



**ANALISIS VARIASI TEGANGAN LISTRIK KIPAS *COOLING*
TOWER INDUCED DRAFT COUNTERFLOW DENGAN
PENGISI BAMBU WULUNG**

SKRIPSI

Oleh

M. MIRZA ROSID SUDRAJAT

NIM 111910101031

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2015**



**ANALISIS VARIASI TEGANGAN LISTRIK KIPAS *COOLING*
TOWER *INDUCED DRAFT COUNTERFLOW* DENGAN
PENGISI BAMBU WULUNG**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

M. MIRZA ROSID SUDRAJAT

NIM 111910101031

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2015**

PERSEMBAHAN

Syukur Alhamdulillah atas kehadiran ALLAH SWT. Penguasa alam semesta. Shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW. Keluarga, sahabat, beserta pengikutmya. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

1. Bapak saya Hariyanto yang selalu memberikan kasih sayang, motivasi, dan pengorbanan yang tiada tara, mendidik dan menasehati saya tanpa lelah, serta doa yang selalu tercurahkan dengan penuh keikhlasan.
2. Almarhumah Ibu saya Umi Nikmah semoga amal ibadah beliau diterima disisi Allah SWT.
3. Kakak saya Luluk Rahmawati, Madely Prastiani, dan Laili vina Fitria yang telah mendukung, memberikan motivasi dan hiburan kepada saya.
4. Semua staf pengajar dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang senantiasa memberikan ilmunya, semoga menjadi ilmu yang bermanfaat dan barokah. Bapak Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc. selaku dosen pembimbing utama, Bapak Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W.,S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing anggota yang selalu memberikan saran dan arahan yang sangat membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini. Bapak Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T. selaku dosen penguji utama dan Bapak Sumarji, S.T., M.T. selaku dosen penguji anggota yang telah banyak sekali saran dan berbagai pertimbangan menuju ke arah yang benar dalam penyelesaian skripsi ini;
5. Pengasuh Pondok Pesantren AL-Aufaa Kyai Muhammad sirad serta keluarga besar yang telah memberikan tempat tinggal serta pengetahuan agama selama saya tinggal di Jember.
6. Semua guru mulai dari guru MI, SMP, maupun SMK yang tidak kenal lelah menularkan ilmunya, membimbing serta memberikan arahan yang terbaik hingga saya ke jenjang perguruan tinggi;

7. Teman-temanku seperjuangan di pesantren AL-Aufaa. Ubaidillah, Iqbal Haqiqi, Nanang, Faisol, Fiky, Riky, Rudi, Wiwit, suaib, dan arif. Yang telah menemani saat suka maupun duka.
8. Dulur-dulur seperjuangan Teknik Mesin angkatan 2011 Abdul Haqqi, Achmad Alifiyan Sobirin, Adam Malik, Adi Febrianto, Agung Widodo, Agus Widiyanto, Ahmad Amril Nurman, Ahmad Shofiyanto, Ahmad Sofyan Hadi, Ahmada Wildan Khadziq, A'isyatul Khoiriyah, Akhmad Mahfud, Aman Sentosa, Andre Tito Dias Setiawan, Annas Widadtyawan Firdaus, Anton Cahyono, Anugrah V Ilannuri, Arief Hidayatullah, Arif Rahmat, Ario Kristian Iman Taka, Aunur Rofik, Bangkit Nurul Akmal, Dani Arief Bahtiar Tri Setiaji, Dhimas Triadi Setyawan, Dwi Wahyu Sujatmiko, Erdha Kogarta Dendi Purnama, Faishal Karamy, Farihen, Febri Anggih Setiawan, Febrian Rhama Putra, Ferdiansya Dayu, Fitria Mahardika, Hanif Rahmat H, Harsono Prasetyo, Hegar Dwi Jaya Sukma, Hendry Wicaksana Sugianto, Ikawati, Imron Rosyadi O.S, Indra Jufri N, Irsyadul Abshor, Itok Denis Pradipta, Kiki Ermawati, Luki Agung Prayitno, Luthfi Hilman Fadhillah, M Syaifuddin Ihsan, Mar'iy Muslih M, Meinovan Dani S, Moch. Wildan T, Moch. Yunus, Mochamad Asrofi, Moh. Arisyabana, Mohammad Arif Ramdhoni, Mohammad Dahlaz Dzuhro, Mohammad Satria Resa Pratama, Muhammad Abduh, Muhammad Agung Fauzi, Muhammad Kahlil Gibran, Muhammad Mukri, Muhammad Zaenal Arifin, Muslih Muhammad, Naufal Firas, Niko Putra Karunia, Novia Devi Triana, Nuruddin Hamid, Pemi Juni Setiawan, Riza Hasbi Prasetya, Rizki Erizal Muhammad, Rizky Bagus Premordiya, Saddam Husein, Saiful Rizal, Setyo Pambudi, Sigit Jatmiko, Syaadillah Farhan, Wildan Mukholladun, Yohanes Christian Susanto, Yudhastian Angga Rahmanto, Yulius Kristian, Yunanda Anggi Prasetya dan Yurike Elok Purwanti saya ucapkan terima kasih atas dukungan, kekompakan dan bantuannya selama ini. salam Solidarity Forever.

MOTO

Maka nikmat Tuhanmu yang manakah yang kamu dustakan?
(terjemahan Al-Qur'an surat Ar-Rahman ayat 13)^{*)}

Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia yang lain
(HR. Thabrani dan Daruquthni)^{**)}

Sukses bukan hanya sekedar kita punya uang banyak, tapi sukses itu ketika kita bisa
membuat orang lain punya harapan, dari sana kebahagiaan
bisa kita dapatkan.^{***)}

^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia. 1998. Al Qur'an dan Terjemahannya. Semarang: PT Kumudarmoro Grafindo.

^{**)} Shahih al-Jami' no 3289 (Hasan).

^{***)} Chelsea Islan dalam Film Merry Riana Mimpi Sejuta Dolar. 2014. menit ke 100. MD Pictures

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. MIRZA ROSID SUDRAJAT

NIM : 111910101031

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas *Cooling Tower Induced Draft Counterflow* dengan Pengisi Bambu Wulung” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 26 Juni 2015

Yang menyatakan,

(M. MIRZA ROSID SUDRAJAT)

NIM 111910101031

SKRIPSI

**ANALISIS VARIASI TEGANGAN LISTRIK KIPAS *COOLING*
TOWER *INDUCED DRAFT COUNTERFLOW* DENGAN PENGISI
BAMBU WULUNG**

Oleh

M. Mirza Rosid Sudrajat
NIM 111910101031

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W., S.T., M.Eng.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas Cooling Tower Induced Draft Counterflow dengan Pengisi Bambu Wulung” yang telah diuji dan disahkan pada:

Hari, Tanggal : 26 Juni 2015

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Sekretaris,

Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc.
NIP. 196806171995011001

Dr. R. Koekoeh K.W., S.T., M.Eng
NIP 196707081994121001

Anggota I,

Anggota II,

Aris Zainul Muttaqin, ST., M.T.
NIP. 196812071995121002

Sumarji, S.T., M.T.
NIP. 196602021997021001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP.196104141989021001

RINGKASAN

Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas Cooling Tower Induced Draft Counterflow dengan Pengisi Bambu Wulung; M. Mirza Rosid Sudrajat, 111910101031; 2015; 70 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Udara merupakan salah satu komponen *Cooling Tower* yang berfungsi membuang panas ke atmosfer. Semakin banyak debit udara yang melewati *Cooling Tower* diharapkan panas yang dibuang ke atmosfer lebih banyak. Peningkatan debit udara ini dilakukan dengan memvariasikan tegangan listrik motor penggerak kipas. Bahan pengisi yang berfungsi untuk memecahkan aliran air yang dijatuhkan dari *nozzle* menjadi butiran butiran tetes air, dengan maksud memluas permukaan pendinginan. Bahan pengisi bambu wulung diharapkan bisa memaksimalkan pendinginan.

Dalam penelitian ini difokuskan tentang efektivitas pendinginan *Cooling Tower* dengan variasi penambahan suhu awal dan penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah suhu awal 40 °C, 50 °C dan 60 °C. Variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas yaitu 0 volt, 110 volt dan 220 volt.

Hasil penelitian menunjukkan, efektivitas pendinginan dengan nilai tertinggi terjadi suhu awal 40 °C dan variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 volt dengan nilai efektivitas pendinginan 78,11 %. Semakin tinggi tegangan listrik pada motor penggerak kipas maka efektivitas pendinginan akan semakin naik. Penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas mengakibatkan debit udara yang masuk *cooling tower* meningkat sehingga pendinginan semakin maksimal. Kapasitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 volt dan suhu awal 60 °C, sebesar 14,19 kJ/s.

SUMMARY

Variation Analysis of Voltage Cooling Tower Fan Induced Draft counterflow with Wulung Bamboo Filler; M. Mirza Rosid Sudrajat, 111910101031; 2015; 70 pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Air is one component of a functioning Cooling Tower dissipates heat into the atmosphere. The more discharge air passing through the Cooling Tower is expected to heat discarded into the atmosphere more. Increased of air flow accomplished by varying voltage electrical the motor fan. Filler material that serves to break the flow of water dropped from a nozzle into graininess drops of water , with the intention of extending the cooling surface. Filler material of wulung bamboo expected can maximize cooling process.

This research focused on the effectiveness of cooling in coolingtower with the temperature variationthe addition of the beginning and the addition of voltage electricity in the motor fan. A variation that used in this research is early office channeling temperature 40 °C, 50 °C and 60 °C. Voltage variations on the engine of a fan is 0 volt , 110 volts and 220 volts

The outcome from this research is effectiveness of cooling with the highest value in temperature 40 °C and variation of voltage electric motor fan 220 volts to the value of the effectiveness of cooling 78,11%. The high voltage electricity in the motor fan then the effectiveness of cooling will be rising.The addition of voltage electricity in the motor fan resulting incoming air discharge cooling tower increase so that it cooling more maximal.The capacity of cooling highest was upon variations of voltage the motor fan 220 volts and initial of temperature 60 °C is 14,19 kJ/s.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Shalawat serta salam semoga Allah SWT limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai sumber inspirasi dan membuat penulis lebih kuat dan menatap setiap hal yang penuh optimis dan berfikir positif, dalam menunjang kemampuan penulis dalam menajalani persaingan globalisasi kerja nantinya.

Skripsi ini berjudul “Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas *Cooling Tower Induced Draft Counterflow* dengan Pengisi Bambu Wulung”. Penyusunan skripsi ini digunakan untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada semua yang telah memberikan bimbingan, dukungan, dan arahan kepada penulis selama penyusunan laporan skripsi ini, khususnya kepada:

1. Keluargaku, Ayahanda tercinta Hariyanto, Almarhumah Umi Nikmah, Kakak-kakakku tersayang Luluk Rahmawati, Madely prastiani, dan Laili Vina Fitria atas segala do'a, dukungan semangat dan materil. Terimakasih atas semua cinta, kasih sayang, perhatian, doa, pengorbanan, motivasi dan bimbingan kalian semua demi terciptanya insan manusia yang beriman, bertaqwa, berakhlak mulia, dan berguna bagi bangsa negara. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya serta membalas semua kebaikan yang telah kalian lakukan.
2. Staf pengajar semua dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan ilmu dan bimbingan kepada saya terutama Bapak Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc, selaku dosen pembimbing utama, Bapak Dr. Robertoes Koekoeh Koentjoro W., S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing anggota, Bapak Aris Zainal Muttaqin, S.T., M.T., selaku dosen penguji I, dan Bapak Sumarji, S.T., M.T., selaku dosen penguji II.

3. Seluruh saudara-saudara seperjuangan teknik mesin angkatan 2011 yang telah memberikan kontribusi, dukungan, ide yang inspiratif, dan kritikan yang konstruktif. Terimakasih atas semua kontribusi yang kalian berikan.
4. Ach. Taufik Hidayat teknik mesin angkatan 2010 yang telah mengizinkan memakai sebagian dari komponen *cooling tower* miliknya dalam penelitian saya ini.
5. Seluruh staf dan karyawan Fakultas Teknik Universitas Jember.
6. Semua guru-guru dan keluarga basar di Pondok Pesantren Al-Aufaa Jl.Slamet riyadi no. 27 A Patrang Jember terutama K.M Sirat, ust. Kholis, dan Ust. As'ad yang telah memberikan motifasi dan dukungan spiritual.
7. Semua pihak yang telah membantu proses penelitian dan penyusunan skripsi ini dari awal hingga akhir.

Penulis menyadari sebagai manusia yang tak lepas dari kekhilafan dan kekurangan, oleh karena itu diharapkan adanya kritik, saran, dan ide yang bersifat konstruktif demi kesempurnaan skripsi ini dan penelitian berikutnya yang berkaitan dengan skripsi ini. Semoga hasil dari penelitian pada skripsi ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi penulis dan peneliti – peneliti berikutnya.

Jember, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

| | HALAMAN |
|--|-----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| PERSEMBAHAN | ii |
| MOTO | iv |
| PERNYATAAN | v |
| PEMBIMBING | vi |
| PENGESAHAN..... | vii |
| RINGKASAN..... | viii |
| PRAKATA | x |
| DAFTAR ISI | xii |
| DAFTAR GAMBAR..... | xv |
| DAFTAR TABEL | xvii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xviii |
| BAB 1. PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah..... | 3 |
| BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Definisi <i>Cooling Tower</i> | 5 |
| 2.2 Konstruksi dan Komponen <i>Cooling Tower</i>..... | 6 |
| 2.3 Jenis-Jenis Menara Pendingin | 10 |
| 2.3.1 Menara Pendingin Jenis <i>Natural Draft</i> | 11 |
| 2.3.2 Menara Pendingin <i>Draft</i> Mekanik | 11 |
| 2.4 Fungsi dan Cara Kerja <i>Cooling Tower</i> | 14 |

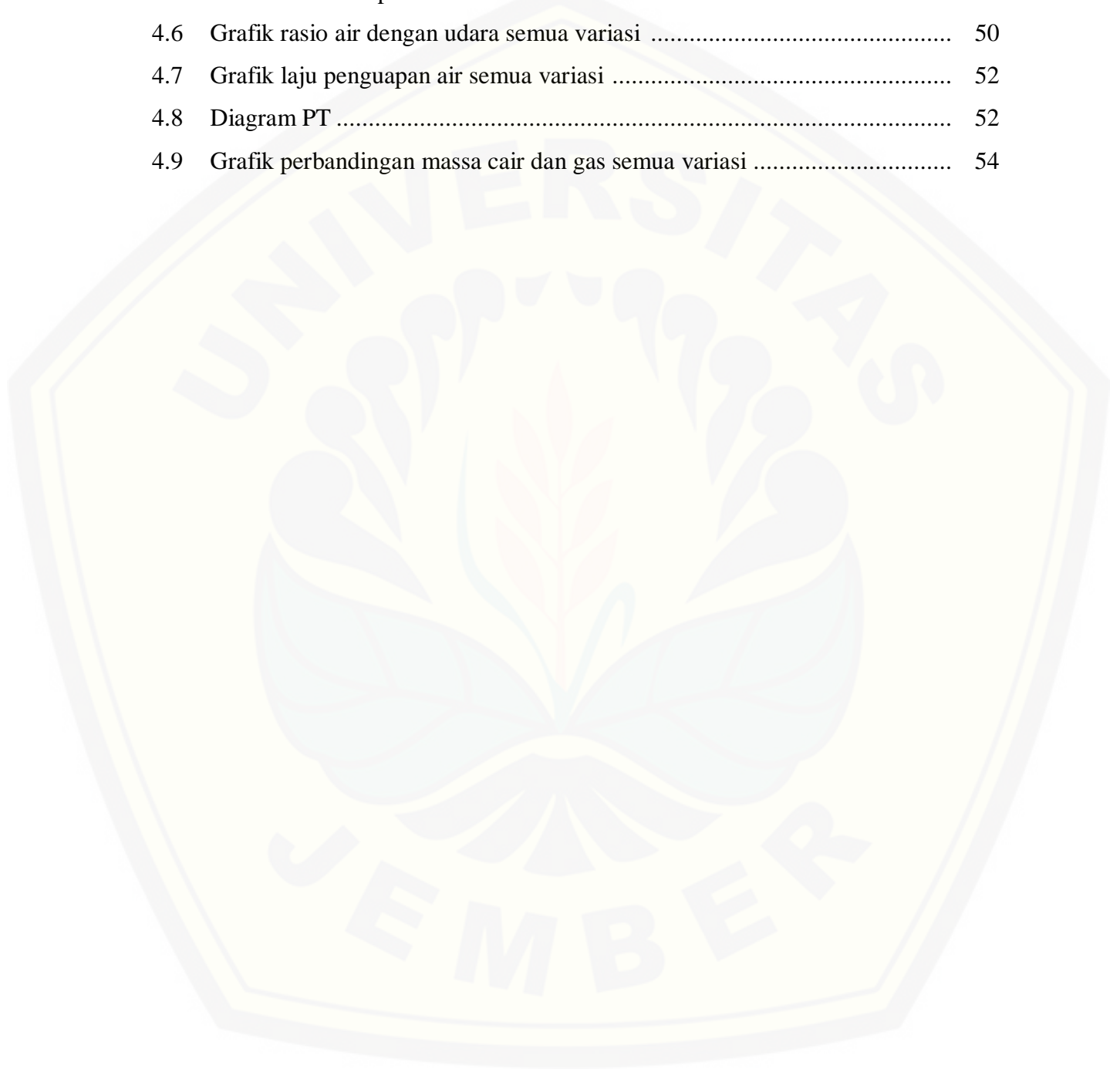
| | |
|--|----|
| 2.4.1 Fungsi <i>Cooling tower</i> | 14 |
| 2.4.2 Cara Kerja <i>Cooling tower</i> | 15 |
| 2.5 Kinerja <i>Cooling Tower</i> | 16 |
| 2.6 Analisis Menara Pendingin Aliran Berlawanan | 19 |
| 2.7 Bambu | 22 |
| 2.8 Air | 24 |
| 2.9 Penelitian Terdahulu | 25 |
| 2.10 Hipotesis | 28 |
| BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN | 30 |
| 3.1 Metode Penelitian | 30 |
| 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian | 30 |
| 3.3 Alat dan Bahan | 30 |
| 3.3.1 Alat dan Instrumen Penelitian | 30 |
| 3.3.2 Bahan Penelitian | 32 |
| 3.3.3 Spesifikasi <i>Cooling Tower</i> | 33 |
| 3.4 Prosedur Penelitian | 34 |
| 3.4.1 Persiapan Alat Pengujian | 34 |
| 3.4.2 Pemeriksaan Alat Pengujian | 34 |
| 3.4.3 Tahapan Pengambilan Data | 34 |
| 3.5 Rangkaian <i>Cooling Tower Induced Draft Counter flow</i> | 35 |
| 3.6 Variabel | 35 |
| 3.6.1 Variabel Bebas | 36 |
| 3.6.2 Variabel Terikat | 36 |
| 3.7 Analisa Data | 36 |
| 3.8 Diagram Alir | 38 |
| BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN | 39 |
| 4.1 Data Hasil Pengujian | 39 |
| 4.2 Range | 40 |
| 4.3 Approach | 42 |

| | |
|--|----|
| 4.4 Efektivitas Pendinginan | 44 |
| 4.5 Kapasitas Pendinginan | 46 |
| 4.6 Debit Air Spesifik | 48 |
| 4.7 Rasio Air dengan Udara | 49 |
| 4.8 Laju Penguapan Air | 51 |
| 4.9 Perbandingan aliran Massa Cair Terhadap Gas (L/G) | 53 |
| BAB 5. PENUTUP | 56 |
| 5.1 Kesimpulan | 56 |
| 5.2 Saran | 57 |
| DAFTAR PUSTAKA | 58 |
| LAMPIRAN | 60 |

