

**PENGARUH TEMPERATUR SUBCOOLING KONDENSOR TERHADAP KINERJA
COLD STORAGE MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK COOLPACK 1.50.**

Philipus E. F. Fongo¹, Matheus M. Dwinanto² dan Arifin Sanusi²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang
Email: edward.fongo97@gmail.com

²Staf Pengajar 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 *cold storage* yang beroperasi berdasarkan siklus refrigerasi kompresi uap menggunakan perangkat lunak *CoolPack* versi 1.50. Temperatur *subcooling* rata-rata yang divariasikan adalah 5 – 10 Kelvin, dan parameter kinerja sistem yang dianalisis adalah laju aliran massa refrigeran, pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, dan koefisien kinerja (COP). 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 *cold storage* akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur *subcooling*.

Kata kunci; Temperatur *subcooling*, kondensor, koefisien kinerja, *cold storage*

Author : Philipus E. F. Fongo, Matheus M. Dwinanto dan Arifin Sanusi

1. PENDAHULUAN

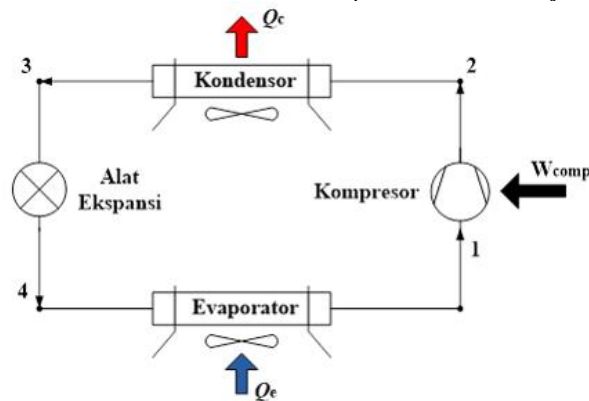
Mesin pendingin saat ini semakin banyak digunakan seiring dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan konsumen untuk mengawetkan makanan dan membekukan ikan. Umumnya penggunaan mesin pendingin digunakan dalam industri perikanan, baik di darat maupun di laut karena memiliki peran yang sangat penting dalam mempertahankan mutu hasil tangkapan dan menjaga kualitas kesegaran ikan. Ikan adalah bahan biologis yang apabila tidak memperoleh perlakuan tertentu setelah ditangkap dan diangkat dari air, maka akan mengalami penurunan kualitas ke arah membusuk. Oleh karena itu perlu diadakan suatu teknik yang dapat dilakukan untuk mempertahankan kesegaran ikan agar supaya tetap awet dan layak dikonsumsi. Untuk cara yang lebih efisien, praktis dan rasa ikan tetap seperti semula maka digunakan *cold storage* untuk mempertahankan kualitas ikan, sehingga bakteri yang menyebabkan penurunan mutu ikan dapat terhambat perkembangannya dan ikan menjadi tidak cepat busuk (Siagian, 2017).

Salah satu parameter yang mempengaruhi kinerja *cold storage* 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 alat 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).

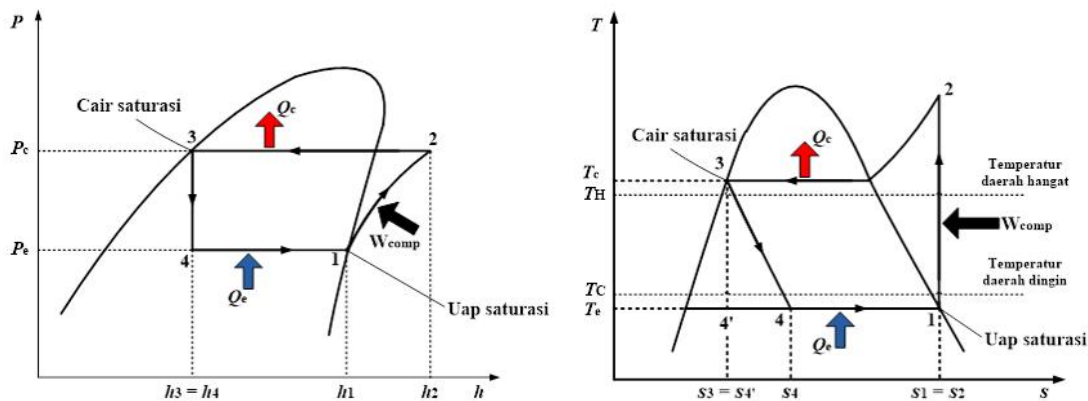
Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan siklus yang paling banyak digunakan oleh sistem refrigerasi dan pengkondisian udara. Pada siklus ini uap refrigeran (freon) dikompresi di dalam kompresor, dan kemudian diembunkan menjadi cairan di dalam kondensor, lalu tekanan cairan refrigeran diturunkan di dalam alat ekspansi

(pipa kapiler atau katup ekspansi) agar refrigeran dalam bentuk cair tersebut selanjutnya dapat menguap di dalam evaporator.

