

Analisis Perpindahan Panas *Heat Recovery System* yang Terintegrasi pada *Water-cooled Chiller*

Ida Bagus Oka Jeve, Made Sucipta dan Ketut Astawa

Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Green building merujuk pada struktur dan proses aplikasi yang bertanggung jawab kepada lingkungan serta memanfaatkan sumber daya secara optimal selama siklus hidup bangunan berlangsung. Pemanfaatan kembali energi terbuang dapat dilakukan untuk memenuhi konsep *green building*. *Water-cooled chiller* bekerja dengan cara menyerap panas dalam suatu ruang dan melepaskannya menuju atmosfer. Pemanfaatan kembali energi yang terbuang dari proses kerja *water-cooled chiller* dapat dilakukan dengan cara mengintegrasikan *heat recovery system*, yakni suatu alat penukar panas yang memanfaatkan panas buang dari kompresor *chiller* untuk memanaskan air. Unit *water-cooled chiller* menggunakan kompresor tipe *screw* yang sudah terintegrasi *heat recovery system* pada sisi *discharge* kompresor memiliki spesifikasi *rate of heat recovery* sebesar 145 kW. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung *rate of heat recovery* dan temperatur refrigeran yang keluar dari *heat recovery* pada *water-cooled chiller* yang terintegrasi dengan *heat recovery system*. Penelitian dilakukan dengan pengambilan data pada setiap titik keadaan dari sistem *water-cooled chiller* selama 2 hari, diantaranya dari sisi kompresor dan *heat recovery*. Penelitian menghasilkan data perhitungan berupa rata-rata *rate of heat recovery* sebesar 80,92 kW (55,81%) dan rata-rata temperatur refrigeran yang keluar dari *heat recovery* adalah 49 °C.

Kata kunci: *Water-cooled chiller*, *Heat recovery system*, Temperatur refrigeran

Abstract

Green building refers to structure and process of applications that are environmentally responsible and optimally-used resources along the building's life cycle. Energy harvesting method can be used to fulfil the concept of green building. *Water-cooled chiller* works by releasing energy in the form of heat to the atmosphere. *Water-cooled chiller's* wasted energy can be harvested by utilising the integration of *heat recovery system*, a heat exchanger which transfers energy from the *chiller's* compressor to heat the water. The *water-cooled chiller* unit is integrated with *heat recovery system* at its screw type compressor's *discharge* side which its specification *rate of heat recovery* is at 145 kW. This research conducts the *rate of heat recovery* and *heat recovery's* refrigerant outlet temperature calculations from *water-cooled chiller* that is already integrated with *heat recovery system*. The research is conducted by gathering data from every *water-cooled chiller* systems' points of condition like compressor and *heat recovery* for 2 days. This research results calculation data like the average *rate of heat recovery* at 80.92 kW (55.81%) and the average *heat recovery's* refrigerant outlet temperature at 49 °C.

Keywords: *Water-cooled chiller*, *Heat recovery system*, Refrigerant temperature

1. Pendahuluan

Chiller adalah mesin pengkondisi udara pendingin ruangan yang biasanya bekerja dengan cara menyerap panas air untuk mendinginkan suatu ruang dan melepas panas tersebut menuju atmosfer. *Chiller* umum diterapkan pada daerah dengan kondisi udara yang panas dan lembab. *Chiller* dapat dijumpai pada pusat perbelanjaan, perkantoran dan perhotelan. *Chiller* digunakan berdasarkan pertimbangan seperti kemudahan perawatan sistem pengkondisi dalam udara skala besar dan perhitungan investasi jangka panjang. *Chiller* berbasis *water-cooled chiller* dalam keadaan normal melepas panas pada air di dalam kondensor dan panas tersebut kemudian dilepaskan menuju atmosfer menggunakan *cooling tower* [1]. Sebagian panas yang akan dilepaskan dapat dimanfaatkan kembali dengan integrasi *heat recovery system* pada unit *water-cooled chiller* untuk menghasilkan air panas sebagai *by-product chiller* tersebut.

