbon display cabinets with heat rejection to the air in the retail [7] and combination of heat rejection to the air and water in a closed loop system [8]. The heat in the water circuit

can be either upgraded through a boiler or heat pump and used for domestic hot water and/or space heating, or rejected to the ambient through a dry cooler. This approach can provide energy integration between the refrigeration and space conditioning systems in the store and offers the potential for energy savings if the system is appropriately designed and controlled.

Another way to reduce greenhouse gas emissions from retail refrigeration systems is by improving their energy efficiency. Sun *et al.* [9] reported the use of guiding strips at front face of the shelves of the open-type vertical refrigerated display cabinets could improve temperature performance and energy efficiency. Cooling capacity required to maintain the food product chilled decreased by 34%. Investigations on energy efficiency of retail cabinets have also been reported in [10,11,12]. They reported the amount of warm air entering open-type display cabinet was due the turbulence intensity, shape of the mean velocity profile at the discharge air grill and the Reynolds number. Furthermore, experimental results on energy performance of refrigerated display cabinets have been presented by [13,14]. They compared different patterns on the rear duct panel to improve the air distribution as well as to reduce heat extraction rate of the display cabinet. The authors reported optimum air distribution that could reduce heat extraction rate was achieved when 67% of the total air circulation to be delivered from the rear panel and the remaining 33% from the air curtain of the display cabinet.

This paper presents results of experimental investigations carried out for the development of a 3.81 meter low front open multi-deck chilled food display cabinet with 37% back flow ratio. The results indicated that regulating air flow rate could not make an open-type display cabinet comply with the M0 classification of product temperature range from -1°C to +4°C as described in BS EN ISO 23953-2 [15]. Further optimization on air flow distribution of the display cabinet would be required as discussed in [14].

Cabinet Description, Test Conditions and Methods

Cabinet Description

The cabinet tested was a vertical multi-deck display cabinet with compression type and built-in condensing units. The cabinet is a 3.81 m long low front cabinet originally designed for R-404A refrigerant. The height of the cabinet is 2.22 m and the depth 1.14 m. The cabinet has a Total Display Area (TDA) of 6.9 m². The evaporator coil and circulation fans are located in the rear flow tunnel. In the conversion to an integral Hydrocarbon (HC) system, the condensing units are located at the top of the cabinet. The cabinet uses hydrocarbon (HC) refrigerant, R1270. The refrigerant is flammable and carries an A3 safety classification [16,17] which limits the concentration of the refrigerant in an occupied space, in the event of leakage, to below its lower flammability limit. To minimize the refrigerant charge in each refrigeration circuit, the cabinet was designed with two completely independent condensing units and evaporator coils. Each circuit was charged with 0.72 kg R1270. This charge is within the safety limit specified by [16].

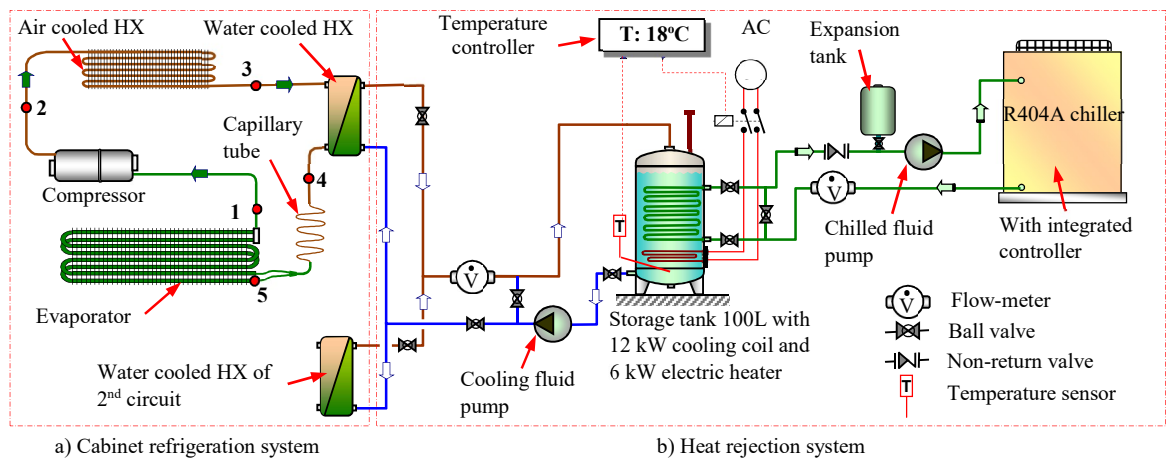


Figure 1. Schematic diagram of heat rejection system

The cabinet consists of 5 shelves and 1 base (bottom) deck for loading the test packages. Ticket-bars are attached in the front edge of the 5 shelves. The selves are also completed with acrylic-risers which seat on the gap between the front edge and the ticket-bars. Heat rejection from the condensing unit takes place through two heat exchangers, an air cooled heat exchanger rejecting heat to the ambient air for direct retail food store space heating, and water cooled heat

exchangers rejecting heat to water/glycol for centralized thermal energy management. A horizontal scroll compressor is used to keep the height of the condensing unit to the minimum. To facilitate testing and development in the laboratory, a water/glycol heat rejection system was developed which enables control of flow rate and temperature to the condensing units. A schematic diagram of the heat rejection system together with the refrigeration system of the cabinet is shown in Figure 1.

Test Conditions

The tests were carried out in a test room conforming to [15]. The test room walls and ceiling are thermally insulated and are equipped with inner metal skin. The useful dimensions of the test room can accommodate overall dimensions of the tested cabinet. The lighting in the test room was provided by fluorescent lights with lighting level in the range between 500 and 650 lux which complies with the standard of 600 ± 100 lux at a height of 1 meter above floor level. Ambient conditions in the test room were tightly controlled by a proportional-differential controller which modulates humidifier, heating system and the opening of three ways valve of the water chiller system. The ambient conditions were monitored by temperature and RH sensors linked to the measurement system. Mean horizontal air velocity (cross flow) was in the range between 0.1 and 0.2 $m s^{-1}$. The room conditions were set to Climate Class 3 with dry bulb temperature of 25°C and 60% RH as shown in Figure 2.

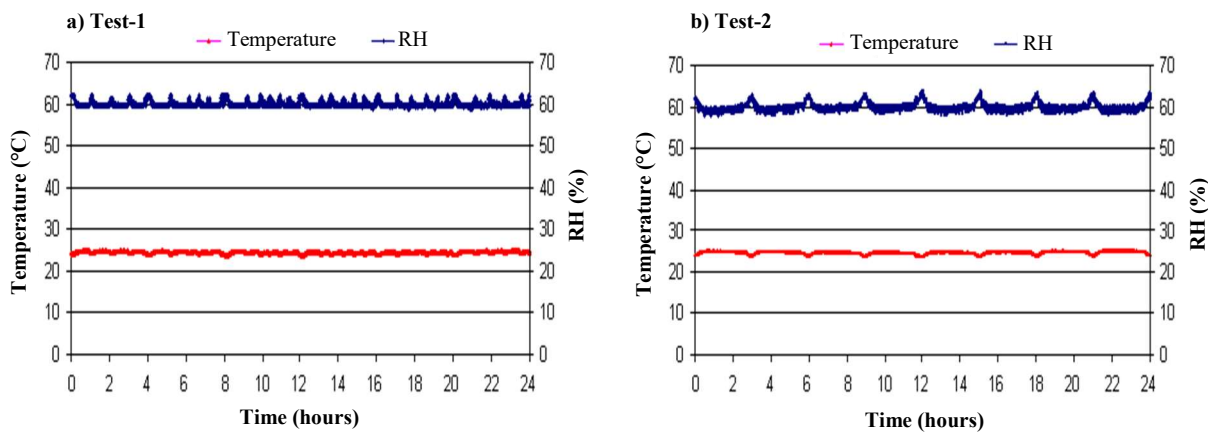


Figure 2. Room conditions (Temperature and RH) during the test

Methods

The tests were performed according to [15] which comprised two tests: (i) Test-1 Cabinet with lower air flow rate ($1200 m^3 h^{-1}$); (ii) Test-2 Cabinet with higher air flow rate ($1800 m^3 h^{-1}$). Air flow in the cabinet is shown in Figure 3. The tested display cabinet had a original back panel from manufacturer with perforated ratio 1.25% and could provide back flow ratio of 37%. The remaining 63% of air flow was for the air curtain.

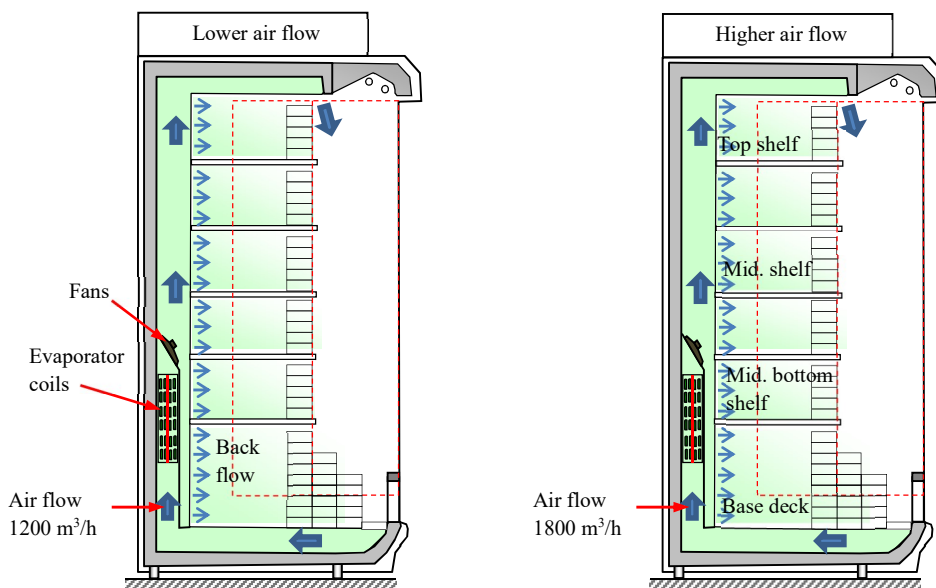


Figure 3. Air flow in the cabinet applied for the tests

In order to comply with the standard, two measurement systems were applied. The first one measured parameters of the refrigeration systems (pressure, temperature and mass flow rate of the cooling fluid), parameters of air, M-packages in the cabinet and parameters of the test room (temperature and RH). The measurement system consisted of some sensors which include temperature sensors with accuracy better than $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, pressure transducers (accuracy $\pm 1\%$), RH sensor (accuracy ± 3 unit), mass flow meter (accuracy $\pm 1\%$) and air velocity meter with accuracy 10%; data logging system (Labtech software and Datascan modules) and recording system (computer set and monitor). The second measurement system monitored and recorded power consumption of the cabinet which comprised a programmable power meter (HM8115-2 from Hameg Instrument; connected in series with the main supply). Temperature sensors (T type thermocouples) in the M-packages were placed on 4 shelves: top shelf, middle shelf, mid-bottom shelf and bottom deck as identified in Figure 3. The positions of the sensors were placed in accordance with [15].

