

## PEMODELAN SISTEM DINAMIS COOLING TOWER DENGAN VARIASI KECEPATAN MOTOR FAN MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK

Gilang Ilham Ramadhan<sup>1</sup>, Aryuanto Soetedjo<sup>2</sup>, Irmalia Suryani Faradisa<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional Malang, Malang, Indonesia  
2412902@student.itn.ac.id<sup>1</sup>, aryuanto@lecturer.itn.ac.id<sup>2</sup>, irmalia\_suryani\_faradisa@lecturer.itn.ac.id<sup>3</sup>

**Abstrak**— Peningkatan konsumsi energi listrik sektor industri di Indonesia yang dilaporkan oleh PT PLN dalam 10 tahun terakhir mengindikasikan potensi pemborosan energi akibat pengoperasian peralatan industri yang belum optimal, salah satunya pada sistem utilitas *cooling tower*. *Cooling tower* berfungsi untuk menjaga kestabilan suhu air keluar proses, namun pengoperasian motor *fan* dengan kecepatan konstan berdampak terhadap tingginya konsumsi energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sistem *cooling tower* dengan menggunakan pendekatan hukum kesetimbangan energi termodinamika I dan hukum *fan* untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan motor *fan* terhadap suhu air keluar, daya motor, dan konsumsi energi secara kuantitatif menggunakan software MATLAB Simulink. Hasil perancangan yang dibuat menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan karakteristik sistem dengan baik melalui nilai rata-rata *error* sebesar 0.047%. Hasil simulasi dengan variasi kecepatan motor *fan* 750–1500 RPM menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan motor dapat menurunkan suhu air keluar, namun menyebabkan peningkatan daya dan konsumsi energi listrik secara signifikan. Konsumsi energi meningkat dari 13.88 kWh pada 750 RPM menjadi 111.0 kWh pada 1500 RPM. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model yang dikembangkan dapat digunakan sebagai alat analisis untuk mengevaluasi sistem dengan kompromi antara kinerja pendinginan dan konsumsi energi, serta dapat digunakan sebagai dasar pengembangan strategi pengaturan kecepatan motor *fan* *cooling tower*.

**Kata Kunci:** *Cooling Tower, Motor Fan, Energi Listrik, Suhu Air Keluar.*

### I. PENDAHULUAN

#### A. Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber energi yang sangat krusial dalam menunjang operasional industri, termasuk untuk penggerak sistem utilitas seperti *cooling tower*. Seiring dengan meningkatnya skala dan intensitas produksi, konsumsi energi listrik pada sektor industri juga mengalami peningkatan yang signifikan. Berdasarkan data PT PLN, konsumsi energi listrik sektor industri meningkat dari 64.079 GWh pada tahun 2015 menjadi 92.195 GWh pada tahun 2024 [1]. Peningkatan

kebutuhan energi tersebut menunjukkan besarnya peran sektor industri terhadap pembentukan beban energi nasional. Namun, besarnya konsumsi energi tidak selalu diiringi dengan efisiensi dalam penggunaannya, khususnya apabila peralatan listrik masih dioperasikan secara konvensional tanpa mempertimbangkan kondisi beban aktual sistem. Salah satu komponen utilitas industri yang berkontribusi terhadap pemborosan konsumsi energi adalah *cooling tower*. *Cooling tower* berfungsi untuk menurunkan suhu air proses dengan cara melepaskan panas ke atmosfer melalui aliran udara yang dihasilkan oleh motor *fan*. Pada kondisi ideal, suhu air keluar dari *cooling tower* dapat dipertahankan tetap stabil apabila suhu *wet bulb* / lingkungan dan beban termal tidak mengalami perubahan dengan asumsi motor *fan* beroperasi pada kecepatan konstan [2]. Namun dalam kondisi operasi nyata, beban termal dan suhu lingkungan bersifat dinamis, sehingga pengoperasian motor *fan* pada kecepatan tetap berpotensi menyebabkan pemborosan energi. Kinerja *cooling tower* sangat dipengaruhi oleh kecepatan motor *fan*, yang secara langsung berdampak pada perubahan suhu air keluar dan efektivitas proses pendinginan. Peningkatan kecepatan motor *fan* dapat meningkatkan laju aliran udara dan efektivitas pelepasan panas, sehingga suhu air keluar menjadi lebih rendah. Namun, hal tersebut berpengaruh pada sisi daya motor yang berakibat dengan tingginya konsumsi energi listrik [3]. Secara teoritis, hubungan antara kecepatan, daya motor, dan konsumsi energi listrik bersifat *nonlinier*. Berdasarkan teori mengenai hukum *fan*, daya motor *fan* berbanding lurus dengan kapasitas laju aliran udara dan bersifat *nonlinear* dari kecepatan motor *fan* [4]. Oleh karena itu, variasi kecepatan motor *fan* memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap konsumsi energi listrik serta suhu air keluar *cooling tower*. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan suatu pendekatan pemodelan yang mampu menggambarkan hubungan antara kecepatan, daya, dan konsumsi energi listrik motor *fan* secara kuantitatif. Pemodelan ini diharapkan dapat menjadi dasar analisis karakteristik konsumsi energi pada *cooling tower* serta memberikan gambaran potensi

penghematan energi melalui pengaturan kecepatan motor fan yang lebih efisien.

## B. Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan latar belakang di atas, maka dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memodelkan *cooling tower* secara dinamis berdasarkan hubungan antara kecepatan motor *fan* terhadap suhu air keluar?
2. Bagaimana akurasi model simulasi yang dibuat menggunakan MATLAB *Simulink*?
3. Bagaimana hubungan variasi kecepatan motor fan terhadap daya motor dan konsumsi energi listrik pada sistem *cooling tower*?

## C. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Memodelkan sistem *cooling tower* secara dinamis berdasarkan hubungan antara kecepatan motor *fan* dan suhu air keluar.
2. Mengevaluasi tingkat akurasi model antara data aktual dan data hasil simulasi menggunakan MATLAB.
3. Menganalisis hubungan variasi kecepatan motor *fan* terhadap daya motor dan konsumsi energi listrik pada sistem *cooling tower*.

# II. KAJIAN PUSTAKA

## A. Data Statistik Pemanfaatan Energi Listrik

Dalam konteks sistem tenaga listrik, energi listrik dihasilkan melalui proses konversi dari berbagai sumber energi primer, seperti energi fosil, panas bumi, air, angin, dan surya, kemudian disalurkan melalui jaringan transmisi dan distribusi untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Pentingnya energi listrik tercermin pada perannya sebagai penggerak utama proses produksi, pengendalian sistem utilitas, serta sarana pendukung keberlangsungan kehidupan masyarakat sehari-hari.

