

Perancangan Sistem Mekanik dan Estimasi Biaya Retrofit Mesin Milling BRIDGEPORT Menjadi Sistem CNC 3 Axis

M.Fathir Hasby A¹, Muhamad²

^{1,2}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat 40559

E-mail : ¹m.fathir.hasby.tpk18@polban.ac.id ² muhamad.tm014n@polban.ac.id

ABSTRAK

Pembuatan produk dalam skala yang besar serta proses yang cepat merupakan sebuah tujuan utama pada setiap pekerjaan di bidang manufaktur. Hal ini tidak terlepas dari tingkat efektivitas pada proses permesinan. Penggunaan mesin milling konvensional masih menjadi pilihan utama pada proses permesinan. Dikarenakan umur dan kekurangan dalam perawatan mengakibatkan penurunan performa dari mesin milling konvensional. Beririsan dengan hal tersebut, pengembangan teknologi terus berkembang pesat salah satunya adalah retrofit. Tujuan dari penelitian ini menghasilkan konsep rancangan mekanik untuk penambahan komponen mesin milling manual untuk mendukung sistem CNC 3 axis beserta estimasi biaya. Metode yang dilakukan untuk mencapai hasil retrofit tersebut berupa perencanaan, perancangan konsep, *embodiment*, serta *detail* desain yang berisi anggaran biaya komponen baik standar dan non-standar. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan luaran berupa konsep rancangan mekanik untuk menerapkan sistem CNC 3 axis. Mengganti beberapa komponen manual membuat mesin milling manual sudah bisa digunakan secara otomatis dengan menghabiskan biaya sebesar Rp. 30.850.000,00.

Kata Kunci

Retrofit, Milling, CNC, Teknologi, Biaya

1. PENDAHULUAN

Pembuatan produk dalam skala yang besar serta proses yang cepat merupakan sebuah tujuan utama pada setiap pekerjaan di bidang manufaktur. Hal ini tidak terlepas dari tingkat efektivitas pada proses permesinan. Proses permesinan adalah sebuah proses membentuk sebuah benda kerja sesuai dengan yang diinginkan dengan cara menambahkan atau membuang sebagian dari benda kerja tersebut [1]. Penggunaan mesin konvensional masih menjadi pilihan utama dalam proses permesinan dimasa sekarang ini. Mesin konvensional merupakan mesin yang energi gerak penggunaannya masih manual. Salah satu mesin konvensional yang masih sering digunakan adalah mesin milling.

Mesin milling adalah mesin perkakas yang dalam proses pemotongan benda kerjanya dengan menyayat atau memakan benda kerja menggunakan alat potong bermata banyak yang berputar (*Multipoint Cutter*) [1]. Seiring bertambahnya umur dari mesin milling, sering ditemui kasus penurunan dari kinerja mesin milling manual ini. Keterbatasan kemampuan, penurunan tingkat akurasi serta proses

produksi yang lambat tidak sebanding dengan permintaan yang terus berkembang.

Penerapan teknologi baru dalam sebuah industri sangat diperlukan. Penerapan teknologi pada mesin yang digunakan bertujuan untuk mengontrol umur setiap mesin, serta menjadi salah satu usaha peremajaan untuk meningkatkan kemampuan mesin dalam proses kerjanya dan diharapkan mampu meningkatkan daya saing suatu perusahaan dengan menerapkan teknologi pada mesin yang digunakan [2]. Salahsatu penerapan teknologi untuk mengatasi penurunan kinerja dari mesin yang sudah berumur adalah dengan proses retrofit. Maka dari itu, dirancanglah proses retrofit mesin milling merek Bridgeport menjadi sistem CNC 3 axis. Gambar 1 menunjukkan mesin milling manual Bridgeport yang akan dilakukan proses retrofit menjadi sistem CNC 3 axis.



Gambar 1 Mesin Milling Bridgeport

Penelitian serupa pernah dilakukan oleh Darshan T.S pada 2018 dengan melakukan penambahan fungsi pada mesin milling skala industri dengan menambah satu axis tambahan berupa *rotary axis* [3]

Tujuan yang akan dicapai yaitu rancang mekanik dan estimasi biaya pada retrofit mesin milling manual merek Bridgeport menjadi sistem CNC 3 axis yang memiliki spesifikasi akhir mirip dengan mesin CNC dipasaran.

2. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan pada retrofit mesin milling manual merek Bridgeport ke sistem CNC 3 axis adalah metode perancangan pada buku “*Engineering Design*” oleh Pahl & Beitz [4]. Tahapan perancangan terdiri dari 4 tahap utama yaitu merencana, perancangan konsep, embodiment, detail desain yang mengkhususkan bahasanya terkait factor anggaran biaya pada proses retrofit. Berikut rincian dari metode yang digunakan:

2.1 Tahap Merencana (Planning)

Pada tahap merencana berisikan identifikasi dari produk retrofit yaitu mesin milling manual merek Bridgeport yang akan di konversi menjadi sistem CNC 3 axis. Pada tahap ini dilakukan proses pembedahan baik dari deskripsi fungsi alat, identifikasi sistem mekanik serta kondisi dari mesin yang berada di PT. METAPOLY ENGINEERING yang selanjutnya diolah untuk mengeluarkan daftar tuntutan

2.2 Tahap Perancangan Konsep

Tahap konseptual desain diawali kegiatan pengembangan dari mesin milling manual menjadi sistem CNC 3 axis. Dimulai dari penambahan fungsi bagian dari diagram fungsi agar mengetahui keterhubungan suatu sistem satu sama lain. Dilanjutkan oleh

penentuan alternatif variasi fungsi bagian yang memungkinkan dari setiap sub fungsi yang akan dikembangkan. Setelah adanya beberapa variasi konsep akan dilakukan penilaian dari berbagai aspek sebagai pembandingan antara satu variasi dengan variasi lain sehingga diperoleh luaran berupa konsep rancangan terpilih.

