



Optimasi sistem pendingin untuk instalasi penyimpanan sementara bahan bakar nuklir bekas di BATAN

Nurul Hanifah^{1*}, Ratiko², I Wayan Sugita¹, Ragil Sukarno¹

¹Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta Timur, 13220, Indonesia

²Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)

Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

*Email: hnflulu1998@gmail.com

Abstrak

Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) yang dihasilkan oleh Reaktor G.A. Siwabessy di Serpong merupakan limbah radioaktif yang tetap menghasilkan panas peluruhan dan harus didinginkan. Sesuai *International Atomic Energy Agency (IAEA) – Safety Standards*, BBNB harus disimpan sedemikian rupa sehingga tidak melepaskan radiasi ke lingkungan sehingga dapat membahayakan pekerja radiasi di dalamnya serta lingkungan. Metode penyimpanan BBNB yang banyak digunakan adalah dengan disimpan pada kolam penyimpanan. Dengan demikian, dapat memproteksi radiasi yang dapat ditimbulkan oleh BBNB dan dapat mendinginkan panas peluruhan yang terus dikeluarkan oleh BBNB hingga energinya habis. Salah satu komponen utama pada pendinginan BBNB di Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (IPSB3) adalah sistem pendingin menggunakan *chiller*. *Chiller* tersebut yang dibutuhkan untuk menjaga air kolam BBNB tetap pada suhu operasi yang diizinkan dan digunakan juga mendinginkan ruangan IPSB3. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai *decision variables* (beberapa variabel yang mempengaruhi kondisi optimum yang diinginkan) pada *chiller* di IPSB3 sehingga diperoleh *safety* dan *cost* yang optimum pada pengoperasian *chiller*. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan eksperimen berupa pengambilan data pengukuran pada panel *chiller* menggunakan alat PQA HIOKI 3197; menggambar desain gedung IPSB3 menggunakan program *drawing 3D Google SketchUp* untuk input data perhitungan *cooling load* menggunakan *Energy plus software* dan melakukan perhitungan optimasi dengan *software* MATLAB. Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan bahwa konsumsi daya kompresor setelah optimasi adalah sebesar 34,84 kW. Hasil akhir optimasi tersebut mendapatkan nilai tengah untuk *safety* sebesar 618,82 Bq/m³ dan *cost* sebesar Rp.872.197.000. Kesimpulan dari optimasi *multi-objective* dengan *genetic algorithm* yang dilakukan pada penelitian ini menunjukkan bahwa *chiller* yang digunakan memenuhi kriteria fungsi *safety*, tetapi dengan *cost* yang lebih rendah. Dengan demikian, *chiller* yang digunakan dapat memenuhi kriteria keselamatan operasi dan biaya operasional yang rendah untuk terus dioperasikan di gedung IPSB3 BATAN.

Kata kunci : Optimasi *multi-objective*, *Chiller*, Bahan bakar nuklir bekas, Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy

Optimization Of Cooling System for the Interim Storage for Spent Nuclear Fuel at BATAN

Abstract

Spent Nuclear Fuel (SNF) produced by the G.A. Siwabessy research reactor in Serpong is radioactive waste which still produces heat of decay and must be cooled. According to the *International Atomic Energy Agency (IAEA) - Safety Standards*, SNF must be stored in a condition that does not endanger radiation workers in it as well as the environment. The method of SNF storing that is widely applied is by storing it in a wet storage pool, thus protecting the radiation that can be generated by SNF and cooling the decay heat that continues to be released by SNF until its energy runs out. One of the main components in the cooling of SNF in the interim storage of spent fuel (ISSF) is a chiller system using chiller. The chiller is needed to keep the SNF pool water at the permitted operating temperature and is used to cool the SNF room. The purpose of this study was to obtain the value of the decision variables (several variables that affect the desired optimum conditions) in the chiller in SNF in order to obtain optimum safety and cost for chiller operation. The method used is to conduct experiments in the form of taking measurement data on the chiller panel using the PQA HIOKI 3197; drawing the SNF building design using *Google SketchUp 3D drawing program* to input cooling load calculation data using *Energy plus software* and performing optimization calculations with *MATLAB software*. The analysis results obtained show that the compressor power consumption after optimization is 34.84 kW. The final result of this optimization gets a mean value for safety of 618.82 Bq/m³ and a cost is Rp.872,197,000. The conclusion from the *multi-objective optimization* with the *genetic algorithm* carried out in this study shows that the chiller used meets the safety function criteria but with a lower cost. Thus, the chiller used can meet the operational safety criteria and low operating costs to continue to operate in the SNF building at BATAN.

