

**ANALISIS TEORITIS PENGARUH TEMPERATUR *SUBCOOLING* TERHADAP
KINERJA BATCH AIR BLAST FREEZER MENGGUNAKAN
SOFTWARE COOLSELECTOR®2**

Yohanes Viva Servianus¹, Matheus M. Dwinanto² dan Muhamad Jafri²

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang
Email: yohanes.servianus@gmail.com

² Dosen Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang
Email: matheus.dwinanto@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Makalah ini membahas studi teoritis tentang pengaruh temperatur *subcooling* di kondensor terhadap beberapa variabel kinerja di ABF yang beroperasi berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap menggunakan *software Coolselector®2*. Temperatur *subcooling* yang divariasikan adalah 0 – 10 Kelvin, dan parameter kinerja sistem yang dianalisis adalah laju aliran massa refrigeran, pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, koefisien kinerja, dan efisiensi *exergy*. Hasil analisis menunjukkan dengan bertambahnya temperatur *subcooling* maka laju aliran massa refrigeran semakin berkurang sehingga daya kompresor dan pelepasan kalor di kondensor juga berkurang. Dengan demikian maka koefisien kinerja dan efisiensi *exergy* ABF akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *subcooling*.

Kata kunci: Temperatur *subcooling*, ABF, koefisien kinerja, efisiensi *exergy*

Author : Yohanes Viva Servianus, Matheus M. Dwinanto dan Muhamad Jafri

1. PENDAHULUAN

Integrated Cold Storage (ICS) atau Unit Pengolahan Ikan (UPI) merupakan tempat untuk melakukan aktifitas pengolahan ikan yang dilengkapi dengan mesin pendingin dalam rangka meningkatkan nilai tambah produk hasil perikanan. ICS/UPI yang dibangun digunakan untuk menghasilkan produk pengolahan ikan beku maupun segar, sehingga harus dilengkapi dengan fasilitas atau sarana pengolahan, fasilitas pembekuan dan fasilitas penyimpanan beku (cold storage) bersuhu ruang -25°C atau lebih rendah sehingga mampu menjaga mutu dan kondisi produk beku. Ikan yang disimpan dalam gudang beku harus telah dibekukan dalam ruang pembekuan atau sarana pembekuan lainnya hingga suhu pusat produk mencapai -18°C. Metode pembekuan ikan yang umum dilakukan adalah menggunakan *Air Blast Freezer* (ABF) yaitu berupa ruangan dimana udara pada suhu beku (-35°C atau lebih rendah) disirkulasikan oleh *blower* untuk tujuan pembekuan ikan basah atau produk secara cepat (Petunjuk teknis pengelolaan bantuan pemerintah pembangunan gudang beku terintegrasi tahun 2017).

Penelitian tentang ABF telah dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya oleh Dempsey dan Bansal (2012) yang menjelaskan tentang ikhtisar dari berbagai jenis *blast freezer*, kelemahan desain, langkah-langkah penghematan energi, dan panduan praktik terbaik. Model simulasi juga disajikan untuk memprediksi kinerja dan untuk merancang sistem yang optimal di bawah berbagai kondisi operasi. Wang dan Zhou (2014) menyajikan pemodelan matematika untuk mensimulasikan perpindahan kalor selama pembekuan makanan. Model ini terdiri dari tiga langkah, yaitu pertama, bidang aliran di dalam ruang pembekuan dimodelkan menggunakan metode CFD, berdasarkan kondisi pembekuan, termasuk temperatur dan kecepatan di sekitar makanan, dihitung. Kedua, koefisien perpindahan kalor antara makanan dan udara dihitung dalam model CFD. Ketiga, model *finite-difference* digunakan untuk mensimulasikan perpindahan kalor di dalam produk makanan. Pengukuran dilakukan pada produk makanan yang berbeda di ruang beku untuk memverifikasi model matematika. Efek dari parameter proses pada pembekuan makanan juga dianalisis, dan mereka menyimpulkan bahwa temperatur udara memiliki pengaruh lebih besar pada pembekuan makanan daripada kecepatan udara.