2.3 Tahap Embodiment

Tahap embodiment desain membahas tentang realisasi variasi konsep terpilih kedalam *modelling* 3D. Sehingga mengetahui setiap komponen yang terdapat pada variasi terpilih baik komponen standar ataupun non-standar. Serta dilakukannya perhitungan beberapa komponen pada kondisi kritis untuk mengetahui kekuatan dan dasar pemilihan komponen. Dan dilakukan perencanaan komponen-komponen non-standar dan ditutup oleh evaluasi kesesuaian dengan daftar tuntutan.

2.4 Tahap Detail Desain

Pada tahap detail desain di perdalam pembahasan tentang biaya produksi sehingga mengeluarkan luaran berupa *bill of material* dari retrofit ini. Sehingga dokumen ini diharapkan bisa menjadi pedoman pembaca terkait anggaran biaya proses retrofit mesin milling manual menjadi CNC 3 Axis.

Gambar 2 menunjukkan alur penelitian yang akan dilakukan selama proses perancangan mekanik dan estimasi biaya.



Gambar 2 Flowchart Metodologi Penelitian

3. Tahap Perancangan

Berikut merupakan hasil setiap langkah perancangan yang dilakukan dalam penelitian perancangan mekanik dan estimasi biaya pada proses retrofit ini:

3.1 Daftar Tuntutan Perancangan

Tahap merencana merupakan tahap awal yang dilakukan, dimana pada tahap ini mengeluarkan sebuah daftar tuntutan

perancangan yang dijadikan dasar perancangan selanjutnya. Daftar tuntutan ini diperoleh dari hasil identifikasi mesin milling manual. Berikut merupakan daftar tuntutan yang telah didapatkan:

- Penggantian komponen *lead screw* pada sumbu X dan Y menjadi *ball screw*.
- Penggantian sumber tenaga penggerak dari manual digantikan dengan motor listrik.
- Merancang sistem mekanik pendukung untuk pergerakan otomatis dengan motor.
- Pembuatan nut bracket yang baru untuk dudukan nut ball screw perpotongan sumbu X dan Y.
- Pergerakan otomatis sumbu Z mengambil dari pergerakan tuas rack pinion pada head mesin milling manual.

3.2 Perancangan Konsep

Pada tahap perancangan konsep diawali dengan mendeskripsikan fungsi umum dari mesin milling. Fungsi secara umum dari mesin milling adalah untuk melakukan pemakanan pada benda kerja. Pada proses perancangan mekanik ini diperlukan adanya pengembangan terkait fungsi bagian mekanik dari mesin milling manual agar mendukung sistem CNC 3 axis. Tabel 1 menjelaskan fungsi bagian dari pergerakan mekanik mesin milling manual untuk menjelaskan keterkaitan prinsip kerja mekanik mesin.

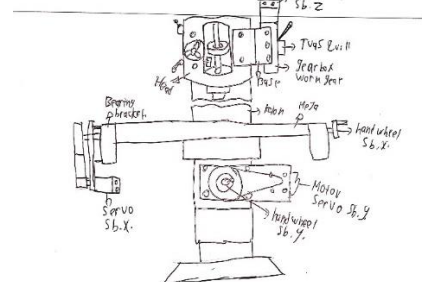
Tabel 1 Fungsi Bagian Mekanik Mesin Milling

No	Fungsi Bagian	Penjelasan
1	Fungsi Pergerakan Sumbu Pemakanan X	Fungsi pergerakan sumbu X adalah untuk melakukan pemotongan memanjang searah sumbu X.
2	Fungsi Pergerakan Sumbu Pemakanan Y	Fungsi pergerakan sumbu Y adalah untuk melakukan pemotongan melintang searah sumbu Y.
3	Fungsi Pergerakan Sumbu Pemakanan Z	Fungsi pergerakan sumbu Z memiliki 2 sumber gerakan yaitu pergerakan dari knee yang naik dan turun. Serta pergerakan dari head mesin untuk

	menurun dan menaikkan pahat.
--	------------------------------

Pencarian setiap alternatif mekanisme fungsi bagian menggunakan tabel morfologi. Tabel morfologi memasukan kemungkinan mekanisme yang selanjutnya dipasangkan menjadi sebuah fungsi bagian.

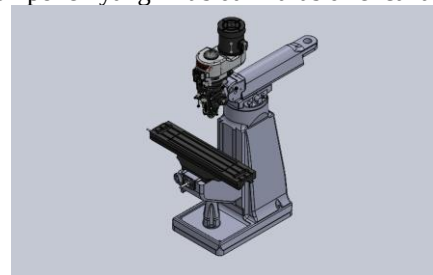
Setiap variasi konsep melalui proses penilaian untuk membandingkan setiap variasi berdasarkan pada kriteria teknik dan kriteria ekonomi dengan metode *scoring*. Berdasarkan hasil pemilihan, Gambar 3 menunjukan variasi konsep terpilih rancangan mekanik.



Gambar 3 Variasi Konsep Terpilih

3.3 Perancangan Embodiment

Pada tahap ini meliputi perhitungan torsi dan gaya pemakanan, perhitungan gaya ulir serta transmisi yang digunakan. Serta pemilihan komponen standar dan pendataan komponen non-standar. Gambar 4 merupakan hasil modelling awal yang berfungsi untuk menggambarkan secara kasar komponen-komponen yang kritis dan harus direncanakan



Gambar 4 Embodiment Perancangan Mekanik

3.3.1 Hasil Perhitungan

a. Gaya Pemakanan

Gaya pemakanan adalah besaran yang dihasilkan pada saat proses pengurangan benda kerja, dimana pada proses ini digunakan pahat $D=32$ mm dan bahan benda kerja adalah S45 C. Sehingga diperoleh gaya pemakanan:

$$F_t = 1.2 \times A \times K_c \times C$$

$$F_t = 1.2 \times 0.1 \times 3975 \times 1.1$$

$$F_t = 524.7 \text{ N}$$

Serta untuk gaya pemakanan aksial menggunakan pendekatan gaya pengeboran dengan $D=25$ mm dengan sudut pahat 118° dengan hasil perhitungan sebagai berikut: [5]

$$F_t = 1.2 \times \frac{d \times f}{4} \times K_c \times C \times \sin \frac{\alpha}{2}$$