Keywords: Multi-objective optimization, Chiller, Spent Nuclear Fuel, Reactor G.A Siwabessy

1. Pendahuluan

Untuk menyimpan bahan bakar nuklir bekas (BBNB) dari operasi Reaktor Serba Guna G.A Siwabessy

(RSG-GAS) yang dioperasikan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) terdapat sebuah fasilitas Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (IPSB3).

Bahan bakar nuklir bekas adalah bahan bakar yang kapabilitas untuk melakukan reaksi nuklirnya sudah berkurang melewati batas yang ditentukan. Dalam terminologi nuklir, BBNB adalah bahan bakar yang sudah tidak digunakan lagi dalam pengoperasian reaktor nuklir. Dari sudut pandang keselamatan dan ekonomi, BBNB sudah tidak memiliki kapabilitas untuk melakukan reaksi nuklir yang berkelanjutan. Meskipun sudah disimpan beberapa tahun, BBNB masih terus memancarkan radiasi dan panas peluruhan. Panas peluruhan dari BBNB ini harus terus menerus didinginkan agar selongsong BBNB tidak rusak dan dapat melepaskan radiasi ke lingkungan. Metode penyimpanan BBNB yang biasa digunakan sesuai International Atomic Energy Agency (IAEA) – *safety standards* adalah dengan penyimpanan basah (*wet storage*) menggunakan air di dalam kolam. Air bebas mineral (*demineralized water*) yang didinginkan oleh sistem pendingin (*chiller*) digunakan sebagai pendingin panas peluruhan dari BBNB tersebut. Dengan demikian, panas berlebih yang dapat mengakibatkan rusaknya integritas BBNB dapat dicegah dan tidak menyebabkan material radioaktif terlepas ke lingkungan [1,2].

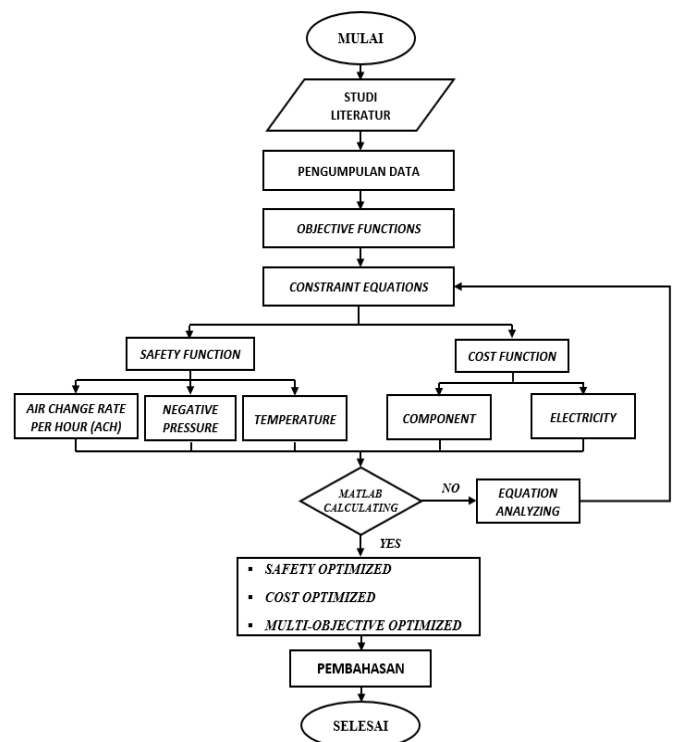
Chiller di IPSB3 digunakan untuk mendinginkan air kolam sesuai batas suhu operasi yang ditetapkan, menjaga suhu peralatan yang digunakan dalam pengoperasian, dan untuk mendinginkan udara ruangan sehingga nyaman bagi operator dan pekerja radiasi. Secara umum, dengan menggunakan *chiller*, dapat dicapai tingkat kenyamanan termal yang baik sehingga akan meningkatkan kinerja dari manusia maupun mesin yang digunakan [3, 4]. Terdapat tiga kondisi yang sangat penting dalam menentukan tingkat kenyamanan termal dari suatu sistem pendingin, yaitu: temperatur, humiditas dan aliran udara di dalam ruangan yang dikondisikan [5,6]. Pada proses pengkondisian tersebut, *chiller* dapat memindahkan kalor dari suatu beban proses ke lingkungan. Dalam menghasilkan kinerja *chiller* yang baik diperlukan suatu pengukuran-pengukuran dan analisa kinerja mesin *chiller* [7]. Cara yang biasa dilakukan dalam menganalisis kinerja mesin *chiller* yaitu melalui perhitungan dan simulasi menggunakan *software*. Dalam operasinya, sistem pendingin *chiller* memerlukan perbaikan dan proses optimasi agar tetap menghasilkan unjuk kerja yang baik. Optimasi yang dimaksud merupakan suatu kegiatan yang dilakukan dalam rangka mengoptimalkan sesuatu yang sudah ada, atau merancang dan membuat sesuatu secara optimal [8]. Di dalam *chiller* biasanya digunakan refrigeran dengan titik didih yang rendah agar menghasilkan kinerja termal yang baik dalam mendinginkan air (*chilled water*) yang selanjutnya dialirkan ke *air handling unit* (AHU) [9].

