

# Kajian Numerik Penerapan *Heat Pump* sebagai Sarana Penyimpanan Energi Skala Jala-Jala dari Pembangkit Energi Terbarukan

Refi Afrilia<sup>1</sup>, Eko Julianto<sup>2</sup>, Burniadi Moballa<sup>3</sup>

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia<sup>2 3 4</sup>

Email: [refiafrilia@student.ppns.ac.id](mailto:refiafrilia@student.ppns.ac.id)<sup>1</sup>; [eko\\_julianto@ppns.ac.id](mailto:eko_julianto@ppns.ac.id)<sup>2</sup>; [bmoballa@ppns.ac.id](mailto:bmoballa@ppns.ac.id)<sup>3</sup>;

**Abstract** - Utilization of New Renewable Energy (EBT) today must be carried out because of its abundant potential. One of the uses is to use energy storage with a heat pump system sourced from EBT. To support this, it is necessary to use a heat exchanger in an energy storage system which is expected to make the heating or cooling system faster with the right refrigerant. Therefore, a study was carried out using the application of a heat pump system with the addition of a heat exchanger as a place to store energy originating from Renewable Energy. The method used is process simulation using DWSIM. The refrigerant used is R-600a, R-407C, R-410a, R-22, and ammonia. Ammonia was chosen because it produces a Coefficient of Performance of 3.012 with a condenser outlet temperature of 102.854°C. The storage medium used is silica sand.

**Keyword:** heat storage, heat pump new renewable energy, process simulation.

## 1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia kian hari kian meningkat dimana pertumbuhan ekonomi yang ditunjukkan juga berbanding lurus. Hal ini dibuktikan dengan kian bertambahnya keluaran dan ragam aktivitas ekonomi yang dilakukan masyarakat, sehingga kebutuhan energi tidak bisa dihindari

Meningkatnya kebutuhan masyarakat akan energi dapat menyebabkan adanya ketidakseimbangan antara permintaan dan penawaran energi. Berkurangnya produksi energi fosil terutama minyak bumi dapat menjadikan persediaannya menipis hingga muncul krisis energi. Maka dari itu tercukupinya kebutuhan energi adalah kunci untuk terhindar dari krisis energi. Oleh karenanya, dorongan untuk memaksimalkan sumber energi baru terbarukan (EBT) sebagai bagian dari menjaga ketahanan energi dan menghindari krisis energi perlu dilakukan.

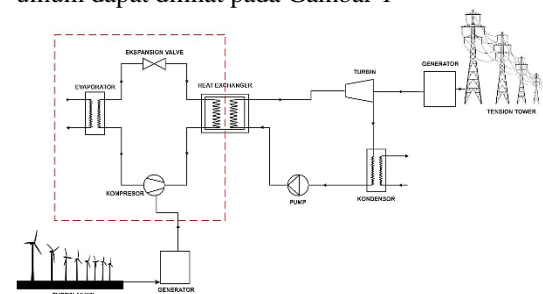
Sumber energi fosil terus digunakan dan sumber energi baru terbarukan kurang dimanfaatkan karena tingginya harga produksi pembangkit berbasis energi baru terbarukan serta tidak maksimalnya pemanfaatannya karena intensitas sumbernya yang tidak menentu

*Heat Pump* atau pompa kalor memiliki sistem pemanfaatan kalor yang dilepaskan di kondensor untuk pemanasan sehingga tidak dibuang ke lingkungan menawarkan alternatif. *Heat pump* berguna sebagai sistem yang dapat

dijadikan sebagai sistem pemulihan energi dengan potensi penghematan energi yang besar.

Oleh karena itu, dilakukan suatu kajian yang menggunakan penerapan *heat pump* dengan penambahan *heat exchanger* sebagai tempat penyimpanan energi yang terbuang dari kondensor.

