

Peluang Pemanfaatan Campuran refrigeran Hidrokarbon Pada Cooling Box Temperatur Sangat Rendah Dengan Menggunakan Sistem Refrigerasi Joule-Thomson

Ade Suryatman Margana^a, Sumeru^b

*(^a)Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik Negeri Bandung
adesmargana@polban.ac.id*

*(^b)Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik Negeri Bandung
sumeru84@gmail.com*

ABSTRAK

Mesin pendingin siklus kompresi uap *single stage* (satu kompresor) umumnya beroperasi dengan temperatur tidak lebih rendah dari -40°C . Bila diinginkan temperatur lebih rendah dari -40°C , maka diperlukan strategi khusus, baik menggunakan refrigeran dan kompresor khusus atau menggunakan *double stage*. Pada penelitian ini akan dirancang *cooling box* yang dapat mencapai temperatur antara -80°C s/d -100°C menggunakan refrigeran ramah lingkungan (hidrokarbon) dan mudah didapat dipasaran, serta menggunakan kompresor yang umum digunakan pada mesin pengkondisi udara. Sistem yang bertemperatur rendah tersebut digunakan untuk penyimpanan vaksin yang saat ini ada di pasaran tapi dengan harga mesin yang sangat mahal. Untuk mencapai tujuan tersebut maka digunakan penukar kalor Joule-Thomson dengan campuran baru pada refrigeran, yaitu metana, propane, iso-butana. Problem utama pada penelitian ini adalah perancangan dimensi penukar kalor Joule-Thomson, komposisi campuran refrigeran, dan konduktivitas insulasi dinding *cooling box* yang harus memiliki nilai U (koefisien overall heat transfer) lebih kecil dari $0,1 \text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. Ketebalan dan kerapatan insulasi adalah dua hal yang menentukan nilai U , dan akan diuji pada penelitian ini. Dari hasil penelitian temperatur terendah yang dapat dicapai adalah -86°C , ini terjadi pada percobaan ke 6 (enam) dengan komposisi campuran refrigeran propane 63 %, iso-butana 27 % dan metana 10%. COP terbesar pada percobaan ke 5 (lima) 1,26 dan efisiensi tersebar pada percobaan ke 5 (lima) 84 %.

Kata Kunci:

Joule-Thompson, propane, iso-butana, metana, COP, efisiensi

1. PENDAHULUAN

Mesin pendingin untuk mencapai temperatur -60°C biasa menggunakan sistem pendingin *cascade* dengan dua kompresor, sedangkan untuk temperatur di bawah -100°C , menggunakan tiga atau lebih kompresor (Venkatarathnam, 2003). Saat ini, untuk mencapai temperatur yang sangat rendah (*cryogenic*) umumnya digunakan mesin pendingin Linde-Hampson dengan refrigeran nitrogen murni. Mesin ini bekerja dengan tekanan kerja sampai 200 bar, sehingga memerlukan konstruksi yang khusus dan tidak sederhana. Adanya tuntutan sistem refrigerasi yang lebih simpel, dengan hanya menggunakan satu kompresor (yang banyak di pasaran), dan dengan tekanan kerja 1-3 bar pada tekanan rendah dan 15-20 bar pada tekanan tinggi, membuat penelitian mesin pendingin *Joule-Thomson* berkembang lagi.

Beberapa negara, seperti India pada tahun 1998 (Venkatarathman, 2003) dan Jerman (Alexeev, 2000) juga mulai meneliti tentang sistem refrigerasi *Joule-Thomson*. Pada awal abad ke-21, beberapa paten yang berhubungan dengan *Joule-Thomson* terus bermunculan, terutama dalam proses pencarian gas-gas, dan pembuatan oksigen cair (Bayram, 2000; Arman, 2000; Brostow, 2001; Kountz, 2003).

Penggunaan *mixed refrigerant* untuk sistem refrigerasi *cryogenic* pertama kali diajukan oleh Polbielniak untuk paten di USA pada tahun 1936 (Podbielniak, 1936). Pada tahun 1959, Kleemenko adalah orang pertama yang mendemonstrasikan pencairan LNG dari gas alam menggunakan proses *mixed refrigerant*. Pada pertengahan dekade 90-an, Amerika Serikat memulai program pembuatan lemari pendingin dengan temperatur sangat rendah (*cryocooler*) (Nisenoff et al., 1996).