F_t

$$= 1.2 \times \frac{25 \times 0.025}{4} \times 4760 \times 1.1 \times \sin \frac{118}{2}$$

$$F_t = 625.1175 \text{ N}$$

b. Torsi Ulir

Torsi ulir yang dibutuhkan untuk menggerakkan sumbu X adalah

$$T = F_{push} \times \frac{d}{2}$$

$$T = 1065.9 \times \frac{0.0295}{2}$$

$$T = 15.72 \text{ Nm}$$

Serta untuk pergerakan sumbu Y membutuhkan torsi yang lebih besar dikarenakan menerima beban yang lebih sebesar:

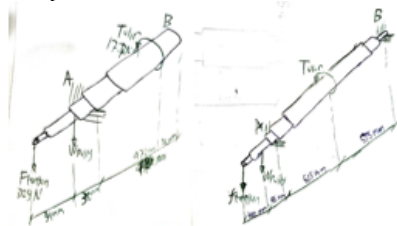
$$T = F_{push} \times \frac{d}{2}$$

$$T = 1136.69 \times \frac{0.0295}{2}$$

$$T = 16.76 \text{ Nm}$$

c. Poros ball screw

Untuk mengetahui besaran moment atau beban terbesar yang terjadi pada poros ball screw sumbu X dan Y diperlukan *free body diagram* (FBD). Gambar 5 menunjukkan gaya yang bekerja (FBD) pada poros ballscrew.



Gambar 5 FBD ball screw X (kanan)&Y (Kiri)

Diperoleh gaya atau beban terbesar yang diterima oleh ballscrew sumbu X adalah 274.5 Nm dan untuk sumbu Y adalah 482.2 Nm.

3.3.2 Pemilihan Komponen Standar

Berdasarkan hasil perhitungan dan modelling, diperoleh data komponen standar pada retrofit ini meliputi controller, power supply, inverter, motor penggerak, driver, proximity, ball screw nut, gearbox. Untuk model dan tipe yang digunakan dilampirkan dalam estimasi biaya.

3.3.3 Pendataan Komponen Non-Standard

Komponen non-standar yang akan diperlukan untuk dilakukan proses manufaktur meliputi bracket motor, kopling poros, dan feed nut bracket. Detail ukuran dan bahan dilampirkan di estimasi biaya.

3.4 Hasil Detail Desain

Tahap ini meliputi model desain yang sudah disesuaikan dengan hasil perhitungan di setiap sumbu nya, serta dilengkapi perhitungan biaya komponen dan manufaktur pada proses retrofit mesin milling manual menjadi CNC 3 axis.

3.4.1 Gambar Assembly

Gambar 6 merupakan gambar assembly hasil rancangan mekanik pada retrofit mesin milling manual menjadi sistem CNC 3 axis.

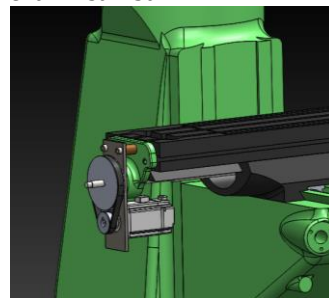


Gambar 6 Assembly Retrofit Mesin Milling

3.4.2 Gambar Sub-Assembly

a. Gerakan Sumbu X

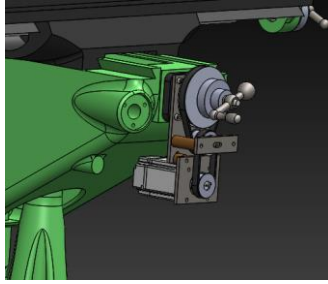
Gambar 7 menunjukkan hasil rancangan mekanik sumbu X



Gambar 7 Sub-Assembly Sumbu X

b. Gerakan Sumbu Y

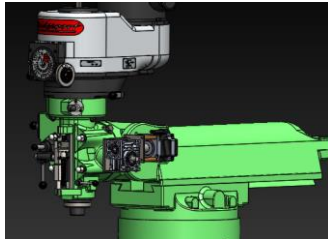
Gambar 8 menunjukkan hasil rancangan mekanik sumbu Y.



Gambar 8 Sub-Assembly Sumbu Y

c. Gerakan Sumbu Z

Gambar 9 menunjukkan hasil rancangan mekanik sumbu Z.



Gambar 9 Sub-Assembly Sumbu Z

4. PEMBAHASAN

Berikut merupakan pembahasan dari hasil perancangan yang sudah dilakukan:

4.1 Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat hasil retrofit adalah sebagai berikut:

- Menggunakan sistem ball screw sebagai penggerak sumbu X dan Y
- Sumber tenaga menggunakan motor servo Panasonic MCDDT3520 untuk sumbu X dan Y serta motor stepper NEMA34 untuk sumbu Z
- Menggunakan transmisi timing belt untuk sumbu X dan Y dengan rasio 30:80 serta gearbox NMRV030 rasio 1:80 untuk sumbu Z
- Feed rate maksimal mesin adalah 800 mm/min
- Panjang lintasan mesin 914 mm (Sumbu X), 305 mm (Sumbu Y), 127 mm (Sumbu Z)
- Variasi kecepatan *spindel* 60-4200 Rpm

Berdasarkan spesifikasi alat yang telah dicapai, mesin milling hasil retrofit ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya:

- *Backlash* dari ballscrew relatif kecil sehingga tingkat presisi dari pergerakan sangat tinggi
- Semua sistem pergerakan sudah terhubung didalam *user interface* sehingga operator tinggal

memasukan G-Code dan M-Code saja.

