

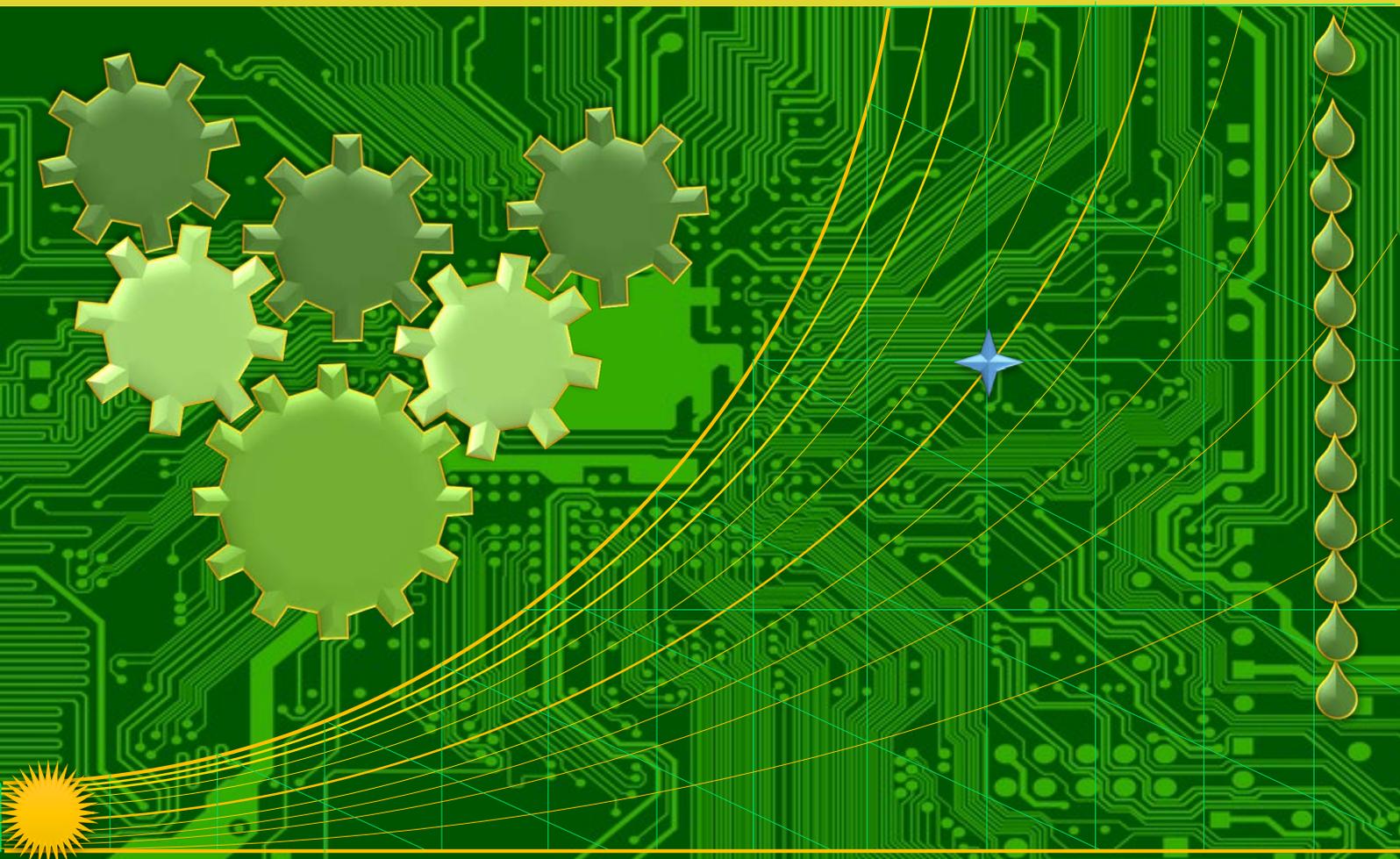
p-ISSN 2655-9145

e-ISSN 2684-8201



JAMETECH

**Journal of
APPLIED MECHANICAL ENGINEERING
AND GREEN TECHNOLOGY**





JAMETECH

Journal of APPLIED MECHANICAL ENGINEERING AND GREEN TECHNOLOGY

Gedung P3M, Lt.1 Politeknik Negeri Bali, Bukit Jimbaran
PO BOX 1064, Kuta Selatan, Badung, Bali - Indonesia
Telp. (+62)361 701981 Fax. (+62)361 701128
Email: jametech@pnb.ac.id

JOURNAL TEAM

Advisors

I Nyoman Abdi (*Director of Politeknik Negeri Bali*)

A.A. Ngurah Bagus Mulawarman (*First Vice Director of Politeknik Negeri Bali*)

I Putu Mertha Astawa (*Head of Research Centre and Community Services of Politeknik Negeri Bali*)

Anak Agung Ngurah Gde Sapteka (*Head of Scientific Publication Unit of Politeknik Negeri Bali*)

Editor-in-Chief

I Nyoman Suamir

Associate Editor

I Made Rasta

Editorial Boards

I Dewa Made Cipta Santosa (*Politeknik Negeri Bali*)

I Made Suarta (*Politeknik Negeri Bali*)

I Putu Gede Sopan Rahtika (*Politeknik Negeri Bali*)

I Wayan Gede Santika (*Politeknik Negeri Bali*)

Putu Wijaya Sunu (*Politeknik Negeri Bali*)

Adi Winarta (*Politeknik Negeri Bali*)

Nyoman Sugiarta (*Politeknik Negeri Bali*)

Made Ery Arsana (*Politeknik Negeri Bali*)

I Gusti Agung Bagus Wirajati (*Politeknik Negeri Bali*)

Kasni Sumeru (*Politeknik Negeri Bandung*)

Ardiyansyah Yatim (*Universitas Indonesia*)

Mirmanto (*University of Mataram*)

Language Editors

I Made Rai Jaya Widanta (*Politeknik Negeri Bali*)

Peer Reviewers

Nandy Setiadi Djaya Putra (*Mechanical Engineering Department, Universitas Indonesia*)

Wayan Nata Septiadi (*Mechanical Engineering Department, Universitas Udayana, Indonesia*)

I Dewa Gede Ary Subagia (*Mechanical Engineering Department, Universitas Udayana, Indonesia*)

Nyoman Budiarsa (*Mechanical Engineering Department, Universitas Udayana, Indonesia*)

I Gusti Ketut Puja (*Mechanical Engineering Department, Universitas Sanata Dharma, Indonesia*)

Tineke Saroinsong (*Mechanical Engineering Department, Politeknik Negeri Manado, Indonesia*)

Herman Saputro (*Universitas Sebelas Maret, Solo, Indonesia*)

Mulya Juarsa (*Puspitek BATAN, Serpong, Indonesia*)

Administrator

Ni Putu Werdiani Utami

PREFACE

Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology (Jametech) enhances research developments and publication of original research papers, review articles, short reports and experimental details. It is essential reading for all those wishing to keep well informed of research and industrial news in the fields of Applied Mechanical Engineering and Green Technology. The journal also provides platforms for debate and dissemination of research findings whilst also facilitating the discussion of new research areas and techniques.

The scope of the journal encompasses research into broad aspects in Mechanical Engineering, Green Technology and associated fields include Mechanics, Materials, Manufacturing and Production, Design and Construction, Automotive, Refrigeration Heating Ventilating and Air Conditioning (RHVAC), Mechanical and Plumbing for Buildings, Sustainable Energy Management and Technology, New, and Renewable Energy Technologies. This is particularly important in these times of rapid introduction of alternative new and renewable energy sources and the emergence of new sustainable energy technology. The journal also brings the development of new research approaches in the area.

The journal is managed by Department of Mechanical Engineering and published by the Center of Research and Community Services of Politeknik Negeri Bali three times in a year: March, July and November. Papers in this journal are published in English and Indonesian. Current publication of the Jametech is volume 2 issue 2 published in July 2021. The current issue includes 8 papers which covers 57 pages from 40 to 96.

Best Regards,
JAMETECH Editorial Team

TABLE OF CONTENTS

Meningkatkan kinerja motor induksi menggunakan teknologi fuzzy logic controller berbasis artificial intelligence	40-47
<i>I Putu Sutawinaya dan A.A. Ngurah Made Narottama</i>	
Sistem refrigerasi CO ₂ : solusi alternatif sistem refrigerasi ramah lingkungan untuk aplikasi supermarket	48-59
<i>I Nyoman Suamir, Achmad Wibolo, I Wayan Adi Subagia, I Putu Eka Idrayana dan A.A. Ngurah Dwi Indra Putra</i>	
Studi ekeperimental aplikasi inverter pada pompa untuk optimasi energi cooling tower	60-65
<i>Sudirman, I Made Sugina, Ida Bagus Gde Widiantera, I Made Rai Dipa Valentine dan I Dewa Gede Liondi Eka Watara</i>	
Analisa kotoran air pengisi ketel uap pipa api di hotel Conrad Bali	66-71
<i>I Nengah Ludra Antara, I Nyoman Sutarna, dan Achmad Wibolo</i>	
Analisa kinerja cooling tower tipe counter flow induced draft	72-77
<i>Luh Putu Ike Midiani, I Wayan Temaja, I Putu Merta Adnyana, I Kadek Dwiana dan I Made Prasana Yoga</i>	
Teknologi refrigerasi ramah lingkungan menggunakan energi matahari menuju green campus Politeknik Negeri Bali.....	78-84
<i>I Made Rasta, Adi Winarta, Putu Wijaya Sunu, I Wayan Adi Subagia dan I Gusti Ketut Puja</i>	
Pengujian mekanis komposit rice starch – organic clay sebagai bahan alternatif kotak pendingin makanan	85-90
<i>Made Ery Arsana, I Kadek Ervan Hadi Wiryanta, I Putu Adi Wiguna, dan I Nyoman Artha Gunawan</i>	
Karbon dioksida refrigeran alami untuk sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial	91-96
<i>Ketut Bangse, I Nyoman Suamir, I Dewa Made Susila, I Ketut Suparwika dan I Putu Sandi Raditya</i>	



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Meningkatkan kinerja motor induksi menggunakan teknologi *fuzzy logic controller* berbasis *artificial intelligence*

I Putu Sutawinaya^{1*} dan A.A. Ngurah Made Narottama¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung Bali 80364, Indonesia

*Email: sutawinaya_putu@pnb.ac.id

Abstrak

Motor induksi adalah merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang umum digunakan pada industri-industri karena memiliki beberapa keuntungan, diantaranya relatif murah, kokoh serta handal. Namun kelemahan motor induksi saat terjadi perubahan torsi beban secara mendadak, maka akan terjadi penurunan kinerja (performansi) motor. Hal tersebut akan berpengaruh terhadap kestabilan putaran motor, di mana overshoot maupun undershoot relatif tinggi serta risetime relatif lambat. Untuk mengantisipasi hal tersebut dibutuhkan sistem kontrol kecepatan motor induksi yang tentunya dapat meningkatkan kinerja motor induksi tersebut. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian terhadap sistem kontrol kecepatan motor induksi menggunakan teknologi Fuzzy Logic Controller (FLC) melalui simulasi perangkat lunak Matlab. Dilakukan pengujian terhadap perubahan kinerja motor induksi melalui pemberian torsi beban serta setpoint yang berubah-ubah. Adapun hasil simulasi menunjukkan bahwa performansi motor induksi, seperti undershoot, overshoot dan steady state error relatif kecil serta peak time, risetime dan settling time relatif cepat. Sistem yang dirancang mampu menurunkan arus start rata-rata sekitar 72,7% dan torsi awal rata-rata sekitar 81,8% terhadap kondisi idealnya.

Kata kunci: Motor induksi, fuzzy logic controller dan matlab/simulink

Abstract: An induction motor is an alternating current (AC) electric motor which is commonly used in industries because it has several advantages, including relatively cheap, sturdy and reliable. However, the weakness of an induction motor when there is a sudden change in load torque, there will be a decrease in motor performance. This will affect the stability of the motor rotation, where the overshoot and undershoot are relatively high and the rise time is relatively slow. To anticipate this, an induction motor speed control system is needed which can certainly improve the performance of the induction motor. In this study, an induction motor speed control system was tested using Fuzzy Logic Controller (FLC) technology through the Matlab software simulation. Performed tests on changes in the performance of the induction motor through the provision of load torque and changing setpoints. The simulation results show that the performance of the induction motor, such as undershoot, overshoot and steady state error, is relatively small and the peak time, rise time and settling time are relatively fast. The system designed is able to reduce the starting current by an average of about 72.7% and an average starting torque of about 81.8% of the ideal conditions.

Keywords: Induction motor, fuzzy logic controller and matlab/simulink

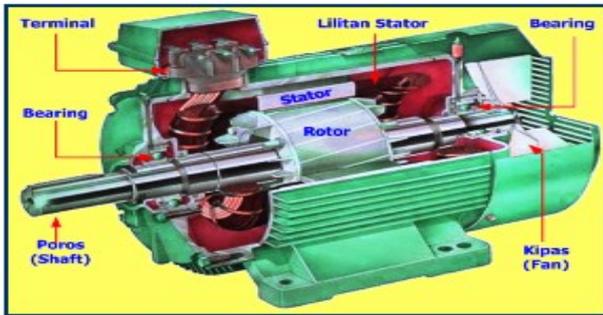
Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Pada umumnya mesin-mesin penggerak yang digunakan pada industri menggunakan motor induksi tiga fasa dengan daya keluaran di atas 1 PK. Prinsip kerja motor ini berdasarkan proses induksi yang terjadi pada bagian rotor, di mana arus yang mengalir pada kumparan rotor merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan antara putaran rotor dengan medan putar stator yang dihasilkan oleh kumparan stator. Secara singkat prinsip kerja motor induksi tiga fasa dapat dijelaskan sebagai berikut [1]:

- Apabila sumber tegangan tiga fasa disuplai pada kumparan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan angular (ω_s).
- Medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor, sehingga pada kumparan stator akan terbangkitkan gaya gerak listrik (ggl) induksi.
- Karena rangkaian rotor merupakan rangkain tertutup, maka akan timbul arus rotor yang diakibatkan oleh ggl tersebut.
- Adanya arus stator dan arus rotor akan menimbulkan torsi elektromagnetik (T_e) pada motor.

- Bila Torsi mula yang dihasilkan cukup besar untuk memikul beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
- Agar tegangan terinduksi, maka diperlukan adanya perbedaan antara kecepatan angular dari medan putar stator (ω_s) dan kecepatan putar rotor (ω_r).



Gambar 1. Konstruksi motor induksi tiga fasa [1]

Kelebihan dari motor induksi bila dibandingkan dengan jenis motor listrik lainnya adalah : konstruksinya yang sederhana, harganya relatif murah, putarannya relatif konstan, perawatan lebih mudah serta tidak membutuhkan motor lain untuk pengasutannya. Kekurangannya : putarannya sulit diatur, arus asut relatif tinggi berkisar 5 sampai 6 kali arus nominalnya serta putaran kecepatan motor tidak konstan bila torsi beban berubah-ubah [1]. Untuk mendapatkan kecepatan motor yang relatif konstan, maka dibutuhkan suatu rangkaian kontrol kecepatan.

Sistem kontrol kecepatan open loop controller melalui pengaturan frekuensi adalah merupakan sistem kontrol konvensional yang umum digunakan pada industri. Namun kelemahan sistem kontrol ini menghasilkan respon kecepatan yang kurang smooth dan sering kali motor mengalami kejenuhan, sehingga memerlukan tambahan inverter. Kontroler PID (Proportional-Integral-Derivative) merupakan sistem kontrol close loop controller yang juga merupakan sistem kontrol konvensional. Kontroler jenis ini dapat memberikan respon kecepatan yang lebih baik bila dibandingkan dengan open loop controller. Namun kelemahan kontroler PID ini antara lain : membutuhkan perhitungan matematik yang rumit dan kompleks serta sulit mendapatkan performance yang bagus karena overshoot dan undershoot masih relatif tinggi. Apabila terjadi perubahan dinamika proses, seperti perubahan beban atau penggantian motor yang sering kali dialami pada industri-industri, maka parameter kontroler motor (K_p , K_i , dan K_d) perlu ditala (tuning) kembali. Di mana proses pentalaan (tuning) tersebut memerlukan waktu yang relatif lama dan kurang efisien.

Untuk mengatasi kelemahan dari sistem kontrol konvensional seperti yang telah diuraikan di atas, maka mulai dikembangkan sistem kontrol yang berbasis pada teknologi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence"AI"). Sistem kontrol berbasis AI yang akhir-akhir ini banyak dikembangkan antara lain: sistem kontrol menggunakan teknologi Fuzzy Logic, Neural Artificial Intelligence maupun Artificial Neural Networks. Sistem kontrol berbasis teknologi Fuzzy Logic yang pernah dikembangkan oleh Penulis diantaranya adalah sistem kontrol menggunakan teknologi ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System)

dan Fuzzy Logic Controller (FLC). FLC yang diaplikasikan pada pengaturan kecepatan motor induksi dapat memenuhi kriteria performance motor yang relatif tinggi. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab diperoleh hasil : overshoot dan undershoot relatif kecil, serta rise time dan settling time relatif cepat. [2].

2. Pemodelan Motor Induksi dan Perancangan FLC

2.1. Rangkaian Ekvivalen Motor Induksi

Pada Gambar 2 memperlihatkan rangkaian ekvivalen motor induksi tiga fasa simetris bila ditinjau dalam rangkaian rotor yang berputar (*rotating frame*) [3,4]. Rangkaian stator digambarkan sepanjang sumbu-sumbu as, bs, dan es, sedangkan rangkaian rotor digambarkan sepanjang sumbu-sumbu ar, br, dan cr.

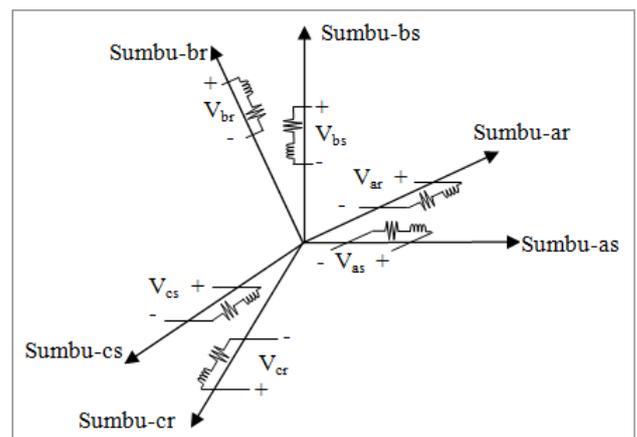
Berdasarkan Gambar 2 dapat dijabarkan persamaan tegangan stator dan rotor sebagai berikut :

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \tag{1}$$

$$V_{abcr} = r_s i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \tag{2}$$

di mana $p = d/dt$, dan selanjutnya persamaan menjadi sebagai berikut;

$$p \lambda_{abcs} = L_s i_{abcs} + L_s i_{abcr} \tag{3}$$



Gambar 2. Ekvivalen stator dan rotor motor induksi dalam sistem koordinat a-b-c

Bentuk matriks dari L_s dan L_r dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Gambar 3 menunjukkan rangkaian ekvivalen sebuah motor induksi tiga fasa yang umum digunakan di industri pada sisi stator dalam sistem koordinat d-q.

Untuk mentransformasikan persamaan dari sistem koordinat a-b-c ke sistem koordinat d-q, maka digunakan persamaan:

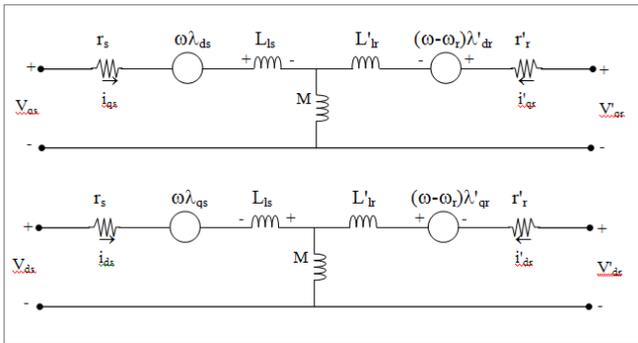
$$f_{qds} = T(\theta) f_{abcs}, \tag{5}$$

di mana variabel f dapat berupa tegangan, arus maupun fluks. Tegangan stator dapat ditulis dengan persamaan :

$$\vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s + j\omega_s \vec{\lambda}_s \tag{6}$$

dan tegangan rotor dengan persamaan :

$$\vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_r + j(\omega_s - \omega_r) \vec{\lambda}_r \tag{7}$$



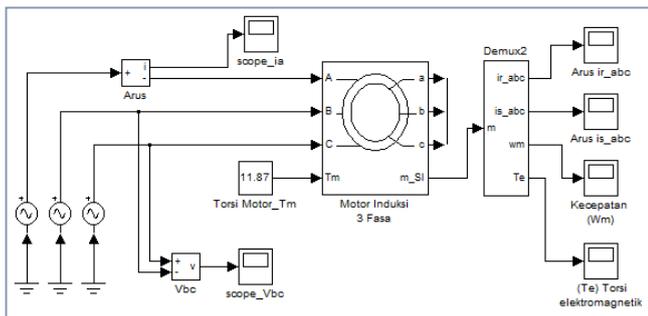
Gambar 3. Rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dalam sistem koordinat d-q

Torsi elektromagnetik (T_e) merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor, dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_e = pM (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \tag{8}$$

Kecepatan putaran rotor dinyatakan sebagai fungsi dari torsi elektro-magnetik, torsi beban yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{J}{p} \frac{d}{dt} \omega_r + K_G \omega_r = T_e - T_l \tag{9}$$



Gambar 4. Pemodelan motor induksi menggunakan simulasi Simulink/Matlab

Tegangan stator yang merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor dalam bentuk matrik adalah sebagai berikut:

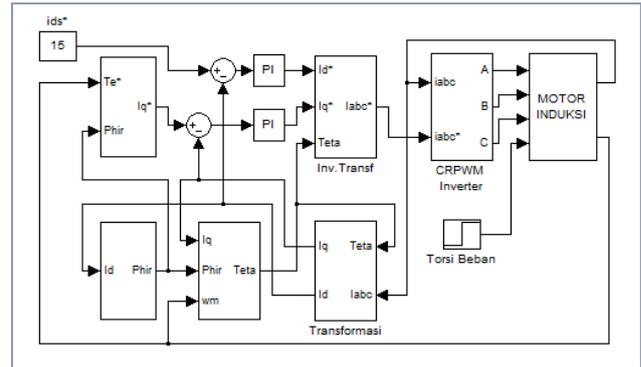
$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_s L_s & pM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + pL_s & \omega_s M & pM \\ pM & -(\omega_s - \omega_r)M & R_r + pL_r & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & pM & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

Pada Gambar 4 ditampilkan pemodelan motor induksi tiga fasa yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab fasilitas Simulink.

2.2. Metode Field Oriented Control

Field Oriented Control (FOC) adalah suatu metode pengaturan medan pada motor AC, di mana dari sistem *coupled* dirubah menjadi sistem *decoupled*. Pada sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, dengan demikian torsi dan fluksi juga dapat diatur secara terpisah.[5,6].

Blok diagram yang menunjukkan proses perhitungan aliran arus listrik pada motor induksi dengan menggunakan metode FOC ditunjukkan seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram blok metode FOC Motor Induksi

Torsi referensi (T_e^*) merupakan variabel keluaran dari unit kontroler berupa sinyal kontrol (U), dan merupakan masukan terhadap arus torsi (i_T). Arus torsi referensi (i_T^*) dan arus medan referensi (i_M^*) dikonversikan ke dalam arus fasa referensi (i_a^*, i_b^*, i_c^*) pada inverter. Vektor transformasi untuk mengkonversikan komponen arus stator referensi sumbu d,q (i_{ds}^*, i_{qs}^*) ke dalam sumbu a,b,c sebagai arus stator referensi (i_a^*, i_b^*, i_c^*) dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta_e) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_e) & \left(\frac{1}{2}\sin(\theta_e) + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta_e)\right) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta_e) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_e) & \left(\frac{1}{2}\sin(\theta_e) - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta_e)\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix}$$

2.3. Perancangan Simulasi Fuzzy Logic Controller

Metode yang digunakan pada sistem kontrol *Fuzzy Logic Controller* (FLC) ini adalah metode statik, artinya sifat fungsi keanggotaan (*membership function*) bekerja dengan rentang kerja (*range*) tetap, yaitu antara -6 sampai dengan 6 untuk masukannya (variabel input), dan antara -0,09 sampai dengan 0,09 untuk keluarannya (variabel output). Penentuan rentang kerja tersebut harus dilakukan sefleksibel mungkin, agar sistem mampu melakukan *tracking setpoint* dengan baik [7,8].

Dalam merancang FLC yang perlu diperhatikan adalah variabel *input* (masukan) *error* (e) dan perubahan / *delta error* (Δe), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$e(k) = sp - y(k) \tag{10}$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \tag{11}$$

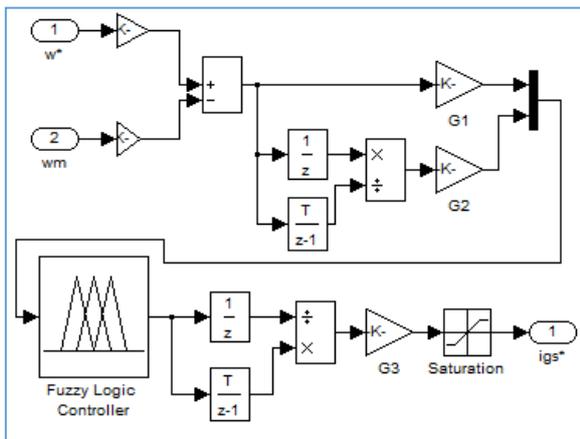
di mana sp adalah *setpoint* (kecepatan referensi ' ω -ref') dan y adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan k dan $k-1$ adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem.

Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan perubahan atau delta *error* kecepatan, yang dinyatakan dalam persamaan $e(k)$ dan $\Delta e(k)$ di atas. Sedangkan semesta pembicaraan dari aksi kontrol adalah torsi referensi, yang didefinisikan sebagai berikut :

$$\Delta Te^*(k) = Te^*(k) - Te^*(k-1) \tag{12}$$

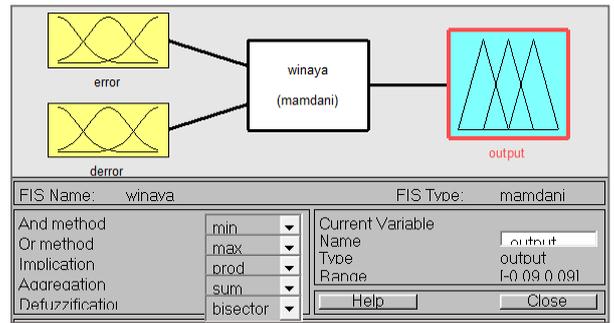
di mana $Te^*(k)$ adalah torsi referensi, dan ΔTe^* adalah perubahan torsi referensi pada urutan sampling ke- k .

Pemodelan FLC dengan menggunakan metode *Fuzzy Inference System* (FIS) seperti pada Gambar 6.

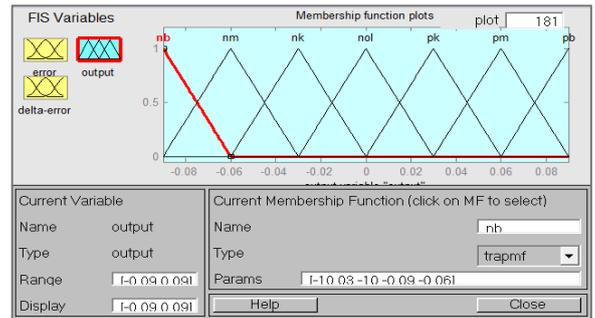


Gambar 6. Pemodelan FLC menggunakan metode FIS

Model *Fuzzy Inference System* (FIS) yang digunakan adalah menggunakan model Mamdani yang dikembangkan dari hasil penelitian sebelumnya [9,10]. Adapun *setting* variabel-variabel *membership fuction* (fungsi keanggotaan) pada Simulink/Matlab adalah seperti ditunjukkan Gambar 7.

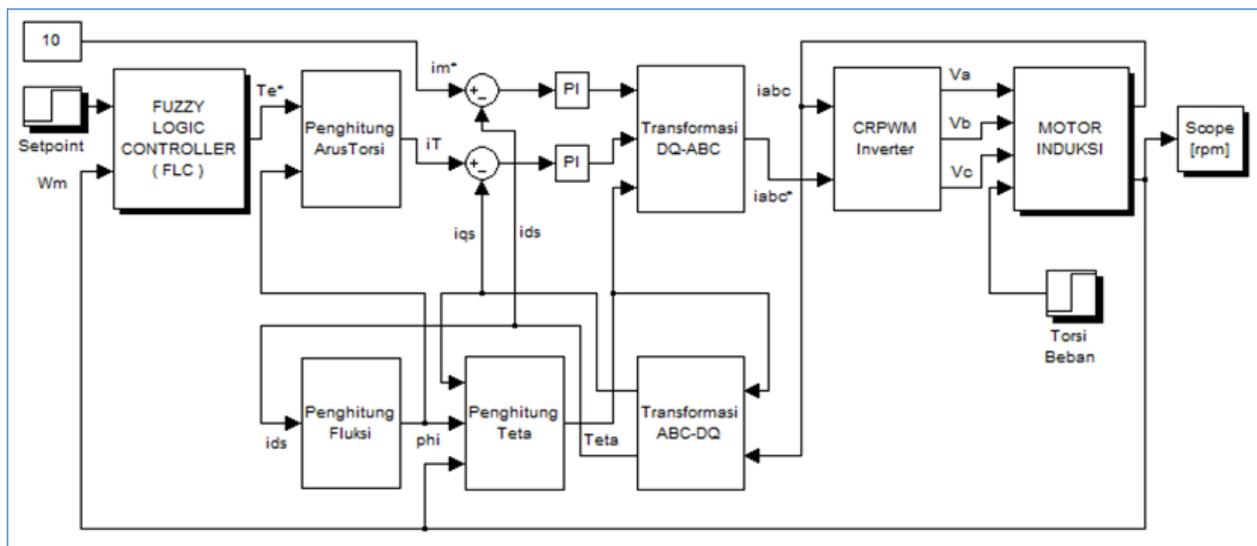


Gambar 7. FIS editor model Mamdani



Gambar 8. Membership function untuk variabel input, output dan delta error

Gambar 8 menunjukkan *membership function* (fungsi keanggotaan) untuk variabel input (*error* dan *delta error*) maupun *output*. Variabel *input* di-*setting* dari rentang kerja antara -6 sampai dengan 6, dan variabel *output* dengan rentang kerja antara -0,09 sampai dengan 0,09 dalam bentuk segitiga untuk (nm, nk, nol, pk, pm) dan trapesium (nb, pb).



Gambar 9. Blok diagram sistem kontrol pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan FLC

Mengembangkan dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [2,3,5], maka blok diagram sistem

kontrol dengan metode FOC menggunakan sistem kontrol FLC disimulasikan menggunakan fasilitas Simulink dan

Power System Blockset dari perangkat lunak MATLAB. Adapun blok diagram sistem kontrol dimaksud adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

Pemodelan dari sistem kontrol FLC yang dirancang menggunakan metode *field oriented control* (FOC-*decoupled*), di mana torsi elektromagnetik (T_e) diupayakan konstan bila terjadi perubahan parameter-parameter motor maupun perubahan kecepatan. Harapannya, respon kecepatan putar motor induksi tersebut relatif stabil terhadap perubahan parameter-parameter yang akan terjadi selama motor beroperasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Umum

Model matematis dari unit motor induksi dan sistem kontrol FLC yang dirancang disimulasikan menggunakan perangkat lunak Matlab fasilitas Simulink. Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan sebagai acuan dalam pengujian sistem meliputi : daya 3 HP, input sumber 220V/fasa, frekuensi 60 Hz, nilai konstanta mekanik (gesekan) 0,06 dan 0,03 dengan torsi beban (TL) konstan 20 N.m.

Langkah pengujian sistem yang dirancang dilakukan dalam 3 tahap pengujian, di mana setiap tahap diamati respon kecepatan putar motor induksi dari hasil simulasi. Tahap pertama dilakukan pengujian sistem dalam kondisi ideal, di sini motor induksi diuji tanpa pengasutan sistem kontrol. Tahap kedua dan tahap ketiga dilakukan pengujian sistem menggunakan pengasutan FLC dengan kecepatan referensi (*setpoint*) tetap (konstan) maupun berubah.

Sebelum proses simulasi dimulai, parameter-parameter sistem harus ditala (*tuning*) terlebih dahulu agar diperoleh respon kinerja motor yang baik. Dalam hal ini *tuning* parameter sistem dilakukan secara coba-coba, perkiraan-perkiraan maupun secara heuristik hingga diperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan. Adapun parameter sistem yang digunakan dari hasil *tuning* motor adalah :

- *Time sampling* sistem kontrol (T_s) = 0,00005 detik.
- *Gain error* (G_1) dan *gain delta error* (G_2) = 0,01.
- Sinyal kontrol (T_e^*) dibatasi maksimum 20 Nm.
- *Setpoint* tetap (konstan) = 1800 rad/s
- *Setpoint* berubah dari 1500-1800 [rad/s].

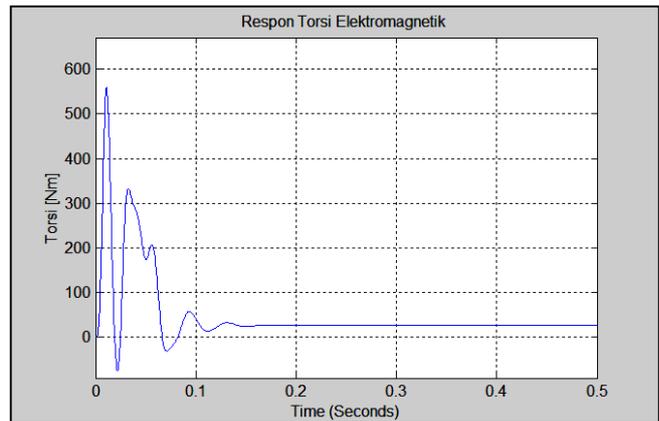
3.2. Pengujian Tanpa Pengasutan

Respon sistem yang diamati dari hasil pengujian tahap pertama, yakni sistem tanpa pengasutan. Dalam hal ini yang diamati bagaimana kinerja motor, diantaranya torsi elektromagnetik, arus stator dan arus rotor maupun putaran motor seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan berturut-turut Gambar 10 sampai Gambar 13.

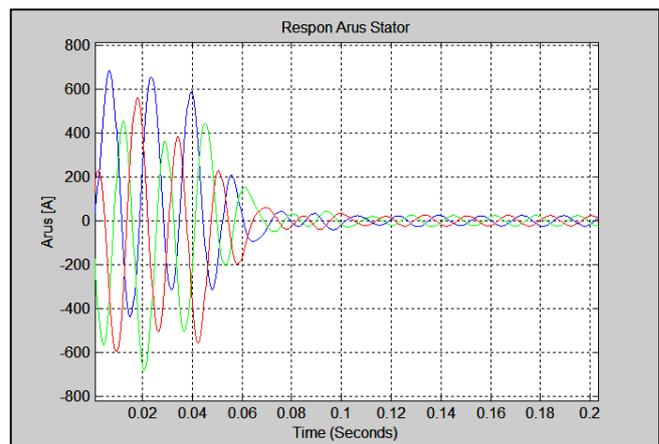
Tabel 1. Respon kecepatan motor induksi

Respon sistem (Kinerja motor)	Tanpa	Pengasutan FLC	
	Pengasutan (kondisi ideal)	kondisi <i>setpoint</i> tetap	berubah
<i>Max overshoot</i> [rad/s]	1875	1813	1806
<i>Min undershoot</i> [rad/s]	1745	1798	1795
<i>Steady state</i> [rad/s]	1785	1500	1800
% <i>Overshoot</i>	5,04	0,71	0,33
<i>Peak time</i> [s]	0,06	0,25	0,22
<i>Rise time</i> [s]	0,03	0,15	0,14
<i>Settling time</i> [s]	0,15	0,20	0,20
<i>steady state error</i> [%]	0,1	0,5	0,5

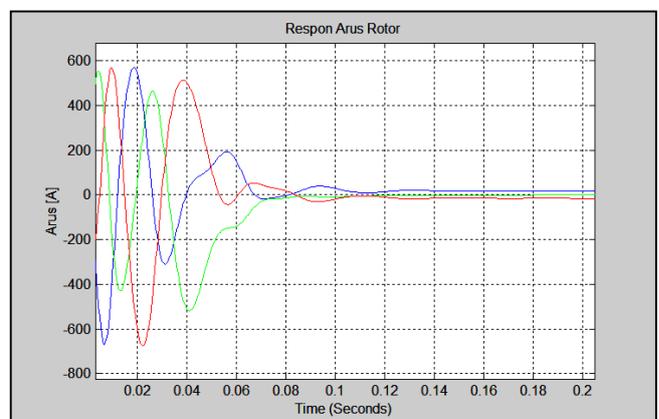
Pada Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi terhadap torsi elektromagnetik, di mana saat awal motor di-*start* terjadi lonjakan torsi hingga mencapai 550 Nm dan berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil 20 Nm sesuai *setting* awal dalam kurun waktu 0,2s. Arus stator maupun arus rotor pada saat awal (arus *start*) relatif tinggi seperti ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12. Arus *start* mencapai rata-rata sekitar 525 A setelah 0,07s, selanjutnya turun hingga mencapai stabil sekitar 20 A sesuai arus nominalnya.



Gambar 10. Respon Torsi Elektromagnetik

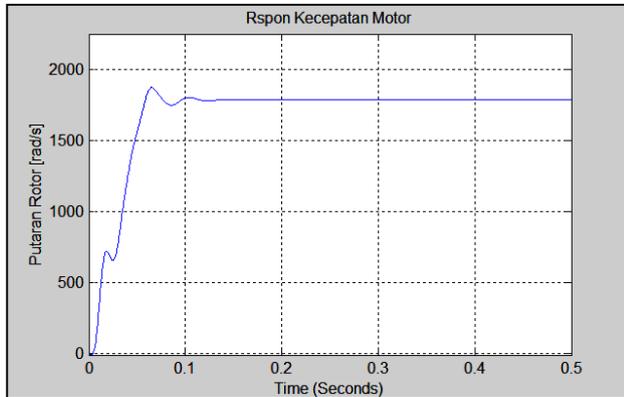


Gambar 11. Respon Arus Stator Motor Induksi



Gambar 12. Respon Arus Rotor Motor Induksi

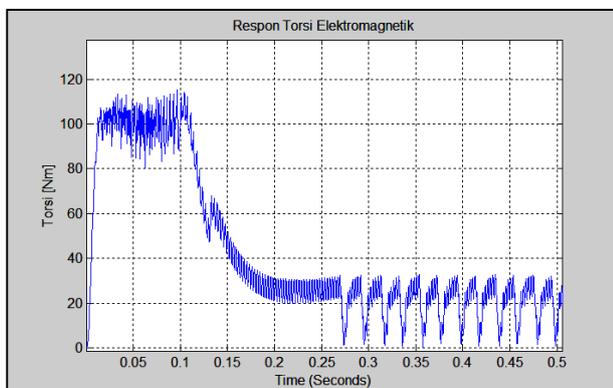
Sedangkan pada Gambar 13 menunjukkan respon kecepatan motor induksi, di mana pada kondisi ini yang dapat diamati adalah : *max overshoot* mencapai 1875 rad/s dan *min undershoot* 1745 rad/s pada posisi *steady state* 1785 rad/s atau % *overshoot* sekitar 5,04%. *Peak time*, *rise time* dan *settling time* secara berturut-turut adalah 0,06 s, 0,03 s dan 0,15 s dengan *steady state error* sekitar 0,1 %.