Sistem pendingin *chiller* yang digunakan pada IPSB3 menggunakan siklus kompresi uap dan dalam operasinya membutuhkan pasokan energi listrik yang cukup besar. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk melakukan efisiensi terhadap pengoperasian *chiller* tersebut adalah dengan melakukan kalkulasi optimasi. Oleh karena itu, maka kegiatan optimasi ini dilakukan untuk dapat

menjamin bahwa keselamatan radiasi menjadi prioritas utama sesuai dengan desain keselamatan yang ditetapkan oleh BATAN dan IAEA. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai *decision variables* yang diinginkan pada *chiller* di IPSB3 sehingga dapat diperoleh *objective functions* (*safety* dan *cost*) yang optimum. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini dengan melakukan pengambilan data berupa pengukuran pada panel *chiller* menggunakan alat *Power Quality Analyzer* HIOKI 3197; menggambar desain gedung IPSB3 menggunakan program *drawing 3D Google SketchUp* dan melakukan perhitungan dengan *software* matlab. Penelitian diharapkan memiliki manfaat sebagai pengetahuan optimasi *chiller* untuk gedung IPSB3 sehingga memenuhi standar desain keselamatan yang ditetapkan oleh BATAN dan IAEA serta memiliki efisiensi pengoperasian yang tinggi.

2. Metode Penelitian

Diagram alur pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur penelitian optimasi *chiller*

Langkah yang dilakukan dalam optimasi *chiller* IPSB3 adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Gedung KH-IPSB3 [10]

1. Melakukan pengambilan data pada *chiller* menggunakan alat PQA HIOKI 3197 di gedung IPSB3. PQA HIOKI 3197 adalah alat ukur dalam pengukuran kualitas listrik. Pada penelitian ini *clamp* yang digunakan yaitu model 9661 dengan spesifikasi seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi PQA HIOKI 3197 [11]

<i>Power</i>	300,0 W – 9 MW
Arus maksimum	AC 500,0 A
Tegangan maksimum	600,0 V
Dasar akurasi	Voltage: $\pm 0,3\%$ RDG. $\pm 0,2\%$ F.S
<i>Current</i>	$\pm 0,3\%$ RDG. $\pm 0,2\%$ F.S. + akurasi sensor arus
Daya aktif	$\pm 0,3\%$ RDG. $\pm 0,2\%$ F.S. + akurasi sensor arus (di faktor daya = 1)

2. Pengukuran dilakukan pada panel *chiller* yang difokuskan untuk mengukur konsumsi daya *chiller* selama 6 hari dengan interval waktu 15 menit.



Gambar 3. *chiller* IPSB3



Gambar 4. Panel *chiller* IPSB3

3. Kalkulasi *cooling load* (energi pendinginan yang diperlukan) gedung IPSB3 menggunakan *Energy plus software* dengan terlebih dahulu menggambar desain gedung IPSB3 menggunakan program *drawing 3D Google SketchUp 2019* yang diperlukan untuk *input* data ke *Energy plus*.
4. Menggunakan Matlab 2020A untuk mengoptimasi fungsi *safety*, simulasi, permodelan dan pembuatan grafik berupa *pareto frontier*, serta mengintegrasikannya dengan *software* Refprop yang digunakan untuk mengkalkulasi segala hal yang berhubungan dengan sifat-sifat refrigeran.

2.1 Objective Function

Penelitian ini membahas mengenai optimasi *multi-objective* dari sistem ventilasi dan pendingin udara dengan *objective functions* berupa *safety* dan *cost*.