All measurements were recorded every 10s. This interval provided possibilities to check all temperature measurements at every 60s, mass flow rate and pressure measurements at every 20s as specified in [15]. Recorded data from the measurement systems were processed and analyzed. Performance parameters such as mean, the overall mean of the M-packages temperatures and energy consumption were calculated. M-packages represented foods that are being stored in the cabinet. EES (Engineering Equation Solver) software was applied to calculate refrigerant mass flow rate from the energy balance of the water-cooled condenser. The software was also used to determine the state of refrigerant in the compression cycle and to check whether the energy balance equation of the water-cooled condenser was valid for calculating the refrigerant mass flow rate. Further calculations and graphs manipulation were processed by using spread sheet program.

Results and Discussion

Temperature Performance

Temperature variation of the warmest and the coldest M-packages for Test-1 is presented in Figure 4a. The highest temperature of the warmest M-package was $+5.2^{\circ}\text{C}$ and the lowest temperature of the coldest M-package was -1.5°C . The overall mean temperature of the all M-packages was found to be 1.7°C . During the 24-hour test 2 M-packages on the middle shelf and 3 M-packages on the base deck laid above $+4^{\circ}\text{C}$. All of the M-packages on the top shelf were below 3°C , but 2 of them were below -1°C .

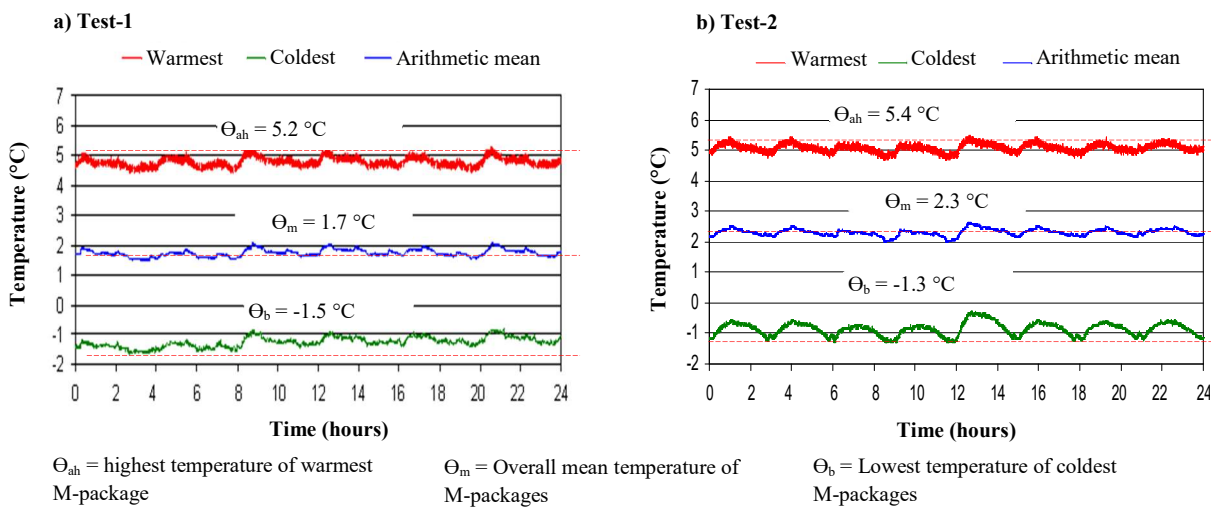


Figure 4. Variation of the warmest, the coldest and the arithmetic mean temperature of M-packages for Test-1 and Test-2

Time based curve of the temperature of the warmest and the coldest M-packages for Test-2 is shown in Figure 4b. The highest temperature of the warmest M-package was $+5.4^{\circ}\text{C}$ and the lowest temperature of the coldest M-package was -1.3°C . The overall mean temperature of the all M-packages was found to be 2.3°C . Similar with the results of the Test-1, for 24-hour test some M-packages on the middle shelf and on the base deck laid above $+4^{\circ}\text{C}$. In addition, some M-packages on the top shelf were below -1°C .

Based on the temperature of the M-packages, results of the Test-1 and Test-2 indicated that the cabinet with lower and higher air flow rate could not comply with the standard for M0 classification cabinet. Further optimization on the air flow rate distribution inside the cabinet would be required.

Energy Performance

Total Energy Consumption (TEC) of the cabinet was calculated according to [15]. For the cabinet equipped with integral condensing unit, TEC equals to Direct Energy Calculation (DEC) which can be calculated from:

$$TEC = DEC = \sum_{n=1}^{n=N_{max}} W_n \times \Delta t \text{ (kWh)} \quad (1)$$

W_n = instant power consumption of the cabinet (kW) over 24 hours ($W_n = 0$ during stopping and defrost time), Δt = period of measurement (h).

Table 1. Operational time of the cabinet during the tests

Operational time	Test-1	Test-2
Compressor ON/OFF frequency in 24 (h)	27	1
Running time t_{run} (h)	21.4	21.8
Defrost time t_{defl} (h)	1.0	2.0
Stopping time t_{stop} (h)	1.6	0.17
Percentage of the running time t_{tr} (%)	93.0	99.2

Operational parameters of the both tests include compressor On and OFF frequency, running, defrost, stopping and percentage of running time is presented in Table 1. It can be seen that Test-1 with lower air flow rate, number of compressor switching ON and OFF due to thermostat setting is much higher than it is in Test-2. This indicated that the refrigeration system of the cabinet stopped in every 50 minutes which make any frost accumulated in the evaporator melt. Therefore for the cabinet with lower air flow rate, frost would not be a problem.

Power consumption including total energy consumption (TEC) of the cabinet can be seen in Table 2. TEC of the cabinet was found to be 57.61 kWh.day⁻¹ for Test-1 and 62.24 kWh.day⁻¹ for Test-2. This results showed that the cabinet with lower air flow rate is more energy efficient compared to the cabinet with higher air flow rate.

Table 2. Power consumption and TEC of the cabinet

Power and Energy consumption	Test-1	Test-2
Maximum power (kW)	3.00	2.99
Minimum power (kW)	1.52	1.50
Average power (kW)	2.69	2.85
TEC (kWh.day ⁻¹)	57.61	62.24

The variation of instant power consumptions of the cabinet are shown in Figure 5a and 5b respectively for Test-1 and Test-2. From the figure can be seen compressor cycles in both tests. For Test-2 most of the compressor cycle due to defrost which was set in every 3 hours. This showed that higher air flow rate caused higher infiltration load and the system run continuously which could make problems with frost accumulation in the evaporator.

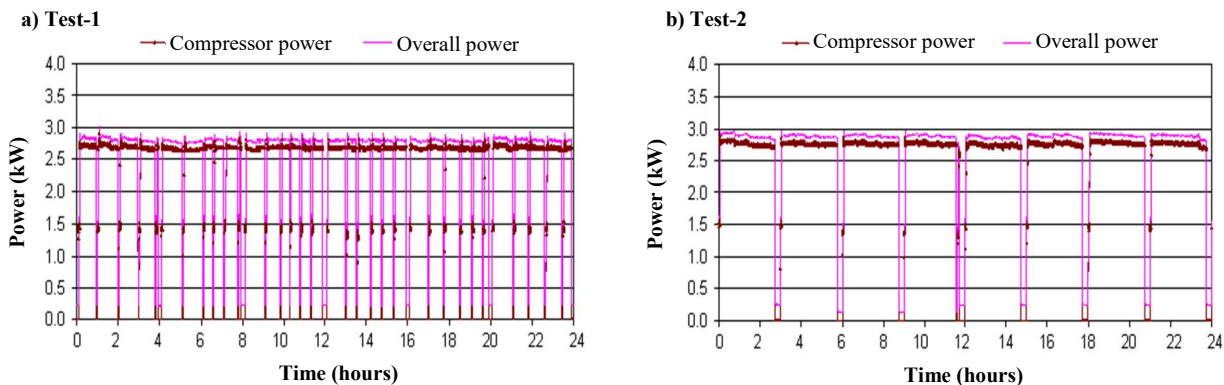


Figure 5. Power consumption of the cabinet for Test-1 and Test-2

An ECA (Enhanced Capital Allowance) performance criterion of a refrigerated display cabinet is expressed as Energy Efficiency Index (EEI) which can be calculated from:

$$EEI = \frac{TEC}{TDA} \text{ (kWh day}^{-1} \text{ m}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

The energy efficiency index of the cabinet and arithmetic mean coefficient of performance (COP) of the refrigeration systems of both tests are presented in Table 3.

Table 3. EEI and COP of the cabinet

	Test-1	Test-2
Energy efficiency index (EEI) kWh day ⁻¹ m ⁻²	8.28	8.95
Coefficient of performance (COP)	3.17	3.03

The EEI threshold for M0 classification cabinet with integral condensing unit is **12.50** (kWh.day⁻¹.m⁻²) [18]

The Energy Efficiency Index (EEI) of the cabinet at for lower air flow rate is found to be 8.28 kWh day⁻¹m⁻² and 8.95 kWh day⁻¹m⁻² the higher air flow rate. This EEI value is far below the enhanced capital allowances (ECA) threshold of 12.50 kWh day⁻¹m⁻² [18].

Conclusions

The HC cabinet with integral condensing unit was found to provide excellent energy performance with an Energy Efficiency Index below the requirement to qualify for enhanced capital allowances. The refrigeration system of the cabinet could also achieve a COP of 3.15 at climate class 3 conditions. Higher air flow rate in the cabinet could make the product temperatures a little bit better, but the energy consumption increased approximately 7% (from 58 kWh day⁻¹ to 62 kWh day⁻¹). Higher air flow rate caused higher infiltration load and the system run continuously which could make problems with frost. For the lower air flow rate frost was not a problem due to the system switching ON and OFF every 50 minutes. Total fans capacity from 1400 to 1500 m³ h⁻¹ would be ideal for this cabinet. However, air flow distribution in the cabinet is necessary to be optimized in order to comply with M0 classification cabinet.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the technical and financial contributions of WR Refrigeration and Arneg SPA to the project.