Mesin pendingin temperatur sangat rendah jarang digunakan dalam keperluan sehari-hari. Hanya instansi tertentu yang menggunakannya, seperti rumah sakit ataupun perusahaan farmasi, pembuatan LNG, produksi Oksigen maupun Nitrogen cair. Selama ini, mesin pendingin tersebut keberadaannya di Indonesia masih *import*, tentunya dengan harga yang relatif tinggi, karena kandungan teknologinya juga cukup tinggi. Agar dapat memutus ketergantungan, dan tidak tertinggal dalam teknologi refrigerasi temperatur sangat rendah, maka perlu dilakukan juga penelitian tentang refrigerasi temperatur rendah dengan refrigerant campuran,

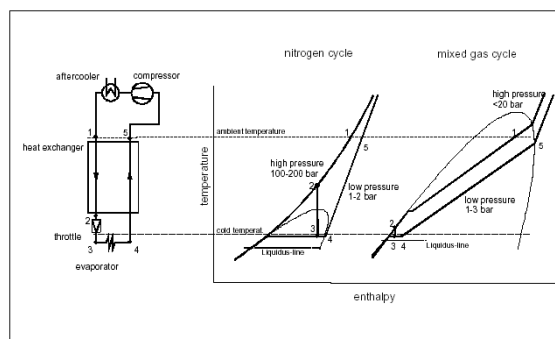
mengingat teknologi ini juga sedang dikembangkan di beberapa negara maju.

Berdasarkan uraian tersebut di atas, maka peneliti bermaksud untuk melakukan penelitian tentang Penerapan Sistem Refrigerasi Joule-Thomson Pada Cooling Box Temperatur Sangat Rendah Dengan Menggunakan Campuran Refrigeran nitrogen Iso-butana, Propana dan Metana

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Sistem (mesin) Refrigerasi Siklus Joule-Thomson

Peralatan yang di pakai dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 2.1. Komponen utama dari sistem Joule Thomson adalah kompresor, oil separator, after cooler, penukar kalor aliran balik (penukar kalor JT), katup cekik dan evaporator. Campuran refrigerant yang digunakan terdiri dari propane, metane, dan iso-butane



Gambar 2.1. Prinsip kerja dan diagram termodinamikan system refrigerasi siklus Joule-Thompson.

Pendingin campuran gas JT kita ini terdiri dari dua modul terpisah: unit kompresor dan kotak pendingin, yang dihubungkan dengan pipa-pipa gas.

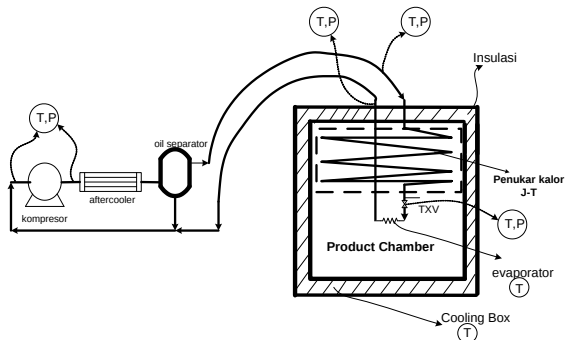
Unit kompresor terdiri dari kompresor campuran gas termasuk jenis kompresor rotary kapasitas 1 pk, dengan aftercooler dan oil separator.

Bok pendingin terdiri dari katup cekik TXV, evaporator dan penukar kalor. Penukar kalor jenis multitube digunakan. untuk aliran tekanan tinggi, pipa tembaga kecil yang berdiameter 4 mm, diletakkan dalam sebuah pipa yang lebih besar yang berdiameter 16 mm. dengan pipa keduanya 11,4 meter. Aliran tekanan rendah mengalir dalam pipa besar dalam ruang diantara pipa-pipa kecil. Pipa-pipa ini tersusun dalam lilitan berbentuk spiral (dengan diameter 265 mm). Gambar 2.2. menunjukkan bagian dalam box pendingin.