Komponen-komponen utama sistem refrigerasi yang menggunakan siklus kompresi uap dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan proses-proses yang membentuk siklus kompresi uap standar dapat dilihat pada diagram tekanan-entalpi ($P-h$) dan temperatur-entropi ($T-s$) dalam Gambar 2. 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 trotoel 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 1. Komponen-komponen utama siklus refrigerasi kompresi uap



Gambar 2. Diagram $P-h$ dan $T-s$ siklus kompresi uap

2. METODE PENELITIAN

Analisis pengaruh temperatur *subcooling* dilakukan menggunakan *software CoolPack* versi 1.50. Refrigeran yang digunakan sistem refrigerasi adalah R404a. Beberapa parameter *cold storage* yang dianalisis dan asumsi yang digunakan disajikan dalam Tabel 1 dan temperatur *subcooling* rata-rata (ΔT_{sc}) yang divariasikan yaitu 5 – 10 Kelvin.

Tabel 1. Parameter analisis dan asumsi

Parameter	Nilai
Kapasitas refrigerasi, Q_E	6,3 kW
Temperatur evaporasi, T_E	-35°C
Temperatur kondensasi, T_C	35°C
Efisiensi isentropik kompresor, η_{is}	0,8 (atau 80%)

Parameter penting yang dianalisis adalah laju aliran massa refrigeran, pelepasan kalor di kondensor, daya kompresor, dan koefisien kinerja sistem. 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:

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

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 3.1 adalah:

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

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

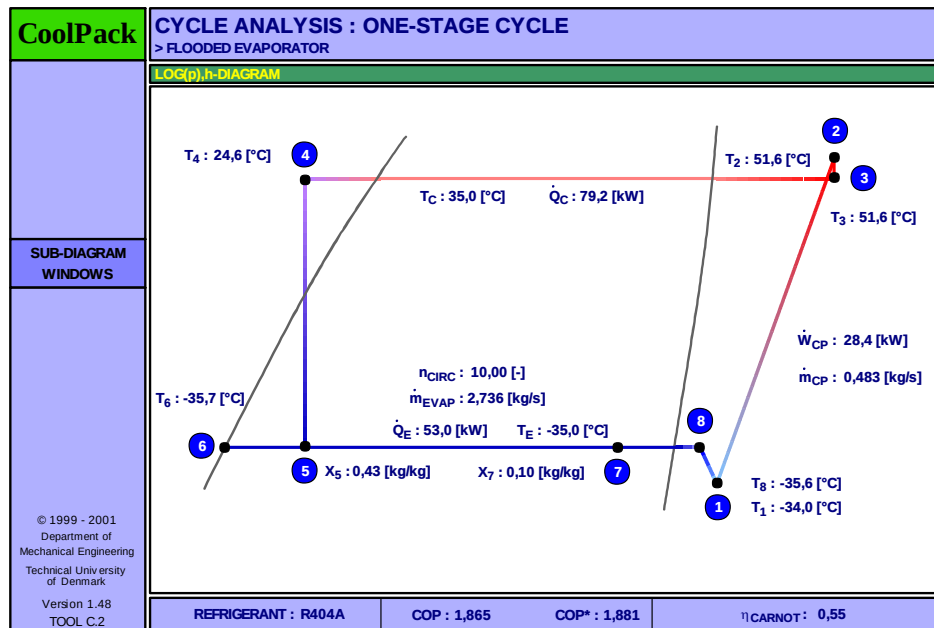
Penelitian ini dimulai dengan menghitung siklus pada *subcooling* dari desain *cold storage* menggunakan perangkat lunak *CoolPack 1.50*. Parameter-parameter yang dibutuhkan dan contoh isian serta hasil perhitungan untuk spesifikasi siklus dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