2.2 Safety function

Fungsi *safety* merupakan fungsi utama pada penelitian ini. Fungsi ini bertujuan untuk mengurangi konsentrasi kontaminan radioaktif ke batas yang diizinkan. Parameter yang harus dipertimbangkan pada fungsi ini yaitu laju perubahan udara, tekanan negatif dan temperatur. Pada penelitian ini, diperhitungkan 4 (empat) jenis radionuklida dominan berfasa gas yang berpotensi dapat terlepas dari BBNB yaitu *Caesium-137*, *Iodine-131*, *Radon-222* dan *Xenon-133*. Keempat jenis radionuklida tersebut dianalisis menggunakan *software contam* untuk mengetahui konsentrasi dan kepadatan aliran udaranya. Pada analisis ini dipilih jenis yang berpotensi mengeluarkan radionuklida paling besar, yaitu *Iodine-131*.

Dalam melakukan analisis, persamaan pada fungsi *safety* dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$F(1) = C_{iv} + C_{ov} + C_t \quad (1)$$

Konsentrasi yang disebabkan oleh kecepatan udara yang masuk (laju perubahan udara) ke *chiller* (C_{iv}) dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$C_{iv} = 3,008 \cdot e^{-14} x (x_5)^4 - 1,329 \cdot e^{-9} x (x_5)^3 + 2,379 \cdot e^5 x (x_5)^3 - 0,2225x_5 + 1003 \quad (2)$$

Konsentrasi yang disebabkan oleh kecepatan udara yang keluar (tekanan negatif) dari *chiller* (C_{ov}) dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$C_{ov} = -9,141 \cdot e^{-11} \times (x_6)^4 + 1,909 \cdot e^{-6} \times (x_6)^3 - 0,01494 \times (x_6)^2 + 51,82x_6 - 6,684 \cdot e^4 \quad (3)$$

Konsentrasi yang disebabkan oleh temperatur (C_t) dinyatakan sebagai berikut [10]:

$$C_t = -1,1402 \times x_7 + 693,99 \quad (4)$$

2.3 Cost function

Selain fungsi *safety*, fungsi *cost* juga penting pada penelitian ini. Fungsi *cost* terdiri dari biaya investasi modal (PVC) dan biaya listrik (PVE) dari seluruh sistemnya. Persamaan pada fungsi *cost* dapat dinyatakan sebagai berikut [8]:

$$F(2) = PVT = Co = PVE + PVC \quad (5)$$

Biaya awal seperangkat *chiller*, AHU serta sistem saluran dimasukkan ke dalam biaya investasi modal (PVC) [8].

$$PVC = PVC_{chiller} + PVC_{AHU} \quad (6)$$

Total biaya listrik pada tahun pertama pengoperasian terdiri dari harga listrik untuk setiap kWh (C_{el}), tahunan jam operasi (H_{year}) dan total konsumsi daya sistem (W_{tot}). Untuk mengetahui total biaya listrik pada tahun pertama, digunakan rumus seperti berikut ini [10].

$$C_o = C_{el} \times H_{year} \times W_{tot} \quad (7)$$

Dimana:

$$C_{el} = \text{Harga listrik/kWh (Rp. 1035,76)} [10]$$

$$H_{year} = \text{Waktu operasi chiller selama 1 tahun (1920 jam)}$$

$$PVC = \text{Harga beli chiller (Rp. 802.910.000,-)}$$

Konsumsi daya total dari sistem dapat diperoleh menggunakan rumus seperti yang tertulis di bawah ini [12]:

$$\dot{W}_{tot} = \dot{W}_{comp} + \dot{W}_{evap} + \dot{W}_{cond} + \dot{W}_{blower in} + \dot{W}_{blower out} \quad (8)$$

Jumlah total konsumsi daya pada sistem (W_{tot}) [12]

$$\dot{W}_{tot} = \dot{W}_{comp} \quad (9)$$

Menghitung konsumsi daya kompresor (W_{comp}) [10]

$$W_{comp} = \frac{\dot{m}_{ref} \times (h_2 - h_1)}{\eta_{comp}} \quad (10)$$

Menghitung laju aliran massa refrigeran ($\dot{m}_{ref}$) [10]

$$\dot{m}_{ref} = \frac{Q_{e max}}{h_1 - h_4} \quad (11)$$

Menghitung efisiensi kompresor (η_{comp}) [10]

$$\eta_{comp} = 0,85 - 0,046667 \times \left(\frac{P_{cond}}{P_{evap}} \right) \quad (12)$$

Menghitung tekanan pada *evaporator chiller* (P_{evap}) [10]

$$P_{evap} = \text{refpropm}('P', 'T', T_{evap}, 'Q', 1, 'R410A') \quad (13)$$

Dimana: $T_{evap} = x_2$

Menghitung entalpi refrigeran keluar *evaporator chiller* (h_1) [10]

$$h_1 = \text{refpropm}('H', 'T', T_{evap} + T_{sup}, 'P', P_{evap}, 'R410A') \quad (14)$$