Tabel 1 Data Energi Terjual per-kelompok Pelanggan (GWh) 2015 - 2024

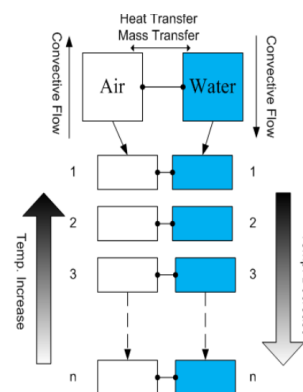
| Tahun | Rumah Tangga | Industri  | Bisnis    | Sosial    | Gdg. Kantor Pemerintah | Penerangan Jalan Umum | Lainnya (T.C.L) | Jumlah     | Δ %    |
|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|-----------------------|-----------------|------------|--------|
| 2015  | 88.682,13    | 64.079,39 | 36.978,05 | 5.940,98  | 3.717,16               | 3.448,11              | -               | 202.845,82 | 2,14   |
| 2016  | 93.634,81    | 68.145,30 | 40.074,39 | 6.630,80  | 4.021,61               | 3.497,58              | -               | 216.004,29 | 6,49   |
| 2017  | 94.457,38    | 72.238,37 | 41.694,79 | 7.095,37  | 4.121,26               | 3.526,55              | -               | 223.133,72 | 3,30   |
| 2018  | 97.832,28    | 76.946,50 | 44.027,40 | 7.781,34  | 4.403,28               | 3.627,07              | -               | 234.617,88 | 5,15   |
| 2019  | 103.733,43   | 77.878,65 | 46.901,25 | 8.621,83  | 4.750,29               | 3.632,71              | -               | 245.518,17 | 4,65   |
| 2020  | 112.155,85   | 72.239,86 | 42.819,32 | 8.098,06  | 4.634,78               | 3.634,88              | -               | 243.582,75 | (0,79) |
| 2021  | 115.370,05   | 80.904,45 | 44.440,85 | 8.665,99  | 4.707,97               | 3.544,95              | -               | 257.634,25 | 5,77   |
| 2022  | 116.095,41   | 88.483,30 | 50.532,19 | 10.073,23 | 4.995,12               | 3.582,23              | -               | 273.761,48 | 6,26   |
| 2023  | 122.339,69   | 88.587,68 | 57.112,00 | 11.496,10 | 5.285,12               | 3.615,19              | -               | 288.435,78 | 5,36   |
| 2024  | 130.433,10   | 92.195,69 | 58.771,14 | 12.679,23 | 5.412,35               | 3.527,90              | 3.200,02        | 306.219,42 | 6,17   |

Berdasarkan data pada Tabel 1 mengenai statistik dari PT PLN (Persero) tahun 2015 – 2024, konsumsi energi listrik

nasional terus meningkat setiap tahunnya dengan kontribusi terbesar berasal dari sektor rumah tangga dan industri. Pada tahun 2024, total energi listrik terjual mencapai 306219.42 GWh, dengan porsi terbesar digunakan oleh sektor rumah tangga sebesar 42.59% dan sektor industri sebesar 30.11%. Data menunjukkan bahwa sektor industri merupakan salah satu pengguna energi listrik terbesar dan berperan sangat signifikan dalam pembentukan beban energi nasional.

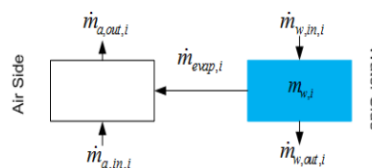
## B. Cooling Tower

*Cooling tower* bekerja untuk menurunkan suhu air proses melalui perpindahan panas antara air panas dan udara yang dihisap fan, di mana air panas dari *heat exchanger* dialirkan ke *fill* untuk meningkatkan proses konveksi dan evaporasi [5]. Air yang telah didinginkan ditampung di basin sebelum disirkulasikan kembali. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja *cooling tower* sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan dan suhu air masuk [3], [6], [7], di mana temperatur lingkungan yang lebih rendah meningkatkan efektivitas pendinginan. Secara matematis, dinamika sistem dimodelkan menggunakan persamaan kesetimbangan energi yang menyatakan perubahan suhu air keluar bergantung pada perbedaan temperatur air dan udara serta kondisi operasi. Model ini merepresentasikan respons *cooling tower* terhadap variasi beban termal dan kondisi lingkungan, sekaligus menjadi dasar evaluasi kinerja sistem kendali.



Gambar 1. Ilustrasi Kontrol Volume *Cooling Tower*

Perpindahan panas pada *cooling tower* terjadi secara sensibel dan berlangsung akibat perbedaan suhu antara air dan udara, sedangkan perpindahan panas laten terjadi karena sebagian kecil massa air mengalami evaporasi dan menyerap kalor laten penguapan. Kedua mekanisme inilah yang berperan utama dalam menurunkan suhu air keluar mendekati suhu bola basah atau suhu lingkungan.



Gambar 2. Ilustrasi perpindahan panas *Cooling Tower*

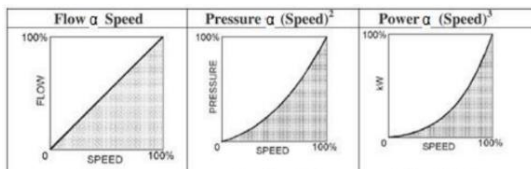
Gambar 1 dan 2 menunjukkan ilustrasi sistem perpindahan panas yang terjadi antara air dan udara di dalam *cooling tower*, secara matematis dapat dituliskan melalui persamaan berdasarkan hukum kesetimbangan energi termodinamika I sebagai berikut :

$$mw \cdot cpw \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} = \dot{m}w_{in} \cdot (Tw_{in} - Tw_i) - \dot{m}w_{out} \cdot (Tw_{out} - Tw_i) - q \quad (1)$$

|                      |                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| Keterangan :         |                                                                |
| $\frac{dT_{wi}}{dt}$ | : Perubahan suhu didalam fill / sistem per-satuan waktu (°C/s) |
| $mw$                 | : Massa air di dalam sistem (kg)                               |
| $cpw$                | : Kalor spesifik panas dari air (kJ/kg)                        |
| $\dot{m}w_{in}$      | : Laju aliran air masuk di dalam sistem (kg/s)                 |
| $\dot{m}w_{out}$     | : Laju aliran air keluar di dalam sistem (kg/s)                |
| $hw_{in}$            | : Enthalpy air masuk (kJ/kg)                                   |
| $hw_{out}$           | : Enthalpy air keluar (kJ/kg)                                  |
| $hw_i$               | : Enthalpy air didalam fill (kJ/kg)                            |
| $Tw_{in}$            | : Suhu air masuk (°C)                                          |
| $Tw_{out}$           | : Suhu air keluar (°C)                                         |
| $q$                  | : Laju perpindahan panas ke lingkungan / udara (kW)            |

### C. Motor Fan Cooling Tower

Motor *fan* adalah komponen utama yang mengalirkan udara ke dalam *cooling tower*. Hubungan antara kecepatan *fan* dan performa pendinginan bersifat langsung sesuai dengan hukum *fan*, yaitu semakin tinggi kecepatan *fan*, maka semakin besar laju perpindahan panas atau kapasitas pendinginan yang berakibat dengan menurunnya nilai suhu air keluar ( $Tw_{out}$ ). Ketika suhu air keluar menurun, nilai efektivitas *cooling tower* semakin tinggi. Namun saat kondisi yang sama, peningkatan juga menyebabkan meningkatnya daya motor secara signifikan sehingga konsumsi energi menjadi tinggi [3]. Pengaruh kecepatan motor *fan cooling tower* sangat berkorelasi dengan hukum *fan* (*affinity laws*) karena berakibat pada laju kapasitas pendinginan [8]. Hal tersebut menjelaskan hubungan dasar antara kecepatan motor *fan* dengan aliran udara dan daya listrik yang dibutuhkan motor.