Studi mengenai *water-cooled chiller* sudah dilakukan untuk menginvestigasi bagaimana kombinasi berbeda dari komponen-komponen sistem

mempengaruhi *coefficient of performance* (COP) sistem [2]. Hasil studi tersebut memberikan informasi bahwa COP sistem optimal dapat diperoleh melalui pengoperasian *chiller*, *cooling tower* serta pompa *chilled water* dan kondensor dengan jumlah yang sama. Analisa intensitas energi operasional sistem AC sentral menggunakan *water-cooled chiller* dengan metode dekomposisi menginformasikan bahwa *chiller* memerlukan energi dalam proporsi terbesar jika dibandingkan dengan komponen sistem lainnya [3]. Penelitian tentang analisa performa kombinasi dari kondensator dan *heat recovery system* juga pernah dilakukan pada *water-cooled chiller* melalui simulasi menggunakan Simulink [4].

Terdapat unit *Water-cooled chiller* dengan kapasitas 275 TR (972 kW) yang terintegrasi *heat recovery system*. *Heat recovery system* yang terintegrasi pada *chiller* tidak memiliki alat ukur untuk mengetahui temperatur refrigeran yang keluar dari unit *heat recovery*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui temperatur refrigeran yang keluar dari *heat recovery*

menggunakan diagram tekanan terhadap entalpi (P-h) refrigeran R410A.

Dalam hal ini maka ada beberapa permasalahan yang akan dikaji, yaitu:

1. Bagaimana *rate of heat recovery* pada *water-cooled chiller* dengan kapasitas pendinginan spesifikasi 972 kW yang terintegrasi *heat recovery system*.
2. Bagaimana temperatur refrigeran keluar *heat recovery* pada *water-cooled chiller* dengan kapasitas pendinginan spesifikasi 972 kW.

Beberapa batasan ditetapkan dalam penelitian ini meliputi:

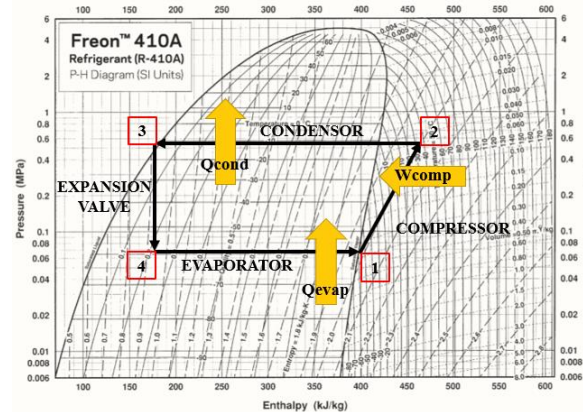
1. Unit *water-cooled chiller* yang diuji sesuai dengan yang terpasang setelah dilakukan *commissioning*.
2. Data operasional *chiller* berdasarkan data yang telah disediakan.

2. Dasar Teori

Refrigerasi adalah proses pendinginan artifisial sebuah ruangan, substansi atau sistem untuk menurunkan dan/atau menjaga temperatur tetap dibawah *ambient temperature* ketika panas yang dibuang memiliki temperatur yang lebih tinggi. Panas dibuang dari reservoir yang memiliki temperatur rendah dan ditransfer menuju reservoir yang memiliki temperatur tinggi. Refrigerasi memiliki beberapa jenis aplikasi seperti kulkas, *freezer* industri, kriogenika dan *Air Conditioner* (AC). Refrigerasi bekerja menggunakan media perpindahan panas refrigeran yang berupa substansi atau campuran dalam wujud fluida. Refrigerasi berdasarkan metode yang digunakan dapat diklasifikasikan menjadi refrigerasi termoelektrik, magnetik, non-siklik dan refrigerasi siklik [5]. Refrigerasi siklik menerapkan siklus termodinamika dengan cara memberikan *external work* untuk menyerap panas dari ruang bertemperatur rendah dan membuangnya menuju ruang bertemperatur lebih tinggi. Hal tersebut dapat terjadi karena pemanfaatan perubahan fase refrigeran dari fase liquid menjadi fase gas dan sebaliknya. Refrigerasi siklik dapat menggunakan siklus gas atau siklus uap. Siklus refrigerasi uap terdiri dari *sorption refrigeration* dan siklus refrigerasi kompresi uap.