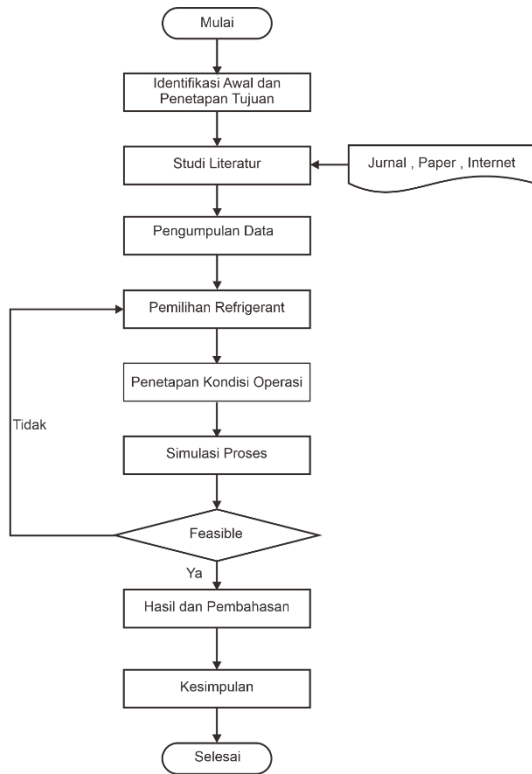
Dengan tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui jenis *refrigerant* yang sesuai untuk menjalankan sistem, mengetahui kondisi temperatur dan tekanan operasi yang sesuai pada sistem, mengetahui *input* listrik yang *feasible* untuk menjalankan sistem penyimpanan energi, dan mengetahui material penyimpanan panas yang sesuai dalam sistem. Skema sistem secara umum dapat dilihat pada Gambar 1



.Gambar 1 Skema Batasan Penelitian

## 2. METODOLOGI .

Alur penelitian yang dilakukan sebagai berikut



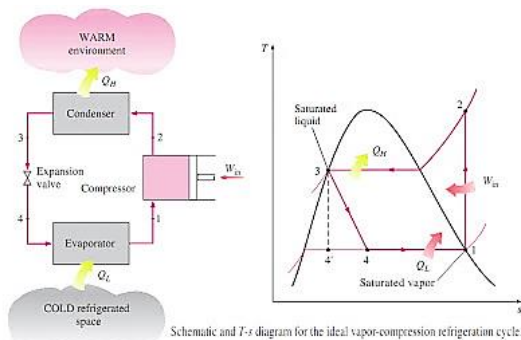
Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

### 2.1 Sistem Refrigerasi

Refrigerasi adalah suatu proses penyerapan panas dari suatu zat atau produk sehingga temperaturnya berada di bawah temperatur lingkungan. Mesin refrigerasi atau disebut juga mesin pendingin adalah mesin yang dapat menimbulkan efek refrigerasi tersebut, sedangkan *refrigerant* adalah zat yang digunakan sebagai fluida kerja dalam proses penyerapan panas. Secara umum bidang refrigerasi mencakup kisaran temperatur sampai 123 °K.

Proses pengambilan atau penyerapan energi tersebut terjadi di evaporator dengan laju perpindahan panas sebesar  $Q_e$ . Sedangkan proses pembuangan energi dalam bentuk panas ke lingkungan terjadi di kondensor dengan laju sebesar  $Q_k$ .

Adapun sistem refrigerasi secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Sistem Refrigerasi

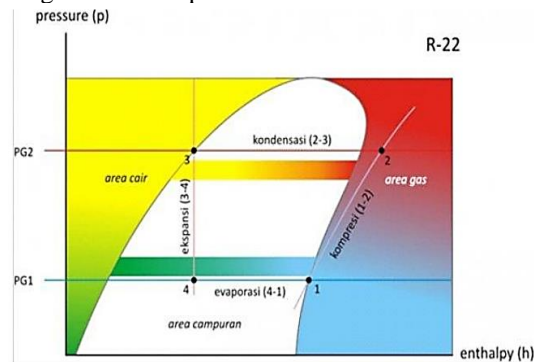
### 2.2 Siklus Kompresi Uap

Secara umum ada dua bagian penting dalam siklus kompresi uap, antara lain bagian yang bertekanan tinggi mulai dari sisi keluar kompresor hingga sisi masuk katup ekspansi, sedangkan bagian yang bertekanan rendah mulai sisi keluar katup ekspansi hingga sisi masuk kompresor. Pada saat terjadi perubahan fase dari cair ke uap, *refrigerant* akan mengambil kalor (panas) dari lingkungan. Sebaliknya, saat berubah fase dari uap ke cair, *refrigerant* akan membuang kalor (panas) ke lingkungan sekelilingnya.