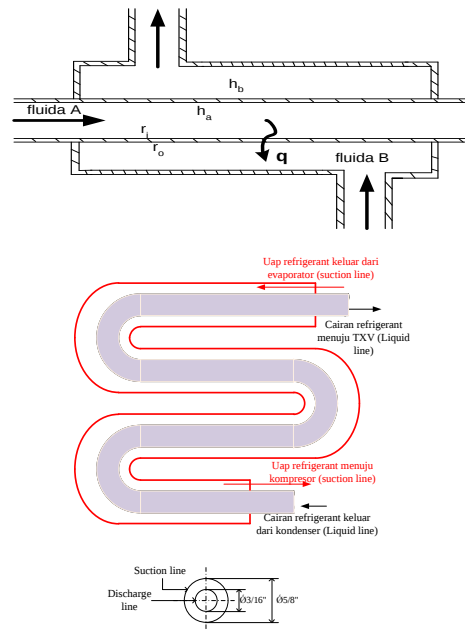
Gambar 2.2. Bagian box pendingin yang terdiri dari katup cekik, evaporator dan penukar kalor.

Rancangan mesin pendingin *Joule-Thomson* yang dilengkapi dengan *cooling box* seperti terlihat pada gambar 2.3. terlihat bahwa penukar kalor diletakkan pada bagian atas *cooling box*, dan evaporator terletak di dalam kabin *cooling box*. *Cooling box* terdiri dari dua ruangan, ruangan atas ditempatkan penukar kalor *Joule-Thomson*, sedangkan ruang bagian bawah untuk evaporator dan sekaligus sebagai *product chamber*.



Gambar 2.3. Skematik rancangan mesin pendingin *Joule-Thomson*

Oleh karena temperatur *cooling box* sangat rendah maka akan mengakibatkan perpindahan kalor yang cukup kuat antara lingkungan dengan *cooling box*, sehingga diperlukan ketebalan dan kerapatan bahan insulasi yang tepat. Pada penelitian ini akan dilakukan dua ketebalan dan kerapatan bahan insulasi, sehingga dihasilkan nilai "*U*" (koefisien *overall heat transfer*) lebih kecil dari $0,1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Secara garis besar, konstruksi penukar kalor yang akan dirancang yaitu *tube-in-tube* (Alexeev, 2000; Venkatarathnam, 2003). Konstruksinya terlihat pada Gambar 2.4.



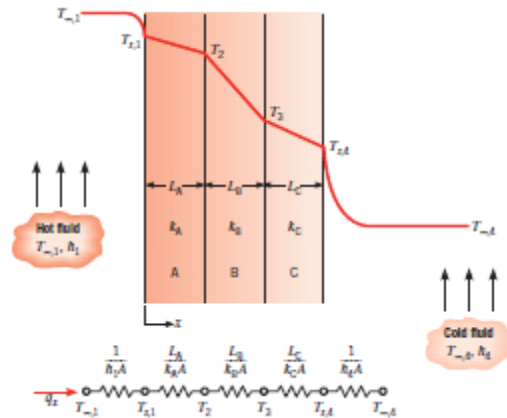
Gambar 2.4. konstruksi penukar kalor *tube in tube*

Persamaan yang digunakan untuk menentukan dimensi penukar kalor pada Gambar 2.4 adalah dengan persamaan 2.1, yaitu,

$$\frac{q}{L} = \frac{\Delta T_m (\pi)}{\frac{1}{h_a d_a} + \frac{\ln(r_b / r_a)}{2k} + \frac{1}{h_b d_b}} \dots\dots\dots(2.1)$$

Penentuan nilai "*h_a*" dan "*h_b*" dihitung dengan persamaan konveksi yang sesuai dengan kasus yang terjadi, misalnya kasus *forced convection* untuk *evaporation* dan *condensation* (Kandlbinder, 1997; Sumeru, 2006; Sumeru, 2007).