Gambar 3. Kurva Hukum *Fan*

Secara umum, teori mengenai Gambar 3 menyatakan bahwa peningkatan kecepatan motor linear dengan laju aliran udara dan daya motor meningkat secara eksponensial atau kubik. Secara matematis dapat dituliskan melalui persamaan berikut:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left[ \frac{N_1}{N_2} \right]^3 \quad (3)$$

|              |                                                          |
|--------------|----------------------------------------------------------|
| Keterangan : |                                                          |
| $N_1$        | : Kecepatan putar nominal motor (rpm)                    |
| $N_2$        | : Perubahan kecepatan motor (rpm)                        |
| $Q_1$        | : Laju aliran udara maksimum ( $m^3/s$ atau <i>cfm</i> ) |
| $Q_2$        | : Perubahan aliran udara ( $m^3/s$ atau <i>cfm</i> )     |
| $SP_1$       | : Tekanan statis maksimum (Pa)                           |
| $SP_2$       | : Perubahan tekanan statis (Pa)                          |
| $P_1$        | : Daya maksimum motor (kW)                               |
| $P_2$        | : Perubahan daya motor (kW)                              |

### D. Energi Listrik

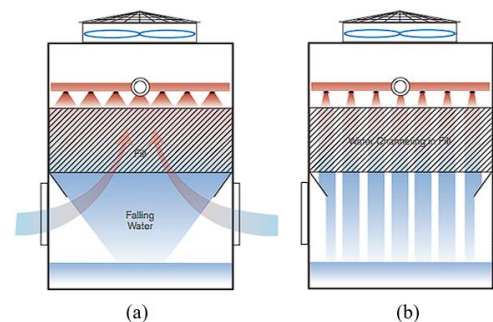
Energi listrik merupakan hasil dari perhitungan akumulasi daya listrik yang dikonsumsi oleh suatu beban selama periode waktu (t) tertentu [9]. Secara sederhana, apabila daya listrik (P) bernilai konstan, maka energi listrik (E) dapat dihitung dengan hubungan dasar sebagai berikut:

$$E = P \times t \quad (4)$$

|              |                       |
|--------------|-----------------------|
| Keterangan : |                       |
| E            | : Energi Listrik (Wh) |
| P            | : Daya Listrik (W)    |
| t            | : Waktu (h)           |

### E. Korelasi Hukum Fan dan Cooling Tower

Hukum *fan* memiliki keterkaitan langsung dengan kinerja *cooling tower*, karena perubahan kecepatan motor *fan* akan berdampak pada laju aliran udara yang melewati menara pendingin.



Gambar 4. Ilustrasi sistem saat kecepatan motor *fan* dengan putaran tinggi & rendah

Berdasarkan ilustrasi Gambar 4, hal tersebut menunjukkan bahwa kapasitas pendinginan *cooling tower* bervariasi terhadap kecepatan *fan* [8]. Pada Gambar 4(a), saat motor *fan* beroperasi pada kecepatan tinggi, aliran udara ke atas meningkat sebanding dengan putaran *fan*, sehingga interaksi antara udara dan air yang didistribusikan oleh *nozzle* berlangsung optimal di seluruh permukaan *fill*. Kondisi ini mendukung proses perpindahan panas yang baik, meskipun disertai tingginya konsumsi daya sesuai hukum *fan*. Pada

Gambar (b), penurunan kecepatan motor *fan* menyebabkan berkurangnya laju aliran udara dan tekanan pada *nozzle*, sehingga pola semprotan air melemah dan berpotensi menimbulkan *water channeling*. Akibatnya, distribusi air pada *fill* menjadi tidak merata dan kinerja perpindahan panas menurun, yang dapat meningkatkan temperatur air keluar. Meskipun demikian, penurunan kecepatan *fan* memberikan keuntungan dari sisi efisiensi energi karena konsumsi daya motor menurun secara signifikan.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan Langkah penelitian yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara kecepatan motor *fan*, daya motor, dan konsumsi energi listrik serta pengaruhnya terhadap sistem termal pada *cooling tower*. Tahapan penelitian diawali dengan pengumpulan dan penentuan parameter operasional *cooling tower*, kemudian dilanjutkan dengan perancangan model sistem dinamis. Selanjutnya, model tersebut diimplementasikan dalam *software* MATLAB *Simulink* untuk mensimulasikan variasi kecepatan motor fan serta menganalisis pengaruhnya terhadap daya motor dan konsumsi energi listrik. Hasil simulasi kemudian dianalisis untuk mengevaluasi karakteristik konsumsi energi pada berbagai kondisi kecepatan operasi.

#### A. Perancangan Sistem

Perancangan sistem difokuskan pada pengembangan model matematis sistem *cooling tower* dengan hubungan antara kecepatan motor dan suhu air keluar *cooling tower*. Perubahan kecepatan berdampak pada nilai suhu air keluar dan konsumsi energi listrik yang dihasilkan melalui pendekatan teori dari hukum kesetimbangan energi termodinamika I dan hukum fan.

#### B. Pengumpulan Data Operasional Cooling Tower

Tahap awal dilakukan dengan mengumpulkan data mengenai suhu air masuk dan keluar, serta suhu udara basah (*wet bulb*) yang diperoleh dari jurnal penelitian terdahulu [10]. Pemanfaatan data operasional ini bertujuan untuk memastikan bahwa model diuji pada kondisi yang representatif terhadap operasi *cooling tower* secara nyata. Data yang digunakan mencerminkan karakteristik sistem pendinginan aktual. Berikut merupakan spesifikasi data yang digunakan:

Tabel 2. Spesifikasi Data Operasional *cooling tower*

| No. | Jam   | $T_{wb}$<br>(°C) | $T_{w_{in}}$<br>(°C) | $T_{w_{out}}$<br>(°C) | $\Delta T$<br>(°C) | Approach<br>(°C) |
|-----|-------|------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|------------------|
| 1.  | 07.00 | 25.66            | 36                   | 27.5                  | 8.5                | 1.84             |
| 2   | 08.00 | 25.51            | 38.5                 | 29                    | 9.5                | 3.49             |
| 3   | 09.00 | 25.04            | 38.5                 | 29                    | 9.5                | 3.96             |
| 4   | 10.00 | 24.42            | 38.5                 | 29.5                  | 9                  | 5.08             |
| 5   | 11.00 | 24.33            | 40                   | 30                    | 10                 | 5.67             |
| 6   | 12.00 | 24.77            | 42                   | 31                    | 11                 | 6.23             |
| 7   | 13.00 | 26.9             | 43.5                 | 33                    | 10.5               | 6.10             |
| 8   | 14.00 | 29.15            | 44                   | 35                    | 9                  | 5.85             |
| 9   | 15.00 | 23.35            | 36                   | 29                    | 7                  | 5.65             |
| 10  | 16.00 | 28.83            | 37                   | 30                    | 7                  | 1.17             |
| 11  | 17.00 | 28.3             | 38                   | 31                    | 7                  | 2.70             |