Dimana: $T_{sup} = x_4$

Menghitung tekanan pada *kondenser* (P_{cond}) [10]

$$P_{cond} = \text{refpropm}('P', 'T', T_{cond}, 'Q', 1, 'R410A') \quad (15)$$

Dimana: $T_{cond} = x_1$

Menghitung entalpi uap refrigeran pada sisi *outlet* kompresor (h_2) [10]

$$h_2 = \text{refpropm}('H', 'P', P_{cond}, 'S', S_1, 'R410A') \quad (16)$$

Dengan S_1 [10],

$$S_1 = \text{refpropm}('S', 'T', T_{evap} + T_{sup}, 'P', P_{evap}, 'R410A') \quad (17)$$

Menghitung entalpi refrigeran yang masuk ke *evaporator* (h_4) [10]

$$h_4 = \text{refpropm}('H', 'T', T_{cond} - T_{sub}, 'Q', 0, 'R410A') \quad (18)$$

dengan $T_{sub} = x_3$

2.4 Decision Variables

Pada penelitian ini ada 7 (tujuh) variabel yang paling mempengaruhi kondisi optimum, seperti:

Tabel 2. *Decision Variables*

Decision Variables			Constraints
$x(1)$	T_{cond} (K)	Temperatur kondenser	$303.15 \leq x(1) \leq 313.15$
$x(2)$	T_{evap} (K)	Temperatur evaporator	$277 \leq x(2) \leq 285$
$x(3)$	ΔT_{sub} (K)	Selisih temperatur subcooled	$1 \leq x(3) \leq 10$
$x(4)$	ΔT_{sup} (K)	Selisih temperatur superheated	$1 \leq x(4) \leq 10$
$x(5)$	V_{in} (m ³ /h)	Laju alir volumetrik masuk	$3000 \leq x(5) \leq 8700$
$x(6)$	V_{out} (m ³ /h)	Laju alir volumetrik keluar	$4000 \leq x(6) \leq 10000$
$x(7)$	T_{room} (K)	Temperatur ruangan	$293.15 \leq x(7) \leq 301.15$

2.5 Constraints

Fungsi objektif didapatkan dari analisis persamaan yang diterapkan pada sistem dan dibatasi oleh *constraints*. Misalnya, untuk contoh *constraints* seperti temperatur *evaporator* maksimal dibatasi 12°C, temperatur *kondenser* minimal 30°C dan juga beberapa variabel yang telah dituliskan pada Tabel 2. *Constraints* didapatkan dari profil temperatur pada *kondenser* dan *evaporator* yang berupa *bound* (*lower* dan *upper*). *Constraints* dapat dituliskan seperti berikut:

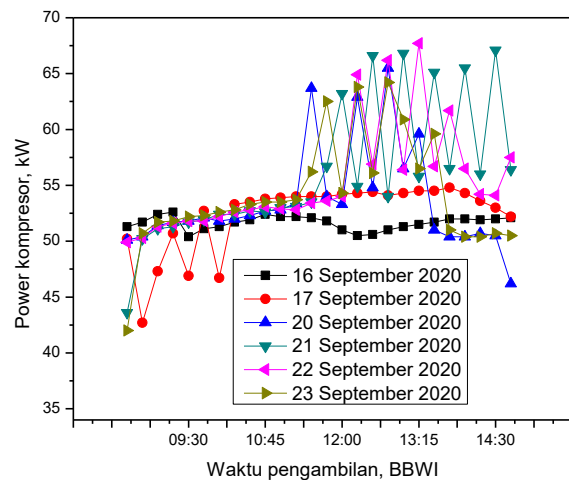
Lower : [303.15 277.15 1 1 1682 5200 291.15]

Upper : [313.15 285.15 10 10 1920 6000 310.15]

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis konsumsi daya chiller

Hasil pengukuran *konsumsi daya chiller* yang diukur menggunakan PQA HIOKI 3197 ditunjukkan pada Gambar 5 :