References

- [1] Chen Y G and Yuan X L 2005 Experimental study of the performance of single-band air curtains for a multi-deck refrigerated display cabinet *J. Food Eng.* **69** 161-267.
- [2] Tassou S A, Ge Y T, Hadawey A, Marriott D 2011 Energy consumption and conservation in food retailing *Appl. Therm. Eng.* **31** 147-156.
- [3] Lorentzen G 1995 The use of natural refrigerant: a complete solution to the CFC/HCFC predicament *Int. J. Refrigeration* **18** 190-197.
- [4] Giroto S, Minetto S, Neksa P 2004 Commercial refrigeration system using CO₂ as the refrigerant *Int. J. Refrig.* **27** 717-723.
- [5] Campbell A, Maidment G G, Missenden J F 2006 A natural refrigeration system for supermarkets using CO₂ as a refrigerant *Proc. CIBSE National Conference* London UK.
- [6] Hinde D, Shitong Zha S, Lan L 2009 Carbon dioxide in North American supermarkets *ASHRAE Journal* **51** 18-26.
- [7] Lidl 2011 *Two hundred Lidl stores to feature R290 technology by 2012* Information on: <http://www.hydrocarbons21.com//content/articles/2011-01-14-200-lidl-stores-to-feature-r290-technology-by-2012.php>
- [8] Gartshore J and Benton S 2010 *Cool concerns and waitrose to support the use of hydrocarbons* Information from: <http://www.hydrocarbons21.com/>
- [9] Sun J, Tsamos K M, Tassou S A 2017 CFD comparisons of open-type refrigerated cabinets with/without air guiding strips *Energy Proc.* **123** 54-61
- [10] Cortella G 2002 CFD-aided retail cabinet design *Computers and Electronics in Agriculture* **34** 43-66
- [11] Cui J and Wang S 2004 Application of CFD in evaluation and energy-efficient design of air curtains for horizontal refrigerated display cases *Int. J. Thermal Sci.* **43** 993-1002

- [12] Navaz H K, Henderson B S, Faramarzi R, Pourmovahed A, Taugwalder F 2005 Jet entrainment rate in air curtain of open refrigerated display cases *Int. J. Refrig.* **28** 267-275
- [13] Hadawey A, Tassou S A, Suamir I N, Jouhara H 2010 Performance optimization of a secondary refrigerant display cabinet using tests and CFD modelling *Proc. 1st IIR International Cold Chain Conference* Cambridge 8pgs paper no 214
- [14] Suamir I N, Tassou S A, Arrowsmith P, Bushell M 2012 Performance of integral hydrocarbon cabinets for supermarket applications *Proc. 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants* Delft 8 pgs paper no GL-203
- [15] BS EN ISO 23953-2 2012 *Refrigerated display cabinets-classification, requirements and test conditions* BSI 79 pgs.
- [16] BS EN 378-1 2012 *Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements, Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria* BSI 68 pgs.
- [17] ASHRAE Standard 34 2007 *Designation and safety classification of refrigerants* American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers
- [18] Minister of State for Energy and Clean Growth 2018 *Enhanced Capital Allowance (ECA) scheme for energy efficient technologies: Energy Technology Criteria List* Information from:
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/685775/ENERGY_TECHNOLOGY_CRITERIA_LIST_February_2018.PDF

**Lampiran 4: ARTIKEL UNTUK PUBLIKASI “ICAST - INTERNASIONAL
CONFERENCE ON APPLIED SCIENCE TECHNOLOGY”, MANADO, OKTOBER
2018**

(Artikel dapat dilihat pada halaman berikutnya)

Effects of Cooling Tower Performance to Water Cooled Chiller Energy Use: a Case Study toward Energy Conservation of Office Building

I Nyoman Suamir, I Nengah Ardita, I Made Rasta
Mechanical Engineering Department
Bali State Polytechnic
Bali, Indonesia

nyomansuamir@pnb.ac.id, nengahardita@pnb.ac.id, maderasta@pnb.ac.id

Abstract—This paper presents results of a study on effects of cooling tower performance to energy consumption of a water cooled chiller system of an office building in Jakarta the capital city of Indonesia. The building was recorded as a less efficient office building with energy use intensity reaching $271 \text{ kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$. The study was conducted by running a water cooled chiller with alternately two different cooling towers of similar specified capacity. Energy and temperature performances of the cooling towers were tested and evaluated. Performance parameters of the chiller that rejected heat to each cooling tower were evaluated, and then the chiller performances involving its energy use were calculated. It was found that one cooling tower had less air flow rate. Its efficiency was only 38% which was much lower than the efficiency of another cooling tower of 61%. Performance of the chiller to be operated with lower efficiency cooling tower, decreased by 5.5% and power consumption increased by 4.1%. The result of this study also showed that cooling tower performance was an important parameter that could make an office building less-energy efficient.

Keywords—cooling tower, performance, water cooled chiller, energy conservation

INTRODUCTION

A study on energy consumption of air conditioning (AC) systems (chiller system) for hotel and office buildings has been reported in [1,2]. AC systems were found to consume the highest electrical energy among other facilities. Therefore, by improving energy efficiency of the chiller systems would significantly contribute to energy conservation and reduce operational cost of the buildings. Reducing energy consumption would also affect environmental impact of the buildings.

Strategies in improving energy efficiency of chiller systems in commercial buildings have been reported in [3-5]. The strategies include waste heat recovery systems, implementation of thermal energy storage in minimizing temperature instability of heat recovery system and integration of heat pump and water cooled chiller system to improve energy-saving opportunity of the buildings.

Another strategy to reduce energy use of chiller systems is by enhancing the process of heat rejection in condenser. For central water cooled chiller systems, heat is rejected to the environment through cooling towers. Optimization of heat rejection in the cooling towers would be one of key roles in improving energy use efficiency of chiller systems. Ghazani *et al.* [6] reported that cooling towers were integrated parts of energy systems. Energy-saving strategies could be obtained by enhancing the overall performance of energy systems including cooling towers. Optimization heat transfer in cooling towers could significantly contribute to energy saving strategy due to cooling towers have been widely used in water cooled condenser. There are several types of cooling towers in which the forced draft counter flow cooling tower is most commonly used in commercial buildings. Cooling towers work using the concept of evaporative cooling where ambient air is humidified and hot water is cooled as a result of heat and mass transfer interactions between air and water. Heat transfer

in a cooling tower is potentially driven by temperature difference between the ambient air and the water. While for mass transfer is driven by their vapor pressure difference.

Many researchers have developed mathematical models for estimating energy performance of cooling towers [7-12]. By using the mathematical models, researchers could optimize performance parameters of the cooling towers. Recent research on correlations between mass transfer coefficient and moisture effectiveness as well as heat transfer coefficient and thermal effectiveness in a cooling tower has also been reported in [13]. Further optimization was found that reversibly used cooling towers presented great potential for energy saving in subtropical areas [14].

Some results of the study on cooling towers have not been properly implemented by building managers due to lack of capability to transfer research results to the building operational practices. It is often to be found in commercial buildings, the managers keep operating chillers with inefficient cooling towers until serious problems occur. This would generally affect the energy use of the chiller as well as energy use intensity (EUI) of the buildings.

For energy conservation, it is crucial to regularly monitor and examine energy use level of the buildings. One way to assess energy use is through measuring and identifying current year energy use intensity (EUI) and then comparing the results against similar building type from published building energy benchmarking. A report of commercial building energy benchmarking has been published by Building and Construction Authority [15]. The report also involved energy benchmarking of office buildings. The average EUI of 180 large office buildings (gross floor area more than $15,000 \text{ m}^2$) was $247 \text{ kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$. The report categorized the office buildings into: top quartile ($\text{EUI} \leq 160 \text{ kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$), second quartile (EUI more than 160 up to $209 \text{ kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$), third quartile (EUI more than 209 up to $272 \text{ kWh m}^{-2} \text{ year}^{-1}$).

¹) and bottom quartile (EUI more than 272 kWh m⁻² year⁻¹). In Indonesia, energy levels of office buildings were classified and labeled in accordance with [16] which comprised: very efficient (EUI ≤ 102 kWh m⁻² year⁻¹), efficient (EUI more than 102 up to 168 kWh m⁻² year⁻¹), quite efficient (EUI more than 168 up to 222 kWh m⁻² year⁻¹) and inefficient (EUI more than 222 kWh m⁻² year⁻¹). Study on energy use intensity of office buildings in the United States of America, Europe and around the world have been reported respectively in [17-19]. It was reported that around 75% of Europe's buildings were not energy efficient [18].

This paper reports results of onsite investigation on effects of cooling tower performance to energy consumption of water cooled chiller systems. This paper also provides a testimony of the influences of cooling tower performance to energy consumption of an office building located in Jakarta, Indonesia. The building is a large office building with gross floor area 17,400 m². Recent main problem occurred in the building was that energy consumption tended to increase since past three years. Energy use intensity (EUI) year 2017 increased for about 4.4% compared with EUI year 2016. This has also caused significant increase in energy cost. In addition of that, some tenants have also complained to the building management that their office temperatures could not achieve thermostat set points especially during midday (feeling uncomfortable).

Evaluation on the energy records of the building was found that energy consumptions of the building in the years 2016 and 2017 were 4,519 MWh and 4,719 MWh respectively. There was an increase of about 4.4%. Considering gross floor area (GFA) of the office building, energy use intensity (EUI) can be calculated for two consecutive years 2016 and 2017. The EUIs are 259.71 kWh m⁻² year⁻¹ and 271.18 kWh m⁻² year⁻¹ respectively for year 2016 and 2017.

According to regulation [16], the investigated office building can be grouped into inefficient office buildings. In order to improve the energy performance of the building toward energy conservation, some recommendations for optimization on the cooling tower parameters are also presented in this paper.

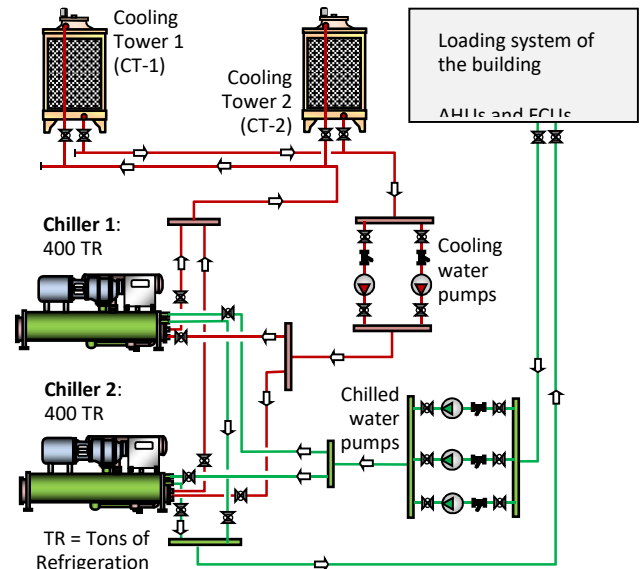
WATER COOLED CHILLER AND METHODS

Water Cooled Chiller

The investigated central chiller plant is for air conditioning (AC) system of an office building. The plant comprises two water cooled chiller system, distribution pumps and two cooling tower systems. Pump systems consist of pumps for cooling water distribution system and pumps for chilled water system. Both chiller and pump systems are located in a central plant room. The cooling tower systems are situated on the roof of the building. Detailed schematic diagram of the chiller systems completed with pumps, cooling and loading systems can be seen in Fig. 1.

Fig. 1 shows the chiller plant which constitutes three main systems, namely: refrigeration, cooling water and chilled water systems. The refrigeration system consists of two water-cooled chillers which absorb heat from the chilled water and reject heat to the cooling water. Chiller 1 and chiller 2 are hermetic centrifugal chillers with R-134a refrigerant of cooling capacity 400 TR (Tons of Refrigeration) each. The chiller plant provides cooling to the service facilities in the building. Number of chillers in operation is usually only 1 and another chiller will be in standby mode as a backup chiller.