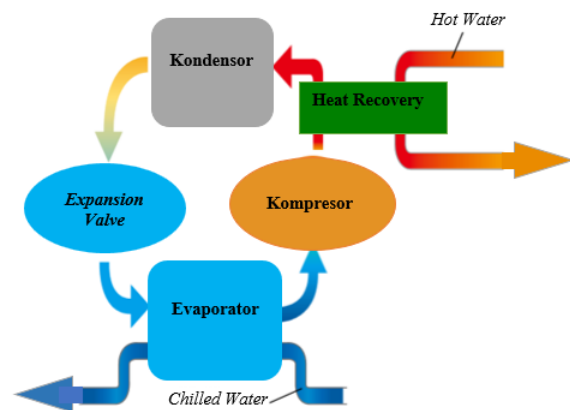
Siklus refrigerasi kompresi uap standar dapat dilihat pada Gambar 1 yang menggunakan diagram tekanan terhadap entalpi. Proses 1-2 merupakan proses kompresi isentropis, refrigeran pada keadaan 1 fase uap jenuh bertekanan rendah dikompresi (dengan memberikan input daya pada kompresor) untuk menghasilkan refrigeran panas lanjut bertekanan tinggi pada keadaan 2. Proses ini diperlukan untuk meningkatkan temperatur refrigeran lebih tinggi dari media penyerap panas (air atau udara) supaya proses pelepasan panas pada kondensor dapat berlangsung. Proses 2-3 adalah proses pelepasan panas dengan tekanan konstan yang menyebabkan refrigeran fase panas lanjut mengalami penurunan temperatur dan menjadi fase cair jenuh

bertekanan tinggi pada keadaan 3. Siklus refrigerasi dapat bekerja dengan baik apabila energi yang mampu dilepaskan kondensor minimal sejumlah panas yang diserap evaporator dan daya yang diberikan pada kompresor (W_{comp}). Proses 3-4 adalah proses *throttling* untuk menurunkan tekanan sehingga menghasilkan refrigeran dengan fase campuran bertekanan rendah pada keadaan 4. Proses ini diperlukan untuk memperoleh refrigeran dengan temperatur rendah supaya proses penyerapan panas pada evaporator dapat terjadi [6]. Proses 4-1 merupakan proses penyerapan panas pada tekanan konstan yang menghasilkan refrigeran keadaan 1 untuk dikompresikan kembali sehingga terbentuk siklus refrigerasi.



Gambar 1. Diagram P-h siklus refrigerasi kompresi uap standar (www.freon.com/en/products/refrigerants/410a)

Heat exchanger tipe *plate* dengan aliran *cross flow* terintegrasi pada sisi *discharge* kompresor digunakan untuk mentransfer panas dari uap refrigeran menuju air. Air panas kemudian dimanfaatkan sebagai tambahan suplai menuju kamar hotel. Skematik integrasi *heat recovery* pada *chiller* terlihat seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik unit *chiller* dengan *heat recovery*

Persamaan laju perpindahan panas secara umum dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$q = \dot{V} \rho c_p \Delta T \quad (W) \quad (1)$$

q = Laju perpindahan panas (W)
 \dot{V} = Debit air (m^3/s)
 ρ = Massa jenis air (kg/m^3)
 c_p = Kalor spesifik air pada tekanan konstan (J/Kg K)
 ΔT = Selisih temperatur air dalam positif absolut (K)

3. Metode Penelitian

Pengambilan data operasional *chiller* dilakukan selama 2 hari setiap pukul 06:00, 14:00 dan 22:00. Periode tersebut dipilih sebagai perwakilan data kinerja selama 1 hari.

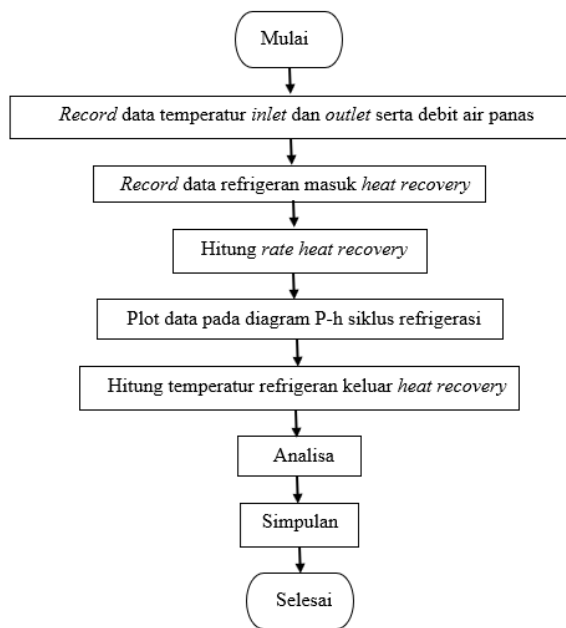
3.1 Alat

Penelitian ini mempergunakan peralatan sebagai berikut.