Siklus refrigerasi kompresi uap merupakan suatu sistem yang memanfaatkan aliran perpindahan kalor melalui *refrigerant*. Proses dari kompresi uap seperti Gambar 2.2 adalah:

1. Proses kompresi (1-2)
2. Proses kondensasi (2-3)
3. Proses ekspansi (3-4)
4. Proses evaporasi (4-1)

Seluruh proses siklus refrigerasi di atas diatas dapat dilihat dengan menggunakan diagram tekanan-entalpi (P-h) yang dikenal dengan diagram Mollier pada Gambar 4



Gambar 4 Diagram P-h Siklus Kompresi Uap

Proses 1 - 2: Proses Kompresi. kompresi *isentropik* (*adibatik* dan *reversible*) dari uap jenuh ke tekanan kondensasi (tekanan kerja kondensor).  
 $W = h_2 - h_1$  (1)

Keterangan:

$W$  = Kerja kompresor (kj/s),

$h_1$  = Entalpi masukan kompresor (kj/kg), dan

$h_2$  = Entalpi keluaran kompresor (kj/kg).

Proses 2 - 3: Proses Pengembunan, pelepasan kalor *reversible* pada tekanan kondensor yang konstan sampai kondisi cair jenuh, panas yang dibawa fluida dilepaskan ke lingkungan sehingga terjadi pengembunan fluida.

$$Q_c = h_2 - h_3 \quad (2)$$

keterangan:

$Q_c$  = Panas yang dilepas kondensor (kj/s),

$h_2$  = Entalpi masukan kondensor (kj/kg),

$h_3$  = Entalpi keluaran kondensor (kj/kg).

Proses 3 - 4: Proses Ekspansi, ekspansi *irreversible* pada entalpi konstan sampai tekanan evaporasi

$$h_3 = h_4 \quad (3)$$

Proses 4 - 1: Proses Penguapan, pemasukan panas *reversible refrigerant* fase campuran antara cair dan uap dengan tekanan dan temperatur rendah masuk evaporator menyerap kalor dari ruangan atau media yang akan didinginkan.

$$Q_e = h_1 - h_4 \quad (4)$$

keterangan:

$Q_e$  = Kalor yang diserap evaporator (kJ/s),

$h_1$  = Entalpi keluaran evaporator (kJ/kg), dan

$h_4$  = Entalpi masukan evaporator (kJ/kg).

### 2.3 Coefficient of Performance (COP)

elain kerja kompresor dan kapasitas penyerapan panas di evaporator, pada sistem refrigrasi kompresi uap juga dikenal istilah *Coefficient of Performance (COP)* yang mana nilai COP tersebut merupakan suatu nilai perbandingan antara kapasitas penyerapan panas yang terjadi di evaporator. Dengan sejumlah kerja kompresi yang dilakukan di kompresor. COP ini digunakan untuk mengetahui kualitas kerja dari suatu mesin refrigerasi

*Coefficient of Performance (COP)* yang tinggi membutuhkan tingkat suhu tinggi untuk sumber panas limbah dan suhu penyimpanan rendah untuk sistem penyimpanan panas. Ini mengarah pada masalah optimisasi untuk menentukan suhu penyimpanan air yang paling baik untuk fluida kerja yang tersedia. Jika eksergi limbah panas menambah eksergi listrik yang tersimpan, total energi dan eksergi dalam penyimpanan air panas meningkat bahkan jika suhu yang sama diterapkan. Eksergi tambahan mengkompensasi kehilangan eksergi dari pompa panas. COP<sub>aktual</sub> terdapat pada persamaan berikut:

$$COP_{aktual R} = \frac{Q_{evap} \left(\frac{kJ}{s}\right)}{W \left(\frac{kJ}{s}\right)} \quad (5)$$

$$COP_{aktual HP} = \frac{Q_{cond} \left(\frac{kJ}{s}\right)}{W \left(\frac{kJ}{s}\right)} \quad (6)$$