- Proses pengerjaan yang lebih cepat dibandingkan manual

Perancangan sistem mekanik mengganti *leadscrew* dengan *ballscrew* serta menambahkan penggerak motor servo dan *stepper* membuat pergerakan mekanik pada sistem mesin menjadi lebih efisien dan cepat. Hal ini bisa menghasilkan tingkat produktivitas mesin yang meningkat dikarenakan berbasis CNC dan bisa mengerjakan lebih banyak pekerjaan.

4.2 Estimasi Biaya

Retrofit merupakan proses mengganti dan menambahkan beberapa komponen untuk meningkatkan kemampuan suatu mesin. Pada proses retrofit mesin milling manual menjadi sistem CNC 3 axis ini, membutuhkan biaya yang terbagi menjadi beberapa bagian anggaran biaya yaitu:

a. Biaya Komponen Standar

Berdasarkan data komponen standar pada Tabel 2, dengan berbagai sumber katalog produk diperoleh biaya yang dibutuhkan untuk pengadaan komponen standar adalah Rp.29.100.000,00

Tabel 2 Daftar Komponen Standar

No	Komponen	Model	Jumlah
1	Ball screw nut set	SFU3205-L1200	1 Set
2	Ball screw nut set	SFU3205-L600	1 Set
3	Motor Servo dan Driver	MSMD082P 1* 750 Watt dan driver MCDDT3520	2 Set
4	Motor Stepper dan Driver	NEMA 34 dan driver DM556	1 Set
5	Pully dan Timing Belt	HTD5M-80 Teeth dan 30 Teeth	2 Set
6	Gearbox	NMRV030 1:80	1 Buah
7	Controller	MACH3 BL-USB	1 Buah
8	Inverter	Ripe Inverter AC 3-Phase 380V	1 Buah
9	Bearing	NTN 6802	2 Buah

- b. Biaya Bahan Komponen Non-Standar**
Berdasarkan data komponen non-standar pada Tabel 3, dengan berbagai sumber katalog produk diperoleh biaya yang dibutuhkan untuk pengadaan bahan adalah Rp.1.000.000,00

Tabel 3 Komponen Non-Standar

No	Komponen	Ukuran (mm)	Jumlah
1	Bracket Motor Sb.X	260x85x8	1 Buah
2	Bracket Motor Sb.Y	170x125x8	1 Buah
3	Bracket Motor Sb.Z	86x86x4.5	1 Buah
4	Bracket Poros Idler	35x125x8	1 Buah
5	Bracket Sumbu Z	81x97x8	1 Buah
6	Bracket Gearbox	38x81x4.5	2 Buah
7	Feed Nut Bracket Atas	84 x 112 x 95	1 Buah
8	Feed Nut Bracket Bawah	84 x 70 x 98	1 Buah
9	Spacer SbX	Ø24 x 31	2 Buah
10	Spacer SbY	Ø24 x 67	1 Buah
11	Spacer SbZ	Ø12 x 59	4 Buah
12	Poros Gearbox Z	Ø28 x 105	1 Buah
13	Hub sumbu Z	Ø28 x 15	1 Buah

- c. Biaya Manufaktur**
Biaya manufaktur diambil dari lamanya pengerjaan dan proses manufaktur retrofit mesin milling manual. Dengan asumsi biaya manufaktur Rp.75.000 / jam. Dengan lamanya proses sebanyak 10 jam

sehingga, biaya manufaktur sebesar Rp.750.000,00

d. Biaya Keseluruhan

Secara keseluruhan proses perancangan mekanik pada retrofit mesin milling manual menjadi CNC 3 axis membutuhkan biaya sebesar Rp.30.850.000

5. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini yaitu telah dirancang sebuah sistem mekanik pada retrofit mesin milling manual merek Bridgeport menjadi sistem CNC 3 axis dengan sumber putaran sebuah motor listrik. Mesin hasil retrofit ini dapat melakukan pekerjaan mesin milling dengan lebih efektif dan cepat. Rancangan sistem mekanik telah sesuai daftar tuntutan yang dijadikan sebagai dasar perancangan. Sehingga menjadikan rancangan ini sudah sesuai dengan keadaan asli dari mesin milling. Serta dibutuhkan total anggaran biaya pada proses retrofit ini sebesar Rp.30.850.000,00

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Pratama, *Buku 1 Proses Permesinan*. Purbalingga: Dinas Pendidikan Kabupaten Purbalingga, 2019.
- [2] K. Turnip, P. Atmadi, and A. A. Novianto, "Desain Mekanisme Ballscrew untuk Retrofit Drilling axis Mesin Ficep H-Beam Drilling LFB-200-49," *J. METTEK*, vol. 7, no. 1, p. 10, 2021, doi: 10.24843/mettek.2021.v07.i01.p02.
- [3] T. S. Darshan, K. M. Mohanambica, and H. Basavaraju, "Design and Controlling of Retrofitted 4 Axes Milling Machine for Industrial Applications," *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 3, no. 5, pp. 668–673, 2018.
- [4] G. Pahl and W. Beitz, *Engineering Design and Process*. 1997.
- [5] U. F. Reutlingen *et al.*, "Mechanical and Metal Trades Handbook," p. 428, 2018.

Perbandingan Konsumsi Listrik *Chiller Plant Variable Flow* dan *Constant Flow* di Kings Mall Bandung

Alifa Jamila¹, Andriyanto Setyawan²

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : alifa.jamila.tptu19@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : andriyanto@polban.ac.id

ABSTRAK

Perbandingan konsumsi listrik dan efisiensi *chiller plant* sistem *variable flow* dan *constant flow* perlu untuk dilakukan sebagai salah satu upaya peningkatan efisiensi sistem pengondisian udara di pusat perbelanjaan. Metodologi yang dilakukan adalah dengan melakukan percobaan sistem *variable flow* secara langsung di Kings Mall Bandung dengan penyesuaian *set point* yang diinginkan. Selanjutnya, perbandingan sistem *constant flow* dihitung dengan menyamakan kondisi yang ada pada saat percobaan langsung. Data akhir dari kedua percobaan tersebut merupakan nilai daya yang dihasilkan dari komponen-komponen *chiller plant*. Nilai daya bergantung pada frekuensi motor yang mengatur nilai debit air atau udara. Nilai debit atau udara menyesuaikan kebutuhan *building load* gedung pusat perbelanjaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *chiller plant* sistem *variable flow* dapat menghemat konsumsi listrik yang rata-ratanya sebesar 16.24%, serta menghasilkan efisiensi yang lebih baik sebesar 16.34% dibandingkan dengan sistem *constant flow*.