Data pada Tabel 2 merupakan data operasional *cooling tower* yang menunjukkan nilai berupa suhu lingkungan ( $T_{wb}$ ), suhu air masuk ( $T_{w_{in}}$ ), suhu air keluar ( $T_{w_{out}}$ ), selisih suhu air masuk dan keluar ( $\Delta T$ ), serta kinerja *cooling tower* (*Approach*) pada jam operasional 07.00-17.00. Parameter data pada tabel tersebut digunakan untuk simulasi model dengan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Dikarenakan data mengenai kecepatan motor yang digunakan tidak tersedia, maka digunakan asumsi bahwa motor berputar pada kecepatan 1500 RPM selama jam operasional 07.00-17.00

#### C. Model Matematis Cooling Tower dan Motor Fan

Tahap selanjutnya adalah merancang model *cooling tower* menggunakan persamaan differensial dengan fungsi waktu berdasarkan hukum kesetimbangan energi termodinamika I sesuai dengan literatur [11]. Secara matematis persamaan dituliskan sebagai berikut :

$$mw \cdot cpw \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} = \dot{m}w_{in} \cdot (hw_{in} - hw_i) - \dot{m}w_{out} \cdot (hw_{out} - hw_i) - q \quad (5)$$

karena entalpi air ( $h$ ) berbanding lurus dengan suhu air ( $T$ ) dan kapasitas panas jenis air ( $cpw$ ), maka persamaan menjadi :

$$mw \cdot cpw \cdot \frac{dT_{wi}}{dt} = \dot{m}w_{in} \cdot (T_{w_{in}} - T_{w_i}) - \dot{m}w_{out} \cdot (T_{w_{out}} - T_{w_i}) - q \quad (6)$$

|                      |                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| Keterangan           | :                                                              |
| $\frac{dT_{wi}}{dt}$ | : Perubahan suhu didalam fill / sistem per-satuan waktu (°C/s) |
| $mw$                 | : Massa air di dalam sistem (kg)                               |
| $cpw$                | : Kalor spesifik panas dari air (kJ/kg)                        |
| $\dot{m}w_{in}$      | : Laju aliran air masuk di dalam sistem (kg/s)                 |
| $\dot{m}w_{out}$     | : Laju aliran air keluar di dalam sistem (kg/s)                |
| $hw_{in}$            | : <i>Enthalphy</i> air masuk (kJ/kg)                           |
| $hw_{out}$           | : <i>Enthalphy</i> air keluar (kJ/kg)                          |
| $hw_i$               | : <i>Enthalpy</i> air didalam fill (kJ/kg)                     |
| $T_{w_{in}}$         | : Suhu air masuk (°C)                                          |
| $T_{w_{out}}$        | : Suhu air keluar (°C)                                         |
| $q$                  | : Laju perpindahan panas ke lingkungan / udara (kW)            |

Persamaan (5) dan (6) merupakan bentuk matematis dari sistem dinamis *cooling tower* dengan pendekatan kontrol volume yang digunakan untuk menggambarkan perilaku sistem dalam melihat perubahan suhu air keluar per-satuan waktu (°C/s). Dikarenakan terdapat keterbatasan data mengenai laju aliran udara dan suhu udara keluar, maka nilai dapat dicari melalui asumsi jika  $\frac{dT_{wi}}{dt}$  pada sistem dianggap steady state = 0, secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$0 = \dot{m}w_{in} \cdot C_{pw} \cdot (T_{w_{in}} - T_{w_{out}}) - \dot{q} \quad (7)$$

sehingga nilai  $q$  menjadi:

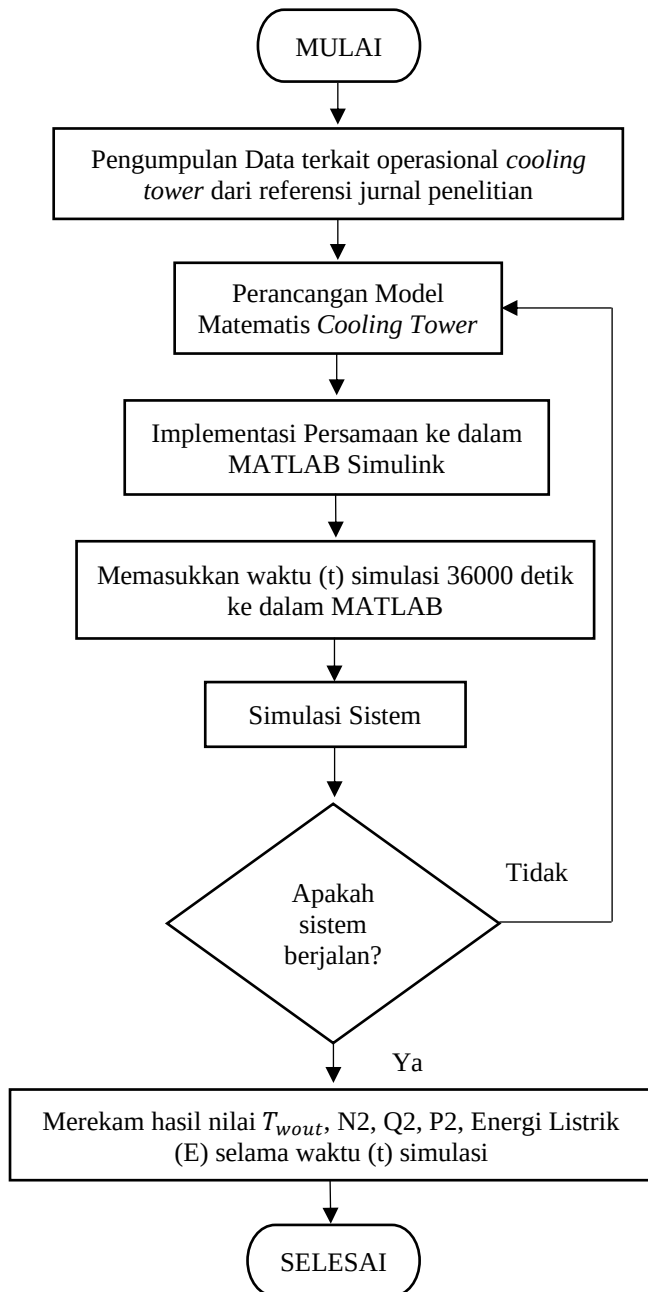
$$q = \dot{m}w_{in} \cdot C_{pw} \cdot (T_{w_{in}} - T_{w_{out}}) \quad (8)$$

Persamaan (7) dan (8) dapat diartikan kondisi sistem yang bermakna bahwa  $Q_{air} = Q_{udara}$ , dimana energi panas yang dilepaskan oleh air diserap sepenuhnya oleh udara. Selanjutnya, pemodelan motor *fan* dilakukan dengan menggunakan *first order transfer function* [12] dan secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H_{mf}(s) = \frac{K_{MF}}{T_{MFS} s + 1} \quad (9)$$

Hubungan antara kecepatan motor *fan*, kapasitas aliran udara, serta daya yang dikonsumsi dinyatakan melalui hukum *fan* (2) dan (3).