Gambar 13. Respon kecepatan Motor Induksi ideal

3.3. Pengujian dengan Pengasutan FLC

Tahap kedua dilakukan pengujian menggunakan pengasutan sistem kontrol FLC dengan *setpoint* tetap 1800 rad/s. Respon sistem yang diamati bagaimana kinerja motor terhadap torsi elektromagnetik, arus rotor maupun respon kecepatannya. Adapun respon yang ditunjukkan adalah berturut-turut seperti pada Gambar 14, Gambar 15 dan Gambar 16.

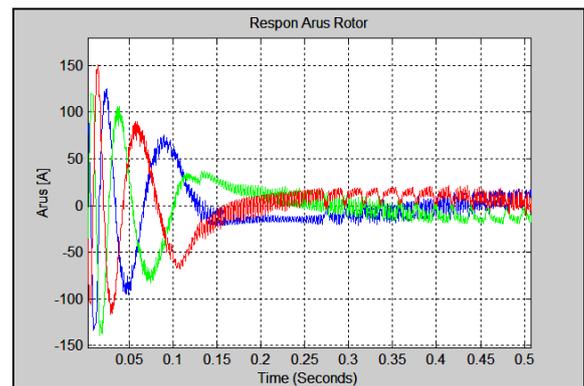


Gambar 14. Respon torsi elektromagnetik saat *setpoint* tetap

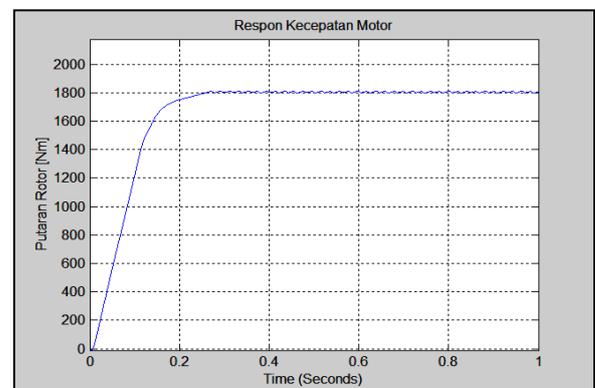
Hasil simulasi seperti ditampilkan pada Gambar 14, menunjukan torsi elektromagnetik saat awal (*start*) mencapai rata-rata sekitar 100 Nm. Torsi berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil rata-rata sekitar 20 Nm saat 0,27s. Sedangkan arus rotor saat *start* mencapai sekitar 150 A dan turun mencapai stabil rata-rata sekitar 20 A saat 0,27s.

Begitu juga terhadap respon kecepatan motor seperti ditampilkan pada Gambar 16 dan Tabel 1. Pada kondisi ini yang dapat diamati adalah : *max overshoot* mencapai 1813 rad/s dan *min under-shoot* 1798 rad/s pada *steady state* 1800 rad/s atau *overshoot* sekitar 0,71%. *Peak time*, *rise time* dan

settling time secara berturut-turut adalah 0,25 s, 0,15 s dan 0,20 s dengan *steady state error* sekitar 0,5 %.

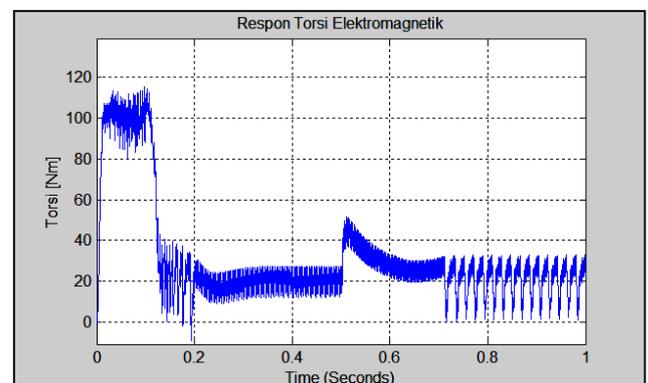


Gambar 15. Respon arus rotor saat *setpoint* tetap



Gambar 16. Respon kecepatan motor saat *setpoint* tetap

Pengujian tahap ketiga adalah untuk menguji keandalan (*reability*) sistem kontrol FLC yang dirancang dengan *setpoint* berubah, dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s. Adapun hasil pengujian adalah seperti ditampilkan secara berturut-turut pada Gambar 17, Gambar 18 dan Gambar 19.



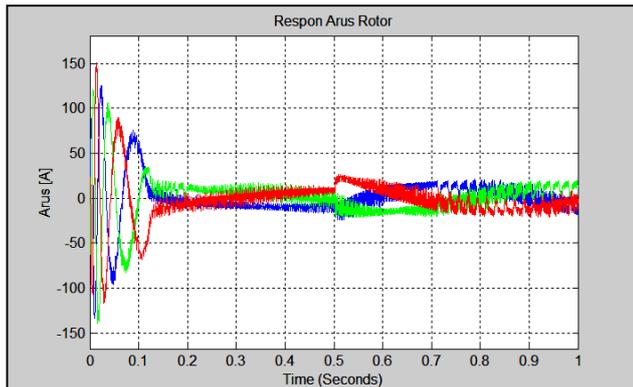
Gambar 17. Respon torsi elektromagnetik saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s

Hasil simulasi seperti ditampilkan pada Gambar 17, menunjukan torsi elektromagnetik saat awal (*start*) mencapai rata-rata sekitar 100 Nm. Torsi berangsur-angsur turun hingga mencapai stabil rata-rata sekitar 20 Nm saat 0,27s. Namun naik kembali hingga mencapai sekitar 50 Nm ketika

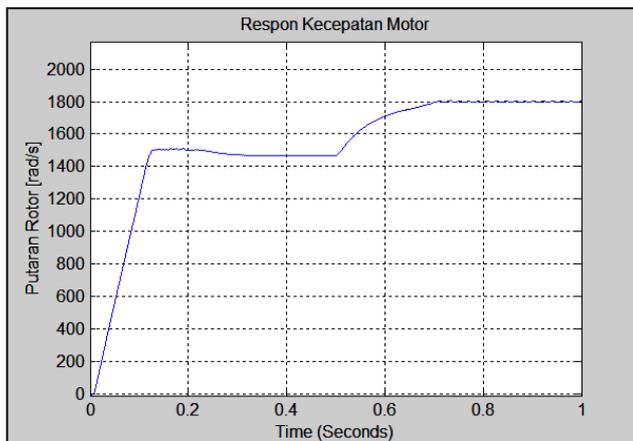
setpoint berubah dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s saat 0,5s, dan turun ke posisi stabil sekitar 20 Nm saat 0,7s.

Sedangkan arus rotor saat *start* mencapai sekitar 150 A dan turun mencapai stabil rata-rata sekitar 20 A saat 0,15s. Namun arus naik kembali hingga mencapai sekitar 30 A ketika *setpoint* berubah dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s saat 0,5s, dan turun ke posisi stabil sekitar 20 A saat 0,7s.

Begitu juga terhadap respon kecepatan motor seperti ditampilkan pada gambar 19 dan tabel 1. Pada pengujian tahap ketiga ini lebih difokuskan mengamati perubahan sistem saat terjadi perubahan kecepatan (*setpoint*), yakni dari 1500 rad/s ke 1800 rad/s.



Gambar 18. Respon arus rotor saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s



Gambar 19. Respon kecepatan motor saat *setpoint* berubah dari 1500 ke 1800 rad/s

Adapun respon kecepatan motor yang dapat diamati seperti ditunjukkan pada gambar 19 adalah kecepatan putar motor relatif stabil. Respon sistem menunjukkan bahwa pencapaian posisi *steady state* sekitar 1500 rad/s saat *setpoint* 1500 rad/s dan sekitar 1800 rad/s saat *setpoint* 1800 rad/s. *Max overshoot* mencapai 1806 rad/s dan *min undershoot* 1795 rad/s atau *overshoot* sekitar 0,33%. *Peak time*, *rise time* dan *settling time* secara berturut-turut adalah 0,22 s, 0,14 s dan 0,20 s dengan *steady state error* sekitar 0,5 %.

4. Kesimpulan

Untuk memperbaiki kinerja dari sebuah motor induksi, maka dibutuhkan adanya penambahan pengasutan berupa rangkaian sistem kontrol kecepatan. Telah dilakukan

pengujian menggunakan sistem kontrol FLC berbasis AI untuk pengasutan kecepatan motor induksi dengan hasil seperti yang telah diuraikan di atas.

Untuk dapat menganalisis keandalan (*reliability*) sistem kontrol FLC yang dirancang, sistem diuji melalui beberapa tahap pengujian yang diawali dari mengamati kinerja motor dalam kondisi tanpa pengasutan (*ideal*). Selanjutnya motor induksi diberikan pengasutan menggunakan sistem kontrol FLC melalui dua kondisi dinamik, yakni kondisi *setpoint* tetap (*konstan*) dan kondisi *setpoint* berubah.

Berdasarkan hasil analisis dari respon kecepatan motor sebelum maupun setelah diberikan pengasutan, secara umum dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem kontrol FLC mampu memperbaiki kinerja motor induksi yang diuji. Sistem kontrol FLC yang dirancang mampu menunjukkan performansi yang lebih baik, di mana respon sistem kembali ke posisi *setpoint* relatif cepat dengan *overshoot* relatif kecil. Disamping itu, penggunaan sistem kontrol FLC pada motor induksi tersebut mampu menurunkan arus start rata-rata sekitar 72,7% dan torsi awal rata-rata sekitar 81,8% terhadap kondisi idealnya.

Namun sistem yang dirancang masih menunjukkan kelemahan, di mana posisi *peak time*, *rise time* dan *settling time* relatif lambat serta *steady state error* lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi idealnya. Respon sistem belum mampu menunjukkan performansi yang optimal dan kurang smooth. Hal ini ditengarai karena kesulitan mengatur nilai *membership function* pada Fuzzy Logic untuk mendapatkan nilai yang relatif tepat, disamping itu karena dalam penentuan *rule base* masih secara coba-coba atau heuristik.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada tim redaksi Jametech atas diterima dan diterbitkan artikel ini. P3M selaku pengelola serta para peneliti lain atas masukannya. Semoga artikel ini dapat menginspirasi dan dikembangkan kembali oleh para peneliti lainnya. Harapannya, dari ide yang sederhana berkembang menjadi lebih luas sehingga bermanfaat untuk kemajuan teknologi ke depan.

Daftar Pustaka

- [1] P. Sumardjati, S. Yahya dan A. Mashar, "Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik jilid 3", Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta, 2008.
- [2] I.P. Sutawinaya, "Pengembangan Model Transformasi Clarke-Park pada Pengendalian Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab/Simulink", Logic, 13, 2013, h. 1-8
- [3] W.R. Ardana dan I.P. Sutawinaya "Pemodelan Sistem Kontroler Logika Fuzzy pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Perangkat Lunak Matlab/Simulink", Matrix, 7, 2017, h. 1-6
- [4] Heber, L. Xu, and Y. Tang, "Fuzzy Logic Enhanced Speed Control of an Indirect Field Oriented Induction Machine Drive", IEEE Transactions on Power Electronics, 12, 1997, pp. 772-773.
- [5] I.P. Sutawinaya, "Pengembangan model Fuzzy Mamdani untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Metode Kontrol Field Oriented", Logic, 13, 2013, h. 74
- [6] Z. Li and L. Xu, "On-Line Fuzzy Tuning of Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives", IEEE

- Transactions on Power Electronics, 13, 1998, pp. 134-141.
- [7] Z. Li and L. Xu, "Fuzzy Learning Enhanced Speed Control of an Indirect Field-Oriented Induction Machine Drives", IEEE Transactions Control Systems Technology, 8, 2000, pp. 270-278.
- [8] A. Ba-Razzouk, A. Cheriti, G. Olivier and P. Sicard, "Field Oriented Control of Induction Motor Using Neural Network De-couplers", IEEE Transactions on Power Electronics, 12, 1997, pp. 752-763.
- [9] Zerek, R. Amer and B. Mostafa, "Implementation of Fuzzy Logic in Engineering Management", Academic Publication Center of Tunis, Tunisia, SSI-403, 2008, pp. 1-9.
- [10] Moraga, Caludio, "An Engineering View of Fuzzy Logic", Facta Universitatis, Serie E.E., Serbia, 18, 2005



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Sistem refrigerasi CO₂: solusi alternatif sistem refrigerasi ramah lingkungan untuk aplikasi supermarket

I Nyoman Suamir^{1*}, Achmad Wibolo¹, I Wayan Adi Subagia², I Putu Eka Idrayana³ dan A.A.Ngurah Dwi Indra Putra³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

³Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Badung, Bali 80364, Indonesia

*Email: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak

Sistem refrigerasi berbasis refrigeran CO₂ sejak lingkungan tiga dekade menjadi solusi alternatif untuk sistem refrigerasi ramah lingkungan untuk aplikasi di supermarket. Paper ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penerapan berbagai sistem refrigerasi CO₂ yang pada tingkat awal implementasinya dalam sistem refrigerasi supermarket masih menghadapi beberapa hambatan. Keselamatan dan teknologi dianggap sebagai salah satu penghalang terpenting yang diikuti oleh regulasi, pelatihan, dan ketersediaan komponen. Beberapa negara mungkin masih menghadapi berbagai tantangan seperti kebijakan dan situasi mengenai fase keluar dari ODP dan refrigerans dengan emisi yang tinggi. Sehubungan dengan keamanan lokal, CO₂ adalah alternatif yang sangat baik di antara sistem refrigerasi alami, terutama dalam aplikasi refrigerasi supermarket. CO₂ berada di grup A1 dari klasifikasi keselamatan yang tidak mudah terbakar atau beracun. Salah satu sistem refrigerasi CO₂ yang banyak diminati adalah sistem transkritikal. Sistem refrigerasi CO₂ transkritikal telah mendapatkan tingkat kematangan teknologi, sehingga teknologi bebas HFC saat ini dapat memberikan solusi ramah lingkungan untuk sektor refrigerasi komersial khususnya supermarket.

Kata kunci: sistem refrigerasi CO₂, kematangan teknologi, ramah lingkungan, supermarket

Abstract: CO₂ refrigerant based refrigeration system since about three decades has become an alternative solution for environmentally friendly refrigeration systems for applications in supermarkets. This paper aims to evaluate the potential application of various CO₂ refrigeration systems which in the early stages of their implementation in supermarket refrigeration systems still face several obstacles. Safety and technology are considered as one of the most important barriers followed by regulation, training and component availability. Some countries may still face various challenges such as the policy and situation regarding the phase out of ODP and high emission refrigerants. Due to local safety, CO₂ is an excellent alternative among natural refrigeration systems, especially in supermarket refrigeration applications. CO₂ is in group A1 of the non-flammable or toxic safety classification. One of the most popular CO₂ refrigeration systems is the transcritical system. The transcritical CO₂ refrigeration system has reached a level of technological maturity, so that the current HFC-free technology can provide an environmentally friendly solution for the commercial refrigeration sector, especially supermarkets.

Keywords: CO₂ refrigeration system, technology maturity, environmentally friendly, supermarket

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Pilihan sistem refrigerasi untuk aplikasi sistem refrigerasi komersial telah mengalami perubahan yang cepat. Salah satu pendekatan yang mendapatkan popularitas adalah penggunaan sistem refrigerasi alami. Refrigeran alami seperti amonia, hidrokarbon (HC) dan CO₂ yang diketahui sebelumnya kini mengalami kebangkitan setelah permasalahan terhadap lingkungan telah meningkat karena penggunaan refrigeran non-alami. Sistem refrigerasi alami

ramah lingkungan telah terbukti menjadi solusi pengganti untuk sistem refrigerasi berbasis refrigeran sintetis seperti CFC, HCFC dan HFC [1,2]. Minat untuk menggunakan sistem refrigerasi alami di sektor komersial bervariasi di berbagai negara. Sistem dengan refrigeran CO₂ dan HC lebih menarik terutama di Eropa dan Jepang. Aplikasi sistem refrigerasi alami pada aplikasi komersial sudah juga meluas sampai di Asia, AS, Australia, Kanada, dan negara-negara lain dapat diharapkan untuk menerapkannya [3].

Penggunaan refrigerasi alami telah muncul kembali sejak lingkungan tiga dekade terakhir, tetapi untuk mengimplementasikannya dalam sistem refrigerasi supermarket masih menghadapi beberapa hambatan. Terutama berhubungan dengan keselamatan dan teknologi. Hambatan lain juga termasuk regulasi, pelatihan, dan ketersediaan komponen. Beberapa negara mungkin masih menghadapi berbagai tantangan seperti kebijakan dan kondisi tentang penghentian penggunaan (phase out) dari refrigeran jenis ODP (Ozone Depleting Potential) dan GWP (Global Warming Potential) [4].

Sehubungan dengan faktor keamanan, CO₂ adalah alternatif yang sangat baik di antara berbagai refrigeran alami, terutama dalam aplikasi sistem refrigerasi supermarket. CO₂ berada di grup A1 dari klasifikasi keselamatan yang tidak mudah terbakar atau beracun [5,6]. Di sisi lain, amonia dengan klasifikasi keselamatan B2 yang menunjukkan bahwa refrigeran ini memiliki toksisitas tinggi dan juga membawa risiko mudah terbakar tingkat sedang. Amonia dapat digunakan dalam sistem refrigerasi supermarket dengan beberapa tantangan untuk mencapai receiveran yang signifikan [7]. Menggabungkan amonia dengan CO₂ bertingkat atau sistem sekunder adalah salah satu peluang untuk menerapkannya di supermarket [8]. Sistem refrigerasi tersebut telah diterapkan di Prancis [9] dan di Australia [10]. HC, yang berada di grup A3 (mudah terbakar level tinggi), mungkin juga memiliki beberapa batasan penggunaan. Kemungkinan kebocoran sistem refrigerasi HC ke area yang dihuni atau ditempati manusia harus dibatasi di bawah titik batas mudah terbakar yang lebih rendah. Namun, dengan perangkat keselamatan yang tersedia saat ini, tingkat ketidkebocoran sistem yang lebih baik, dan strategi desain canggih dalam meminimalkan biaya sistem refrigerasi beberapa supermarket di Inggris dan Jerman juga telah menerapkan HC dalam sistem refrigerasi supermarket [11,12].

Tetapi, banyak efek positif yang tak terbantahkan dari pelarangan penggunaan HFC karena GWP tinggi yang mudah diamati, seperti kenaikan harga R404A, R134a dan R410A dan optimalisasi biaya dan efisiensi unit CO₂ [13]. Sebagai konsekuensinya, saat ini solusi untuk memperkenalkan berbagai aplikasi sistem refrigerasi CO₂ komersial terus didorong lebih jauh karena konstruksi sistem dapat disesuaikan dengan sifat-sifat CO₂ [14-20].

Di AS, analisis berbagai sistem refrigerasi transkritisal dan kaskade/sekunder menjadi populer di aplikasi supermarket dengan tujuan mengoptimalkan parameter pengoperasian sistem ini. Selain itu, kinerja sistem refrigerasi berbasis CO₂ yang dipilih dibandingkan dengan sistem ekspansi langsung (DX system) berbasis R404A. Untuk sistem refrigerasi yang diselidiki, ditempatkan bahwa Sistem booster transkritisal dengan Kompresor Bypass memiliki konsumsi energi terendah untuk temperatur lingkungan kurang dari 8°C, dan untuk temperatur lingkungan yang lebih tinggi sistem ekspansi langsung (DX) R404A ditempatkan memiliki konsumsi energi terendah. Sistem booster ini juga berkinerja setara atau lebih baik daripada sistem ekspansi langsung R404A di utara AS. Untuk bagian selatan AS, sistem DX R404A berkinerja lebih baik daripada sistem CO₂ [21].

Penerapan sistem refrigerasi supermarket CO₂ di India telah dilaporkan oleh Lata dan Gupta [22]. Kinerja sistem refrigerasi booster CO₂ dengan delapan konfigurasi berbeda

untuk aplikasi supermarket dianalisis dan dibandingkan dengan sistem R404A konvensional. Konfigurasi yang diselidiki termasuk sistem booster dasar dengan over-feed evaporator, serta adopsi refrigerasi transkritisal berdingin evaporatif yang dimodifikasi. Analisis ini terutama berfokus pada konsumsi daya, efisiensi energi, dan dampak pemanasan global saat menggunakan sistem ini sepanjang tahun dalam kondisi iklim India. Model termodinamika steady-state dikembangkan dan divalidasi untuk sistem booster yang tersedia dalam literatur. Selanjutnya, analisis diekspansi untuk semua konfigurasi pada operasi sepanjang tahun (2017-18) untuk lima kota besar di India dari berbagai wilayah iklim. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem booster dengan flooded-evaporator temperatur rendah dan menengah yang terintegrasi dengan sistem refrigerasi evaporatif yang dimodifikasi adalah konfigurasi terbaik di semua kota. Peringkat kinerja lebih tinggi untuk Delhi, diikuti oleh Ahmedabad, Bangalore, Chennai, dan Kolkata. Sistem tersebut dapat meningkatkan SEER maksimum hingga 49%, sedangkan penghematan energi tahunan hingga 35%, dibandingkan dengan sistem booster. Selanjutnya, penurunan maksimum emisi tidak langsung (TEWI) ditempatkan 18% dibandingkan dengan sistem R404A konvensional.

Di Cina, investigasi kinerja sistem refrigerasi CO₂ telah dilakukan oleh Sun dkk [23]. Sistem Refrigerasi Kompresi Bertingkat Parsial diusulkan dan dievaluasi dalam hal koefisien kinerja (COP) dan rasio efisiensi energi musiman (SEER) ketika beroperasi di lima kota perwakilan iklim khas di Cina. R134a dan CO₂ digunakan sebagai refrigeran dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa SEER sistem refrigerasi supermarket di zona dingin dan zona ringan lebih tinggi daripada zona iklim lainnya. Kinerja R134a Two-stage Compression Refrigeration System (R134a) berkinerja lebih baik daripada CO₂ Two-stage Compression Refrigeration System (R744-TCS). Namun, COP dan SEER dari sistem CO₂ dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menambahkan kompresor paralel, serta menggunakan siklus kaskade parsial kompresi uap tunggal untuk subcooling di bawah kondisi kerja praktis. Peningkatan terbesar sistem ini dapat dicapai di daerah dengan kondisi iklim ekstrim, di mana COP meningkat sebesar 48,9% pada temperatur lingkungan 39 °C, dan SEER meningkat maksimum 21,5% di musim panas dan zona musim dingin yang hangat, dibandingkan dengan CO₂ transkritisal. Dibandingkan dengan sistem R134a, sistem yang diamati pada dasarnya mencapai efisiensi energi yang sebanding atau bahkan lebih tinggi. Dapat disimpulkan bahwa sistem yang diusulkan memiliki potensi besar untuk menggantikan sistem refrigerasi R134a yang ada untuk aplikasi refrigerasi supermarket.

Oleh karena itu, sistem refrigerasi CO₂ transkritisal telah mendapatkan tingkat kematangan teknologi seperti itu sehingga teknologi bebas HFC saat ini dapat menjadi solusi ramah lingkungan untuk sektor refrigerasi komersial di Eropa. Menurut [13], pada kenyataannya, jumlah instalasi sistem CO₂ di Uni Eropa, Norwegia dan Swiss pada tahun 2016 adalah tiga kali lebih tinggi dari pada tahun 2013. Sedangkan di wilayah Mediterania perkembangan penerapan sistem CO₂ lingkungan 8 kali dari 2013 hingga 2016. Akibatnya, Eropa adalah pemimpin dunia saat ini dalam unit supermarket CO₂ transkritisal dengan jumlah

8732 unit dari lingkungan 11000 instalasi di seluruh dunia [13].

Meskipun pabrik refrigeran CO₂ (R744) murni komersial telah menarik minat yang cukup besar di seluruh dunia, sepengetahuan peneliti, manfaat energi yang dapat dicapai dengan mengadopsi teknologi "khusus CO₂" canggih di industri ritel makanan Eropa belum pernah diperkirakan. Untuk menjembatani kesenjangan ilmiah ini, penghematan energi yang terkait dengan penggunaan evaporator overfed dan konsep multi-ejektor telah diuji sebagai solusi yang paling baik untuk pengganti sistem yang digunakan saat ini (yaitu sistem terpusat R404A). Selain itu, evaluasi ini telah diekspansi ke sistem sebelumnya (yaitu konfigurasi booster) dan sistem saat ini (yaitu teknologi kompresi paralel) untuk sistem supermarket CO₂ transkritikal. Investigasi telah dilaksanakan dengan mempertimbangkan ritel makanan ukuran rata-rata yang berlokasi di berbagai kota Eropa. Hasil dari pekerjaan penelitian saat ini bertujuan untuk meningkatkan kepercayaan pada solusi bebas HFC tersebut dan lebih mempromosikan penggunaannya di seluruh dunia. Paper ini menyajikan berbagai alternatif solusi sistem refrigerasi CO₂ yang efisien diaplikasikan pada supermarket.

2. Metode

Metode studi literatur diterapkan di dalam melakukan kajian sistem refrigerasi CO₂ untuk supermarket. Berbagai sumber terkini dari sistem refrigerasi CO₂ (R744) untuk aplikasi supermarket diinvestigasi dari berbagai kajian dan evaluasi yang telah dipublikasi di berbagai jurnal maupun konferensi. Berbagai hasil kajian dibandingkan untuk memperoleh hasil analisis yang bersifat komperatif dari berbagai teknologi sistem refrigerasi CO₂ dan sistem kombinasi antara sistem CO₂ dan sistem refrigerasi dengan refrigeran alami lainnya. Kajian dilengkapi dengan ilustrasi teknologi yang diterapkan dalam bentuk gambar skematik sehingga dapat lebih mudah dalam membandingkan teknologi dan keunggulan yang diaplikasikan khususnya sistem konvensional berbasis R404a untuk aplikasi supermarket.

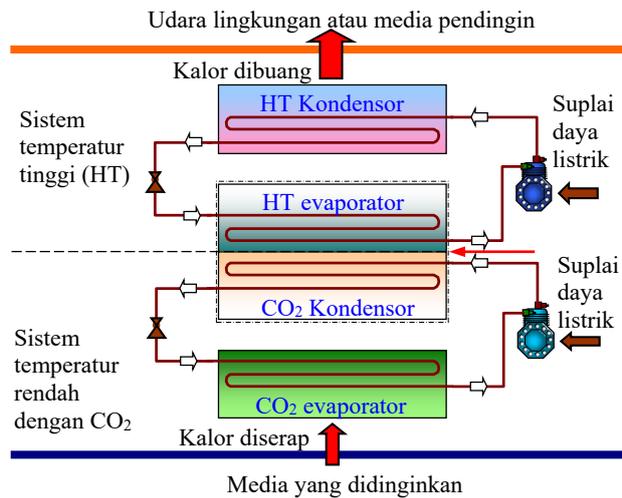
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil kajian menunjukkan berbagai jenis sistem refrigerasi CO₂ sudah diterapkan untuk aplikasi supermarket. Berbagai konsep penerapan sistem refrigerasi CO₂ untuk supermarket juga sudah banyak dikembangkan. Untuk aplikasi supermarket, tiga jenis sistem refrigerasi CO₂ terutama digunakan yang meliputi unit mandiri (integral), kondensasi, dan sistem supermarket terpusat (*centralized supermarket system*) [24]. Dalam sistem refrigerasi supermarket terpusat, sejumlah pendekatan desain yang berbeda dapat diadopsi yang termasuk dalam dua kategori utama yaitu: sistem kaskade subkritikal dan sistem transkritikal. Sistem kaskade subkritikal beroperasi pada tekanan sedang dan menerapkan dua sistem refrigerasi satu sistem untuk refrigerasi (*refrigeration*) dan satu sistem lagi untuk pembuangan panas (*heat rejection*). Sedangkan sistem transkritikal beroperasi pada tekanan tinggi tetapi hanya menggunakan CO₂ sebagai refrigeran.

3.1. Sistem refrigerasi CO₂ subkritikal

Seperti yang dibahas sebelumnya, refrigeran CO₂ memiliki titik kritis rendah yang membatasi temperatur kondensasi

maksimum hingga lingkungan 25 °C [25]. Untuk menjaga siklus di kondisi subkritikal sepanjang tahun, perlu menggunakan sistem bertingkat untuk menyerap panas yang dibuang di kondensor sistem tekanan rendah. Diagram skematik dari sistem kaskade sederhana menggunakan CO₂ saat siklus tingkat rendah ditampilkan pada Gambar 1. Sistem kaskade dibentuk oleh dua sistem tunggal yang terhubung oleh penukar kalor (heat exchanger). Sistem tekanan tinggi yang membuang panas ke media lingkungan dapat menggunakan berbagai refrigeran.



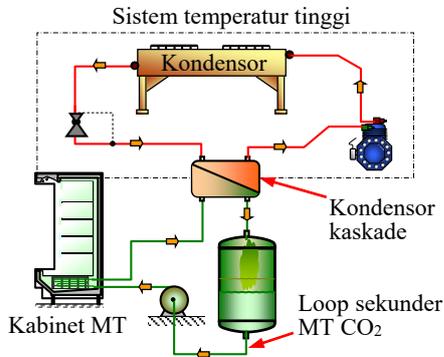
Gambar 1. Diagram skematik dari sistem kaskade dengan refrigeran CO₂ pada sistem temperatur rendah

Kinerja sistem kaskade subkritikal dalam aplikasi supermarket telah dilaporkan oleh sejumlah peneliti [26,27]. Penelitian lain juga telah dilakukan pada penggunaan semua sistem refrigerasi alami dalam susunan bertingkat. Fernandez-Seara et al. [28] mempelajari sistem refrigerasi bertingkat menggunakan CO₂ dan amonia sebagai refrigerasi di tingkat rendah. Sawalha et al. [29] mengevaluasi secara teoritis dan eksperimental kinerja sistem refrigerasi kaskade amonia / CO₂ untuk aplikasi supermarket. Para peneliti telah melaporkan bahwa sistem kaskade dapat memberikan COP yang lebih baik dibandingkan dengan sistem R404a konvensional. Sistem amonia/CO₂ kaskade serupa juga telah diselidiki oleh Lee et al. [30]; Getu dan Bansal [31]; Bingming et al. [32] dan Dopazo et al. [34]. Bansal dan Jain [35] meneliti sistem refrigerasi bertingkat dan menganalisis sistem menggunakan CO₂ dalam siklus tingkat rendah, sementara tingkat tinggi menggunakan berbagai refrigeran termasuk propena, propilen, amonia dan R404a.

3.2. Sistem refrigerasi CO₂ sebagai refrigeran sekunder

Gambar 2 dan 3 menunjukkan susunan sistem CO₂ subkritikal yang disederhanakan. Dengan susunan ini CO₂ bekerja sebagai sistem sekunder untuk sistem makanan dingin dan beku yang diatur sebagai unit paralel. Sirkuit CO₂ terhubung ke sistem refrigerasi utama yang bertindak sebagai tingkat tekanan tinggi. Temperatur evaporasi sistem tingkat tinggi harus lebih rendah dari temperatur saturasi sistem loop sekunder. Perbedaan temperatur tergantung pada efektivitas kondensor kaskade. Pada saat yang sama, temperatur saturasi loop sekunder harus cukup rendah untuk

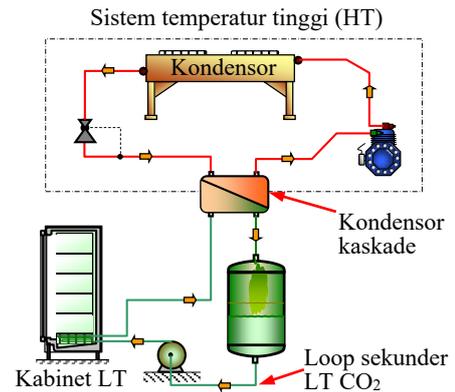
menjaga makanan dingin dalam kisaran antara $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan makanan beku dari antara $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Supermarket biasanya menggunakan temperatur saturasi dalam kisaran antara $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk loop LT (Low Temperature) dan dari $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ke $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk loop MT (Medium Temperature). Dengan tekanan yang sesuai dengan temperatur ini, dimungkinkan untuk menggunakan pipa refrigerasi dan komponen untuk sistem CO₂.



Gambar 2. Sistem medium temperatur (MT) tak langsung dengan CO₂ sebagai refrigeran sekunder

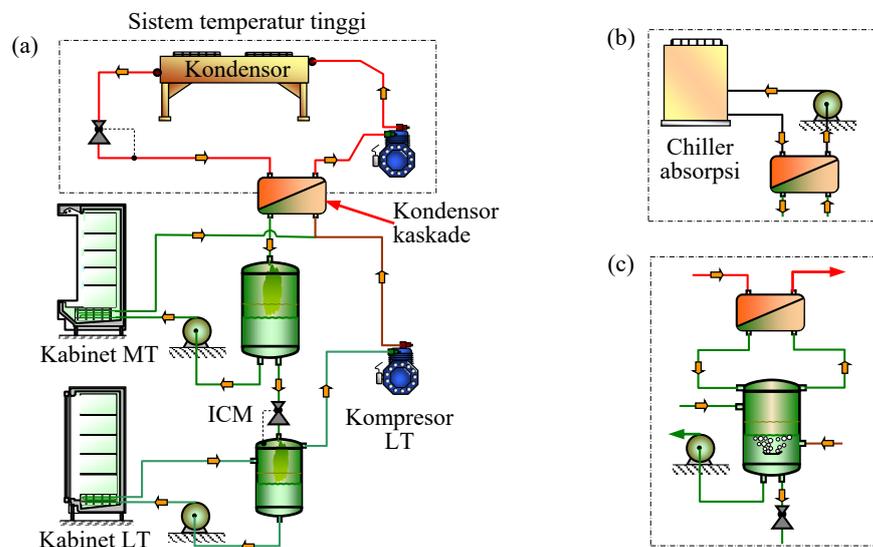
Sirkuit CO₂ berisi receiver bahwa CO₂ kembali dari kondensor bertingkat. Receiver juga berfungsi sebagai reservoir cair untuk pompa CO₂. Tingkat fluida dalam receiver dapat dihubungkan ke pengontrol pompa untuk memastikan pompa bekerja pada head hisap positif (NPSH)

yang dapat diterima. Oleh karena itu, ukuran receiver harus dirancang dengan hati-hati untuk dapat mengakomodasi fluktuasi CO₂ cair yang disebabkan oleh variasi.



Gambar 3. Sistem temperatur rendah (LT) tak langsung dengan CO₂ sebagai refrigeran sekunder

Pompa menyirkulasikan CO₂ cair di loop sekunder dari receiver ke evaporator dan menjaga evaporator tetap basah (flooded) untuk semua kondisi beban. Di evaporator, CO₂ cair menyerap panas dan beberapa di antaranya evaporasi. Campuran jenuh kemudian mengalir ke kondensor bertingkat di mana membuang panas ke sistem tingkat tinggi dan menjadi cair lagi. Dari kondensor CO₂ kembali ke receiver untuk pengulangan siklus.



Gambar 4. Sistem CO₂ subkritikal dengan LT DX; (a) kaskade dengan siklus kompresi uap pada sistem temperatur tinggi; (b) rangkaian alternatif untuk sistem tekanan tinggi dengan sistem absorpsi; (c) Model rangkaian lain pada sistem kaskade

Susunan lain untuk sistem CO₂ subkritikal yang mudah evaporasi ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem ini menggunakan sirkuit LT DX dan loop sekunder LT untuk sistem temperatur rendah. Susunan ini hanya menggunakan satu sistem tingkat tinggi yang dapat meminimalkan biaya refrigeran dan risiko keselamatan jika refrigerasi alami lainnya seperti HC dan amonia digunakan. CO₂ cair dari receiver MT didistribusikan ke loop sekunder MT dan sistem LT. Untuk sistem LT, CO₂ cair mengalir melalui katup (ICM) di mana ia diekspansi ke tekanan evaporasi

tingkat rendah. Katup ICM dimodulasi untuk mempertahankan temperatur dan tingkat fluida loop sekunder LT relatif konstan. Dari katup ICM, campuran dua fase memasuki receiver LT di mana dipisahkan menjadi dua fase. Fase cair mengalir melalui loop sekunder LT dan gas jenuh memasuki kompresor LT dan dikompresi ke tingkat tekanan MT. Gas panas dari kompresor LT kemudian bercampur dengan campuran dua fase. Campuran kemudian memasuki kondensor bertingkat dan kembali ke receiver MT untuk menyelesaikan siklus. Penukar kalor internal

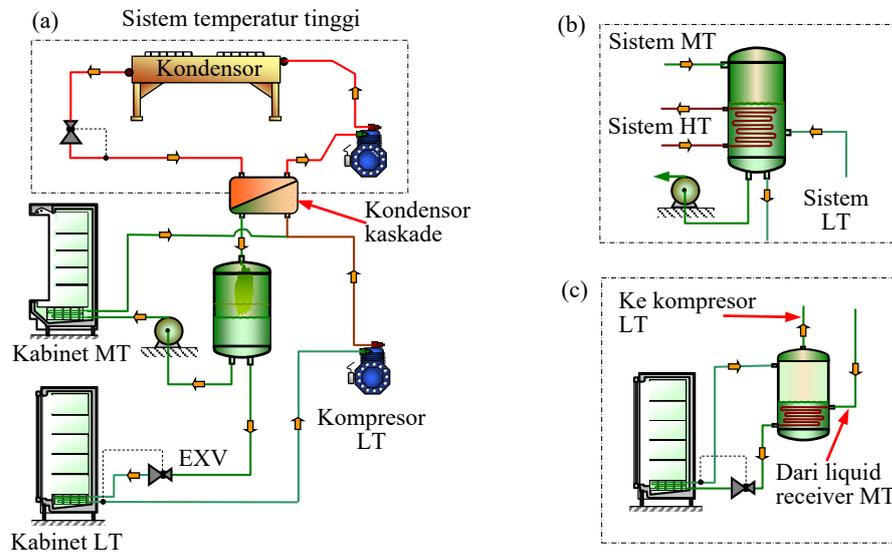
(IHX) mungkin diperlukan antara pipa hisap kompresor LT dan pipa cair di hulu katup ICM untuk memastikan tidak ada fluida pada pipa hisap kompresor.

Susunan di atas juga dapat menggunakan refrigerasi sorpsi di tingkat tinggi sebagai solusi alternatif untuk sistem kompresi uap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b), terutama di mana ada panas limbah yang tersedia, seperti halnya pada pembangkit listrik lokal. Susunan yang berbeda untuk konektor kaskade CO₂ juga dapat diterapkan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4(c).