Kata Kunci

Building Load, frekuensi, debit, daya, efisiensi

1. PENDAHULUAN

Penggunaan listrik di pusat perbelanjaan yang paling besar adalah untuk pengondisian udara, yaitu sekitar 60% dari total penggunaan listrik [1]. Oleh karena itu, upaya untuk melakukan peningkatan efisiensi penggunaan listrik sistem pengondisi udara pada pusat perbelanjaan perlu untuk dilakukan. Salah satu upayanya adalah dengan memilih dan mengatur sistem pengondisi udara yang paling efisien.

Pada pusat perbelanjaan, sistem AC sentral banyak dipilih sebagai sistem pengondisian udara pada gedung. Salah satu yang berperan dalam pengondisian udara oleh AC sentral adalah *chiller plant*. *Chiller plant* merupakan suatu sistem yang terintegrasi antara *chiller*, *chilled water pump* (CHWP), serta tambahan *cooling water pump* (CWP) dan *cooling tower* (jika menggunakan *chiller* jenis *water cooled*), sehingga sistem tersebut dapat memenuhi kebutuhan air dingin yang akan digunakan sebagai pendingin udara pada gedung pusat perbelanjaan. Pada pengoperasiannya, komponen-komponen tersebut mengonsumsi listrik yang nilai besarnya tergantung dari beberapa faktor, diantaranya kecepatan

putaran motor pompa dan kipas *cooling tower* serta langkah pengontrolan komponen-komponen yang ada.

Pada *chiller plant* sistem *variable flow*, digunakan *variable frequency drive* (VFD) untuk mengatur frekuensi putaran motor sehingga debit air dan debit udara yang dihasilkan pompa dan kipas *cooling tower* bisa bervariasi. Sedangkan pada sistem *constant flow* tidak digunakan VFD, sehingga debit air dan debit udara yang dihasilkan selalu sama.

Kedua sistem tersebut melakukan penambahan dan pengurangan jumlah unit dari komponen yang beroperasi bergantung pada kebutuhan beban gedung. Pada *chiller plant* sistem *variable flow*, penambahan dan pengurangan jumlah unit yang beroperasi juga bergantung pada batas maksimum dan minimum frekuensi motor. Sedangkan *chiller plant* sistem *constant flow* tidak bergantung pada batas frekuensi motor.

Pada kondisi beban tertentu, seringkali *chiller plant* sistem *constant flow* mengoperasikan unit komponen yang jumlahnya lebih sedikit dibandingkan sistem *variable flow*. Dengan

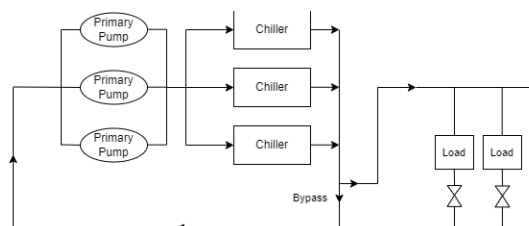
adanya hal tersebut tidak bisa dikatakan jika sistem *constant flow* mengonsumsi listrik lebih sedikit dibandingkan sistem *variable flow*. Untuk mengetahui sistem yang lebih efisien perlu dilakukan perbandingan antara *chiller plant* sistem *variable flow* dan *constant flow* dengan melakukan percobaan langsung salah satu diantara dua sistem serta perhitungan sistem lainnya yang dijadikan sebagai pembanding dan dianggap memiliki kondisi serupa dengan sistem yang dicoba secara langsung.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan konsumsi daya sistem *chiller* dalam mode operasi *constant flow* dan *variable flow*. Konsumsi listrik yang dibahas meliputi konsumsi daya pada *chiller* sendiri, pompa air dingin, pompa air pendingin kondenser, dan kipas *cooling tower*.

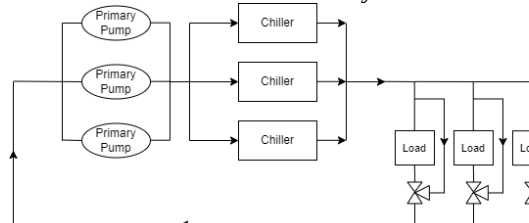
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Primary-only chilled water system

Chilled water pumping system yang paling sederhana memiliki satu tingkat pemompaan primer yang menghubungkan *chiller plant* dan *load* [1]. *Primary-only system* yang pemompaan airnya diatur untuk menghasilkan debit bervariasi disebut sistem *variable primary flow* (VPF). *Control valve* pada *load* yang biasa digunakan sistem VPF adalah berjenis *two-way valve* seperti yang tertera pada Gambar 1. *Primary-only system* yang pemompaan airnya menghasilkan debit konstan disebut sistem *constant primary flow*. *Control valve* pada *load* yang biasa digunakan sistem *constant primary flow* adalah berjenis *three-way valve* seperti yang tertera pada Gambar 2.