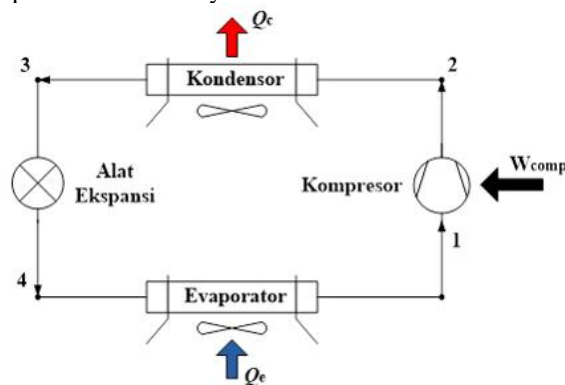
Salah satu parameter yang mempengaruhi kinerja ABF yang beroperasi berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap adalah temperatur *subcooling* di kondensor. *Subcooling* merupakan proses pendinginan cairan refrigeran di bawah temperatur kondensasi. *Subcooling* memberikan 100% cairan refrigeran untuk masuk ke katup ekspansi, dan mencegah gelembung uap yang menghalangi aliran refrigeran melalui katup ekspansi. Jika *subcooling* disebabkan oleh metode perpindahan kalor eksternal ke siklus refrigerasi, pengaruh refrigeran terhadap sistem akan meningkat karena cairan *subcooled* mempunyai entalpi yang lebih sedikit daripada cairan jenuh. *Subcooling* berhasil dicapai dengan mendinginkan pipa cairan di sistem

menggunakan temperatur sistem yang lebih tinggi. Pottker dan Hrnjak (2015) melakukan studi teoritis pengaruh temperatur subcooling kondensor terhadap kinerja sistem refrigerasi kompresi uap dengan menggunakan beberapa refrigeran ramah lingkungan. Hadya (2016) melakukan analisis kinerja sistem refrigerasi kompresi uap sebagai akibat pengaruh temperatur *subcooling* dan *superheating* dari tiga refrigeran berbeda yang diterapkan di pengkondisian udara, sedangkan Karakurt dkk. (2016) melakukan analisis *exergetic* dan ekonomi di sistem refrigerasi kompresi uap sebagai akibat pengaruh temperatur *subcooling* dan *superheating*. Sasongko (2017) menganalisis kinerja mesin refrigerasi kompresi uap pada beberapa variasi *superheating* dan *subcooling* sedangkan Suparmin, dkk. (2017) meneliti pengaruh derajat temperatur *subcooling* terhadap kinerja refrigerasi dengan menggunakan refrigeran CFC, HFC, dan hidrokarbon. Studi parameter pengaruh temperatur *subcooling* kondensor tipe *wire-on-tube* terhadap kinerja sistem refrigerasi kompresi uap telah dilakukan oleh Azzouri, dkk. (2017).

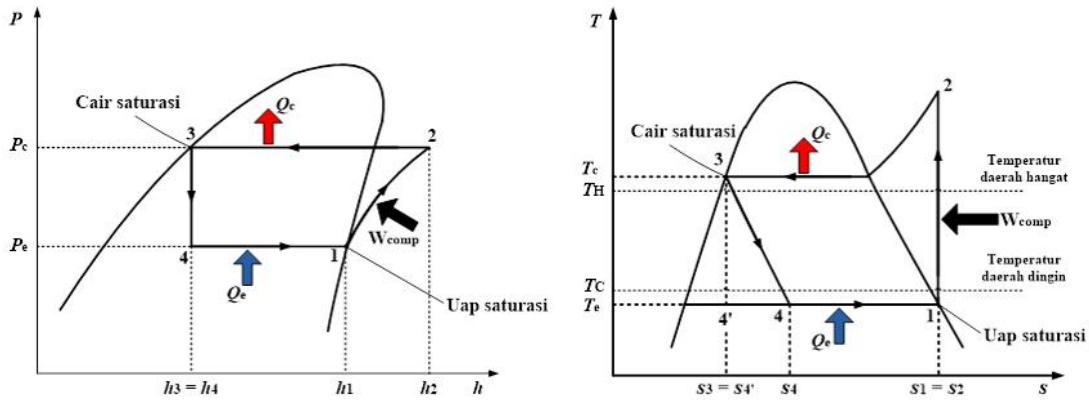


Gambar 1. *Batch air blast freezer* di mana ikan digantung di rak untuk dibekukan dalam ruangan dengan udara dingin.