Solusi CO₂ subkritis yang mudah evaporasi adalah sistem yang relatif sederhana untuk diimplementasikan dan menawarkan keunggulan dibandingkan sistem yang konvensional. Sistem CO₂ membutuhkan pipa dan komponen yang jauh lebih kecil, dan penghematan biaya instalasi dapat mencapai 12% [36]. Sehubungan dengan konsumsi energi, peneliti menyatakan bahwa solusi CO₂

sekunder dapat lebih hemat energi lingkungan 30% untuk sistem LT dan 20% untuk sistem MT. Rogstam [37] melaporkan bahwa CO₂ sekunder dapat memberikan pengurangan energi untuk pemompaan pada level 90% dibandingkan dengan pompa air garam kecepatan tetap dan pengurangan 50% dibandingkan dengan pompa air garam kecepatan variabel. Kemungkinan lain adalah mengoperasikan sistem CO₂ pada sirkulasi gravitasi

3.3. *Sistem refrigerasi sistem DX dan refrigeran sekunder*
Sistem volatile-DX adalah sistem CO₂ subkritis dengan MT secondary loop bertingkat dengan sirkuit LT DX seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Keuntungan dari sistem ini adalah bahwa sistemnya sederhana tanpa pompa LT atau receiver LT untuk sirkuit LT.



Gambar 5. Sistem refrigerasi CO₂ kaskade dengan loop sekunder MT dan sistem LT DX; (b) Sistem kaskade alternatif untuk sistem HT; (c) Alternatif untuk evaporator LT (diadopsi dari Sawalha et al. [29])

Solusi sistem CO₂ subkritis dalam aplikasi supermarket memberikan beberapa keunggulan dibandingkan sistem konvensional. Biaya refrigerasi HFC pada sistem tingkat tinggi dapat dikurangi secara signifikan yang mengurangi dampak pada lingkungan. Sistem tingkat tinggi dapat ditempatkan di ruang mesin yang aman tanpa akses publik. Ini memberikan kemungkinan untuk menerapkan refrigeran alami lainnya seperti amonia dan hidrokarbon dengan risiko keamanan minimum. Juga telah dilaporkan bahwa konsumsi energi solusi supermarket CO₂ subkritis dapat sebanding dengan sistem R404a DX [25,27,29].

Hingga saat ini banyak sistem CO₂ subkritis telah diterapkan di negara-negara Uni Eropa seperti Denmark, Jerman, Norwegia, Swedia, Italia dan Inggris [25]. Sistem tersebut juga telah dilaporkan dalam aplikasi supermarket di Australia, Kanada dan Amerika Latin seperti yang dilaporkan [10,38,39].

3.4. Sistem hanya dengan refrigeran CO₂

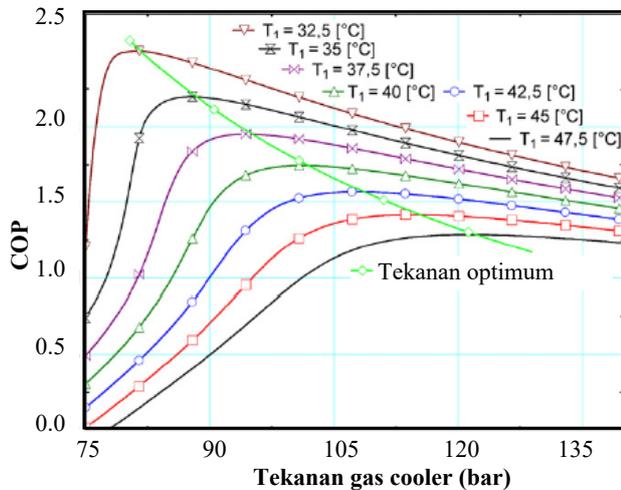
Sistem All-CO₂ menggunakan CO₂ sebagai satu-satunya refrigeran tanpa perlu refrigeran kedua di sisi tekanan tinggi dari susunan bertingkat untuk pembuangan panas. Ini meminimalkan dampak lingkungan dari kebocoran

refrigeran tetapi mengharuskan sistem untuk beroperasi di atas temperatur kritis CO₂ (secara transkritisal) pada temperatur tinggi. Pada temperatur di atas titik kritis, pembuangan panas terjadi sementara CO₂ dalam keadaan gas dan terjadi dalam gas refrigeran. Ini membutuhkan tekanan tinggi yang dapat menyebabkan konsumsi daya tinggi. Oleh karena itu, tekanan gas refrigeran menjadi parameter operasi yang sangat penting yang perlu dikontrol untuk mendapatkan kinerja terbaik.

Pada tingkat transkritisal tekanan pengoperasian refrigerasi transkritisal menjadi independen dari temperatur gas refrigeran keluar refrigerasi transkritisal. Gambar 6 menunjukkan bahwa tekanan operasi yang berbeda dapat dipilih pada temperatur keluar gas refrigeran. Angka ini juga menggambarkan tekanan pengoperasian yang optimal pada temperatur keluar yang berbeda dari refrigerasi transkritisal.

Temperatur CO₂ keluar dari refrigerasi transkritisal tergantung pada temperatur lingkungan dan panas dibuang dari refrigerasi transkritisal. Temperatur keluar dapat dipertahankan dekat dengan temperatur lingkungan dengan memodulasi kecepatan kipas. Tekanan refrigerasi transkritisal diatur oleh perangkat ekspansi tekanan tinggi (ICMT valve) dan tekanan operasi optimal dapat dicapai

dengan memodulasi katup ICMT yang menggabungkan pengontrol diferensial integral proporsional (PID). Parameter kontrol pengontrol sistem ini termasuk temperatur keluar dan tekanan aktual gas refrigeran.

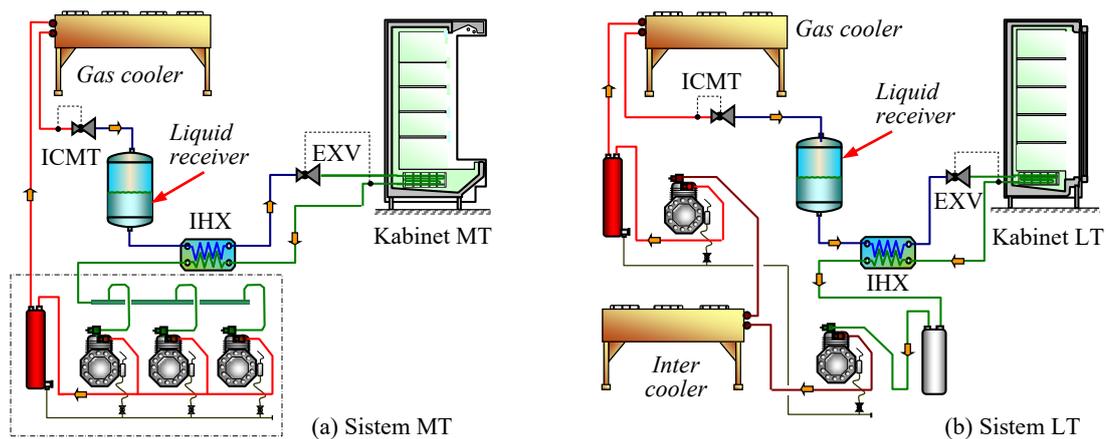


Gambar 6. COP siklus transkritikal CO₂ dengan tekanan gas cooler pada berbagai temperatur gas (T₁) [40]

3.4.1. Sistem CO₂ paralel

Gambar 7 menggambarkan sistem CO₂ paralel yang merupakan dua sirkuit DX terpisah. Satu rangkaian adalah untuk show case makanan dingin (MT) dan satu lagi untuk display cabinet makanan beku (LT). Sistem MT menggunakan kompresi tingkat tunggal sedangkan kompresi dua tingkat dengan intercooler biasanya digunakan untuk sistem LT. Dalam praktiknya, kedua sistem biasanya menggunakan paket multi-kompresor. Penukar kalor internal (IHX) juga umum digunakan untuk memastikan sistem memiliki uap CO₂ superpanas di pipa hisap kompresor.

Penggunaan kompresi dua tingkat dengan intercooler dapat mengurangi rasio tekanan dan temperatur keluar kompresor LT. Intercooler menghilangkan superheat uap CO₂ sebelum masuk kompresi tingkat kedua. Ini dapat menjaga temperatur sistem LT CO₂ di bawah 140 °C yang dianggap sebagai nilai yang dapat diterima untuk kompresor CO₂ [41]. Kompresi dua tingkat juga dapat meningkatkan efisiensi volumetrik dan isentropik kompresor LT.



Gambar 7. Sistem refrigerasi CO₂ paralel sederhana

3.4.2. Sistem booster CO₂ transkritikal

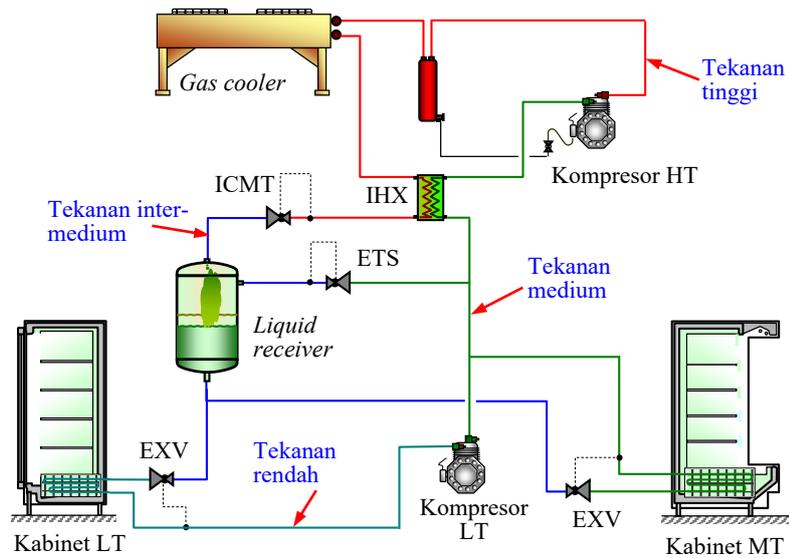
Dalam solusi sistem terintegrasi, sirkuit MT dan LT terhubung ke sirkuit pembuangan panas yang sama. Susunan ketiga sirkuit tergantung pada solusi sistem yang dipilih. Ini dijelaskan di bagian berikut.

Diagram yang disederhanakan dari sistem booster CO₂ transkritikal ditampilkan pada Gambar 8. Sistem ini dibagi menjadi 4 tingkat tekanan. Tekanan tinggi berada di kisaran antara 60 dan 90 bar_a. Ini menggabungkan keluar kompresor HT, refrigerasi transkritikal dan perangkat ekspansi tekanan tinggi (ICMT-motor operated valve driven by actuator). Tekanan menengah adalah dari 30 hingga 40 bar_a. Bagian ini dimulai dari hilir katup ICMT menggabungkan receiver dan katup bypass (ETS – Electric Expansion Valve) dan berakhir pada katup ekspansi sirkuit MT dan LT. Tingkat tekanan sedang berkisar antara 26 hingga 29 bar_a dan termasuk keluar kompresor LT, evaporator MT dan hisap kompresor HT. Bagian tekanan rendah berkisar antara 12

hingga 14 bar_a menggabungkan evaporator LT dan pipa hisap ke kompresor LT.

Fungsi utama katup bypass (ETS) adalah untuk menjaga tekanan di bagian tekanan menengah relatif konstan dengan melewati gas jenuh dari receiver ke bagian tekanan sedang. Katup bypass juga memastikan tekanan diferensial ada di antara pipa cair setelah liquid receiver dan koil evaporator MT untuk pengoperasian katup ekspansi MT yang tepat.

Dalam sistem booster CO₂, semakin rendah tekanan menengah semakin baik untuk efisiensi sistem yang dapat dijelaskan sebagai berikut: Tekanan menengah tidak mempengaruhi rasio tekanan kompresor LT dan HT yang berarti konsumsi daya kompresor tetap konstan. Efek refrigerasi dari evaporator MT dan LT, bagaimanapun, akan meningkat ketika tekanan menengah berkurang. Ini akan meningkatkan kapasitas refrigerasi sistem untuk mendapatkan efisiensi sistem yang lebih tinggi.



Gambar 8. Sistem booster CO₂ booster dengan *gas bypass* (diadopsi dari Danfoss [42])

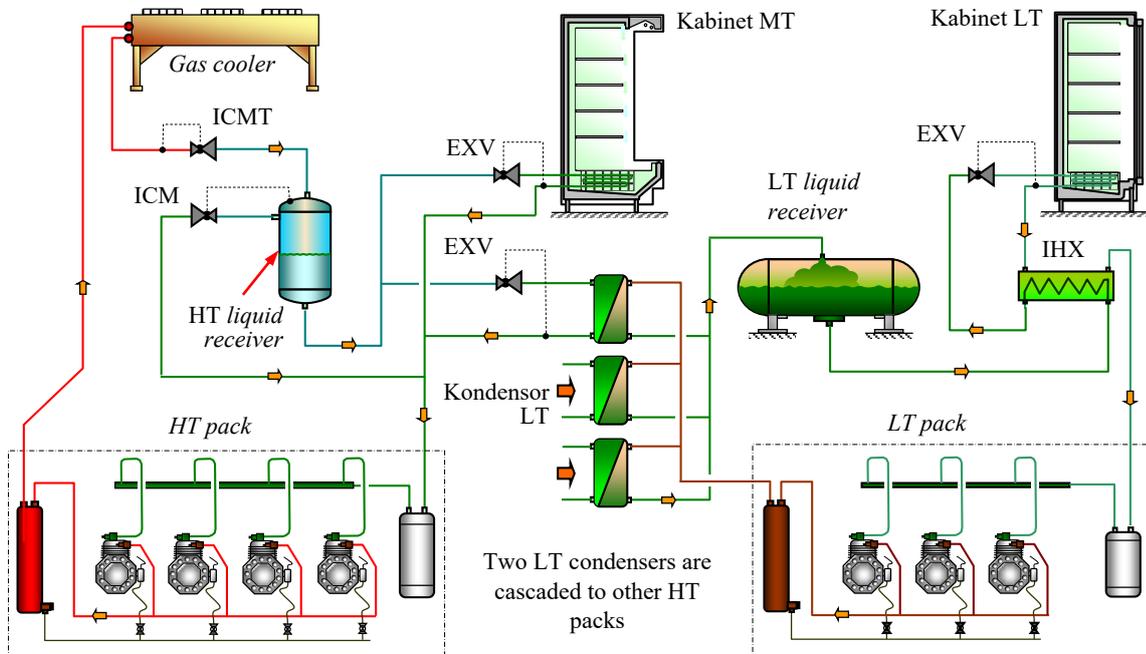
Untuk pengoperasian katup ekspansi MT, setidaknya perbedaan tekanan 4 bar dipertahankan di atas tekanan evaporator MT [42]. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi pengoperasian katup bypass dan kontrol tekanan menengah termasuk tekanan dan temperatur keluar refrigerasi transkritikal dan persyaratan untuk memiliki uap CO₂ superpanas saat masuk ke kompresor HT.

Gambar 9 juga menunjukkan sistem CO₂ ukuran kecil dengan sistem booster all-CO₂ terintegrasi. Sistem CO₂ menggunakan refrigerasi transkritikal berpendingin udara, dua kompresor paralel untuk sistem tekanan tinggi dan

kompresor tunggal untuk siklus tekanan rendah. Katup ICMT dan ICM digunakan untuk perangkat ekspansi tekanan tinggi dan katup bypass gas masing-masing. Pabrik CO₂ menggabungkan pengontrol Danfoss untuk kontrol dan pemantauan sistem.

3.4.3. Sistem CO₂ kaskade dengan flash gas bypass

Sistem CO₂ bertingkat dengan bypass gas flash ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 9. Sistem CO₂ kaskade dengan *flash gas bypass*

Bagian pembuangan panas atau tingkat tinggi mirip dengan sistem booster. Bedanya, sistem LT bertingkat sebagai sirkuit individu dengan sistem HT untuk pembuangan panas. Evaporator MT dibagi menjadi dua

kelompok: satu menyediakan refrigerasi ke cabinet MT dan yang lainnya mengembun gas CO₂ untuk sistem LT.

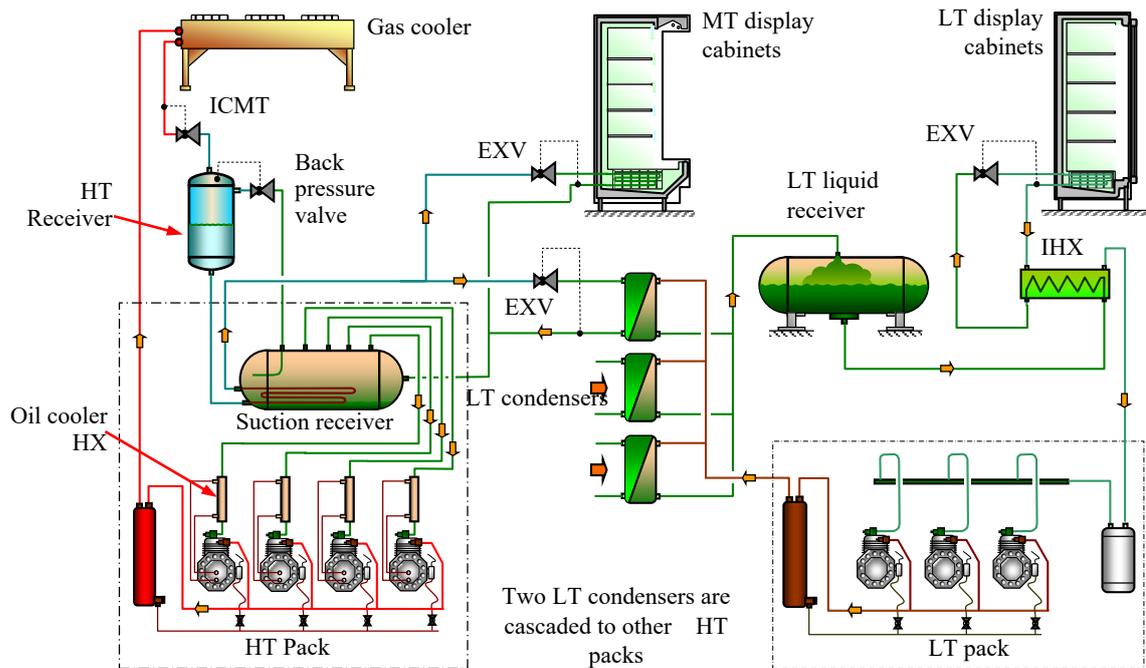
Solusi ini telah diterapkan di sejumlah supermarket Inggris [43]. Investigasi kinerja telah menunjukkan kinerja

energi musimannya hampir sama dengan sistem R404A konvensional [44-46]. Untuk mendapatkan keuntungan penuh dari operasi subkritikal ketika temperatur lingkungan rendah katup bypass diperlukan secara paralel dengan katup ICMT (katup bypass tidak ditunjukkan dalam diagram). Katup bypass ditutup ketika temperatur lingkungan berada di atas nilai tertentu (titik peralihan antara operasi subkritikal dan transkritikal) untuk memungkinkan katup ICMT untuk mengatur aliran gas CO₂ keluar dari refrigerasi transkritikal dan terbuka di bawah titik peralihan untuk

memungkinkan CO₂ cair mengalir bebas dari kondensor (refrigerasi transkritikal) ke receiver fluida.

3.4.4. Sistem CO₂ dengan sebuah suction receiver

Sistem CO₂ bertingkat dengan receiver tekanan rendah adalah peningkatan pada sistem kaskade dengan bypass gas flash. Seperti dapat dilihat pada Gambar 10, receiver hisap ditambahkan pada sisi sistem temperatur tinggi. Katup back pressure digunakan sebagai katup bypass untuk meminimalkan fluktuasi tekanan menengah karena tekanan dan variasi temperatur di outlet refrigerasi transkritikal.



Gambar 10. Sistem CO₂ kaskade dengan *suction receiver*

Dengan susunan ini evaporator MT dapat ditetapkan pada nol superheat yang dapat meningkatkan kapasitas refrigerasi dan COP sistem. Untuk memastikan tidak ada fluida yang masuk ke kompresor, sistem ini dilengkapi dengan HX oli refrigerant di pipa hisap setiap kompresor HT. Menurut Campbell [43] sistem ini dapat beradaptasi dengan beban yang variabel.

Gambar 10 menyajikan sistem cascade all-CO₂ terintegrasi dengan receiver hisap yang diterapkan di supermarket Inggris. Supermarket jenis ini memiliki area penjualan 2.300 m². Sistem refrigerasi CO₂ dari supermarket ini merupakan 4 pack sistem HT dan 2 pack LT. Setiap pack HT terdiri dari 3 kompresor, refrigerasi transkritikal berpendingin udara, dan receiver hisap (volume 0,26 m³). Pack LT menggabungkan 3 kompresor LT, liquid receiver (volume 0,13 m³) dan 3 kondensor. Untuk keandalan sistem refrigerasi LT, setiap paket LT dikaskade dengan tiga pack HT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10.

3.5. Sistem booster CO₂ dengan subcooling mekanik

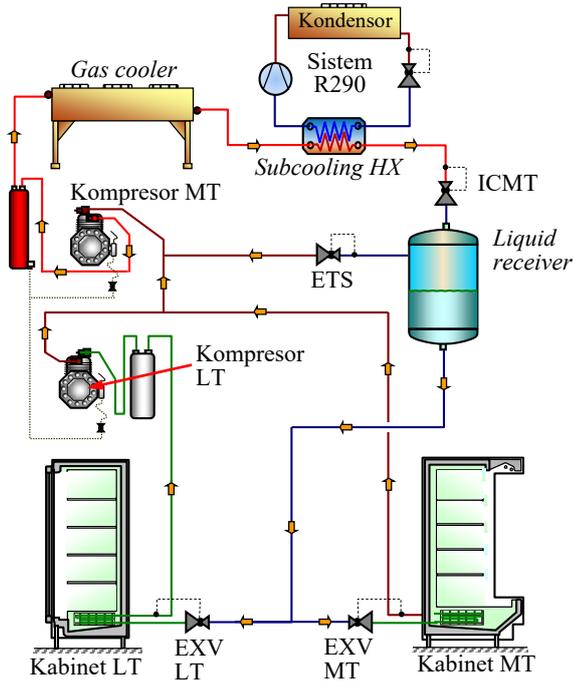
Metode umum yang digunakan dalam sistem berbasis CO₂ dengan tujuan untuk mengurangi konsumsi energi adalah penambahan konfigurasi subcooling mekanik khusus setelah kondensor / gas transkritikal. Konfigurasi ini terdiri

dari sistem sederhana yang menggabungkan kompresor, kondensor, katup throttling, dan evaporator. Evaporator sistem ini adalah penukar kalor yang menyerap panas dari CO₂, sehingga mengurangi temperaturnya. Dengan cara ini, kualitas CO₂ yang memasuki receiver fluida berkurang dan sebagai hasilnya, lebih sedikit refrigeran yang dikompresi dalam kompresor MT. Konfigurasi yang diadopsi dalam penelitian ini menggunakan R290 sebagai refrigeran, dan temperatur lingkungan di mana sistem ini beroperasi.

Fluida kerja ini adalah fluida kerja alami (propana) dengan GWP rendah sekitar 3,3, nol ODP dan tidak beracun. Jadi, ini adalah refrigeran ramah lingkungan yang cocok untuk sistem CO₂ yang bertujuan untuk mengurangi dampak lingkungan dari sistem. Satu-satunya kerugian dari R290 adalah flammability tinggi yang memerlukan sistem yang tepat dengan standar keamanan yang tinggi. Namun, R290 digunakan dalam aplikasi nyata dan ada personel berpengalaman yang harus bekerja dalam sistem ini. Gambar 11 menggambarkan sistem booster konvensional yang tidak menggabungkan konfigurasi sub-cooling mekanik khusus sedangkan Gambar 12 dilengkapi dengan sub-cooling mekanik [47].

Untuk mengurangi ketidakefisienan yang disebutkan di atas, Fazelpour dan Morosuk [48] merekomendasikan yang bertujuan mengurangi temperatur CO₂ yang keluar dari

refrigerasi transkritikal. Seperti yang dilaporkan pada [49-51], target ini dapat dicapai dengan bantuan sub-cooling mekanik khusus, yang memungkinkan refrigeran untuk masuk ke evaporator dengan kualitas uap yang lebih rendah dan, dengan demikian, menyebabkan kenaikan efek refrigerasi. Juga, seperti yang dijelaskan oleh peneliti [52-54]. Tekanan tinggi yang optimal, yang memaksimalkan koefisien kinerja (COP), harus dievaluasi sebagai fungsi temperatur keluar refrigerasi transkritikal saat mode berjalan transkritikal terjadi. Seperti yang dilaporkan di dalam [49], integrasi sub-cooling mekanik khusus juga memungkinkan penurunan tekanan pembuangan panas yang optimal serta menimbulkan peningkatan kinerja tambahan.

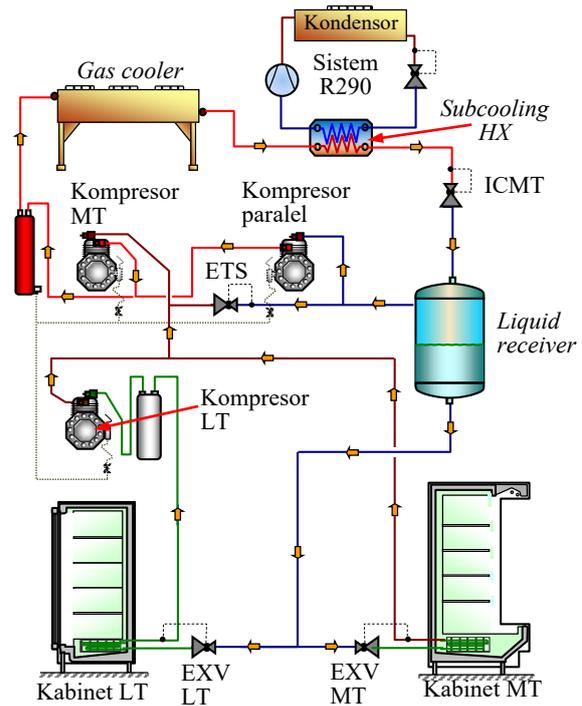


Gambar 11. Sistem booster CO_2 dengan sub-cooling mekanik

3.6. Sistem booster CO_2 dengan kompresor paralel

Sistem lain yang dipelajari dalam paper ini adalah sistem booster CO_2 dengan penambahan kompresor paralel. Pada kondisi temperatur lingkungan yang tinggi, seperti yang terjadi di Athena, kualitas refrigeran yang masuk ke receiver menjadi lebih tinggi, yang menyebabkan peningkatan massa uap yang perlu dikompresi oleh kompresor MT. Untuk mengurangi konsumsi energi yang besar, solusi kompresor tambahan diterapkan. Tujuan kompresor ini adalah untuk mengompresi uap dari receiver ke sistem tekanan tinggi dari sistem tekanan menengah.

Manfaat dari sistem ini adalah fakta bahwa dalam sistem booster, gas flash dikompresi dari sistem temperatur sedang, sehingga mengkonsumsi lebih banyak energi daripada dalam kasus ketika kompresi dimulai dari tekanan menengah. Konfigurasi ini juga diselidiki dengan penambahan sub-cooling mekanik khusus yang bekerja dengan R290. Gambar 12 merupakan sistem CO_2 yang menggunakan kompresi paralel, dengan menerapkan sub-cooling mekanik.



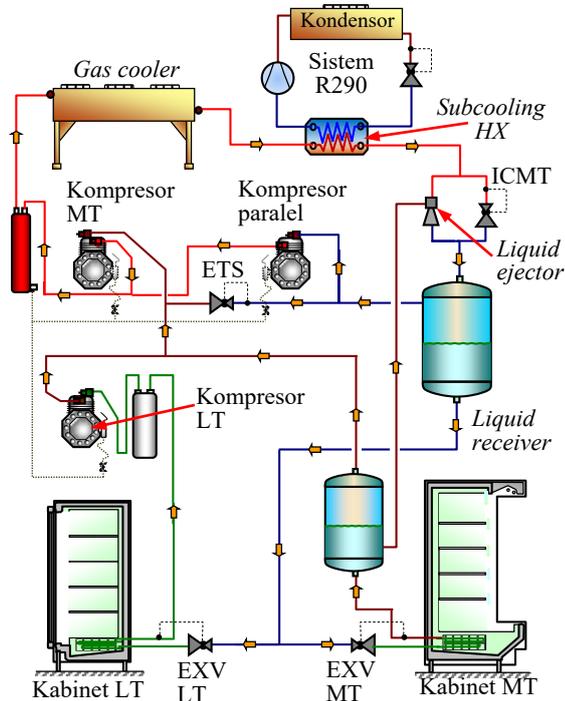
Gambar 12. Sistem CO_2 booster dengan paralel kompresor dan sub-cooling mekanik

3.7. Sistem booster CO_2 dengan kompresor paralel, evaporator MT overfed dan internal HX LT

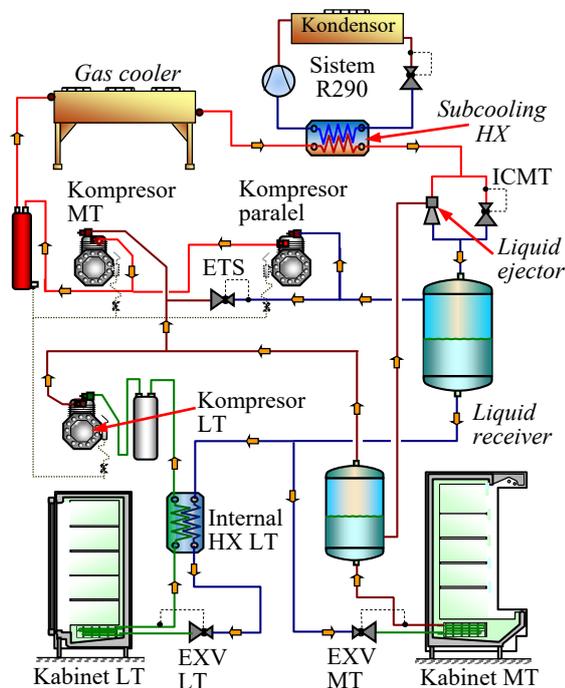
Konfigurasi yang disajikan berikutnya adalah konfigurasi yang memiliki evaporator overfed. Fluida overfeed memberikan refrigeran cair yang lebih besar ke evaporator daripada yang evaporasi total. Biasanya, bagian dari evaporator ditentukan untuk superheating refrigeran. Namun, koefisien perpindahan panas di wilayah aliran dua fase lebih tinggi daripada refrigeran superpanas fase tunggal. Teknik over-fed ini, memanfaatkan CO_2 cair di semua area evaporator. Koefisien transfer panas yang lebih tinggi dan tidak perlu superheating menghasilkan temperatur evaporasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional [47, 55-58]. Konsumsi daya berkurang 2-3% ketika temperatur evaporasi meningkat 1 K. Metode untuk over-fed MT evaporator dapat dilakukan melalui pemanfaatan ejektor cair dan tangki ekstra yang disebut akumulator. Ketika over-fed dari evaporasi terjadi, refrigeran cair masih ada di bagian keluar evaporator, karena belum dipanaskan.

Refrigeran tentunya tidak boleh memasuki kompresor dalam kondisi fase campuran ini, karena refrigeran cair dalam aliran hisap kompresor dapat menyebabkan kerusakan mekanik pada kompresor. Oleh karena itu, akumulator ditempatkan setelah evaporator MT, di mana refrigeran keluar dari evaporator MT dipisahkan menjadi bagian uap dan cainya. Uap yang keluar dari akumulator bercampur dengan refrigeran yang telah dikompresi di kompresor LT, sedangkan komponen cainya dialirkan ke ejektor cair. Ejektor cair ditempatkan sejajar dengan katup high-pressure, dan ketika refrigeran cair masuk ke dalam ejektor, sejumlah refrigeran bertekanan tinggi masuk ke ejektor. Jumlah total refrigeran yang keluar dari ejektor cair bercampur dengan refrigeran yang keluar dari katup

bertekanan tinggi, dan kemudian masuk ke liquid receiver dalam tekanan menengah. Sistem dengan evaporator MT overfed dan kompresi paralel diilustrasikan dalam Gambar 13. Seperti pada sistem sebelumnya, konfigurasi sub-cooling mekanik dapat diintegrasikan juga ke dalam sistem.



Gambar 13. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel dan evaporator MT overfed



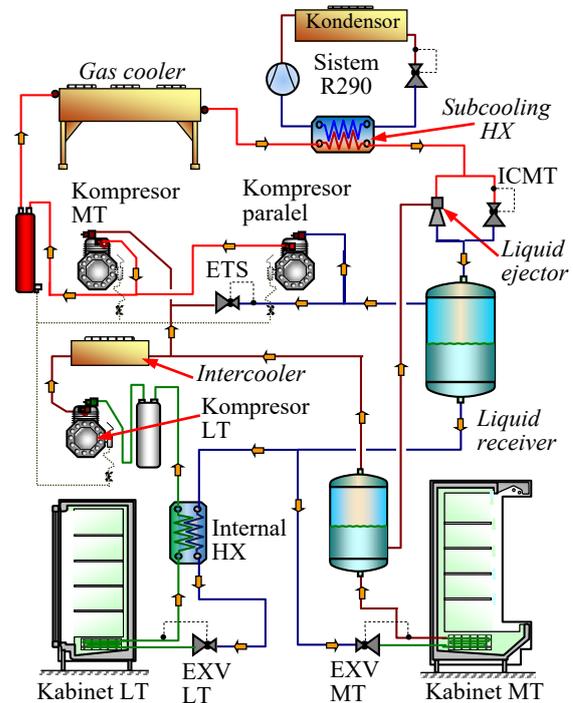
Gambar 14. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel, MT overfed dan internal-HX LT

Metode over-fed pada evaporator LT dengan penggunaan penukar kalor internal antara refrigerasi sebelum katup ekspansi LT dan refrigerasi setelah evaporator LT. Dalam hal ini, refrigeran yang tidak superpanas keluar dari evaporator LT dipanaskan di dalam

penukar kalor, menyerap panas dari refrigeran yang memasuki katup ekspansi yang disub-cooled [49]. Teknik ini menawarkan peluang peningkatan temperatur evaporasi evaporator LT, sehingga mengurangi konsumsi daya di kompresor LT. Pemakaian penukar kalor seperti itu ditampilkan dalam Gambar 14. Penambahan sub-cooling mekanik khusus juga diaplikasikan [49,58].

3.8. Sistem booster CO₂ dengan kompresor paralel evaporator MT overfed dan intercooler

Penggunaan intercooler setelah kompresor LT adalah pilihan lain untuk mengurangi konsumsi listrik dalam sistem. Intercooler ditempatkan di luar ruangan, di mana refrigeran membuang panas ke lingkungan. Penggunaan perangkat ini secara signifikan mengurangi temperatur refrigerasi yang memasuki kompresor MT, yang mengarah pada penghematan energi. Penambahan teknologi ini diilustrasikan pada Gambar 15.



Gambar 15. Sistem CO₂ booster dengan kompresor paralel, MT overfed, internal-HX LT dan intercooler

4. Kesimpulan

Kelebihan dan kekurangan berbagai teknologi sistem CO₂ telah disajikan. Sistem dengan refrigeran CO₂, dengan ODP nol dan GWP satu, memiliki dampak yang jauh lebih rendah terhadap lingkungan dibandingkan dengan refrigerasi HCFC dan HFC. Memiliki sifat termo-fisik yang menarik, sistem refrigerasi CO₂ dapat memberikan perpindahan panas yang baik dalam penukar panas dari sistem refrigerasi yang memungkinkan pemilihan peralatan yang lebih kecil daripada refrigerasi HCFC dan HFC.

Berbagai solusi dan susunan sistem refrigerasi CO₂ untuk aplikasi supermarket yang termasuk dalam dua kategori utama: sistem kaskade subkritikal dan sistem transkritikal. Sistem kaskade subkritikal beroperasi pada tekanan sedang dan menerapkan dua refrigeran satu untuk refrigerasi dan satu lagi untuk pembuangan panas. Sedangkan sistem transkritikal beroperasi pada tekanan tinggi pada temperatur lingkungan tinggi tetapi hanya

menggunakan CO₂ sebagai refrigeran. Perkembangan terbaru dari sistem refrigerasi CO₂ dan aplikasi di supermarket juga disajikan.

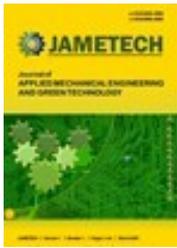
Ucapan Terima Kasih

Peneliti menyampaikan banyak terima kasih atas bantuan atau dukungan dari peneliti, unit publikasi P3M Politeknik Negeri Bali yang telah membantu penyelesaian dan publikasi paper ini.

Daftar Pustaka

- [1] G. Lorentzen, "The use of natural refrigeran: a complete solution to the CFC/HCFC predicament", *Int. J. Refrigeration*, 18, 1995, pp. 190-197.
- [2] S.B. Riffat, C.F. Afonso, A.C. Oliveira, D.A. Reay, "Natural refrigerans for refrigeration and air-conditioning system", *Appl. Therm. Eng.*, 17, 1997, pp. 33-42.
- [3] TOC, "Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps", UNEP, Nairobi, 2006, 223 pgs.
- [4] ATMOSphere, "How to bring natural refrigerans faster to market: A summary report. International workshop on Natural Refrigerans", Brussels, Belgium, 2010, 42 pgs.
- [5] BS EN 378-1, "Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements: Part 1 - Basic requirements, definitions, classification and selection criteria", BSI, UK, 2008, 68 pgs.
- [6] ASHRAE Standard 34, "Designation and safety classification of refrigerans", ASHRAE, Inc., Atlanta, 2007, 53 pgs.
- [7] A. Pearson, "Refrigeration with Ammonia", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 545-551
- [8] D. Hinde, "Applying natural refrigerans in supermarket refrigeration", ASHRAE winter conference, Las Vegas, USA, 2011.
- [9] P. Rivet, "A green and up to date retail store. Proc. International Conference New Technologies in Commercial Refrigeration", Urbana, IL, USA, 2002, pp. 31-34.
- [10] M. Bellstedt, "Carbon dioxide systems for supermarkets review", Green Cooling Council (GCC), 2008, 5 pgs.
- [11] J. Gartshore, and S. Benton, "Cool concerns and Waitrose to support the use of hydrocarbons", 2010.
- [12] Lidl, "Two hundred Lidl stores to feature R290 technology by 2012", 2011.
- [13] Shecco. F-Gas Regulation shaking up the HVAC&R industry. October 2016; Brussels, Belgium
- [14] Gullo P, Hafner A, Cortella G. Multi-ejector R744 booster refrigerating plant and air conditioning system integration – A theoretical evaluation of energy benefits for supermarket applications. *Int J Refrig* 2017;75:164-76.
- [15] Hafner A, Försterling S, Banasiak K. Multi-ejector concept for R-744 supermarket refrigeration. *Int J Refrig* 2014;43:1-13.
- [16] Gullo P, Cortella G, Minetto S, Polzot A. Overfed evaporators and parallel compression in commercial R744 booster refrigeration systems –An Assessment of energy benefits. In: *Proceedings of the 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*; 21-24 August 2016; Edinburgh, UK. ID: 1039.
- [17] Minetto S, Brignoli R, Zilio C, Marinetti S. Experimental analysis of a new method of overfeeding multiple evaporators in refrigeration systems. *Int J Refrig* 2014;38:1-9.
- [18] Gullo P, Elmegaard B, Cortella G. Energy and environmental performance assessment of R744 booster supermarket refrigeration systems operating in warm climates. *Int J Refrig* 2016;64:61-79.
- [19] Polzot A, D'Agaro P, Gullo P, Cortella G. Modelling commercial refrigeration systems coupled with water storage to improve energy efficiency and perform heat recovery. *Int J Refrig* 2016;69:313-23.
- [20] Javerschek O, Reichle M, Karbinger J. Optimization of parallel compression systems. In: *Proceedings of the 12th IIR Gustav Lorentzen Natural Working Fluids Conference*; 21-24 August 2016; Edinburgh, UK. ID: 1184.
- [21] V. Sharma, B. Fricke, P. Bansal, "Comparative analysis of various CO₂ configurations in supermarket refrigeration systems", *Int. J. Refrig.*, 46, 2014, pp. 86-89.
- [22] M. Lata and D.K. Gupta, "Performance evaluation and comparative analysis of transcritical CO₂ booster refrigerations systems with modified evaporative cooled gas cooler for supermarket application in Indian Context", *Int. J. Refrig.*, 120, 2020, pp. 248-259.
- [23] Z. Sun, J. Li, Y. Liang, H. Sun, S. Liu, L. Yang, C. Wang, B. Dai, "Performance assessment of CO₂ supermarket refrigeration system in different climate zones of China", *Energy Convers. Manage.*, 208, 2020, 112572
- [24] IPCC, "Safeguarding the ozone layer and the global climate system. UN-Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005, 478 pgs.
- [25] J.M. Rhiemeier, J. Harnisch, C. Ters, M. Kauffeld, A. Leisewitz, "Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment", Federal Environment Agency, 2009, 270 pgs.
- [26] A. Campbell, G.G. Maidment, J.F. Missenden, "A natural refrigeration system for supermarkets using CO₂ as a refrigeran", *Proc. CIBSE National Conference*, London, UK, 2006.
- [27] D. Hinde, S. Shitong Zha, L. Lan, "Carbon dioxide in North American supermarkets", *ASHRAE Journal* 51, 2009, pp. 18-26.
- [28] J. Fernandez-Seara, J. Sieres, and M. Va'zquez, "Compression-absorption cascade refrigeration system", *Appl. Therm. Eng.*, 26, 2006, pp. 502-512.
- [29] S. Sawalha, K.A. Soleimani, J. Rogstam, "Experimental and theoretical evaluation of NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration in laboratory environment", *Proc. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Trondheim, Norway, 2006.