DAFTAR GAMBAR

| | HALAMAN |
|--|---------|
| 2.1 Diagram skematik sistem menara pendingin | 5 |
| 2.2 Konstruksi menara pendingin..... | 6 |
| 2.3 <i>Splash fill</i> | 8 |
| 2.4 <i>film fill</i> | 9 |
| 2.5 <i>Low-clog film fill</i> | 9 |
| 2.6 <i>Drift eliminators</i> | 10 |
| 2.7 Menara pendingin natural draft aliran melintang | 11 |
| 2.8 Menara Pendingin <i>induced draft cross flow cooling tower</i> | 12 |
| 2.9 Menara Pendingin <i>forced draft</i> | 13 |
| 2.10 Menara Pendingin <i>induced draft</i> | 14 |
| 2.11 Grafik lintasan udara pada menara pendingin aliran berlawanan | 14 |
| 2.12 Skema kerja <i>cooling tower</i> | 15 |
| 2.13 Grafik <i>Range</i> dan <i>approach</i> temperatur pada menara pendingin..... | 16 |
| 2.14 Pertukaran energi menara pendingin berlawanan arah | 20 |
| 2.15 Diagram entalpi-suhu udara dan air..... | 21 |
| 2.16 Menara pendingin <i>induced counter flow</i> | 26 |
| 2.17 Skema rangkaian <i>Cooling Tower induced draft counter flow</i> | 28 |
| 3.1 Kipas | 31 |
| 3.2 <i>Heater</i> | 32 |
| 3.3 <i>Nozzle</i> | 32 |
| 3.4 Susunan bambu pengisi..... | 33 |
| 3.5 Skema Rangkaian <i>Cooling Tower induced draft counter flow</i> | 35 |
| 3.6 Diagram alir penelitian | 38 |
| 4.1 Grafik temperatur <i>range</i> semua variasi | 40 |
| 4.2 Grafik temperatur <i>approach</i> semua variasi | 42 |
| 4.3 Grafik temperatur efektivitas pendinginan semua variasi | 45 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.4 | Grafik temperatur Kapasitas pendinginan semua variasi | 47 |
| 4.5 | Grafik debit air spesifik semua variasi | 49 |
| 4.6 | Grafik rasio air dengan udara semua variasi | 50 |
| 4.7 | Grafik laju penguapan air semua variasi | 52 |
| 4.8 | Diagram PT | 52 |
| 4.9 | Grafik perbandingan massa cair dan gas semua variasi | 54 |



DAFTAR TABEL

| | HALAMAN |
|---|---------|
| 2.1 Konduktivitas termal bahan | 23 |
| 2.2 Kuat tarik dan berat jenis bambu..... | 24 |
| 2.3 Kalor jenis zat..... | 25 |
| 3.1 Spesifikasi pompa air | 31 |
| 3.2 Spesifikasi kipas | 31 |
| 4.1 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 0 volt..... | 39 |
| 4.2 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 110 volt..... | 39 |
| 4.3 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 220 volt..... | 39 |
| 4.4 Data rata-rata hasil penghitungan range dari semua variasi..... | 40 |
| 4.5 Data rata-rata hasil penghitungan approach dari semua variasi..... | 42 |
| 4.6 Data rata-rata hasil penghitungan efektivitas pendinginan dari semua Variasi | 44 |
| 4.7 Data rata-rata hasil penghitungan kapasitas pendinginan dari semua Variasi | 47 |
| 4.8 Data rata-rata hasil debit air spesifik dari semua variasi | 48 |
| 4.9 Data rata-rata hasil rasio air dengan udara dari semua variasi..... | 50 |
| 4.10 Data rata-rata hasil debit laju penguapan air dari semua variasi..... | 51 |
| 4.11 Data rata-rata hasil L/G dari semua variasi..... | 54 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | HALAMAN |
|--|-----------|
| LAMPIRAN 1. Tabel data hasil pengujian..... | 60 |
| A.1 Tegangan 0 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 40 °C | 60 |
| A.2 Tegangan 0 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 50 °C | 60 |
| A.3 Tegangan 0 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 60 °C | 60 |
| A.4 Tegangan 110 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 40 °C | 61 |
| A.5 Tegangan 110 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 50 °C | 61 |
| A.6 Tegangan 110 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 60 °C | 61 |
| A.7 Tegangan 220 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 40 °C | 62 |
| A.8 Tegangan 220 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 50 °C | 62 |
| A.9 Tegangan 220 volt pada kipas <i>Cooling Tower</i> dengan suhu awal 60 °C | 62 |
| LAMPIRAN 2. Nilai rata-rata, Volume spesifik, Rasio kelembaban, Entalpi | 63 |
| LAMPIRAN 3. Perhitungan | 64 |
| LAMPIRAN 4. Hasil Semua Perhitungan rata-rata | 66 |
| LAMPIRAN 5. Gambar Pengujian | 67 |

BAB. 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan mesin konversi energi yang terus mengalami peningkatan dengan adanya perbaikan dan modifikasi agar tercapainya efisiensi yang maksimum. Salah satu usaha peningkatan efisiensi dengan menjaga temperatur mesin agar tidak terjadi *over heating* (panas berlebih). Proses pendinginan mesin menjadi sangat penting agar mesin bekerja dengan baik dan tidak menghambat kinerja mesin itu sendiri. Metode pendinginan yang sering digunakan adalah menggunakan fluida cair atau dengan hembusan angin untuk membantu proses pendinginannya. Beberapa model sistem pendinginan seperti menara pendingin (*cooling tower*), radiator, sirip-sirip angin dan banyak lagi yang lainnya. Pentingnya fungsi dari sebuah sistem pendinginan mesin mengharuskan kita supaya lebih berinovasi agar proses pendinginan lebih cepat atau dengan kata lain mempercepat penyerapan panas pada mesin dan membuang panas ke lingkungan.

Cooling tower merupakan salah satu alat penukar kalor yang fluida kerjanya adalah air dan udara, yang biasanya digunakan untuk mesin-mesin yang berada pada tempat yang tidak berpindah-pindah. Penempatan *cooling tower* bersifat semi permanen jadi jika ingin merubah instalasinya maka perlu pembongkaran pipa-pipa dan komponen lainnya. *Cooling tower* ini biasanya dipakai di pabrik-pabrik dengan mesin yang menghasilkan panas cukup besar.

Cooling tower digunakan sebagai pembantu menurunkan panas dari suatu fluida. Banyak penelitian tentang *cooling tower*, dimaksudkan untuk mengetahui seberapa penting *cooling tower* sebagai pendinginan mesin. Karakteristik *cooling tower* saat ini hanya membandingkan antara data manual kisaran (*range*), pendekatan (*approach*), dan beban kalor (*cooling load*), tentu tidak relevan dengan kondisi operasional saat ini, menanggapi hal tersebut harus ada pengujian yang sesuai dengan operasional yang ada.

Cooling tower induced draft counterflow dengan bahan pengisi bambu wulung, merupakan modifikasi penelitian dari berbagai macam variasi *cooling tower* yang ada, diharapkan modifikasi ini dapat memaksimalkan kinerja dari *cooling tower* yang sebelumnya dibuat. Dengan bahan pengisi yang ramah lingkungan, mudah didapat, murah, diharapkan penelitian ini dapat menjadi tolak ukur efisiensi yang diharapkan selama ini dalam kinerja suatu mesin pendingin.

Penelitian yang sudah dilakukan diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Wibisono (2005) meneliti tentang perbandingan unjuk kerja antara bahan pengisi pada menara pendingin tipe *induced counter flow*. Dihasilkan *range* maksimal pada *packing* 5 lapis spons sebesar $3,2^{\circ}\text{C}$ pada *L/G Ratio* $2,33 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$ dan daya pendinginan maksimum $2690,6 \text{ w}$. Penelitian Mulyono (2010) tentang analisa beban kalor menara pendingin basah *induced-draft* aliran lawan arah, dengan efektivitas menara maksimal $57,1 \%$, *cooling range* 6°C , *Approach* $6,5^{\circ}\text{C}$ Perbandingan *L/G* $1,47 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$. Penelitian Hidayat (2014) meneliti tentang Analisis Beban Kalor *Cooling Tower Induced Draft Counter flow* Dengan Bahan Pengisi Bambu Wulung, dengan efektivitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi dengan suhu awal 40°C , ketinggian 200 cm sebesar $68,08 \%$ dengan menggunakan bahan pengisi. Sedangkan perubahan temperatur air tertinggi terjadi pada variasi suhu awal 70°C , tinggi 200 cm , tanpa atau dengan bahan pengisi dengan nilai 53°C dan 47°C Perbandingan massa cair dan gas (*L/G*) tertinggi terjadi pada variasi ketinggian 100 cm , temperatur air masuk 50°C , dengan menggunakan *fill* sebesar $1,51 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian *cooling tower* berperan penting untuk pelepasan panas atau mendinginkan suatu mesin.

Melihat kondisi yang ada penulis mencoba memberikan suatu solusi, dengan mengangkat suatu percobaan pengembangan pendinginan fluida dengan menggunakan *cooling tower*. Percobaan yang akan dilakukan yaitu memvariasikan kecepatan udara keluar. Diharapkan penelitian lanjutan ini, bisa memperbaiki kecepatan pelepasan kalor. Sehingga pendinginan akan semakin cepat dan kerja suatu mesin nantinya akan lebih maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisa kinerja *Cooling tower* dengan menambah debit udara untuk mempercepat pelepasan kalor. Penambahan debit udara dilakukan dengan cara menambah tegangan listrik pada motor penggerak kipas *cooling tower*. Adapun perumusannya :

- a. Pengaruh variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas udara keluar pada *cooling tower* terhadap laju pelepasan kalor.
- b. Kinerja *cooling tower* untuk melepaskan kalor dan seberapa besar efektivitas pendinginannya.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Untuk mengetahui pengaruh variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas udara keluar terhadap laju pelepasan kalor yang terjadi pada *cooling tower*
- b. Untuk mengetahui efektivitas pendinginan *cooling tower* dengan variasi yang ada.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

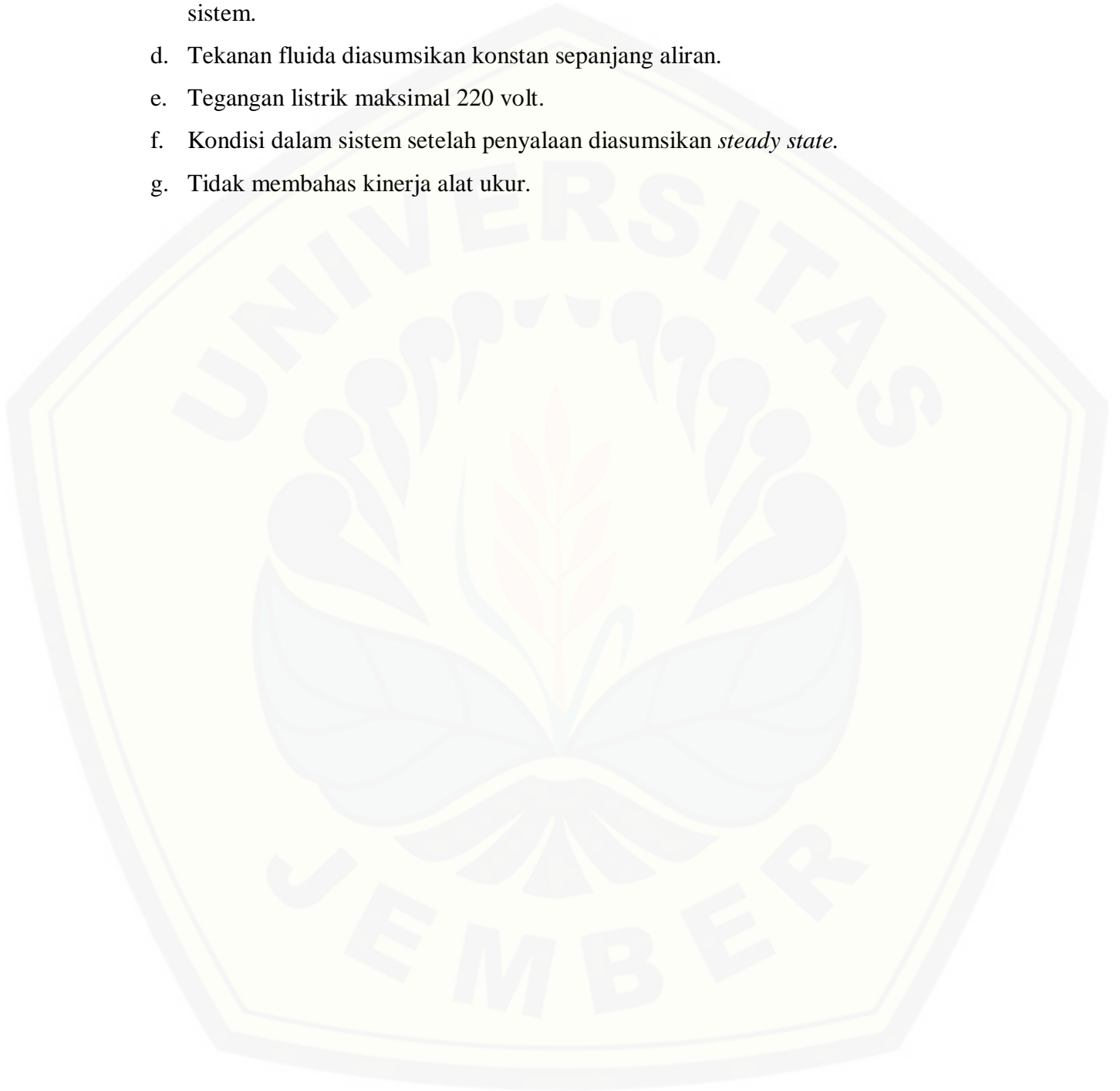
- a. Mengetahui laju pelepasan kalor dengan variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas udara keluar *cooling tower*.
- b. Mengetahui efektivitas pendinginan air pada *cooling tower* dengan memvariasikan tegangan listrik pada motor penggerak kipas udara keluar.

1.5 Batasan Masalah

Ada beberapa faktor yang tidak terkontrol sehingga dapat mempengaruhi pengambilan data dan analisis. Untuk itu perlu diberikan batasan dan asumsi agar mempermudah menganalisis permasalahan di atas yaitu :

- a. Properti dari fluida konstan sepanjang aliran.
- b. Sistem aliran terisolasi sempurna.