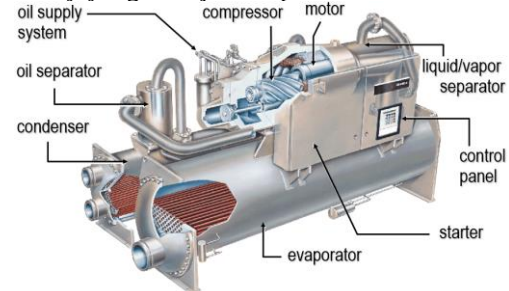
Gambar 10. Variable Primary Flow



Gambar 11. Constant Primary Flow

2.2 Screw Water Chiller

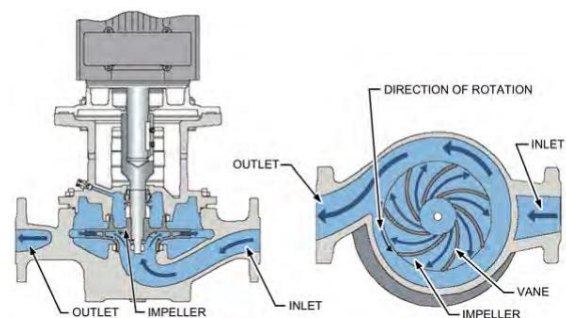
Berdasarkan tipe kompresornya *chiller* terbagi menjadi tiga jenis, yaitu *chiller* dengan kompresor *reciprocating*, sentrifugal, dan *rotary*. *Chiller* dengan kompresor *rotary* dibagi lagi menjadi beberapa jenis, salah satunya adalah kompresor *screw* atau *helical-rotary* yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 12. Screw Water Chiller [2]

2.3 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal memberikan kekuatan utama untuk mendistribusikan air panas dan dingin yang disirkulasikan ulang dalam berbagai sistem pengondisian dan *plumbing* [3]. Dalam pompa sentrifugal, motor listrik atau sumber daya lainnya memutar *impeller* pada *rated speed* (kecepatan putaran pada saat mencapai *horse power* maksimum) motor. Seperti pada Gambar 4, Rotasi *impeller* menambahkan energi ke fluida setelah diarahkan ke pusat atau mata *impeller* yang berputar. Fluida kemudian bekerja dengan gaya sentrifugal dan gaya rotasi, kedua gaya ini menghasilkan peningkatan kecepatan fluida.

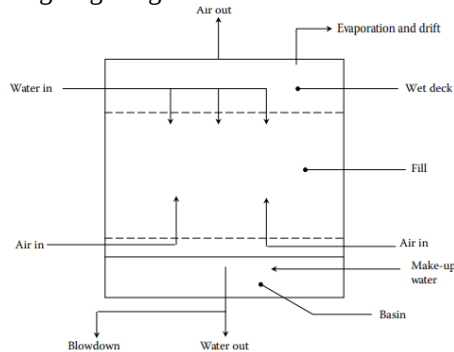


Gambar 13. Pompa sentrifugal [3]

2.4 Cooling Tower

Mesin dan proses industri, serta yang ditujukan untuk kenyamanan manusia, menghasilkan jumlah panas yang besar yang harus terus-menerus dibuang jika mesin dan proses tersebut ingin terus beroperasi secara efisien [4].

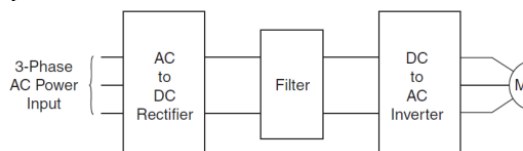
Langkah kerja *cooling tower* secara garis besar yang pertama yaitu air panas yang berasal dari kondensor dipompa menuju *cooling tower* melalui instalasi pipa yang dilengkapi *nozzle* pada bagian ujung. Setelah itu, air panas akan keluar melalui *nozzle* dan disebut dengan tahap *spraying*. Air tersebut kemudian bergerak karena pengaruh dari komponen *fan* atau *blower*. Pada tahap ini, air yang keluar langsung menjalin kontak dengan udara. Lalu air yang temperaturnya sudah berkurang akan ditampung pada *basin* yang kemudian dialirkan kembali ke kondensor. Jika terjadi pengurangan air pada tahap evaporasi dan *blow down*, maka *make-up water* seperti pada Gambar 5 akan ditambahkan melalui katup yang terhubung langsung dengan sumber air terdekat.



Gambar 14. Elemen Cooling Tower [5]

2.5 Variable Frequency Drive

Variable frequency drive (VFD) adalah cara yang paling efisien untuk mengontrol kapasitas. Prinsip kerja dari VFD ditunjukkan pada Gambar 6. Pada dasarnya, VFD mengubah tegangan bolak balik (AC) dari input menjadi tegangan searah (DC) oleh *AC/DC converter/rectifier*, kemudian di-filter untuk menghaluskan hasil penyearah tegangan tersebut dan selanjutnya *DC/AC inverter* akan mengubah kembali tegangan DC menjadi tegangan AC dengan frekuensi tertentu yang sudah diatur tergantung kebutuhan. Karena menggunakan prinsip *inverter* (pengubahan dari DC menjadi AC), di pasaran VFD sering disebut juga sebagai *inverter* untuk beberapa aplikasi.



Gambar 15. Diagram skematik VFD [6]

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Percobaan Langsung

Sistem yang dipilih untuk dilakukan pada percobaan langsung adalah *chiller plant* sistem *variable flow*. Pada percobaan langsung, sistem diatur menggunakan *Building Automation System* (BAS) atau *Chiller Plant Control* (CPC) yang dioperasikan dengan menggunakan *Personal Computer* (PC). BAS berfungsi untuk memonitor dan mengubah *set point* parameter *chiller*, CHWP, CWP, dan *cooling tower*. *Set point* yang diinginkan dapat diubah langsung melalui *local display* BAS. Nilai *set point* yang perlu diatur tertera pada Tabel 1.