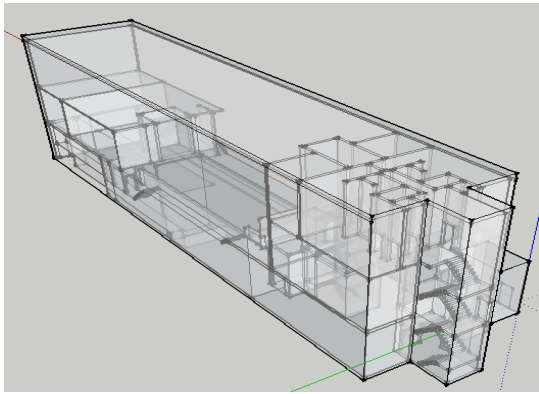


Gambar 5. konsumsi daya *chiller* IPSB3

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa konsumsi daya *chiller* mengalami kenaikan dan penurunan yang bergantung pada kondisi udara di gedung IPSB3 akibat pengaruh udara luar. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rerata daya *chiller* IPSB3 selama 6 hari adalah sebesar 52,2 kW. Pada pengukuran daya *blower* secara manual didapatkan sebesar 6 kW. Daya pada kompresor (*cooling power*) didapatkan dari selisih rerata daya *chiller* dengan daya *blower* hasil pengukuran. Didapatkan hasil *cooling power* sebesar 46,2 kW. Hasil pengukuran rerata daya *chiller* dan *blower* menunjukkan hasil yang sudah cukup baik untuk memenuhi kebutuhan pendinginan gedung IPSB3 karena sudah dipasang *capasitor bank*. Dari segi ini yang dibutuhkan adalah *power* yang merepresentasikan energi yang diperlukan oleh *chiller* dan nantinya akan digunakan untuk mendinginkan kolam dan ruangan yang memenuhi kebutuhan pendinginan (*cooling load*)

3.2 Analisis Data Cooling Load

Kalkulasi *cooling load* (energi pendinginan yang diperlukan) dilakukan dengan *software Energy plus*. Sebagai data *input* untuk kalkulasi *cooling load* menggunakan *Energy plus* diperlukan pembuatan gambar rinci bangunan IPSB3 menggunakan *software sketchUp*. Pembuatan sketsa bangunan dibuat semirip mungkin dengan bangunan aslinya.



Gambar 6. Desain IPSB3 menggunakan SketchUp

Untuk mencapai target temperatur yang diinginkan, sistem pendingin harus dapat mengatasi sumber panas yang masuk ke bangunan IPSB3 baik itu berupa kalor transmisi, ifiltrasi, sumber panas internal, serta banyaknya populasi di bangunan itu. *Cooling load* didapatkan dari desain bangunan IPSB3 yang dapat dilihat pada gambar 6 yang ditransfer ke *software Energy Plus* kemudian memasukkan lokasi lintang dan bujur letak bangunan IPSB3 dan dikalkulasi menggunakan *weather data* selama satu tahun yang ada di *Energy Plus*. Hasil kalkulasi *cooling load* dapat dilihat pada Tabel 3.

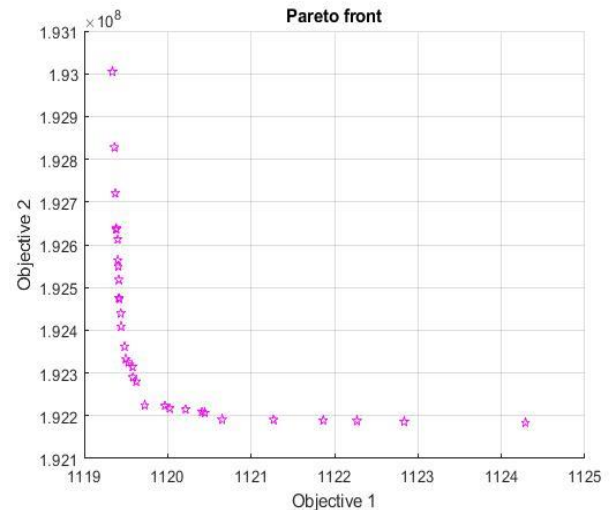
Tabel 3. Data maksimum dan rerata *cooling load*

	kW	TR	Latent	Sensib el	SHR
Max	398,39	113,5	245,23	201,7	51%
Average	142,04	40,46	69,5	72,5	51%

Dari Tabel 3 dapat dilihat bahwa *average* sebesar 142 kW pada *cooling load* di atas dapat memenuhi kebutuhan *chiller* IPSB3 yang berkapasitas 60 kW. Namun, pemilihan *chiller* perlu mempertimbangkan *cooling load* maksimum selama satu tahun, sehingga *chiller* tersebut dapat memenuhi *cooling load* pada waktu *cooling load* maksimum sebesar 398,39 kW.