Komponen-komponen utama sistem refrigerasi yang menggunakan siklus kompresi uap dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan proses-proses yang membentuk siklus kompresi uap standar dapat dilihat pada diagram tekanan-entalpi ($P-h$) dan temperatur-entropi ($T-s$) dalam Gambar 3. Proses-proses yang membentuk siklus kompresi uap standar yaitu (a) Proses 1-2: kompresi isentropik refrigeran dari kondisi 1 hingga mencapai tekanan kondensor pada kondisi 2; (b) Proses 2-3: perpindahan kalor dari refrigeran ketika mengalir pada tekanan konstan melalui kondensor. Refrigeran keluar berupa cairan pada kondisi 3. (c) Proses 3-4: proses trolol di alat ekspansi dari kondisi 3 ke campuran dua fase cair-uap pada kondisi 4. Proses ini terjadi pada entalpi konstan. (d) Proses 4-1: perpindahan kalor ke refrigeran ketika mengalir pada tekanan konstan melalui evaporator untuk menyelesaikan siklus tersebut.



Gambar 2. Komponen-komponen utama siklus refrigerasi kompresi uap



Gambar 3. Diagram $P-h$ dan $T-s$ siklus kompresi uap

2. METODE PENELITIAN

Analisis pengaruh temperatur *subcooling* dilakukan menggunakan *software Coolselector@2*. Refrigeran yang digunakan ABF adalah R404a. Beberapa parameter ABF yang dianalisis dan asumsi yang digunakan disajikan dalam Tabel 1 dan temperatur *subcooling* (T_{SC}) yang divariasikan yaitu $0 - 10$ Kelvin = $0^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$.

Tabel 1. Parameter analisis dan asumsi

Parameter	Nilai
Kapasitas refrigerasi, Q_E	9,5 kW
Temperatur ruangan yang dibekukan, T_E	248 K (-25°C)
Temperatur kondensasi, T_C	313 K (40°C)
Temperatur <i>superheating</i> , T_{SH}	10 K (10°C)

Parameter penting yang dianalisis adalah laju aliran massa refrigeran, pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, koefisien kinerja system, dan efisiensi *exergy* (efisiensi hukum kedua termodinamika). Pada saat refrigeran melewati evaporator, perpindahan kalor dari ruang yang didinginkan menghasilkan penguapan refrigeran, maka laju perpindahan kalor di evaporator adalah:

$$Q_E = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (1)$$

di mana \dot{m} adalah laju aliran massa refrigeran. Laju perpindahan kalor Q_L dapat disebut sebagai kapasitas refrigerasi. Refrigeran yang meninggalkan evaporator dikompresikan ke tekanan dan temperatur yang relatif tinggi oleh kompresor. Dengan asumsi tidak ada perpindahan kalor ke atau dari kompresor, maka daya kompresor adalah:

$$W_C = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

Selanjutnya, refrigeran melalui kondensor, di mana refrigeran terkondensasi dan terjadi perpindahan kalor dari refrigeran ke lingkungan sekitarnya yang lebih dingin. Laju perpindahan kalor dari refrigeran adalah:

$$Q_C = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (3)$$

Akhirnya, refrigeran pada kondisi 3 memasuki katup ekspansi dan berekspansi hingga mencapai tekanan evaporator. Proses ini biasanya dimodelkan sebagai proses trotel (pencekikan) dengan

$$h_4 = h_3 \quad (4)$$

Di dalam sistem kompresi uap, masukan daya netto (daya bersih) sebanding dengan daya kompresor, karena alat ekspansi tidak melibatkan masukan atau keluaran daya. Dengan menggunakan persamaan-persamaan yang diperkenalkan di atas, maka koefisien prestasi (COP) untuk sistem refrigerasi kompresi uap dari Gambar 3 adalah:

$$COP = \frac{Q_E}{W_C} \quad (5)$$

Exergy akibat kalor yang dipindahkan dari ruangan ABF (ruangan bertemperatur rendah) adalah;

$$Ex_{Q_L} = -Q_E \left(1 - \frac{T_0}{T_E} \right) \quad (6)$$

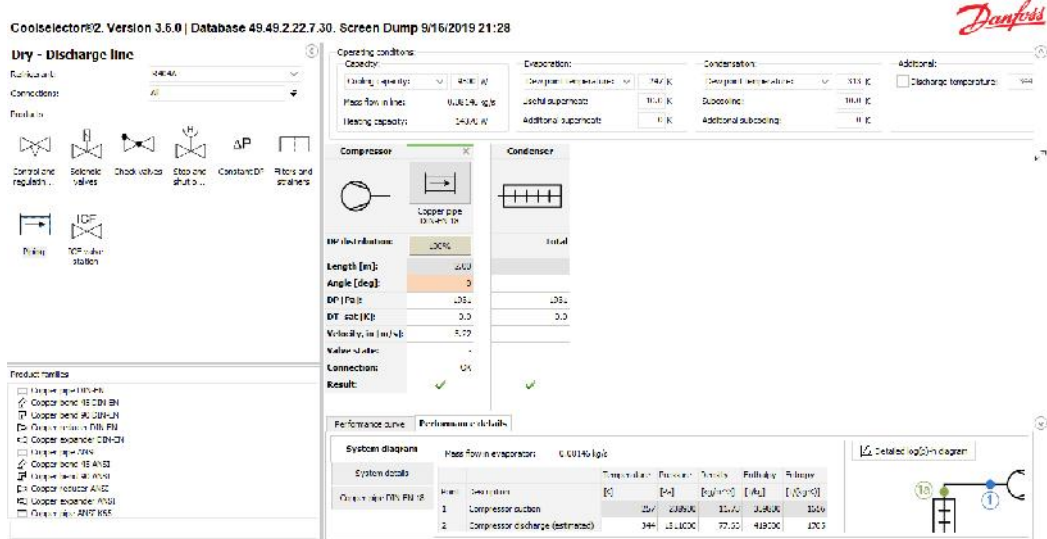
Maka efisiensi *exergy* (efisiensi hukum kedua termodinamika) adalah:

$$y_{II} = \frac{Ex_{Q_L}}{W_C} \quad (7)$$

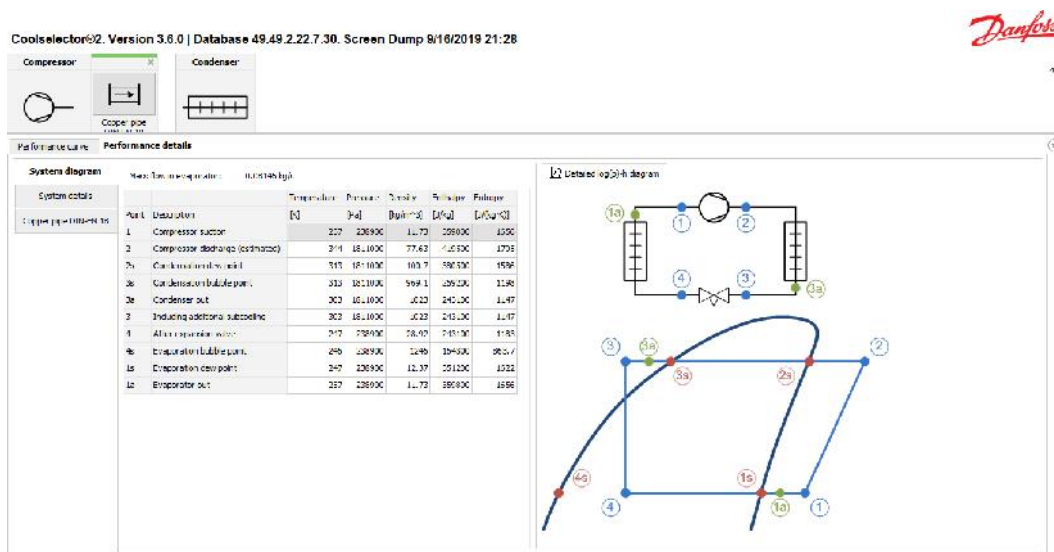
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dimulai dengan menghitung siklus pada *subcooling* dari desain ABF menggunakan *software Coolselector*®2. Parameter-parameter yang dibutuhkan dan contoh isian serta hasil perhitungan untuk spesifikasi siklus dapat dilihat pada gambar-gambar di bawah ini.