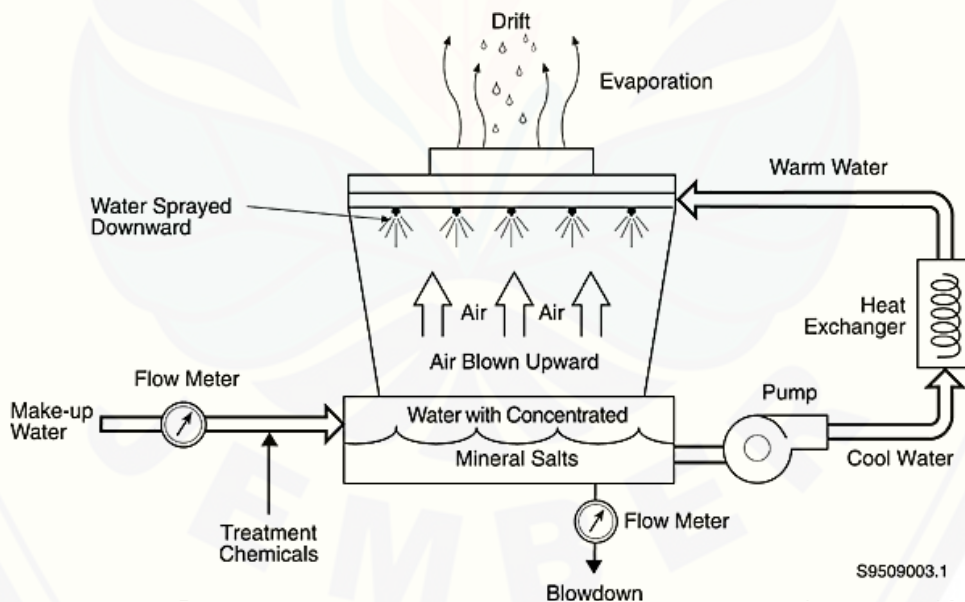
- c. Tidak menghitung perubahan energi kinetik dan energi potensial fluida pada sistem.
- d. Tekanan fluida diasumsikan konstan sepanjang aliran.
- e. Tegangan listrik maksimal 220 volt.
- f. Kondisi dalam sistem setelah penyalaan diasumsikan *steady state*.
- g. Tidak membahas kinerja alat ukur.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Definisi *Cooling Tower*

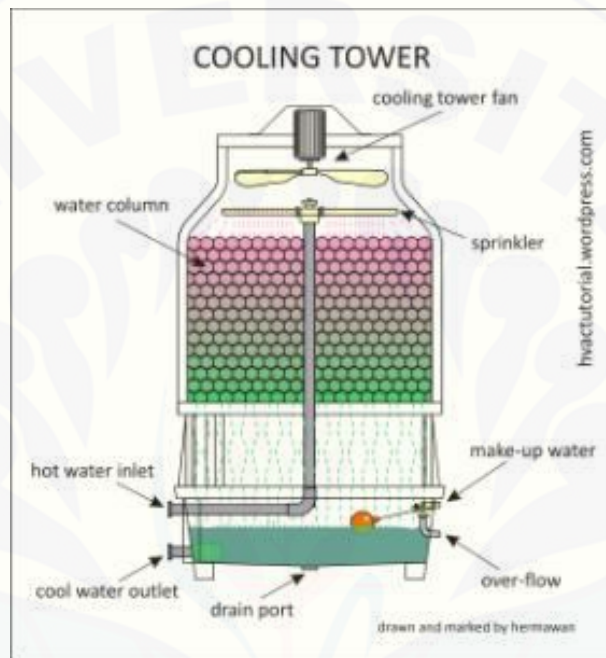
Cooling tower induced draft adalah peralatan pembuang kalor berdasarkan mekanisme pendinginan air dengan menggunakan udara yang berkontak secara langsung dan menguapkan sebagian air tersebut (Stoecker dan Jones, 2009). Sedangkan menurut El-Wakil dan Jasjfi (1992) *Cooling tower* (menara pendingin) merupakan alat penukar kalor dengan fluida kerja menggunakan air dan udara. Menara pendingin menggunakan penguapan dimana sebagian air diuapkan ke aliran udara yang bergerak dan kemudian dibuang ke atmosfer. Sebagai akibatnya, air yang tersisa didinginkan secara signifikan seperti dilihat pada Gambar 2.1. menara pendingin mampu menurunkan suhu air lebih dari peralatan-peralatan yang hanya menggunakan udara untuk membuang panas, seperti radiator dalam mobil, dan oleh karena itu biayanya lebih efektif dan efisien energinya.



Gambar 2.1. Diagram skematik sistim menara pendingin
(Sumber: Laboratorium Nasional Pacific Northwest, 2001)

2.2 Konstruksi dan Komponen *Cooling Tower*

Dari konstruksi *cooling tower* secara garis besar terdiri dari beberapa komponen dasar yang meliputi rangka dan wadah, bahan pengisi, kolam air dingin, *eliminator* aliran, saluran masuk udara, *louvers*, *nozzel* dan *fan*. Gambar 2.2 merupakan komponen-komponen *cooling tower* :



Gambar 2.2. Konstruksi menara pendingin.
(Sumber: Yulia, 2013)

1. Kerangka pendukung menara (*tower supporter*)

Tower supporter berfungsi untuk mendukung menara pendingin agar dapat berdiri kokoh dan tegak.

2. Rumah menara pendingin (*casing*)

Casing berfungsi sebagai rumah dari komponen-komponen *cooling tower* sehingga harus memiliki ketahanan yang baik terhadap segala cuaca agar komponen awet dan memiliki umur pakai (*life time*) yang lama.

3. Pipa *sprinkler*

Pipa *sprinkler* merupakan pipa yang berfungsi untuk mensirkulasikan air secara merata pada menara pendingin, sehingga perpindahan kalor air dapat menjadi

efektif dan efisien. Pipa *sprinkler* dilengkapi dengan lubang-lubang kecil untuk menyalurkan air.

Penggunaan *sprinkler* hanya untuk beberapa tipe *cooling tower* tertentu, sedangkan untuk tipe *cooling tower* yang lain digunakan *nozzle* untuk menyemprotkan air. Alat ini menyemprotkan air untuk membasahi bahan pengisi. Distribusi air yang seragam pada puncak bahan pengisi penting untuk mendapatkan pembasahan yang benar dari seluruh permukaan bahan pengisi.

4. Penampung air (*water basin*)

Water basin berfungsi sebagai pengumpul air sementara yang jatuh dari *filling material* sebelum disirkulasikan kembali ke kondensor. Kolam air dingin terletak pada bagian bawah menara. Kolam biasanya memiliki sebuah lubang atau titik terendah untuk pengeluaran air dingin.

5. Lubang udara (*inlet louver*)

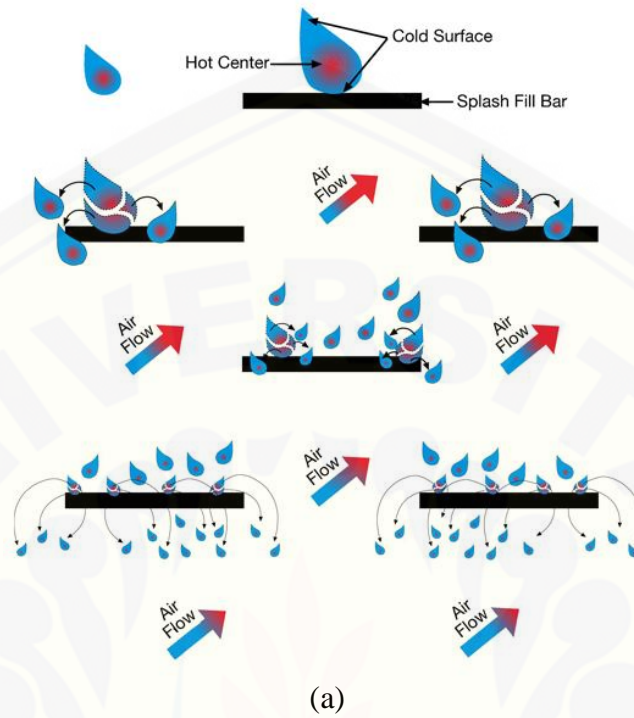
Inlet louver berfungsi sebagai tempat masuknya udara melalui celah-celah yang ada. Melalui *inlet louver* akan terlihat kualitas dan kuantitas air yang akan di distribusikan.

6. Bahan pengisi (*Filling material*).

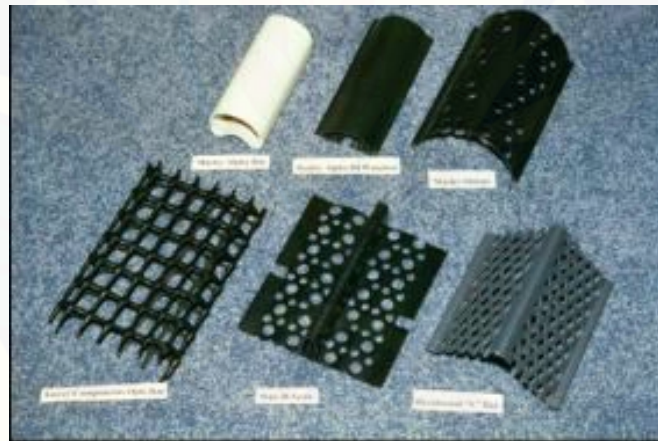
Hampir seluruh menara menggunakan bahan pengisi (terbuat dari plastik atau kayu) untuk memfasilitasi perpindahan panas dengan memaksimalkan kontak udara dan air. bahan pengisi harus dapat menimbulkan kontak yang baik antara air dan udara agar terjadi laju perpindahan kalor yang baik. Bahan pengisi harus kuat, ringan dan tahan lapuk. Jenis bahan pengisi dibagi menjadi dua:

a. Bahan pengisi jenis percikan (*Splash fill*)

Air jatuh diatas lapisan yang berurut dari batang pemercik horisontal, secara terus menerus pecah menjadi tetesan yang lebih kecil. Bahan pengisi percikan dari plastik memberikan perpindahan kalor yang lebih baik dari pada bahan pengisi percikan dari kayu. Gambar 2.3 dibawah ini adalah aliran percikan dan profil *splash fill*.



(a)



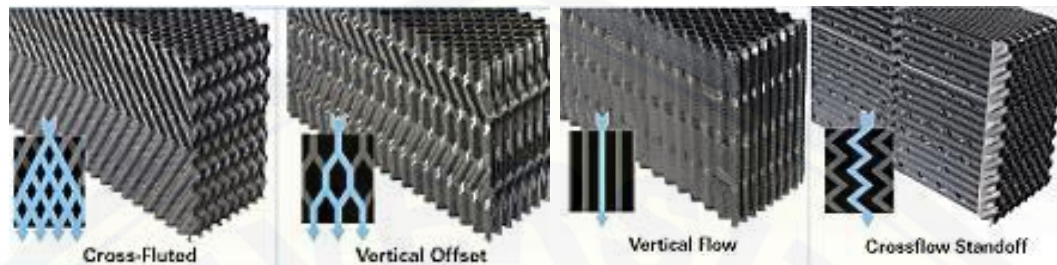
(b)

Gambar 2.3 (a) Aliran *splash fill*. (b) Profil *splash fill*
 (Sumber: (a) Tower component inc, 2012. (b) Fulkerson, 2012)

b. Bahan pengisi jenis film (*film fill*)

Film fill terdiri dari permukaan plastik tipis dengan jarak yang berdekatan dimana di atasnya terdapat semprotan air, membentuk lapisan film yang tipis dan melakukan kontak dengan udara. Permukaannya dapat berbentuk datar,

bergelombang, berlekuk, atau pola lainnya. Gambar 2.4 berikut ini adalah bahan pengisi jenis *film fill* dan aliran fluidanya.

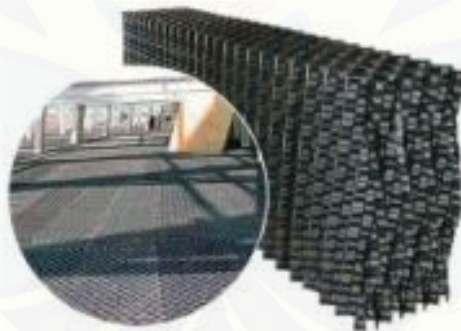


Gambar 2.4 *film fill* .

(Sumber: Process cooling magazine, 2014)

c. Bahan pengisi sumbatan rendah (*Low-clog film fill*)

Bahan pengisi sumbatan rendah saat ini dikembangkan untuk menangani air yang keruh. Jenis ini merupakan pilihan terbaik untuk air laut karena adanya penghematan daya dan kinerjanya, dibandingkan tipe bahan pengisi jenis percikan konvensional. Gambar 2.5 dibawah ini adalah bahan pengisi jenis sumbatan rendah (*Low-clog film fill*).



Gambar 2.5 *Low-clog film fill*

(Sumber: Spx cooling technologies, 2014)

7. *Drift eliminators*.

Alat ini berfungsi menangkap uap air yang terbentuk selama proses pendinginan. Udara ditabrakkan ada sebah bidang sehingga tetes-tetes air yang terjebak dalam aliran udara terpisah dari fluida udara. Proses ini untuk meminimalisir terbuangnya air ke atmosfir. Gambar 2.6 berikut ini merupakan *Drift eliminators*.



Gambar 2.6 Profil *drift eliminators* .
(Sumber: Beniz Endüstri, 2015)

8. Saluran udara masuk.

Merupakan titik masuk bagi udara menuju menara. Saluran masuk bisa berada pada seluruh sisi menara (desain aliran melintang) atau berada dibagian bawah menara (desain aliran berlawanan arah).

9. *Louvers*.

Kegunaan *louvers* adalah untuk menyamakan aliran udara ke bahan pengisi dan menahan air dalam menara. Beberapa desain menara aliran berlawanan arah tidak memerlukan *louvers*. Gambar 2.8 dibawah ini merupakan bentuk *louvers*.

10. Kipas.

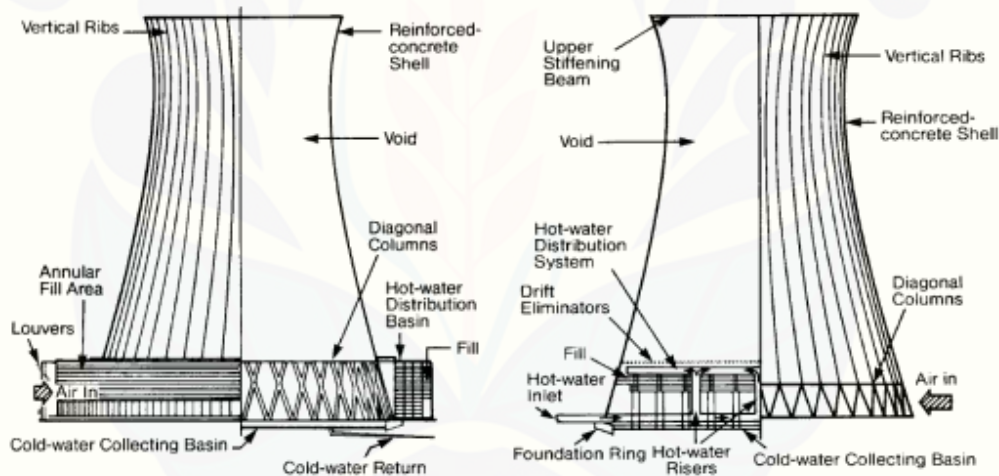
Kipas merupakan bagian terpenting dari sebuah menara pendingin karena berfungsi untuk menarik udara dingin dan mensirkulasikan udara tersebut di dalam menara untuk mendinginkan air. Jika kipas tidak berfungsi maka kinerja menara pendingin tidak akan optimal. Kipas digerakkan oleh motor listrik yang dikopel langsung dengan poros kipas.

2. 3 Jenis-Jenis Menara Pendingin

Menara pendingin secara garis besar dibagi menjadi dua, yaitu jenis *natural draft* dan jenis *mechanical draft*.

2.3.1 Menara Pendingin Jenis *Natural Draft*

Menara pendingin jenis *natural draft* atau hiperbola menggunakan perbedaan suhu antara udara ambien dan udara yang lebih panas dibagian dalam menara. Begitu udara panas mengalir ke atas melalui menara, udara segar yang dingin mengalir ke menara melalui saluran udara masuk di bagian bawah. Pada menara pendingin tipe ini tidak diperlukan *fan* dan hampir tidak ada sirkulasi udara panas yang dapat mempengaruhi kinerja. Kontruksi beton banyak digunakan untuk dinding menara dengan ketinggian hingga mencapai 200 m. Menara pendingin ini kebanyakan hanya digunakan untuk jumlah panas yang besar sebab struktur beton yang besar cukup mahal seperti terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Menara pendingin natural draft aliran melintang
(Sumber: Gulf Coast Chemical Commercial Inc, 1995)

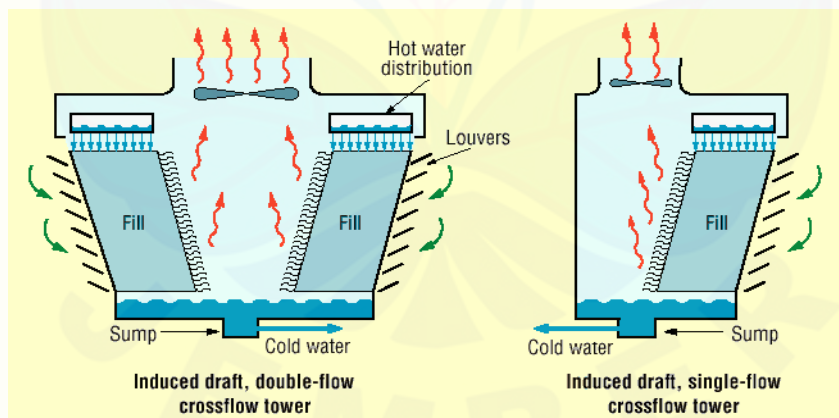
2.3.2 Menara Pendingin *Draft* Mekanik

Menara *draft* mekanik memiliki *fan* yang besar untuk mendorong atau mengalirkan udara melalui air yang disirkulasi. Air yang dijatuhkan diatas permukaan bahan pengisi akan menjadikan kontak udara dan air lebih lama, hal ini membantu dalam memaksimalkan perpindahan panas diantara keduanya. Beberapa parameter yang mempengaruhi laju pendinginan menara *draft* mekanis adalah diameter *fan* dan kecepatan operasi, bahan pengisi untuk tahanan sistim dan lain-lain. Menara tersedia

dalam bentuk rakitan pabrik atau didirikan dilapangan. Banyaknya menara pendingin tergantung kapasitas yang dikehendaki. Menara pendingin bisa dirakitan dari dua atau lebih menara pendingin individu. Aliran udara di menara pendingin basah terjadi dengan atau tanpa bantuan kipas (*fan*), arah aliran udara searah (*parallel flow*) atau aliran berlawanan arah (*counter flow*) dengan jatuhnya air. Ada tiga jenis menara draft mekanik yaitu jujut dorong (*forced draft*), aliran melintang jujut isap (*induced draft*), dan menara pendingin aliran berlawanan (*induced draft*).

a. *Induced draft cross flow cooling tower*

Pada tipe ini air masuk pada puncak dan melewati isian, udara masuk dari salah satu sisi (menara aliran tunggal), atau pada sisi berlawanan (menara aliran ganda) mengalirkan udara melintas isian menuju saluran keluar pada puncak seperti terlihat pada Gambar 2.8. Keuntungan dari tipe ini adalah lebih sedikit dari pada resirkulasi menara *forced draft* sebab kecepatan keluarnya udara 3 hingga 4 kali lebih tinggi dari pada udara masuk. Sedangkan kerugiannya *fan* dan mekanisme penggerak motor harus tahan cuaca terhadap embun dan korosi sebab mereka berada pada jalur udara keluar yang lembab.