1. Sistem pendingin yang sudah terpasang.
2. Termokopel untuk mengukur temperatur air panas.
3. *Ultrasonic flow meter* untuk mengukur debit air panas.

3.2 Diagram alir penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



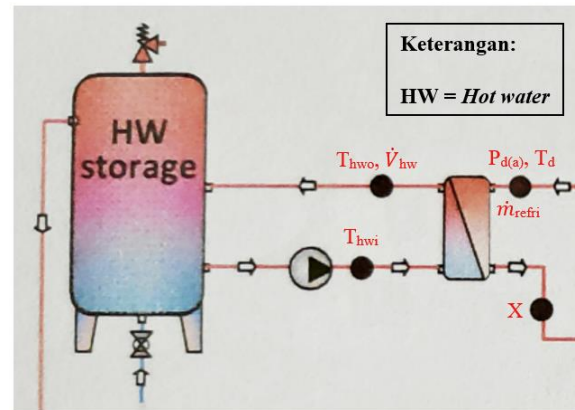
Gambar 3. Diagram alir penelitian

3.3 Instalasi unit *chiller* penelitian

Gambar 4 dan 5 berturut-turut menunjukkan gambar aktual dan skematik unit *chiller*.



Gambar 4. Foto aktual unit *chiller*



Gambar 5. Skematik unit *chiller*

Keterangan titik pengambilan data:

1. Temperatur *outlet* air panas (T_{hwo})
2. Temperatur *inlet* air panas (T_{hwi})
3. Debit air panas (\dot{V}_{hw})
4. *Compressor's absolute discharge pressure* ($P_{d(a)}$)
5. *Compressor's discharge temperature* (T_d)
6. *Refrigerant's mass flow rate* (\dot{m}_{refri})

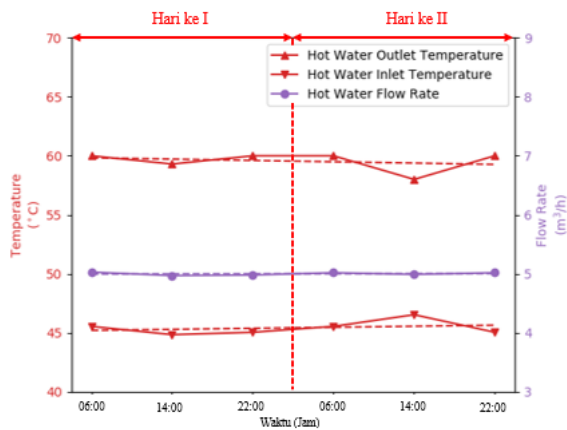
4. Hasil dan Pembahasan

Data pengoperasian yang sudah dicatat terlihat seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Data pengoperasian

NO	ITEM	UNIT	Hari ke I (Jam)			Hari ke II (Jam)			Rata-rata
			06:00	14:00	22:00	06:00	14:00	22:00	
1	T_{hwo}	$^{\circ}C$	60,0	59,3	60,0	60,0	58,0	60,0	59,6
2	T_{hwi}	$^{\circ}C$	45,6	44,9	45,1	45,6	46,5	45,1	45,4
3	\dot{V}_{hw}	m^3/h	5,12	5,07	4,98	5,10	4,99	5,05	5,00
4	$P_{d(a)}$	MPa	2,20	2,22	2,20	2,32	2,18	2,40	2,25
5	T_d	$^{\circ}C$	68	67	70	68	62	69	67,33
6	\dot{m}_{refri}	Kg/s	3,03	3,06	2,44	3,8	4,12	3,92	3,40

Data temperatur *outlet* air panas (T_{hwi}), temperatur *inlet* air panas (T_{hwo}) dan debit air panas (\dot{V}_{hw}) diplotkan seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik visualisasi data air panas

Heat recovery system menghasilkan air panas dengan temperatur rata-rata sebesar 59,6 °C. Semua nilai T_{hwo} yang dihasilkan tersebar mendekati temperatur 60 °C, kecuali T_{hwo} pada pukul 14:00 hari kedua yang memiliki temperatur sebesar 58 °C. Nilai T_{hwi} yang diterima pada periode tersebut lebih tinggi karena penggunaan air panas lebih rendah, tetapi T_{hwo} yang dihasilkan rendah karena panas dari sisi discharge kompresor juga bertemperatur lebih rendah.