The cooling water system of the chiller plant consists of two cooling towers (CT-1 and CT-2) with heat rejection capacity specified for 500 TR each. Two pumps are installed to circulate the cooling water. The main function of the cooling water system is to remove heat from the condenser and reject it to the ambient air through cooling tower system. While the chilled water system comprises three pumps and cooling load units which constitute fan coil units (FCUs) and air handling units (AHUs). Chilled water from chillers streams down to a chilled water header and then to be pumped to AHUs and FCUs. There are about 18 units AHUs and several units FCU to provide cooling into the building.



Schematic diagram of the investigated central chiller plant

In the cooling load units, heat from the facilities is absorbed which results in temperature of the chilled water increases. The chilled water then returns to the evaporator of the chiller system where the heat is transferred to the refrigerant and finally the heat is rejected to the atmosphere through condenser, cooling water circuit and cooling towers.

Cooling Towers

Technical specifications of the cooling towers are presented in Table I. It can be seen that the CT-1 is actually smaller in term of fan power input and diameter of 'spray filled'. Smaller fan power would provide less airflow rate which meant smaller air mass flow rate and lower heat rejection rate. Fan power consumption of CT-1 is 16% smaller than CT-2 as shown in Table I. Airflow rate of CT-1 was 32.5 m³ s⁻¹. This flow rate can be optimized by adjusting fan pitch and modifying fan blades. Maximum optimization obtained by implementing fan law, however, would improve the airflow rate up to 40.4 m³ s⁻¹. This would still smaller than the airflow rate of CT-2 which was 47.8 m³ s⁻¹.

TECHNICAL SPECIFICATION OF THE COOLING TOWERS

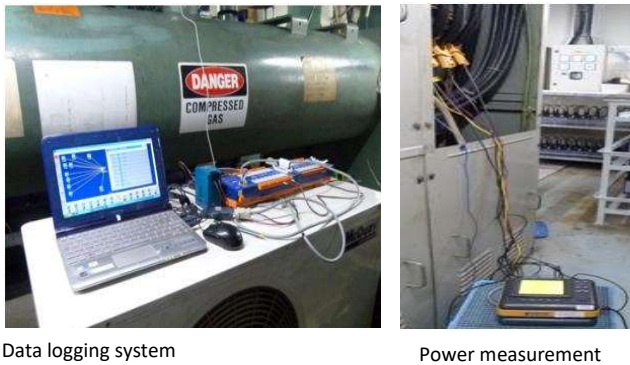
No	Parameters	CT-1	CT-2
1	Heat rejection capacity (TR)	500	500
2	Running current (Ampere)	15.2	18
3	Power input (Hp)	11.4	13.5
4	Voltage (V)	380	380
5	Phase	3	3
6	Air flow rate (m ³ s ⁻¹)	32.5	47.8

CT = Cooling tower, TR = Tons of Refrigeration, Hp = horse power
Value of the parameters specified by manufacturer

Methods

The tests were carried out in the plant room and on the roof of the building respectively for the chiller and cooling tower units. The tests were performed in two stages. The first stage, chiller-1 was operated with CT-2 (the cooling tower with higher thermal efficiency) referred to as the first test method. The test was continued to the second stage where the chiller-1 was consecutively operated with CT-1 (the cooling tower with lower thermal efficiency) referred to as the second test method.

Data of the chiller parameters such as high and low pressures of the refrigerant, chilled and cooling water temperatures were directly obtained from chiller monitoring system. Other data include refrigerant temperature, water mass flow rate, air temperature and relative humidity (RH) were measured using instrumentation systems specifically prepared for the tests. The measurement system consisted of some sensors which include temperature sensors of accuracy better than $\pm 1^\circ\text{C}$, RH sensor (accuracy ± 3 unit), mass flow meter (accuracy $\pm 1\%$) and air velocity meter with accuracy 10%; data logging system (Labtech software and DataScan modules) and recording system (computer set and monitor). Power consumption of the chiller system was also monitored and recorded. The instrumentation systems used for the tests can be seen in Fig. 2.



Measurement systems with data logger and power analyzer

The main purpose of conducting direct measurements and observations is to obtain accurate data based on actual operating conditions. Some parameters such as temperatures of the cooling towers, FCUs and AHUs, as well as water and air flow rate were measured using handheld measurement tools where data were recorded manually.

Data of the tests were recorded in every 10 seconds. This interval provided possibilities to examine the measurements in more detailed. The recorded data were processed and analyzed and performance parameters such as energy consumption, cooling capacity, approach temperatures, coefficient of performance (COP) of the chiller, efficiency of the cooling towers were calculated.

Further calculations were processed by using spread sheet and EES (*Engineering Equations Solver*) programs. With these programs, energy performance of the chillers can be investigated and simulated. The program can also be used to estimate performance of the chillers and cooling tower at different operating conditions.

RESULTS AND DISCUSSION

Cooling Tower Performances

A cooling tower is a specialized heat exchanger in which two fluids (air and water) are brought into direct contact with

each other to affect the transfer of heat. Heat rejection process is accomplished by spraying water into a rain-like pattern, through which an upward moving mass flow of cool air is induced by the action of a fan. Therefore, performance parameters would be influenced by water and airflow through the cooling tower.

In order to examine the performance of cooling towers (CT-1 and CT-2), two numerical models were developed in EES program. Models were used to process data and comprehensively provided outputs such as performance parameters. Input data were obtained from tests and operational records of the chiller. Input parameters include temperature and RH (relative humidity) of air, temperature of water entering and leaving the CT, flow rate of air and water. Other input such as hardness of cooling water and make up water, operation time and flow rate of make up water.

Main output performance parameters of the cooling towers include heat rejection capacity, efficiency, range, approach and COC (Cycle of Concentration). Other output parameters are total flow rate of air, blow-down rate, evaporation rate and drift. Table II shows performance comparison between cooling tower CT-1 and CT-2 resulted from the EES models. Heat rejection capacity of CT-1 was found to be smaller than CT-2 of about 6.9%. Convective heat rejection of CT-1 was bigger than CT-2 because of dry bulb temperature of exit air for CT-1 was higher.

MEASURED PARAMETERS OF THE COOLING TOWERS

No	Performance Parameters	CT-1	CT-2
1	Heat rejection capacity (TR)	330.2	354.7
2	Evaporation heat (kW)	980.2	1077.0
3	Convective heat (kW)	181.2	170.5
4	Cooling Water inlet Temperature ($^\circ\text{C}$)	33.8	30.3
5	Cooling water outlet Temperature ($^\circ\text{C}$)	29.8	26.0
6	Ambient wet bulb Temperature ($^\circ\text{C}$)	23.3	23.3
7	Range (K)	4.0	4.3
8	Approach (K)	6.5	2.7
9	Efficiency (%)	37.85	60.96
10	Evaporation water ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	18.3	20.0
11	Drift loss ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	0.2	0.2
12	Blow down water ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	3.5	3.8
13	Makeup water ($\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$)	22.0	24.0
14	COC	5.21	5.21

CT = Cooling tower, TR = Tons of Refrigeration, COC = cycle of concentration.

Evaporation heat rejection of CT-1, however, was smaller of about 9.9% compared with CT-2. This provides indication that CT-1 works with lower efficiency than CT-2. The efficiencies of CT-1 and CT-2 were found to be 37.85% and 60.96% respectively as shown in Table II.

Water Quality of the Cooling Tower

Quality of the cooling water can also gradually affect the performance of the cooling towers and the chillers. For example, high hardness and alkalis in the cooling water can form salt scale on the heat transfer surface of the condenser which then increases thermal resistance of the condenser pipe and reduces heat transfer from the refrigerant to the cooling water. It consequently reduces the heat rejection capacity of the condenser. Tests on the quality of cooling water were also carried out. Results of the test are presented in Table III.

WATER QUALITY OF THE COOLING TOWERS

No	Item Parameters	**Max. Conditions	*Cooling water	Unit
1	TDS	700	2165	ppm
2	Conductivity	1000	-	$\mu\text{S cm}^{-1}$
3	Sulphate Ions	200	163.62	ppm
4	All Iron (as Fe)	0.5	0.0722	ppm
5	M Alkalis (as CaCO_3)	100	1008.3	ppm
6	All Hardness (as CaCO_3)	200	795.72	ppm
7	Silica (as SiO_2)	50	8.05	ppm
8	Chloride Ions (as Cl)	150-400	181.94	ppm
9	pH at 25°C	6-9	8.19	pH

TDS Total Dissolved Solids

* Tested by Analytic Lab. of Udayana University

**Recommended by chiller manufacturer

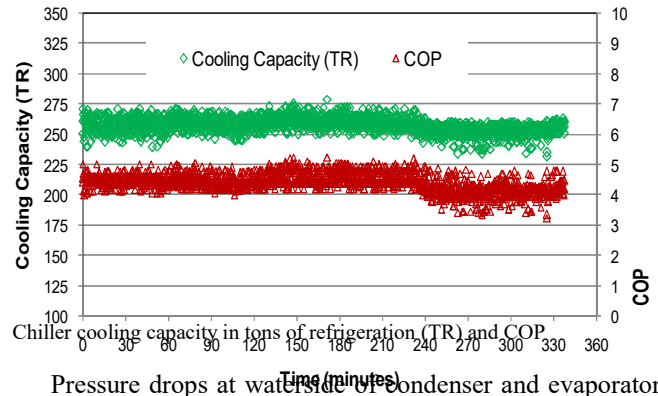
From Table III, it can also be seen water characteristics of the cooling tower recommended by chiller manufacturer. Three parameters of the cooling water (TDS, M Alkalis, and hardness) did not comply with the recommendation. The water used for cooling towers contains high hardness, alkalis and dissolved solid. This, however, would provide COC of the cooling towers in the range of 3 to 10 as recommended by manufacturer. Too low COC value would increase flow rate of the make-up water due to requirement of high blow-down rate. While high value COC would increase the formation of salt-scale on the surface of condenser pipe. Therefore, it is also recommended to continuously check and monitor the quality of the cooling water and maintain the COC value between 5 and 7.

Energy Consumption and Performance of the Chiller

The data from direct measurements were processed and analyzed by using spreadsheet and EES (*Engineering Equations Solver*) programs. For data processing and investigation of the chillers performance, two simple refrigeration cycle models were developed. Input parameters of the models include high and low pressures, temperatures of refrigerant at suction and discharge line of the compressor and at refrigerant liquid line, chilled and cooling water temperatures as well as cooling water flow rate.