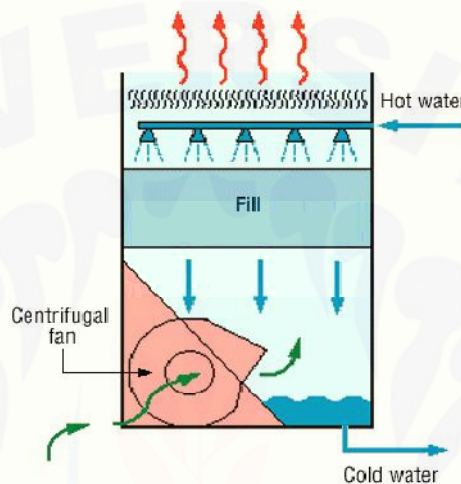


Gambar 2.8 Menara Pendingin *induced draft cross flow cooling tower*
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

b. *Forced draft cooling tower*

Pada jenis ini udara dihembus ke menara oleh *fan* di saluran udara masuk bagian bawah sehingga udara akan bertabrakan dengan air seperti yang ditunjukkan

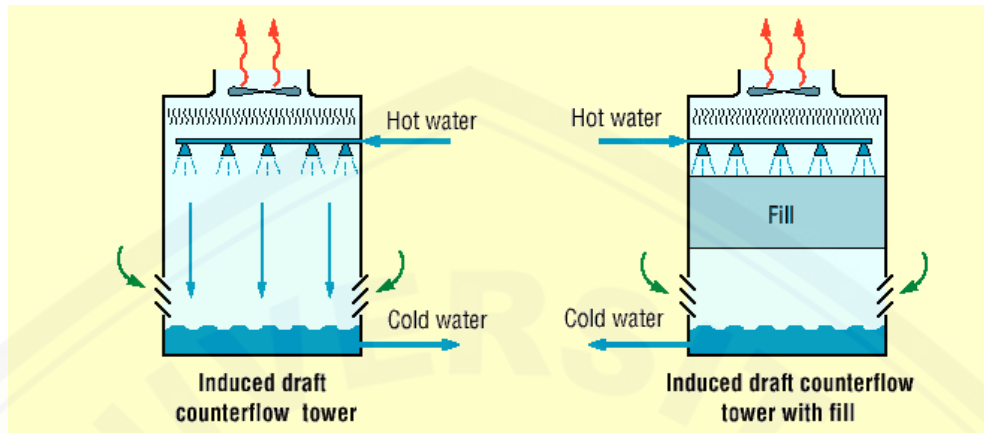
Gambar 2.9 . Keuntungan dari jenis ini adalah cocok untuk resistansi udara yang tinggi karena adanya *fan* dengan *blower* sentrifugal dan *fan* relatif tidak berisik. Kekurangannya adalah resirkulasi, laju udara masuk tinggi dan keluar rendah, solusinya dengan menempatkan menara di ruangan pabrik digabung dengan saluran buang.



Gambar 2.9 Menara Pendingin *forced draft*
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

a. Menara pendingin aliran berlawanan (*induced draft*)

Terlihat pada Gambar 2.10 air panas masuk pada puncak udara masuk dari bawah dan keluar pada puncak menggunakan *fan forced* dan *induced draft*. Keuntungan *induced draft* sama dengan *induced draft cross flow cooling tower* yaitu resirkulasi lebih sedikit menara sebab kecepatan keluaranya udara 3 hingga 4 kali lebih tinggi dari pada udara masuk. Sedangkan kerugiannya *Fan* dan mekanisme penggerak motor harus tahan cuaca terhadap embun dan korosi sebab mereka berada pada jalur udara keluar yang lembab.

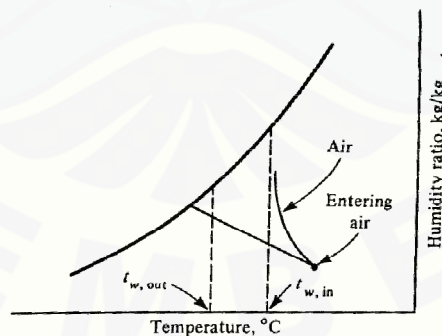


Gambar 2.10 Menara Pendingin *induced draft*
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

2.4 Fungsi dan Cara Kerja *Cooling Tower*

2.4.1 Fungsi *Cooling tower*

Cooling tower secara garis besar berfungsi untuk menyerap kalor dari air panas dan mengubah sejumlah air yang relatif dingin untuk dipergunakan kembali di suatu instalasi pendingin, dengan kata lain *cooling tower* berfungsi untuk menurunkan suhu aliran air dengan cara mengekstraksi panas dari air dan mengemisikannya ke atmosfer. Berikut adalah Gambar 2.11 Grafik lintasan udara pada menara pendingin aliran berlawanan.



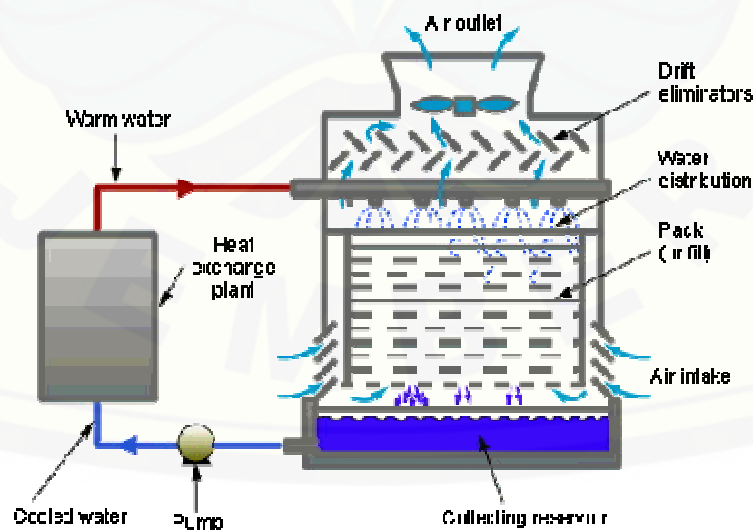
Gambar 2.11 Grafik lintasan udara pada menara pendingin aliran berlawanan.
(Sumber: Stoecker dan Jones, 2009)

Suatu laju perpindahan kalor *sensibel* didalam setiap bagian menara memungkinkan kita melakukan perhitungan suhu udara keluar, apabila suhu masuk diketahui.

2.4.2 Cara Kerja *Cooling tower*

Prinsip kerja *cooling tower* berdasarkan pada pelepasan kalor, perpindahan kalor berlangsung dari air ke udara. *cooling tower* menggunakan penguapan dimana sebagian air diuapkan ke aliran udara yang bergerak dan kemudian dibuang ke atmosfer. Prinsip kerja *cooling tower* dapat dilihat pada Gambar 2.12 Air dari bak dipompa menuju *heater* untuk dipanaskan dan dialirkan menuju *cooling tower*. Air panas yang keluar tersebut secara langsung melakukan kontak dengan udara sekitar yang bergerak secara paksa karena pengaruh *fan* yang terpasang pada bagian atas menara pendingin, lalu mengalir jatuh ke bahan pengisi.

Sistem ini sangat efektif dalam proses pendinginan air karena suhu kondensasinya sangat rendah mendekati suhu *wet-bulb* udara. Air yang sudah mengalami penurunan suhu ditampung kedalam bak. Didalam *cooling tower* juga dipasang katup *make up water* untuk menambah kapasitas air pendingin jika terjadi kehilangan air ketika proses *evaporative cooling* sedang berlangsung.



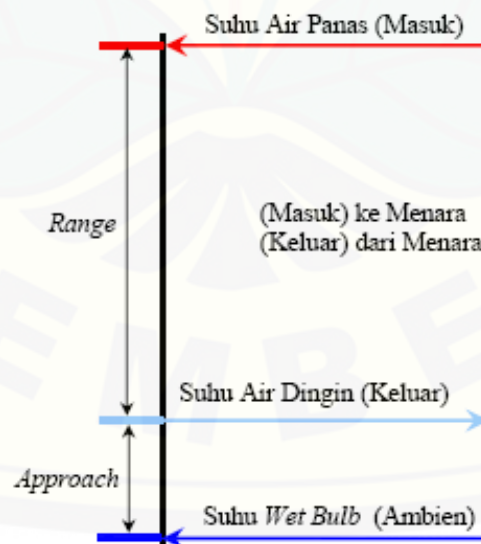
Gambar 2.12 Skema kerja *cooling tower*.
(Sumber: Chemical and Oil Refining, 2015)

2.5 Kinerja *Cooling Tower*

Bagian ini menjelaskan tentang bagaimana kinerja tenaga pendinginan dapat dikaji. Kinerja menara pendingin dievaluasi untuk mengkaji tingkat *approach* dan *range* saat ini terhadap nilai desain, mengidentifikasi area terjadinya pemborosan energi dan memberikan saran perbaikan. Selama evaluasi kinerja, peralatan pemantauan yang portabel digunakan untuk mengukur. Sebagai evaluasi kinerja, pemantauan dilaksanakan untuk mengukur parameter-parameter signifikan berikut ini:

1. Temperatur udara *wet bulb*
2. Temperatur udara *dry bulb*
3. Temperatur air masuk menara pendingin
4. Temperatur air keluar menara pendingin
5. Temperatur udara keluar
6. Laju aliran air
7. Laju aliran udara.

Prestasi menara pendingin biasanya dinyatakan dalam *range* dan *approach* seperti yang terlihat pada Gambar 2.13 berikut:



Gambar 2.13. Grafik *Range* dan *approach* temperatur pada menara pendingin
(Sumber: Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

Parameter terukur tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kinerja menara pendingin dengan beberapa cara. Yaitu:

a) *Range*

Merupakan perbedaan antara suhu air masuk dan keluar menara pendingin. *Range CT (cooling tower)* yang tinggi berarti bahwa menara pendingin telah mampu menurunkan suhu air secara efektif, dan kinerjanya bagus. Rumusnya adalah:

$$Range\ CT\ (^{\circ}C) = [suhu\ masuk\ CW\ (^{\circ}C) - suhu\ keluar\ CW\ (^{\circ}C)] \dots\dots\dots(2-1)$$

b) *Approach*

Merupakan perbedaan antara suhu air dingin keluar menara pendingin dan suhu *wet bulb ambien*. Semakin rendah *approach* semakin baik kinerja menara pendingin. Walaupun, *range* dan *approach* harus dipantau, '*approach*' merupakan indikator yang lebih baik untuk kinerja menara pendingin.

$$Approach\ CT\ (^{\circ}C) = [suhu\ keluar\ CW\ (^{\circ}C) - suhu\ wet\ bulb(^{\circ}C)] \dots\dots\dots(2-2)$$

c) Efektivitas

Merupakan perbandingan antara *range* dan *range* ideal (dalam persentase), yaitu perbedaan antara suhu masuk air pendingin dan suhu *wet bulb ambien*. Semakin tinggi perbandingan ini, maka semakin tinggi efektivitas menara pendingin.

$$Efektivitas\ CT\ (\%) = 100 \times Range / (suhu\ masuk\ CW - suhu\ wet\ bulb) \dots\dots(2-3)$$

d) Kapasitas pendinginan

Merupakan panas yang dibuang dalam kKal/jam, sebagai hasil dari kecepatan aliran masa air, panas spesifik dan perbedaan suhu. Kapasitas pendinginan suatu menara pendingin adalah setara dengan kemampuan menara pendingin tersebut dalam membuang panas ke lingkungan. Kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$Q = \dot{m}.Cp.\Delta T \dots\dots\dots(2-4)$$

Sedangkan kapasitas pendinginan spesifik persatuan luas penampang menara pendingin dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$Q_{sp} = \frac{Q}{A_{tower}} \dots \dots \dots (2-5)$$

Dimana:

Q_{sp} = kapasitas pendinginan spesifik (KJ/s.m²)

Q = kapasitas pendinginan (KJ/s)

\dot{m} = debit air (kg/s)

C_p = kalor jenis air (KJ/kg °C)

ΔT = perbedaan suhu air masuk dan suhu air keluar (°C)

A_{tower} = luas penampang menara pendingin (m²)

e) Debit air spesifik

Sesuai dengan ukuran luas penampang menara pendingin dan debit air, maka dapat dihitung debit air spesifik dengan rumus sebagai berikut.

$$\dot{m}_{sp} = \dot{m}/A_{tower} \dots \dots \dots (2-6)$$

Dimana:

\dot{m}_{sp} = debit air spesifik (ℓ/min.m²)

\dot{m} = debit air (ℓ/menit)

A_{tower} = luas penampang menara pendingin (m²)

f) Rasio air dengan udara

Nilai rasio air-udara adalah parameter yang sangat penting dalam pemilihan suatu menara pendingin, terutama dalam pemilihan kapasitas *fan*. Rasio ini merupakan perbandingan antara debit air spesifik yang hendak didinginkan terhadap debit udara spesifik yang diinduksikan oleh *fan* minimum.

$$\text{Rasio air - udara} = \frac{\text{debit air spesifik}(\ell/\text{min.m}^2)}{\text{debit udara spesifik}(\ell/\text{min.m}^2)} \dots \dots \dots (2-7)$$

g) Kehilangan penguapan

Merupakan jumlah air yang diuapkan untuk tugas pendinginan. Secara teoritis jumlah penguapan mencapai 1,8 m³ untuk setiap 10.000.000 kKal panas yang dibuang. Rumus berikut dapat digunakan Perry (1997):

$$\text{Penguapan (m}^3/\text{jam } ^\circ\text{C)} = 0,00085 \times 1,8 \times \text{laju sirkulasi (m}^3/\text{jam)} \times (T1 - T2)$$

Dimana:

$T1 - T2$ = perbedaan suhu antara air masuk dan keluar ($^{\circ}\text{C}$)

Salah satu parameter kinerja menara pendingin yang penting adalah laju penguapan air ke udara. Proses penguapan inilah yang menjadi prinsip dasar suatu menara pendingin dalam mendinginkan air kondensor. Adapun rumus untuk menghitung laju penguapan air ke udara pada suatu menara pendingin adalah sebagai berikut.

$$\text{Laju penguapan air (}\ell/\text{menit)} = (\omega_{H2} - \omega_{H1}) \times \frac{V}{\rho \cdot v} \times 60 \dots \dots \dots (2-8)$$

Dimana:

$(\omega_{H2} - \omega_{H1})$ = selisih antara rasio kelembaban udara keluar dan masuk menara pendingin (kg uap air / kg udara)

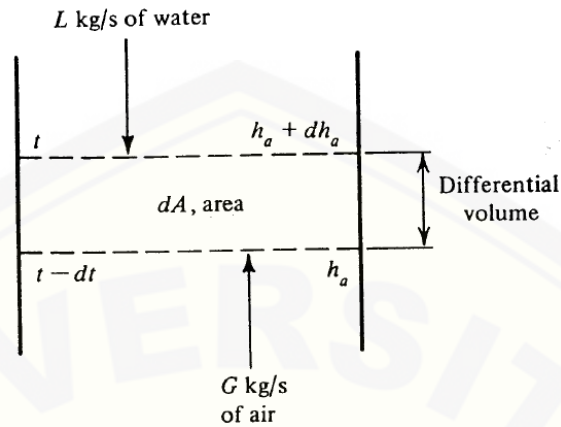
V = debit aliran udara (m^3/s)

ρ = densitas air = $0,99285 \text{ kg}/\ell$

v = volum spesifik udara ambien (m^3/kg).

2.6 Analisis Menara Pendingin Aliran Berlawanan

Salah satu rancang bangun menara pendingin yaitu menara pendingin aliran berlawanan, didalamnya udara bergerak keatas melalui semburan air yang jatuh, Gambar 2.14 menjelaskan tentang volume diferensial sebuah menara pendingin aliran berlawanan dengan laju air yang masuk dari bagian puncak sebesar L kg/detik dan laju udara yang masuk dari bagian dasar sebesar G kg/s. Untuk mudahnya, sejumlah kecil air yang menguap diabaikan, sehingga L dan G tetap konstan di segenap bagian menara.



Gambar 2.14 Pertukaran energi menara pendingin berlawanan arah.
(Sumber: Stoecker dan Jones, 2009)

Air masuk kesuatu bagian pada suhu t °C dan meninggalkannya pada suhu yang sedikit lebih rendah yaitu $t - dt$. Udara masuk dengan entalpi h_a kJ/kg udara kering dan meninggalkan dengan entalpi $h_a + dh_a$. Total area permukaan basah mencakup luas permukaan tetes-tetes air termasuk pula kepingan – kepingan logam basah atau bahan pengisi lainnya (Stoecker dan Jones, 2009). Laju kalor yang dilepas dari air dq , sama dengan laju kalor yang diterima udara:

$$dq = G dh_a = L (4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) dt \cdot \text{kW} \dots\dots\dots(2-9)$$

dari prinsip-prinsip tentang potensial entalpi. Maka persamaan lain untuk dq yaitu:

$$dq = \frac{hc dA}{c_{pm}} (h_i - h_a) \dots\dots\dots(2-10)$$

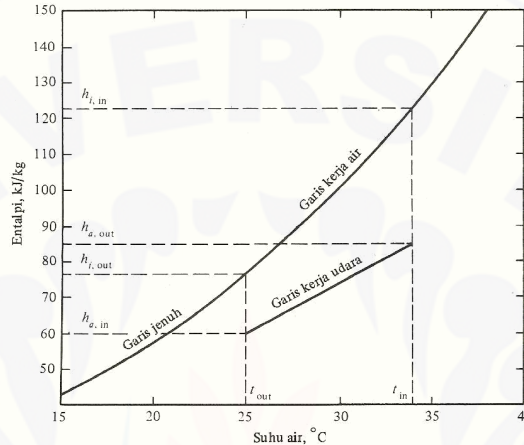
Dengan :

- hc = koefisien konveksi, kW/m² .K
- h_i = entalpi udara jenuh pada suhu air, kJ/(kg udara kering)
- h_a = entalpi udara, kJ/(kg udara kering)
- C_{pm} = kalor jenis udara lembab, kJ/kg .K..