Untuk merancang *cooling box* digunakan persamaan-persamaan sbb :



$$q_x = \frac{[(1W^1q) + (\Gamma^V \backslash K^Vq) + (\Gamma^B \backslash K^Bq) + (\Gamma^C \backslash K^Cq) + (1W^4q)]}{\Lambda^{\infty,1} - \Lambda^{\infty,2}}$$

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{(1/h_1A)} = \frac{T_{s,1} - T_2}{(L_A/k_A A)} = \frac{T_2 - T_3}{(L_B/k_B A)} = \dots$$

$$q_x \equiv UA \Delta T$$

$$U = \frac{1}{R_{tot}A} = \frac{1}{[(1/h_1) + (L_A/k_A) + (L_B/k_B) + (L_C/k_C) + (1/h_2)]}$$

$$R_{tot} = \sum R_i = \frac{\Delta T}{q} = \frac{1}{UA}$$

Dengan :

- q : Laju perpindahan kalor total, W
- U : Perpindahan kalor menyeluruh, $[W/m^2.K]$
- Δtm : Beda temperatur rata-rata, $[K]$
- A : Luas bidang pertukaran kalor, $[m^2]$
- h_i : Koefisien perpindahan kalor ditinjau dari sisi permukaan dalam, $[W/m^2.K]$
- h_o : Koefisien perpindahan kalor ditinjau dari sisi permukaan luar, $[W/m^2.K]$
- A_o : Luas pertukaran kalor sisi luar, m^2
- A_i : Luas pertukaran kalor sisi dalam, m^2
- A_m : Luas pertukaran kalor rata-rata, m^2
- k : Konduktivitas termal, $W/(m.K)$
- t : Tebal permukaan pertukaran kalor, m
- r_{fi} : Fouling factor sisi dalam, $m^2.K/W$
- r_{fo} : Fouling factor sisi luar, $m^2.K/W$

Kemampuan kerja sistem refrigerasi dinyatakan oleh besaran yang dinamakan COP (Coefficient of

performance). COP ini dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur kerja dari sistem itu sendiri. COP terbagi menjadi dua, diantaranya COP_{actual} dan COP_{carnot}.

Untuk mengetahui nilai COP_{actual}, digunakan persamaan :

- Kapasitas pendinginan,
 $Q_{in} = m \times C_p \times \Delta T$
- Kerja kompresor, $W_{komp} = P \times I$

$$COP_{actual} = \frac{Q_{in}}{W_{komp}} = \frac{m \times C_p \times \Delta T}{P \times I} \quad (2.2)$$

Untuk mengetahui nilai COP_{carnot} digunakan persamaan :

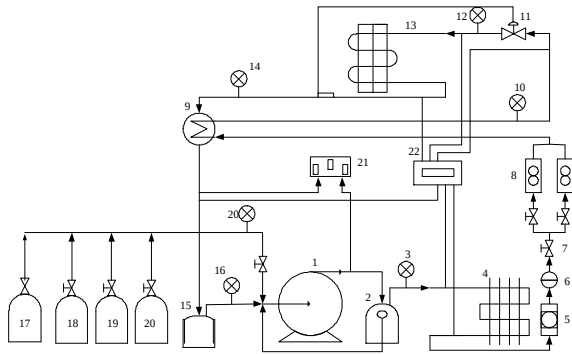
$$COP_{carnot} = \frac{T_{evaporasi}}{T_{kondensasi} - T_{evaporasi}} \quad (2.3)$$