### 2.4 Komponen Kompresi Uap Standar

#### 1. Kompresor

Menurut Dinçer (2003), kompresor mempunyai fungsi utama untuk meningkatkan tekanan fluida. Kompresor biasanya menggunakan motor listrik, mesin diesel atau mesin bensin sebagai tenaga penggerakannya. Fluida bertekanan hasil dari kompresor biasanya digunakan pada pencepatan dengan teknik *spray/air brush*, untuk mengisi angin ban, pembersihan, pneumatik, dsb.

#### 2. Kondensator

Menurut (Cengel et al., 2006), kondensator merupakan alat penukar kalor yang berfungsi untuk mengembunkan uap *refrigerant* yang mengalir dari kompresor. Untuk mengembunkan uap *refrigerant* yang bertekanan dan bertemperatur tinggi diperlukan usaha untuk melepaskan kalor dengan cara mendinginkan uap *refrigerant* tersebut. Secara umum terdapat tiga jenis kondensator yaitu kondensator berpendingin udara (*air cooled*), berpendingin air (*water cooled*) dan *evaporative* kondensator. Jenis kondensator yang banyak digunakan pada mesin pendingin makanan skala kecil adalah kondensator dengan pendinginan udara (*air cooled condensor*).

#### 3. Evaporator

Menurut (Cengel et al., 2006), evaporator adalah suatu alat penukar kalor yang memindah kalor dari benda yang ingin didinginkan ke *refrigerant*. Pada prinsipnya perpindahan panas yang terjadi dalam evaporator sama dengan perpindahan panas yang terjadi pada kondensator. Hanya saja di dalam kondensator, panas dilepas atau dibuang oleh *refrigerant* ke media pendingin kondensator sedangkan di dalam evaporator kalor diserap oleh *refrigerant* dari media yang didinginkan.

#### 4. Katup Ekspansi

Katup ekspansi digunakan untuk mengekspansi secara adiabatik cairan *refrigerant* yang bertekanan dan bertemperatur tinggi sampai mencapai kondisi tekanan dan temperatur pada entalpi konstan. Selain itu katup ekspansi mengatur pemasukan debit *refrigerant* sesuai dengan beban pendinginan yang harus ditanggung oleh evaporator. Terdapat beberapa jenis katup ekspansi, diantaranya yaitu *Thermostatic Expansion Valve (TXV)*, *Automatic Expansion Valve (AXV)*, *capillary tube* dan *float valves*. Diantara keempat jenis tersebut, TXV merupakan alat yang paling sering digunakan.

### 2.5 Heat Exchanger

Penukar Panas adalah alat yang digunakan untuk menukar energi panas (entalpi) antara dua atau lebih fluida, antara zat padat dan cair, atau antara partikular padat dan fluida yang berbeda temperatur dalam kondisi bersentuhan atau kontak termal. Dalam *heat exchanger* tidak ada panas eksternal yang masuk dan interaksi kerja. Aplikasi yang sering dijalankan pada *heat exchanger* adalah pemanasan atau pendinginan fluida yang melibatkan penguapan atau kondensasi pada satu fluida atau multikomponen fluida. Contoh umum dari *heat exchanger* adalah

shell and tube heat exchanger, radiator mobil, evaporator, kondensor, dan cooling tower.