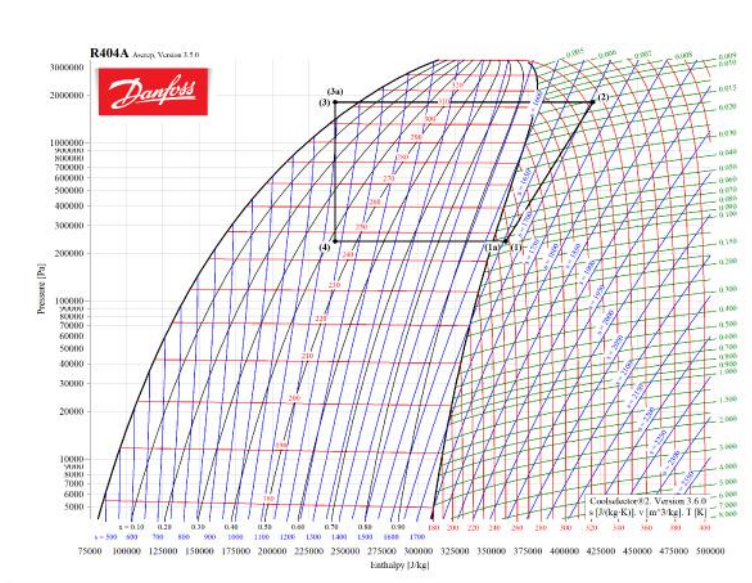
Gambar 4 merupakan contoh isian dan hasil yang diperoleh untuk spesifikasi siklus dengan $T_{SC} = 10$ K. Beberapa parameter sesuai nilai-nilai pada Tabel 1 dan hasil perhitungannya disajikan pada Gambar 5 untuk nilai-nilai parameter pada setiap tingkat keadaan dalam siklus refrigerasi kompresi uap. Gambar 6 menyajikan diagram tekanan – entalpi (P – h) untuk temperatur *subcooling* = 10 K dan temperatur *superheating* = 10 K. Hasil perhitungan lengkap untuk berbagai variasi temperatur *subcooling* disajikan dalam Tabel 2.



Gambar 4. Contoh isian dan hasil perhitungan spesifikasi siklus untuk $T_{SC} = 10$ K



Gambar 5. Nilai-nilai pada setiap *state points* dari siklus refrigerasi

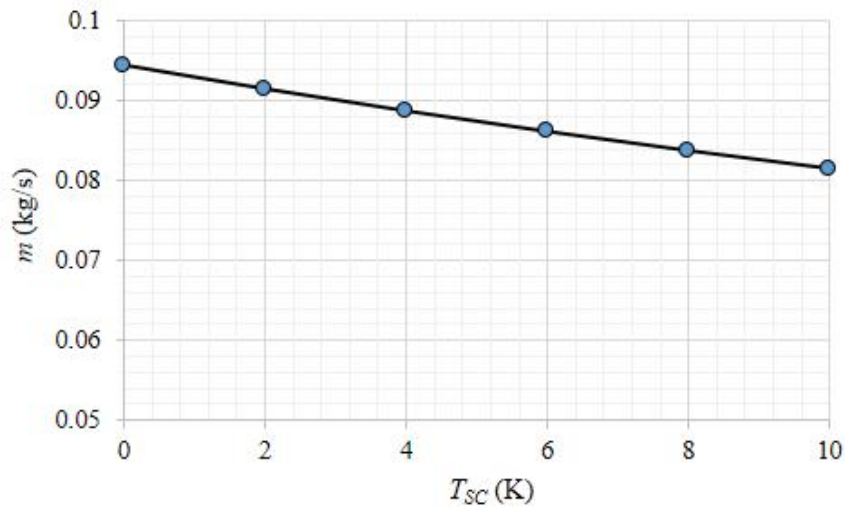


Gambar 6. Diagram tekanan-entalpi untuk $T_{sc} = 10 \text{ K}$ dan $T_{sh} = 10 \text{ K}$