3.3 Analisis Optimasi

Dari data-data yang ada kemudian dilakukan analisis optimasi seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pareto frontier

Pada Gambar 7 menunjukkan hasil objektif perlu ditarik garis lurus 45° untuk mendapatkan kondisi yang optimal baik dari segi *safety* dan *cost*. Dari hasil *multi-objective optimization* menggunakan *command optimization toolbox (optimtool)* dengan *solver gamultobj* diperoleh nilai *decision variables* dan *objective functions* yang optimal seperti terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai *decision variable* hasil dari optimasi

Decision variable	Base case	Safety optimized	Cost optimized	Multi-objective optimized
<i>Tcond</i> (K)	306	303,15	303,2	303,15
<i>Tevap</i> (K)	278,8	285,15	285,1	285,15
<i>Atsub</i> (K)	5	9,9	9,6	9,98
<i>Atsup</i> (K)	3	4,8	7	4,9
<i>Vin</i> (m ³ /h)	14.9	18.714	18.859,	18.855,5
<i>Vout</i> (m ³ /h)	19.0	5.984,2	5.989	5.988,1
<i>Troom</i> (K)	298	308,7	310,1	310,1

Dengan persamaan-persamaan yang telah ditentukan, dapat dihitung nilai analisis hasil optimasi pada fungsi *safety*, *cost* dan *multi-objective* seperti disajikan pada Tabel 5 dan 6.

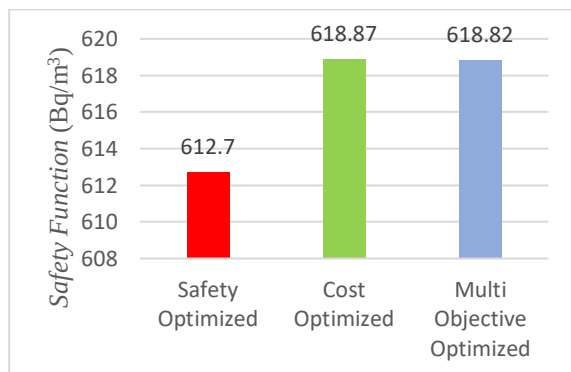
Tabel 5. Nilai analisis optimasi pada *safety function*

	<i>Safety optimized</i>	<i>Cost optimized</i>	<i>Multi-objective optimized</i>
C_{iv} (Bq/m ³)	149,93	158,93	158,65
C_{ov} (Bq/m ³)	120,77	119,53	119,76
C_t (Bq/m ³)	342,01	340,41	340,41
<i>Safety</i> (Bq/m ³)	612,70	618,87	618,82

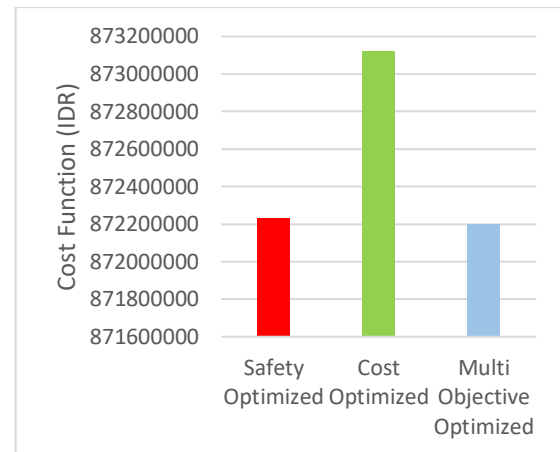
Tabel 5. Nilai analisis optimasi pada *cost function*

	<i>Safety optimized</i>	<i>Cost optimized</i>	<i>Multi-objective optimized</i>
W_{comp} (kW)	34,85	35,30	34,84
<i>PVE</i> (IDR)	69.320.000	70.211.000	69.287.000
<i>Cost</i> (IDR)	872.230.00	873.121.00	872.197.00

Selanjutnya, nilai-nilai yang ada pada Tabel 4 dan 5 dianalisis kembali dengan grafik seperti terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.

**Gambar 8.** Hasil analisis optimasi pada *safety function*

Dari Gambar 8 dapat dijelaskan bahwa konsentrasi kontaminan yang minimum termasuk dalam sistem yang dioptimalkan untuk *safety*. Nilai minimum saat ini dari total biaya untuk sistem adalah milik sistem yang dioptimalkan secara *cost*. Didapatkan kalkulasi biaya terdiri dari biaya operasional dan biaya investasi modal *chiller* selama setahun dengan mempertimbangkan bunga selama 20 tahun operasi seperti ditunjukkan pada Gambar 9.