- [30] T.S. Lee, C.H. Liu, T.W. Chen, "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems", *Int. J. Refrigeration*, 29, 2006, pp. 1100-1108.
- [31] H.M. Getu, and P.K. Bansal, "Thermodynamic analysis of an R744–R717 cascade refrigeration system", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 45-54.
- [32] W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, and X. Ziwen, "Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor", *Int. J. Refrigeration*, 32, 2009, pp. 1358-1365.
- [34] J.A. Dopazo, J. Fernández-Seara, J. Sieres, and F.J. Uhía, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures", *Appl. Therm. Eng.*, 29, 2009, pp. 1577–1583.
- [35] P.K. Bansal, and S. Jain, "Cascade systems: past, present, and future", *ASHRAE Transactions*, 113, 2007, pp. 245-252.
- [36] Danfoss, "Experience significant savings with the Danfoss pumped CO₂ solution", 2010.
- [37] J. Rogstam, "Ice rinks using carbon dioxide as secondary refrigerant", *Proc. Sustainable Refrigeration and Heat Pump Conference*, Stockholm, Sweden, 2010, 9 pgs.
- [38] CanmetENERGY, "CO₂ as a refrigerant in a Sobeys Supermarket, a case study", *Natural Resources Canada*, 2009, 8 pgs.
- [39] Verdemar, "The first supermarket in Latin America that uses CO₂ as a refrigerant", 2010, 9 pgs.
- [40] S. Sawalha, "Theoretical evaluation of transcritical CO₂ systems in supermarket refrigeration, Part I: Modelling, simulation and optimization of two system solutions", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 516-524.
- [41] S. Giroto, S. Minetto, P. Neksa, "Commercial refrigeration system using CO₂ as the refrigerant", *Int. J. Refrigeration*, 27, 2004, pp. 717-723.
- [42] Danfoss, "Transcritical CO₂ systems in a small supermarket", 2008.
- [43] A. Campbell, "Working with CO₂ supermarkets", 2009.
- [44] I.N. Suamir, "Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation", PhD Thesis, in Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 2012, 272 pgs.
- [45] I.N. Suamir, S.A. Tassou, "Performance evaluation of integrated trigeneration and CO₂ refrigeration systems", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 2013, pp. 1487-1495.
- [46] I.N. Suamir, S.A. Tassou, D. Marriott, "Integration of CO₂ refrigeration and trigeneration systems for energy and GHG emission savings in supermarkets", *Int. J. Refrig.*, 35, 2012, pp. 407-417.
- [47] G. Mitsopoulos, E. Syngounas, D. Tsimpoukis, E. Bellos, C. Tzivanidis, S. Anagnostatos, "Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO₂ refrigerant", *Energy Conversion and Management: X*, 1, 2019, 100006.
- [48] F. Fazelpour, T. Morosuk, "Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines. *Int. J. Refrig.*, 38, 2014, pp., 128–139.
- [49] R. Llopis, R. Cabello, D. Sánchez, E. Torrella, "Energy improvement of CO₂ transcritical refrigeration cycles using dedicated mechanical subcooling", *Int. J. Refrig.*, 55, 2015, pp. 129–141.
- [50] P. Gullo, "Advanced thermodynamic analysis of transcritical R744 booster refrigerating unit with dedicated mechanical subcooling", *Energies*, 11, 2018, 3058.
- [51] P. Gullo, A. Hafner, K. Banasiak, "Transcritical R744 refrigeration systems for supermarket applications: Current status and future perspectives", *Int. J. Refrig.*, 93, 2018, pp. 269-310.
- [52] Lorentzen, G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *Int. J. Refrig.* 1994, 17, 292–301.
- [53] Liao, S.M.; Zhao, T.S.; Jakobsen, A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Appl. Therm. Eng.* 2000, 20, 831–841.
- [54] Kim, M.-H.; Pettersen, J.; Bullard, C.W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2004, 30, 119–174.
- [55] M. Karampour, S. Sawalha, "State-of-the-art integrated CO₂ refrigeration system for supermarkets: a comparative analysis", *Int J Refrig.*, 86, 2018, pp. 239–57.
- [56] S. Minetto, R. Brignoli, C. Zilio, S. Marinetti, "Experimental analysis of a new method for overfeeding multiple evaporators in refrigeration systems", *Int J Refrig.*, 38, 2014; pp. 1–9.
- [57] S. Bortolin, M. Rossato, S. Bernardinello, D. Del Col, "Investigation of evaporator performance with and without liquid overfeeding", In: 16th International refrigeration and air conditioning conference at Purdue, July 11–14; 2016, p. 2305.
- [58] P. Gullo, K. Tsamos, A. Hafner, Y. Ge, S.A. Tassou, "State of the art technologies for transcritical R744 refrigeration systems – a theoretical assessment of energy advantages for European food retail industry", *The 1st ICSEF 19-20 April 2017, Berkshire, UK, Energy Procedia*, 123, 2017, pp 46-53.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Studi ekeperimental aplikasi inverter pada pompa untuk optimasi energi cooling tower

Sudirman^{1*}, I Made Sugina², Ida Bagus Gde Widiantera², I Made Rai Dipa Valentine³ dan I Dewa Gede Liondi Eka Watara³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

³Mahasiswa Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

*Email: dirmansdr@pnb.ac.id

Abstrak

Masih banyak peluang-peluang penghematan yang bisa dicari untuk mendapatkan penghematan pada sistem refrigerasi. Salah satu sub sistem yang ada pada sistem refrigerasi adalah sistem cooling tower. Dengan menemukan cara penghematan pada cooling tower, maka konsumsi energi oleh sistem refrigerasi pun akan berkurang. Penelitian ini mengaplikasikan inverter pada motor fan pada simulasi cooling tower. Simulasi cooling tower dibuat dengan menggunakan heater 2 x 2 kW sebagai pengganti sumber panas yang akan dibuang pada cooling tower. Dengan menggunakan inverter, perubahan debit air yang masuk ke cooling tower dibuat pada 3,2; 3,8; 4,8; 5,6 dan 6,8 m³/h. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa, makin besar debit aliran air ke cooling tower, maka performance cooling tower akan meningkat juga. Tapi dengan meningkatnya debit air yang mengalir meningkat pula daya cooling tower yang terjadi.

Kata kunci: cooling tower, performa, inverter, debit aliran

Abstract: There are still many savings opportunities that can be sought to get savings on the refrigeration system. One of the sub-systems in the refrigeration system is the cooling tower system. By finding a way to save energy on the cooling tower, the energy consumption by the refrigeration system can also be reduced. This study applies an inverter to the fan motor in the cooling tower simulation. The cooling tower simulation is made using a 2 x 2 kW heater as a substitute for the heat source to be rejected from the cooling tower. By using an inverter, changes in the flow rate of water entering the cooling tower were investigated at 3.2; 3.8; 4.8; 5.6 and 6.8 m³/h. Experimental results show that, the greater the flow rate of water to the cooling tower, the cooling tower performance also increases. But with the increase in the flow rate of water, the cooling tower power also increases.

Keywords: cooling tower, performance, inverter, flow rate

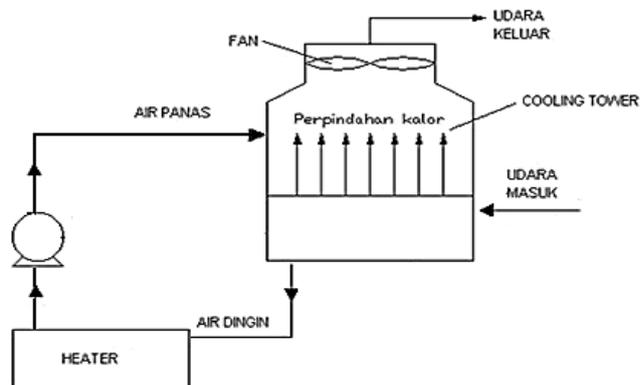
Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

1.1. Prinsip Kerja Cooling tower

Air mengambil kalor dari condensor dan mengalir ke cooling tower. Oleh cooling tower kalor yang berasal dari condensor akan dibuang ke udara lingkungan. Air tersebut disemprotkan ke filler cooling tower yang berfungsi memperluas permukaan perpindahan panas. Sehingga pembuangan panas bisa berjalan dengan efektif. [1].

Dari Gambar 1. Air yang telah didinginkan, turun menuju heater untuk dipanaskan, kemudian dipompa menuju cooling tower. Disana air disemprotkan ke filler cooling tower. Oleh kipas yang dipasang dibagian atas cooling tower akan menghisap udara yang akan mengambil panas yg dibawa air dan kalor tersebut dibuang ke udara bebas.



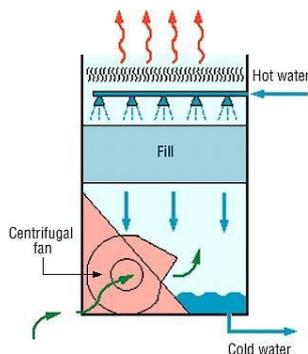
Gambar 1. Skema cooling tower

1.2. Cooling tower draft mekanik

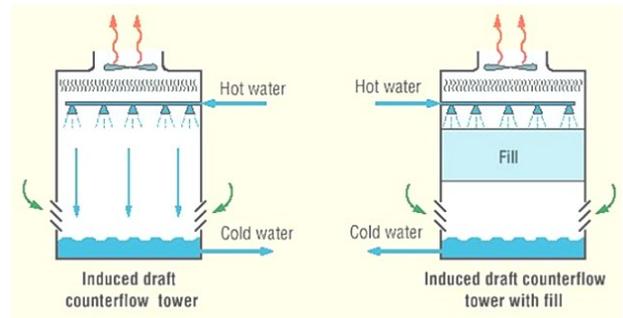
Cooling tower jenis ini mempunyai kipas besar yang akan menghisap udara luar kemudian mendorong udara tersebut melewati filling yang dilapisi air panas yang dialirkan oleh sprinkler, menuju udara bebas. filler ini berfungsi untuk memperluas permukaan perpindahan panas antara air dengan udara yang dihembuskan oleh kipas besar tersebut. Cooling tower dengan jumlah sel-sel filler berupa, garis lurus, segi empat atau lingkaran tergantung bentuk individu sel dan tempat lorong udara masuk disisi bawah.[2]

Tabel 1. Ciri-ciri berbagai jenis cooling tower [2]

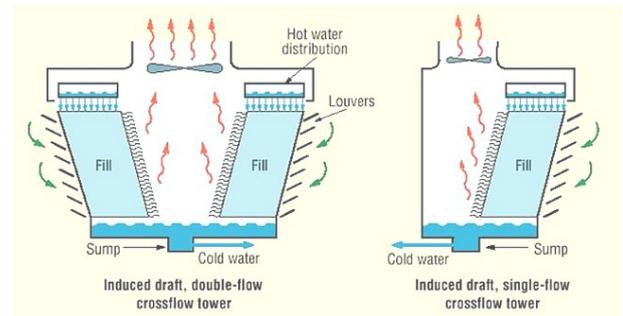
Jenis cooling tower	Keuntungan	Kerugian
<i>Cooling tower forced draft</i> (Gambar 2): Udara dihisap dan dihembuskan ke cooling tower oleh kipas yang ditempatkan di udara masuk.	Sangat baik pada tahanan udara yang besar. Karena kipas ini relatif lebih sunyi.	Kecepatan udara input yang tinggi dan kecepatan udara keluar yang rendah, menyebabkan Resirkulasi yang buruk. Ini bisa disiasati dengan cooling tower digabung penempatannya dengan saluran pembuangan.
<i>Cooling tower aliran melintang induced draft</i> (Gambar 3): Air masuk pada puncak dan melewati bahan pengisi, udara masuk dari salah satu sisi (menara aliran tunggal) atau pada sisi yang berlawanan (menara aliran ganda)	Sedikit terjadi resirkulasi dari cooling toer force draft karena kecepatan out nya antara 3 sampai 4 kali kecepatan in.	Fan dan mekanisme penggerak motor dibutuhkan yang tahan cuaca terhadap embun dan korosi sebab mereka berada pada jalur udara keluar yang lembab
<i>Cooling tower aliran berlawanan induced draft</i> (Gambar 4) : Air panas masuk pada puncak udara masuk dari bawah dan keluar pada puncak menggunakan fan		



Gambar 2. Cooling tower forced draft [2]



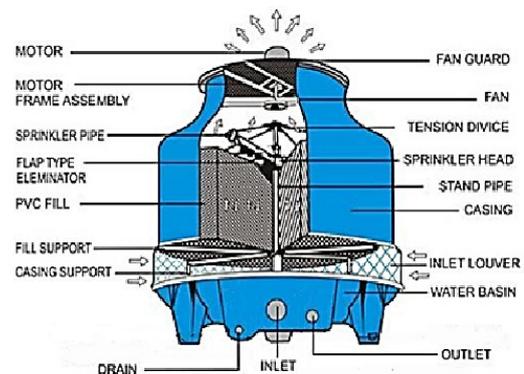
Gambar 3. Cooling tower induced draft counterflow [2]



Gambar 4. Cooling tower induced draft crossflow [2]

1.3. Konstruksi Cooling tower

Adapun konstruksi cooling tower jenis (*induced draft counterflow cooling tower*) .



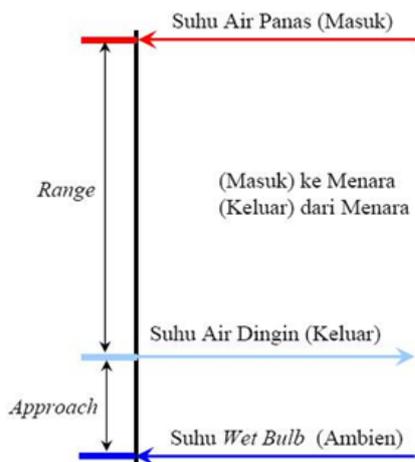
Gambar 5. Konstruksi cooling tower [1]

Konstruksi cooling tower secara umumnya seperti di bawah ini :

1. Kipas (*fan*)
Kipas adalah bagian yang paling substansial dari sebuah cooling tower karena berfungsi untuk menarik udara lingkungan sekitar cooling tower dan dialirkan kedalam cooling tower untuk menyerap kalor dan dibuang ke udara bebas. Jika tidak ada kipas, maka proses pembuangan kalor tidak akan berjalan sempurna..
2. Rangka penyangga Cooling tower (*tower supporter*)
Rangka penyangga tower berfungsi untuk menopang cooling tower agar kuat dan kokoh. Rangka penyangga umumnya dibuat dari bahan baja yang tahan terhadap karat.

3. *Casing cooling tower.*
Casing cooling tower harus tahan terhadap semua cuaca, karena dipasang diruang terbuka. Juga harus mempunyai umur pakai yang relatif panjang. Umumnya dibuat dari bahan seng. .
4. *Pipa sprinkler*
 Air panas yang akan didinginkan dilewatkan ke pipa *sprinkler*, berupa pipa berlubang-lubang kecil untuk memancarkan air ke *filler cooling tower*. Sehingga *filler* akan merata kena air panas dan menyebabkan proses pembuangan panas akan berjalan efektif dan efisien.
5. *Bak air (water basin)*
 Bak air berfungsi sebagai penampungan air sementara yang jatuh dari bahan Filling sebelum dihisap balik ke kondensor. Bak air biasanya terbuat dari plastik tebal yang tahan terhadap karat.
6. *Lubang udara (inlet louver)*
 Udara yang dihisap oleh kipas akan masuk melalui inlet louver, yaitu lubang udara pada cooling tower dan akan melewati filler, yang berfungsi mengambil kalor yang akan dibuang keluar

1.4. Kinerja Cooling Tower



Gambar 6. Range dan Approach cooling tower

Kinerja cooling tower dievaluasi untuk mempelajari nilai *Approach* dan *Range cooling tower* terhadap nilai desain, identifikasi area terjadinya pemborosan energi dan memberikan saran perbaikan. Elemen-elemen kinerja dari cooling tower adalah :

Suhu udara wet bulb, suhu udara dry bulb, suhu air masuk cooling tower, suhu air keluar cooling tower, suhu udara keluar, amper motor, laju alir air, laju alir udara. Parameter tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kinerja cooling tower.

1.4.1. Range

Temperatur range adalah selisih dari temperatur air masuk *cooling tower* (T_{in}) dan keluar *cooling tower* (T_{out}). Makin besar selisih yang didapatkan, maka bisa dikatakan *cooling tower* tersebut kinerjanya sangat bagus dan *cooling tower* mampu bekerja secara efektif. Dirumuskan dengan :

$$Range\ (^{\circ}C) = T_{in}\ (^{\circ}C) - T_{out}\ (^{\circ}C) \tag{1}$$

1.4.2. Approach

Temperatur approach adalah selisih temperatur air dingin yang keluar cooling tower (T_{out}) dengan temperatur bila basah (wet bulb) udara lingkungan (TWB_{amb}) sekitar cooling tower.

$$Approach\ (^{\circ}C) = T_{out}\ (^{\circ}C) - TWB_{amb}\ (^{\circ}C) \tag{2}$$

1.4.3. Efektivitas cooling tower

Efektivitas cooling tower adalah perbandingan antara *range* dengan *range + approach*, atau istilah lainnya adalah *range* dengan *range ideal*. Makin besar hasil perbandingan tersebut, maka makin tinggi nilai *efektifitas cooling tower* dalam mendinginkan air panas dari kondensor.

$$Efektivitas\ (\%) = \frac{Range}{Range+approach} \times 100\% \tag{3}$$

1.4.4. Debit air spesifik

Debit air spesifik (\dot{m}_{sp}) dihitung dengan rumus :

$$\dot{m}_{sp} = \frac{\dot{m}}{A_{tower}} \quad (\ell/min/m^2) \tag{4}$$

dengan:

\dot{m} = debit air (ℓ /menit)

A_{tower} = luas penampang *Cooling Tower* (m^2).

1.4.5. Kapasitas pendinginan (cooling load)

Kapasitas pendinginan suatu *Cooling Tower* adalah setara dengan kemampuan *Cooling Tower* tersebut dalam menyerap kemudian membuang kalor ke udara lingkungan sekitar. Sedangkan kapasitas pendinginan dari suatu cooling tower dirumuskan dengan :

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \tag{5}$$

dimana:

Q = kapasitas pendinginan (kW)

\dot{m} = debit air (kg/s)

C_p = kalor jenis air (KJ/kg $^{\circ}C$)

ΔT = perbedaan suhu air masuk dan suhu air keluar ($^{\circ}C$)

Perpindahan panas pada cooling tower terjadi melalui dua mekanisme utama: transfer kalor sensible secara konvensi dari air menuju udara dan transfer kalor laten oleh penguapan air (*difusi*). Kedua mekanisme ini terjadi pada udara-air *boundary layer*. Transfer panas total adalah jumlah dari dua mekanisme *boundary layer* ini. Transfer panas total juga dapat dinyatakan dalam hal perubahan entalpi setiap bulk phase. Perpindahan panas di lapisan batas adalah sama dengan perpindahan panas dalam *bulk phase* [5].

Mulyono dan Baskoro [7] meneliti tentang karakteristik cooling tower dengan bahan *filling* plastik bergelombang. Jamilah [8] mempelajari tentang performance cooling tower dengan mendistribusikan aliran air menggunakan pelat aluminium. Sedangkan Ramli [9] meneliti tentang karakteristik *cooling tower* mendistribusikan cairan pendingin menggunakan pelat besi.

Penelitian-penelitian tentang cooling tower adalah untuk mencari cara yang paling efektif untuk membuang panas yang dihasilkan pada system Refrigerasi. Dengan menemukan cara tersebut, maka konsumsi energi oleh system refrigerasi pun akan berkurang, karena untuk bangunan komersial khususnya hotel, fasilitas yang lahap energi adalah sistem pengkondisian udara (*AC: air conditioning*) dan sistem produksi air panas. Kedua sistem ini bisa mencapai 70% dari total energi yang digunakan [10]. Karena itu dengan melakukan inovasi untuk mengurangi konsumsi energy pada salah satu bagian pada system refrigerasi, maka akan berkurang pula konsumsi energy secara keseluruhan.

2. Metode

Jenis penelitian ini merupakan kajian eksperimental, suatu konsep parameter operasi kritis dari system cooling tower pada AC sentral, tipe water chiller pada aplikasi gedung komersial seperti perkantoran, hotel, supermarket dan bandara.



Gambar 7: Simulasi cooling tower dan condensor

Kegiatan eksperimen pada tahap pertama adalah membuat bagian AC sentral yaitu *Cooling tower* dan kondensor, Gambar 7. adalah *cooling tower* yang dibuat.

Yang berfungsi sebagai sumber panas dari condenser adalah 2 buah *electric water heater* 4 kW, yang suhunya dijaga pada 34 °C oleh *thermocontrol*. Laju aliran air yang mendinginkan kondensor bisa diatur dengan merubah putaran motor pompa cooling tower melalui inverter. Dengan perubahan debit air melalui inverter pada 3,2; 3,8; 4,8; 5,6 dan 6,8 m³/h. Masing-masing dicari performansi dan konsumsi listrik cooling tower.

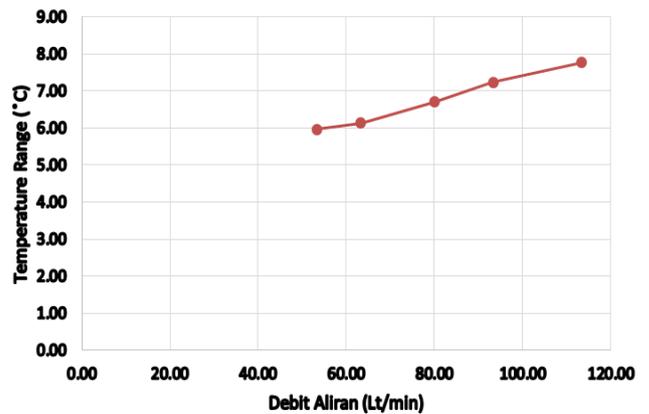
3. Hasil dan Pembahasan

Dengan variasi debit aliran menggunakan inverter dimotor pompa pada debit 3,2; 3,8; 4,8; 5,6 dan 6,8 m³/h, dan temperature air dibuat konstan pada temperature 34°C. hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut :

3.3. Grafik Debit Aliran vs Temperature Range

Temperatur range yang makin tinggi menyatakan berarti bahwa cooling tower telah mampu menurunkan temperatur

air secara efektif dan kinerjanya baik [11]. Hasil penelitian yang telah dilakukan, menghasilkan, makin tinggi debit air yang dialirkan, makin tinggi angka *temperature range*-nya. Jadi dengan makin banyak debit air yang dialirkan, makin banyak kalor yang akan diserap oleh air, dan akan makin banyak kalor yang dibuang ke udara (Gambar 8)

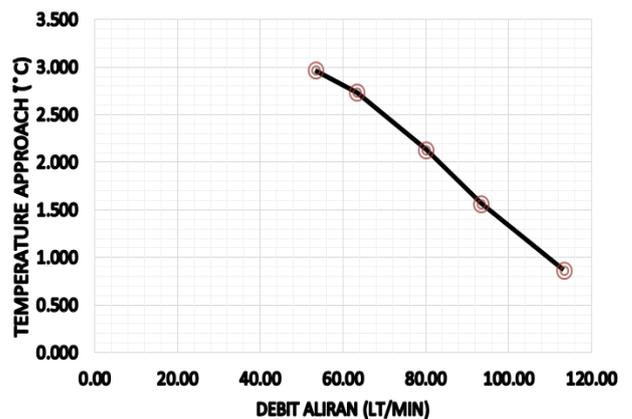


Gambar 8. Grafik debit aliran vs temperature range

3.2. Grafik Debit Aliran vs Temperature Approach

Gambar 9. menggambarkan makin besar debit yang dialirkan, maka makin rendah temperature approach yang dihasilkan. Semakin rendah temperatur approach yang dihasilkan, maka kinerja dari cooling tower tersebut makin baik [10].

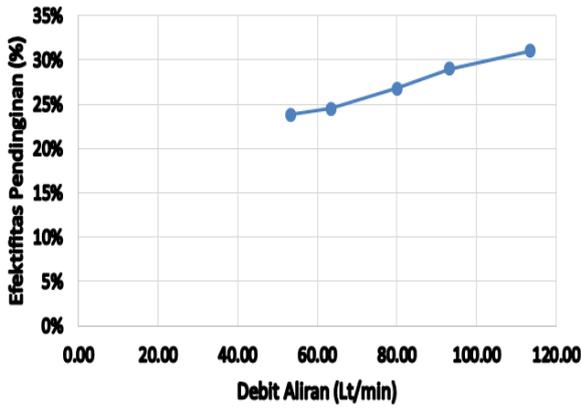
Jadi semakin temperature air keluar cooling tower mendekati temperature bola basah lingkungan sekitar cooling tower, maka semakin baik performa cooling tower tersebut.



Gambar 9. Grafik debit aliran vs temperature approach

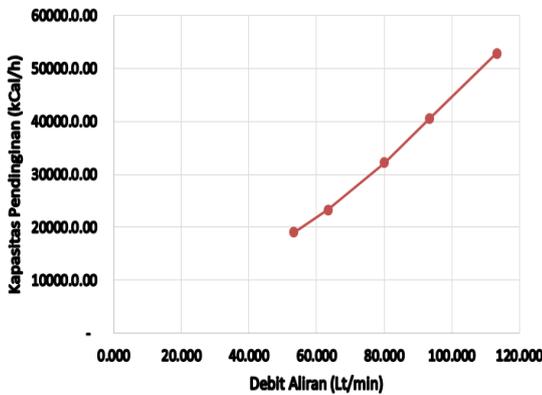
3.3. Grafik Debit Aliran vs Efektifitas Pendinginan

Hasil diatas memperlihatkan makin besar debit alirannya, maka makin tinggi efektifitas pendinginan cooling tower. Efektivitas pendinginan merupakan perbandingan antara range dan range ideal. Semakin tinggi perbandingan ini, maka semakin tinggi efektifitas pendinginan suatu menara pendingin.



Gambar 10. Grafik debit aliran vs efektifitas pendinginan

3.4. Grafik Debit Aliran vs Kapasitas Pendinginan



Gambar 11. Grafik Debit aliran vs kapasitas pendinginan

Kapasitas pendinginan suatu cooling tower adalah setara dengan kemampuan cooling tower tersebut dalam membuang kalor ke udara sekitar atau lingkungan cooling tower [11,12]. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa, makin besar debit aliran air ke cooling tower, maka kapasitas pendinginan dari cooling tower tersebut makin meningkat.

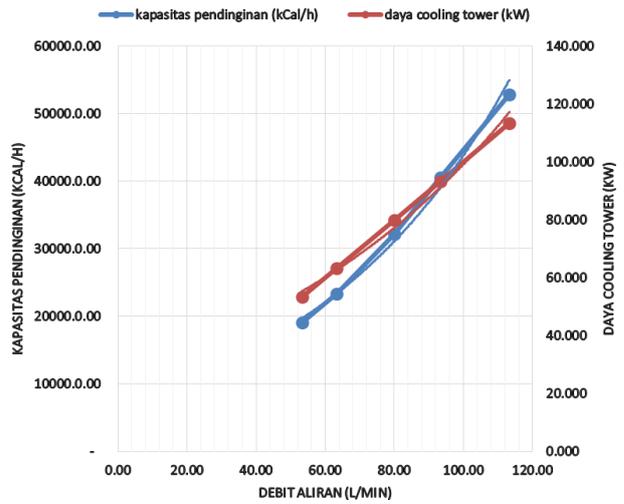
3.5. Grafik Debit Aliran vs Kapasitas Pendinginan dan Daya Cooling Tower

Meningkatnya frekuensi listrik yang disuplai ke motor pompa oleh inverter, mengakibatkan meningkatnya juga putaran poros motor. Putaran poros motor naik, naik juga putaran pompa, berakibat meningkatnya juga debit aliran air yang menuju cooling tower. Putaran poros motor meningkat, meningkat juga daya motor yang terjadi [13].

Debit aliran air ke cooling tower makin meningkat, performa cooling tower makin meningkat juga. Agar cooling tower tersebut bisa bekerja optimal dan efisien, kita harus memperhatikan sisi daya listrik yang timbul untuk mengurangi konsumsi energi listrik, juga tidak mengurangi kapasitas pendinginan dari cooling tower

Jika dilihat Grafik Gambar 6. Titik optimal cooling tower untuk pemakaian daya dan kapasitas pendinginannya adalah pada titik debit aliran 105 Liter/minute, daya yang

terjadi 13,120 kW dan menghasilkan kapasitas pendinginan sebesar 48.000 kCal/h.



Gambar 12. Grafik Debit aliran vs kapasitas pendinginan dan daya cooling tower

4. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan maka dapat diambil beberapa kesimpulan : (i) Makin besar debit aliran air ke cooling tower, maka performance cooling tower akan meningkat juga; (ii) Dengan meningkatnya debit air yang mengalir meningkat pula daya cooling tower yang terjadi; (iii) Ada titik dimana bertemunya titik performansi cooling tower dan daya cooling tower yang merupakan titik optimal untuk operasionalnya suatu cooling tower.

Supaya ada penurunan konsumsi energi listrik lagi dari sebuah sistem chiller, langkah ini bisa menjadi alternative yang bisa diambil

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami haturkan kepada Politeknik Negeri Bali, sebagai penyandang dana dalam penelitian ini, melalui P3M (Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat).

Daftar Pustaka

[1] F. Sembiring, "Pengaruh Penggunaan Media Bahan Pengisi (Filler) PVC Dengan Tinggi 22,5 Cm Dan Diameter 70 Cm Terhadap Kinerja Menara Pendingin Jenis Induced Draft Counterflow" Universitas Sumatera Utara, Medan, 2018.

[2] United Nations Environment Programme (UNEP), "Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia", 2006.

[3] S. P. Murugaveni, P. M. Shameer, 2015., "Analysis Of Forced Draft Cooling Tower Performance Using Ansys Fluent Software", International Journal Of Research In Engineering And Technology, 4, 2015, pp.217-229.

[4] J. Qian, L. Li, Y. Tan, and D. Zheng, "Research And Application Of Closed Cooling Tower", 2nd International Conference On Electronic & Mechanical Engineering And Information Technology ,2012, pp1-3.

- [5] Mulyono dan Baskoro, "Karakteristik Pendingin dengan Bahan Isian Plastik Bergelombang", Media Teknik, No. 1 tahun XXII, Edisi Februari, 2000
- [6] S. Jamilah, "Unjuk Kerja Cooling tower dengan Plat Aluminium sebagai Pendistribusi Aliran", Laporan Penelitian Laboratorium Teknologi Kimia Umum, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 1999.
- [7] Prayitno, "Karakteristik Susunan Bilah Pengisi yang Menggunakan Permukaan Bergelombang pada Cooling tower dengan Aliran Lawan Arah", Laporan Penelitian Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, 1993.
- [8] J.A. Suryabrata, "Pendekatan Konsep Hemat Energi pada Proses Pelaksanaan Desain Gedung Baru", EECCHI Conference: Sustainable Design Practices and Energi Conservation, JW Marriot Hotel, Jakarta, 2011.
- [9] R. Ramkumar, A. Ragupathy, "Thermal Performance Of Forced Draft Counter Flow Wet Cooling Tower With Expanded Wire Mesh Packing", International Journal On "Technical And Physical Problems Of Engineering", 3, 2011, pp.19-24.
- [10] R. Ramakrishnan, R. Arumugam, "Experimental Study and Performance Analysis Of Ceramic Packing Cooling Tower Using Taguchi Method", Int. J. Of Thermal & Environmental Engineering, vol.8, 2014, pp.45-53,
- [11]. X. Qi, Y. Liu, Z. Liu, "Exergy Based Performance Analysis Of A Shower Cooling Tower", Strojniški Vestnik - Journal Of Mechanical Engineering, 59, 4, 2013, pp.251-259,
- [12] I. N. Suamir, I. N. Ardita, and I. M. Rasta, "Effects of Cooling Tower Performance to Water Cooled Chiller Energy Use: a Case Study toward Energy Conservation of Office Building," in 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 2018, pp. 712-717.
- [13] P.R. Chhaya, N.M. Mistry, A.K. Chandi-wala, "A Review On Effect of Wind Loading On Natural Draught Hyperbolic Cooling Tower", International Journal Of Advance Engineering And Research Development, 1, 2014, pp.47-50.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Analisa kotoran air pengisi ketel uap pipa api di hotel Conrad Bali

I Nengah Ludra Antara^{1*}, I Nyoman Sutarna¹, dan Achmad Wibolo²

¹Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung Bali, 80364 Indonesia

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

*Email: nengahludraantara@yahoo.com

Abstrak

Air adalah media yang penting untuk mendapat uap pada ketel uap. Apabila air tidak bersih atau masih mengandung kotoran akan mempengaruhi produktivitas ketel. Tujuan utama yang hendak dicapai dengan pengelolaan air secara umum adalah mencegah korosi yang akan timbul karatan pada tabung dan pipa pada ketel yang diakibatkan oleh kotoran yang terbawa air pengisi ketel. Sebagai tambahan, suatu perawatan yang sukses harus memenuhi hal-hal sebagai berikut : kebanyakan dari kotoran yang terbawa dalam air ketel harus dihilangkan atau diminimalisir, umum yang dapat mengakibatkan karat pada Ketel Uap harus dijaga pada batas minimum, air ketel harus dapat mendidih dengan lembut tanpa buih, konsentrasi terhadap zat padat terlarut dalam ketel harus tidak tinggi dan apabila terdapat kelebihan yang menimbulkan endapan harus diblowdown, air pengisi harus dapat memberikan perlindungan terhadap peralatan ketel dan memberikan kualitas terhadap uap yang dihasilkan. Efek yang lebih serius adalah overheating dan penyebab kerusakan pada pipa-pipa ketel uap. Setelah melakukan pengambilan data di lapangan selama satu bulan didapat nilai rata-rata untuk klorin adalah 3,0 ppm dan pH 7,8 ppm. Jadi hotel Conrad Bali sudah melakukan perawatan pencegahan batu ketel dengan baik yaitu menjaga kandungan klorin kisaran 2,5~4,0 ppm dan pH 7,0~9,0 ppm.

Kata kunci: Kotoran air dan pengolahan air

Abstract: Water is an important medium for getting steam on a boiler. If the water is not clean or still contains dirt will affect the productivity of the boiler. The main goal to be achieved by managing water in general is to prevent corrosion that will cause rust in the tubes and pipes in the boiler caused by dirt carried by the makeup water. In addition, a successful treatment must meet the following: most of the dirt carried in the boiler water must be removed or minimized, the general that can result in rust in the Boiler must be maintained at the minimum limit, the boiler water should be able to boil gently without foam, the concentration of dissolved solids in the boiler should not be high and if there are excesses that cause deposits should be blow-downed, the makeup water should be able to provide protection to the boiler equipment and provide quality to the resulting steam. A more serious effect is overheating and the cause of damage to boiler pipes. After taking data in the field for one month obtained the average value for chlorine is 3.0 ppm and pH 7.8 ppm. So Conrad Bali hotel has done the prevention of boiler scale well that is to maintain the chlorine content range of 2.5~4.0 ppm and pH 7.0~9.0 ppm.

Keywords: Water dirt and water treatment

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Air merupakan kebutuhan penting dalam proses produksi dan kegiatan lain dalam suatu industri. Perlu adanya penyediaan air tambah (make up water) yang kualitasnya memenuhi standar boiler dan kuantitasnya serta ketersediaannya sesuai dengan kebutuhan industri. Keberadaan standar baku kualitas air pengisi boiler di industri menjadi sangat penting dan untuk itu industri yang memanfaatkan boiler seperti hotel perlu memiliki pengolahan air sendiri menurut kebutuhannya [1].

Dewasa ini, penggunaan alat-alat di bidang teknologi semakin meningkat untuk memperlancar kegiatan produksi suatu perusahaan. Di Bali salah satu contoh, banyak hotel-

hotel berbintang didirikannya. Guna memperlancar kegiatan dalam memberikan pelayanan terhadap wisatawan yang berkunjung ke Hotel, alat-alat teknologi sangat diperlukan untuk menunjang fasilitas Hotel seperti laundry, kitchen, keperluan air panas dalam suatu ruangan, untuk mandi dan lain-lainnya, untuk mendapat uap diperlukannya pemakaian ketel uap. Ketel Uap merupakan peralatan utama dan sangat diperlukan untuk proses perubahan energi panas dari bahan bakar menjadi energi kinetis uap yang bertekanan dan bertemperatur tertentu. Dalam pengoperasiannya, Ketel Uap didukung dengan peralatan antara lain economizer, ruang pembakaran, pipa, burner, tangka uap, superheater, reheater, air preheater dan cerobong. Komponen tersebut

menunjang kelancaran operasi kerja Ketel Uap sehingga dapat menghasilkan uap, yang terpenting disini adalah air sebagai media utama untuk dapat menghasilkan uap. Maka dari itu air harus bersih dan bebas dari segala kotoran yang terkandung di dalamnya [2,3].