Tabel 4. Set point percobaan

Menu	Parameter	Nilai	Satuan
System mode	Maximum stage	3	unit
Chilled water system setting	Temperature	10	°C
	Sub RLA set point	50	%
Condensor water system setting	Temperature	29	°C
	Maximum fan frequency	50	Hz
	Minimum fan frequency	10	Hz
CHWP setting	Maximum frequency	50	Hz
	Minimum frequency	30	Hz
CWP setting	Maximum frequency	40	Hz
	Minimum frequency	30	Hz

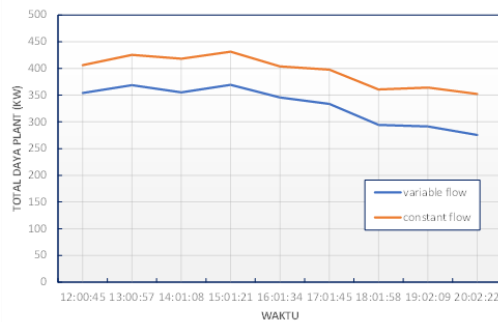
3.2 Pembuatan Data Pembanding

Percobaan yang dilakukan hanya sistem *variable flow*, sehingga perlu data pembanding sistem *constant flow* yang dihitung dengan menganggap kondisi *building load* dan masalah yang ada sama dengan sistem *variable flow* percobaan langsung. Nilai daya *chiller* dihitung dengan menyesuaikan data *selection unit chiller constant flow*. Frekuensi *fan* dan CHWP selalu sama di 50 Hz di setiap kondisi *load*. Nilai daya CWP dianggap selalu sama dengan nilai daya CWP di sistem *variable flow* pada frekuensi 40 Hz.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pengolahan data percobaan langsung dan pembanding, didapatkan nilai perbandingan daya dan efisiensi total dari plant seperti yang tertera pada Gambar 7, Tabel 2, dan Tabel 3. Dengan *building load* yang sama, sistem terhemat adalah sistem *chiller plant variable flow*. Dalam satu hari, sistem ini mengkonsumsi daya listrik yang

rata-ratanya lebih hemat sebesar 16.24% dari sistem constant flow. Selain itu, sistem ini juga lebih efisien sebesar 16.34%.



Gambar 16. Grafik total daya plant terhadap waktu

Tabel 5. Perbandingan sistem variable flow dan constant flow

Jam	Bulding Load (%)	Variable Flow		Constant Flow	
		Daya Plant Total (kW)	Eff (kW/TR)	Daya Plant Total (kW)	Eff (kW/TR)
12:00:45	49,20	354	0.55	406	0.63
13:00:57	51,37	369	0.55	425	0.64
14:01:08	50,05	355	0.55	418	0.64
15:01:21	52,47	369	0.54	431	0.63
16:01:34	48,76	346	0.54	404	0.64
17:01:45	47,66	334	0.54	398	0.64
18:01:58	40,86	295	0.55	361	0.68
19:02:09	41,52	291	0.54	364	0.67
20:02:22	39,20	275	0.54	352	0.69
Rata-rata		332	0.55	396	0.65

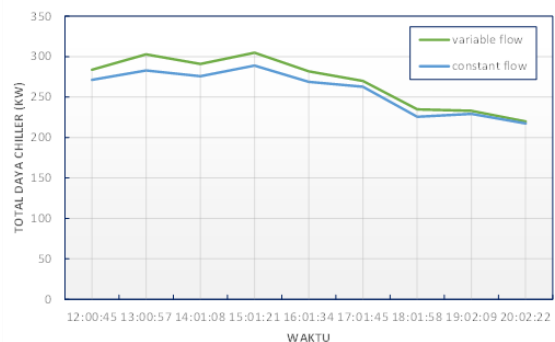
Tabel 6. Nilai saving sistem variable flow terhadap constant flow

Jam	Daya Plant Total (kW)	Daya Plant Total (%)	Eff (kW/TR)	Eff (%)
12:00:45	52	12.82	0.08	12.82
13:00:57	57	13.29	0.08	13.29
14:01:08	63	15.06	0.10	15.06
15:01:21	62	14.36	0.09	14.36
16:01:34	58	14.41	0.09	14.41
17:01:45	64	16.10	0.10	16.10
18:01:58	66	18.32	0.12	18.32
19:02:09	73	20.00	0.13	20.00
20:02:22	77	21.83	0.15	21.83

Rata-rata	64	16.24	0.11	16.34
-----------	----	-------	------	-------

4.1 Analisis Konsumsi Listrik Chiller

Walaupun konsumsi listrik sistem *variable flow* keseluruhan *plant* lebih hemat, tetapi konsumsi listrik komponen *chiller constant flow* lebih hemat dibandingkan *chiller variable flow* yang ditunjukkan pada Gambar 8. Debit air yang konstan di berbagai kondisi *load* mengakibatkan nilai temperatur air yang masuk ke *chiller* bervariasi, sehingga selisih temperatur mengecil seiring berkurangnya *load chiller*. Nilai selisih temperatur sebanding dengan nilai perpindahan panas, sehingga ketika nilai perpindahan panas mengecil, kebutuhan listrik juga mengecil. Pada sistem *chiller variable flow*, yang terjadi adalah sebaliknya. Debit air yang bervariasi menyesuaikan dengan besarnya *load* menjaga nilai temperatur air yang masuk ke dalam *chiller*, sehingga selisih temperatur menjadi cenderung konstan di setiap *load chiller*. Tetapi hal tersebut tidak membuat kebutuhan listrik juga menjadi konstan. Selain selisih temperatur, perpindahan panas juga dipengaruhi oleh nilai debit air. Nilai debit air menurun seiring berkurangnya kebutuhan *load* sehingga nilai perpindahan panas dan kebutuhan listrik juga ikut menurun. Walaupun konsumsi listrik pada *chiller variable flow* juga menurun seiring penurunan kebutuhan *load*. Tetapi penurunan tersebut tidak lebih besar dibandingkan *chiller constant flow* karena yang pengaruhnya lebih besar terhadap nilai perpindahan panas adalah selisih temperatur.