CYCLE SPECIFICATION						
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES	QUALITY OUT OF EVAPORATOR	REFRIGERANT		
T_E [°C] :	-35,0	Δp_{SL} [k] :	0,5	x_{OUT} [kg/kg]	0,10	R404A
T_c [°C] :	35,0	Δp_{DL} [k] :	0,5			
ΔT_{sc} [K] :		10,0				
CYCLE CAPACITY						
Cooling capacity $\dot{Q}_E$ [kW]	53	$\dot{Q}_E$: 53,0 [kW]	$\dot{Q}_C$: 79,2 [kW]	$\dot{m}$: 0,483 [kg/s]	$\dot{V}_S$: 205,5 [m³/h]	
COMPRESSOR PERFORMANCE						
Isentropic efficiency η_{IS} [-]	0,8	η_{IS} : 0,800 [-]	$\dot{W}_{CP}$: 28,4 [kW]			
COMPRESSOR HEAT LOSS						
Heat loss factor f_Q [%]	10	f_Q : 10,0 [%]	T_2 : 51,6 [°C]	$\dot{Q}_{Loss}$: 2,84 [kW]		
SUCTION LINE						
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]	1,0	$\dot{Q}_{SL}$: 439 [W]	T_8 : -34,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]		
			COP : 1,865	COP* : 1,881		

Gambar 3. Contoh isian dan hasil perhitungan spesifikasi siklus untuk $\Delta T_{SC} = 10$ K

Gambar 3 merupakan contoh isian dan hasil yang diperoleh untuk spesifikasi siklus dengan $\Delta T_{SC} = 10$ K. Beberapa parameter tidak mengalami perubahan dan sesuai dengan format asli perangkat lunak seperti kerugian tekanan (*pressure losses*), kualitas uap keluar evaporator (*quality out of evaporator*), rugi kalor kompresor (*compressor heat loss*), dan sisi hisap (*suction line*).

Gambar 4 merupakan hasil analisis siklus satu tingkat (*one-stage*) dengan evaporator yang digunakan adalah jenis *flooded* evaporator. Gambar ini juga menunjukkan temperatur pada masing-masing tingkat keadaan, di mana terlihat bahwa pada temperatur kondensasi $T_C = 35^\circ\text{C}$ dan $\Delta T_{SC} = 10$ K maka temperatur refrigeran dalam keadaan *subcool* saat keluar kondensor adalah $24,6^\circ\text{C}$ ($T_4 = 24,6^\circ\text{C}$). Kualitas uap refrigeran setelah melewati alat ekspansi adalah 0,43 ($x_5 = 0,43$) sedangkan sebelum meninggalkan evaporator adalah 0,1 ($x_7 = 0,1$). Untuk temperatur evaporasi $T_E = -35^\circ\text{C}$ laju aliran massa refrigeran dalam keadaan dua fase selama proses penyerapan kalor di evaporator adalah 2,736 kg/s ($\dot{m}_E = 2,736$ kg/s) dan kalor yang diserap selama proses ini berlangsung adalah 53,0 kW ($\dot{Q}_E = 53,0$ kW). Temperatur refrigeran saat meninggalkan evaporator adalah $-35,6^\circ\text{C}$ ($T_8 = -35,6^\circ\text{C}$) sedangkan temperatur refrigeran sebelum memasuki kompresor adalah $-34,0^\circ\text{C}$ ($T_1 = -34,0^\circ\text{C}$), dan laju aliran refrigeran dalam keadaan fase uap selama proses kompresi adalah 0,483 kg/s ($\dot{m}_{CP} = 0,483$ kg/s). Selama proses kompresi besar daya yang dibutuhkan agar proses ini dapat berlangsung adalah 28,4 kW ($\dot{W}_{CP} = 28,4$ kW) dan temperatur refrigeran saat meninggalkan kompresor adalah $51,6^\circ\text{C}$ ($T_3 = 51,6^\circ\text{C}$). Untuk temperatur kondensasi $T_C = 35^\circ\text{C}$ besar kalor yang dilepaskan selama proses ini berlangsung di kondensor adalah 79,2 kW ($\dot{Q}_C = 79,2$ kW).