**Gambar 9.** Hasil analisis optimasi pada *cost function*

Dari kedua Gambar di atas, ditunjukkan bahwa biaya yang rendah dicapai oleh *safety optimized* sebesar Rp.872.230.000 dibandingkan dengan *cost optimized* sebesar Rp.873.121.000, tetapi seperti yang terlihat pada Gambar *safety function*, konsentrasi kontaminan lebih tinggi terjadi pada *cost optimized* sebesar 618,87 Bq/m³ daripada *safety optimized* sebesar 612,7 Bq/m³. Jika konsentrasi kontaminan dikurangi menjadi batas yang sangat aman, biaya sudah cukup rendah.

Tetapi jika melihat pada *multi-objective optimized* pada *cost function* didapatkan biaya yang sedikit lebih rendah dibandingkan pada *safety optimized* yaitu sebesar Rp. 872.197.000. Oleh karena itu, diterapkan *multi-objective optimization*, sehingga didapatkan nilai tengah dimana konsentrasi kontaminan masih dalam kondisi desain yang ditetapkan sebesar 618,82 Bq/m³ dan biayanya tidak terlalu tinggi yaitu sebesar Rp.872.197.000 untuk tahun pertama yang dibayarkan. Tahun selanjutnya untuk biaya yang dibayarkan hanya biaya operasional (*PVE*) saja sebesar Rp.69.287.000 karena pembelian *chiller* sudah diselesaikan pada tahun pertama.

4. Kesimpulan

Multi-objective optimization di penelitian ini dikembangkan dari dua *single-objective optimization* (*safety* dan *cost*) yang dikalkulasi secara bersamaan. Dari hasil dari optimasi *multi-objective* didapatkan kondisi optimum yang memenuhi batas aman *safety* namun dengan *cost* yang lebih rendah. *Safety optimization* dipertimbangkan dengan batasan tingkat konsentrasi radioaktif, sedangkan *cost optimization* difokuskan pada pembatasan konsumsi daya pada sistem.

Dari *multi-objective optimization* didapatkan nilai tengah dimana konsentrasi kontaminan masih dalam kondisi desain yang ditetapkan oleh BATAN sebesar 618,82 Bq/m³ dan *cost* tidak terlalu tinggi yaitu sebesar Rp.872.197.000 untuk tahun pertama yang dibayarkan. Tahun selanjutnya untuk *cost* yang perlu dibayarkan hanya biaya operasional (*PVE*)

sebesar Rp.69.287.000 karena pembelian *chiller* sudah diselesaikan pada tahun pertama.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa *chiller* dapat memenuhi kriteria keselamatan operasi dan biaya operasional yang rendah untuk terus dioperasikan di gedung IPSB3 BATAN. Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat juga untuk digunakan dalam mengoptimasi kebutuhan *chiller* pada instalasi nuklir lainnya.

Referensi

- [1] M. H. Kusuma, "Disertasi Doktor: Sistem Pendingin Pasif di Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas Nuklir dengan Menggunakan Pipa Kalor," Universitas Indonesia, 2017.
- [2] Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, "Fasilitas Kanal Hubung – Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3)." .
- [3] D. Supriyadi, "Analisis Kinerja Air Cooler sebagai Dehumidifier pada Air Compressor System." Universitas Mercu Buana Jakarta, 2018.
- [4] F. Nurhadi, "Analisis Kinerja *Chiller* Water Cooled Pada Proyek Scientia Office Park Serpong," Universitas Mercu Buana, 2014.
- [5] W. F. Stoecker and W. N. Jones, "Refrigeration and Air Conditioning. The McGraw-Hill," Inc. New York, 1982.
- [6] K. Anwar, "Efek beban pendingin terhadap performa sistem mesin pendingin," *SMARTek*, vol. 8, no. 3, 2010.
- [7] Maya Firanti Putri, "Analisis Kinerja Mesin *Chiller* di Gedung Senayan City," Universitas Negeri Jakarta, 2016.
- [8] Ratiko, "Optimasi Sistem Pengkondisian Udara Untuk Top Coat Booth pada Industri Otomotif di Indonesia," Universitas Indonesia, 2011.
- [9] H. Rahman, "Analisis Kinerja Mesin *Chiller* Sentrifugal pada Gedung X," Universitas Indonesia, 2004.
- [10] R. Ratiko, "Optimasi Multi Objektif Sistem Pendingin pada Ruang Penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas Tipe Vault," *J. Teknol. Pengelolaan Limbah*, vol. 15, no. 2.
- [11] S. Prepar, "3197 Power Quality Analyzer Measurement Guide Screen and Key Operation HARMONICS," no. 4, pp. 1–2.
- [12] H. Sayyaadi and M. Nejatolahi, "Multi-objective optimization of a cooling tower assisted vapor compression refrigeration system," *Int. J. Refrig.*, vol. 34, no. 1, pp. 243–256, 2011.