Dari uraian di atas dapat disimak suatu permasalahan tentang air, yang mana air sebagai media utama dalam pemanapahatan sebagai air pengisi ketel, yang nantinya diproses didalam ketel uap untuk dapat menghasilkan uap. Dan uap tersebut dimanapahatkan untuk laundry, kitchen, keperluan air panas dalam suatu ruangan, untuk mandi dan lain, jadi permasalahan yang timbul adalah air harus bebas dari segala kotoran, sehingga penulis mencoba mengangkat permasalahan tersebut yaitu: Analisa Kotoran Air Pengisi Ketel di Hotel Conrad Bali.

Mengingat luasnya permasalahan yang nantinya dapat muncul dari Analisa Kotoran air pengisi ketel di Hotel Conrad Bali, maka penulis hanya membahas hal-hal mencakup: analisa kotoran air pengisi ketel uap di Hotel Conrad Bali dan prosedur perlakuan air pengisi ketel uap.

2. Metode dan Bahan

2.1. Kerangka Konsep

Analisa kotoran air pengisi ketel uap di Hotel Conrad Bali, dilakukan untuk mengetahui kotoran-kotoran air pengisi ketel uap yang terkandung didalamnya. Dalam penelitian ini diperlukan data-data yang dibutuhkan seperti spesifikasi ketel uap yang digunakan, nama komponen-komponen, dan jenis perawatan yang dilakukan.

2.2. Kondisi Awal

Perawatan yang dilakukan terhadap ketel uap menyebabkan operasi ketel uap berjalan lebih lancar dan hal-hal yang tidak diinginkan bisa diminimalkan seperti kotoran pada air pengisi yang akan berpengaruh terhadap produksi uap.

2.3. Alat Ukur yang Digunakan

Ada dua alat ukur utama yang digunakan mencakup: (i) Infrared Thermometer, dengan menggunakan metode pengukuran temperatur yang cepat, tepat dan presisi untuk objek yang diukur dari jauh dan sulit disentuh, dimana objek sangat panas, jauh letaknya, perlunya mencegah kontaminasi dan kondisi lingkungan berbahaya; (ii) Tes kit, merupakan alat ukur untuk mengukur konsentrasi ion hidrogen dalam air atau disebut pH dan kandungan klorin atau CL.

2.4. Lokasi Penelitian

Pengambilan data penelitian ini dilakukan sekitar satu bulan (Mei – Juni 2020) di Hotel Conrad Bali, JL. Pratama 168 Tanjung Benoa, Nusa Dua, Kuta Selatan, Badung, Bali.

2.5. Analisa Data

Penelitian ini merupakan analisa data yang didapat dari hasil pengamatan yang menggunakan metode observasi di lapangan dengan melakukan pengukuran dari alat ukur yang digunakan yaitu Infrared Thermometer dan Tes kit, sehingga dapat memberikan penjelasan yang lebih rinci terhadap usaha perawatan dan pencegahan kotoran air pengisi ketel uap apakah sudah sesuai dengan SOP (Standar Operasional Perawatan).

3. Hasil dan Pembahasan

Pengolahan Air pengisi ketel sesuai karakteristik air pengisi ketel yang memproduksi uap yang berkualitas dan tergantung pada pengolahan air yang benar untuk mengendalikan kualitas uap, endapan dan korosi serta mencegah disebabkan terjadinya carry over pada garam-garam hasil dari uap. Ketel uap atau boiler merupakan bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau uap atau berupa energi kerja. Berikut gambar dan spesifikasi ketel uap yang digunakan di Hotel Conrad Bali, seperti berikut:



Gambar 1. Ketel Uap Hotel Conrad Bali

Tabel 1. Spesifikasi Ketel Uap Hotel Conrad Bali

<i>Made in</i>	Germany
<i>Date</i>	May 2003
<i>Design Pressure</i>	10 kg/cm ²
<i>Test Pressure</i>	15 kg/cm ²
<i>Capacity</i>	1250 kg/h
<i>Number</i>	YB 25/10- 03

3.1. Pengolahan Air

Air merupakan kebutuhan utama untuk dapat menghasilkan uap, maka air ada beberapa jenis yang dapat difahatkan untuk pengisi air ketel, yaitu :

- Air sumber yang digunakan untuk pengisian ketel uap pada umumnya mengandung bahan- bahan padat dan gas yang bisa larut di air.
- Air hujan dapat kotor saat jatuh di atmosfer, serta dapat mengandung gas-gas yang larut seperti oksigen dan karbon dioksida. Karbon dioksida dapat membentuk zat asam lemah serta bisa menambah kelarutan bahan-bahan lain yang ada di dalam air.
- Sedangkan air kali yang banyak membawa kotoran jenis sampah, lumpur, minyak, sabun dan zat-zat kimia lainnya, sebelum digunakan untuk air pengisi, kotoran tersebut harus dibersihkan terlebih dahulu.

Jenis kotoran-kotoran yang terkandung di dalam air secara kasar dapat diklasifikasikan [4-6] sebagai berikut:

- Gas-gas yang terlarut diantaranya, nitrogen dan hidro-karbon, dan gas-gas yang menimbulkan korosif (oksigen, karbon dioksida dan hidrogen sulfida).

- Bahan-bahan padat: garam-garam kalsium dan magnesium, minyak dan silica, sedangkan bahan padatan yang dapat larut seperti garam dapur (NaCl), natrium-sulfat, natrium-karbonat, natrium-nitrat dan natrium-silikat.
- Bahan padat yang dapat mengendap seperti tanah liat, lumpur, benda organik/anorganik: umumnya dapat dijumpai di sungai-sungai serta air mengalir; dan bahan-bahan yang tak terlarut.
- Bahan-bahan yang tidak dapat larut misalnya: gemuk dan sabun.

Perbandingan spesifikasi air ketel dan air pengisi air pengisi:

- Kandungan oksigen 0 dan tidak melebihi 0,05 cc/L untuk boiler yang memakai economizer serta pipa baja.
- pH harus sama atau lebih besar dari 7; keasaman dijaga minimum.
- Kesadahan: sebaiknya dijaga 0, kurang dari 26 ppm yang terukur sebagai kalsium karbonat.
- Klorida dijaga serendah mungkin, bila digunakan untuk condensor harus kurang atau sama dengan 6 ppm.
- Minyak harus tidak ada, bahan padat dijaga minimum, bahan-bahan padat yang dapat mengendap dihindari dan zat organik harus kurang atau maksimum sama dengan 5 ppm

Sedangkan untuk air ketel dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Natrium phosphate. kesadahan dibuat di antara 50 dan 100 ppm dalam bentuk natrium fosfat.
- Kebasaan (alkalinitas) : terletak di antara 100 dan 250 ppm disesuaikan dengan silikat yang dikandung.
- Chlorida: tidak lebih dari 500 ppm, di harapkan serendah mungkin, dengan ph tidak kurang dari 10,5, yang diharapkan 11,0, dan minyak tidak sedangkan bahan padat tidak lebih dari 1700 ppm

3.2. Pengolahan Air Internal

Pengolahan internal merupakan penambahan zat kimia ke dalam ketel untuk mencegah terbentuknya kerak yang bersumber dari senyawa yang dapat membentuk kerak selanjutnya menjadi lumpur yang dapat mengalir bebas dan bisa dibuang melalui proses blowdown. Metode ini terbatas pada ketel dimana air pengisi mengandung garam sadah yang rendah, dengan tekanan rendah sehingga kandungan konduktivitas tinggi didalam ketel ini dapat ditoleransi jika jumlah airnya kecil.

3.3. Pengolahan Air Eksternal

Pengolahan eksternal dimanfaatkan untuk membuang zat padat yang tersuspensi, padatan yang telarut (khususnya ion kalsium serta magnesium dan merupakan faktor penyebab utama terbentuknya kerak) dan gas yang dapat larut (oksigen dan karbon-dioksida). Proses eksternal merupakan pertukaran ion-deaerasi (mekanis/kimia), Osmosis mampu balik (reverse-osmosis). Dengan tujuan menghilangkan mineral atau demineralisasi sebelum digunakan. Metode ini sangat diperlukan untuk membuang zat padat serta warna dari air penambah boiler. Zat padat dapat mengotori proses pengolahan air selanjutnya.

Hal utama pengolahan adalah menurunkan serendah mungkin atau menghilangkan kesadahan dan ion-ion.

Proses ini disebut pelunakan (softening), sedangkan proses untuk menghilangkan kesadahan total disebut demineralisasi. Pada Hotel Conrad Bali, pengelolaan air seperti gambar 2 dimana air yang didapat dari sumur bor dan PDAM yang dipompakan dengan submersible langsung dialirkan melalui pipa yang kemudian dipercikkan pada unit aerasi pada bak penampungan air dan dipompakan ke Water Treatment untuk mendapatkan pembersihan atau permurnian sehingga standar atau ph air dapat tercapai.

3.4. Pengendalian Endapan

Endapan dalam ketel dapat diakibatkan dari kesadahan air pengisi dan hasil korosi dari sistem kondensat dan air pengisi. Kesadahan air pengisi dapat terjadi karena kurangnya sistem pelunakan. Endapan dan korosi menyebabkan kehilangan efisiensi yang dapat menyebabkan kegagalan dalam pipa ketel dan ketidakmampuan memproduksi uap. Endapan bertindak sebagai isolator dan memperlambat perpindahan panas. Sejumlah besar endapan diseluruh ketel dapat mengurangi perpindahan panas yang secara signifikan dapat menurunkan efisiensi ketel [7].

Bahan kimia yang paling penting dalam air yang mempengaruhi pembentukan endapan dalam ketel adalah garam kalsium dan magnesium yang dikenal dengan garam sadah. Hal ini disebut dengan kesadahan sementara (kesadahan yang dapat dibuang dengan pendidihan). Kalsium dan magnesium sulfat, klorida dan nitrat bila dilarutkan air secara kimiawi akan menjadi netral dan dikenal dengan kesadahan non-alkali. Bahan kimia sadah non-alkali yang terlepas dari larutannya karena ada penurunan daya larut dengan meningkatnya suhu sehingga pemekatan karena penguapan yang berlangsung dalam ketel atau dengan perubahan bahan kimia menjadi senyawa yang kurang larut [8-10].

Keberadaan silika dalam air ketel dapat meningkatkan pembentukan kerak silika yang keras. Silika dapat juga berinteraksi dengan garam kalsium dan magnesium, membentuk silikat kalsium dan magnesium dengan daya konduktivitas panas yang rendah. Silika dapat meningkatkan endapan pada dinding ketel, setelah terbawa dalam bentuk tetesan air dalam uap, atau dalam bentuk yang mudah menguap uap padatekanantinggi.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengecekan air pengisi ketel uap di hotel Conrad Bali sebagai berikut:

- Siapkan alat ukur yang akan digunakan (infrared thermometer dan tes kit)
- Siapkan alat keamanan seperti masker dan sarung tangan
- Pertama mengambil sampel air dari header domestic water tank dengan menggunakan tes kit
- Kemudian catat hasil dari pengukuran
- Setelah itu ukur temperatur air menggunakan infrared thermometer
- Kemudian catat hasil dari pengukuran
- Setelah selesai, kemudia lanjutkan mengambil sampel air di header calorifier
- Langkah pengambilan data di header calorifier sama seperti pengambilan data di header domestic water tank.

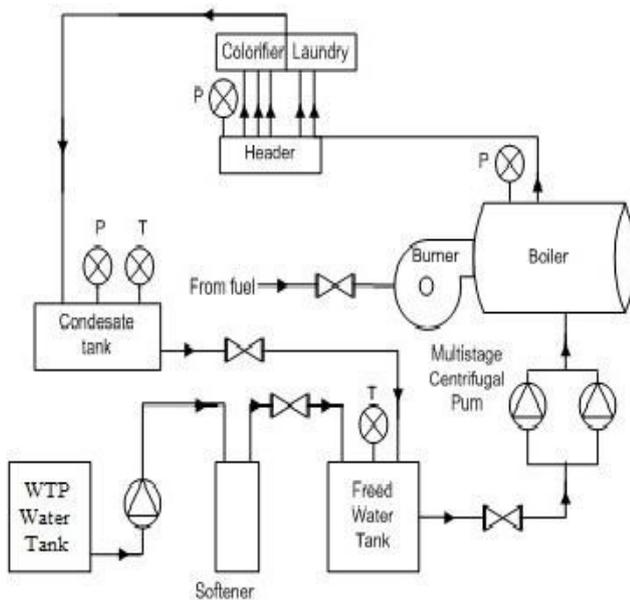
Persyaratan air pengisi ketel bebas dari kotoran, chloride serendah mungkin tidak lebih dari 6 ppm, kesadahan air

tidak lebih dari 26 ppm, bebas dari minyak, bebas bahan padat, pH tidak kurang dari 7 dan bahan organik tidak lebih dari 5 ppm. Dimana persyaratan Air Pengisi Ketel Uap Di Hotel Conrad Bali (Tabel 2), yang telah dilakukan perlakuan penambahan klorin terhadap air pengisi Penambahan klorin akan dilakukan jika klorin di bawah 2,5 ppm dan pH di bawah 7,0 ppm dan klorin yang ditambah kisaran 25 liter sampai 30 liter [11,12].

Tabel 2. Standar air pengisi ketel uap di Hotel Conrad Bali

Item	Nilai Standar
Chlorine (ppm)	2,5 ~ 4,0
pH (ppm)	7,0 ~ 9,0

Adapun skematik aliran ketel uap di Hotel Conrad Bali disajikan pada Gambar 2.

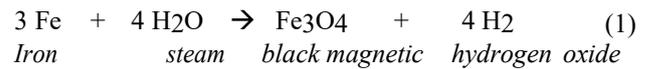


Gambar 2. Ketel Uap Hotel Conrad Bali

3.5. Pengendalian Endapan

Dalam pengamatan di lapangan dan referensi yang penulis gunakan dimana kotoran-kotoran yang terkandung di dalam air dan apabila air tidak diproses terlebih dahulu akan mengakibatkan kerusakan yang ditimbulkan oleh air terhadap komponen-komponen Ketel Uap. Kotoran dari air tersebut akan mengakibatkan terjadinya korosi di dalam ketel uap atau peralatan air pengisi, kotoran-kotoran yang mempercepat terjadinya korosi di dalam ketel uap adalah korosi yang ditimbulkan adanya oxygen yang terlarut dalam air, asam-asam, endapan yang dipermukaan terutama yang mempunyai sifat electronegative terhadap baja, gabungan logam yang tak disukai seperti tembaga dan baja, dan adanya electrolytes seperti larutan garam.

Pada suhu yang lebih tinggi, terutama diatas 950° F, uap dapat bereaksi dengan besi (iron):



Pada suhu sampai 950° F reaksi korosi ini lambat. diatas suhu ini kecepatan dipercepat, dan campuran Cr – Ni campuran KA2 dapat digunakan. Bahan-bahan ini membentuk suatu lapisan *oxida* pelindung pada permukaan logam, dimana hal seperti ini tak terjadi pada baja.

Di bawah keadaan yang baik untuk terjadinya korosi dan adanya tekanan, logam dapat berkarat dalam bentuk lobang yang dalam dan runcing, yang akhirnya berkembang memanjang seperti celah atau menjadi retak. Bila kejadian ini tidak dihentikan, maka bagian yang diserang ini akhirnya menjadi lemah. Penelitian mikroskopik menunjukkan bahwa hal tersebut dapat terjadi dengan karakteristik retak transkristalin, dan dalam bentuk seperti garis lurus atau sering disebut Caustic Embrittlement.

Pada kondisi air pengisi tertentu, kekhasan bentuk retak dapat dilihat pada plat boiler, khususnya pada bagian paku keling yang berada lebih rendah dari muka air. Retak-retak ini merupakan inter-crystalline serta tidak mengikuti pola garis tekanan tertinggi. Keretakan seperti tersebut sering dikenal dengan caustic embrittlement. Keadaan tersebut dapat berlangsung apabila konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) berada pada air boiler, sedangkan unsur lainnya tidak ada, dan Embrittlement bisa dihindari apabila perbandingan sodium sulfat dan sodium karbonat dipertahankan dengan tepat pada air pengisi.

Untuk mendapatkan kerja optimal dari Ketel Uap, maka air pengisi harus memenuhi standar dimana pH air tidak kurang dari 7, pH rendah akan terjadi korosi dan pada pH tinggi akan terjadi buih untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakuka dengan cara:

- Menghilangkan gas terlarut pada air pengisi, terutama oksigen dan karbon dioksida.
- Penetralkan asam serta mempertahankan alkalinitas yang diperlukan dan pH pada air pengisi boiler.
- Pembersihan mesin secara berkala
- Meniadakan konsentrasi garam yang berlebihan.

3.6. Data Hasil Pengukuran

Adapun data-data yang didapat dari alat ukur setelah melakukan pengamatan di lapangan selama satu bulan disajikan pada Tabel 3.

Setelah mendapatkan data di lapangan dan hasil pengukuran alat ukur kemudian hasil data dirata-ratakan dengan nilai rata-rata pengukuran alat ukur selama satu bulan dapat dilihat pada Tabel 4. Jadi hasil pengolahan data seperti Tabel 4, yang mana temperaturnya (29,3), chlorine (3.0). pH (7.8) pada Domestic Water Tank, pada Header Calorifier temperaturnya (58,84), Chlorine (1,15), dan pH (7,6).

Tabel 3. Data hasil dari pengukuran

No	Date	Domestic Water Tank			Header Calorifier		
		Temperatur (°C)	Chlorine (ppm)	pH (ppm)	Temperatur (°C)	Chlorine (ppm)	pH (ppm)
1	15-05-2015	29,0	3,0	7,8	55,8	1,0	7,6
2	16-05-2015	29,0	3,0	7,8	65,1	1,0	7,6
3	17-05-2015	29,5	3,0	7,8	56,1	1,0	7,6
4	18-05-2015	29,2	3,0	7,8	56,2	1,0	7,6
5	19-05-2015	29,1	3,0	7,8	55,9	1,0	7,6
6	20-05-2015	29,5	3,0	7,8	65,0	1,0	7,6
7	21-05-2015	29,1	3,0	7,8	55,7	1,0	7,6
8	22-05-2015	29,7	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
9	23-05-2015	29,5	3,0	7,8	65,0	1,0	7,6
10	24-05-2015	29,6	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
11	25-05-2015	29,7	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
12	26-05-2015	29,6	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
13	27-05-2015	29,5	3,0	7,8	65,2	1,0	7,6
14	28-05-2015	29,5	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
15	29-05-2015	29,5	3,0	7,8	65,0	1,0	7,6
16	30-05-2015	29,5	3,0	7,8	56,3	1,5	7,6
17	31-05-2015	29,5	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
18	01-06-2015	29,5	3,0	7,8	56,5	1,5	7,6
19	02-06-2015	28,7	3,0	7,8	56,3	1,5	7,6
20	03-06-2015	29,5	3,0	7,8	65,0	1,0	7,6
21	04-06-2015	29,1	3,0	7,8	55,7	1,0	7,6
22	05-06-2015	28,9	3,0	7,8	56,4	1,0	7,6
23	06-06-2015	29,1	3,0	7,8	65,2	1,0	7,6
24	07-06-2015	29,0	3,0	7,8	55,8	1,0	7,6
25	08-06-2015	29,0	3,0	7,8	65,1	1,0	7,6
26	09-06-2015	29,5	3,0	7,8	56,1	1,0	7,6
27	10-06-2015	29,2	3,0	7,8	56,2	1,0	7,6
28	11-06-2015	29,1	3,0	7,8	55,9	1,0	7,6
29	12-06-2015	29,5	3,0	7,8	65,0	1,0	7,6
30	13-06-2015	29,1	3,0	7,8	55,7	1,0	7,6

Tabel 4. Nilai rata-rata pengukuran selama satu bulan

Domestic Water Tank			Header Calorifier		
Temperatur (°C)	Klorin (ppm)	pH (ppm)	Temperatur (°C)	Chlorine (ppm)	pH (ppm)
29,3	3,0	7,8	58,84	1,15	7,6

4. Kesimpulan

Dari uraian dan pembahasan mengenai analisa kotoran air pengisi ketel uap di Hotel Conrad Bali, maka dapat disimpulkan: (i) Usaha pencegahan kotoran air dapat dilakukan dengan cara menjaga kandungan klorin dan pH agar air yang nantinya masuk ke ketel uap sudah memenuhi persyaratan yaitu mengandung klorin kisaran antara 2,5~4,0 ppm dan pH kisaran antara 7,0~9,0 ppm sebelum air itu masuk ke ketel uap. Maka dari itu, setiap harinya akan dilakukan pengecekan terhadap air yang nantinya akan masuk ke ketel uap. Selain menjaga kandungan klorin dan pH, pencegahan kotoran air juga dilakukan dengan cara melakukan blow down setiap 2 jam sekali kurang lebih 7 sampai 10 detik; (ii) Prosedur perlakuan air pengisi ketel uap yaitu pertama-tama kita harus melakukan pengecekan terhadap air itu jika kadar klorin < 2,5 ppm dan pH < 7,0 ppm, maka perlu dilakukan perlakuan terhadap air itu dengan cara penambahan klorin. Penambahan klorin akan dilakukan jika kadar klorin di bawah 2,5 ppm dan pH di bawah 7,0 ppm dan klorin yang ditambah kisaran 25 liter sampai 30 liter.

Dari studi kasus yang telah dilakukan di Hotel Conrad Bali, dan hasil data yang didapat, disarankan untuk melakukan pemeriksaan secara teratur dan kontinyu terutama pada air pengisi agar ketel uap terhindar dari

kotoran yang terkandung dalam air dan ketel uap bisa beroperasi secara maksimal dan melakukan blow down secara teratur dan sesuai prosedurnya karena blow down sangat penting dilakukan untuk pencegahan endapan yang terkandung pada air pengisi. Kepatuhan kepada semua prosedur dalam penggunaan dan perawatan terhadap ketel uap juga sangat diperlukan agar usia ketel uap lebih panjang dan penggunaannya tetap aman.

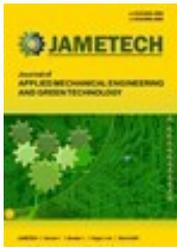
Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan atau dukungan dari teman sejawat di Politeknik Negeri Bali yang telah membantu penyelesaian penelitian yang dipublikasikan dalam artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] A. Corder, "Teknik Manajemen Pemeliharaan", Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama, 1996.
- [2] J. Satriawan, "Pengolahan Air. <http://chemicalengineeringatip.com/2013/05/utilitas-pengolahan-air>, 2015
- [3] L.A. Bruijn dan L. Muilwijk, "Ketel Uap", Pradnya Pramitra, Jakarta 1980.
- [4] M.I. Lestari, "Himpunan Peraturan Perundangan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) RI, Portalk3.com, 2005.
- [5] Muliati, "Pengendalian Korosi pada Ketel Uap", <http://portalgaruda.org/article.phparticle>, 2008.
- [6] Manual Book, "Steam Boiler Maintenance" Conrad Hotel Bali, 2012.
- [7] Sunardi., "Boiler Chemical Treatment. <https://suntzu2107.wordpress.com/2011>, 2011.
- [8] A. Silalahi, "Ketel Uap I", ATN Malang, 1981.

- [9] S.A. Muin, "Pesawat – Pesawat Konversi Energi I", CV. Rajawali, Jakarta, 1988
- [10] V.L. Snoeyink, and D. Jenkins, "Water Chemistry", New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [11] O. Solorza and L. Olivares, "Experimental Demonstration of Corrosion Phenomena", 1991.
- [12] R. Walker, "The Corrosion and Preservation of Iron Antiques" Journal of Chemical, 1982.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Analisa kinerja cooling tower tipe counter flow induced draft

Luh Putu Ike Midiani^{1*}, I Wayan Temaja², I Putu Merta Adnyana³,
I Kadek Dwiana³ dan I Made Prasana Yoga³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

³Mahasiswa Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

*Email: putuikemidiani@pnb.ac.id

Abstrak

Paper ini bertujuan untuk memberikan wawasan tentang kinerja menara pendingin. Menara pendingin yang diamati adalah menara pendingin tipe counterflow induced draft. Analisa dilakukan untuk mengetahui pengaruh temperatur lingkungan terhadap kinerja menara pendingin, kerugian energi dan alternatif perbaikan. Metode yang digunakan adalah pengumpulan data operasional, pengolahan data dan selanjutnya menganalisa hasil pengolahan data. Parameter kinerja menara pendingin yang dicari meliputi range, approach, efektifitas, kapasitas pendinginan. Kerugian yang terjadi selama operasional menara pendingin seperti kerugian penguapan, blow down dan drift juga dihitung. Hasil analisa kinerja menara pendingin menyatakan bahwa efektivitas menara pendingin tinggi karena laju penguapan yang tinggi dan lebih sedikit kehilangan karena penguapan, blowdown, dan drift. Laju penguapan yang tinggi dapat terjadi karena jumlah uap air yang rendah di udara dan menunjukkan kelembaban relatif yang rendah, sehingga penurunan temperatur wet bulb akan besar.

Kata kunci: menara pendingin, kinerja, range, approach, efektifitas

Abstract: This paper aims to provide insight into cooling tower performance. The cooling tower observed is a counterflow induced draft cooling tower. The analysis was conducted to determine the effect of environmental temperature on cooling tower performance, energy losses and alternative improvements. The method used is operational data collection, data processing and then analyzing the results. The cooling tower performance parameters include range, approach, effectiveness, cooling capacity. Losses that occur during cooling tower operations such as evaporation losses, blow downs and drifts are also calculated. The results of the cooling tower performance analysis indicate that the effectiveness of the cooling tower is high due to the high evaporation rate and less loss due to evaporation, blowdown, and drift. A high evaporation rate can occur due to the low amount of water vapor in the air and shows low relative humidity, so that the decrease in wet bulb temperature can be large.

Keywords: cooling tower, performance, range, approach, effectivity

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Tujuan penulisan paper ini adalah sebagai studi kinerja menara pendingin yang beroperasi di laboratorium Tata Udara Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali. Menara pendingin ini merupakan bagian dari sistem AC Central tipe chilled water dimana kondensor yang digunakan adalah kondensor berpendingin air. Untuk membuang panas air pendingin kondensor ini digunakan menara pendingin. Jenis menara pendingin yang digunakan adalah draft mekanis kontak langsung (*open tower*) dimana air yang didinginkan berkontak dengan udara dan kipas ditempatkan di sisi saluran keluar udara (*induced draft*) [1].

Menara pendingin dapat dikatakan sebagai alat penukar panas dengan prinsip kerja melepaskan dan memindahkan

panas antara air pendingin kondensor ke udara. Air pendingin kondensor yang hangat dipompakan ke bagian atas menara pendingin kemudian didistribusikan melalui splash bars (batang percikan) ke material pengisi menara pendingin. Material pengisi menara pendingin berfungsi menghambat laju air yang jatuh. Material pengisi membuat permukaan air sebanyak mungkin, meningkatkan waktu kontak antara air dengan udara guna meningkatkan penguapan dan perpindahan panas. Udara dapat berkontak dengan air karena udara ditarik atau dipaksa melintasi kisi-kisi (*fill*) oleh satu atau lebih kipas di bagian atas menara. Air yang bersentuhan dengan udara akan menguap dan sisa panas laten air dipindahkan ke udara. Proses tersebut menyebabkan temperatur bola basah udara meningkat dan temperatur air menurun saat air dan udara keluar dari

menara pendingin [2]. Air yang sudah dingin akan ditampung di dalam bak penampung untuk kemudian disirkulasikan kembali ke kondensor. Pada bak penampung dipasang katup make up water untuk menjaga kapasitas air pendingin tidak berkurang akibat terjadinya proses *evaporative cooling* tersebut. Pengendalian kehilangan air dalam bentuk penguapan juga dapat menjadi sebuah perhatian untuk menghindari pemborosan energi [3, 4].

Paper ini akan menganalisa pengaruh temperatur lingkungan sekitar (temperatur *dry bulb* dan *wet bulb*) terhadap parameter kinerja menara pendingin. Analisa dilakukan untuk dapat memberikan wawasan tentang kinerja menara pendingin, kehilangan energi dan alternative perbaikan. Banyak penelitian telah dilakukan untuk menganalisa kinerja menara pendingin dan hasil-hasil penelitian tersebut digunakan sebagai referensi dalam penulisan artikel ini [5-9].

2. Metode

Metodologi yang digunakan adalah pengumpulan data operasional, pengolahan data dan analisa hasil pengolahan data. Jenis menara pendingin yang digunakan pada AC Central tipe chilled water adalah LBC 15 dengan cooling capacity 59.5 kCal/hr. Spesifikasi teknis menara pendingin disajikan pada Tabel 1.

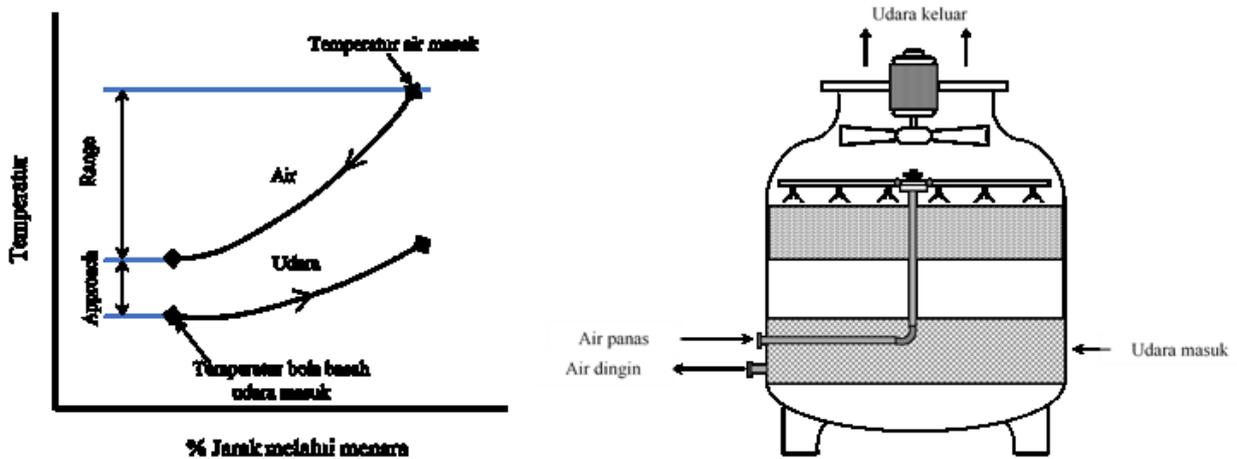
Evaluasi kinerja menara pendingin diperlukan sebagai upaya penghematan energi dan sarana perbaikan. Kinerja menara dievaluasi dengan menghitung range, approach, efektifitas dan sistem distribusi air, dimana sangat ditentukan oleh laju aliran masa air dan udara, temperatur air masuk dan keluar, dan temperatur bola basah udara masuk dan keluar [10, 11].

Tabel 1. Spesifikasi teknis menara pendingin LCT 15

No.	Jenis	Ukuran
1	H (mm)	: 1495
2	D (mm)	: 1170
3	Pipe Connection outlet (mm)	: 50
4	Pipe Connection inlet (mm)	: 50
5	Pipe Connection overflow (mm)	: 25
6	Pipe Connection drain (mm)	: 20
7	Pipe Connection auto filler (mm)	: 15
8	Pipe Connection quick filter(mm)	: 15
9	Fan Motor (HP)	: 1/4
10	Fan Dia. (mm)	: 670
11	Air Volume (m3/m)	: 135
12	Nominal Water Flow (L/M)	: 195
13	Tower Heads (m)	: 1.6
14	Nominal Tons	: 15

Distribusi temperatur menara pendingin jenis Counter-flow Induced Draft ditunjukkan pada Gambar 1.

Parameter input meliputi temperatur dan RH (kelembaban relatif) udara, temperatur air masuk dan keluar menara pendingin, laju aliran udara dan air. Menurut Kumar [5], kinerja menara pendingin ditentukan dengan menghitung: range, approach, efektifitas dan kapasitas pendinginan, blow down dan drift.



Gambar 1 Distribusi temperatur dalam menara pendingin

2.1. Range (R),

Range merupakan perbedaan antara temperatur air masuk dan keluar menara pendingin, disebut juga kemampuan air untuk menurunkan temperaturnya. Range yang tinggi menunjukkan menara pendingin bekerja dengan baik dan efektif. Secara matematis,

$$R (^{\circ}C) = t_h - t_c \tag{1}$$

dimana :

t_h = temperatur air masuk, temperatur air panas ($^{\circ}C$)

t_c = temperatur air keluar, temperatur air dingin ($^{\circ}C$)

2.2. Approach (A),

Approach merupakan perbedaan antara temperatur air keluar dan temperatur bola basah udara masuk. semakin besar menara pendingin semakin dekat Approach tersebut. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$A (^{\circ}C) = t_c - t_{wb} \tag{2}$$

dimana :

t_c = temperatur air keluar, temperatur air dingin (°C)

t_{wb} = temperatur wet bulb udara masuk menara (°C)

2.3. Efektifitas Pendinginan (ϵ),

Efektifitas pendinginan merupakan perbandingan antara range dan selisih temperatur air masuk dan bola basah udara. Semakin tinggi perbandingan ini, maka semakin tinggi efektivitas pendinginan suatu menara pendingin. Secara matematis:

$$\epsilon = \frac{t_h - t_c}{(t_h - t_c) + (t_c - t_{wb})} = \frac{t_h - t_c}{(t_h - t_{wb})} \tag{3}$$

2.4. Cooling Capacity (Kapasitas Pendinginan)

Merupakan kemampuan menara pendingin tersebut dalam membuang panas ke lingkungan.

$$Q = \dot{m}_w c_p (t_h - t_c) \tag{4}$$

dimana :

Q = kapasitas panas (kJ/s)

\dot{m}_w = laju alir masa air (kg/s)

c_p = panas spesifik air (kJ/kg °C)

Selanjutnya dihitung kerugian-kerugian yang dapat diakibatkan oleh evaporasi dan blow down.

2.5. Evaporation Losses / Kehilangan Penguapan (E),

$$E = 0.00085 \times R \times C \tag{5}$$

dimana :

0.00085 = konstanta penguapan [5]

C = nominal water flow pada spesifikasi menara pendingin (m³/h)

2.6. Blow Down (B)

Merupakan metode untuk mengontrol konsentrasi TDS dengan membuang sebagian aliran air yang bersirkulasi (bersama dengan beban TDS-nya) dan diisi ulang dengan air make-up yang relatif murni.

$$B = \frac{E}{COC - 1} \tag{6}$$

Dimana :

COC = Cycle of Concentration ditentukan 5 [9]

2.7. Drift (D)

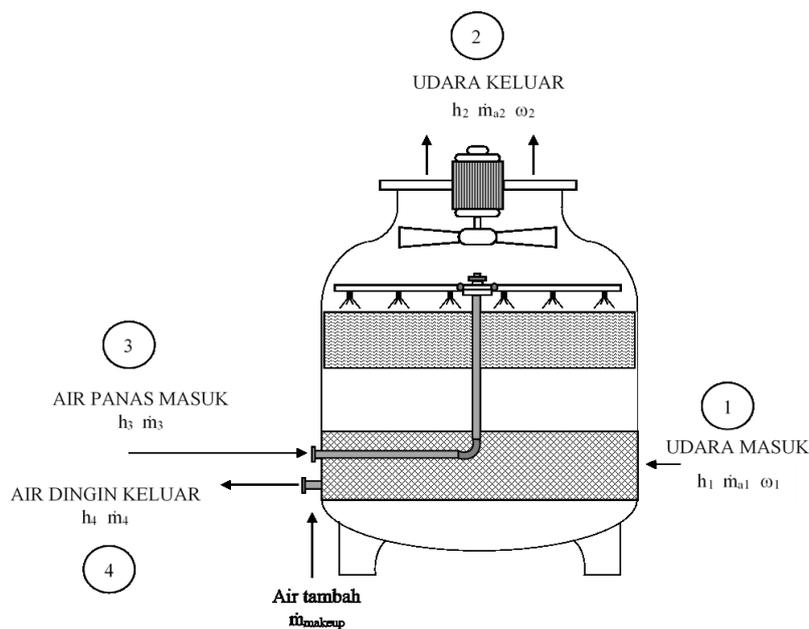
Merupakan tetesan air yang terperangkap di aliran udara yang akan hilang bersama udara.

$$D = 0.1 \times C \tag{7}$$

Set up pengambilan data awal untuk pengujian dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2. Sifat psikrometrik yang merupakan hasil perhitungan disajikan dalam bentuk tabel (Tabel 3).

Tabel 2. Parameter pengambilan data awal

Parameter	Nilai
Temperatur dry bulb udara masuk (t_{db1}), °C	27.6
Temperatur dry bulb udara keluar (t_{db2}), °C	27.6
Relatif Humidity udara masuk (RH ₁), %	82%
Relatif Humidity udara keluar (RH ₂), %	89%
Temperatur air masuk menara (t_3), °C	29
Temperatur air keluar menara (t_4), °C	26
Volume udara, m ³ /h	8100
Volume aliran air, m ³ /h	11.7
Tekanan udara (mm Hg)	760



Gambar 2. Set up pengambilan data

Tabel 3. Sifat psikrometrik yang dihitung

Parameter	Nilai
Temperatur wet bulb udara masuk (t_{wb1}), °C	25.12
Temperatur wet bulb udara keluar (t_{wb2}), °C	26.11
Enthalpy udara masuk (h_1), kJ/kg	76.7
Enthalpy udara masuk (h_2), kJ/kg	81
Sp. Humidity udara masuk (ω_1), kg/kg udara kering	0.0192
Sp. Humidity udara masuk (ω_2), kg/kg udara kering	0.0209
Sp. Volumetrik udara (v_1) m ³ /kg udara kering	0.878
Sp. Volumetrik udara (v_2) m ³ /kg udara kering	0.881

Pengambilan data dilakukan selama 20 hari, perhitungan parameter kinerja dan kerugian untuk data awal adalah sebagai berikut:

$$R = 29 - 26 = 3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A = 26 - 25.12 = 0.88 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\epsilon = \frac{29 - 26}{29 - 25.1} = 0.773$$

Laju alir massa udara :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_3(h_3 - h_4)}{(h_2 - h_1) - (\omega_2 - \omega_1)h_4}$$

$$= \frac{1170(121.56 - 109.01)}{(82.28 - 76.7) - (0.0212 - 0.0192)(109.01)}$$

$$= 27375.77 \text{ kg/h}$$

Penambahan panas pada udara (HG) :

$$HG = \dot{m}_a \times C_{pa} \times (t_2 - t_1)$$

$$= 27375.77 \times 1.005 \times (27.9 - 27.6)$$

$$= 8253.79 \text{ kJ/h}$$

Panas yang dibuang oleh air/ cooling capacity (HL) :

$$HL = \dot{m}_{makeup} \times C_{pw} \times (t_3 - t_4)$$

$$\dot{m}_{makeup} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$$

$$= 27375.77 (0.0212 - 0.0192)$$

$$= 54.75 \text{ kg/h}$$

$$HL = 54.75 \times 4.18 \times (29 - 26)$$

$$= 686.58 \text{ kJ/h}$$

Perhitungan kerugian-kerugian yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$E = 0.00085 \times 3 \times 11.7$$

$$= 0.0298 \text{ m}^3/\text{h}$$

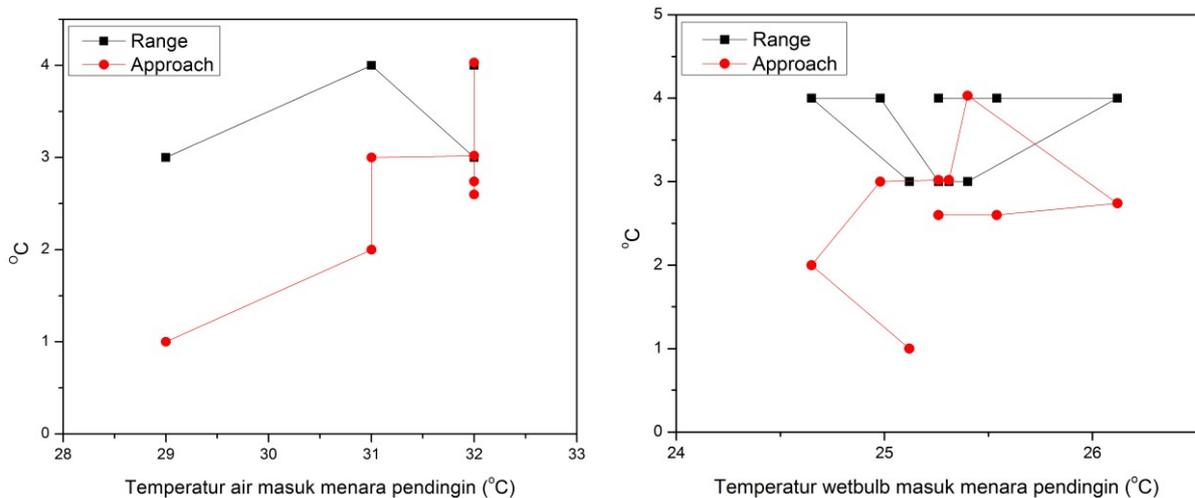
$$B = \frac{0.0298}{5 - 1} = 0.00746 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$D = 0.1 \times 11.7 = 1.17 \text{ m}^3/\text{h}$$

Perhitungan selanjutnya diolah dengan menggunakan program spread sheet dan Origin. Dengan program ini, kinerja menara pendingin dapat diketahui dan disimulasikan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan kinerja menara pendingin yang meliputi range, approach, efektifitas ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 3 dan 4. Selanjutnya hasil perhitungan kapasitas pendinginan dan losses ditampilkan pada Gambar 5 dan 6.