Penukar panas terdiri dari bagian yang penting seperti inti atau matriks yang berisi permukaan perpindahan panas, dan elemen untuk distribusi fluida seperti header, manifold, nozzle, dan pipa. Biasanya tidak ada bagian yang bergerak pada penukar panas tetapi terdapat beberapa pengecualian yaitu pada penukar panas yang regeneratif putar dimana matriks didorong untuk diputar pada kecepatan desain tertentu. Penukar panas bisa digolongkan berdasarkan bentuk konstruksinya. Pembagian penukar panas berdasarkan konstruksinya dibagi menjadi empat yaitu: Tubular Heat Exchanger, Plate-Type Heat Exchanger, Extend Surface, Regenerative Exchangers. Tubular Heat Exchanger umumnya dibangun menggunakan tube berbentuk lingkaran walaupun, di beberapa aplikasi terdapat bentuk persegi, ellips.

### 2.6 Refrigerant

Refrigerant adalah suatu fluida kerja yang digunakan sebagai media penghantar kalor. Peran refrigerant adalah menyerap kalor dalam substansi atau ruangan yang ingin didinginkan pada tekanan dan temperatur yang rendah, lalu membuang kalor ke lingkungan dengan tekanan dan temperatur yang tinggi. Dalam suatu siklus biasanya refrigerant mengalami perubahan fase. Pada saat refrigerant keluar evaporator refrigerant berwujud uap. Sedangkan saat refrigerant keluar kondensor refrigerant kembali berwujud cair. Refrigerant merupakan komponen terpenting dalam siklus refrigerasi maupun heat pump karena menimbulkan efek pendinginan dan pemanasan pada mesin refrigerasi. Menurut Dossat (1981), bahan pendingin diantaranya yang dewasa ini banyak dan secara umum digunakan Refrigerant-11 (R-11), R-12, R-13, R-22, freon R12 dan R134A serta R404A.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Identifikasi Refrigerant

Sifat Refrigerant	R-600a	R-22	R-410a	R-407C
Titik didih pada 1 atm (°C)	11,7	41,4	51,6	43,80
Tekanan Absolut (25°C) Mpa	0,38	0,62	0,96	0,96
Suhu kritis (°C)	134,70	96,20	72,5	87,3
Tekanan kritis (Mpa)	3,64	4,99	4,95	4,63
Global Warming Potential (GWP)	20	1700	2000	1700
Ozone Depletion Potential (ODP)	0	0,0034	0	0

Tabel 1 Identifikasi Refrigerant

Dilakukan variasi 4 refrigerant dengan tambahan 1 ammonia. Variasi dilakukan pada tekanan masuk evaporator 2, 2,1, 2,2, 2,3, dan 2,4 bar dengan kerja kompresor 110,120, 130, 140, dan 150 kW. Dengan parameter tetap simulasi proses seperti pada table 2.

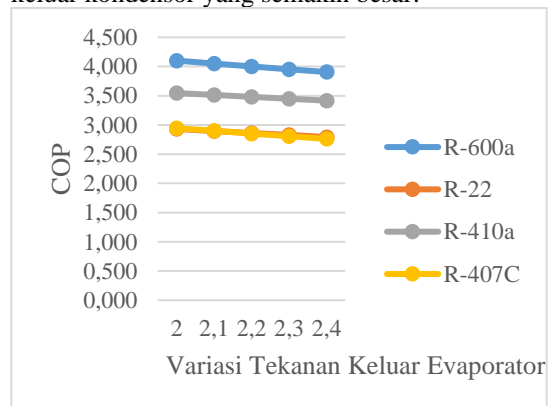
Jenis Parameter	Nilai Parameter	Satuan Parameter
Mass flow refrigerant	1,5	kg/s
Mass flow udara	60	kg/s
Efisiensi adiabatic kompresor	70	%
Temperatur udara	30	°C
Tekanan udara	1	atm