Untuk mencari besarnya laju besarnya kalor yang dipindahkan oleh seluruh bagian menara pendingin, persamaan (2-10) harus diintegrasikan. Baik h_i maupun h_a berubah-ubah menurut *variable* integrasi A . dengan mengkombinasikan persamaan (2-9) dan (2-10), menyusun kembali dan kemudian mengintegrasinya akan menghasilkan.

$$L \int_{t_{out}}^{t_{in}} \frac{dt}{h_i - h_a} = \int_0^A \frac{hc dA}{C_{pm}} = \frac{hca}{C_{pm}} \dots \dots \dots (2-11)$$

Dengan t_{in} dan t_{out} berturut-turut adalah suhu air yang masuk dan meninggalkan menara pendingin. Berikut ini adalah Gambar 2.15 menjelaskan tentang suhu dan entalpi udara dan air.



Gambar 2.15 Diagram entalpi-suhu udara dan air.

(Sumber: Stoecker dan Jones, 2009)

Visualisasi grafik suhu dan entalpi dapat dibuat seperti pada Gambar 2.15. Air masuk menara pada suhu t_{in} dan meninggalkannya pada t_{out} , dan entalpi udara jenuh pada suhu-suhu ini berturut-turut adalah $h_{i,in}$ dan $h_{i,out}$. nyatakan entalpi udara yang masuk sebagai $h_{a,in}$ dan entalpi udara yang keluar sebagai $h_{a,out}$.

Garis jenuh pada Gambar 2.15 menyatakan suhu air dan entalpi udara jenuh pada suhu air tersebut. Tetapi hanya koordinat entalpi saja yang berlaku bagi garis kerja udara. Kemiringan garis kerja udara yaitu, $4,19 L/G$, dapat diperlihatkan dari persamaan (2-9). Cara tradisional dalam melakukan integrasi terhadap persamaan (2-10) adalah dengan proses *numeric* yang ditunjukkan oleh:

$$\frac{hca}{c_{pm}} = 4,19 L \Delta t \sum \frac{1}{(h_i - h_a)m} \dots \dots \dots (2-12)$$

Dengan $(h_i - h_a)m$ adalah perbedaan harga tengah entalpi untuk suatu bagian kecil dari volume.

2.7 Bambu

Bambu adalah tanaman dengan laju pertumbuhan tertinggi di dunia. Laju pertumbuhan yang paling umum adalah sekitar 3–10 cm per hari. Beberapa dari spesies bambu terbesar dapat tumbuh hingga melebihi 30 m tingginya, dan bisa mencapai diameter batang 15–20 cm. Namun spesies tertentu hanya bisa tumbuh hingga ketinggian beberapa inci saja.

Bambu termasuk dalam keluarga rumput-rumputan, yang dapat menjadi penjelasan mengapa bambu memiliki laju pertumbuhan yang tinggi. Hal ini berarti bahwa ketika bambu dipanen, bambu akan tumbuh kembali dengan cepat tanpa mengganggu ekosistem. Tidak seperti pohon, batang bambu muncul dari permukaan dengan diameter penuh dan tumbuh hingga mencapai tinggi maksimum dalam satu musim tumbuh (sekitar 3 sampai 4 bulan). Selama beberapa bulan tersebut, setiap tunas yang muncul akan tumbuh vertikal tanpa menumbuhkan cabang hingga usia kematangan dicapai. Bambu paling tepat dipanen ketika berusia antara tiga hingga tujuh tahun.

Sekitar 1250 jenis bambu didunia, sekitar 200 jenis ditemukan di Asia tenggara, sedangkan di Indonesia hanya terdapat sekitar 154 jenis bambu. Di Indonesia bambu banyak ditemukan mulai dari dataran rendah hingga pegunungan dengan ketinggian 300 m di atas permukaan laut. Selain murah, sifat bambu yang ringan dan lentur mempunyai kekuatan yang tinggi. Seratnya yang liat dan elastis sangat baik dalam menahan beban (tekan, tarik, maupun geser). Keistimewaan bambu sehingga dapat digunakan sebagai bahan material konstruksi antara lain :

- a. Merupakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui.
- b. Pertumbuhan cepat dengan rentang waktu 3-7 tahun dibandingkan kayu yang membutuhkan waktu yang lama.
- c. Memiliki kekuatan tarik dan lentur yang tinggi dibandingkan dengan kayu.
- d. Merupakan bahan ramah lingkungan, hemat energi, dan hemat biaya sebagai bahan konstruksi.

Konduktivitas termal bambu sama dengan konduktivitas termal yang dimiliki kayu, yaitu sebesar 0,08-0,16 J/m.s.⁰C (0,2 x 10⁻⁴ Kkal/m.s.⁰C). berikut ini adalah Tabel 2.1 yang menunjukkan konduktivitas termal beberapa bahan.

Tebel 2.1 konduktivitas termal bahan.

| Jenis benda | Konduktivitas termal (k) | | Jenis benda | Konduktivitas termal (k) | |
|--------------|--------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| | J/m.s.C ^o | Kkal/m.s.C ^o | | J/m.s.C ^o | Kkal/m.s.C ^o |
| Perak | 420 | 1000 x 10 ⁻⁴ | Air | 0,56 | 1,4 x 10 ⁻⁴ |
| Tembaga | 380 | 920 x 10 ⁻⁴ | Tubuh | 0,2 | 0,5 x 10 ⁻⁴ |
| Aluminium | 200 | 500 x 10 ⁻⁴ | Kayu | 0,08 – 0,16 | 0,2 x 10 ⁻⁴ – |
| Baja | 40 | 110 x 10 ⁻⁴ | Gabus | 0,042 | 0,1 x 10 ⁻⁴ |
| Es | 2 | 5 x 10 ⁻⁴ | Wol | 0,040 | 0,1 x 10 ⁻⁴ |
| Kaca (biasa) | 0,84 | 2 x 10 ⁻⁴ | Busa | 0,024 | 0,06 x 10 ⁻⁴ |
| Bata | 0,84 | 2 x 10 ⁻⁴ | Udara | 0,023 | 0,055 x 10 ⁻⁴ |

(Sumber: Gurumuda.net, 2014)

Berikut ini adalah bambu yang mudah ditemui dan paling banyak digunakan sebagai bahan konstruksi bangunan adalah:

1. *Dendrocalamus Asper* (Bambu petung)

Bambu ini mempunyai diameter lebih besar dibanding bambu jenis lain. Ruas bambu petung lebih pendek yaitu antara 40 – 60 cm, dengan diameter mencapai 20 cm, tebal 10 -20 mm, dan panjang batang 10 -20 m. karena itu bambu petung biasanya dipakai sebagai elemen teken kolam karena kemampuan menahn tekuk yang tinggi.

2. *Bambusa Spinosa Bluemeana* (bambu ori)

Bambu ori hampir sama dengan bambu petung yaitu kuat, keras, dan berdiameter besar, dengan jarak ruas pendek. Bagian kuli bambu ori lebih halus dan licin dibanding bambu lainnya.

3. *Gigantochloa verticillite* (Bambu wulung / hitam)

Bambu wulung mempunyai rumpun yang tidak rapat, dengan warna kulit batang hijau kehitaman, panjang ruas 40 – 50 cm, diameter 6 – 8 cm.

Berikut ini adalah kekuatan dan berat jenis dari jenis bambu diatas. Dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Kuat tarik dan berat jenis bambu

| Jenis Bambu | Kekuatan tarik Kg/cm ² | | |
|-------------|-----------------------------------|-------------|--------------|
| | Berat jenis | Tanpa Nodia | Dengan Nodia |
| Apus | 0,590 | 2910 | 1228 |
| Legi | 0,613 | 1900 | 1160 |
| Wulung | 0,685 | 1660 | 1470 |
| Petung | 0,717 | 1515 | 552 |
| ori | 0,744 | 2880 | 1260 |

(Sumber: Morisco,2006)

2.8 Air

Air adalah zat cair yang tidak mempunyai rasa, warna dan bau pada kondisi standar, yaitu padatekanan 100 kPa (1 bar) and temperatur 273,15 K (0 °C), yang terdiri dari hidrogen dan oksigen dengan rumus kimiawi H₂O. Satu molekul air tersusun atas dua atom hidrogen yang terikat secara kovalen pada satu atom oksigen. Zat kimia ini merupakan suatu pelarut yang penting, yang memiliki kemampuan untuk melarutkan banyak zat kimia lainnya, seperti garam-garam, gula, asam, beberapa jenis gas dan banyak macam molekul organik.

Air merupakan suatu larutan yang hampir bersifat universal, maka zat-zat yang paling alamiah maupun buatan manusia hingga tingkat tertentu terlarut di dalamnya. Dengan demikian, air di dalam mengandung zat-zat terlarut. Zat-zat ini sering disebut pencemar yang terdapat dalam air (Linsley, 1991). Kalor jenis air sebesar $4,2 \times 10^3$ Kj/kg.°C. Berikut ini adalah Tabel 2.3 kalor jenis beberapa zat.

Tabel 2.3 kalor jenis zat.

| Z a t | Kalor Jenis (c) | |
|--------------|----------------------|--------|
| | Kal/g ⁰ C | J/kg K |
| Air | 1,00 | 4200 |
| Air laut | 0,93 | 3900 |
| Alkhohol | 0,55 | 230 |
| Minyak tanah | 0,52 | 220 |
| Raksa | 0,033 | 140 |
| Es | 0,595 | 2500 |
| Alumunium | 0,214 | 900 |
| Kaca | 0,16 | 670 |
| Besi | 0,11 | 460 |
| Tembaga | 0,093 | 390 |
| Kuningan | 0,90 | 380 |
| Perak | 0,056 | 230 |
| Emas | 0,031 | 130 |
| Timbal | 0,031 | 130 |

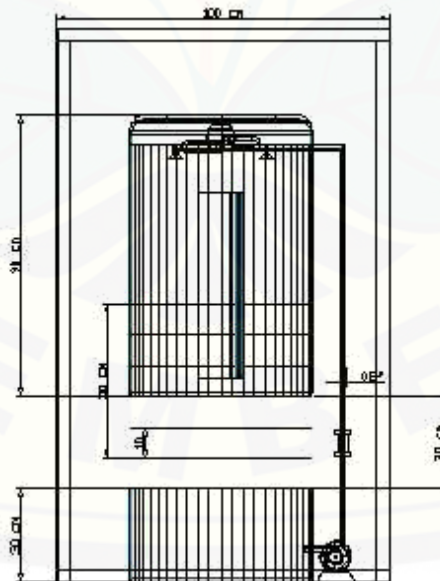
(Sumber: Arif kristanta, 2012)

Sifat air yang penting, dapat digolongkan ke dalam sifat fisis, kimiawi, dan biologis. Sifat fisis dari air yaitu didapatkan dalam ketiga wujudnya, yakni, bentuk padat sebagai es, bentuk cair sebagai air, dan bentuk gas sebagai uap air. Bentuk mana yang akan didapatkan, tergantung keadaan cuaca yang ada setempat. Sifat kimia dari air yaitu mempunyai pH=7 dan oksigen terlarut (=DO) jenuh pada 9 mg/L. Air merupakan pelarut yang universal, hampir semua jenis zat dapat larut di dalam air. Air juga merupakan cairan biologis, yakni didapat di dalam tubuh semua organisme. Sifat biologis dari air yaitu di dalam perairan selalu didapat kehidupan, fauna dan flora. Benda hidup ini berpengaruh timbal balik terhadap kualitas air

2.9 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Wibisono (2005) meneliti tentang perbandingan unjuk kerja antara bahan pengisi pada menara pendingin tipe *induced counter flow*. Rancangan memakai rak-rak penyusunan *packing*, untuk memudahkan sirkulasi udara, sehingga kontak air dan udara dapat berlangsung dengan maksimal

dan menghasilkan kisaran serta kinerja pendinginan lebih besar. Kisaran terbesar dihasilkan pada pengukuran dengan beban pemanasan yang serupa dengan kondisi sebenarnya, yaitu pada *packing* 5 lapis spons sebesar $3,2^{\circ}\text{C}$ pada L/G Ratio 2,567, daya pendinginan maksimum W dan COP sebesar 12,9, dan kondisi lingkungan dimana suhu bola kering $26,1^{\circ}\text{C}$, suhu bola basah $24,4^{\circ}\text{C}$, dan kelembaban 87% (kondisi ruang tertutup), serta suhu bola kering dan bola basah udara masuk masing-masing $25,5^{\circ}\text{C}$ dan $24,3^{\circ}\text{C}$, dan suhu air masuk $27,4^{\circ}\text{C}$ dan keluar menara pendingin dengan suhu $24,2^{\circ}\text{C}$. Nilai L/G Ratio yang diuji berkisar antara 0,91– 2,33 kJ/kg. $^{\circ}\text{C}$ dan yang tepat untuk kondisi iklim Indonesia harus dipertahankan pada nilai 2,33 seperti pada hasil pengujian. Nilai karakteristik menara yang diuji dengan beban pemanasan sebesar 0,11 sampai 2,18 W/kJ/Kg beda entalpi yaitu kapasitas pendinginan pada kondisi sama maksimum sebesar 2690,6 W dengan nilai COP rata-rata sebesar 8,7. Secara umum bahan *packing* spons cenderung menampilkan kinerja yang lebih baik dibanding bahan batu apung, namun belum bisa dianggap bahwa *packing* spons merupakan bahan pengisi yang terbaik. Gambar 2.16 merupakan menara pendingin *induced counter flow* yang diuji oleh Wibisono (2005).

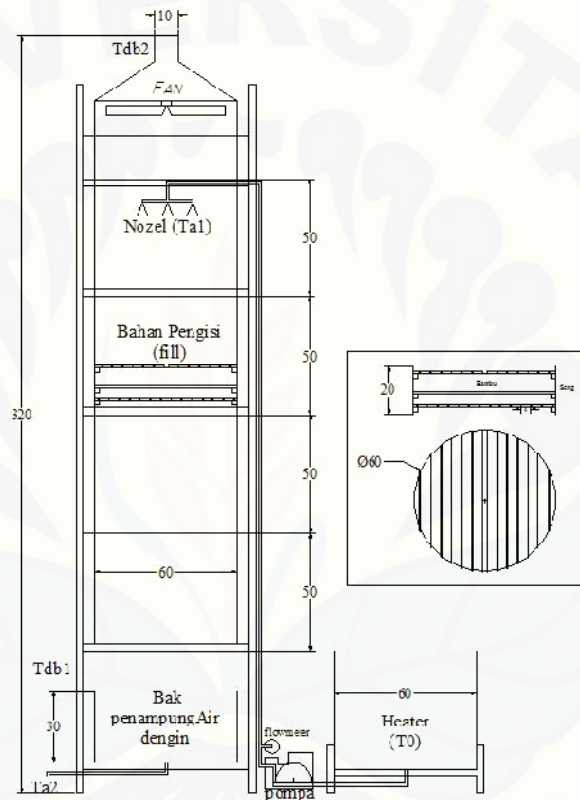


Gambar 2.16 Menara pendingin *induced counter flow*
(Sumber: Wibisono, 2005)

Penelitian Mulyono (2010) tentang analisa beban kalor menara pendingin basah *induced-draft* aliran lawan arah, Penelitian dilakukan dengan memasang termometer bola basah, termometer bola kering, anemometer, dan pengukur debit air di menara pendingin. Hasil pengujian dengan suhu lingkungan 27 °C sampai 34 °C menunjukkan bahwa efektivitas menara 31,6 % s.d 57,1 % dan rata-rata 45,1 %; *cooling range* 3,0 °C sampai 6 °C dan rata-rata 4,8 °C. *Approach* berkisar 4,5 °C sampai 6,5 °C dengan rata-rata 5,8 °C. Beban kalor pendinginan mulai 831,52 kJ/s hingga 1663,03 kJ/s dengan beban pendinginan rata-rata 1330,4 kJ/s. Beban kalor penguapan berkisar 50,1 % hingga 65,2 % dan rata-rata sebesar 56,3 % dari beban pendinginan. Beban penambahan panas sensibel ke udara 34,8 % hingga 47,7 % dan rata-rata 43,7 % . Perbandingan L/G 1,4 sampai dengan 1,47 dengan rata-rata L/G 1,43 (kgair/ kg udara). Berdasarkan rasio L/G menara ini bersesuaian dengan tipe menara pendingin basah isian cetus (*splash fill*) yang mempunyai rasio L/G 1,1 sampai dengan 1,5, dengan beban kalor penguapan rata-rata masih dibawah nilai yang ada dirujukan yang berkisar 60 % sampai 75 %.