#### D. Diagram Alir Penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

Diagram Alir pada Gambar 3 disusun secara sistematis untuk menggambarkan tahapan penelitian simulasi sistem *cooling tower* yang dilakukan menggunakan MATLAB *Simulink*. Hal ini digunakan untuk memperjelas urutan proses mulai dari pengumpulan data, perancangan model matematis, hingga pengambilan data hasil simulasi. Setiap tahapan dirancang saling terintegrasi guna memastikan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi operasi *cooling tower* secara akurat. Adapun tahapan penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Penelitian diawali dengan pengumpulan data operasional *cooling tower* yang diperoleh dari referensi jurnal penelitian sebagai dasar pemodelan sistem.
2. Data yang telah dikumpulkan digunakan untuk merancang model matematis *cooling tower* yang merepresentasikan karakteristik termal dan operasional sistem.
3. Model matematis tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam MATLAB *Simulink* untuk keperluan simulasi sistem.
4. Waktu (t) simulasi ditetapkan sebesar 36.000 detik agar respons sistem dapat diamati secara menyeluruh pada kondisi operasi yang representatif sesuai jam operasional yaitu pada jam 07.00 – 17.00.
5. Setelah seluruh parameter ditentukan, simulasi sistem dijalankan untuk mengevaluasi kinerja dan kestabilan model.
6. Apabila sistem belum berjalan dengan baik, dilakukan penyesuaian model dan proses simulasi diulang hingga diperoleh hasil yang sesuai.
7. Jika sistem telah berjalan dengan baik, data keluaran berupa suhu air keluar ( $T_{wout}$ ), kecepatan motor (N2), debit aliran (Q2), daya motor (P2), dan energi listrik (E) direkam selama waktu simulasi.
8. Proses penelitian diakhiri setelah seluruh data yang diperlukan berhasil diperoleh.

#### IV. SIMULASI DAN ANALISA

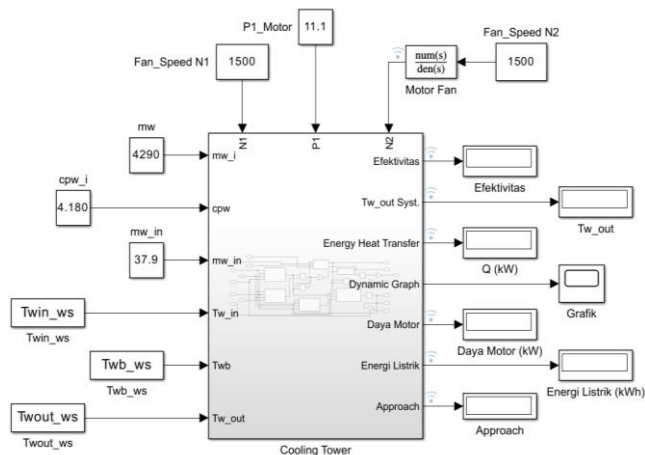
Pada penelitian ini, fokus utama diarahkan pada implementasi model persamaan matematis *cooling tower*, motor *fan*, dan perhitungan energi listrik ke dalam *software* MATLAB *Simulink*. Selanjutnya, model dilakukan simulasi dan pencatatan data untuk dilakukan evaluasi serta analisis.

##### A. Pemodelan menggunakan MATLAB Simulink

*Software* MATLAB *Simulink* digunakan sebagai platform pemodelan dan simulasi yang digunakan untuk mengimplementasikan persamaan matematis yang telah diturunkan serta mengevaluasi kinerja sistem secara komprehensif. Pemilihan *software* ini dipilih karena kemampuannya dalam merepresentasikan sistem secara dinamis, visual, dan terintegrasi, sehingga memudahkan untuk dilakukan analisis mengenai perilaku sistem terhadap perubahan parameter operasi. Struktur model *cooling tower* dibangun dengan mengintegrasikan persamaan dari hukum



kesetimbangan energi termodinamika I, hukum *fan*, dan energi listrik. Integrasi ini memungkinkan simulasi dilakukan secara dinamis untuk mengamati respons suhu air keluar terhadap variasi perubahan suhu air masuk dan kondisi suhu lingkungan yang berubah selama jam operasional berdasarkan Tabel 2. Selanjutnya, dilakukan perubahan mengenai variasi kecepatan motor *fan* untuk diamati penggunaan daya, konsumsi energi listrik, dan suhu air keluar pada sistem.



Gambar 6. Desain Blok Sistem

Gambar 6 menunjukkan skema model blok cooling tower yang telah di implementasikan ke dalam MATLAB Simulink. Pemodelan menggunakan Simulink digunakan untuk menggambarkan perilaku / kinerja sistem karena dampak dari perubahan kecepatan motor. Pada model tersebut, kecepatan motor *fan* dijadikan sebagai variabel kendali utama yang memengaruhi laju aliran udara dan intensitas proses pendinginan di dalam cooling tower. Variabel masukan lainnya meliputi suhu air masuk (*Twin\_ws*), suhu udara basah (*Twb\_ws*), laju aliran massa air (*mw\_in*), massa air di dalam sistem (kg), suhu air masuk data operasional (*Twout\_ws*), serta kapasitas panas jenis air (*cpw\_i*). Berikut merupakan detail dari parameter *input* yang digunakan pada model :

Tabel 3. Parameter *Input* Simulasi

| Parameter                | Simbol   | Nilai         | Satuan   |
|--------------------------|----------|---------------|----------|
| Massa air sistem         | mw       | 4290          | kg       |
| Kalor spesifik jenis air | Cpw      | 4.18          | kJ/kg.°C |
| Laju aliran massa air    | mw_in    | 37.9          | kg/s     |
| Suhu Air Masuk           | Twin_ws  | Tw_in Tabel 2 | °C       |
| Suhu Udara Lingkungan    | Twb_ws   | Tw_in Tabel 2 | °C       |
| Suhu Air Keluar          | Twout_ws | Tw_in Tabel 2 | °C       |
| Kecepatan motor          | N1       | 1500          | °C       |
| Kecepatan motor          | N2       | 1500          | °C       |
| Daya Motor               | P1_Motor | 11.1          | kW       |

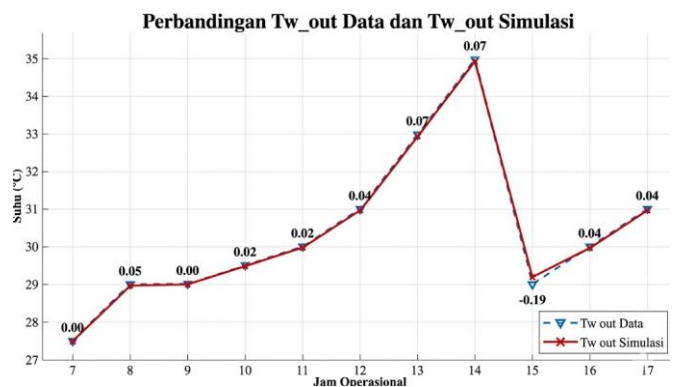
Seluruh parameter pada Tabel 3 diproses di dalam blok *cooling tower* untuk proses simulasi serta menghasilkan keluaran berupa efektivitas, suhu air keluar (*Tw\_out*), laju perpindahan panas (*Q*), daya motor (*P*), konsumsi energi listrik (kWh), dan *Approach cooling tower*.