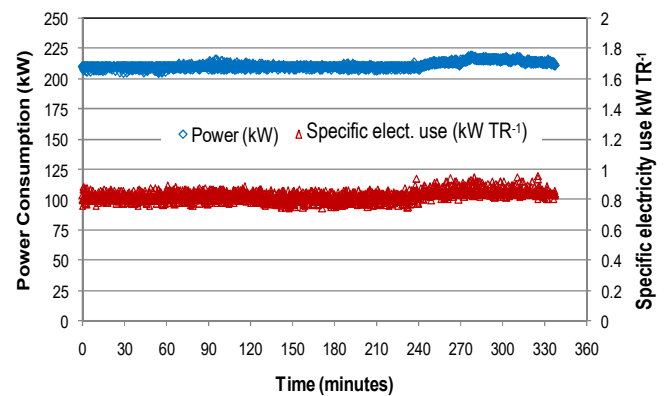
The chiller systems use R-134a as their heat transfer fluid. The refrigerant flow through the refrigeration system range from 5.77 kg s^{-1} up to 5.91 kg s^{-1} with cooling capacity varied with the methods of the tests. The chillers were operated at load factor of 87%. This load factor was based on the measured power consumption and maximum power of the chiller specified by the manufacturer. Maximum cooling capacity at full load operating conditions (load factor 100%) was found to be about 302 TR accounting for 75.5% of specified capacity. It can be noticed that the actual capacity of the chiller was significantly lower of about 24.5% than the specified cooling capacity of 400 TR.

The simulation results also showed that the flow-rates of cooling water and chilled water are relatively stable. The cooling water circulated through condenser with flow rate of 4206 LPM (Liter per minute) or equivalent to 69.72 LPS (liter per second) or mass flow rate of 69.79 kg s^{-1} . This flow rate provided water velocity of 2.19 m s^{-1} , which was in the range of manufacturer specification between 1.02 m s^{-1} and 3.66 m s^{-1} . While the flow rate of chilled water was 3901 LPM equivalent to 65 kg s^{-1} mass flow rate. The velocity of chilled water is about 2.04 m s^{-1} (specified range from manufacturer between 0.91 and 3.66 m s^{-1}).



Pressure drops at water side of condenser and evaporator were also investigated. Test results were in agreement with recorded data from the chiller operation log sheet. Pressure drop of cooling water at condenser was ranging from 0.8 to 1 bar (80 to 100 kPa) and for chilled water at evaporator was in the range of 1.7 to 2 bar (170 to 200 kPa). The pressure drops of cooling and chilled water at test conditions specified by manufacturer are 75 kPa and 100 kPa respectively.

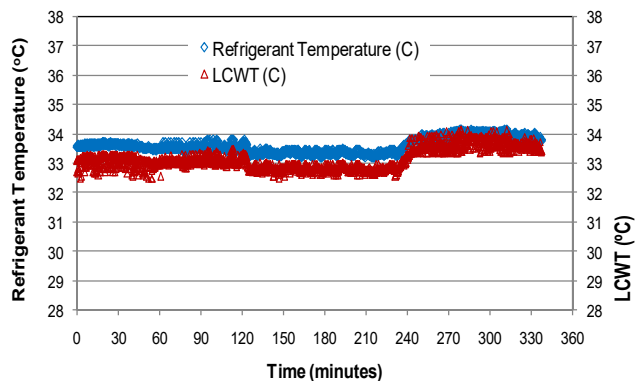
Performance parameters of the chiller are shown in Figs. 3, 4, and 5. The figures showed that investigated parameters (cooling capacity, power consumption, Coefficient of Performance (COP), condenser temperatures) seem to be stable during the first four hours (the first test method) and then significantly change in the last 1.5 hours (the second test method). This happened due to the chiller operated with different cooling towers. At the first test method, the chiller was in operation with CT-2 and then at the second test method CT-2 was subsequently replaced with CT-1. Ambient temperature during the test was ranging from $25 \text{ }^\circ\text{C}$ to $28 \text{ }^\circ\text{C}$.



Chiller power consumption and specific electricity use

Figs. 3 and 4 show performances of the chiller drop at the second test method. Cooling capacity decreased by 4 TR, power consumption increased for about 8.7 kW, COP reduced by 0.24 and specific electricity consumption went up for about 0.05 kW TR^{-1} . This was caused by the increase of cooling water temperature due to low thermal efficiency of the cooling tower.

With regards to the condenser of the chiller, Fig. 5 shows that condenser operates with low approach temperature (0.5 K). This indicates that condenser is clean. By maintaining the approach temperature of the condenser as low as possible can make the chiller operate at lower condensing temperature and better energy performance [20].



Temperature of refrigerant and leaving cooling water in condenser

Comprehensive results have been obtained from this study. Effects of cooling towers with 60.96% and 37.85% efficiencies to the investigated water-cooled chiller have been identified which can be described below:

- Cooling capacity decreases by 1.6%;
- Coefficient of performance (COP) reduces by 5.5%;
- Power consumption increases of about 4.1%;
- Specific electricity use (kW TR⁻¹) increases 5.8%;
- Condensing temperature as well as cooling water temperature leaving the condenser increased for about 1.4 K.

In this study, the increase of chiller power consumption caused by less efficient cooling tower could reach 4.1%. The value is very close to the increase of energy consumption of the office building (4.4%). The results provide indication that chiller or air conditioning system is the most significant energy consumption facility of the building. This is in agreement with [21] which reported that energy consumption of air conditioning system in office building was nearly 51% of total energy use. Therefore, improving the quality and energy efficiency of cooling towers as well as chiller system offers a considerable energy saving opportunity.

In order to improve energy efficiency of the cooling tower, optimization on the airflow rate is required. Optimization can be done by adjusting fan pitch and modifying fan blades. This optimization can increase airflow rate from 32.5 m³ s⁻¹ to 40.4 m³ s⁻¹. Further optimization can be prepared by replacing fan of the cooling tower with one that can provide minimum air flow rate of 47,8 m³ s⁻¹. Additionally water quality of the cooling tower should also be improved so that it can meet the requirements recommended by chiller manufacturer.

CONCLUSIONS

Energy consumption of a water cooled chiller operated with different performance cooling towers for office building application has been examined. Chiller performance decreased of about 5.5% when it was operated with a lower efficiency cooling tower. The study was also found that critical effect of using inefficient cooling tower to the chiller was that the chiller would operate at higher condensing temperature (increased by 1.4 K) due to the increase of cooling water temperature leaving the cooling tower. This caused the chiller to consume 4.1% more energy. Moreover, low efficiency cooling tower would cause mismatch between heat rejection in the cooling tower and cooling load of the chiller and it consequently could affect the energy performance of the chillers. Maintaining quality and efficiency of cooling towers would offer a substantial energy-

saving opportunity for chiller operation and energy conservation of the building.

ACKNOWLEDGMENT

This research has received a financial support from the Higher Education Directorate General of the Ministry of Research, Technology and Higher Education of the Republic of Indonesia and in-kind support from PT. JSI Jakarta. Authors faithfully acknowledge this financial and in-kind supports.

REFERENCES

- L. Barry, B.L. Mak, W.W. Chan, D. Li, L. Liu, K.F. Wong, "Power consumption modeling and energy saving practices of hotel chillers," *Int. J. Hospitality Management*, 33, 2013, pp. 1-5
- F.W. Yu, K.T. Chan, R.K.Y. Sit, "Climatic influence on the design and operation of chiller systems serving office buildings in a subtropical climate," *Energy and Buildings*, 55, 2012, pp. 500-507.
- I.N. Suamir, I.N. Ardita, I.G.A.B. Wirajati, "Waste Heat Recovery from Central AC System for Hot Water Supply; A Case Study for Hotel Building Application in Indonesia," *Advanced Science Letters*, 23, 2017, pp. 12206-12210.
- I.N. Suamir, I.B.P. Sukadana, M.E. Arsana, "Minimizing temperature instability of heat recovery hot water system utilizing optimized thermal energy storage," *Journal of Physics: Conf. Series*, 953, 2018, p.8
- I.N. Suamir, I.N. Ardita, N.I.K. Dewi, "Integration of heat pump and heat recovery of central ac system for energy use reduction of hotel industry," *Refrigeration Science and Technology*, 2015, pp. 3581-88, <http://dx.doi.org/10.18462/iir.icr.2015.0096>.
- M.A. Ghazani, A. Hashem-ol-Hosseini, M.D. Emami, "A comprehensive analysis of a laboratory scale counter flow wet cooling tower using the first and the second laws of thermodynamics," *Appl. Therm. Eng.* 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.090>.
- J.C. Kloppers, D.G. Kroger, "Cooling tower performance evaluation: Merkel, Poppe, and e-NTU methods of analysis," *Journal of Engineering Gas Turbines Power*, 127, 2005, pp. 1-7.
- H. Jaber, R.L. Webb, "Design of cooling towers by the effectiveness-NTU Method. International," *Journal of Heat Transfer*, 1989, pp. 837-843.
- R. Cheng-Qin, "Corrections to the simple effectiveness-NTU method for counter flow cooling towers and packed bed liquid desiccantair contact systems," *Int J of Heat Transfer*, 51, 2008, pp. 237-245.
- J.R. Khan, S.M. Zubair, "Performance characteristics of counter flow wet cooling towers," *Energy Conversion and Management*, 44, 2002, pp. 2073-2091.
- J.R. Khan, S.M. Zubair, "An improved design and rating analyses of counter flow wet cooling towers," *Journal of Heat Transfer Transaction ASME*, 123, 2001, pp. 770-778.
- M. Prasad, "Economic up gradation and optimal use of multi-cell cross flow evaporative water cooling tower through modular performance appraisal," *Applied Thermal Engineering*, 24, 2003, pp. 579-593.
- B. Kiran Naik, V. Choudhary, P. Muthukumar C. Somayaji, "Performance Assessment of a Counter Flow Cooling Tower -Unique Approach," *Energy Procedia*, 109, 2017, pp. 243-252.
- B. Kiran Naik, V. Choudhary, P. Muthukumar C. Somayaji, "Performance Assessment of a Counter Flow Cooling Tower – Unique Approach," *Energy Procedia*, 109, 2017, pp. 243-252.
- Building and Construction Authority, "BCA Building Energy Benchmarking Report 2017," 2017, p. 32.
- Minister of Energy and Mineral Resources of Republic of Indonesia, "Regulation of the Minister of Energy and Mineral Resources of the Republic of Indonesia no. 13 concerning saving electricity usage," 2012, p.14.
- Energy Star, "Energy use in office buildings," United States Environmental Protection Agency, 2012, p. 2.
- Skanska, "Energy Consumption in Office Buildings: a Comparative Study," 2017, p. 36, available from: <http://oswbz.org/wp-content/uploads/2017/03/ENERGY-CONSUMPTION-IN-OFFICE-BUILDINGS.pdf>
- A. Hinge, P. Bertoldi, P. Waide, "Comparing Commercial Building Energy Use Around the World," *The American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE)*, 2004, pp 136-147.

- I.N. Suamir, I.N.G. Baliarta, M.E. Arsana, I.W. Temaja, "The Role of Condenser Approach Temperature on Energy Conservation of Water Cooled Chiller," *Advanced Science Letters*, 23, 2017, pp. 12202-05.
- A. Prieto, U. Knaack, T. Klein, T. Auer, "25 Years of cooling research in office buildings: Review for the integration of cooling strategies into the building façade (1990–2014)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017, pp. 89-102.