Penelitian Hidayat (2014) meneliti tentang Analisis Beban Kalor *Cooling tower Induced Draft Counterflow* Dengan Bahan Pengisi Bambu Wulung Pelaksanaan percobaan dilakukan pada *cooling tower* dengan dimensi tinggi keseluruhan 320 cm, luas 70 cm², dan penampang tabung dalam berdiameter 60 cm. Bahan pengisi terbuat dari bambu wulung yang dibelah, dengan lebar 4 cm, tebal 1 cm, dan jarak antar bambu 0,2 cm. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kinerja maksimal dari *cooling tower* dengan variasi suhu awal 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, ketinggian 100 cm, 150 cm, dan 200 cm. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi suhu awal dan tinggi *cooling tower* mengakibatkan naiknya beban kalor. Efektivitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi dengan suhu awal 40 °C, ketinggian 200 cm sebesar 68,08 % dengan menggunakan bahan pengisi. Sedangkan perubahan temperatur air tertinggi terjadi pada variasi suhu awal 70 °C, tinggi 200 cm, tanpa atau dengan bahan pengisi, dengan nilai 17 °C dan 23 °C. Kapasitas pendinginan (beban kalor *cooling tower*) tertinggi, pada variasi penambahan fill ketinggian 200

cm, t_{a1} 70°C , sebesar $41,54 \text{ kJ/s}$, dibandingkan dengan tanpa menggunakan *fill* dengan variasi yang sama beban kalor sebesar $31,42 \text{ kJ/s}$. Perbandingan massa liquid/gas (L/G) tertinggi terjadi pada variasi, t_{a1} 70°C , menggunakan *fill* sebesar $1,45 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$, dan (L/G) terendah $0,5 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$, terjadi pada variasi t_{a1} 40°C . Gambar 2.17 merupakan skema Rangkaian *Cooling tower induced draft counterflow* yang di buat oleh Hidayat (2014).



Gambar 2.17 Skema rangkaian *cooling tower induced draft counter flow* (Sumber: Hidayat, 2014)

2.10 Hipotesis

Hipotesis awal pengujian adalah semakin tinggi tegangan listrik pada motor penggerak kipas maka kecepatan udara keluar dari *cooling tower* semakin tinggi. Semakin tinggi kecepatan udara dengan debit air yang sama maka pelepasan panas semakin tinggi, karena udara yang bertabrakan dengan air semakin banyak. Sebaliknya semakin rendah kecepatan udara keluar dari *cooling tower* dengan debit

air yang sama maka pelepasan panas semakin kecil, karena udara yang bertabrakan dengan air semakin sedikit. Penambahan bahan pengisi bambu diharapkan dapat memecah, memperluas permukaan air dan menghambat laju aliran air panas yang jatuh dari *nozzel*. Sehingga, memungkinkan udara menyerap panas yang ada, dan dapat mendinginkan air sebelum jatuh ke bak penampung.



BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Dengan variasi peningkatan suhu dari air *heater*. Variasi pelepasan panas dilakukan dengan menempatkan air dalam suatu wadah yang dipanaskan. Kemudian air panas disirkulasikan melalui pipa yang dijaga panasnya dan didinginkan dengan menggunakan pendinginan alami yaitu udara sebagai objek pendinginan. Berdasarkan data tersebut dapat ditentukan kondisi suhu air sebelum dipanaskan, sesudah pemanasan, dan sesudah pendinginan. Laju pendinginan air setelah dipanaskan nantinya akan divariasikan pendinginannya dengan kecepatan udara keluar dari *cooling tower* dengan mengatur tegangan motor listrik penggerak kipas.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan rencana kerja yang telah disusun. Penelitian ini dapat dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pada bulan April 2015 sampai dengan Juni 2015.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam proses penelitian meliputi:

3.3.1 Alat dan instrumen penelitian

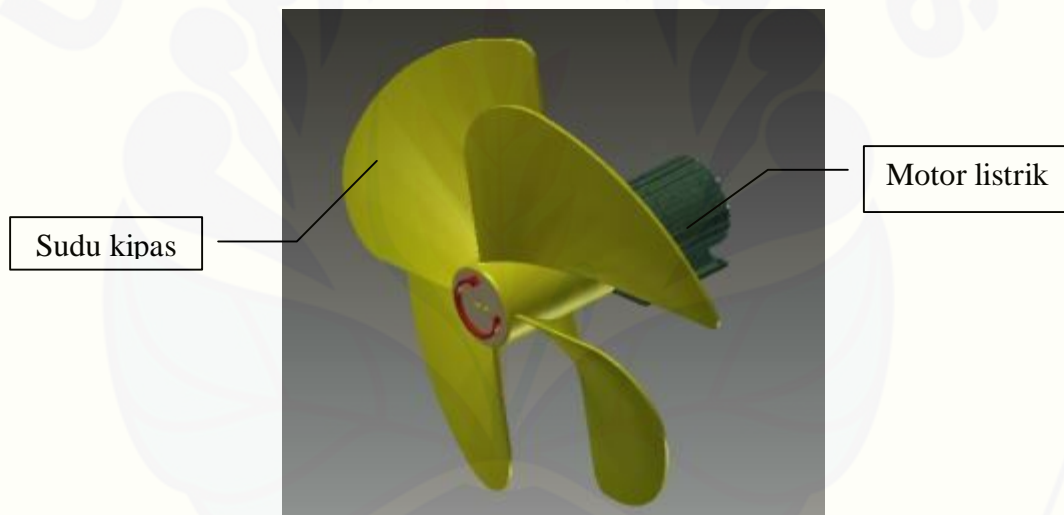
- a. Satu *unit cooling tower induced draft counterflow* dengan diameter 60 cm
- b. *Thermokopel*
- c. *Thermoreader*
- d. *Stopwatch*.
- e. *Flowmeter*
- f. *Voltmeter*
- g. *Dimmer*

- h. Pompa air, dengan spesifikasi pompa dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini:

Tabel 3.1 spesifikasi pompa air.

| Spesifikasi komponen | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Merk | Sanyo tipe, PW H137A |
| Daya pompa | 125 Watt |
| Daya hisap | 9 meter |
| Daya dorong | 9 meter |
| Total head | 18 meter |
| Kapasitas | 30 liter/ menit (max) |

- i. Kipas



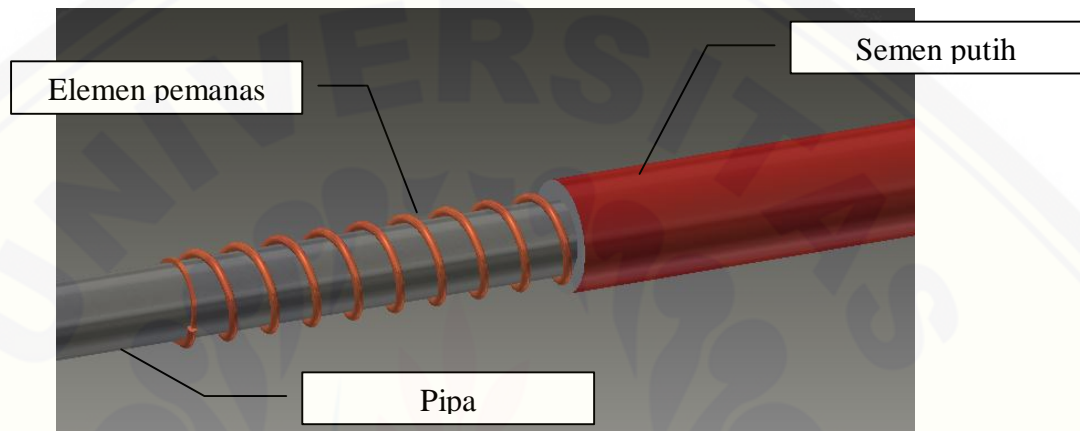
Gambar 3.1 Kipas

Tabel 3.2 spesifikasi kipas.

| Spesifikasi komponen | |
|-----------------------------|----------------------|
| Merk | Sanyo tipe, PW H137A |
| Daya pompa | 125 Watt |
| kipas | Kipas kondensor AC |

- j. Tabung pitot
k. Sakelar Kabel

- l. Pipa.
- m. Keran.
- n. Kompor LPG
- o. Panci Bak penampungan.
- p. *Heater*



Gambar 3.2 *Heater*

- q. *Nozzle*



Gambar 3.3 *Nozzle*

3.3.2 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

- a. Bambu wulung (*Gigantochloa Verticillie*) sebagai bahan pengisi

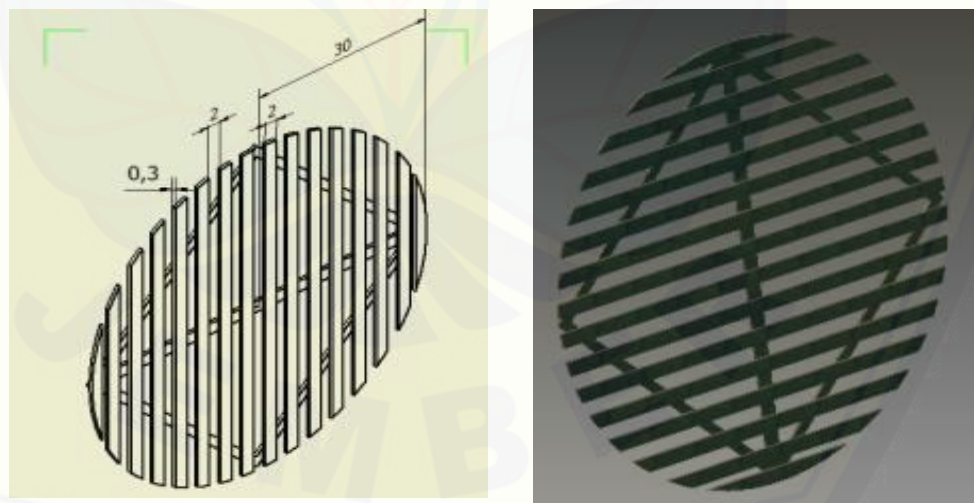
cooling tower,

- b. Air yang dipanaskan dalam wadah *heater* sebagai fluida kerja.
- c. Tegangan listrik yang divariasikan untuk mengatur putaran motor listrik pada *Exhaust fan*

3.3.3 Spesifikasi *Cooling Tower*.

Spesifikasi *cooling tower* adalah sebagai berikut

1. Kerangka terbuat dari besi siku dengan ketinggian keseluruhan 3,2 m dan luas 0.7 m
2. Diameter *cooling tower* 60 cm
3. Bak penampung menggunakan drum oli berdiameter 60 cm dan tinggi 30 cm.
4. Penutup menggunakan seng dengan tebal 0,2 cm.
5. Bahan pengisi menggunakan bambu wulung sebanyak 4 lapis dengan lebar tiap bambu 2 cm yang akan disusun menyerupai diameter *cooling tower* dan jarak antar bambu 2 cm. Disusun menyerupai susunan *Splash fill*. Jarak antar bambu 20 cm, seperti Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.4 Susunan bambu pengisi.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Persiapan alat pengujian

Persiapan alat pengujian dilakukan dengan merangkai ulang instalasi perpipaan sesuai kebutuhan, dalam hal ini alat pengujinya menggunakan *cooling tower* berbahan pengisi bambu dan pemanas air (*heater*).

3.4.2 Pemeriksaan alat pengujian

Memeriksa semua kelengkapan alat uji komponen *cooling tower* dan melakukan tes sirkulasi air lancar.

3.4.3 Tahapan pengambilan data

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur semua variabel saat melakukan pengujian. Tahap-tahap yang dilakukan dalam melakukan pengujian adalah sebagai berikut:

1. Merangkai komponen-komponen *cooling tower*, bahan pengisi bambu, dan *heater* dengan benar yaitu dengan menghubungkan pipa dari *heater* ke *cooling tower*, serta menaruh bahan pengisi bambu di bawah *nozzle*. Pemasangan alat ukur suhu (*termokopel*) pada titik-titik yang telah ditentukan menggunakan terminal port pada 7 titik yang diamati, Yaitu pada

T_0 : Suhu air *heater*

T_{a1} : Suhu air masuk *Cooling Tower*

T_{a2} : Suhu air keluar *Cooling Tower*

T_{db1} : Suhu bola kering masuk *Cooling Tower*

T_{bd2} : Suhu bola kering keluar *Cooling Tower*

T_{wb1} : Suhu bola basah masuk *Cooling Tower*

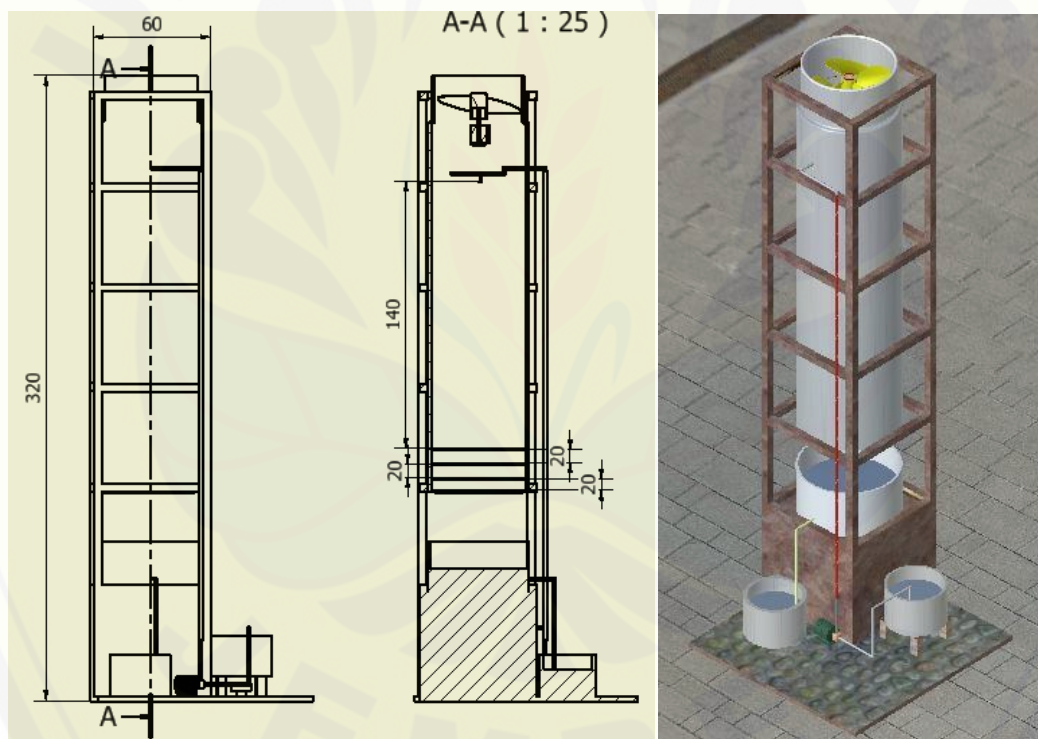
T_{wb2} : Suhu bola basah keluar *Cooling Tower*

2. Panaskan air dalam *heater* dengan tingkat suhu variasi 40 °C, 50 °C, dan 60 °C.
3. Hubungkan motor penggerak kipas *cooling tower* dengan variasi tegangan listrik 0 Volt, 110 Volt dan 220 Volt.

4. Selanjutnya menjalankan alat uji sampai sistem dan aliran air bersirkulasi dengan baik pada *cooling tower*.
5. Mencatat suhu yang ditunjukkan oleh pengukur suhu pada semua titik laju aliran pelepasan panas. Dengan variasi tegangan listrik pada motor kipas *cooling tower* yang sudah ditentukan.
6. Pengumpulan data.
7. Penghitungan data.

3.5 Rangkaian *Cooling Tower Induced Draft Counterflow*.

Rangkaian alat yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Rangkaian *Cooling tower induced draft counter flow*.

3.6 Variabel

Variabel pada dasarnya adalah segala sesuatu yang berbentuk apa saja yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari sehingga diperoleh informasi tentang hal yang dibutuhkan, kemudian ditarik kesimpulan.

3.6.1. Variabel Bebas

Variabel bebas yaitu variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian. Variabel bebas pada percobaan ini adalah variasi kecepatan udara keluar dengan memberi tegangan pada motor penggerak kipas yaitu 0 volt, 110 volt dan 220 volt. Dan variasi suhu air 40 °C, 50 °C, dan 60 °C.

3.6.2. Variabel Terikat

Variabel Terikat merupakan suatu variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan sepenuhnya oleh peneliti, tetapi besarnya tergantung pada variabel bebasnya. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi laju aliran air dan suhu pada titik-titik yang dicari yaitu pada T0, Ta1, Ta2, Tdb1, Tdb2, Twb1, dan Twb2.