$$Effisiensi = \frac{COP_{aktual}}{COP_{carnot}} \times 100\% \quad (2.4)$$

2.2. Prosedur Pelaksanaan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan rangkaian komponen system refrigerasi kompresi uap sederhana yang dimodifikasi. Modifikasi dilakukan dengan menambah komponen penukar panas, alat ukur laju aliran refrigerant (rotameter), pemisah oli (oil separator), kipas pendingin kondenser (after cooler) dan alat ukur tekanan (pressure gauge). Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan rangkaian komponen system refrigerasi kompresi uap sederhana yang dimodifikasi. Modifikasi dilakukan dengan menambah komponen penukar panas, alat ukur laju aliran refrigerant (rotameter), pemisah oli (oil separator), kipas pendingin kondenser (after cooler) dan alat ukur tekanan (pressure gauge), gambar 3 merupakan skema peralatan uji dalam penelitian ini. Sebelum melakukan eksperimen, system yang telah dirakit dilakukan dulu proses pem-vakuuman, proses ini dilakukan untuk mengeluarkan uap air yang terdapat dalam sistem selama proses perakitan dan juga untuk mendeteksi kebocoran di dalam sistem. Proses selanjutnya adalah mengetahui letak kebocoran, caranya sistem diisi dengan refrigeran kemudian gunakan *leak detector* atau dengan cara yang paling sederhana dengan busa sabun yang diletakkan pada setiap sambungan. Prses pemvacuuman kembali dilakukan setelah perbaikan sistem akibat kebocoran.

Setelah selesai proses vacuum, isi sistem dengan refrigerant campuran, kemudian mesin dihidupkan,



Gambar 3 Skema Alat Uji.

Komposisi campuran refrigeran dalam melakukan penelitian ini adalah campuran propane, iso-butana dan metana, data dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 3.1. Komposisi refrigeran campuran yang diuji.

Percobaan ke	Propana (%)	Iso-Butana (%)	Metana (%)
1	90	5	5
2	82	11	7
3	75	21	4
4	69	25	6
5	66	26	8
6	63	27	10

Cara pengambilan data adalah dengan mengukur temperatur, tekanan kerja dan debit aliran refrigeran campuran. Pengukuran tegangan dan arus dilakukan hanya untuk mengetahui kerja kompresor. Data temperatur meliputi :

1. Temperatur lingkungan
2. Temperatur suction
3. Temperatur discharge
4. Temperatur kondensasi
5. Temperatur masuk TXV
6. Temperatur keluar TXV
7. Temperatur evaporasi
8. Temperatur keluar evaporator
9. Temperatur kabin.

Sedangkan data tekanan yang diukur adalah tekanan :

1. Tekanan Suction
2. Tekanan discharge
3. Tekanan masuk TXV
4. Tekanan keluar TXV
5. Tekanan keluar penukar kalor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-Thompson dirancang dilengkapi dengan 9 sensor temperatur dan 5 sensor tekanan, serta alat ukur tegangan dan arus.

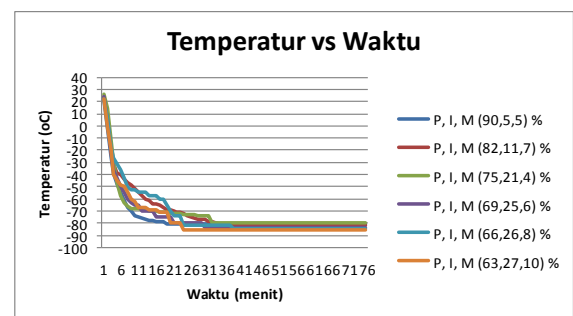
Perhitungan data tersebut diolah dengan menggunakan program Reprop versi 7.

Berdasarkan 6 (enam) kali pengujian dan dengan jenis refrigeran yang berbeda (tabel 3.1), didapat hasil seperti digambarkan pada gambar 4 dan tabel 2.

3.1 Temperatur

Pada gambar 4 terlihat bahwa temperatur terendah yang dapat dicapai adalah -86°C , ini terjadi pada percobaan ke 6 (enam) dengan komposisi campuran refrigeran propane 63 %, iso-butana 27 % dan metana 10%. Penambahan prosentase metana diharapkan akan menurunkan pencapaian temperatur evaporator, karenametana mempunyai nilai NBP (normal boiling point) yang lebih rendah dari propane. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, kecepatan pencapaian temperatur evaporator relatif sama dan berlangsung relatif cepat, terutama pada 4 (tiga) menit pertama. Kecepatan (penurunan) temperatur rata-rata sekitar $-13,5^{\circ}\text{C}$ per menit. Setelah menit ke 4 (empat) kecepatan pencapaian temperatur evaporator mulai berbeda untuk masing-masing campuran refrigeran. Pencapaian temperatur yang paling cepat terjadi pada percobaan ke 6 (satu), temperatur yang terukur adalah -86°C terjadi pada menit ke 20.