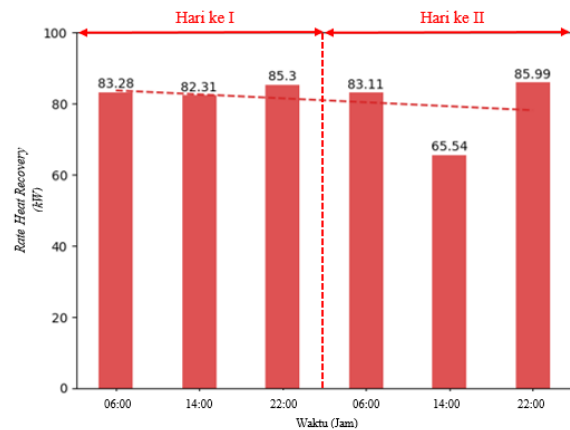
Temperatur inlet air panas diterima heat recovery dengan rata-rata sebesar 45,4 °C. Nilai T_{hwi} paling besar tercatat pada pukul 14:00 hari kedua sebesar 46,5 °C. Besar nilai T_{hwi} merupakan indikator untuk mengetahui tingkat penggunaan air panas, nilai T_{hwi} rendah terjadi karena penggunaan air panas lebih besar.

Hasil perhitungan menggunakan data air panas dapat dilihat pada Tabel 2. Massa jenis air panas (ρ_{hw}) dan kalor spesifik pada tekanan konstan ($c_{p,hw}$) diperoleh menggunakan tabel thermophysical properties of saturated water [7]. Perhitungan dilakukan dengan asumsi pengambilan data dalam keadaan steady-state.

Tabel 2. Data hasil perhitungan

NO	ITEM	UNIT	Hari ke I (Jam)			Hari ke II (Jam)			Rata-rata
			06:00	14:00	22:00	06:00	14:00	22:00	
1	T_{hwo}	K	333,00	332,30	333,00	333,00	331,00	333,00	332,6
2	T_{hwi}	K	318,60	317,85	318,05	318,55	319,54	318,05	318,40
3	ΔT	K	14,45	14,45	14,95	14,45	11,46	14,95	14,12
4	T rata-rata	K	325,78	325,08	325,53	325,78	325,27	325,53	325,49
5	ρ_{hw}	kg/m ³	986,31	986,65	986,43	986,31	986,55	986,43	986,45
6	$c_{p,hw}$	kJ/kgK	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
7	q_{hw}	kW	83,28	82,31	85,3	83,11	65,54	85,99	80,92

Visualisasi data rate of heat recovery (q_{hw}) dari Tabel 2 dapat dilihat seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil perhitungan rate of heat recovery

Rate of heat recovery yang telah dihitung memiliki rata-rata sebesar 80,92 kW. Nilai q_{hw} terkecil terdapat pada pukul 14:00 hari kedua sebesar 65,54 kW yang diakibatkan oleh kecilnya tingkat penggunaan air panas yang membuat T_{hwi} lebih tinggi. Nilai T_{hwi} yang tinggi mengakibatkan kemampuan penerimaan panas air tidak maksimal sehingga nilai ΔT menjadi kecil. Hal tersebut sesuai dengan Persamaan 2.5 yang digunakan untuk proses perhitungan, bahwa penurunan perubahan temperatur hot water pada kecepatan aliran yang sama akan memperkecil rate of heat recovery. Penggunaan air panas yang rendah juga mengakibatkan q_{hw} lebih rendah dari q_{hw} spesifikasi pabrik sebesar 145 kW.

Data pada pukul 06:00 hari pertama digunakan sebagai contoh pengerjaan untuk proses pengolahan grafik menggunakan diagram P-h untuk refrigeran R410A dengan tahapan berikut.

1. Mencari nilai entalpi spesifik refrigeran sisi discharge (h_d) kompresor pada diagram P-h untuk refrigeran R410A.

Input: $P_{d(a)} = 2,20$ MPa; $T_d = 68$ °C

Output: $h_d = 473$ kJ/kg

2. Menghitung nilai entalpi spesifik refrigeran pada outlet heat recovery (h_x) serta menentukan letak dan temperaturnya (T_x) pada diagram P-h untuk refrigeran R410A.