## B. Simulasi Sistem

Simulasi bertujuan untuk memvalidasi model *cooling tower* yang dikembangkan serta menganalisis pengaruh variasi kecepatan motor *fan* terhadap kinerja sistem dan pengaruhnya terhadap konsumsi energi listrik. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi operasi yang sama untuk memastikan bahwa perbedaan hasil simulasi disebabkan oleh perubahan kecepatan motor.

### 1) Hasil Simulasi Validasi Model Cooling Tower

Validasi model *cooling tower* dilakukan untuk memastikan kesesuaian respons model terhadap karakteristik fisis sistem. Validasi difokuskan pengamatan pada perubahan suhu air keluar dengan kecepatan motor 1500 RPM.



Gambar 7. Perbandingan *Tw\_out* data dan *Tw\_out* Simulasi

Gambar 7 menunjukkan perbandingan antara suhu air keluar (*Tw\_out*) hasil data aktual dan hasil simulasi dari implementasi model *cooling tower* selama jam operasional 07.00 - 17.00 ke dalam MATLAB Simulink. Secara umum, kurva hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan pola perubahan suhu pada data aktual, baik pada fase peningkatan suhu maupun saat terjadi penurunan. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan mampu merepresentasikan karakteristik termal sistem cooling tower dengan tingkat akurasi yang baik. Perbedaan nilai antara data aktual dan hasil simulasi pada setiap titik waktu relatif kecil, sehingga model dinilai cukup representatif untuk digunakan pada tahap analisis maupun pengembangan dalam strategi optimasi energi selanjutnya. Selain itu, kesesuaian pola tersebut juga menunjukkan bahwa parameter masukan yang digunakan dalam pemodelan telah mampu menggambarkan kondisi operasional sistem sebenarnya. Nilai suhu air keluar pada masing-masing jam operasional disajikan secara rinci pada Tabel 4 sebagai bentuk validasi kuantitatif terhadap hasil simulasi yang diperoleh.

Tabel 4. Hasil Simulasi Model *Cooling Tower*

| No. | Jam operasional | Suhu Air Keluar Data Aktual (°C) | Suhu Air Keluar Simulasi (°C) | Error (%) |
|-----|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------|
| 1   | 07.00           | 27.5                             | 27.5                          | 0         |
| 2   | 08.00           | 29                               | 28.95                         | 0.05      |
| 3   | 09.00           | 29                               | 29                            | 0         |
| 4   | 10.00           | 29.5                             | 29.48                         | 0.02      |
| 5   | 11.00           | 30                               | 29.98                         | 0.02      |
| 6   | 12.00           | 31                               | 30.96                         | 0.04      |
| 7   | 13.00           | 33                               | 32.93                         | 0.07      |
| 8   | 14.00           | 35                               | 34.93                         | 0.07      |
| 9   | 15.00           | 29                               | 29.19                         | 0.19      |
| 10  | 16.00           | 30                               | 29.96                         | 0.04      |
| 11  | 17.00           | 31                               | 30.96                         | 0.04      |

Hasil simulasi validasi model pada Tabel 4 dilakukan dengan menggunakan kecepatan 1500 RPM dan hasil menunjukkan perbandingan kuantitatif antara suhu air keluar hasil data aktual dan hasil simulasi pada berbagai jam operasional. Hasil perhitungan *error* menunjukkan bahwa selisih antara data aktual dan hasil simulasi relatif kecil, dengan nilai rata-rata *error* sebesar 0.047%.

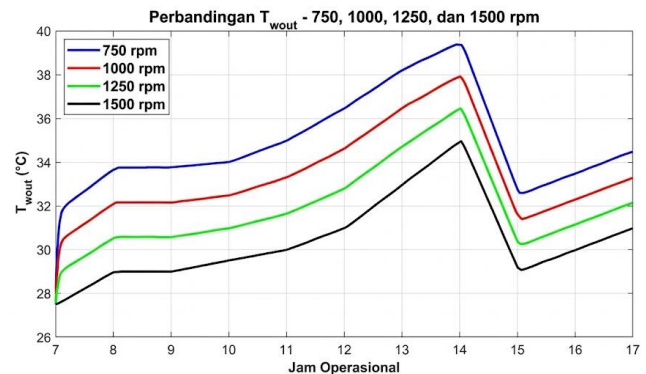
### C. Analisis Sistem

Setelah model *cooling tower* dinyatakan *valid* dengan *error* rata-rata sebesar 0.047%, simulasi dilanjutkan dengan menganalisis pengaruh variasi kecepatan motor *fan* terhadap kinerja sistem. Variasi kecepatan motor *fan* yang digunakan dalam simulasi adalah 750, 1000, 1250, dan 1500 RPM. Pemilihan rentang kecepatan ini bertujuan untuk merepresentasikan kinerja sistem pada kecepatan rendah hingga tinggi. Analisis dilakukan mengenai korelasi teori hukum *fan* dengan *cooling tower* serta pengaruhnya terhadap konsumsi energi listrik.

#### 1) Analisis Korelasi Hukum Fan dengan Cooling Tower

Pembahasan ini meninjau hubungan antara kecepatan motor *fan* dan kinerja *cooling tower* berdasarkan teori dari hukum fan. Secara teoritis, hubungan antara kecepatan motor *fan* dan parameter operasional utama sistem *cooling tower* dijelaskan melalui hukum *fan* (2) dan (3). Berdasarkan hubungan tersebut, laju aliran udara (*Q*) berbanding lurus secara linear terhadap kecepatan motor fan (*N*). Namun, dalam penelitian ini nilai (*Q*) tidak tersedia secara langsung dalam data hasil pengukuran. Oleh karena itu, asumsi linearitas antara (*Q*) dan (*N*) digunakan untuk mempermudah pembuatan model serta analisis. Motor fan pada *cooling tower* memiliki peran krusial dalam proses perpindahan panas antara air dan udara. Berdasarkan persamaan (6), terdapat variabel laju perpindahan panas ke lingkungan (*q*) yang merepresentasikan intensitas laju pelepasan panas dari air ke udara. Variabel (*q*) berperan langsung dalam menentukan perubahan suhu air keluar *cooling tower*. Dengan demikian, laju perpindahan panas ke lingkungan diasumsikan

berbanding lurus (linier) terhadap kecepatan motor *fan* (*N*). Parameter-parameter keluaran tersebut dicatat selama waktu simulasi untuk dilakukan analisis guna mengevaluasi pengaruh perubahan kecepatan motor *fan* terhadap kinerja termal dan konsumsi energi sistem. Hasil simulasi ini digunakan sebagai dasar dalam analisis efisiensi energi serta penentuan strategi pengoperasian motor *fan* yang optimal pada sistem *cooling tower*.