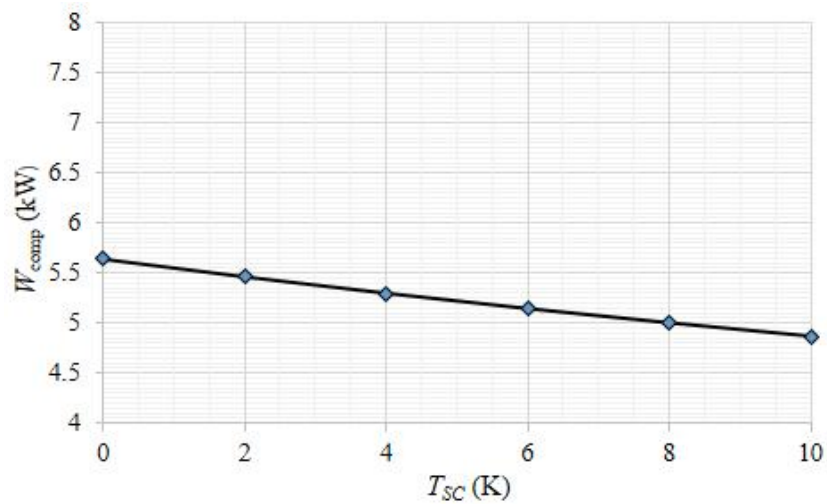
Table 2. Hasil perhitungan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap kinerja sistem refrigerasi

No	T_{sc} (kW)	Q_{evap} (kW)	Q_{cond} (kW)	W_{comp} (kW)	COP	\dot{m}	(kg/s)
1	0	9,5	15,1387	5,6380	1,6849	0,3751	0,0944
2	2	9,5	14,6610	5,4601	1,7399	0,3874	0,0914
3	4	9,5	14,2170	5,2947	1,8098	0,3995	0,0886
4	6	9,5	13,8035	5,1407	1,8482	0,4115	0,0861
5	8	9,5	13,4187	4,9974	1,9009	0,4232	0,0837
6	10	9,5	13,0580	4,8631	1,9535	0,4349	0,0814

Gambar 7 menunjukkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap laju aliran massa refrigeran dan dari gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* maka laju aliran massa uap refrigeran akan semakin berkurang. Hal ini akan berdampak secara langsung terhadap daya kompresi yang dibutuhkan sehingga proses ini dapat berlangsung, di mana daya kompresor pun akan semakin berkurang. Hubungan ini juga terlihat pada Gambar 8, di mana dengan meningkatnya temperatur *subcooling* di kondensor maka daya kompresor semakin berkurang. Dengan demikian maka temperatur *subcooling* sangat berpengaruh terhadap laju aliran massa uap refrigeran di kompresor dan daya kompresor yang dibutuhkan.

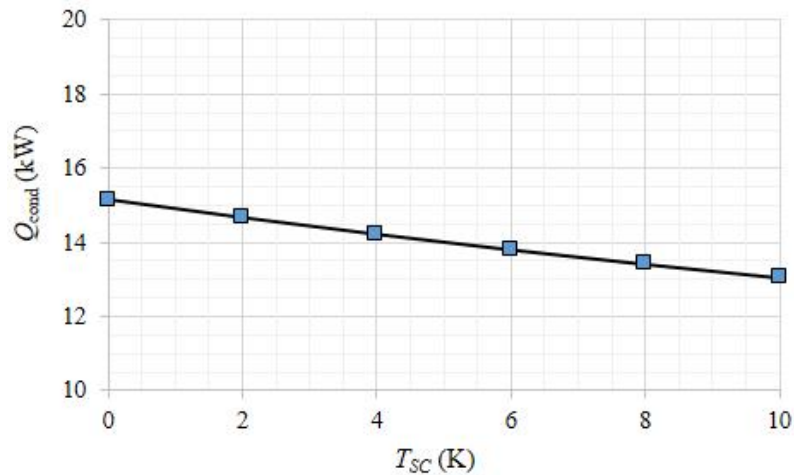


Gambar 7. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap laju aliran massa