Tabel 2 Parameter Simulasi Proses

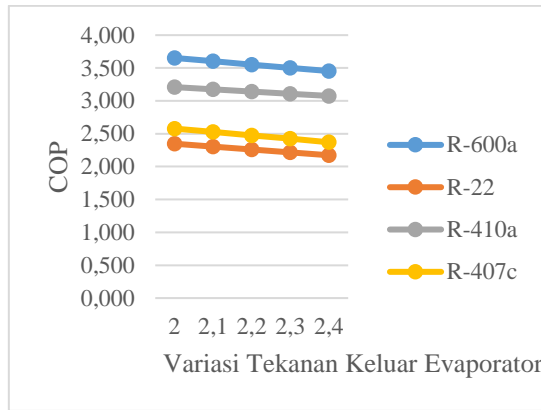
### 3.2 Hasil Simulasi 4 Fluida Kerja

Hubungan antara variasi tekanan keluar evaporator dan daya kompresor terhadap COP Heat Pump tersaji pada gambar 4, Gambar 5 Gambar 6, dan Gambar 7. Semakin rendah daya kompresor yang digunakan, maka nilai COP sistem akan semakin besar seperti pada Gambar 4, variasi refrigerant R-600a dengan daya kompresor 110 kW dan 2 bar menghasilkan COP 4,102. Perbandingan ini selaras dengan semua variasi refrigerant. Namun, jika daya kompresor yang digunakan semakin besar, maka nilai COP akan semakin kecil seperti pada Gambar 5, variasi refrigerant R-410a dengan daya kompresor 150kW dan 2,4 bar menghasilkan COP 2,24.

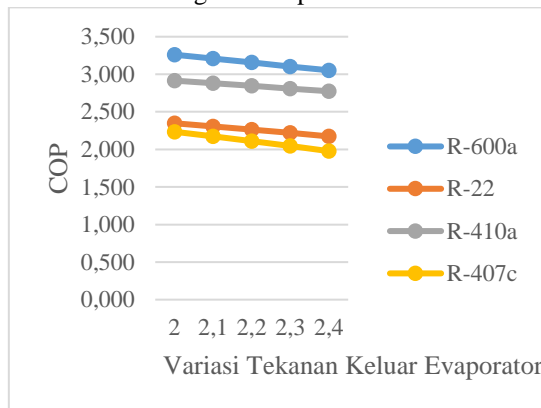
COP dipengaruhi oleh nilai entalpi keluar dan masuk kondensor dengan entalpi masukan kondensor dan keluaran evaporator. Entalpi keluaran evaporator bernilai sama pada saat variasi dilakukan, karena variasi tekanan pada keluaran evaporator dibuat sama dari 2, 2,1, 2,2, 2,3, dan 2,4 bar. Perbedaan terletak pada entalpi keluaran dan masukan kompresor. Pada saat variasi daya kompresor yang semakin kecil, maka tekanan pada kondensor inlet akan semakin kecil yang menyebabkan pengaruh pada nilai entalpi keluar kondensor yang semakin besar.



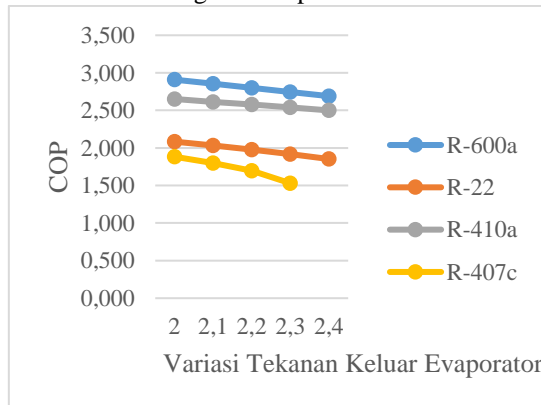
Gambar 4 Hubungan COP pada 110 kW



Gambar 5 Hubungan COP pada R-22



Gambar 6 Hubungan COP pada R-410a

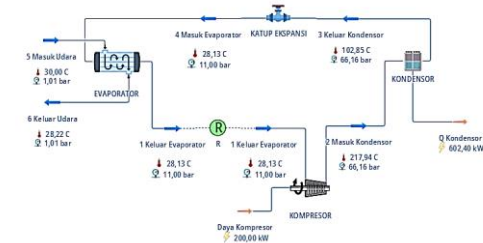


Gambar 7 Hubungan COP pada R-407c

### 3.3 Simulasi Proses Ammonia

Ada banyak kemajuan dalam teknologi pompa panas pada suhu pengiriman panas yang lebih rendah tetapi lebih sedikit pada suhu tinggi di atas 80 °C. Maka dari itu simulasi dilakukan dengan fluida kerja alami yang dianggap baik dan mampu beroperasi dengan temperatur kondensor diatas 80°C yaitu Ammonia. Pada simulasi proses di software DWSIM dilakukan simulasi seperti parameter 4 fluida sebelumnya. Hasilnya temperatur keluar kondensor berada pada -1,77 °C