Lampiran 5: ARTIKEL SUBMIT PADA JURNAL NASIONAL MATRIX

(Artikel dapat dilihat pada halaman berikutnya)

STUDI EKSPERIMENTAL KINERJA TEMPERATUR DAN ENERGI INTEGRASI BIO-PCM PADA CHEST FREEZER

I Nyoman Suamir¹ dan I Made Rasta

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali, 80364

¹e-mail: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak: *Chest freezer* pada operasionalnya memerlukan beban transien yang fluktuatif dari waktu ke waktu sesuai dengan kondisi lingkungan. Untuk mampu memenuhi kebutuhan beban pendinginan maksimum, *chest freezer* umumnya dirancang dengan kapasitas lebih besar dari beban pendinginan yang dibutuhkan. Akibatnya sistem *chest freezer* kurang efisien dan kurang handal akibat sering mati-hidup selama operasi. Oleh karena itu perlu dikembangkan sistem *chest freezer* yang dapat mengurangi siklus mati-hidupnya kompresor dan menghemat penggunaan energi fosil. Penelitian ini mengkaji teknologi refrigerasi *chest freezer* dengan siklus kompresor yang kecil dan memiliki potensi untuk diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan. Pendekatan teknologi yang diterapkan adalah teknologi *chest freezer* berbasis vegetable oil *phase change materials* (bio-PCM). Hasil investigasi menunjukkan bahwa penggunaan bio-PCM dapat menurunkan siklus kompresor dan mampu menjaga temperatur produk di bawah -15°C . Konsumsi energi teknologi *freezer* yang diusulkan relatif sama dengan *freezer* tanpa bio-PCM. Tetapi bio-PCM dapat membuat *chest freezer* sangat potensial diintegrasikan dengan sumber energi surya.

Kata kunci: *Chest freezer, bio-PCM, kinerja temperatur dan energi.*

Abstract: *Chest freezers in their operations experience transient loads that fluctuate from time to time with environmental conditions. To satisfy the maximum cooling demand, chest freezers are normally oversized. This can cause inefficient operation and less reliable due to frequent on-off cycling. Therefore, a reliable and efficient energy chest freezer is essential to be developed. This study examined technology with lower on-off cycles and potential to be integrated with renewable energy sources. The technology approach was a chest freezer technology incorporated vegetable oil phase change materials (bio-PCM). The results showed that integration of bio-PCM could significantly reduce on-off cycle of the compressor and maintain the product temperature below -15°C . Energy consumption of the investigated freezer with bio-PCM consumed nearly the same energy compared to chest freezer without bio-PCM. However, the use of bio-PCM in the chest freezer makes it be highly potential to be integrated with solar energy sources.*

Keywords: *Chest freezer, bio-PCM, temperature and energy performances.*

I. PENDAHULUAN

Sistem refrigerasi yang salah satunya adalah *chest freezer* memegang peranan yang penting dalam rantai makanan (*food chain*), baik menjaga keamanan dan kualitas banyak makanan dan memungkinkan makanan dipasok dari produsen ke konsumen. Refrigerasi juga memiliki peran penting dalam mengurangi kerugian pasca panen. Kurang dari 10% bahan pangan yang mudah rusak didinginkan dengan sistem refrigerasi dan diperkirakan kerugian pasca panen saat ini mencapai 30% dari total produksi. Coulomb [1] dan IIR [2] melaporkan bahwa total produksi pangan global adalah 5.500 juta ton, setidaknya 33% membutuhkan pendinginan namun hanya 7% yang diawetkan melalui sistem refrigerasi. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar jumlah sistem pendinginan yang tersedia pada suatu negara maka kerugian pasca panen negara tersebut lebih rendah.

Tetapi perkembangan rantai dingin (*cold chain*) sebagai bagian dari rantai pangan (*food chain*) di Indonesia masih sangat rendah. Pada tahun 2016, negara ini memiliki kapasitas *cold storage* di dalam rantai dinginnya sebesar 12,3 juta m^3 atau kurang dari 0,05 m^3 per kapita. Sebagai perbandingan kapasitas *cold storage* per kapita beberapa negara seperti UK

0,39 m^3 , USA 0,36 m^3 , Jepang 0,26 m^3 , India 0,10 m^3 , Brasil 0,08 m^3 , dan Cina 0,06 m^3 . Dengan demikian Indonesia membutuhkan investasi yang masih sangat besar untuk sistem rantai dingin [3,4].

Sehubungan dengan isu lingkungan, peningkatan konsumsi produk pangan berdampak pada emisi gas rumah kaca (GRK) atau pemanasan global akibat konsumsi energi. Di Indonesia, pemerintah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 26% (dengan kekuatan sendiri) dan 41% (dengan dukungan internasional) pada tahun 2020. Emisi gas rumah kaca dari sektor komersial diperkirakan sekitar 0,7% (3,8 juta ton CO_2) dari emisi total sebesar 540 juta ton CO_2 [5]. Teknologi refrigerasi bertanggung jawab 15% dari seluruh listrik yang dikonsumsi di dunia [1] dan sekitar 72% dampak pemanasan global dari sistem refrigerasi adalah karena konsumsi energi [6]. Mengurangi konsumsi energi sistem refrigerasi menjadi prioritas utama dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dari rantai pangan (*food chain*). Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi energi dan dampak lingkungan *chest freezer* pada rantai pangan adalah melalui penggunaan teknologi refrigerasi yang efisien dan teknologi energi berkelanjutan.

Aplikasi TES disesuaikan berdasarkan jenis bahan PCM (*phase change material*) yang digunakan. PCM yang paling umum digunakan mencakup organik, inorganik dan campuran dari kedua jenis bahan organik-inorganik [7]. Adapun PCM yang baik adalah bahan yang memiliki kapasitas termal tinggi dan rentang temperatur perubahan fasenya konstan [8]. PCM yang terbuat dari bahan organik saat ini menjadi pilihan yang menarik untuk berbagai aplikasi karena keunggulan-keunggulan sifat-sifat termalnya seperti misalnya paraffin dan lemak jenuh seperti yang dilaporkan oleh Su *et al.* [9] dan Giro-Paloma *et al.* [10]. Parafin merupakan PCM organik yang paling populer karena memiliki super cooling yang rendah dan rentang temperatur perubahan fase yang lebar. Struktur kimia Parafin juga stabil pada saat terjadi proses perubahan fase [11]. Tetapi parafin juga memiliki kelemahan antara lain konduktivitas termal dan panas laten yang rendah, mudah terbakar dan perubahan volume yang besar pada saat terjadi perubahan fase [12].

PCM untuk aplikasi *freezer* bisa dari bahan parafin, larutan garam, atau material yang berbahan dasar air [13]. Untuk PCM dari larutan garam, titik beku dan titik leburnya dapat diturunkan dengan meningkatkan konsentrasi larutannya. Tetapi makin rendah titik leburnya maka makin korosif dan kalor latennya semakin rendah dibandingkan dengan air [14]. Sampai saat ini sudah mulai banyak diteliti penggunaan bahan minyak sayur sebagai *nucleating agents* yang dilarutkan ke dalam air dan mampu menurunkan titik beku di bawah 0°C. Minyak sayur mengandung berbagai jenis asan lemak jenuh dan ester dari minyak tersebut memiliki potensi yang baik sebagai bahan PCM organik [15]. Bahan organik dari ester minyak jagung dan berbahan dasar air juga berpotensi menjadi PCM organik untuk temperatur di bawah 0°C [16,17]. Campuran ester tersebut dilaporkan mampu menurunkan titik lebur dan titik beku air, sehingga mampu diterapkan pada aplikasi refrigerasi temperatur medium dan rendah. Disamping itu ester minyak jagung dan kedelai mampu menghilangkan super cooling dari air serta memiliki kalor laten yang masih tinggi, sehingga sangat cocok diterapkan sebagai bahan PCM organik untuk temperatur rendah seperti *chest freezer*.

Dilaporkan bahwa PCM murah berbasis larutan garam (NaCl + H₂O) dapat diterapkan pada *freezer* sebagai TES, tetapi PCM jenis ini sangat korosif dan masih ada *super-cooling* [18]. Penelitian eksperimental juga telah dilakukan oleh Azzouz *et al.* [19] pada refrigerator domestik yang diintegrasikan dengan PCM dan ditempatkan pada bagian belakang dari evaporator. Pemasangan PCM ini dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan memberikan kapasitas pendinginan dalam beberapa jam tanpa suplai listrik.

Cheralathan *et al.* [20] melakukan penelitian experimental kinerja sistem refrigerasi industri yang

diintegrasikan dengan kapsul PCM yang ditempatkan pada tangki penyimpanan dimana evaporator dari sistem refrigerasi juga dipasang. Ditemukan bahwa kinerja termal dari sistem dapat ditingkatkan dengan melakukan pengisian PCM pada temperatur kondensasi yang rendah dan juga pada temperatur evaporator yang optimal. Setiap 1 K penurunan temperatur evaporator dapat menyebabkan 3-4% peningkatan konsumsi energi dan setiap 1 K penurunan temperatur kondensasi menyebabkan turunnya konsumsi energi sampai sekitar 3%.

Investigasi aplikasi PCM pada *freezer* komersial sudah dilakukan oleh Oró *et al.* [21] dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja termal dari *freezer* pada saat pintu dibuka dan pada saat listriknya padam. PCM yang digunakan adalah PCM berbasis larutan garam sehingga PCM ditempatkan pada sebuah panel dari bahan *stainless steel* yang ditempatkan di dalam *freezer*. Penggunaan PCM dapat mempertahankan temperatur produk pada tingkat aman lebih lama dibandingkan *freezer* tanpa PCM. Akhir-akhir ini, penelitian aplikasi PCM berbasis larutan garam pada *chest freezer* juga sudah dilakukan dengan menempatkan PCM pada dinding evaporator [22]. PCM dikemas dalam dua model, yaitu pertama dengan model kantong PCM yang ditempelkan pada sebuah pelat aluminium kemudian pelat dan PCM bersama-sama ditempelkan pada dinding *freezer*, kedua dengan model penempatan pada *honey comb* aluminium. Dilaporkan bahwa penempatan PCM dengan model kantong aluminium dapat mengurangi ruang untuk produk, konsumsi energi meningkat tapi siklus *on/off* kompresor jauh berkurang. Sedangkan untuk model *honey comb* dapat menghemat energi sebesar 2%, siklus *on/off* kompresor juga berkurang. Kinerja *chest freezer* dengan PCM sangat sensitive terhadap setting dari thermostat.

Penelitian-penelitian pada aplikasi *freezer* komersial yang ada saat ini, umumnya menggunakan PCM yang berbasis garam yang sangat korosif. Artikel ini melaporkan hasil investigasi dari integrasi bio-PCM berbasis air dan ester minyak jagung yang tidak korosif dan pengaruhnya terhadap kinerja termal dan energi dari *chest freezer*.