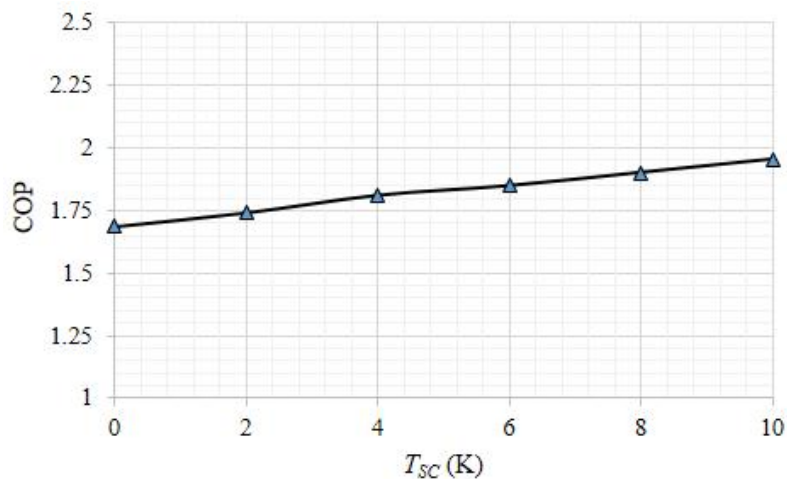
Gambar 8. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap daya kompresor

Gambar 9 menunjukkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap pelepasan kalor di kondensor, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* di kondensor maka pelepasan kalor di kondensor akan semakin berkurang. Hal ini lebih diakibatkan oleh daya kompresor yang berkurang saat temperatur *subcooling* meningkat, dan karena terdapat hubungan linier antara daya kompresor dan pelepasan kalor di kondensor maka untuk kasus di mana penyerapan kalor di evaporator dipertahankan konstan maka pelepasan kalor di kondensor lebih dipengaruhi oleh daya kompresor. Dengan semakin berkurangnya daya kompresor maka pelepasan kalor di kondensor juga semakin berkurang.



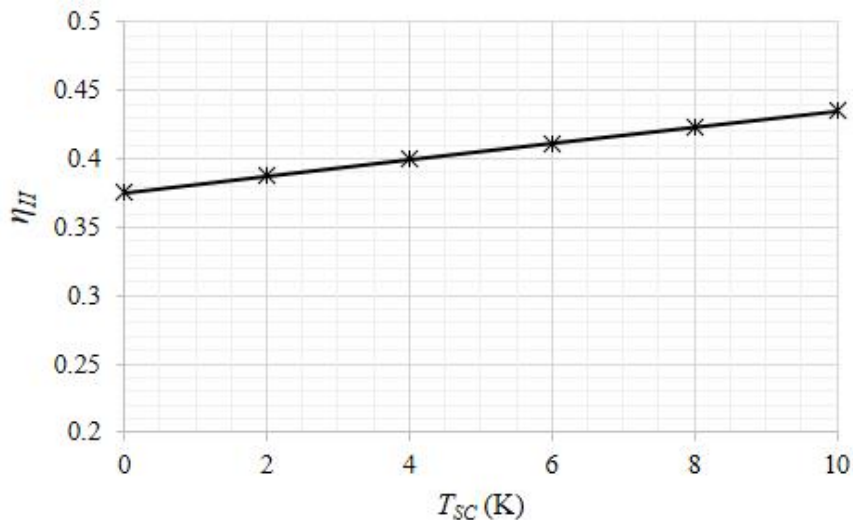
Gambar 9. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap pelepasan kalor di kondensor

Gambar 10 menunjukkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap koefisien kinerja sistem, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* di kondensor maka koefisien kinerja sistem (COP) akan semakin meningkat. Meningkatnya koefisien kinerja lebih diakibatkan oleh berkurangnya daya kompresor dan ini hanya berlaku untuk kasus di mana penyerapan kalor di evaporator dipertahankan konstan. Studi teoritis ini telah dapat menggambarkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap kinerja sistem di mana untuk sistem yang telah dalam keadaan stedi, kinerjanya dapat ditingkatkan dengan meningkatkan temperatur *subcooling* di kondensor.