dengan daya kompresor 150kW dan tekanan masuk evaporator 2,4 bar. laju perpindahan panas yang terjadi sangat tinggi yaitu 2.456,98 kW dengan COP 16,380. Dilakukan simulasi proses dengan menaikkan daya kompresor menjadi 200kW dengan tekanan masuk evaporator 11 bar yang diharapkan temperatur kondensasi mencapai lebih dari 80°C.



Gambar 4.8 Simulasi proses Ammonia

### 3.4 Media Penyimpanan Panas

(Schlipf, et al. 2014) melakukan penelitian mengenai sistem penyimpanan energi termal dengan hasil untuk mengevaluasi pengaruh bahan penyimpanan yang digunakan dan ukuran butirnya dan didapatkan pasir silika dengan ukuran maksimum diameter 0,5 mm yang memiliki kepadatan cukup tinggi daripada krikil basal dan krikil biasa (kuarsa). Hasil teoritis dan eksperimen menunjukkan bawah bahan berbutir sangat kecil dapat menjadi pilihan sebagai media penyimpanan energi termal. Maka media penyimpanan panas yang dipilih adalah pasir silika.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Kocak et al., 2020) koefisien panas pada pasir silika adalah 900 J/kg.°C dan konduktivitas termalnya adalah 0,1 W/m.°C.

### 3.5 Perkiraan Massa Media Penyimpanan Panas

Massa media penyimpanan panas berupa pasir silika didapatkan melalui persamaan kesetimbangan energi

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta t$$

$$m = \frac{Q}{C_p \times \Delta t}$$

$$Q = 602,399 \text{ kW}$$

$$C_p = 0,9 \text{ kJ/kg.C}$$

$$\Delta t = t_{in} - t_{out}$$

$$= 102,854 - 100,661 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$= 2,193 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$m = \frac{602,399}{0,9 \times 2,193}$$

$$m = 305,2 \text{ kg}$$

Berdasarkan perhitungan maka massa pasir diperkirakan 305,2 kg.

900 J/kg.°C dan koefisien termal sebesar 0,1 W/m,°C.

## 5. PUSTAKA

## 4. KESIMPULAN

1. *Refrigerant* yang paling sesuai untuk sistem *heat pump* adalah R-600a (*isobutane*) dengan suhu kondensasi dibawah 80°C. Sedangkan jika *Heat Pump* dengan suhu kondensasi diatas 80°C fluida yang digunakan adalah ammonia.
2. Kondisi operasi yang *feasible* pada sistem *heat pump* adalah tekanan keluar evaporator sebesar 2,2 bar dengan temperatur 9,799 °C. Temperatur kondensor mencapai 70,93 °C pada masukan kondensor tekanan sebesar 11,096 bar. Temperatur evaporator mencapai 9,799 °C pada tekanan 2,2 bar. *Coefficient of Performance* dari kondisi ini adalah 3,156. Sedangkan kondisi operasi yang *feasible* pada sistem *heat pump* diatas 80°C, maka kondisi operasi yang digunakan adalah daya kompresor 200kW dengan tekanan keluar 66,158 bar dengan temperatur 217,936 °C. Temperatur kondensasi mencapai 102,854 °C dan temperatur evaporasi 28,131 °C pada tekanan 11 bar dengan COP 3,012.
3. *Input* listrik yang *feasible* untuk menjalankan sistem penyimpanan energi adalah 130kw pada *heat pump* dan *high temperatur heat pump input* listrik yang *feasible* adalah 200kW.
4. Media penyimpanan panas yang digunakan berupa pasir silika dengan koefisien panas