Gambar 8. Perbandingan Suhu Air Keluar dengan variasi kecepatan motor

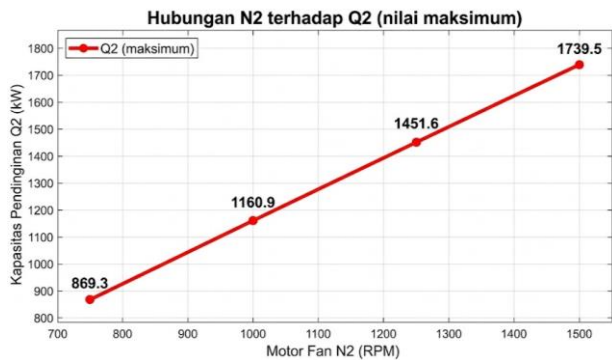
Gambar 8 menunjukkan pola perubahan suhu air keluar (*Tw\_out*) pada variasi kecepatan motor yang berbeda. Semakin tinggi kecepatan motor *fan* maka nilai suhu air keluar semakin rendah. Untuk hasil nilai simulasi dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 5. Hasil simulasi Suhu Air Keluar dengan variasi kecepatan Motor

| Jam operasional | Kecepatan Motor Fan (RPM) |       |       |       |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|
|                 | 750                       | 1000  | 1250  | 1500  |
| 07.00           | 27.5                      | 27.5  | 27.5  | 27.5  |
| 08.00           | 33.61                     | 31.99 | 30.41 | 28.95 |
| 09.00           | 33.76                     | 32.13 | 30.55 | 29    |
| 10.00           | 34                        | 32.45 | 30.93 | 29.48 |
| 11.00           | 34.88                     | 33.25 | 31.59 | 29.98 |
| 12.00           | 36.44                     | 34.62 | 32.78 | 30.96 |
| 13.00           | 38.13                     | 36.32 | 34.54 | 32.93 |
| 14.00           | 39.43                     | 37.96 | 36.44 | 34.93 |
| 15.00           | 33.05                     | 31.88 | 30.55 | 29.19 |
| 16.00           | 33.42                     | 32.24 | 31.11 | 29.96 |
| 17.00           | 34.47                     | 33.30 | 32.14 | 30.96 |

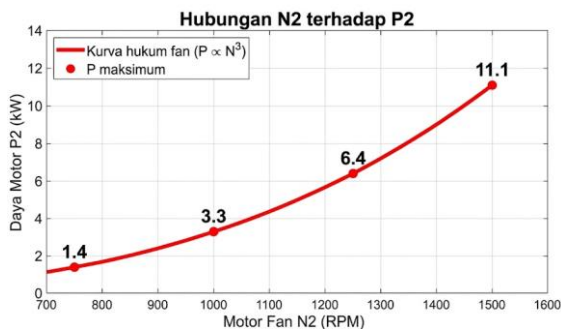
Tabel 5 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan motor *fan* menyebabkan penurunan suhu air keluar pada seluruh jam operasional. Pada kecepatan rendah yaitu 750 RPM, suhu air keluar cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan motor 1500 RPM. Hal tersebut mengindikasikan efektivitas pendinginan yang lebih rendah akibat laju aliran udara yang menurun karena modulasi dari kecepatan motor. Sebaliknya

pada kecepatan 1500 RPM, suhu air keluar menunjukkan nilai yang rendah selama periode pengujian, menandakan peningkatan performa pendinginan seiring bertambahnya kecepatan motor *fan*.



Gambar 9. Hubungan Kecepatan Motor Fan dengan Kapasitas Pendinginan

Gambar 9 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan motor *fan* (N) diikuti oleh peningkatan kapasitas pendinginan (Q) yang mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan motor secara langsung meningkatkan nilai kapasitas pendinginan *cooling tower* karena dampak dari perubahan nilai dari laju aliran udara. Hubungan ini sejalan dengan teori hukum *fan* yang menyatakan bahwa laju aliran udara berbanding lurus dengan kecepatan motor. Namun, peningkatan kecepatan motor menyebabkan kenaikan konsumsi daya yang lebih signifikan karena hubungan daya motor *fan* bersifat *nonlinear* dari kecepatan motor dan dapat dilihat pada Gambar 10.



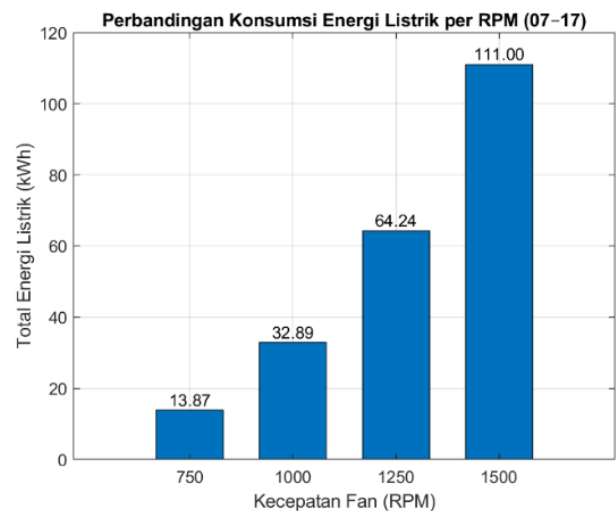
Gambar 10. Hubungan Kecepatan dengan Daya Motor

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara kecepatan motor *fan* (N) dan daya motor (P). Hasil simulasi memperlihatkan bahwa peningkatan kecepatan motor *fan* menyebabkan kenaikan daya motor yang bersifat *nonlinier*, dengan kecenderungan kurva meningkat secara tajam pada kecepatan yang lebih tinggi. Pola ini menunjukkan bahwa perubahan kecil pada kecepatan motor *fan* pada rentang kecepatan tinggi dapat menyebabkan peningkatan daya yang signifikan.

## 2) Konsumsi Energi Listrik

Analisis konsumsi energi listrik motor *fan cooling tower*

dilakukan berdasarkan hasil simulasi variasi kecepatan motor selama jam operasional yang ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 11. Perbandingan Konsumsi Energi Listrik dengan Variasi Kecepatan Motor Fan

Analisis difokuskan pada hubungan antara kecepatan motor *fan* beserta daya dan konsumsi energi listrik yang dikonsumsi selama periode operasi simulasi. Hasil simulasi konsumsi energi listrik pada berbagai variasi kecepatan motor fan disajikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 11 untuk memudahkan perbandingan antar kondisi operasi. Gambar 11 menunjukkan perbandingan total konsumsi energi listrik motor *fan cooling tower* pada rentang jam operasional 07.00–17.00 dengan variasi kecepatan motor *fan* 750, 1000, 1250, dan 1500 RPM. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa konsumsi energi listrik meningkat secara signifikan seiring dengan bertambahnya kecepatan motor *fan*. Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai pengaruh variasi kecepatan motor *fan* terhadap daya dan konsumsi energi listrik, hasil simulasi selanjutnya disajikan dalam tabel.