Gambar 3. Range dan approach

Range dihasilkan dari beda temperatur air masuk dan keluar menara pendingin. Range yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar antara 3-4 °C, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Variasi temperatur air dan temperatur wet bulb masuk menara pendingin tidak berpengaruh signifikan terhadap range.

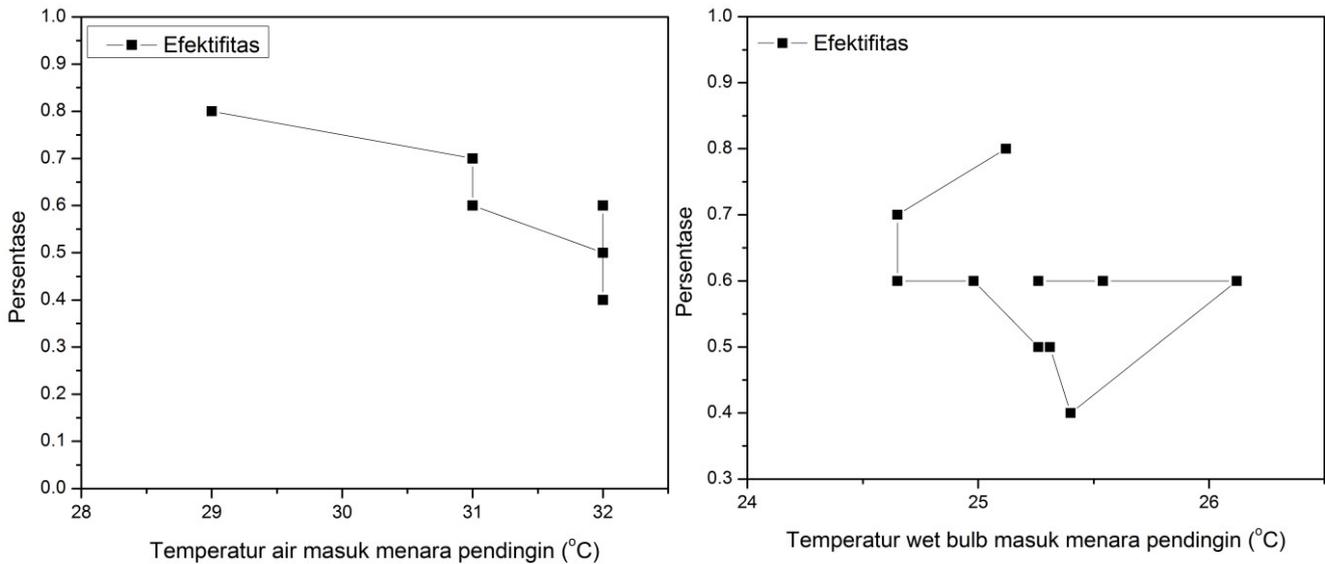
Range ditentukan saat perancangan menara pendingin. Range dipengaruhi oleh laju sirkulasi air, semakin besar laju sirkulasi air, range akan semakin kecil dan berlaku sebaliknya [10]. Pada paper ini laju aliran air adalah tetap yaitu 195 liter permenit atau setara dengan 11.7 m³/jam sehingga range yang dihasilkan tetap pada kisaran 3-4 °C.

Approach merupakan beda temperatur antara temperatur air keluar menara pendingin dengan temperatur

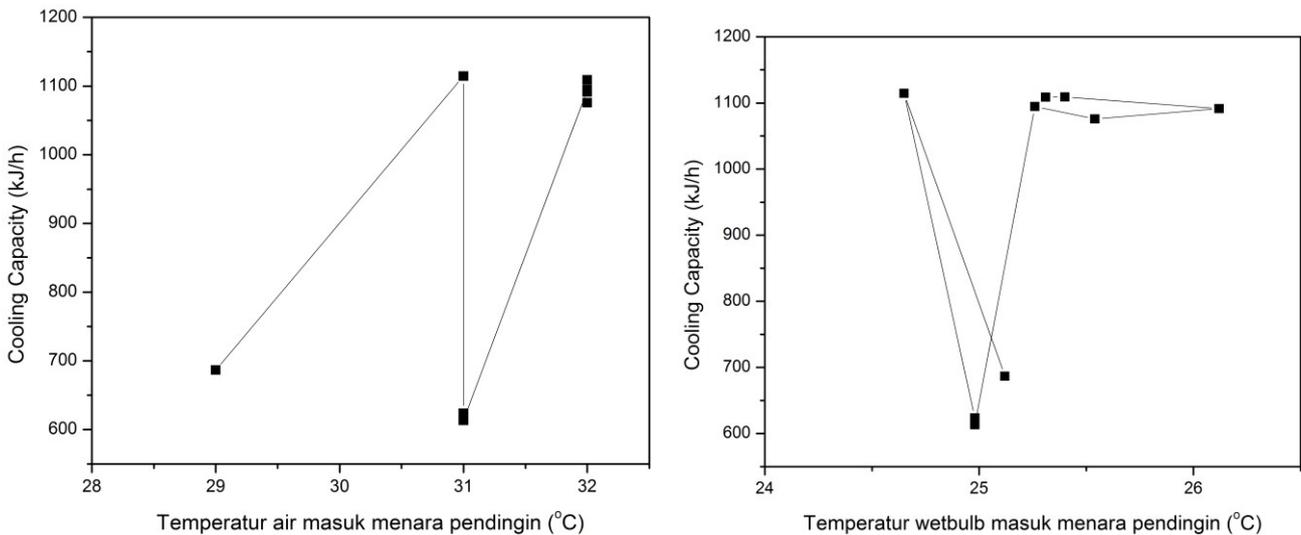
wet bulb udara masuk menara pendingin. Approach hasil perhitungan seperti yang ditunjukkan Gambar 3 adalah berkisar antara 0.8-4.3 °C.

Approach berkaitan erat dengan koefisien menara dan ukuran menara. Nilai approach yang kecil menghasilkan ukuran menara pendingin yang besar dan approach yang besar menghasilkan menara pendingin yang kecil. Untuk menara pendingin yang digunakan pada sistem pendingin udara, approach biasanya bervariasi antara 2,8-6,7°C [10].

Pada range dengan nilai tetap, approach yang kecil menghasilkan temperatur air keluar menara pendingin yang rendah, serta tekanan dan temperatur kondensasi yang lebih rendah.



Gambar 4. Efektifitas



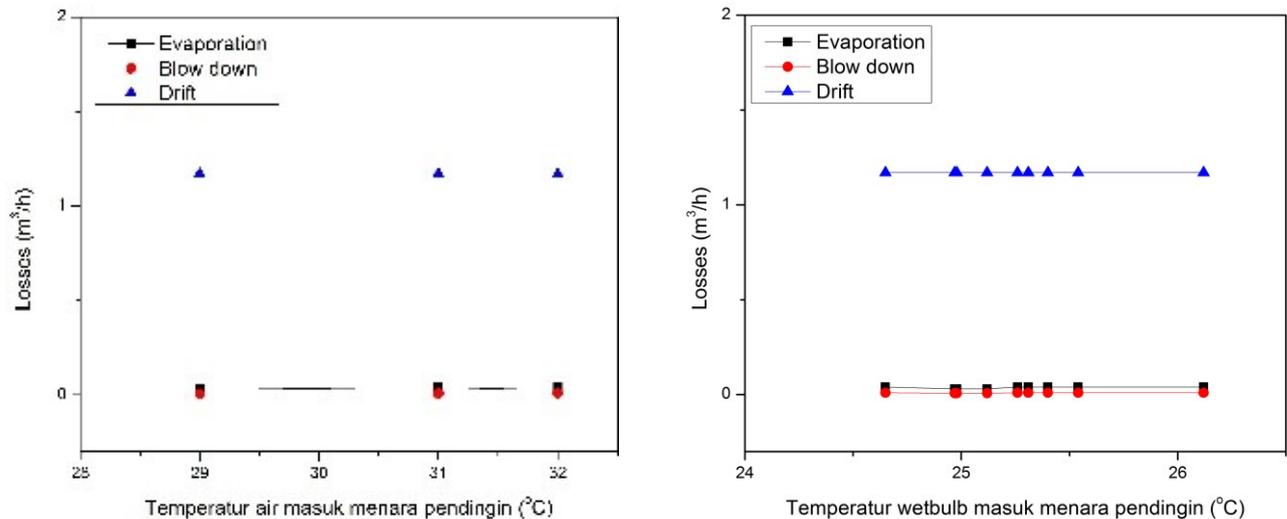
Gambar 5. Cooling capacity

Gambar 4 menunjukkan efektifitas dari menara pendingin. Efektifitas cenderung tinggi, karena rata-rata berada pada 0.6 atau 60%. Hal ini disebabkan kemampuan membuang panas sekitar 600-2500 kJ/h dan lebih sedikit kehilangan karena penguapan, blow-down, dan drift, seperti ditunjukkan pada gambar 5 dan 6.

Cooling capacity menara pendingin ditunjukkan pada Gambar 5, menyatakan kemampuan menara pendingin untuk membuang panas. Temperatur wet bulb udara masuk menara pendingin digunakan sebagai parameter utama yang mempengaruhi kinerja menara pendingin yaitu kemampuan menara pendingin tersebut untuk membuang

panas ke lingkungan. Air yang menguap menciptakan efek pendinginan. Ketika kesetimbangan tercapai, temperatur wet bulb akan lebih rendah dari temperatur lingkungan. Selisih temperatur lingkungan dan temperatur wet bulb sangat tergantung pada laju penguapan air. Sedangkan laju penguapan tergantung pada jumlah uap air di udara.

Jumlah uap air yang tinggi di udara akan menurunkan laju penguapan. Jadi, penurunan bola basah yang kecil menunjukkan kelembaban relatif yang tinggi, sedangkan penurunan bola basah yang besar menunjukkan kelembaban relatif yang rendah [12].



Gambar 6. Evaporation, blowdown & drift

Losses atau kerugian yang terjadi selama menara pendingin beroperasi terdiri dari kerugian penguapan, blow down dan drift. Rugi-rugi yang terjadi lebih kecil dari 0.1 m³/h untuk rugi penguapan dan blow down. Sedangkan rugi karena drift sebesar 1.17 m³/h.

4. Kesimpulan

Analisa kinerja menara pendingin telah dilakukan untuk dapat memberikan wawasan tentang parameter kinerja dan kehilangan energi yang terjadi. Berikut yang beberapa hal yang dapat disimpulkan :

1. Efektivitas menara pendingin tinggi karena laju penguapan yang tinggi dan lebih sedikit kehilangan karena penguapan, blowdown, dan drift.
2. Laju penguapan tinggi dapat terjadi karena jumlah uap air yang rendah di udara dan menunjukkan kelembaban relatif yang rendah, sehingga penurunan temperatur wet bulb akan besar.
3. Panas yang dibuang oleh menara pendingin meningkat dengan meningkatnya selisih temperatur udara maupun selisih temperatur air.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas bantuan dan dukungan dari Kalab tata udara, teknisi dan mahasiswa-mahasiswa prodi TRU dan TPTU yang telah membantu dalam penyelesaian paper ini.

Daftar Pustaka

- [1] A. D. Althouse, Modern Refrigeration and Air Conditioning (Modern Refridgeration and Air, 2004.
- [2] P. Tymkow, S. Tassou, M. Kolokotroni, and H. Jouhara, Building services design for energy efficient buildings: Routledge, 2013.
- [3] M. Laković, S. Laković, and M. Jović, "Design and Performance Analysis of the Cooling Tower in the Adhesive Factory," in Proceedings, 2014, pp. 81-85.
- [4] J. C. Hensley, Cooling tower fundamentals: Marley Cooling Tower Company, 1985.
- [5] R. Kumar, Y. Shrivastava, R. R. Maheshwari, and D. Singh, "Natural draft cooling tower: Analytic study for performance enhancement," Materials Today: Proceedings, vol. 38, pp. 211-217, 2021.
- [6] Y. Handoyo, "Analisis Performa Cooling Tower LCT 400 Pada PT XYZ, Tambun Bekasi," Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unisma" 45" Bekasi, 3, p. 97640, 2015.
- [7] D. A. Fauzi and B. Rudiyanto, "Analisa performa menara pendingin pada pt. Geo dipa energi unit dieng," Jurnal Ilmiah Rotary, vol. 1, 2016.
- [8] N. P. Pratiwi, G. Nugroho, and N. L. Hamidah, "Analisa Kinerja Cooling Tower Induced Draft Tipe LBC W-300 Terhadap Pengaruh Temperatur Lingkungan," Jurnal Teknik Pomits, 7, pp. 1-6, 2014.
- [9] I. N. Suamir, I. N. Ardita, and I. M. Rasta, "Effects of Cooling Tower Performance to Water Cooled Chiller Energy Use: a Case Study toward Energy Conservation of Office Building," in 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 2018, pp. 712-717.
- [10] S. K. Wang and S. K. Wang, Handbook of air conditioning and refrigeration, vol. 49: McGraw-Hill New York, 2000.
- [11] A. A. R. Hakim and E. A. Kosasih, "Analysis Of Heat And Mass Transfer On Cooling Tower Fill," in Jurnal Forum Nuklir, 2020, pp. 25-30.
- [12] L. R. Wilhelm, D. A. Suter, and G. H. Brusewitz, Food & process engineering technology, 2004.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Teknologi refrigerasi ramah lingkungan menggunakan energi matahari menuju *green campus* Politeknik Negeri Bali

I Made Rasta^{1*}, Adi Winarta¹, Putu Wijaya Sunu¹, I Wayan Adi Subagia² dan
I Gusti Ketut Puja³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364

³Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sanata Dharma, Yogyakarta 55282

*Email: maderasta@pnb.ac.id

Abstrak

Meningkatnya permintaan energi global, menipisnya sumber daya energi fosil, dan perubahan iklim adalah kenyataan yang tidak dapat disangkal. Sistem refrigerasi jenis chest freezer adalah salah satu peralatan elektronik yang banyak digunakan di rumah serta industri. Penggunaan sistem refrigerasi terus meningkat, yang menegaskan bahwa sejumlah besar konsumsi energi diperlukan untuk pengoperasiannya. Sistem refrigerasi konvensional yang digerakkan oleh jaringan listrik (*power grid*) adalah produk utama di pasar global. Selain itu, penggunaan refrigerasi elektrik meningkatkan tekanan listrik pada waktu beban puncak. Untuk mengurangi kontradiksi antara permintaan dan pasokan listrik, lebih banyak pembangkit listrik termal telah dibangun, dan lebih banyak bahan bakar fosil telah dibakar dalam beberapa dekade terakhir. Oleh karena itu, perubahan baru harus dilakukan untuk mengurangi dan mengoptimalkan penggunaan energi fosil. Pengembangan teknologi dengan sumber energi terbarukan menjadi tindakan istimewa untuk pengurangan konsumsi energi dan pencarian efisiensi energi yang lebih baik. Makalah ini menyajikan pemanfaatan energi matahari (*solar energy*) sebagai salah satu pendekatan untuk mengurangi atau menggantikan sebagian konsumsi energi sistem refrigerasi konvensional di bawah tekanan perlindungan lingkungan. Hasil studi menunjukkan dengan sistem Photovoltaik (PV), energi panas matahari dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi sistem refrigerasi jenis chest freezer baik untuk keperluan rumah tangga maupun industri

Kata kunci: Refrigerasi hijau, energi terbarukan, energi matahari, Sel Photovoltaik (PV) dan kampus hijau

Abstract: Increasing global energy demand, depleting fossil energy resources, and climate change are undeniable facts. The chest freezer type refrigeration system is one of the most widely used electronic equipment in homes and industries. The use of refrigeration systems continues to increase, which confirms that a large amount of energy consumption is required for their operation. Conventional refrigeration systems that are powered by a grid (*power grid*) are a major product in the global market. In addition, the use of electric refrigeration increases the electric pressure during peak loads. To reduce the contradiction between electricity demand and supply, more thermal power plants have been built, and more fossil fuels have been burned in recent decades. Therefore, new changes must be made to reduce and optimize the use of fossil energy. The development of technology with renewable energy sources is a special action for reducing energy consumption and the search for better energy efficiency. This paper presents the utilization of solar energy (*solar energy*) as an approach to reduce or partially replace the energy consumption of conventional refrigeration systems under environmental protection stress. The study results show that with the Photovoltaic (PV) system, solar thermal energy can be utilized to meet the energy needs of the chest freezer type refrigeration system for both household and industrial purposes.

Keywords: Green refrigeration, renewable energy, solar energy, Cells Photovoltaic (PV) and green campus

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Meningkatnya jumlah penduduk, kemajuan teknologi dan pertumbuhan ekonomi, dalam beberapa dekade terakhir telah menyebabkan permintaan energi meningkat, sehingga penyediaan energi yang andal menjadi sebagai salah satu tantangan besar di abad ke-21 [1]. Menipisnya sumber daya tak terbarukan, pemasalahan pemanasan global meningkat

dan untuk menghindari efek berbahaya dan negatif dari polusi di lingkungan telah mendorong tren untuk bergeser ke arah penggunaan sumber daya energi yang berkelanjutan [2,3,4]. Akibatnya, sangat penting untuk mengeksplorasi sumber daya yang dapat diperbarui dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan konversi energi listrik. Sumber energi terbarukan lebih disukai daripada eksploitasi sumber daya

tak terbarukan karena ketersediaan jangka panjang, aksesibilitas dan kebaikan lingkungan [5].

Salah satu teknologi pembangkit energi terbarukan yang paling luas adalah penggunaan sistem Photovoltaik (PV) yang mengubah sinar matahari menjadi energi listrik [6,7]. Jenis teknologi energi terbarukan yang bebas polutan selama operasi, mengurangi masalah pemanasan global, menurunkan biaya operasional, dan menawarkan perawatan minimal dan kepadatan daya tertinggi dibandingkan dengan teknologi energi terbarukan lainnya, menyoroti keunggulan energi surya Photovoltaic (PV) [8,9]. Riset dan pengembangan masih terus mendorong efisiensi seiring dengan penurunan biaya [10,11]. Di sisi lain, photovoltaic sudah digunakan tetapi masalahnya adalah daya tahan sistem dan pengeluaran yang rendah karena panel tidak berfungsi sama dari waktu ke waktu. Begitu pula dengan baterainya yang juga sangat mahal dan tidak tahan lama. Namun, bersama dengan penghalang lainnya, penghalang utama adalah sinar matahari yang terputus-putus yang hanya tersedia untuk sebagian hari. Oleh karena, sifat *intermittency* dari sumber energi terbarukan, terutama energi matahari, merupakan kendala utama sejauh pasokan energi dari mereka diperhatikan, dan pengaturan khusus harus dibuat untuk kemampuan beradaptasi mereka [12]. Sistem energi terintegrasi / hybrid yang terdiri dari berbagai teknologi yang digabungkan bersama untuk memangkas permintaan daya puncak (perataan beban) sedang digunakan secara komplementer [13,14]. Sebagian besar sistem hybrid menggunakan berbasis bahan bakar berbasis karbon untuk mengatasi terputusnya sumber energi terbarukan [15].

Para ilmuwan dan ahli teknologi energi melakukan upaya mereka untuk mendapatkan pasokan energi yang lebih stabil, lebih efisien, stabil dan sepanjang waktu dari energi terbarukan, tetapi menangani permintaan energi membutuhkan upaya yang tak terhitung jumlahnya [16]. Ada banyak penekanan dalam mengambil tindakan korektif untuk mengatasi pemanasan global dan mengintegrasikan energi terbarukan ke dalam sistem energi konvensional. Langkah-langkah tertentu sedang dilakukan untuk menunjukkan potensi sistem energi hijau yang berkelanjutan [17].

1.1. Penggunaan Energi Surya dalam sistem refrigerasi

Dampak dari pembakaran bahan bakar fosil telah menimbulkan pencemaran lingkungan yang memaksa komunitas riset energi untuk secara serius mempertimbangkan sumber terbarukan yang tersedia secara alami, seperti energi surya. Teknologi pendinginan tenaga surya memanfaatkan energi matahari dan menggunakannya untuk menjalankan sistem pendingin. Jenis aplikasi tenaga surya ini merupakan pilihan yang menarik untuk pengawetan makanan dan pendinginan vaksin dan obat-obatan di daerah dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi dan tidak ada pasokan listrik. Sistem refrigerasi yang menggunakan refrigeran ramah lingkungan memberikan keunggulan keberlanjutan jika dibandingkan dengan pilihan refrigeran lainnya. Namun, penggunaan energi yang terkait dengan pengoperasian sistem refrigerasi dan dampak lingkungan yang terkait dengan pembangkitan dan distribusinya sering kali melebihi pilihan refrigeran. Untuk meminimalkan dampak lingkungan yang terkait dengan pengoperasian sistem pendingin, adalah bijaksana untuk

mengevaluasi prospek sumber energi bersih seperti energi matahari.

1.2. Energi Matahari

Para ilmuwan semakin memanfaatkan energi matahari dalam beberapa tahun terakhir karena ancaman kekurangan energi global [18].

Penggunaan langsung energi surya menarik karena ketersediaannya yang universal, dampak lingkungan yang rendah, dan biaya bahan bakar yang rendah atau tidak ada sama sekali. Penelitian telah menunjukkan bahwa energi matahari adalah sumber ideal untuk aplikasi pemanas suhu rendah seperti ruang dan pemanas air panas rumah tangga. Aplikasi pemanas matahari bersifat intuitif karena, ketika energi matahari diserap di permukaan, suhu permukaan meningkat, memberikan potensi pemanasan. Penggunaan energi matahari untuk mendinginkan agak kurang intuitif. Daya dari matahari yang dicegah oleh bumi kira-kira $1,8 \times 10^{11}$ MW, yang jauh lebih besar daripada tingkat konsumsi di bumi dari semua sumber energi komersial. Dengan demikian, pada prinsipnya energi matahari dapat menyuplai seluruh kebutuhan energi dunia saat ini dan yang akan datang secara berkelanjutan. Selain itu, energi matahari merupakan sumber energi yang bersih, gratis dan tersedia dalam jumlah yang cukup di hampir seluruh belahan dunia.

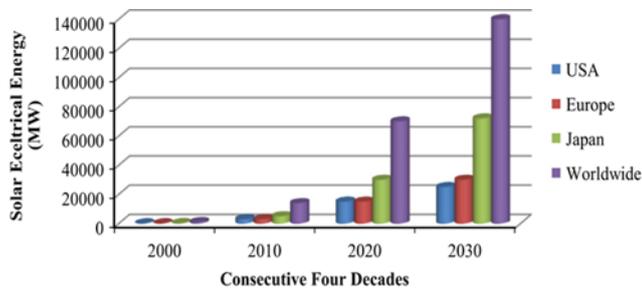
Dalam beberapa tahun terakhir, banyak negara menghadapi kesulitan dengan masalah sistem pendingin. Secara khusus, permintaan refrigerasi dan AC untuk tujuan komersial dan residensial selama musim panas terus meningkat [19]. Terdapat kekurangan energi listrik dan penyimpanan di negara berkembang untuk mengakomodasi sistem konsumsi energi tinggi seperti *refrigeration* dan *cooling*. Oleh karena itu, teknologi pendingin matahari telah menjadi titik fokus di seluruh dunia; krisis energi ini telah membuka pintu bagi energi surya untuk menangani tidak hanya kebutuhan puncak listrik tetapi juga masalah pendinginan.

1.3. Siklus refrigerasi yang dioperasikan sel-PV

Pendinginan surya melibatkan sistem di mana tenaga surya digunakan untuk tujuan pendinginan [20]. Pendinginan dapat dicapai, salah satunya melalui sistem energi surya berbasis PV (Photovoltaik), di mana energi matahari diubah menjadi energi listrik dan digunakan untuk pendinginan seperti metode konvensional [21].

Sel Photovoltaik (PV) pada dasarnya adalah perangkat semikonduktor solid-state yang secara langsung mengubah energi cahaya (radiasi matahari) menjadi energi listrik arus searah (DC). Panel fotovoltaik surya menghasilkan daya DC yang dapat digunakan untuk mengoperasikan motor DC yang digabungkan ke kompresor sistem pendingin kompresi uap. Pertimbangan utama dalam merancang siklus pendinginan PV melibatkan pencocokan yang tepat dengan karakteristik kelistrikan motor yang menggerakkan kompresor dengan arus dan tegangan yang tersedia yang dihasilkan oleh susunan PV. Sayangnya, modul PV akan beroperasi pada berbagai kondisi yang jarang menguntungkan seperti kondisi peringkat. Selain itu, daya yang dihasilkan oleh array PV sama variabelnya dengan sumber daya surya dari mana ia berasal. Kinerja modul PV, yang dinyatakan dalam karakteristik tegangan arus dan tegangan daya, pada dasarnya bergantung pada radiasi matahari dan suhu modul.

Untuk mengakomodasi permintaan listrik yang besar, Pembangkit listrik berbasis PV telah meningkat pesat di seluruh dunia bersama dengan pembangkit listrik konvensional selama dua dekade terakhir. Gambar 1 menunjukkan representasi komparatif dari pengembangan sistem PV surya di berbagai negara [22].



Gambar 1. Produksi energi listrik tenaga surya global berbasis PV selama empat dekade

Sementara output dari sel PV biasanya listrik arus searah (DC), sedangkan sebagian besar peralatan listrik rumah tangga dan industri menggunakan arus bolak-balik (AC). Oleh karena itu, sistem pendingin PV lengkap biasanya terdiri dari empat komponen dasar: modul Photovoltaik, baterai, rangkaian inverter, dan unit refrigerasi kompresi uap [23,24].

- Modul PV: Sel PV menghasilkan listrik dengan mengubah energi cahaya (dari matahari) menjadi energi listrik arus searah (DC).
- Baterai: Baterai digunakan untuk menyimpan tegangan DC pada mode pengisian saat sinar matahari tersedia dan memasok energi listrik DC dalam mode pemakaian saat siang hari tidak ada. Itu juga dapat langsung menangani penggunaan DC untuk peralatan industri dan rumah tangga. Pengatur pengisian baterai dapat digunakan untuk melindungi pengisian daya baterai yang berlebihan.
- Inverter: Inverter adalah rangkaian listrik yang mengubah daya listrik DC menjadi AC dan menyalurkan energi listrik tersebut ke beban AC.
- Unit refrigerasi: Unit refrigerasi kompresi uap sebenarnya adalah sistem pendinginan atau pendinginan konvensional yang dijalankan oleh daya yang diterima dari inverter.

Sistem PV dapat berfungsi sebagai sistem mandiri, sistem hibrida (bekerja dengan pembangkit listrik) atau sebagai sistem jaringan atau utilitas yang saling terkait.

2. Metode dan Bahan

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen pada sebuah sistem refrigerasi jenis chest freezer dengan sumber daya energi matahari. Untuk dapat menjalankan sistem refrigerasi jenis chest freezer memanfaatkan energi matahari dibutuhkan sistem Photovoltaic (PV). Konversi dari sinar matahari menjadi listrik terjadi karena efek PV.

Sistem PV lengkap terdiri dari modul PV yang mengubah sinar matahari menjadi listrik. Di antara modul PV dan sistem refrigerasi chest freezer, terdapat seperangkat perangkat dan struktur yang memungkinkan listrik PV dapat diterapkan dengan baik ke beban. Seperangkat perangkat ini dikenal sebagai "*Balance of System*" yang terdiri dari

inverter (12 VDC-220VAC 1000W; dan V), pengontrol pengisian daya, dan baterai (100 Ah – 12VDC). Fungsi charger adalah untuk mengatur tegangan dan arus yang berasal dari panel surya yang menuju ke baterai. Baterai adalah komponen kunci dalam sistem PV karena berfungsi sebagai cadangan energi untuk sistem energi terbarukan. Ini juga berfungsi sebagai perangkat penyimpanan untuk menyimpan listrik yang dihasilkan PV selama hari berawan dan malam hari. Untuk menerapkan sistem ini pada beban refrigerasi chest freezer, diperlukan inverter untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh panel PV menjadi AC.

Fungsi dari charge controller adalah untuk mengatur arus dari modul PV untuk mencegah pengisian baterai yang berlebihan. Pengontrol pengisian daya digunakan untuk mendeteksi kapan baterai terisi penuh dan untuk menghentikan, atau mengurangi, jumlah arus yang mengalir ke baterai. Pengontrol muatan seperti yang dinilai oleh jumlah arus yang dapat mereka terima dari panel surya.

Cara kerja refrigerasi chest freezer bertenaga surya meliputi, energi matahari diterima oleh modul PV (dua panel fotovoltaik 12 VDC 150 Wp yang dihubungkan secara parallel) dan diubah menjadi energi listrik. Energi listrik kemudian diatur oleh pengontrol muatan baik dengan memasoknya langsung ke beban atau mengisi baterai. Karena energi listrik yang berasal dari modul PV dalam bentuk DC, inverter akan mengubahnya menjadi AC karena kompresor membutuhkan AC untuk beroperasi. Jenis sistem refrigerasi chest freezer yang digunakan dengan daya input 100 W dan 220 VAC, bahan pendingin R600a (ramah lingkungan) paling umum secara teknis disebut sebagai ekspansi langsung, mekanis, sistem refrigerasi kompresi uap.

Penelitian dilakukan di laboratorium Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik Negeri Bali. Pengukuran Suhu dalam chest freezer, suhu udara dalam dan luar ruangan diukur menggunakan data logger dengan termokopel tipe K dengan akurasi ± 1 °C dan linieritas 0,5 °C. Alat analisa daya digunakan untuk mengukur arus, tegangan dan daya. Nilai arus dan tegangan pada keluaran panel PV dan chest freezer diukur untuk menentukan energi yang dihasilkan oleh panel PV dan energi yang dikonsumsi oleh chest freezer. Data dicatat ke pencatat data selama interval 10 menit. Nilai radiasi matahari diukur dengan Lutron Solar Power Meter SPM-1116SD dengan akurasi 10 W/m² dan resolusi 0,1 W/m² untuk radiasi di bawah 1000 W/m² dan resolusi 1 W/m² untuk radiasi lebih tinggi atau sama dengan 1000 W/m². Data yang direkam dari sistem pengukuran diolah dan dianalisis. Parameter kinerja sistem catu daya surya seperti daya yang dihasilkan dan konsumsi daya oleh chest freezer dihitung dan disajikan.

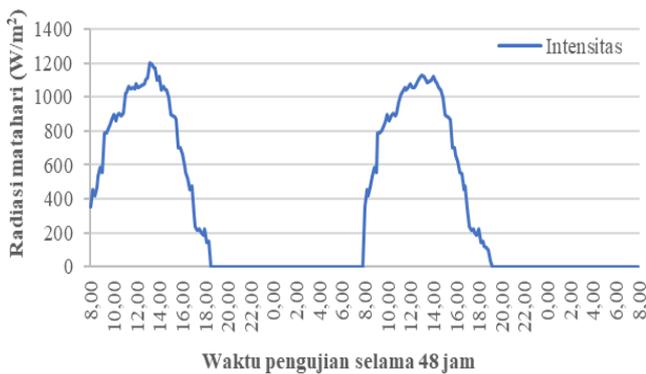
3. Hasil dan Pembahasan

Keluaran daya fotovoltaik bergantung pada banyak faktor, seperti posisi matahari, intensitas penyinaran matahari, suhu, dan kebutuhan beban. Oleh karena itu, respons dinamis dari sistem PV harus dievaluasi secara menyeluruh, karena menghubungkan sistem PV dengan jaringan utilitas dapat menyebabkan ketidakstabilan.

3.1. Iradiasi Matahari

Gambar 2 menampilkan nilai intensitas sesaat dari penyinaran matahari pada sistem sel-PV pada aplikasi

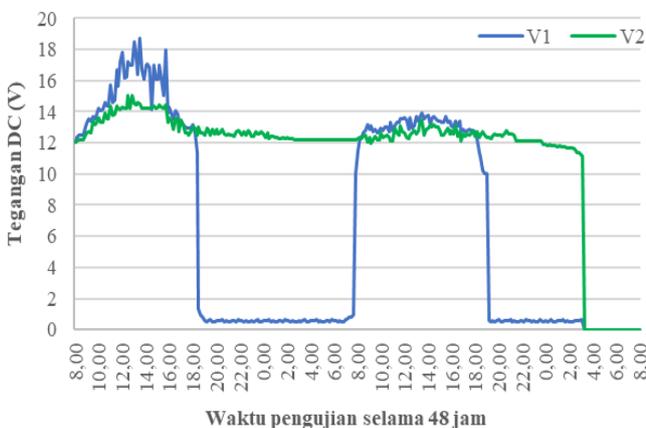
sistem refrigerasi jenis chest freezer. Proses pengujian dilakukan mulai dari jam 8.00 pagi selama 48 jam di Laboratorium Refrigerasi dan Tata Udara, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali. Nilai tertinggi iradiasi matahari langsung hasil pengujian pada hari ke-1 dan hari ke-2 masing-masing didapat 1.199 W/m² dan 1.127 W/m², serta nilai iradiasi rata-rata adalah 775,6 W/m² dan 731,2 W/m². Nilai maksimum iradiasi matahari terjadi sekitar dari jam 11 sampai jam 2 siang, yaitu antara 1.017 W/m² sampai 1.199 W/m². Nilai intensitas radiasi matahari pada hari ke-2 lebih rendah dari hari ke-1 disebabkan karena cuaca pada hari ke-2 kelihatan sedikit berawan sedangkan pada hari ke-1 cuaca cukup cerah. Dengan demikian kecerahan, awan dapat mempengaruhi nilai intensitas cahaya matahari.



Gambar 2. Intensitas iradiasi matahari

3.2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

3.2.1. Tegangan panel surya dan baterai



Gambar 3. Tegangan luaran sel-PV dan baterai

Tabel 1. Tegangan luaran sel-PV dan baterai

Pengujian	Tegangan rata-rata (V)		Tegangan max (V)		Tegangan min (V)	
	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂	V ₁	V ₂
Hari ke-1	14,83	12,93	18,75	15,03	0,51	12,01
Hari ke-2	12,91	12,35	13,95	13,47	0,51	11,18

Hasil pengujian nilai tegangan panel surya maksimum pada hari ke-1 terjadi sekitar jam 11 sampai jam 3.40 siang, berkisar antara 15,75 sampai 18,75 (V), sedangkan pada hari ke-2 terjadi sekitar jam 10.50 sampai jam 16.40 berkisar antara 13,3 sampai 13,95 (V). Nilai tegangan tertinggi

terjadi pada jam 1.30 baik untuk hari pertama dan kedua. Tegangan rata-rata panel surya pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing 14,8 dan 12,9 (V). Sedangkan tegangan rata-rata baterai baik untuk hari ke-1 dan ke-2 adalah masing-masing 12,9 sampai 12,4 (V), seperti ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 1. Nilai tegangan hari ke-2 lebih rendah dari hari ke-1, disebabkan oleh kualitas penyinaran matahari yang tidak cerah atau sedikit berawan. Nilai tegangan panel surya menurun menjadi nol seiring dengan tidak adanya sinar matahari (malam hari) antara jam 6 sore sampai jam 7 pagi pada hari ke-1 dan dari jam 7 sore sampai jam 7 pagi pada hari ke-2.

3.2.2. Arus luaran panel surya dan baterai serta yang digunakan sistem refrigerasi

Gambar 4 menampilkan nilai arus maksimum yang dihasilkan sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 13,45 (A) dan 12,87 (A), terjadi sekitar jam 11 sampai dengan jam 2.40 siang. Nilai arus rata-rata sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 9,6 (A) dan 8,7 (A). Sedangkan nilai arus maksimum yang dihasilkan baterai pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 8,3 (A) dan 8,7 (A) dan nilai arus terendah adalah 0. Nilai arus rata-rata baterai pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing adalah 5,3 (A) dan 5,8 (A). Selama pengoperasian sistem refrigerasi chest freezer dalam pengujian mengalami siklus hidup dan mati. Nilai arus maksimum yang digunakan sistem refrigerasi chest freezer pada saat hidup, baik pada hari ke-1 maupun hari ke-2 adalah 0,4 (A) dan saat mati nilai arus adalah 0. Nilai arus rata-rata yang digunakan sistem refrigerasi chest freezer, baik pada hari ke-1 maupun hari ke-2 adalah 0,27 Ampere (A).