II. METODE PENELITIAN

2.1 *Chest Freezer*

Chest freezer yang digunakan pada penelitian ini adalah *chest freezer* yang sudah ada di pasaran lokal dengan kapasitas 100 Liter dan menggunakan refrigeran ramah lingkungan yaitu refrigeran hidrokarbon R-600a. Konsumsi daya dari *chest freezer* setara dengan 1/10 PK (sekitar 60-75 W). Adapun *chest freezer* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 1.

Chest freezer tipe ini memiliki kompresor hermetik tipe piston sehingga mampu bekerja dengan *temperature lift* yang relative tinggi sesuai dengan kebutuhan *freezer* pada umumnya. Kondensornya

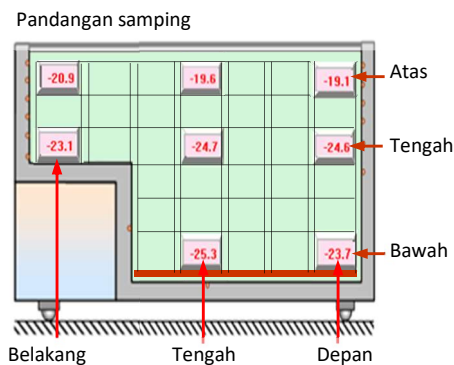
menggunakan konsep perpindahan panas *natural flow* dengan memasang pipa kondensor pada bagian luar dinding *freezer* tepat di sisi dalam pelat luar *freezer*. Kondensor di samping membuang panas juga berfungsi mencegah adanya kondensasi pada dinding luar *freezer*. Evaporatornya juga menggunakan konsep perpindahan panas konveksi natural dengan menempatkan pipa evaporator menempel dengan pelat bagian dalam dari dinding *freezer*. Antara pipa evaporator dan pipa kondensor diinjeksi dengan *polyurethane foam* dengan ketebalan sekitar 70 mm. *Polyurethane foam* ini berfungsi sebagai isolator yang meminimal-kan beban transmisi dari dinding *freezer* akibat perbedaan temperatur kondensor dan evaporator.



Gambar 1. *Chest freezer* yang disiapkan untuk penelitian

2.2 Pembebanan *Chest Freezer*

Untuk penempatan beban dari produk di dalam *chest freezer* dan sensor alat ukur pada penelitian eksperimental ini mengacu kepada standar [23]. Posisi penempatan produk dan pengukurannya dapat dilihat pada Gambar 2. Pengukuran temperatur produk pada berbagai posisi bertujuan untuk mendapatkan kinerja temperatur dari sistem *chest freezer*.



Gambar 2. Penempatan produk dan sistem pengukuran di dalam *chest freezer*

2.3 Paket Bio-PCM

Pengembangan paket bio-PCM diawali dengan membuat rancangan kotak PCM dengan mempertimbangkan bahwa bio-PCM tidak bocor pada saat diintegrasikan dengan *chest freezer* karena bio-PCM berwujud cair pada temperatur di atas titik bekunya. Bio-PCM yang digunakan adalah campuran ester minyak jagung (*Corn-oil ester*) dan air.

Paket bio-PCM juga memiliki pengantar panas yang baik dan cukup kokoh untuk dapat diintegrasikan pada *chest freezer*. Untuk itu kotak bio-PCM dirancang dari bahan pelat aluminium dengan ketebalan minimum 0.5 mm. Paket bio-PCM dibuat dalam bentuk yang relatif kecil disesuaikan dengan ukuran dari ruang *chest freezer* (Gambar 3). Untuk *chest freezer* 100 Liter diperlukan lima buah paket bio-PCM dengan total volume sekitar 9 Liter.



Gambar 3. Paket PCM yang siap diintegrasikan ke dalam *chest freezer*

2.4 Kondisi Pengujian dan Sistem Instrumentasi

Pengujian dilakukan di dalam sebuah ruangan yang terbuka, sehingga kondisi di sekitar pengujian relatif sama dengan kondisi lingkungan. Temperatur lingkungan dimonitor dan dicatat dengan *data logging system*.



Gambar 4. Sistem instrumentasi dan *data logging*

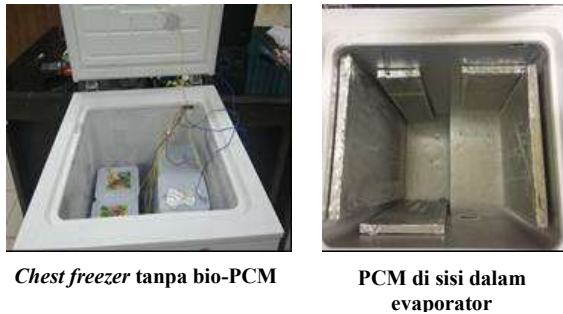
Chest freezer dilengkapi dengan sistem instrumentasi yang lengkap untuk mengukur temperatur dari *freezer* pada berbagai posisi. Ada 24 termokopel dipasang pada bagian inti (di tengah-tengah produk) khusus untuk mengukur variasi temperatur produk. Sebagian termokopel juga dipasang pada bagian atas dari produk yang paling atas. Juga ada termokopel yang dipasang pada dinding evaporator dan sebagian lagi digunakan untuk mengukur sistem refrigerasi dari *chest freezer*. Daya yang dikonsumsi oleh *chest freezer* juga diukur dengan menggunakan *power analyser*. Sistem instrumentasi dan *data logging system* disajikan pada Gambar 4.

Termokopel yang digunakan pada pengujian ini adalah termokopel tipe T dengan deviasi maksimum sebesar ± 0.5 °C. Sistem pengukuran yang lain adalah memonitor dan mencatat konsumsi daya dengan menggunakan *power analyser* Lutron DW6092 dengan ketidakpastian sebesar $\pm 0.05\%$.

2.5 Prosedur Pengujian

Pada pengujian ini penempatan produk dan titik-titik pengukuran mengacu kepada standar [24].

Pengujian mencakup *chest freezer* tanpa PCM dan *chest freezer* dengan Bio-PCM yang integrasinya dengan menggunakan paket Bio-PCM dan ditempelkan ke dinding evaporator. Gambar 5 menyajikan *chest freezer* tanpa dan dengan Bio-PCM. Volume PCM yang terpasang 9 Liter dan terjadi pengurangan volume *chest freezer* sekitar 10%.

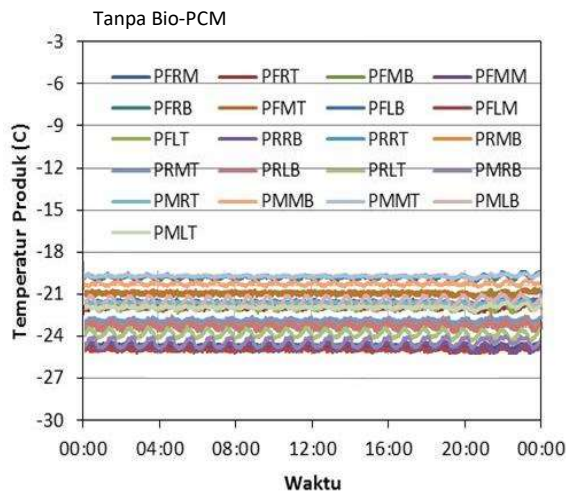


Gambar 5. *Chest freezer* tanpa dan dengan paket bio-PCM

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Temperatur Produk dan PCM

Parameter kinerja dari sistem *chest freezer* terdiri atas temperatur produk, temperatur PCM dan konsumsi energi. Variasi temperatur produk pada berbagai posisi di dalam *chest freezer* tanpa PCM dapat dilihat pada Gambar 6, sedangkan untuk *chest freezer* dengan Bio-PCM disajikan pada Gambar 7.

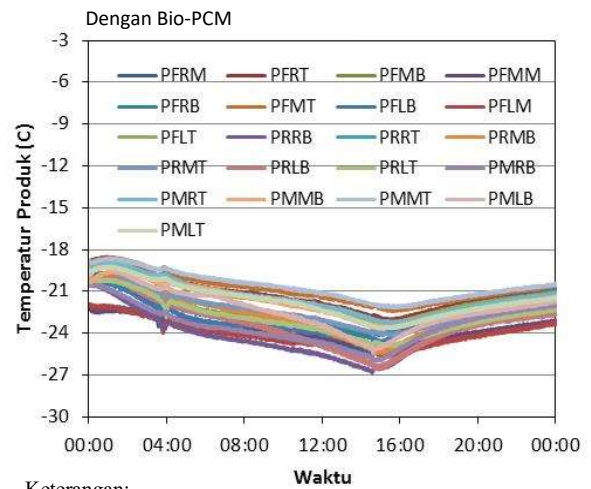


Keterangan:
PFRM, PFRT, PFMB dan seterusnya menunjukkan posisi produk yang diukur temperaturnya. Posisi ditunjukkan dengan kombinasi posisi: Huruf I yaitu P = produk; Huruf II menunjukkan posisi: depan (F = front), tengah (M = middle), belakang (R = rear); Huruf III sebagai indikasi posisi: kanan (R = right), tengah (M = middle), kiri (L = left); Huruf IV berarti posisi vertikal, atas (T = top), tengah (M = middle), bawah (B = bottom)

Gambar 6. Variasi temperatur produk di dalam *chest freezer* tanpa PCM

Dari Gambar 6 dapat diketahui bahwa *chest freezer* tanpa PCM temperatur produk relatif sangat stabil dengan fluktuasi yang kecil sebagai akibat dari respon

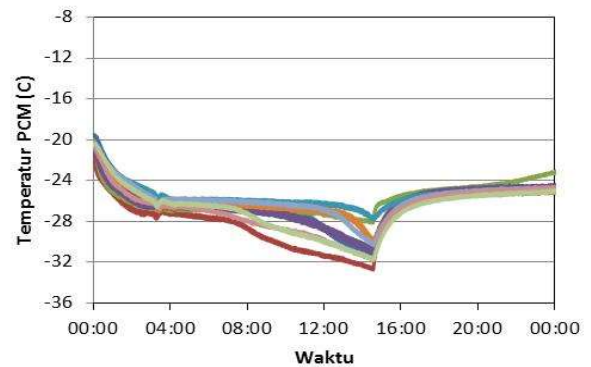
dari kerja kompresor dengan jumlah siklus *on/off* sebanyak 23 kali per hari (dalam 24 jam). Variasi temperatur dari produk berada pada rentang antara -19 °C an -25 °C.