Tabel 6. Hasil simulasi Kecepatan, Daya, dan Konsumsi Energi Listrik Motor Fan

| No. | Kecepatan Motor Fan (RPM) | Daya Motor (P) | Konsumsi Energi Listrik (kWh) |
|-----|---------------------------|----------------|-------------------------------|
| 1.  | 750                       | 1.4            | 13.88                         |
| 2.  | 1000                      | 3.3            | 32.89                         |
| 3.  | 1250                      | 6.4            | 64.24                         |
| 4.  | 1500                      | 11.1           | 111.0                         |

Hasil simulasi pada Tabel 6 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan motor *fan* menyebabkan kenaikan daya dan konsumsi energi listrik yang signifikan. Daya motor meningkat dari 1.4 kW pada 750 RPM menjadi 11.1 kW pada 1500 RPM, dengan konsumsi energi listrik naik dari 13.88 kWh menjadi 111.0 kWh. Kenaikan yang bersifat *nonlinier* ini sesuai dengan hukum *fan*. Hal ini menegaskan bahwa



peningkatan kecepatan motor *fan* berdampak besar terhadap konsumsi energi listrik, sehingga pengaturan kecepatan yang optimal diperlukan untuk mencapai keseimbangan antara kinerja pendinginan dan efisiensi energi pada sistem *cooling tower*.

## V. KESIMPULAN

### A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan model, implementasi, dan simulasi ke dalam *software* MATLAB *Simulink*, maka kesimpulan pada penelitian ini dapat dituliskan sebagai berikut :

1. Sistem pemodelan dinamis *cooling tower* berhasil dibuat dengan menggunakan pendekatan hukum kesetimbangan energi termodinamika I yang dikorelasikan dengan hukum *fan*.
2. Model simulasi yang dikembangkan menggunakan MATLAB *Simulink* memiliki tingkat akurasi yang baik dalam merepresentasikan karakteristik termal *cooling tower*. Hasil validasi menunjukkan bahwa perbedaan antara hasil simulasi dan data operasional relatif kecil dengan rata-rata *error* sebesar 0.047% dan menunjukkan pola perubahan yang sejalan dengan data aktual.
3. Variasi kecepatan motor *fan* berpengaruh signifikan terhadap daya motor dan konsumsi energi listrik sistem *cooling tower*. Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan kecepatan motor *fan* dari 750 RPM ke 1500 RPM menyebabkan daya motor meningkat dari 1.4 kW menjadi 11.1 kW, sementara konsumsi energi listrik meningkat dari 13.88 kWh menjadi 111.0 kWh selama periode operasi.
4. Suhu air keluar *cooling tower* dipengaruhi oleh kecepatan motor *fan*, saat kecepatan diturunkan maka suhu air keluar akan mengalami kenaikan nilai dan sebaliknya.

### B. Saran

1. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mengintegrasikan sistem kecepatan motor *fan* menggunakan *Variable Speed Drive (VSD)* agar dapat diketahui secara rinci mengenai arus, tegangan, dan frekuensi pada motor.
2. Data yang digunakan pada penelitian ini memiliki keterbatasan, khususnya terkait nilai laju aliran udara (*ma*) sehingga dilakukan asumsi bahwa nilai laju aliran udara secara linear berpengaruh terhadap nilai kapasitas pendinginan (*Q*) berdasarkan pendekatan teori hukum *fan* (*affinity laws*) tanpa validasi berdasarkan data lapangan.
3. Analisis keekonomian terkait penghematan energi listrik harian, mingguan, bulanan, tahunan, dan potensi penurunan biaya operasional dapat dikembangkan untuk menilai manfaat dampak dari perubahan kecepatan motor.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] "Statistik PLN 2024 Data Operasional (Unaudited)."
- [2] J. C. Hensley, "Cooling Tower Fundamentals," 2009.
- [3] N. P. Pratiwi, N. Gunawan, and N. L. Hamidah, "Analisa Kinerja Cooling Tower Induced Draft Tipe LBC W-300 Terhadap Pengaruh Temperatur Lingkungan," Surabaya, 2014.
- [4] N. Sandrugu, S. Naresh, and B. Mahendra, "Design and Optimization of Centrifugal Fan Radial Blade Impeller," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/366720436>
- [5] A. G. Suganda, R. F. Muldiani, and B. Suharto, "Perancangan Fill Pack Cooling Tower Induced Draft Counterflow Pada Sistem Pendingin," Bandung, 2024.
- [6] S. Wuryanti, "Peningkatan Efektivitas Cooling Tower dengan Metoda Air High Speed," vol. 10, 2020.
- [7] I. Saputra, A. Mursadin, and P. Studi Teknik Mesin, "Analisis Temperatur Lingkungan Terhadap Kinerja Cooling Tower di PT. Indocement Tunggul Prakarsa Tbk. P-12 Tarjun Kalimantan-Selatan," vol. 3, pp. 159–172, 2021, [Online]. Available: <https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/rot>
- [8] S. Cooling Technologies, "Variable Flow Over Cooling Towers for Energy Savings (Thermal Science)," 2017. [Online]. Available: <https://spxcooling.com>
- [9] *The Integral*. Massachusetts: Five Colleges, Inc., 2008.
- [10] A. Kurniawan and H. Charles, "Analisa Pengaruh Proses Pendinginan Terhadap Temperatur Angin Masukan Stage Terakhir pada Kompresor Sentrifugal Multistage IHI TRE-50," 2019.
- [11] X. Li, Y. Li, and J. E. Seem, "Dynamic Modelling of Mechanical Draft Counter-Flow Wet Cooling Tower With Modelica."
- [12] N. Muntean, C. Volosencu, A. Hedes, N. Muntean, C. Volosencu, and A. Hedeş, "A temperature control system for water cooling towers based on variable speed drives," 2008. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/262315527>

## VII. BIODATA PENULIS



Gilang Ilham Ramadhan, lahir di Blitar 28 Januari 1996. Asal pendidikan SMKN 1 Blitar jurusan Teknik Instalasi Tenaga Listrik lulus pada tahun 2015. Penulis selanjutnya meneruskan studi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya – ITS Surabaya pada prodi D3 Teknik Kelistrikan Kapal dan lulus pada tahun 2018. Pada masa 2018 – saat ini, aktif bekerja sebagai salah satu staff di industri yang bergerak di bidang manufaktur. Pada tahun 2024 penulis memutuskan untuk melanjutkan studi di ITN Malang dengan memilih program RPL pada jurusan S1 Teknik Elektro dengan bidang konsentrasi Teknik Energi Listrik.