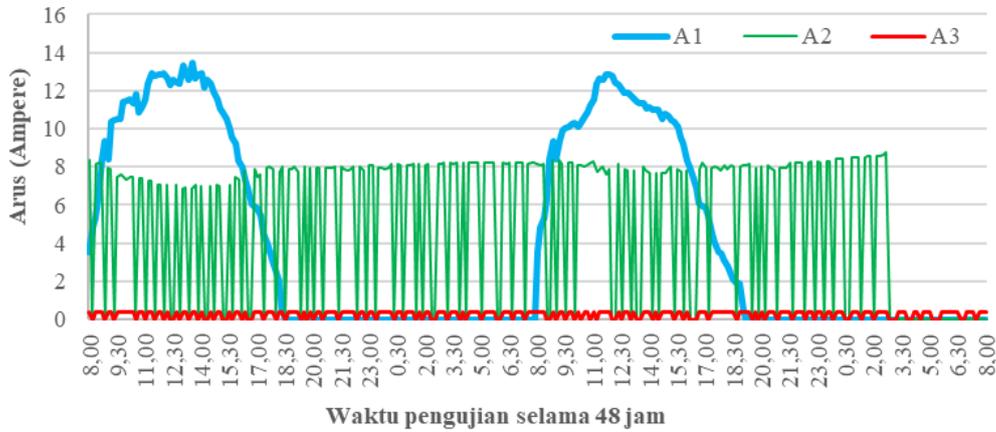
Dari grafik kelihatan bahwa baterai tidak mampu mensuplai arus yang dibutuhkan oleh sistem refrigerasi selama 48 jam operasi (sampai jam 8 pagi). Baterai hanya mampu mensuplai arus sampai jam 2.40 pagi. Untuk selanjutnya kebutuhan arus disuplai dari listrik PLN untuk pengujian selama 48 operasi. Hal ini menandakan bahwa sel-PV dan baterai yang terpasang tidak cukup untuk mengoperasikan sistem refrigerasi chest freezer selama 48 jam operasional pengujian. Nilai arus rata-rata, maksimum, dan minimum dihasilkan panel surya (A₁), arus dihasilkan baterai (A₂) dan arus digunakan sistem refrigerasi jenis chest freezer (A₃), dapat dilihat pada Tabel 2.

3.2.3. Daya yang dihasilkan sel-PV

Gambar 5 menunjukkan bahwa daya sesaat yang dihasilkan sel-PV (P₁) pada siang hari saat matahari cerah sangat tinggi dan menurun ketika cuaca kurang baik, seperti berawan. Demikian seterusnya hingga menjelang sore hari menuju malam hari, daya yang dihasilkan sel-PV terus menurun menuju mendekati nol. Daya sesaat maksimum yang dihasilkan sel-PV pada hari ke-1 dan ke-2 masing-masing 254,1 W dan 178,3 W seperti ditampilkan pada grafik P₁. Daya sesaat yang tinggi dihasilkan pada siang hari oleh sel PV digunakan untuk mensuplai daya yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem refrigerasi chest freezer dan kelebihan daya yang tersedia disimpan pada baterai. Daya yang tersimpan pada baterai (P₂) digunakan pada saat daya dari sel-PV tidak mencukupi untuk memenuhi suplai daya yang dibutuhkan sistem refrigerasi chest freezer, misalnya pada cuaca buruk, khususnya terutama pada malam hari. Baterai hanya bisa terisi 70% dari kapasitas 300 Wp sel-PV

terpasang. Sehingga baterai hanya mampu mensuplai daya hingga sampai jam 2.40 pagi. Untuk pengoperasian selanjutnya selama pengujian 48 jam kekurangan daya dari

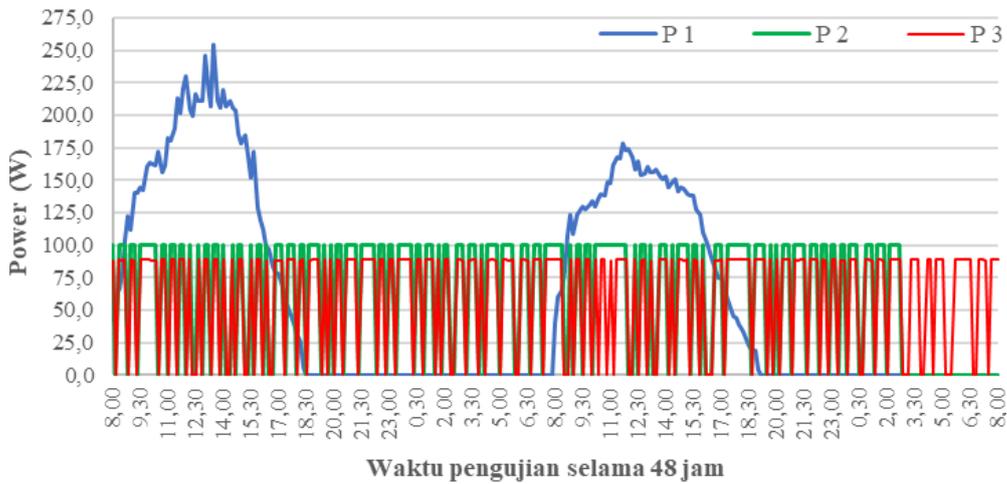
baterai disuplai dari listrik PLN seperti ditunjukkan pada grafik P₃.



Gambar 4. Nilai arus luaran sel PV, baterai dan yang digunakan sistem refrigerasi

Tabel 2. Nilai arus luaran sel-PV, baterai dan yang digunakan sistem refrigerasi

Pengujian	Arus rata-rata (A)			Arus maksimum (A)			Arus minimum (A)		
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃	A ₁	A ₂	A ₃
Hari ke-1	9,60	5,33	0,27	13,45	8,33	0,4	0,51	0	0
Hari ke-2	8,74	5,80	0,27	12,87	8,78	0,4	0,51	0	0



Gambar 5. Daya yang dihasilkan sel-PV, disimpan baterai dan digunakan sistem refrigerasi

Tabel 3. Daya yang dihasilkan sel-PV, disimpan baterai dan digunakan sistem refrigerasi

Pengujian	Daya rata-rata (W)			Daya maksimum (W)			Daya minimum (W)		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
Hari ke-1	148,1	68,1	60,4	254,1	100	89,2	6,5	0	0
Hari ke-2	119,3	70,8	59,4	178,3	100	89,2	4,7	0	0

Selama pengoperasian dalam pengujian sistem refrigerasi jenis chest freezer mengalami siklus hidup dan mati. Daya yang dikonsumsi oleh chest freezer saat hidup berkisar antara 88,4 - 89,2 (Watt) dan saat mati sama dengan 0. Dari sistem sel-PV yang terpasang sebesar 300 Wp tidak mampu memenuhi daya yang dibutuhkan oleh sistem refrigerasi

jenis chest freezer (P₃) untuk operasional pengujian 48 jam, sehingga perlu ditambahkan 1 buah modul sel-PV 150 Wp lagi sehingga sistem refrigerasi chest Freezer sepenuhnya dapat digerakkan oleh solar panel (sel-PV). Nilai luaran daya rata-rata, maksimum, dan minimum yang dihasilkan panel surya fotovoltaik (P₁), daya yang

dihasilkan baterai (P₂) dan daya yang digunakan sistem refrigerasi jenis chest freezer (P₃), seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

4. Kesimpulan

Sistem teknologi surya fotovoltaik (PV) dapat menyediakan energi listrik untuk pengoperasian sistem refrigerasi jenis chest freezer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan oleh sistem sel PV pada hari ke-2 lebih kecil dari hari ke-1 hal ini disebabkan oleh iradiasi matahari hari kedua lebih rendah dari hari ke-1. Iradiasi matahari yang baik menjadi kebutuhan sangat vital untuk sistem refrigerasi dengan sumber tenaga sinar matahari menggunakan sistem sel-PV. Teknologi refrigerasi menggunakan energi matahari merupakan teknologi yang menjanjikan untuk masa depan karena permintaan pendinginan terus meningkat terkait dengan perubahan iklim. Teknologi refrgerasi dengan sumber tenaga panas matahari menggunakan sel-PV dapat digunakan untuk keperluan pendingin industri dan rumah. Sistem pendingin ini dapat diterapkan di daerah terpencil atau pulau-pulau di mana pendinginan konvensional sulit dilakukan dan energi matahari selalu tersedia. Pendinginan tenaga surya bisa memainkan peran penting di negara-negara yang memiliki potensi matahari yang sangat baik, dapat digunakan untuk menyimpan obat-obatan dan vaksin pada suhu yang lebih rendah, dan sistem ini dapat dibuat portabel jika diperlukan. Salah satu kelemahan sistem refrgerasi dengan sumber tenaga solar panel adalah sifat *intermittency* panas matahari (ketersediaannya terputus-putus), maka sangat perlu dikembangkan alat penyimpan energi (*energy storage*) salah satunya dengan menggunakan *phase hange material* (PCM) untuk bisa menjamin ketersediaan sumber energi sepanjang waktu dan terus menerus.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dan dukungannya kepada rekan-rekan dosen dan mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali yang terlibat dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bali atas bantuan dan dukungan administratif dalam penyelesaian artikel yang diberikan terkait dengan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] H.Z. Hassan, and A.A. Mohamad, "A review on solar-powered closed physisorption cooling systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 2516-38.
- [2] U.S. Energy Information Administration, "Annual Energy Outlook with projections to 2050," 2017.
- [3] J.P. da-Cunha, and P. Eames, "Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - a review," *Applied Energy*, 177, 2016, pp. 227-238.
- [4] I.N. Suamir, I.M. Rasta, Sudirman, K.M. Tsamos, "Development of corn-oil ester and water mixture phase change materials for food refrigeration applications", *Energy Procedia*, 161, 2019, pp. 198-206.
- [5] A. Hussain, S.M. Arif, and M. Aslam, "Emerging renewable and sustainable energy technologies: state of the art," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 2017, pp. 12-28.
- [6] J. Hu, W. Chen, D. Yang, B. Zhao, H. Song, and B. Ge, "Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days," *Applied Energy*, 173, 2016, pp. 40-51.
- [7] Y.H. Yau, and K.S. Lim, "Energy analysis of green office buildings in the tropics Photovoltaic system," *Energy Building*, 126, 2016, pp. 177-93.
- [8] Y. Wang, S. Zhou, and H. Hou, "Cost and CO2 reductions of solar photovoltaic power generation in China: perspectives for 2020," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 2014, pp. 370-80.
- [9] P. Bhubaneswari, S. Iniyan, and R. Goic, "A review of solar photovoltaic technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 1625-36.
- [10] M.J. Li, and W.Q. Tao, "Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry," *Applied Energy*, 187, 2017, pp. 203-215.
- [11] F. Ascione, "Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling," *Solar Energy*, 154, 2017, pp. 34-100.
- [12] M. Waterson, "The characteristics of electricity storage, renewables and markets," *Energy Policy*, 104, 2017, pp 466-473.
- [13] X. Huang, J. Guo, J. He, Y. Gong, D. Wang, Z. Song, "Novel phase change materials based on fatty acid eutectics and triallyl isocyanurate composites for thermal energy storage," *Journal of Applied Polymer Science*, 134, 2017, pp. 44866.
- [14] L. Nkhonjera, T. Bello-Ochende, G. John, C.K. King'ondeu, "A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 2017, pp. 157-167.
- [15] H. Mehling, S. Hiebler, C. Keil, C. Schweigler, M. Helm, "Test results from a latent heat storage developed for a solar heating and cooling system," in: *Proceedings. EuroSun 2008 Conference, Lisbon: International Solar Energy Society*, 2010, pp. 1-8.
- [16] S.F. Ahmed, M. Khalid, W. Rashmi, A. Chan, K. Shahbaz, "Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 2017, pp. 450-460.
- [17] S. Khare, M. Dell'Amico, C. Knight, S. McGarry, "Selection of materials for high temperature latent heat energy storage," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107, 2012, pp. 20-27.
- [18] Z.F. Li, and K. Sumathy, "Technology development in the solar absorption air conditioning systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 2000, pp. 267-93.
- [19] N. Kalkan, E.A. Young, and A. Celiktas, "Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2012, pp. 6352-83.

- [20] C. Koroneos, E. Nanaki, and G. Xydis, "Solar air conditioning systems and their applicability-an exergy approach," *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 2010, pp. 74-82.
- [21] R. Saidur, H. Masjuki, M. Hasanuzzaman, T. Mahlia, C. Tan, J. Ooi, et al., "Performance investigation of a solar powered thermoelectric refrigerator," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 7, 2008, pp. 7-16.
- [22] K.H. Solangi, M.R. Islam, R. Saidur, N.A. Rahim, and H. Fayaz, "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2011, pp. 2149-63.
- [23] I.N. Suamir, I.G.A.B. Wirajati, I.D.M.C. Santosa, I.D.M. Susila, I.D.G.A. Tri Putra, "Experimental Study on the Prospective Use of PV Panels for Chest Freezer in Hot Climate Regions, *Journal of Physics: Conference Series*, 1569, p. 032042.
- [24] T. Otanicar, R.A. Taylor, and P.E. Phelan, "Prospects for solar cooling an economic and environmental assessment," *Solar Energy*, 86, 2012, pp. 1287-99.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Pengujian mekanis komposit rice starch – organic clay sebagai bahan alternatif kotak pendingin makanan

Made Ery Arsana^{1*}, I Kadek Ervan Hadi Wiryanta¹, I Putu Adi Wiguna² dan I Nyoman Artha Gunawan²

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Badung, Bali 80364, Indonesia

*Email: eryarsana@pnb.ac.id

Abstrak

Sampah plastik sudah menjadi permasalahan yang menjadi isu utama mengenai sampah di dunia saat ini. Produksi plastik di dunia sudah mencapai 8300 juta metrik ton (Mt) dari tahun 1950 sampai tahun 2015 dan 6.300 Mt adalah limbah berupa sampah plastik. Upaya yang bisa kita lakukan untuk mengurangi limbah plastik ini, dengan menggunakan plastik yang ramah lingkungan seperti bio-plastik. Bio-plastik dapat terurai di alam secara alami. Berbagai teknologi pembuatan bioplastik berdasarkan dari tumbuhan yang dapat tumbuh di Indonesia telah diperkenalkan, termoplastik tersebut menggunakan bahan dasar pati terutama corn starch (kanji) dan getah pohon pinus. Pembuatan plastic dari rice starch (beras) pada penelitian ini. dilakukan dengan bantuan penggunaan gliserol, citric acid dan clay (tanah liat) dan selanjutnya dilakukan pemanasan 100°C sampai 150°C. Komposit bioplastik yang terbentuk dicetak untuk pembuatan specimen uji tarik dan untuk material kotak pendingin makanan. Adanya campuran gliserol dan citric acid dapat membantu proses biodegradable komposit tersebut. Sedangkan campuran tanah liat digunakan untuk membantu matrik plastic agar lebih kuat secara struktur serta diharapkan akan dapat meningkatkan tahanan termalnya.

Kata kunci: tepung jagung, tepung tapioka, bio-plastic

Abstract: Plastic waste has become a major issue regarding waste in the world today. The world's plastic production has reached 8300 million metric tons (Mt) from 1950 to 2015 and 6,300 Mt is waste in the form of plastic waste. Efforts that we can do to reduce this plastic waste are by using environmentally friendly plastics such as bio-plastics. Bio-plastics are biodegradable in nature. Various technologies for making bioplastics based on plants that can grow in Indonesia have been introduced, these thermoplastics use starch as basic ingredients, especially corn starch, and pine tree sap. Making plastic from rice starch in this research. carried out with the help of the use of glycerol, citric acid and clay (clay) and then heated 100°C to 150°C. The formed bioplastic composites are molded for the manufacture of tensile test specimens and for food cooler box materials. The presence of a mixture of glycerol and citric acid can help the biodegradable process of the composite. While the clay mixture is used to help the plastic matrix to be structurally stronger and is expected to increase its thermal resistance.

Keywords: corn starch, rice starch, bio-plastic

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

Plastik sejak diperkenalkan awal abad ke 20 dan mulai berkembang penggunaannya setelah perang dunia ke dua. Plastik karena kuat dan tidak mudah terdegradasi untuk berbagai kegunaan plastik juga dapat menggantikan peran logam dan merubah kemasan dari yang digunakan berulang menjadi sekali pakai [1]. memperkirakan bahwa 8300 juta metrik ton (Mt) telah diproduksi dari sejak tahun 1950 sampai tahun 2015, dan ada sekitar 6.300 Mt adalah limbah plastik yang dihasilkan, baru sekitar 9% yang telah didaur ulang, 12% dibakar, dan 79% diakumulasikan di tempat

pembuangan sampah atau ada dilingkungan sekitar kita. Jika tren produksi tersebut berlanjut dan pengelolaan limbah masih berlanjut, seperti sekarang ini maka di tahun 2050 diperkirakan akan ada sekitar 12.000 Mt limbah plastik akan berada di tempat pembuangan sampah atau di lingkungan sekitar kita. Indonesia adalah salah satu negara yang menjadi penyumbang sampah plastik no 2 terbanyak didunia [2]. Sehingga harus ada upaya yang sungguh-sungguh untuk menanggulangi agar nantinya tidak akan menimbulkan masalah lingkungan dan kesehatan dimasyarakat kita.

1.1. Latar Belakang Masalah

Upaya terkini yang dilakukan adalah pemanfaatan teknologi pembuatan bioplastik atau bioplastik biodegradable yang merupakan plastik yang dapat didegradasi oleh mikroorganisme dari senyawa turunan tumbuhan, bahan baku alami, seperti pati, selulosa, dan lignin [3]. Bioplastik biodegradable memiliki kualitas fungsional yang sama dengan plastik konvensional, namun memiliki keunggulan yaitu; dapat terurai oleh aksi mikroorganisme, yang menghasilkan air (H_2O), karbon dioksida (CO_2), dan metana (CH_4), [4] sehingga mereka dapat kembali ke alam setelah digunakan karena dapat terurai di lingkungan [5]. Plastik konvensional membutuhkan waktu 50 tahun untuk terurai di alam, sedangkan bioplastik dari nasi aking dapat terdegradasi lebih cepat di alam [6]. Berbagai riset dan pengujian yang ada diantaranya, pengujian campuran yang berbeda bio plastic dari protein dan pati albumen (kentang dan jagung) telah digunakan sebagai bahan mentah untuk bioplastik dengan transparansi tinggi dan sifat mekanis yang sesuai [7]. Penggunaan plasticizer glycerol dan sorbitol dan pengaruh penambahan bahan tersebut pada pembuatan plastic dari bahan cassava starch (pati singkong) [8]. Penggunaan cassava starch juga diungkapkan pada penelitian biodegradable dan non-retrobiodegradable dari [9]. Pati adalah polimer alami yang diekstraksi dari tumbuhan dan dapat digunakan untuk menghasilkan plastik biodegradable karena sifatnya yang ramah lingkungan, dan dapat diperbaharui [10]. Disamping ubi kayu, potensi beras mengandung sejumlah besar pati, yang dapat digunakan dengan tepat untuk produksi bioplastik. Potensi ini merupakan peluang besar untuk memberi nilai tambah pada beras terutama yang telah mengalami penurunan kualitas akibat terlalu lama disimpan atau kurang bagusnya penyimpanan. Namun pati tersebut umumnya memiliki stabilitas termal yang tidak stabil sehingga diperlukan modifikasi kimia untuk meningkatkan sifat mekanis dengan menambahkan plasticizer (bahan pemlastis).

Teknik pencampuran, pemanasan, dan pencetakan yang terintegrasi, merupakan kombinasi pemanfaatan teknologi dalam pembuatan bioplastik. Ada tiga cara efektif dalam menggunakan pati sebagai bahan dasar pembuatan plastik biodegradable.

- 1) Pati digunakan sebagai bahan pengisi plastik berbasis minyak bumi, jumlahnya relatif sedikit, berkisar antara 6-15% dan hanya patinya yang bersifat biodegradable.
- 2) Pati dicampur dengan polimer biodegradable seperti PLA. Jumlah pati yang digunakan mencapai 85%.
- 3) Pati termoplastik, dengan bantuan plasticiser (air, gliserin, dan sorbitol), dan pemanasan temperatur tinggi (90-160°C), dalam proses pembuatannya kemudian dialirkan seperti termoplastik.

Pembuatan plastik biodegradable dengan teknik pencampuran tersebut cukup sederhana. Namun implementasi teknologi produksi dalam skala lebih besar belum banyak dilaporkan. Di beberapa negara, teknologi produksi plastik biodegradable dalam skala besar tidak hanya menghasilkan lembaran film tapi juga dalam bentuk lainnya. Plastik biodegradable dengan berbagai bentuk dapat dibuat dari pati dengan bahan tambahan. Campuran pati alami, pati tergelatinisasi, pati termoplastis, dan pati termodifikasi, polimer atau monomer (asam laktat, hidroksi alkanolat) dapat ditambah dengan plasticizer, bleaching

maupun pewarna dilakukan melalui proses ekstrusi menggunakan ekstruder pada suhu 100-160°C.

1.2. Plastisasi (pati termoplastik, dengan bantuan plasticiser)

Pati termoplastik, dengan bantuan plasticiser seperti (air, gliserin, dan sorbitol), serta pemanasan temperatur tinggi (90-160°C), yang selanjutnya proses pembuatannya kemudian dialirkan seperti termoplastik. Jiugao, Ning and Xiaofei [11] menggunakan tepung jagung dengan menambahkan sedikit air suling yang kadarnya disesuaikan menjadi 10% berat (basis basah). Teknik yang dilakukan adalah; gliserol dan air dicampur terlebih dahulu, ditambahkan tepung maizena kemudian diblender (3000 rpm, 2 menit) dengan menggunakan High-Speed Mixer GH-100Y (buatan China). Campuran ditutup dan disimpan semalaman. Rasio gliserol terhadap pati jagung air (basis berat b/b) adalah 30 : 100. Campuran secara manual dimasukkan ke dalam ekstruder plastik ulir tunggal SJ-25 (s) (rasio sekrup $L / D = 25:1$, dibuat di China). Kecepatan ulir adalah 20 rpm. Profil suhu sepanjang barrel ekstruder adalah 130C, 140C, 150C, 130C (dari zona umpan sampai akhir). Hasil ekstrusi setelah melalui proses pengeringan dan pelleting menghasilkan pellet plastik biodegradable. Pellet atau biji bioplastik selanjutnya dapat diproses menjadi berbagai bentuk plastik menggunakan plastic converter berupa film blowing untuk menghasilkan kantung plastik. Penggunaan thermoforming dan injection moulding akan menghasilkan produk seperti keyboard dan pesawat telepon. Sedangkan blow moulding digunakan untuk menghasilkan produk berupa botol plastik, dan extrusion coating menghasilkan film laminasi untuk kemasan makanan ringan, retort pouch.

1.3. Organic Acids as Additives

Asam organik berguna untuk meningkatkan sifat starch/film, dikarenakan asam organik akan menghasilkan crosslink yang saling menghubungkan rantai polimer, dan menghasilkan ketahanan film dan lebih sedikit film permeabel. Selain itu, asam organik berkontribusi pada pati hidrolisis, Olivato [12] memfasilitasi penghancuran dan gangguan butiran, menurunkan viskositas material, meningkatkan pemrosesan properti dan menghasilkan matriks yang lebih homogen. Peningkatan kelembaban relatif menyebabkan kekuatan tarik untuk mengurangi dan menambah perpanjangan film karena peran air sebagai plasticizer. Jadi, film biodegradable dengan properti yang lebih baik dapat diproduksi. Film-film biodegradable ini mewakili sebuah alternatif untuk kemasan sintetis, tetapi keterbatasannya itu dilihat sebagai keunggulannya.

1.4. Insulation Panel

Cara yang ramah lingkungan untuk menurunkan penggunaan energi pada system refrigerasi adalah dengan menggunakan insulation yang baik. Teknologi terkini yang ada adalah kombinasi penggunaan VIP (vacuum insulation panel) dan penggunaan PCM. Produk dari VIP rigid yang ada dipasaran, merupakan vakum panel tipis yang dilapisi dengan polyurethane dan aluminium memberikan kinerja isolasi yang memiliki tingkat efisiensi termal yang tinggi dengan ketebalan minimal hingga lima kali lebih baik daripada isolasi yang tersedia secara umum.

1.5. Material Komposit dari Plastik

Plastik juga mempunyai sifat adhesi yang baik hasil uji kekuatan lentur dan kekuatan kompresi menunjukkan bahwa plastik dapat digunakan sebagai pengikat. Hasil Cheriaan and Lehman [13] menunjukkan kekuatan adhesi HDPE meningkat sekitar 50% ketika HDPE dicampur dengan 34% PS (Table 4). Material komposit yang lainnya campuran concrete PET untuk 10% material bangunan dilaporkan [14], paver block [15], sedangkan campuran PET, PP dengan karet ban [16] dan untuk penggunaan genteng atap yang merupakan campuran dari tepung karet ban dan plastik PP dan PE dilaporkan [17] campuran 50 : 50 % keduanya memberikan hasil yang terbaik berdasarkan hasil test impactnya dari 7 sample test komposisi yang dibuatnya. Material komposit yang lainnya yaitu campuran alumina buangan dari pabrik kemasan makanan dan organo clay [18], interkalasi leleh dengan penggilingan dua gulungan dan pencetakan kompresi dilakukan dengan suhu yang diproses pada 200 °C dan waktu tujuh menit. Analisis termal dari bahan komposit daur ulang diperiksa pada suhu kamar dan RH (kelembaban relatif) 64% ditambah dengan dua persamaan (Persamaan 1 dan 2) seperti ketahanan termal permukaan faktor (nilai-R) dan konduktivitas termal (γ). Nilai-R adalah kebalikan dari konduktivitas termal.

Formulasi 5% OC memiliki ketahanan termal paling tinggi diantara formulasi lainnya. nilainya lebih tinggi dari nilai tipikal isolator dan didapatkan hasil juga bahwa peningkatan jumlah OC lebih dari 5% tidak akan meningkatkan ketahanan material terhadap panas. Hasil penelitiannya juga menunjukkan bahwa penambahan OC 5 dan 10% berpengaruh signifikan dalam menurunkan konduktivitas termal dengan di ekuivalen masing-masing sebesar 20,81 dan 17,08. Ini lebih besar dari pada spesimen kontrol (0% OC) yang 2,65. Oleh karena itu, informasi ini menjadikan Organo Clay (tanah liat) sebagai pengisi potensial untuk bahan isolasi.

3.6 State of the Art

Pembuatan material komposit bioplastik dimungkinkan mengacu pada adanya sifat adhesive dari plastik pada umumnya yang dapat digunakan untuk membuat komposit seperti dilaporkan [19]. Material lainnya seperti dilaporkan Senoro [18] penambahan 5-10% bahan pengisi tanah liat (OC), potensial untuk bahan isolasi termal. Penggunaan material tanah liat biasa juga digunakan untuk bahan keramik yang mempengaruhi kekuatan keramik [20]. Sedangkan dalam penelitian ini akan membuat material komposit dari bioplastik (biodegradable plastic) pati beras (rice starch) ditambahkan platilizer gliserol, surbitol dan citric acid dan dicampurkan material lokal yang digunakan adalah tanah liat (OC). Material tersebut ditambahkan sebagai matrik untuk memperkuat komposit, serta untuk menurunkan konduktivitas termalnya. Komposit tersebut yang belum pernah dibuat sebelumnya. Mendapatkan metode pembuatannya dan komposisi serta hasil pengujian mekanisnya dilakukan untuk penggunaan material isolasi termal papan dinding ruangan pendingin.

2. Metode

Metode eksperimen kualitatif. Dimana pengumpulan data diperoleh berdasarkan pengamatan dan pengukuran langsung. dengan mencobakan komposisi bioplastik. Berdasarkan studi literatur komposisi 550 gr tepung beras,

100 ml platilizer gliserol, citric acid 100 ml, Air murni 100 gr, 100 gr kitosan, dicobakan pembuatannya selanjutnya diaduk dan ditambahkan tanah liat 50 gr seperti table 1, selanjutnya diaduk perlahan dengan mixer selama 15 menit. Dipanaskan sambil diaduk pada temperature 150°C selama 15 menit, diangkat dan dicetak didinginkan dalam suhu udara ruang. Proses pendinginan memakan waktu 8 hari untuk selanjutnya dilakukan uji tarik dengan alat uji tarik RAMT 0-100 kgf Gambar 1. Uji solubility terhadap air lihat gambar 4. Pengujian dilakukan dengan cara sample dipotong menjadi bagian persegi 2,0 cm² dan massa sampel kering ditimbang akurat dan dicatat. Sampel tetap direndam dalam 100 mL air tap water dan agitasi tetap pada 180 rpm dilakukan selama 6 jam pada 25° C [21] . Bagian film yang bertahan lama disaring setelah 6 jam. Kemudian dikeringkan dalam oven udara panas pada suhu 110 °C sampai berat tetap akhir ditemukan. Gliserol memiliki kelarutan air yang baik berkisar dari 18% sampai 25% [22].

Table 1. Komposisi komposit bio plastik

Komponen	Campuran Komposit	
	(gram)	(%)
Pati beras	550	55
Air murni	100	10
Gliserol	100	10
Citric acid	100	10
Chitosan	100	10
Tanah liat	50	5

Persentase total zat terlarut (% kelarutan) dihitung sebagai berikut:

$$WS (\%) = [(W0 - Wf)/W0] \times 100 \quad (1)$$

di mana; WS adalah kelarutan dalam air W0 adalah yang berat terakhir bioplastic. Wf adalah berat awal bio-plastic. Analisis kemudian dilakukan dengan membandingkan dengan hasil pengujian dari literatur yang ada sehingga bisa disimpulkan hasilnya.

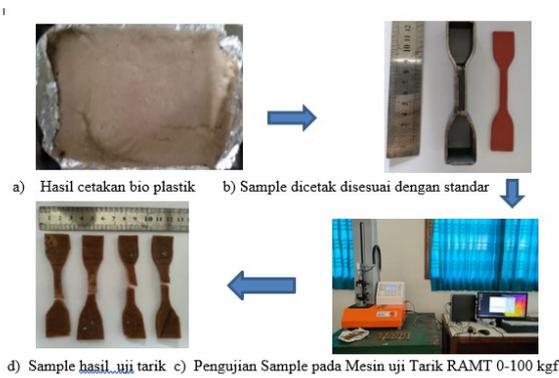
Uji tahanan thermal, pengujian dilakukan dengan cara membuat kotak gambar 6. Dimana kotak dibuat beberapa unit dengan ukuran yang sama dinding kotak 1 dibuat dengan menggunakan polyurethane yang dilapisi aluminium sheet dan kotak lainnya dengan menggunakan bio plastic yang juga dilapisi aluminium sheet pengujian dilakukan dengan beban ice cream dan pendingin PCM dimasukkan kedalam kotak di tutup dan diisolasi. pengukuran temperature dilakukan dengan termokopel dan data akuisisi yang dicatat dengan menggunakan PC.

3. Hasil dan Pembahasan

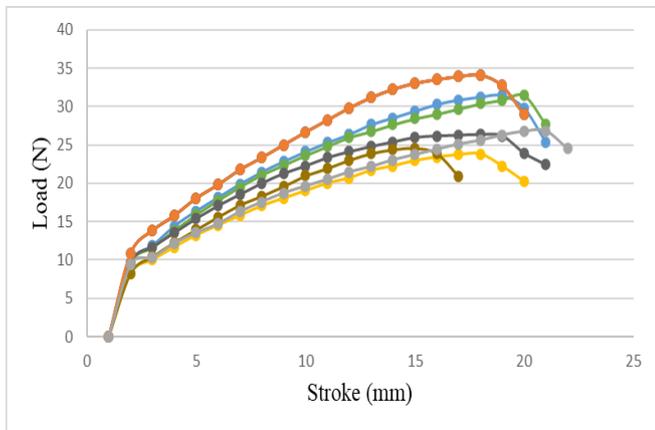
Hasil berupa material komposit setelah dicetak dapat dilihat pada Gambar 1. Selanjutnya dicetak untuk pembuatan specimen pengujian untuk uji Tarik (Gambar 2). Gambar 3. Menunjukkan hasil uji Tarik dari komposit bio plastic menunjukkan rerata besarnya beban 28,02 N dengan rerata elongation 1,77% (in %). jika dibandingkan dengan hasil uji Tarik dari bio plastic berbahan beras dan jagung dari literatur yang rerata nya 9,578 N dan elongation rerata 5,35 (in %) [23].



Gambar 1. Hasil pencetakan komposit



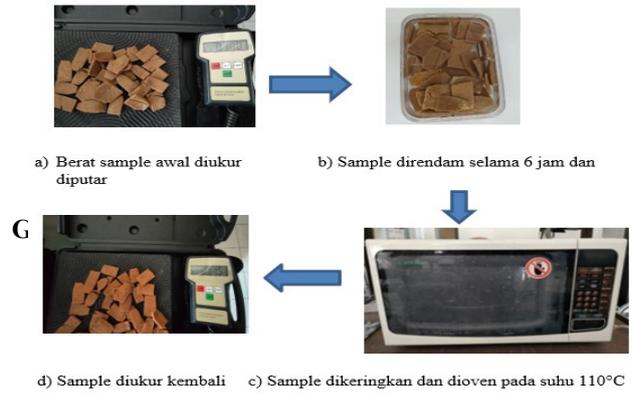
Gambar 2. Pencetakan dan pengujian sample



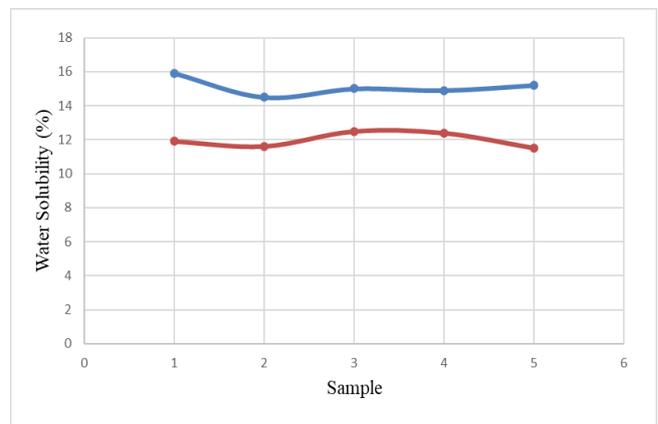
Gambar 3. Grafik hasil uji tarik

Hal ini menunjukkan adanya hubungan bahwa bio plastic beras-tanah liat menunjukkan peningkatan kekuatan tarik tiga kali lipat dari bio plastic beras-jagung. Dari perbandingan ini juga menunjukkan menurunnya sifat plastisnya menjadi hampir tiga kali lipatnya.

Gambar 5, adalah hasil perbandingan tingkat solubility komposit beras dan tanah liat jika dibandingkan dengan bio plastic beras - jagung [23]. Jika dibandingkan hasil pengujiannya menunjukkan nilai prosentase penyerapan air dari sampel yang diujikan warna biru adalah bio plastic pati beras-tanah liat rerata hasilnya 15 % dan jika dibandingkan dengan bio-plastik beras-jagung dari literatur warna merah yang reratanya 11,98%.

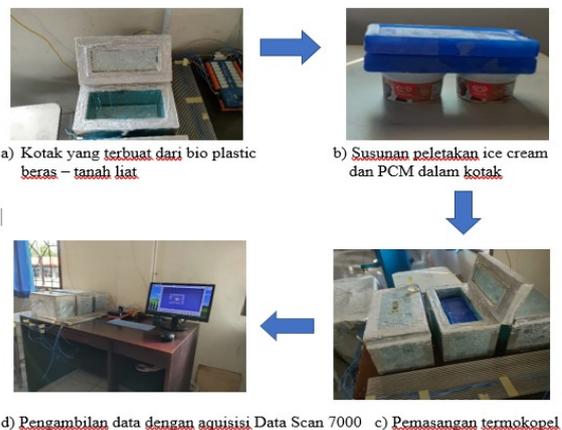


Gambar 4. Adalah skematik pengujian solubility terhadap air dari komposit.



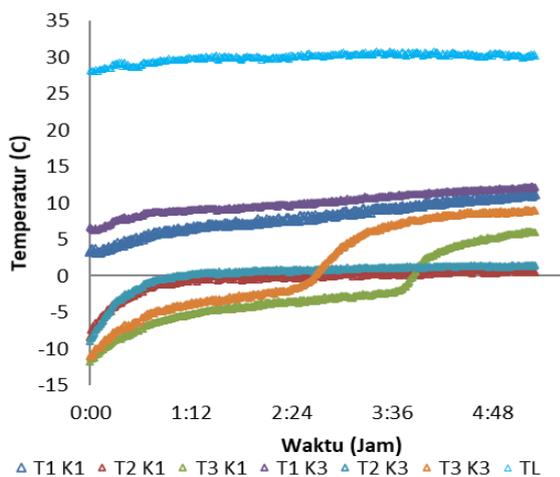
Gambar 5. Grafik perbandingan water solubility bio plastik

Hasil ini dapat dinyatakan kalau komposit beras dan tanah liat memiliki daya serap terhadap air lebih tinggi Keterserapan akan air diperoleh dari adanya komponen Gliserol yang memiliki kelarutan air yang baik berkisar dari 18% sampai 25% [22] Adanya matrix clay pada komposit adalah menjadi factor tambahan untuk meningkatkan hal tersebut. Sifat ini penting untuk membantu proses biodegradable bio-plastik di alam.



Gambar 6. Skematik pengujian tahanan termal

Pengambilan data dilakukan beberapa kali dengan hasil di rata-ratakan dan diplot seperti gambar 7. Garis biru muda adalah temperature lingkungan (TL) hasil pengukuran berkisar 28-30°C dengan rerata 29,5°C pada setiap pengujian sehingga dapat diasumsikan konstan, Garis (T1 K1) adalah temperature ruang pada kotak bagian dalam dari bahan polyurethane dan garis (T1 K3) adalah temperature pada kotak bagian dalam dari bahan bio plastic yang dibuat keduanya menunjukkan kesesuaian kenaikan temperature yang terdapat perbedaan yang kecil $\pm 3^\circ\text{C}$. Temperature dari PCM ditunjukkan oleh garis (T2 K1) pada kotak dari bahan polyurethane dan temperature (T2 K3) pada kotak dari bahan bio plastic keduanya berhimpit yang menyatakan PCM bekerja menyimpan dan melepas kalor latennya dengan baik pada kedua kotak pengujian.



Gambar 7.. Hasil pengujian tahanan termal bio plastic vs polyurethane

Untuk kondisi temperature es krim bisa dilihat pada grafik yaitu garis hijau (T3 K1) adalah kenaikan temperature eskrim pada kotak dari bahan polyurethane dan garis orange (T3 K3) adalah garis grafik yang menunjukkan kenaikan temperature es krim pada kotak dari bahan bio plastic. Temperature awal es krim yang diujikan sama pada kedua kotak yaitu pada temperature -11°C . Pada kotak satu memotong garis temperature 0°C dari PCM di waktu 3 jam dan 44,5 menit sedangkan temperature es krim pada kotak dua dari bahan bio plastic memotong garis 0°C temperature PCM di waktu 2 jam 49 menit. Hal ini menunjukkan bahwa kotak satu polyurethane memiliki ketahanan untuk mempertahankan temperature dingin es krim lebih baik ada perbedaan waktu 1 jam 05 menit terhadap temperature dingin es krim pada kotak dua bio plastic.

Hasil ini memberi harapan kuat atau mengindikasikan bio plastic bisa digunakan untuk bahan kotak pendingin makanan. Hal baru yang tercatat adalah penambahan komposisi tanah liat organic clay 5% pada pengujian ini masih dapat dilanjutkan dengan menambahkan material Organic clay sampai 10%. Adanya matrix tambahan clay pada bio plastic menambah kerapatan dari bahan tersebut untuk penelitian lanjutan berikutnya sehingga akan diperoleh material komposit bio plastic yang dapat mengurangi penggunaan bahan polyurethane.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari pengujian mekanis komposit bio-plastik pati beras dan tanah liat dengan komposisi seperti table 1. Dengan campuran tanah liat 5% cara pembuatan seperti pada sub bab 3. Menghasilkan material yang hasil uji tariknya rerata 28.02 N dan memiliki solubility terhadap air 15%. Material ini lebih kuat dari bio plastic beras-jagung dan adanya sifat solubility terhadap air maka material ini punya prospek mampu terurai yang lebih baik dari plastic pada umumnya. Hasil uji ketahanan termal bahan untuk kotak makanan dingin komposit beras-tanah liat dengan 5% clay mampu menahan suhu es krim pada suhu awal -11°C selama 2 jam 44.5 menit sampai tercapai temperature yang sama dengan temperatur kerja PCM 0°C lebih cepat 1 jam 05 menit dari kotak yang sama dari bahan polyurethane. Perlu penelitian lanjutan penambahan material organic clay sampai 10 % pada komposit untuk dapat menjadi material komposit yang punya spesifikasi yang lebih baik dari polyurethane.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Unit P3M-PNB yang telah mendanai penelitian ini melalui skema DANA-DIPA instistusi, serta buat teman sejawat, PLP teknisi, dan mahasiswa yang telah membantu penyelesaian proses pengujian di lab Uji dan Material Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Bali.