3.7 Analisa Data

a) Range

$$\text{Range CT } (^{\circ}\text{C}) = [\text{suhu masuk } (^{\circ}\text{C}) - \text{suhu keluar } (^{\circ}\text{C})]$$

b) Approach

$$\text{Approach CT } (^{\circ}\text{C}) = [\text{suhu keluar } (^{\circ}\text{C}) - \text{suhu wet bulb } (^{\circ}\text{C})]$$

c) Efektivitas

$$\text{Efektivitas CT } (\%) = 100 \times \text{Range} / (\text{suhu masuk} - \text{suhu wet bulb})$$

d) Kapasitas pendinginan

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dimana:

Q = kapasitas pendinginan (KJ/s)

\dot{m} = debit air (kg/s)

Cp = kalor jenis air (KJ/kg °C)

ΔT = perbedaan suhu air masuk dan suhu air keluar (°C)

e) Debit air spesifik

$$\dot{m}_{sp} = \dot{m}/A_{tower}$$

Dimana:

$$\dot{m}_{sp} = \text{debit air spesifik } (\ell/\text{min.m}^2)$$

$$\dot{m} = \text{debit air } (\ell/\text{menit})$$

$$A_{tower} = \text{luas penampang menara pendingin } (\text{m}^2)$$

f) Rasio air dengan udara

$$\text{Rasio air - udara} = \frac{\text{debit air spesifik } (\ell/\text{min.m}^2)}{\text{debit udara spesifik } (\ell/\text{min.m}^2)}$$

g) Kehilangan penguapan

$$\text{Laju penguapan air } (\ell/\text{menit}) = (\omega H_2 - \omega H_1) \times \frac{V}{\rho \cdot v} \times 60$$

Dimana:

$(\omega H_2 - \omega H_1)$ = selisih antara rasio kelembaban udara keluar dan masuk menara pendingin (kg uap air / kg udara)

$$V = \text{debit aliran udara } (\text{m}^3/\text{s})$$

$$\rho = \text{densitas air} = 0,99285 \text{ kg}/\ell$$

$$v = \text{volum spesifik udara ambien } (\text{m}^3/\text{kg}).$$

h) Perbandingan Cair/Gas (L/G).

$$L/G = (h_2 - h_1) / (4.19 \cdot \Delta T)$$

Dimana:

$$L/G = \text{Perbandingan aliran massa cair terhadap gas } (\text{KJ}/\text{Kg } ^\circ\text{C})$$

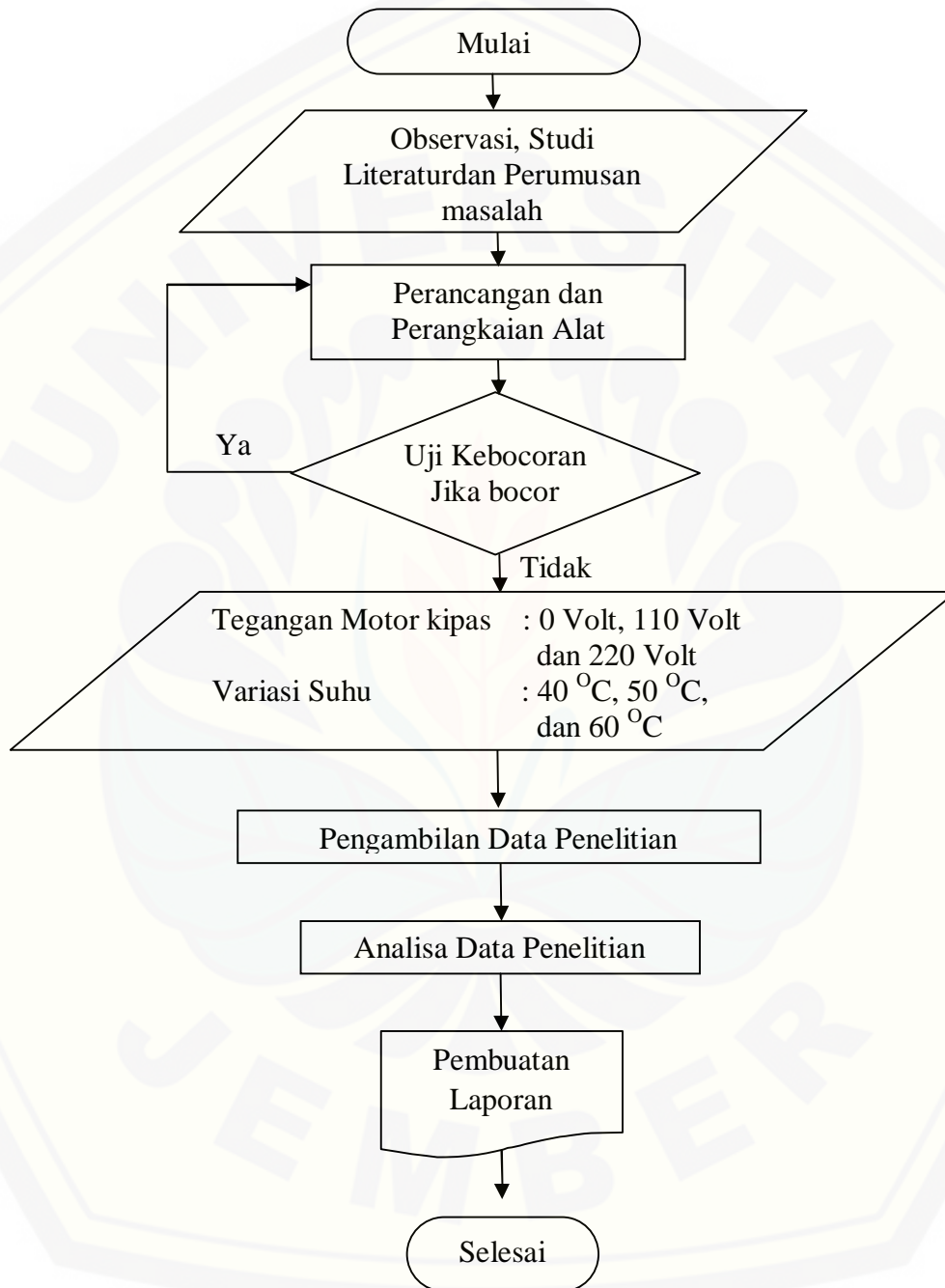
h_2 = Entalpi uap campuran udara-air pada suhu *wet-bulb* keluar (satunya sama dengan diatas)

h_1 = Entalpi uap campuran udara-air pada suhu *wet-bulb* masuk (satunya sama dengan diatas)

$$\Delta T = \text{Range}$$

3.8 Diagram Alir

Adapun proses dan alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Telah dilaksanakan penelitian tentang analisis variasi tegangan listrik kipas *cooling tower induced draft counterflow* dengan pengisi bambu wulung dengan data rata-rata data yang disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 0 volt

| Suhu awal | Temperatur air | | Temperatur udara masuk | | Temperatur udara keluar | | Debit air | Kec.udara keluar |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| $T_0(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb2}(^{\circ}\text{C})$ | $Q_a(\text{m}^3/\text{s})$ | $v_u(\text{m/s})$ |
| 40 | 40,65 | 37,68 | 32,77 | 28,35 | 35,72 | 38,72 | 0,00014 | 0,20 |
| 50 | 51,83 | 44,18 | 33,18 | 29,03 | 38,28 | 41,28 | 0,00014 | 0,27 |
| 60 | 61,77 | 48,47 | 32,55 | 28,57 | 40,37 | 43,37 | 0,00014 | 0,51 |

Tabel 4.2 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 110 volt

| Suhu awal | Temperatur air | | Temperatur udara masuk | | Temperatur udara keluar | | Debit air | Kec.udara keluar |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| $T_0(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb2}(^{\circ}\text{C})$ | $Q_a(\text{m}^3/\text{s})$ | $v_u(\text{m/s})$ |
| 40 | 40,32 | 34,15 | 32,28 | 27,88 | 35,33 | 38,33 | 0,00014 | 4,47 |
| 50 | 50,18 | 37,70 | 33,12 | 29,18 | 39,23 | 42,23 | 0,00014 | 4,47 |
| 60 | 61,70 | 39,92 | 31,32 | 27,55 | 42,72 | 45,72 | 0,00014 | 4,47 |

Tabel 4.3 Hasil pengujian variasi tegangan motor listrik pada kipas 220 volt

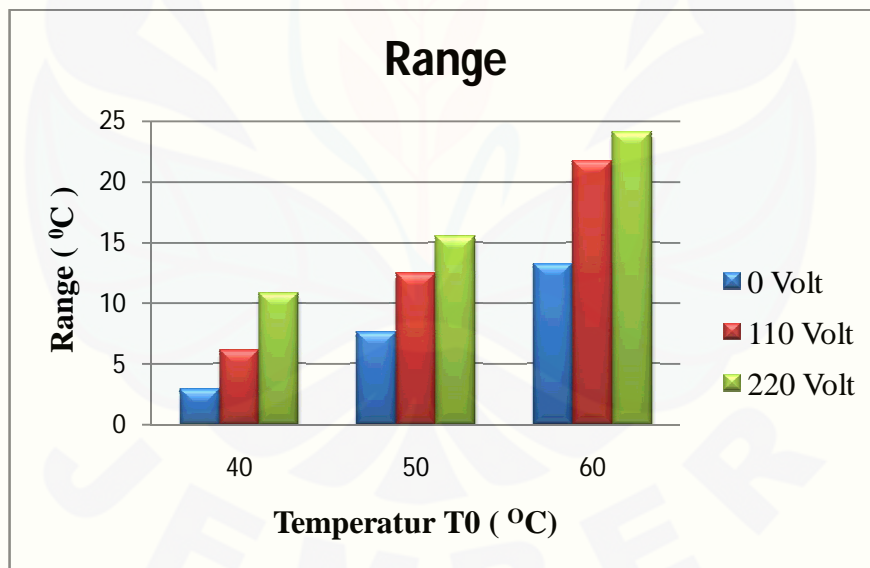
| Suhu awal | Temperatur air | | Temperatur udara masuk | | Temperatur udara keluar | | Debit air | Kec.udara keluar |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| $T_0(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{a2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb1}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{db2}(^{\circ}\text{C})$ | $T_{wb2}(^{\circ}\text{C})$ | $Q_a(\text{m}^3/\text{s})$ | $v_u(\text{m/s})$ |
| 40 | 42,23 | 31,35 | 32,65 | 28,30 | 35,57 | 38,57 | 0,00014 | 7,76 |
| 50 | 51,92 | 36,37 | 33,87 | 29,52 | 38,67 | 41,67 | 0,00014 | 7,76 |
| 60 | 61,23 | 37,10 | 31,18 | 27,63 | 41,33 | 44,33 | 0,00014 | 7,76 |

4.2 Range

Range merupakan perbedaan antara temperatur air masuk dan keluar *cooling tower*. Data *range* dapat diperoleh dengan cara mengurangi temperatur masuk (T_{a1}) dengan temperatur keluar (T_{a2}). Data hasil penghitungan *range* rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan grafik *range* dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini:

Tabel 4.4 Data rata-rata hasil penghitungan *range* dari semua variasi

| Tegangan motor (Volt) | Suhu awal air (T_0) | | |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 40 ($^{\circ}\text{C}$) | 50 ($^{\circ}\text{C}$) | 60 ($^{\circ}\text{C}$) |
| 0 | 2,97 | 7,65 | 13,30 |
| 110 | 6,17 | 12,48 | 21,78 |
| 220 | 10,88 | 15,55 | 24,13 |



Gambar 4.1 Grafik temperatur *range* semua variasi

Pada Gambar 4.1 nilai *range* (ΔT) semakin bertambah naik seiring dengan variasi yang telah ditentukan. Perubahan ΔT disebabkan karena adanya pengaruh dari variasi. Pengaruh diperoleh dari kecepatan udara keluar *cooling tower* yang diatur tegangan listriknya pada motor penggerak kipas. Penambahan tegangan listrik pada

motor penggerak kipas *cooling tower* berpengaruh pada putaran kipas sehingga kecepatan udara keluar semakin cepat. Putaran kipas yang semakin cepat meningkatkan debit udara yang mempengaruhi *range* dimana semakin cepat putaran kipas udara masuk *cooling tower* semakin banyak, maka *range* yang dihasilkan semakin besar karena semakin banyak panas dari air yang berpindah ke udara. Penambahan suhu awal pada *heater* (T_0) memungkinkan ΔT akan semakin besar, hal ini disebabkan karena semakin besar perbedaan suhu air masuk *cooling tower* (T_{a1}) dengan suhu lingkungan, akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar pada ΔT .

Suhu ΔT tertinggi yang dihasilkan *cooling tower* terjadi pada variasi tegangan listrik pada motor kipas 220 volt dengan suhu T_0 60 °C yaitu sebesar 24,13 °C. Suhu ΔT terendah yang dialami *cooling tower* adalah sebesar 2,97 °C pada variasi tegangan listrik pada motor kipas 0 volt dengan suhu T_0 40 °C. Penambahan tegangan listrik pada motor kipas dan penambahan suhu awal (T_0) terbukti dapat meningkatkan nilai *range* dari sebuah *cooling tower*.

Penggunaan pengisi bambu wulung yang disusun dengan jarak 2 cm tiap bambu dan antar tingkat bahan pengisi 20 cm menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan dengan penelitian oleh Hidayat (2014). *Range* maksimal yang dihasilkan Hidayat (2014) pada suhu air masuk 60 °C adalah 17 °C, ini berarti terjadi peningkatan 7,13 °C menjadi 24,13 °C. Adanya jarak yang cukup lebar antar bambu menjadikan aliran udara lebih lancar sehingga udara yang berkontak dengan air semakin banyak dan menjadikan panas yang ditransfer keudara lebih banyak. Perbandingan dengan bahan pengisi yang lain seperti yang diteliti oleh Mulyono (2010) dengan bahan pengisi poliester menghasilkan *range* maksimal 6 °C pada suhu air masuk 41 °C. Bahan pengisi batu apung dan spons yang diteliti oleh Wibisono (2005) menghasilkan *range* maksimal 2,4 °C dan 3,2 °C pada suhu air masuk 27,4 °C. Penggunaan bahan pengisi tali ijuk oleh Johanes (2011) menghasilkan *range* maksimal 16,2 °C pada suhu air masuk 60 °C dan yang terakhir adalah bahan pengisi keramik yang diteliti oleh Ramkrishnan (2013) menghasilkan *range* maksimal 16 °C pada suhu air masuk 45 °C. Dari beberapa penelitian diatas bambu wulung

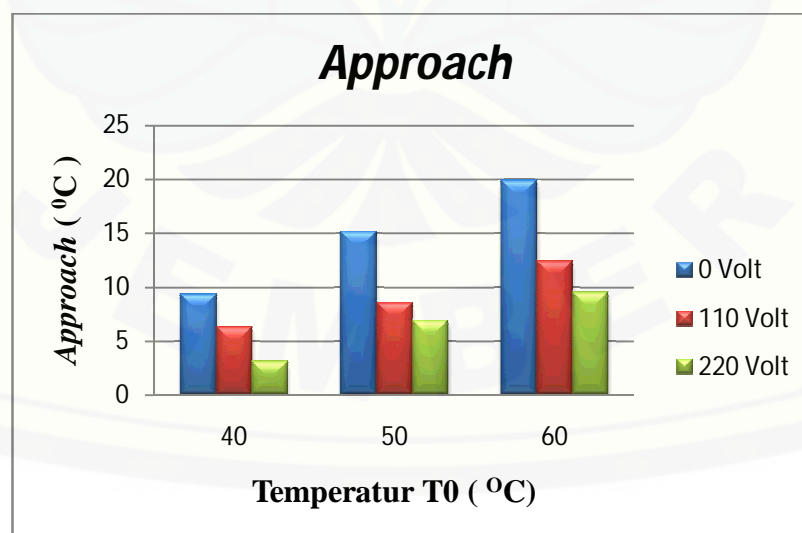
menghasilkan *range* yang terbesar kemudian diikuti bahan pengisi tali ijuk, keramik, polyester, spons dan yang terakhir batu apung. Terdapat perbedaan suhu air masuk, debit air dan debit udara pada setiap penelitian di atas sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk mengetahui *range* terbesar yang bisa dihasilkan oleh bahan pengisi.

4.3 Approach

Approach Adalah perbedaan antara temperatur air dingin keluar *cooling tower* (T_{a2}) dan temperatur *wet bulb ambien* (T_{wb1}). Data *Approach* dapat diperoleh dengan cara, temperatur keluar (T_{a2}) dikurangi temperatur *wet bulb ambien* (T_{wb1}). Data hasil penghitungan *Approach* rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan grafik *approach* dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini:

Tabel 4.5 Data rata-rata hasil penghitungan *approach* dari semua variasi

| Tengangan motor (Volt) | Suhu awal air (T_0) | | |
|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 40 ($^{\circ}\text{C}$) | 50 ($^{\circ}\text{C}$) | 60 ($^{\circ}\text{C}$) |
| 0 | 9,33 | 15,15 | 19,90 |
| 110 | 6,27 | 8,52 | 12,37 |
| 220 | 3,05 | 6,85 | 9,47 |



Gambar 4.2 Grafik temperatur *Approach* semua variasi

Pada Gambar 4.2 temperatur *approach* naik pada variasi suhu awal dan turun pada variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas. Kenaikan *approach* pada variasi suhu awal dikarenakan suhu awal yang semakin tinggi tetapi suhu bola basah pada udara masuk *cooling tower* relatif tetap. Kecepatan putaran kipas yang semakin tinggi akibat kenaikan tegangan listrik yang diberikan menjadikan debit udara yang masuk kedalam *cooling tower* semakin banyak, udara yang semakin banyak menyerap panas dari air semakin banyak pula dan menjadikan air keluar *cooling tower* lebih dingin. Penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas berpengaruh pada penurunan nilai *approach* dan peningkatan suhu awal mempengaruhi kenaikan nilai *approach*.

Nilai *approach* terendah didapatkan pada variasi suhu awal 40 °C dan tegangan listrik 220 volt yaitu 3,05 °C. Nilai *approach* ini tercapai karena perbedaan suhu air dingin keluar *cooling tower* dan suhu bola basah udara masuk *cooling tower* tidak terlalu besar. Debit udara yang banyak menyerap panas dari air lebih banyak pula. Nilai ini merupakan nilai terbaik yang dapat dihasilkan dari *cooling tower* ini. Pada variasi suhu awal 60 °C dan tegangan listrik 0 volt merupakan nilai *approach* tertinggi yaitu sebesar 19,90 °C. Kipas *cooling tower* yang tidak berputar karena tegangan yang diberikan adalah 0 volt menjadikan debit udara yang masuk *cooling tower* sedikit, hanya terjadi aliran udara natural akibat perbedaan suhu. Debit udara yang sedikit ditambah dengan suhu awal yang tinggi mengakibatkan panas yang dipindahkan ke udara sedikit pula, hal ini yang mengakibatkan nilai *approach* meningkat. Semakin rendah *approach* semakin baik kinerja *cooling tower*.