Berdasarkan data hasil pengujian, sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-Thompson sangat tepat digunakan untuk sistem yang memerlukan pendinginan cepat (*fast cool-down*), mengingat kecepatan pencapaian temperatur evaporator relatif sangat cepat. Percobaan dilakukan dengan menggunakan *cooling box* dengan ketebalan 100 mm.

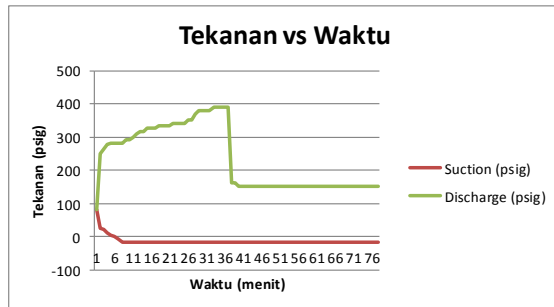


Gambar 4 Temperatur evaporator system (mesin) refrigerasi siklus Joule-Thompson.

3.2 Tekanan kerja

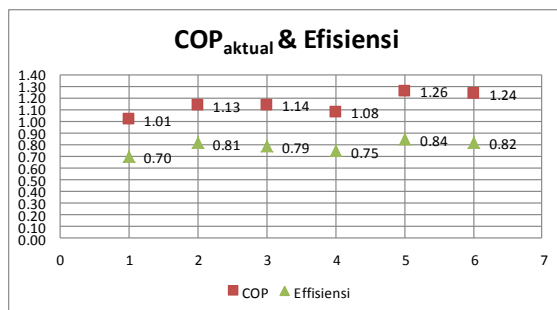
Pada gambar 5 terlihat bahwa dengan menambahkan prosentase metana, tekanan kerja, temperatur discharge meningkat dan temperatur evaporator sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-thompson menurun. Hal ini sesuai tidak sesuai dengan yang diharapkan, mengingatmetana mempunyai nilai NBP

yang lebih rendah dari propane, Kemungkinan besar hal ini disebabkan oleh rancangan penukar kalor yang kurang tepat baik panjang maupun diameter pipa yang digunakan (Alexeev, 2000, Venkatarathnam, 2003).



Bambar5 Hasil pengukuran tekanan terhadap waktu sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-thompson.

3.3 COP (coeffisien of performance) dan efisiensi
COP dan efisiensi dari sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-thompson dapat dilihat pada gambar 6. Pada percobaan ke 6 (enam) COP-nya 1,24 dengan efisiensi 82 %. COP terbesar pada percobaan ke 5 (lima) 1,26 dan efisiensi tersebar pada percobaan ke 5 (lima) 84 %.



Gambar 6 COP (Coeffisien of performance) dan efisiensi system (mesin) refrigerasi siklus Joule-thompson.

4. KESIMPULAN

Temperatur evaporator terendah yang dapat dicapai pada sistem (mesin) refrigerasi siklus Joule-thompson ini adalah -86°C , COP 1,24 dan efisiensi 82 % pada saat komposisi campuran refrigeran propane 63 %, iso-butane 27 % dan metana 10%.

Kecepatan pencapaian temperatur evaporator relatif lebih cepat, yaitu sekitar $-13,5^{\circ}\text{C}$ per menit, sehingga memiliki potensi untuk dijadikan mesin pendinginan cepat (*fast cool-down*).

Penambahan prosentase komposisi metana tidak selalu akan menurunkan temperatur evaporator, tetapi juga dapat menaikkan tekanan dan temperatur suction, tekanan dan temperature discharge. Pencapaian temperatur sangat tergantung dari komposisi campuran refrigerant dan penukar kalor yang digunakan.