Daftar Pustaka

- [1] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L.Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Science Advances*, 3(7), 2017, pp. 25–29. doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [2] Global Waste Management Outlook, "Global Waste Management Outlook," 2016. doi: 10.18356/765baec0-en.
- [3] L. Avérous, "Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review," *Journal of Macromolecular Science - Polymer Reviews*, 44(3), 2004, pp. 231–274. doi: 10.1081/MC-200029326.
- [4] N. Wahyuningtyas, H. Suryanto, "Analysis of Biodegradation of Bioplastics Made of Cassava Starch," *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 1(1), 2017, pp. 24–31. doi: 10.17977/um016v1i12017p024.
- [5] E. Kamsiati, H. Herawati, E.Y. Purwani, "The Development Potential of Sago and Cassava Starch-Based Biodegradable Plastic in Indonesia," *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 36(2), 2017, p. 67. doi: 10.21082/jp3.v36n2.2017.p67-76.
- [6] Selpiana, J.F. Riansya, and K. Yordan, "Pembuatan Plastik Biodegradable dari Tepung Nasi Aking," *Seminar Nasional Added Value of Energy Resources Avoer VII*, 2015, pp. 130
- [7] J. González-Gutiérrez, "Effect of processing on the viscoelastic, tensile and optical properties of albumen/starch-based bioplastics," *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 2011, pp. 308–315. doi: 10.1016/j.carbpol.2010.11.040.
- [8] J.B. Lagos, "Mechanical properties of cassava starch films as affected by different plasticizers and different relative humidity conditions," *International Journal of*

- Food Studies, 4(1), 2015, pp. 116–125. doi: 10.7455/ijfs/4.1.2015. a10.
- [9] P.G. Seligra, "Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch-glycerol with citric acid as crosslinking agent," *Carbohydrate Polymers*, 138(December), 2016, pp. 66–74. doi: 10.1016/j.carbpol.2015.11.041.
- [10] N.A. Kukhta, I.V. Vasilenko and S.V. Kostjuk, "Room temperature cationic polymerization of β -pinene using modified ALCL3 catalyst: Toward sustainable plastics from renewable biomass resources," *Green Chemistry*, 13(9), 2011, pp. 2362–2364. doi: 10.1039/c1gc15593h.
- [11] Y. Jiugao, W. Ning and M. Xiaofei, "The effects of citric acid on the properties of thermoplastic starch plasticized by glycerol," *Starch/Staerke*, 57(10), 2005, pp. 494–504. doi: 10.1002/star.200500423.
- [12] J.B. Olivato, "Effect of organic acids as additives on the performance of thermoplastic starch/polyester blown films," *Carbohydrate Polymers*, 90(1), 2012, pp. 159–164. doi: 10.1016/j.carbpol.2012.05.009.
- [13] Z. Cherian, and R. Lehman, "Effects of adhesive type and polystyrene concentration on the shear strength of bonded polystyrene/high-density polyethylene blends," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 25(6), 2005, pp. 502–506. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.02.001.
- [14] L. Pezzi, "Concrete products with waste's plastic material (bottle, glass, plate)," *Materials Science Forum*, 514–516(PART 2), 2006, pp. 1753–1757. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.514-516.1753.
- [15] G. Tapkire, "Recycled Plastic Used in Concrete Paver Block," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(21), 2014, pp. 33–35. doi: 10.15623/ijret.2014.0321009.
- [16] E.H. Hernández, "Sulfuric acid treatment of ground tire rubber and its effect on the mechanical and thermal properties of polypropylene composites," *Journal of Applied Polymer Science*, 134(21), 2017, pp. 1–7. doi: 10.1002/app.44864.
- [17] Y. Liu, W. Yang, and M. Hao, "Research on mechanical performance of roof tiles made of tire powder and waste plastic," *Advanced Materials Research*, 87–88, 2010, pp. 329–332.
- [18] D. Senoro, A. Grino, E. Chan, "Effects of impregnation of organoclay in the thermo-physico-mechanical properties of recycled composite aluminates as barrier material," *Defect and Diffusion Forum*, 382 DDF, 2018, pp. 12–20. doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.382.12.
- [19] M. Seghiri, "The Possibility of Making a Composite Material from Waste Plastic," *Energy Procedia*, 119, 2017, pp. 163–169. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.065.
- [20] B.W. Nuryadin and K. Khairurrijal, "Sintesis Keramik Berbasis Komposit Clay-Karbon dan Karakterisasi Kekuatan Mekaniknya," (January, 2009).
- [21] M. Ghasemlou, N. Aliheidari, R. Fahmi, S. Shojaee-Aliabadi, B. Keshavarz, M.J. Cran, R. Khaksar, "Physical mechanical and barrier properties of corn starch films incorporated with plant essential oils," *Carbohydr. Polym.*, 98, 1117–1126, 2013. [CrossRef]
- [22] M. Gaspar, Z. Benk^o, G. Dogossy, K. Reczey, T. Czigany, O. Reducing, "Water absorption in compostable starch-based plastics", *Polym. Degrad. Stab*, 90, 563–569, 2005. (CrossRef)
- [23] M.K. Marichelvam, M. Jawaid, M. Asim, "Corn and Rice Starch-Based Bio-Plastics as Alternative Packaging Materials", *Fibers*, 7, 32; 2019. DOI;10.3390/fib7040032
- [24] Kingspan, "OPTIM-R, Next generation insulation solutions", *Produktdatablad*, 2012
- [25] D.E. Nasional, "Indonesia Energy Outlook", 2019.



Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <http://ojs.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Karbon dioksida refrigeran alami untuk sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial

Ketut Bangse¹, I Nyoman Suamir^{1*}, I Dewa Made Susila², I Ketut Suparwika³ dan I Putu Sandi Raditya³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364 Indonesia

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta Selatan, Badung, Bali 80364 Indonesia

³Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Badung, Bali 80364 Indonesia

*Email: nyomansuamir@pnb.ac.id

Abstrak

Paper ini mengevaluasi sifat-sifat termo-fisik dari karbon dioksida yang memiliki potensi sebagai refrigeran alternatif ramah lingkungan dengan nama standar R744. Refrigeran R744 merupakan senyawa alami yang memiliki potensi merusak ozon (ODP) nol dan potensi pemanasan global (GWP) yang sangat rendah yaitu 1 kgCO₂/kg. Evaluasi dilakukan secara komprehensif mencakup keuntungan utama R744 dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya dalam berbagai aplikasi khususnya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. R744 memiliki sifat termo-fisik yang menarik seperti viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Sifat termo-fisik ini dapat memberikan keunggulan kepada R744 pada perpindahan panas yang baik di evaporator, kondensor, dan pendingin gas (gas cooler). Dengan demikian penggunaan R744 memungkinkan pemilihan komponen dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan sistem dengan refrigeran HFC. Pemanfaatan R744 pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial juga dibahas. Ditemukan pada aplikasi pompa kalor untuk pemanas air di negara-negara yang beriklim tropis, sistem transkritikal R744 dengan sangat mudah dapat mencapai temperature air panas di antara 65 °C dan 80 °C dengan COP sistem bisa mencapai 5,4.

Kata kunci: refrigeran R744, senyawa alami, refrigerasi supermarket, pompa kalor

Abstract: This paper evaluates the thermo-physical properties of carbon dioxide which has the potential as an environmentally friendly alternative refrigerant with the code R744. Refrigerant R744 is a natural compound that has zero ozone depleting potential (ODP) and very low global warming potential (GWP) of 1 kgCO₂/kg. Evaluations were comprehensively conducted which covered the main advantages of R744 compared to other natural refrigerants in various applications, especially in supermarket refrigeration and commercial building heat pumps. CO₂ as a refrigerant has attractive thermo-physical properties such as low viscosity, high thermal conductivity, high specific heat capacity, and high vapor density. These thermo-physical properties can give the R744 an advantage in good heat transfer in the evaporator, condenser, and gas cooler. Thus the use of R744 allows the selection of components with a smaller size compared to systems with HFC refrigerants. The use of R744 in supermarket refrigeration and commercial building heat pumps is also discussed. Found in heat pump applications for water heating in tropical countries, the R744 transcritical system can easily reach hot water temperatures between 65 °C and 80 °C with a system COP of up to 5.4.

Keywords: R744 refrigerant, natural compound, supermarket refrigeration, heat pump

Penerbit @ P3M Politeknik Negeri Bali

1. Pendahuluan

CO₂ adalah senyawa alami yang telah digunakan dalam industri refrigerasi sejak tahun 1866. Setelah mencapai puncak penggunaan untuk sistem pendingin aplikasi kenyamanan pada tahun 1920-an, penggunaannya menurun hingga hampir nol ditemukan dan diperkenalkan refrigeran chlorofluorocarbon (CFC) pada tahun 1930-an [1,2]. Tetapi dengan ditemukannya bahwa refrigeran jenis

CFC memberikan dampak buruk terhadap lingkungan karena memiliki potensi merusak lapisan ozon ODP (Ozone Depleting Potential) dan potensi pemanasan global GWP (Global Warming Potential). Penurunan yang sangat drastis sistem CFC sejak tiga dekade terakhir telah menimbulkan peningkatan yang luar biasa dalam penelitian refrigerasi untuk refrigeran alternatif baru yang lebih ramah lingkungan. Penelitian ini meliputi penggunaan refrigeran

alami meliputi penggunaan refrigeran alami yang sudah tua termasuk CO₂ (R744) dan ammonia (R717). Sejak periode itu, CO₂ telah kembali sebagai pilihan praktis untuk berbagai aplikasi sistem refrigerasi [3].

R744 adalah refrigeran ramah lingkungan. Refrigeran ini memiliki ODP nol dan potensi pemanasan global (GWP) yang rendah. Keuntungan utama CO₂ dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya adalah tidak beracun dan tidak mudah terbakar, yang sering membatasi penerapan refrigeran alami lainnya, seperti hidrokarbon dan amonia. R744 juga memiliki sifat termo-fisik yang menarik: viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Keunggulan sifat termo-fisik ini berpengaruh baik terhadap perpindahan panas di evaporator, kondensor, dan gas cooler yang memungkinkan penggunaan komponen yang lebih kompak dibandingkan dengan sistem refrigerasi HFC.

Berbagai penerapan refrigeran R744 terutama untuk supermarket juga dibahas dalam paper ini. Konsep-konsep penerapan refrigeran R744 meliputi unit yang berdiri sendiri (integral), kondensasi (kaskade), dan unit terpusat (*centralized system*) [4]. Untuk unit refrigerasi supermarket yang terpusat, beberapa solusi desain dapat diterapkan seperti sistem sub-kritikal dan trans-kritikal. Pengoperasian sistem kaskade sub-kritikal pada tekanan sedang dan menggunakan dua sistem yaitu sistem untuk refrigerasi dan sistem untuk pembuangan kalor (heat rejection). Sedangkan pengoperasian sistem trans-kritikal pada tekanan tinggi dan hanya memanfaatkan refrigeran R744.

Sistem refrigerasi R744 sub-kritikal dievaluasi di dalam paper [5] yang kinerjanya pada aplikasi supermarket sudah juga dilaporkan oleh sejumlah peneliti [6,7]. Aplikasi R744 bersama penggunaan refrigeran alami lainnya dalam susunan bertingkat (kaskade) juga telah diteliti [8,9]. Dilaporkan bahwa sistem kaskade bisa memberikan kinerja energi yang lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional menggunakan R404a. Sistem refrigerasi kaskade antara R744 dengan refrigeran R717 juga dilaporkan dapat memberikan kinerja lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional [10-15]. Sedangkan aplikasi sub-kritikal R744 yang diintegrasikan dengan sistem trigeneration untuk penerapan di supermarket juga memberikan kinerja sistem yang lebih baik dari sistem konvensional, baik dari aspek konsumsi energi maupun dampaknya terhadap lingkungan [16-18].

Penerapan penggunaan refrigeran R744 lebih luas lagi dan semakin populer termasuk di negara-negara tropis adalah pada aplikasi sistem pompa kalor (heat pump). Sebuah sistem komersial R744 transkritikal secara eksperimental menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk aplikasi pompa kalor yang difungsikan sebagai pemanas air pada rentang temperatur 65-80 °C. Kinerja sistem pompa kalor R744 untuk aplikasi ini dapat mencapai COP dari 3,8 sampai dengan 5,4 [19]. Aplikasi pompa kalor R744 menjadi sangat strategis pada gedung komersial di negara-negara yang beriklim tropis, seperti di industri hotel yang kebutuhan air panas domestiknya cukup signifikan dan bersifat kontinyu. Penerapan dan kinerja R744 pada sistem pompa kalor juga sudah banyak diteliti yang antara lain sudah dilaporkan oleh beberapa peneliti ini [20-22]. Secara umum dilaporkan bahwa sistem refrigerasi R744 transkritikal memberikan kinerja yang positif untuk aplikasi pompa kalor termasuk untuk negara yang beriklim tropis.

Paper ini menyajikan evaluasi berbagai keunggulan termo-fisik R744 dibandingkan refrigeran lain khususnya pada aplikasi refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Kelemahan utama dari R744 yang bertekanan tinggi juga dievaluasi termasuk teknik praktis untuk melindungi sistem refrigerasi R744 dari kelemahan tersebut.

2. Metode

Evaluasi R744 sebagai refrigeran alami dengan berbagai keunggulan dilakukan dengan metode kajian literatur. Sumber-sumber informasi tentang refrigeran R744 dan aplikasinya pada sistem refrigerasi supermarket dan pompa kalor untuk gedung komersial telah dievaluasi secara komprehensif. Kajian dari berbagai literatur tentang R744 dan refrigeran alami lain yang sudah dipublikasikan juga dibandingkan untuk memperoleh analisis komparasi sifat-sifat termo-fisik dengan berbagai refrigeran beserta berbagai teknologi penerapannya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Parameter termo-fisik yang dievaluasi meliputi: kinerja energi pada aplikasi temperatur medium (MT) dan rendah (LT); rugi-rugi tekanan pada sistem baik pada pipa refrigeran gas maupun pipa refrigeran cair; termasuk rugi-rugi tekanan yang diperbolehkan pada sistem refrigerasi. Sifat-sifat termo-fisik dari refrigeran dalam penelitian ini diturunkan dari program EES (Engineering Equation Solver) versi 11.112-3D.

3. Hasil dan Pembahasan

Salah satu karakteristik yang membedakan R744 adalah sifat perubahan fasanya; titik tripel relatif tinggi pada -56,6 °C (5,2 bar_a) dan temperatur kritis 31 °C (73,8 bar_a) yang dianggap relatif rendah [23]. Karakteristik ini dapat membatasi fleksibilitas aplikasi sistem refrigerasi R744 dan juga sifat perubahan fasa dari padat, cair, dan uap seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Semua sifat dan karakteristik R744 harus dipertimbangkan secara menyeluruh dalam setiap aplikasi yang potensial.

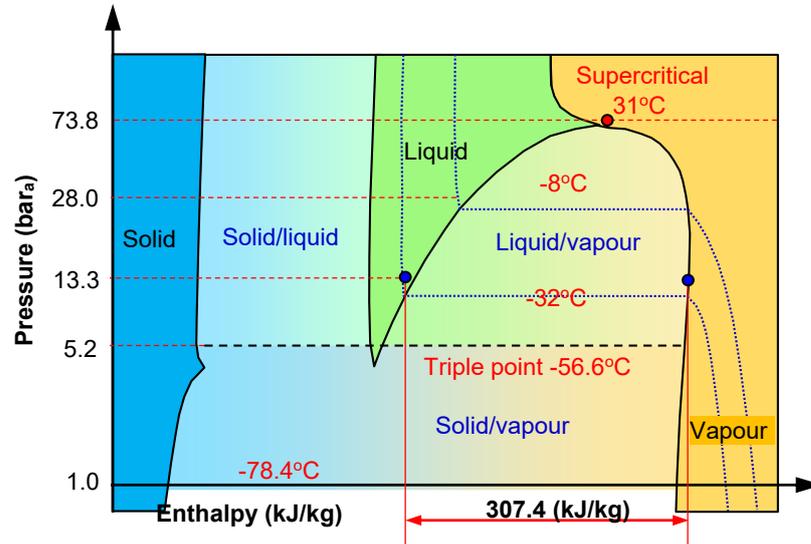
Kinerja komparatif R744 dan refrigeran terpilih untuk aplikasi refrigerasi temperatur sedang (MT) dan rendah (LT) dengan kondisi operasi yang sama ditunjukkan pada Tabel 1. Efek refrigerasi R744 lebih tinggi daripada R404a tetapi lebih rendah dari refrigeran alami lainnya. Hal ini secara langsung mempengaruhi jumlah refrigeran yang perlu disirkulasikan dalam sistem refrigerasi. Tabel juga menunjukkan bahwa R744 memiliki rasio tekanan terendah di antara refrigeran yang diamati yaitu sekitar 5% sampai 30% lebih rendah untuk sistem MT dan 15% sampai 50% untuk sistem LT. Memiliki rasio tekanan yang lebih rendah menunjukkan bahwa R744 dapat memberikan efisiensi volumetrik dan isentropik yang lebih besar. Keuntungan lain dari refrigeran R744 yang dapat dilihat dengan jelas pada tabel adalah memiliki volume spesifik gas hisap yang sangat kecil sekitar 3 sampai 30 kali lebih rendah dari refrigeran lain untuk sistem MT dan bahkan lebih rendah untuk sistem LT. Ini berarti bahwa sistem refrigerasi R744 akan membutuhkan kompresor berukuran lebih kecil dan membutuhkan diameter pipa hisap yang lebih kecil untuk kondisi operasi yang sama.

Kondisi operasi yang dipertimbangkan untuk Tabel 1 mencakup: kapasitas refrigerasi 1 kW, derajat superheat 5 K, tanpa sub-cooling, temperatur evaporasi masing-masing

-8 dan -32 °C untuk refrigerasi MT dan LT dan temperatur kondensasi 28 °C untuk kedua sistem [24].

R744 juga menunjukkan kinerja penurunan tekanan yang sangat baik dibandingkan dengan kebanyakan refrigeran lainnya. Untuk mendemonstrasikan keuntungan dari refrigeran R744 sehubungan dengan penurunan tekanan, tiga grafik berbeda telah diplot seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4. Data penurunan tekanan R744 dan refrigeran terpilih lainnya diturunkan menggunakan program EES (Engineering Equation Solver) untuk geometri, kondisi operasi, dan beban refrigerasi yang sama.



Gambar 1. Diagram P-h refrigeran R744 (Dimodifikasi dari: ASHRAE [23])

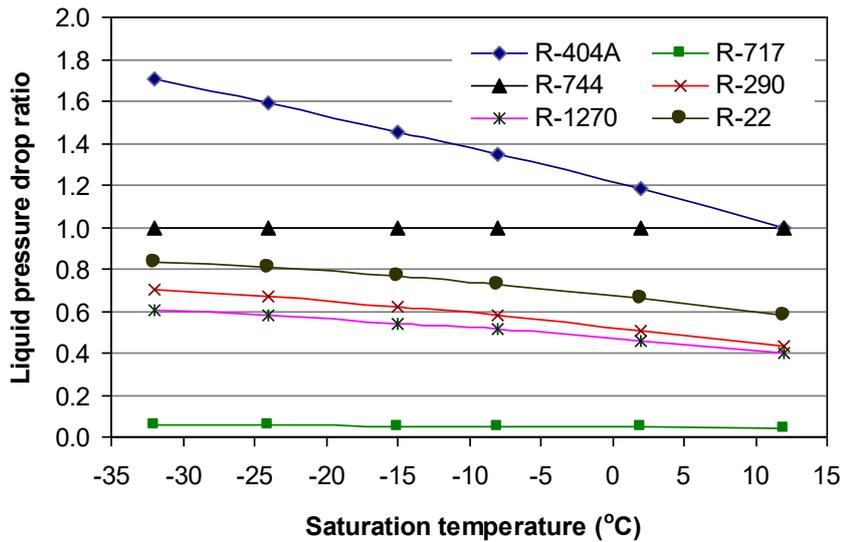
Tabel 1. Perbandingan kinerja refrigeran R744 dengan berbagai refrigeran lainnya per kW kapasitas refrigerasi untuk aplikasi refrigerasi MT dan LT

Refrigeran	P_{evap} (bar _a)	P_{cond} (bar _a)	Rasio tekanan	Efek refrigerasi (kJ/kg)	Laju massa refrigeran $\times 10^{-3}$ (kg/s)	Volume jenis gas sisi hisap $\times 10^{-3}$ (m ³ /kg)
Aplikasi sistem refrigerasi MT (Medium Temperature)						
R-22	3.8	11.3	3.0	170.1	5.9	62.6
R404A	4.7	13.6	2.9	124.2	8.1	42.8
R-290	3.7	10.3	2.9	300.5	3.3	126.1
R-1270	4.6	12.5	2.7	306.4	3.3	105.4
R-717	3.2	11.0	3.5	1134.1	0.9	396.8
R-744	28.0	68.9	2.6	153.1	6.5	13.9
Aplikasi sistem refrigerasi LT (Low Temperature)						
R-22	1.5	11.3	7.5	159.4	6.3	150.3
R404A	1.9	13.6	7.0	110.1	9.1	101.3
R-290	1.5	10.3	6.6	271.7	3.7	285.4
R-1270	2.0	12.5	6.3	281.3	3.6	234.4
R-717	1.1	11.0	10.2	1100.1	0.9	1082.2
R-744	13.3	68.9	5.2	153.3	6.5	29.9

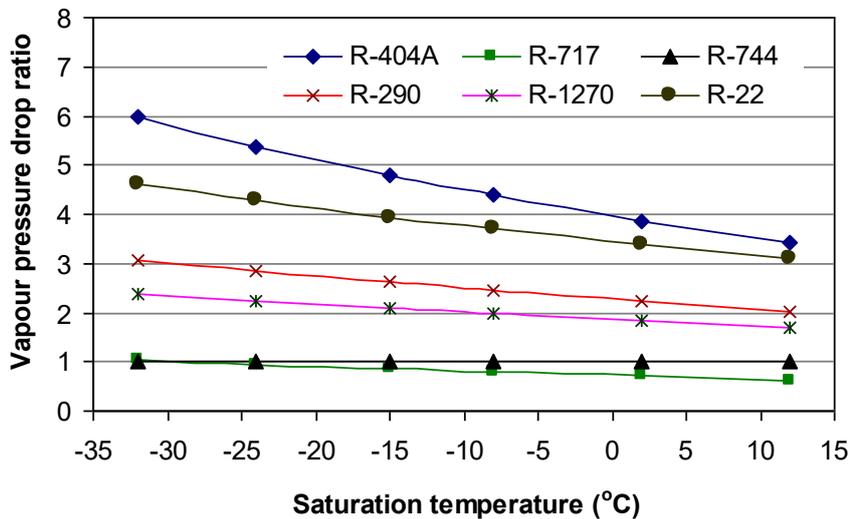
P_{evap} = tekanan evaporasi dan P_{cond} = tekanan kondensasi

Gambar 2 menunjukkan perbandingan penurunan tekanan cairan jenuh dari refrigeran lain dengan penurunan tekanan R744. Dapat dilihat bahwa penurunan tekanan cairan refrigeran R744 secara signifikan lebih kecil dari R404a khususnya pada temperatur saturasi yang lebih rendah tetapi sekitar 1,7 hingga 2,5 kali lebih tinggi dari R1270, R290 dan R22. Amonia (R717) memberikan penurunan tekanan cairan jenuh terendah untuk rentang

temperatur evaporasi yang diberikan. Akan tetapi, penurunan tekanan cairan jenuh R744 yang dapat diterima adalah 5 hingga 9 kali lebih besar daripada refrigeran lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa R744 dapat bekerja lebih baik dibandingkan dengan refrigeran lain yang dipilih kecuali amonia dalam hal penurunan tekanan cairan jenuh yang juga membuatnya cocok untuk digunakan sebagai cairan sekunder.



Gambar 2. Perbandingan rugi-rugi tekanan pipa cair untuk R744 dan berbagai refrigeran pada temperatur evaporasi yang diamati dan pada kondisi operasional yang sama



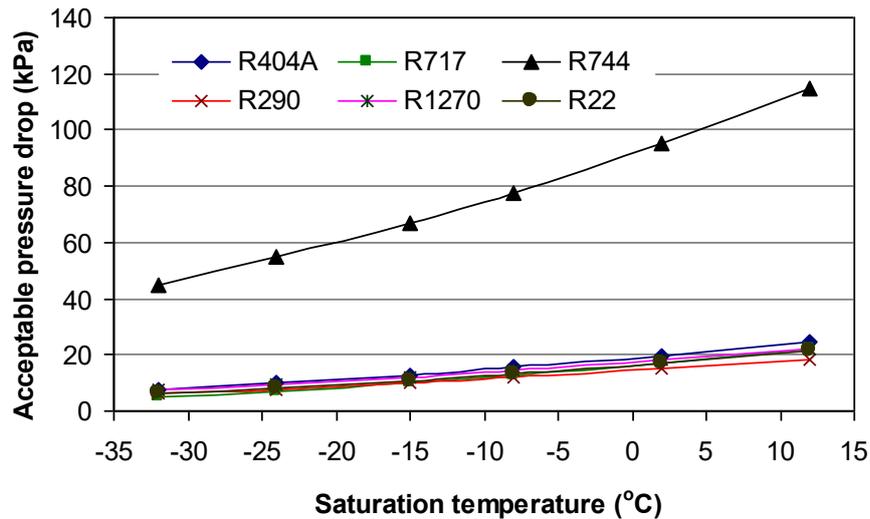
Gambar 3. Perbandingan rugi-rugi tekanan pipa gas untuk R744 dan berbagai refrigeran pada temperatur evaporasi yang diamati dan pada kondisi operasional yang sama

Rasio penurunan tekanan uap jenuh refrigeran lain terhadap refrigeran R744 disajikan pada Gambar 3. R744 memiliki penurunan tekanan uap yang jauh lebih rendah daripada refrigeran lain selain amonia. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa semakin rendah temperatur saturasi, refrigeran R744 lebih menguntungkan dibandingkan dengan refrigeran lain yang dipilih sehubungan dengan penurunan tekanan uap jenuh. [25].

Gambar 4 menjelaskan penurunan tekanan yang diperbolehkan dari pipa cairan dan gas jenuh yang setara dengan penurunan temperatur jenuh 1 K. Untuk temperatur saturasi yang sama, penurunan tekanan R744 yang diperbolehkan secara signifikan lebih tinggi daripada refrigeran terpilih lainnya. R744 dapat mentolerir penurunan tekanan sekitar 45 kPa untuk sistem LT dan 80 kPa untuk aplikasi MT. Sedangkan refrigeran lainnya dapat menerima pressure drop hanya setinggi 5 kPa dan 15 kPa untuk masing-masing aplikasi LT dan MT. Fakta bahwa penurunan tekanan yang lebih tinggi dapat ditoleransi

dengan R744 di evaporator dan saluran hisap sebelum kinerja sistem terpengaruh secara serius, temperatur penguapan yang lebih tinggi dapat dicapai dan diameter pipa yang lebih kecil dapat digunakan dibandingkan dengan refrigeran lainnya.

Komponen dan diameter pipa yang lebih kecil yang dapat digunakan dengan R744 menyebabkan pengurangan yang signifikan dalam muatan refrigeran yang dibutuhkan untuk beban refrigerasi tertentu dibandingkan dengan refrigeran HCFC dan HFC. Untuk sistem refrigerasi supermarket terpusat, muatan refrigeran R744 diperkirakan sekitar 50% dari refrigeran jenis HCFC dan HFC. Muatan refrigeran spesifik R744 dalam aplikasi supermarket berada dalam kisaran 1 hingga 2,5 kg/kW. R744 juga merupakan refrigeran yang relatif murah. Harganya sekitar 50% lebih rendah dari amonia dan sekitar 6-9 kali lebih rendah dibandingkan dengan harga refrigeran HCFC, HFC dan HC seperti dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. Rugi-rugi tekanan yang diizinkan pada pipa refrigeran R744 dan refrigeran lain dalam wujud gas dan cair

Tabel 2. Perbandingan harga refrigeran R744 dan refrigeran lain

Refrigeran	Harga (Rp/kg)	Rasio harga
R-22	306.000	7.3
R404A	234.000	5.7
R-290	346.500	8.3
R-1270	397.800	9.5
R-717	100.800	2.4
R-744	41.580	1.0

Sumber: Dean & Wood [26]

Seperti semua refrigeran lainnya, pilihan pelumas juga sangat penting dengan sistem refrigerasi R744. Fungsi utama pelumas adalah untuk mengurangi gesekan dan meminimalkan keausan pada kompresor. Pelumas memberi lapisan minyak di antara permukaan geser untuk mengurangi kontak langsung padatan ke padat dan menurunkan koefisien gesekan. Pelumas yang kompatibel akan dapat terus menjaga lapisan pelumasan di kompresor. Pelumas yang cocok untuk R744 termasuk minyak mineral (MO), dan poli alfa olefin (PAO). Oli poli ester (POE) yang biasa digunakan untuk refrigeran HFC juga memiliki daya larut yang baik dengan R744 [25].

Terlepas dari keuntungan tersebut, R744 juga memiliki beberapa kelemahan. Salah satu kelemahan utama R744 sebagai refrigeran adalah tekanan kerjanya yang tinggi dibandingkan dengan refrigeran alami dan sintesis. Ini berarti bahwa untuk sistem R744, komponen harus dirancang untuk menahan tekanan tinggi dan untuk mengurangi risiko keselamatan akibat tekanan tinggi terutama untuk sistem dengan biaya besar seperti sistem supermarket [27]. Karena R744 memiliki kapasitas volumetrik yang jauh lebih tinggi, masalah tekanan kerja yang lebih tinggi dapat diatasi dengan desain optimal yang melibatkan komponen yang lebih kecil dan lebih kuat. Selain itu, pengembangan material modern, teknik desain dan teknologi dalam proses manufaktur telah secara

dramatis mengurangi risiko yang terkait dengan tekanan tinggi [28]. Namun, untuk mengurangi biaya beberapa komponen di pabrik R744 seperti pada sistem tidak langsung dan sistem kaskade temperatur rendah biasanya dirancang untuk tekanan operasi maksimum (MOP) 40 hingga 46 bar. Dalam praktiknya, cara paling umum dan termudah untuk melindungi dari tekanan tinggi adalah dengan melepaskan sebagian muatan R744 dari sistem melalui katup pengaman (safety valve) ketika tekanan mencapai nilai yang ditetapkan. Jika sistem tetap diam, maka katup pelepas akan berulang kali membuka dan menutup untuk menjaga tekanan tetap rendah. Dalam kasus seperti itu, sistem dapat kehilangan banyak refrigeran dan perlu diisi lagi untuk mengkompensasi R744 yang terbuang melalui safety valve. Untuk sistem refrigerasi R744 yang dirancang untuk downtime yang lama, unit refrigerasi independen kecil dapat dipasang untuk mendinginkan cairan R744 ke tingkat di mana tekanan jenuh kurang dari tekanan desain. Teknik lain adalah dengan menggunakan receiver yang dapat menahan tekanan lebih tinggi dari tekanan jenuh R744 pada temperatur lingkungan. Jika sistem berhenti, sistem di-pump-down dan semua refrigeran R744 disimpan di receiver.

Masalah keamanan lainnya dengan refrigeran R744 adalah tingkat konsentrasi gas CO₂ di area yang ditempati jika terjadi kebocoran. R744 lebih berat daripada udara dan cenderung menggantikan udara dari area yang ditempati dekat lantai. R744 juga tidak berbau dan tidak dapat tercium. Kebocoran dari sistem R744 dapat membuat tingkat konsentrasi CO₂ terlalu tinggi yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Risiko serupa juga ada pada refrigeran CFC, HCFC, dan HFC. Dalam praktiknya, ini dianggap sebagai risiko terkendali yang dapat dicegah dengan deteksi kebocoran dan ventilasi ruang yang tepat. Detektor CO₂ yang andal diperlukan untuk memastikan ruang kerja aman bagi manusia dan untuk menjaga tingkat konsentrasi CO₂ dalam kisaran kualitas udara yang baik untuk kenyamanan manusia dan tidak boleh melebihi 1000 ppm [29].

4. Kesimpulan

Paper ini menyajikan evaluasi berbagai keunggulan termofisik R744 dibandingkan refrigeran lain khususnya pada aplikasi refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. Kelemahan utama dari R744 yang bertekanan tinggi juga dielaborasi termasuk teknik praktis untuk melindungi sistem refrigerasi R744 dari kelemahan tersebut. Sifat-sifat termofisik dari R744 yang memiliki potensi sebagai refrigeran alternatif ramah lingkungan dievaluasi secara komprehensif mencakup keuntungan utama R744 dibandingkan dengan refrigeran alami lainnya dalam berbagai aplikasi khususnya pada refrigerasi supermarket dan pompa kalor gedung komersial. R744 terbukti memiliki sifat termofisik yang menarik seperti viskositas rendah, konduktivitas termal tinggi, kapasitas panas spesifik tinggi, dan massa jenis uap tinggi. Sifat termofisik ini dapat memberikan keunggulan kepada R744 pada perpindahan panas yang baik di evaporator, kondensator, dan pendingin gas (gas cooler). Dengan demikian penggunaan R744 memungkinkan pemilihan komponen dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan sistem dengan refrigeran HFC.

Daftar Pustaka

- [1] M. Bellstedt, F. Elefsen, S.S. Jensen, "Application of CO₂ (R744) refrigerant in industrial cold storage plant", *Forum*, 2002, pp. 25-30.
- [2] W.S. Bodinus, "The rise and fall of carbon dioxide systems", *ASHRAE Journal*, 1999, 37-42.
- [3] A. Pearson, "Carbon dioxide - new uses for an old refrigerant", *Int. J. Refrigeration* 28, 2005, pp. 1140-1148.
- [4] IPCC, "Safeguarding the ozone layer and the global climate system. UN-Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005, 478 pgs.
- [5] J.M. Rhiemeier, J. Harnisch, C. Ters, M. Kauffeld, A. Leisewitz, "Comparative assessment of the climate relevance of supermarket refrigeration systems and equipment", *Federal Environment Agency*, 2009, 270 pgs.
- [6] A. Campbell, G.G. Maidment, J.F. Missenden, "A natural refrigeration system for supermarkets using CO₂ as a refrigerant", *Proc. CIBSE National Conference*, London, UK, 2006.
- [7] D. Hinde, S. Shitong Zha, L. Lan, "Carbon dioxide in North American supermarkets", *ASHRAE Journal* 51, 2009, pp. 18-26.
- [8] J. Fernandez-Seara, J. Sieres, and M. Va'zquez, "Compression-absorption cascade refrigeration system", *Appl. Therm. Eng.*, 26, 2006, pp. 502-512.
- [9] S. Sawalha, K.A. Soleimani, J. Rogstam, "Experimental and theoretical evaluation of NH₃/CO₂ cascade system for supermarket refrigeration in laboratory environment", *Proc. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids*, Trondheim, Norway, 2006.
- [10] T.S. Lee, C.H. Liu, T.W. Chen, "Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems", *Int. J. Refrigeration*, 29, 2006, pp. 1100-1108.
- [11] H.M. Getu, and P.K. Bansal, "Thermodynamic analysis of an R744-R717 cascade refrigeration system", *Int. J. Refrigeration*, 31, 2008, pp. 45-54.
- [12] W. Bingming, W. Huagen, L. Jianfeng, and X. Ziwen, "Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor", *Int. J. Refrigeration*, 32, 2009, 1358-65.
- [14] J.A. Dopazo, J. Fernández-Seara, J. Sieres, and F.J. Uña, "Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low temperatures", *Appl. Therm. Eng.*, 29, 2009, 1577-83.
- [15] P.K. Bansal, and S. Jain, "Cascade systems: past, present, and future", *ASHRAE Transactions*, 113, 2007, pp. 245-252.
- [16] I.N. Suamir, "Integration of trigeneration and CO₂ based refrigeration systems for energy conservation", *PhD Thesis*, in Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 2012, 272 pgs.
- [17] I.N. Suamir, S.A. Tassou, "Performance evaluation of integrated trigeneration and CO₂ refrigeration systems", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 2013, pp. 1487-1495.
- [18] I.N. Suamir, S.A. Tassou, D. Marriott, "Integration of CO₂ refrigeration and trigeneration systems for energy and GHG emission savings in supermarkets", *Int. J. Refrig.*, 35, 2012, pp. 407-417.
- [19] A. Soh and S. Dubey, "Performance study of CO₂ heat pump under tropical conditions of Singapore", *Energy Procedia*, 158, 2019, pp. 1366-1371.
- [20] L. Yang, X. Qin, L. Zhao, S. Ye, X. Wei, D. Zhang, "Analysis and comparison of influence factors of hot water temperature in transcritical CO₂ heat pump water heater: An experimental study", *Energy Conversion and Management*, 198, 2019, pp. 111836.
- [21] Y. Chen, "Optimal heat rejection pressure of CO₂ heat pump water heaters based on pinch point analysis", *Int. J. Refrig.*, 106, 2019, pp. 592-603.
- [22] S. Wang, H. Tuo, F. Cao, Z. Xing, "Experimental investigation on air-source transcritical CO₂ heat pump water heater system at a fixed water inlet temperature", *Int. J. Refrig.*, 36, 2013, pp. 701-716.
- [23] ASHRAE, "ASHRAE handbook of refrigeration", ASHRAE, Inc., Atlanta, 2018, 749 pgs.
- [24] EES, "Engineering equation solver V.11.112-3D", 2021, www.fChart.com.
- [25] C.A. Lommers, "Air conditioning and refrigeration industry refrigerant selection guide", 7th ed. Melbourne, AIRAH, 2003, 66 pgs.
- [26] Dean & Wood, "Refrigerant price", 2011, Available from: <http://dean-wood.com/products/refrigerant-price/>.
- [27] IIR, "5th Informatory note on refrigerants: Carbon dioxide as a refrigerant", 2000.
- [28] Proklima, 2008. Natural refrigerants. GTZ GmbH, Eschborn, Germany, 208 pgs.
- [29] ASHRAE, "ASHRAE Standard 62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", ASHRAE, Inc., Atlanta, 2013, 58 pgs.

e-ISSN 2684-8201



p-ISSN 2655-9145



JAMETECH

Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Politeknik Negeri Bali,
Jl. Kampus, Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Badung
Bali - Indonesia 80364 - PO BOX 1064
Telp. (+62)361 701981 Fax. (+62)361 701128
Email: jametech@pnb.ac.id