Gambar 4. Diagram tingkat keadaan siklus satu tingkat untuk $\Delta T_{SC} = 10$ K

STATE POINTS					Additional information	
STATE POINT	TEMPERATURE [°C]	PRESSURE [kPa]	ENTHALPY [kJ/kg]	DENSITY [kg/m ³]	Pressure ratio (p_2 / p_1) : 10,047	
1	-34,0	162,0	199,6	8,5	$T_{2,IS} : 46,7$ [°C]	
2	51,6	1628,1	252,6	76,6	$T_{2,W} : 56,7$ [°C]	
3	51,6	1608,0	252,9	75,3	$T_{2,IS}$ is the temperature of the discharge gas assuming reversible and adiabatic compression	
4	24,6	1608,0	88,9	1045,2	$T_{2,W}$ is the temperature of the discharge gas assuming real and adiabatic compression	
5	-35,4	165,6	88,9	-----		
6	-35,7	165,6	5,4	1269,6		
7	-35,6	165,6	24,8	-----		
8	-35,6	165,6	198,7	8,7		

		COP : 1,865	COP* : 1,881
--	--	-------------	--------------

Gambar 5. Properti termodinamika siklus untuk $\Delta T_{SC} = 10$ K

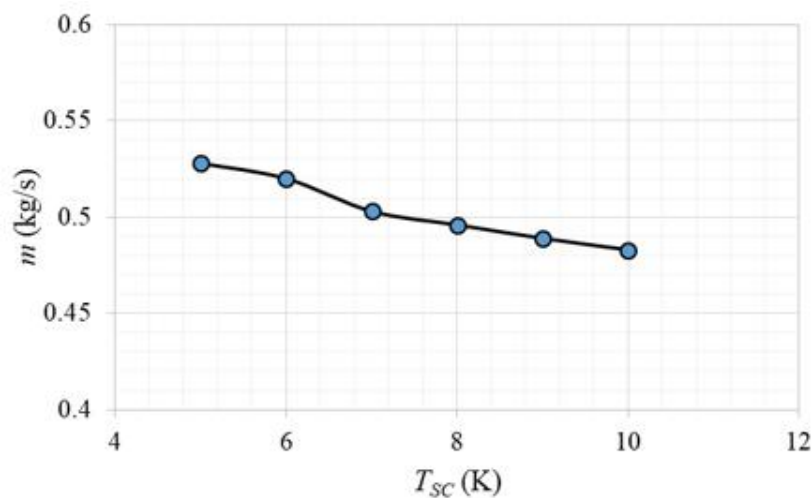
Gambar 5 menunjukkan nilai tekanan, entalpi, dan densitas refrigeran pada setiap tingkat keadaan yang disajikan dalam Gambar 4. Tambahan informasi diberikan yaitu rasio tekanan kompresi uap refrigeran pada sisi hisap dan sisi buang adalah 10,047 (rasio kompresi $p_2/p_1 = 10,047$) dan koefisien kinerja sistem selama proses ini berlangsung adalah 1,865 ($COP = 1,865$). Hasil perhitungan lengkap untuk berbagai variasi temperatur *subcooling* disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis temperatur *subcooling* (T_{sc}) terhadap kinerja *cold storage*

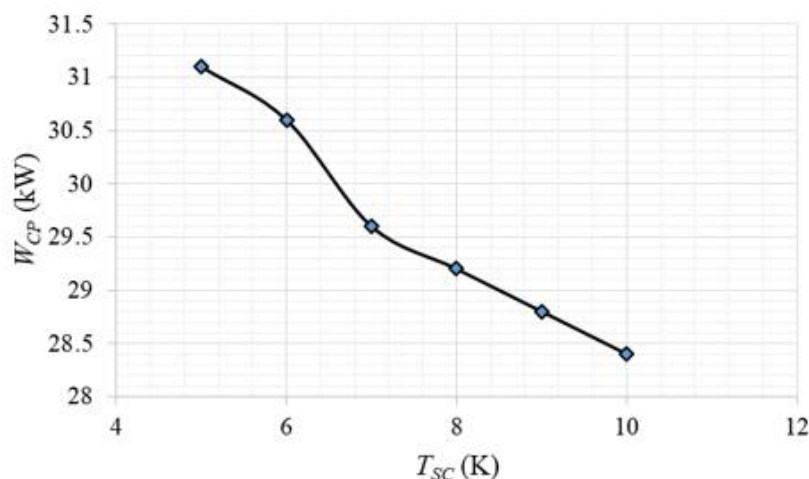
No	T_{sc} (K)	COP	$\dot{m}$ (kg/s)	W_{cp} (kW)	Q_c (kW)
1	5	1,737	0,528	31,1	82,6