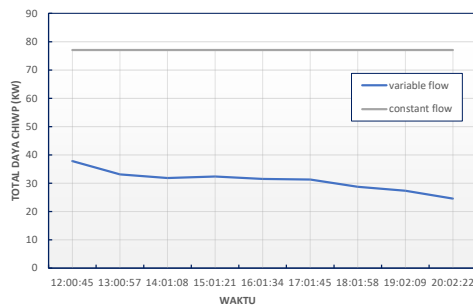


Gambar 17. Grafik total daya chiller terhadap waktu

4.2 Analisis Konsumsi Listrik CHWP

Berdasarkan Gambar 9, CHWP dengan debit air yang konstan menghasilkan konsumsi listrik yang sangat besar. Di sepanjang hari konsumsi listrik tidak berubah, selain karena frekuensi motor pompa yang selalu 50 Hz,

juga tidak terjadi pengurangan jumlah CHWP yang beroperasi. CHWP dengan debit yang bervariasi menghasilkan nilai daya yang bervariasi.

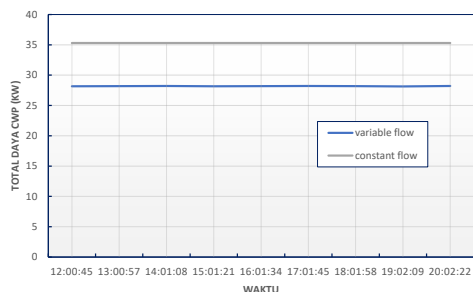


Gambar 18. Grafik total daya CHWP terhadap waktu

4.3 Analisis Konsumsi Listrik CWP

Walaupun *set point* frekuensi putaran motor CWP telah diatur untuk bervariasi mulai 30 Hz hingga 40 Hz, tetapi pada kondisi aktual frekuensi yang terbaca selalu 40 Hz sehingga nilai konsumsi listrik CWP cenderung konstan.

Terlihat pada Gambar 10 konsumsi listrik CWP yang frekuensinya diatur bervariasi lebih rendah dibandingkan dengan CWP yang diatur konstan meskipun frekuensi motor CWP yang diatur konstan juga sebesar 40 Hz.



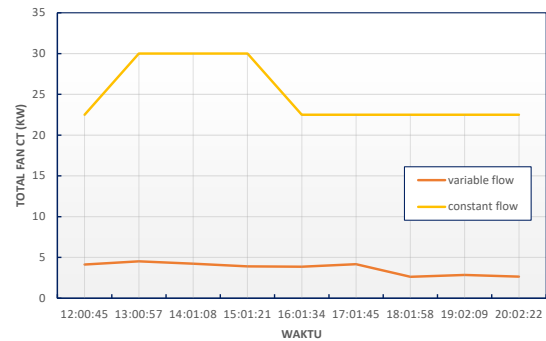
Gambar 19. Grafik total daya CWP terhadap waktu

4.4 Analisis Konsumsi Listrik Fan Cooling Tower

Dilihat dari Gambar 11, konsumsi listrik *fan cooling tower variable flow* jauh lebih hemat dibandingkan dengan yang konstan. Konsumsi listrik menyesuaikan dengan kebutuhan load, tetapi ada beberapa *load* yang lebih kecil dari sebelumnya yang mengalami sedikit kenaikan konsumsi listrik.

Frekuensi *cooling tower* pada sistem *constant flow* selalu 50 Hz, sehingga daya listrik yang dibutuhkan selalu sama untuk setiap *fan*-nya. Perubahan daya listrik total bergantung

kepada jumlah *fan* yang beroperasi. Jumlah *fan* yang beroperasi menyesuaikan kebutuhan load. Pada jam 13.00.57 daya listrik total mengalami kenaikan dikarenakan bertambahnya *fan* yang beroperasi. Lalu pada jam 16.01.34 daya listrik total mengalami penurunan karena berkurangnya jumlah *fan* yang beroperasi.



Gambar 20. Grafik total daya cooling tower terhadap waktu

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Chiller plant sistem *variable flow* di Kings Mall Bandung dapat menghemat konsumsi listrik rata-rata sebesar 16.24%, serta menghasilkan efisiensi yang lebih baik sebesar 16.34% dibandingkan dengan sistem *constant flow*.

Komponen CHWP, CWP dan *fan cooling tower* yang putaran motornya diatur untuk bervariasi membutuhkan listrik yang jauh lebih sedikit dibandingkan putaran motor yang diatur konstan. Sedangkan kebutuhan listrik *chiller variable flow* sedikit lebih besar dibandingkan *chiller constant flow*. Meskipun demikian, *chiller variable flow* tidak bisa diaplikasikan tanpa CHWP dan CWP yang menghasilkan *variable flow*, begitu pula sebaliknya. Sehingga secara keseluruhan *chiller plant* sistem *variable flow* lebih hemat dibandingkan sistem *constant flow*.

Adapun saran untuk kelanjutan penelitian ini yaitu dengan dilakukannya kajian lebih lanjut terkait pengaruh variasi frekuensi putaran motor terhadap lubrikasi oli pada motor sehingga batas minimum nilai frekuensi yang diatur pada CHWP dan CWP bisa lebih tepat. Selain itu, batas bawah RLA motor kompresor *chiller* juga bisa diatur lebih tepat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-sebarnya atas dukungan Jurusan

Teknik Refrigerasi dan Tata Udara Politeknik
Negeri Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] hijauku.com, "Tunjungan Plaza Menjadi Mall Hemat Energi," 18 September 2017. [Online]. Available: <https://hijauku.com/2017/09/18/tunjungan-plaza-menjadi-mall-hemat-energi/>. [Accessed 2022].
- [2] W. P. Bahnfleth and E. B. Payet, "Energy Use Characteristic of Variable Primary Flow Chilled Water Pumping Systems," *Internal Congress of Refrigeration*, p. 1, 2003.
- [3] Trane, Air Conditioning Clinic Helical-Rotary Water Chillers, 1999.
- [4] ASHRAE, ASHRAE Handbook Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment, Atlanta: ASHRAE, 2020.
- [5] J. C. Hensley, Cooling Tower Fundamentals Second Edition, Kansas: SPX Cooling Technologies, 2009.
- [6] H. W. Stanford III, HVAC Water Chillers and Cooling Towers, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2012.
- [7] Y. Li, in *Variable Frequency Drive Applications in HVAC Systems*, 2015.