Gambar 10. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap koefisien kinerja

Gambar 11 menunjukkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap efisiensi exergy (efisiensi hukum kedua termodinamika) sistem, di mana terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* di kondensor maka efisiensi *exergy* sistem akan semakin meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa meningkatnya koefisien kinerja dan efisiensi *exergy* lebih diakibatkan oleh berkurangnya daya kompresor dan ini hanya berlaku untuk kasus di mana penyerapan kalor di evaporator dipertahankan konstan. Studi teoritis ini telah dapat menggambarkan pengaruh temperatur *subcooling* terhadap kinerja sistem di mana untuk sistem yang telah dalam keadaan stedi, kinerjanya dapat ditingkatkan dengan meningkatkan temperatur *subcooling* di kondensor.



Gambar 10. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap efisiensi *exergy*

4. KESIMPULAN

Studi teoritis pengaruh temperatur *subcooling* di kondensor ABF yang beroperasi berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap dengan refrigeran R404A telah dilakukan untuk memprediksi kinerja sistem. Hasil analisis untuk kasus di mana penyerapan kalor di evaporator dipertahankan konstan menunjukkan bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* kondensor maka laju aliran massa refrigeran akan semakin menurun sehingga berdampak langsung pada berkurangnya daya kompresor dan pelepasan kalor di kondensor, sehingga akan meningkatkan koefisien kinerja dan efisiensi *exergy* sistem.

DAFTAR PUSTAKA

Azzouzi, D., Kelkoul, M., and Amaryoucef, F. (2017), "Parametric study of the wire-on-tube condenser subcooling effect on the performance of vapor compression refrigeration system", *Applied Thermal Engineering*, Volume 122, pp. 528-534.

Dempsey, P., and Bansal, P., (2012), "The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 41, pp. 71-83.

Hadya, B. (2016), "Analysis of vapour compression refrigeration system with subcooling and superheating with three different refrigerants for air-conditioning application", *International Journal of Engineering Sciences and Research Technology*, pp. 70-77.

Karakurt, A. S., Gunes, U., and Ust, Y. (2016), "Exergetic and economic analysis of subcooling and superheating effect on vapor compression refrigeration system, *Proceedings of the ASME 2016 Power Conference*, June 26-30, 59492, pp. 1-6.

Petunjuk teknis pengelolaan bantuan pemerintah pembangunan gudang beku terintegrasi tahun 2017, Direktur Jenderal Penguatan Daya Saing Produk Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, hal. 5.

Pottker, G., and Hrnjak, P. (2015), "Effect of the condenser subcooling on the performance of vapor compression system", *International Journal of Refrigeration*, Volume 50, pp. 156-164.

Sasongko, M. N. (2017), "Unjuk kerja mesin pendingin kompresi uap pada beberapa variasi superheating dan subcooling", *SAINTEK II*, hal. E26-123 – E26-127.

Siagin, S. (2017), "Pengaruh perhitungan beban pendingin pada cold storage untuk penyimpanan ikan tuna pada PT. X", *BINA TEKNIKA*, Volume 13, Nomor 1, hal. 139-149.

Suparmin, P., Antono, V., and Nurhasanah, R., (2017). "Effect degree of temperature subcooling in the performance of refrigeration with CFC, HFC, and hydrocarbons refrigerant", *MATEC Web of Conferences* 101, 03002 pp. 1-6.

Wang, G., and Zou, P., (2014), "Mathematical Modeling of Food Freezing in Air-Blast Freezer, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 2, No. 4, pp. 278-281.