Keterangan:
PFRM, PFRT, PFMB dan seterusnya menunjukkan posisi produk yang diukur temperaturnya. Posisi ditunjukkan dengan kombinasi posisi: Huruf I yaitu P = produk; Huruf II menunjukkan posisi: depan (F = front), tengah (M = middle), belakang (R = rear); Huruf III sebagai indikasi posisi: kanan (R = right), tengah (M = middle), kiri (L = left); Huruf IV berarti posisi vertikal, atas (T = top), tengah (M = middle), bawah (B = bottom)

Gambar 7. Variasi temperatur produk di dalam *chest freezer* dengan Bio-PCM

Sedangkan untuk *chest freezer* dengan Bio-PCM jumlah siklus *on/off* dari kompresor menurun dengan drastis menjadi 1 siklus dalam 27 jam 20 menit atau kurang dari 1 siklus per hari. Temperatur produknya dengan variasi yang relatif lebih lebar dibandingkan dengan produk di dalam *chest freezer* tanpa PCM yaitu antara -18,5 °C dan -27 °C, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7. Variasi temperatur produk pada rentang ini masih termasuk katagori kabinet L1 menurut standar [24].



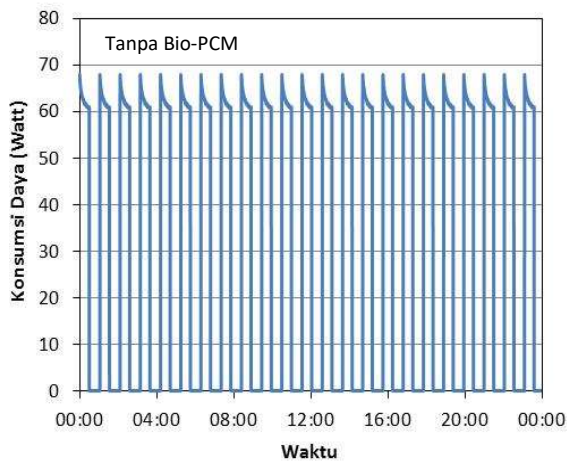
Gambar 8. Variasi temperatur PCM di dalam *chest freezer*
Menurunnya jumlah siklus *on/off* yang sangat drastis pada *chest freezer* dengan Bio-PCM dan tetap mampu menjaga temperatur produk berada pada rentang klasifikasi dari *freezer* memberikan potensi

yang baik untuk diterapkan pada daerah dimana suplai listrik sering ada gangguan atau daerah yang belum memiliki suplai listrik. Salah satu cara adalah melalui pengintegrasian sistem *chest freezer* bio-PCM dengan suplai listrik tenaga surya.

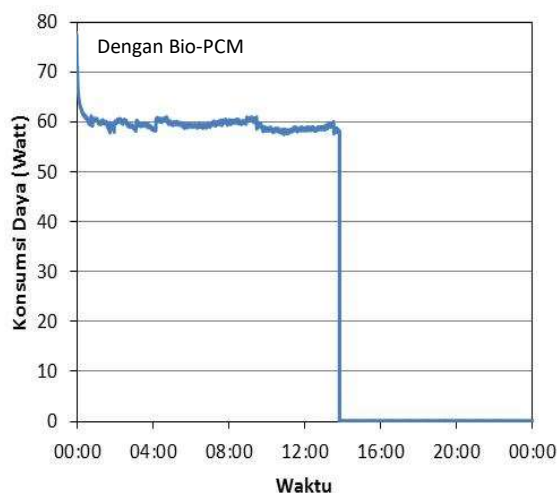
Pada Gambar 8 ditunjukkan variasi temperatur bio-PCM yang dipasang pada dinding evaporator *chest freezer*. Dari gambar dapat diketahui bahwa bio-PCM mengalami perubahan fase pada temperatur $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa *setting* termostat dari *chest freezer* sudah optimum dan PCM dapat menjaga temperatur produk dalam waktu yang relatif lama walaupun kompresor tidak beroperasi.

3.2 Konsumsi Energi

Konsumsi energi dari *chest freezer* ditentukan berdasarkan standar [23]. Variasi pemakaian daya dari *chest freezer* tanpa PCM dan dengan Bio-PCM dapat dilihat berturut-turut pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Variasi konsumsi daya *chest freezer* tanpa PCM



Gambar 10. Variasi konsumsi daya *chest freezer* dengan bio-PCM

Dari Gambar 9 dan 10 dapat diperoleh perbandingan jumlah siklus *on/off* dari kompresor *chest freezer*. Untuk *chest freezer* tanpa PCM diperoleh 27 siklus *on/off* dalam rentang waktu 27,4 jam dengan

daya rata-rata 61 W dan waktu operasi kompresor (*running time*) 13,41 jam. Sehingga diperoleh konsumsi energi dari *chest freezer* tanpa PCM sekitar 0,818 kWh dalam 27,4 jam (Tabel 1).

Pengaruh pemasangan bio-PCM pada *chest freezer* dapat diamati dengan jelas dari penurunan jumlah siklus *on/off* yang hanya 1 siklus dalam 27,4 jam. Konsumsi daya rata-rata relatif lebih kecil dibandingkan dengan *chest freezer* tanpa PCM yaitu sebesar 59,53 W. Hal ini disebabkan karena banyaknya jumlah siklus operasi pada *chest freezer* tanpa PCM, dimana pada awal-awal siklus konsumsi daya relatif lebih besar dibandingkan dengan bagian akhir dari siklus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10. Tetapi waktu operasi dari kompresor pada *chest freezer* dengan bio-PCM lebih lama sehingga total konsumsi energinya menjadi sedikit lebih besar yaitu sebesar 0,64% (Tabel 1). Peningkatan konsumsi energi ini masih dibawah 1% jadi masih dapat diasumsikan relatif sama.

Dari hasil studi ini juga diperoleh bahwa optimasi penempatan paket bio-PCM di dalam *chest freezer* masih perlu dilakukan sehingga diperoleh sistem integrasi yang lebih efisien energi dan juga tidak mengurangi kapasitas produk yang didinginkan.

Table 1. Perbandingan konsumsi energi dari *chest freezer* tanpa dan dengan Bio-PCM

Parameter energi	Tanpa Bio-PCM	Dengan Bio-PCM
Rata-rata konsumsi daya (W)	61,01	59,53
Waktu operasi dalam 27,4 jam (h)	13,41	13,83
Konsumsi energi dalam 27,4 jam (kWh)	0,818	0,823
Perbandingan konsumsi energi (%)	-	+0,64%

Catatan: perbandingan konsumsi energi pada rentang waktu 1 siklus lengkap dari *chest freezer* dengan bio-PCM

IV. KESIMPULAN

Studi eksperimental integrasi bio-PCM di dalam sebuah *chest freezer* sudah dilakukan. Hasil studi menunjukkan bahwa:

- (i) Integrasi bio-PCM di dalam *chest freezer* dengan menempelkan paket bio-PCM pada dinding evaporator dapat mengurangi kapasitas produk yang didinginkan;
- (ii) Bio-PCM di dalam *chest freezer* mampu menurunkan jumlah siklus *on/off* dari kompresor secara signifikan dengan tetap menjaga temperatur produk pada batas-batas yang dibutuhkan oleh standar. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja termal dari *chest freezer* dengan bio-PCM sangat baik;
- (iii) Konsumsi energi dari *chest freezer* dengan bio-PCM dapat dikatakan sama dengan *chest freezer* tanpa bio-PCM, tetapi optimasi pada penempatan

bio-PCM di dalam *chest freezer* dapat memberikan potensi penghematan energi;

- (iv) *Chest freezer* dengan bio-PCM sangat potensial untuk diaplikasikan pada daerah yang suplai listriknya terbatas atau sering ada gangguan serta sangat potensial untuk diintegrasikan dengan sumber-sumber energi terbarukan yang ketersediaannya tidak kontinu seperti sumber energi listrik tenaga surya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bali yang telah mendanai penelitian ini melalui dana PNBPN tahun 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coulomb, D. (2008). Refrigeration and cold chain serving the global food industry and creating a better future: two key IIR challenges for improved health and environment. *Trends in Food Science & Technology*, 29, 413-417.
- [2] IIR. (2009). The role of refrigeration in worldwide nutrition - 5th Informatory note on refrigeration and food. Paris. *International Institute of Refrigeration (IIR)*.
- [3] Miller, J. (2016). *Top Markets Report Cold Chain, International Trade Administration*, website: http://trade.gov/topmarkets/pdf/Cold_Chain_Executive_Summary.pdf
- [4] IARW. (2016). *Global cold storage capacity report: Capacity and growth of refrigerated warehousing by country*. International Association of Refrigerated Warehouses.
- [5] Sugiyono, A., Anindhita, Boedoyo, M.S., Adiarso. (2014). *Indonesia Energy Outlook 2014*. Center for Energy Resources Development Technology. Agency for the Assessment and Application of Technology, p. 117
- [6] Cowan, D., Chaer, I., Maidment, G. (2010). Reducing refrigerant emissions and leakage – An overview and feedback from two EU projects. *Proc. Sustainable Refrigeration and Heat Pump Conference*. Stockholm, Sweden, p. 16.
- [7] Yang, D., Shi, S., Xiong, L., Guo, H., Zhang H., Chen X., Wang C., X. Chen X. (2016). Paraffin/palygorskite composite phase change materials for thermal energy storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 44, 228-34.
- [8] Xue H.S. (2016). Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage. *Renewable Energy*, 86, 257-61.
- [9] Su, W., Darkwa, J., Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 48, 373-391.
- [10] Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L.F., Fernández, A.I. (2016). Types, methods, techniques, and applications for micro-encapsulated phase change materials (MPCM): a review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 53, 1059-75.
- [11] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P., Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 14, 615-28.
- [12] Luo, J., Zhao, L., Yang, Y., Song, G., Liu, Y., Chen, L., Tang, G. (2016). Emulsifying ability and cross-linking of silk fibroin microcapsules containing phase change materials. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 147, 144-9.
- [13] Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl. Energy*, 92, 593- 605.
- [14] Oró, E., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M.M., Cabeza, L.F. (2010). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Appl. Energy*, 99, 513-33.
- [15] Liston, L.C., Farnam, Y., Krafcik, M., Weiss, J., Erk, K., Tao, B.Y. (2016). Binary mixtures of fatty acid methyl esters as phase change materials for low temperature applications. *Appl. Therm. Eng.*, 96, 501-7.
- [16] Rasta, I.M., Wardana, I.N.G., Hamidi, N., Sasongko, M.N. (2016). The role of soya ester in water based PCM for low temperature cool energy storage. *Journal of Thermodynamics*. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5384640>.
- [17] Rasta, I.M. and Suamir, I.N. (2018). The role of vegetable oil in water-based phase change material for medium temperature refrigeration. *Journal of Energy Storage*, 15, 368-378.
- [18] Onyejekwe, D. (1989). Cold storage using eutectic mixture of NaCl/H₂O: an application to photovoltaic compressor vapour freezers. *Solar Wind Technology*, 6, 11–8.
- [19] Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D. (2009). Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *Int. J. Refrig.*, 32, 1634-44.
- [20] Cheralathan, M., Velraj, R., Renganarayanan, S. (2007). Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-base cool thermal energy storage system. *Int J Energy Res*, 31, 1398–413.
- [21] Oro, E., Miro, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F. (2012). Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 35, 984-991.