5.DAFTAR PUSTAKA

1. Alexeev, A., Thiel, A., Haberstroh, Ch., and Quack H., 1997, *Mixed gas J-T Cryocooler with precooling stage*, Lehrstuhl fuer Kaelte- und Kryotechnik, Technische Universitaet Dresden, 01062 Dresden, Germany
2. Alexeev, A., Thiel, A., Haberstroh, Ch., and Quack H., 2000, Study of behavior in the heat exchanger of a mixed gas Joule-Thomson cooler, *Advances in Cryogenic Engineering*, vol.45, p.307-315.
3. ASHRAE, 2009, Fundamental, USA.
4. Arman B., Bonaquist, D.P., Weber J.A., Ziemer A., Acharya A., and Rashad M.A., 2000, Cryogenic rectification method for producing nitrogen gas and liquid nitrogen, *US Patent* 6,125,656.
5. Arora, C.P., 2001, *Refrigeration and Air Conditioning*, 2nd edition, International edition, McGraw-Hill.
6. Bayram, A., Olszewski, J.A., Bonaquist, D.P., Acharya A., and Royal J.H., 2000, Multicomponent refrigerant cooling with internal recycle, *US Patent* 6,065,305.
7. Boiarskii, M., Brodyanskii, V.M., and Longsworth, R.C., 1998, Restrospective of mixed refrigerant technology and modern status of cryocoolers based on one-stage, oil-lubricated compressors, *Advances in Cryogenic Engineering*, vol.43, p.1701-1708.
8. Brostow A.A., Agrawal, R., Herron D.M., and Mark Julian Robert, 2001, Process for nitrogen liquefaction, *US Patent* 6,298,688.
9. Incropera, F.P. and De Witt, 2002, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, 4thed, John Wiley & Sons, New York
10. Kountz, K.J., and Patrick, M.B., 2003, Control method for mixed refrigerant based natural gas liquefier, *U.S. Patent* 6,530,240.
11. Margana, A.S., 2010, Desain dan Studi Eksperimental Mesin Refrigerasi Siklus Joule Thomson Menggunakan Refrigeran Campuran, Thesis Magister, Departemen Teknik Mesin Universitas Gajahmada, Yogyakarta.

12. Mooran, Michael J., Shapiro, Howard N., 2006, *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, Ltd., England
13. Nisenhoff, F., Patten F., and Wolf S.A., 1996, ...And what about cryogenic refrigeration, *Proc. Of International Cryocooler Conference*, June 25-27, Waterville, USA.
14. Podbielniak, W.J., 1936, Art of refrigeration, *U.S. Patent 2,041,725*.
15. Refprod versi 7 (software), Thermophysical Properties Division, NIST (National Institute of Standards and Technology).
16. Sumeru, Andriyanto S., & Rudi S., 2006, Rancang bangun prototipe mesin pendingin temperatur rendah berkapasitas kecil menggunakan dua tingkat kompresor, *Jurnal Itenas, Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni*, Vol. 10, No.2, Juni-Agustus, p.88-95.
17. Sumeru, 2007, Rancang bangun prototipe mesin pendingin temperatur rendah menggunakan metode cascade, *Jurnal RACE, Jurnal Refrigerasi, Tata Udara, dan Energi*, Politeknik Negeri Bandung, Vo. 1, No. 1, Maret, p.15-23.
18. Sumeru, 2008, *Rancang bangun Mesin Refrigerasi Cryogenic dengan Mixed refrigerant*, Politeknik Negeri Bandung.
19. Sumeru, 2009, Analisis pengujian mesin pendingin Joule-Thomson temperature rendah menggunakan refrigerant *binary mixture*, *RACE Jurnal*, Vol. 3, No.3, Oktober, p. 367-375.
20. Venkatarathnam, G., *Liquefaction of nitrogen using mixed refrigerant processes*, *Refrigeration and Airconditioning Laboratory* Department of Mechanical Engineering Indian Institute of Technology Madras Chennai 600036.
21. Venkatarathnam, G., Sentil Kumar P., and Srinivasa Murthy S., 2003, Experimental studies on fast cool down mixed refrigerant cascade refrigerators, *Proceeding of International Conggres of Refrigeration*, ICR0105, Washington D.C.
22. Threlkeld, James L., 1970, *Thermal environmental engineering*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
23. Refprop7, software

Suhanan, 2000, Studi eksperimental Refrigerator Cryogenic Joule-Thompson Menggunakan Kompresor Termik Sistem Adsorpsi, *Media Teknik* No.3, No. ISSN 0216-3012.