2	6	1,763	0,520	30,6	82,2
3	7	1,789	0,503	29,6	80,3
4	8	1,814	0,496	29,2	79,9
5	9	1,840	0,489	28,8	79,5
6	10	1,856	0,483	28,4	79,2

Gambar 6 menunjukkan pengaruh temperatur *subcooling* di kondensor terhadap laju aliran massa uap refrigeran di kompresor dan dari gambar ini terlihat bahwa dengan meningkatnya temperatur *subcooling* maka laju aliran massa uap refrigeran di di kompresor 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 7, 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.

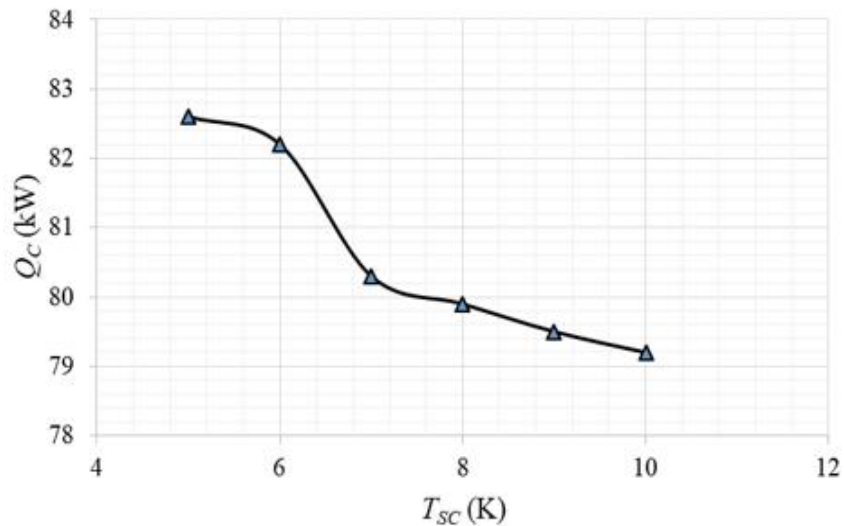


Gambar 6. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap laju aliran massa refrigeran

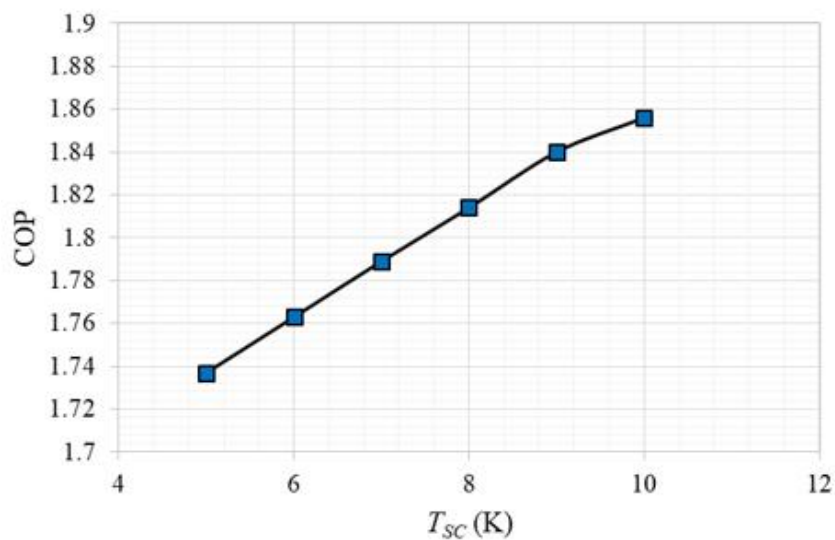


Gambar 7. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap daya kompresor

Gambar 8 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 8. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap pelepasan kalor di kondensor



Gambar 9. Pengaruh temperatur *subcooling* terhadap koefisien kinerja

Gambar 9 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.

4. KESIMPULAN

Studi teoritis pengaruh temperatur *subcooling* di kondensor sebuah *cold storage* 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 kinerja sistem.

DAFTAR PUSTAKA

Azzouzi, D., Kelkouli, 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.

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.

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.

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.