Input: $h_d = 473$ kJ/kg; $\dot{m}_{refri} = 3,03$ kg/s;

$q_{hw} = 83,28$ kW; $P_{d(a)} = 2,20$ MPa

Proses: $q_{hw} = \dot{m}_{refri} \cdot (h_d - h_x)$

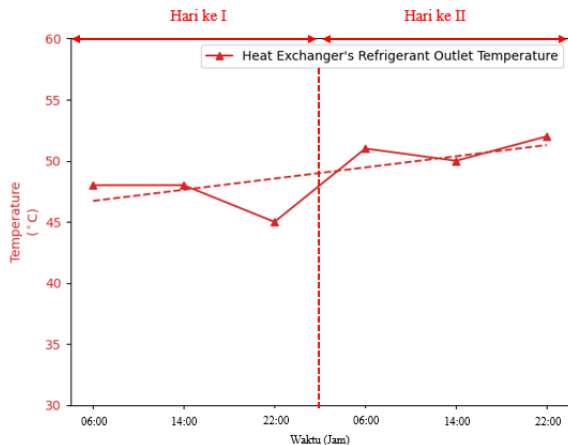
Output: $h_x = 446$ kJ/kg; $T_x = 48$ °C

Rate of heat recovery pada sisi refrigeran dan air dianggap sama karena memiliki heat loss sangat kecil yang dapat diabaikan [4].

Tabel 3. Data hasil pengolahan grafik

NO	ITEM	UNIT	Hari ke I (Jam)			Hari ke II (Jam)			Rata-rata
			06:00	14:00	22:00	06:00	14:00	22:00	
1	h_d	kJ/kg	473	470	474	470	463	468	470
2	h_x	kJ/kg	446	443	439	448	447	446	445
3	T_x	°C	48	48	45	51	50	52	49

Data temperatur refrigeran keluar heat recovery (T_x) pada Tabel 3 divisualisasikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Visualisasi data temperatur refrigeran keluar *heat recovery*

Data temperatur refrigeran yang keluar dari *heat recovery* (T_x) dengan nilai antara 45 °C dan 52 °C memiliki nilai rata-rata sebesar 49 °C. Nilai T_x pada hari kedua sedikit lebih besar karena memiliki laju alir massa refrigeran (\dot{m}_{refri}) yang lebih besar. Kecilnya tingkat penggunaan air panas pada saat pengambilan data mengakibatkan semua data T_x masih dalam keadaan uap panas lanjut yang masih memiliki potensi energi untuk dimanfaatkan kembali.

5. Simpulan

Simpulan yang dapat diambil dari pembahasan sebelumnya adalah sebagai berikut.

1. Integrasi *heat recovery system* pada *water-cooled chiller* dengan spesifikasi *rate of heat recovery* sebesar 145 kW memiliki nilai rata-rata operasional 80,92 kW atau 55,81% dari kemampuan operasional maksimal.
2. *Heat recovery* mentransfer panas dari refrigeran menuju air sehingga memiliki nilai rata-rata temperatur refrigeran yang keluar dari *heat recovery* sebesar 49 °C.

Daftar Pustaka

- [1] Arora C. P., 2000, *Refrigeration and Air Conditioning*, New Delhi, Tata McGraw-Hill.
- [2] Yu F. W., & Ho W. T., 2019, *Analysis of Chiller System Performance with Different Component Combinations*. Applied Thermal Engineering, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>, 2019.03.113.
- [3] Liu L.-r., Gu J.-j., & Liu J., 2015, *Analysis of Operational Energy Intensity for Central Air Conditioning System with Water-cooled Chiller by Decomposition Method*. Energy and Buildings, doi: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild>.

2015.01.064.

- [4] Gong G., Chen F., Su H., & Zhou J., 2012, *Thermodynamic Simulation of Condensation Heat Recovery Characteristics of a Single Stage Centrifugal Chiller in a Hotel*. Applied Energy, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.007.
- [5] Dossat R., 2001, *Principles of Refrigeration, 5th Edition*, London: Pearson.
- [6] ASHRAE, 2013, *ASHRAE Handbook Fundamentals*, SI Edition, Atlanta, ASHRAE.
- [7] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., & Dewitt D. P., 2011, *Introduction to Heat Transfer*, Sixth Edition, Jefferson, John Wiley & Sons, Inc.



Ida Bagus Oka Jeve menyelesaikan studi SMA di SMAN 99 Jakarta, pada tahun 2015, kemudian melanjutkan program sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana pada tahun 2015.