Penurunan nilai *approach* sebesar 7,36 °C menjadi 9,47 °C dibandingkan dengan penelitian Hidayat (2014) dengan bahan pengisi yang sama yaitu 16,83 °C pada suhu air masuk 60 °C. Penurunan ini terjadi karena susunan dari bahan pengisi yang menjadikan udara lebih lancar dan peningkatan debit udara karena kipas yang lebih besar dari kipas yang digunakan Hidayat (2014). Sedangkan bahan pengisi lain menunjukkan hasil yang bervariasi, ini tergantung metode dan temperatur lingkungan saat pengujian. Bahan pengisi poliester menghasilkan *approach* terendah 4,5 °C

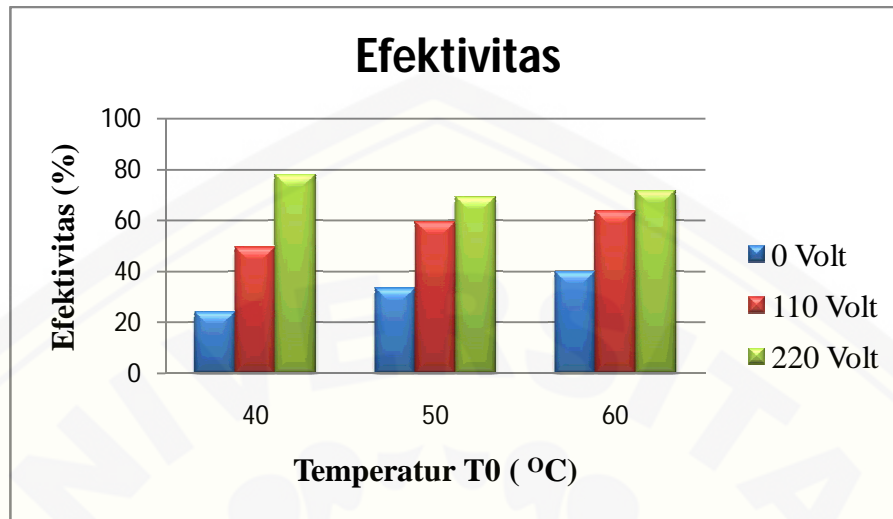
pada suhu air masuk 41°C . Bahan pengisi batu apung dan spons menghasilkan *approach* terrendah $1,7^{\circ}\text{C}$ dan $0,7^{\circ}\text{C}$ pada suhu air masuk $27,4^{\circ}\text{C}$. Penggunaan bahan pengisi tali ijuk menghasilkan *approach* terrendah $16,8^{\circ}\text{C}$ pada suhu air masuk 60°C dan yang terakhir adalah bahan pengisi keramik menghasilkan *approach* terrendah 2°C pada suhu air masuk 45°C . Dari beberapa bahan pengisi diatas dapat diurutkan bahan terbaik adalah keramik, bambu, spons, batu apung, polyester dan yang terakhir adalah tali ijuk. Keramik menjadikan permukaan air lebih luas dan waktu kontak air dan udara semakin lama sehingga panas yang dibuang kelingkungan lebih besar dari pada bahan pengisi yang lain. *Approach* sangatlah tergantung pada suhu bola basah udara masuk, sehingga setiap perbedaan ketinggian penempatan *cooling tower* akan menghasilkan nilai *approach* yang berbeda pula.

4.4 Efektivitas Pendinginan

Efektivitas pendinginan merupakan perbandingan antara *range* dan *range ideal* (dalam persentase), yaitu perbedaan antara suhu masuk air dan suhu *wet bulb ambien*, atau dengan kata lain adalah $= \text{Range} / (\text{Range} + \text{Approach})$. Semakin tinggi perbandingan ini, maka semakin tinggi efektivitas menara pendingin. Data hasil penghitungan efektivitas pendinginan rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan grafik efektivitas pendinginan dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini:

Tabel 4.6 Data rata-rata hasil penghitungan efektivitas pendinginan dari semua variasi

| Tengangan motor (Volt) | Suhu awal air (T0) | | |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 40°c (%) | 50°c (%) | 60°c (%) |
| 0 | 24,12 | 33,55 | 40,06 |
| 110 | 49,60 | 59,44 | 63,79 |
| 220 | 78,11 | 69,42 | 71,83 |



Gambar 4.3 Grafik temperatur efektivitas pendinginan semua variasi

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat, efektivitas pendinginan mengalami peningkatan pada setiap variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas dan variasi penambahan suhu awal hampir seluruhnya mempengaruhi peningkatan efektivitas hanya pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 volt terjadi perbedaan nilai efektivitas yang naik turun. Variasi tegangan listrik pada motor penggerak kipas mempengaruhi peningkatan efektivitas *cooling tower* karena putaran kipas berpengaruh pada *range*, sehingga apabila *range* meningkat dengan suhu awal dan suhu bola basah yang sama maka efektivitas akan meningkat pula. Suhu awal memang mempengaruhi nilai efektivitas *cooling tower*, tetapi hasil penelitian menunjukkan nilai efektivitas naik dan turun pada variasi tegangan listrik 220 volt pada motor penggerak kipas. Fenomena ini terjadi karena suhu bola basah udara masuk mengalami peningkatan, perubahan ini tergantung pada keadaan lingkungan. Kenaikan suhu bola basah ini menyebabkan efektivitas *cooling tower* menurun.

Efektivitas tertinggi diperoleh saat suhu awal 40 °C dengan tegangan motor listrik penggerak kipas sebesar 220 volt yaitu sebesar 78,11 %. Pada saat suhu awal 50 °C dengan tegangan motor listrik penggerak kipas sebesar 220 volt terjadi penurunan sebesar 8.69 % menjadi 69,42 % dan naik kembali sebesar 2,41 % menjadi 71,83 % pada saat suhu awal 60 °C dengan tegangan motor listrik penggerak

kipas sebesar 220 volt. Efektivitas terendah yaitu 24,12 % pada suhu awal 40 °C dan tegangan listrik motor kipas 0 volt.

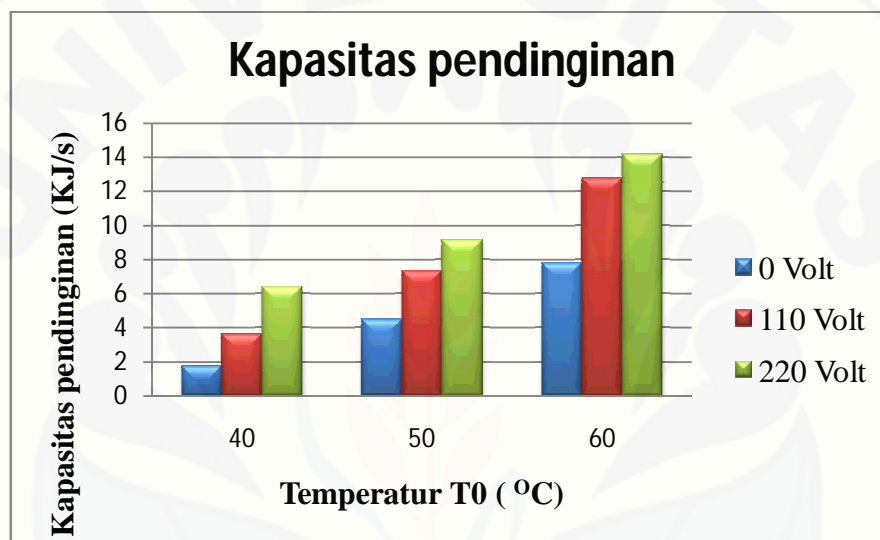
Penelitian Hidayat (2014) dengan bahan pengisi bambu wulung memiliki efektivitas sebesar 50,25 % pada suhu air masuk 60 °C dan pada penelitian ini efektivitas pada suhu 60 °C sebesar 71,83, peningkatan ini menunjukkan debit udara dan susunan dari bahan pengisi mempengaruhi efektivitas *cooling tower* dengan bahan pengisi yang sama. Bahan pengisi bambu bukan bahan pengisi terbaik ini dibuktikan oleh Ramkrishnan (2013) dalam penelitiannya, keramik menghasilkan efektivitas sebesar 88,89 % pada profil setengah lingkaran dengan diameter 100 mm. Dibawah bahan pengisi bambu terdapat poliester yang menghasilkan efektivitas tertinggi sebesar 57,1%. Bahan pengisi spons menghasilkan efektivitas tertinggi 56 %. Penggunaan bahan pengisi tali ijuk menghasilkan efektivitas tertinggi 49,1 % dan yang terakhir adalah bahan pengisi batu apung menghasilkan efektivitas tertinggi 42%. Efektivitas sebaiknya diatas 50 % karena apabila kurang dari 50 % maka *cooling tower* tersebut perlu adanya perbaikan supaya dapat digunakan dengan maksimal.

4.5 Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan merupakan panas yang dibuang dalam kKal/jam atau kJ/s, sebagai hasil dari kecepatan aliran masa air, panas spesifik dan perbedaan suhu. Kapasitas pendinginan suatu menara pendingin adalah setara dengan kemampuan menara pendingin tersebut dalam membuang panas ke lingkungan. Data hasil penghitungan Kapasitas pendinginan rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.7 dan grafik efektivitas pendinginan dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut

Tabel 4.7 Data rata-rata hasil penghitungan kapasitas pendinginan dari semua variasi.

| Tegangan motor (Volt) | Suhu awal air (T0) | | |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 40 ⁰ c (KJ/s) | 50 ⁰ c (KJ/s) | 60 ⁰ c (KJ/s) |
| 0 | 1,74 | 4,50 | 7,82 |
| 110 | 3,63 | 7,34 | 12,81 |
| 220 | 6,40 | 9,14 | 14,19 |



Gambar 4.4 Grafik temperatur Kapasitas pendinginan semua variasi

Pada Gambar 4.4 memperlihatkan kapasitas pendinginan akan semakin naik dengan variasi yang ada. Pengaruh ini memiliki kesamaan yang dialami oleh perubahan ΔT . Kapasitas pendinginan paling rendah dialami pada variasi suhu awal 40 °C dengan tegangan motor listrik penggerak kipas 0 volt yaitu 1,74 kJ/s dan naik seiring penambahan suhu awal dan penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas yang telah ditentukan. Kapasitas pendinginan tertinggi diperoleh dari variasi tertinggi yaitu pada suhu awal 60 C dan tegangan motor listrik penggerak kipas 220 volt yaitu 14,19 kJ/s.

Kemampuan *cooling tower* untuk membuang panas lingkungan dipengaruhi oleh suhu air masuk dan debit udara, ini dibuktikan dari grafik diatas. Setiap kenaikan

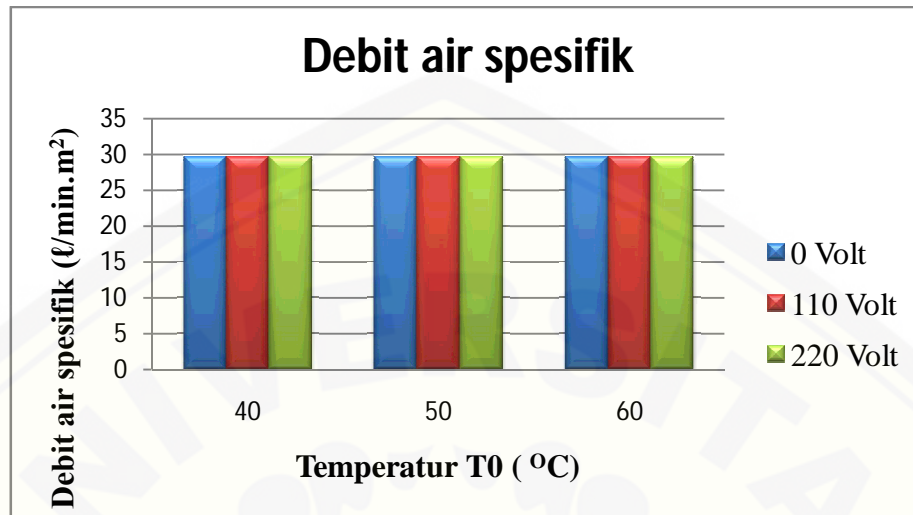
suhu air awal maka kapasitas pendinginan juga meningkat. Tegangan listrik yang diberikan pada motor penggerak kipas yang menjadikan debit udara meningkat sehingga menjadikan kapasitas pendinginan meningkat. Pengaruh debit air juga dialami oleh bahan pengisi lain, seperti penelitian Mulyono (2010) dengan bahan bahan pengisi poliester mempunyai kapasitas pendinginan mencapai 1663,03 KJ/s dikarenakan debit air masuk cooling tower yang sebesar 4000 liter/menit. Beberapa bahan pengisi yang lain seperti batu apung, spons, tali ijuk dan keramik memiliki kapasitas yang kecil yaitu secara berurutan 2,05 KJ/s, 2,69 KJ/s, 1,91 KJ/s dan 3,4 KJ/s. Dalam penelitian ini menunjukkan peningkatan kapasitas pendinginan dengan bahan pengisi yang sama yang diteliti oleh Hidayat (2014) yaitu dari 3,14 KJ/s menjadi 14,19. Fenomena ini terjadi karena *range* pada penelitian ini lebih besar yaitu 24,13 °C sedangkan penelitian Hidayat (2014) *range* adalah 17 °C pada suhu air masuk 60 °C.

4.6 Debit Air Spesifik

Merupakan debit air yang berada di dalam *cooling tower* yang di ukur sesuai dengan ukuran luas penampang *cooling tower* dan debit aliran air yang mengalir didalamnya. Dalam menghitung debit aliran spesifik yaitu $\dot{m}_{sp} = \dot{m}/A_{tower}$ massa air dibagi luas permukaan *cooling tower*. Data hasil penghitungan debit air spesifik dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan grafik debit air spesifik dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.

Tabel 4.8 Data rata-rata hasil debit air spesifik dari semua variasi

| Tegangan motor (Volt) | Suhu awal air (T0) | | |
|-----------------------|---|---|---|
| | 40 ^o c (ℓ/menit.m ²) | 50 ^o c (ℓ/menit.m ²) | 60 ^o c (ℓ/menit.m ²) |
| 0 | 29,72 | 29,72 | 29,72 |
| 110 | 29,72 | 29,72 | 29,72 |
| 220 | 29,72 | 29,72 | 29,72 |



Gambar 4.5 Grafik debit air spesifik semua variasi

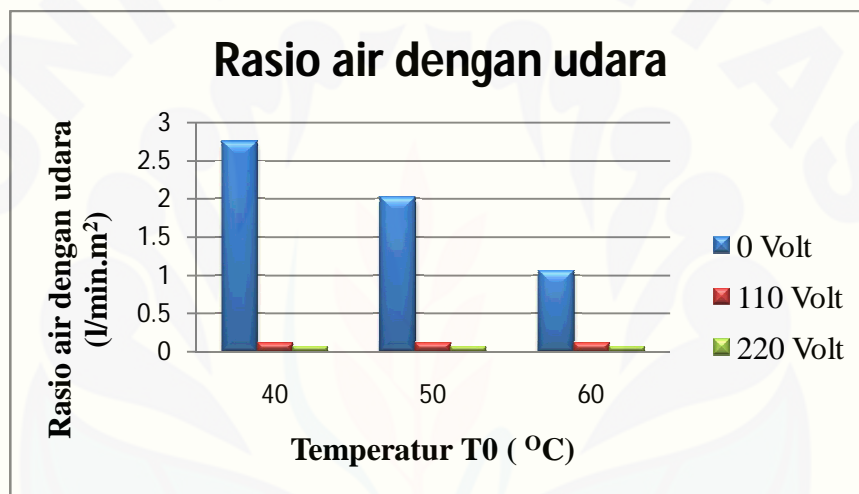
Pada Gambar 4.5 dapat dilihat debit aliran spesifik pada grafik mengalami kesamaan dari semua variasi. Kesamaan ini dikarenakan pompa air yang digunakan sama dan tanpa adanya variasi pada pompa air. Debit pompa air air masuk *cooling tower* selama operasi adalah $0,00014 \text{ m}^3/\text{s}$ atau 8,4 liter/menit. Debit air spesifik yang didapat adalah $29,72 \text{ liter/menit.m}^2$ atau $2,97 \text{ liter/menit.cm}^2$, ini berarti setiap luasan 1 cm^2 pada penampang *cooling tower* dilewati air dengan debit 2,97 liter/menit. Penampang *cooling tower* berbentuk lingkaran dengan diameter 60 cm dan luas 2.82 m^2 . Perhitungan debit air spesifik ini bertujuan untuk pemilihan *nozzle* yang bertujuan untuk meratakan air pada seluruh permukaan penampang *cooling tower*, sehingga tidak terjadi perbedaan debit air tiap luasannya.

4.7 Rasio air dengan udara

Nilai rasio air-udara adalah parameter yang sangat penting dalam pemilihan suatu menara pendingin, terutama dalam pemilihan kapasitas kipas. Rasio ini merupakan perbandingan antara debit air spesifik yang hendak didinginkan terhadap debit udara spesifik yang diinduksikan oleh kipas minimum. Data hasil penghitungan rasio air dengan udara rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.9 dan grafik rasio air dengan udara dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.

Tabel 4.9 Data rata-rata hasil rasio air dengan udara dari semua variasi.

| Tengangan motor (Volt) | Suhu awal air (T0) | | |
|------------------------|---|---|---|
| | 40 ^o c (ℓ/min.m ²) | 50 ^o c (ℓ/min.m ²) | 60 ^o c (ℓ/min.m ²) |
| 0 | 2,75 | 2,03 | 1,07 |
| 110 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| 220 | 0,07 | 0,07 | 0,07 |



Gambar 4.6 Grafik rasio air dengan udara semua variasi

Pada Gambar 4.6 dapat dilihat grafik rasio perbandingan air dan udara menunjukkan naik dan turunnya rasio pada semua variasi. Pengaruh naik dan turunnya nilai rasio ini disebabkan karena adanya perubahan kecepatan udara yang masuk kedalam *cooling tower*. Kecepatan putaran kipas berpengaruh pada rasio air dengan udara dimana semakin cepat putaran kipas maka nilai rasio semakin kecil.

Perbedaan nilai rasio pada variasi tegangan motor listrik penggerak kipas 0 volt terjadi karena aliran udara yang terjadi aliran natural. Nilai rasio tertinggi terjadi pada variasi suhu awal 40 °C tegangan listrik pada kipas 0 volt yaitu 2,75 l/min.m². Saat suhu awal dinaikkan ke 50 °C dan 60 °C terjadi penurunan nilai rasio, karena udara yang masuk dalam *cooling tower* semakin meningkat. Nilai rasio terendah

didapatkan pada tegangan motor kipas 220 volt dengan variasi suhu awal 40 °C, 50°C dan 60°C yaitu 0,07 ℓ/min.m².

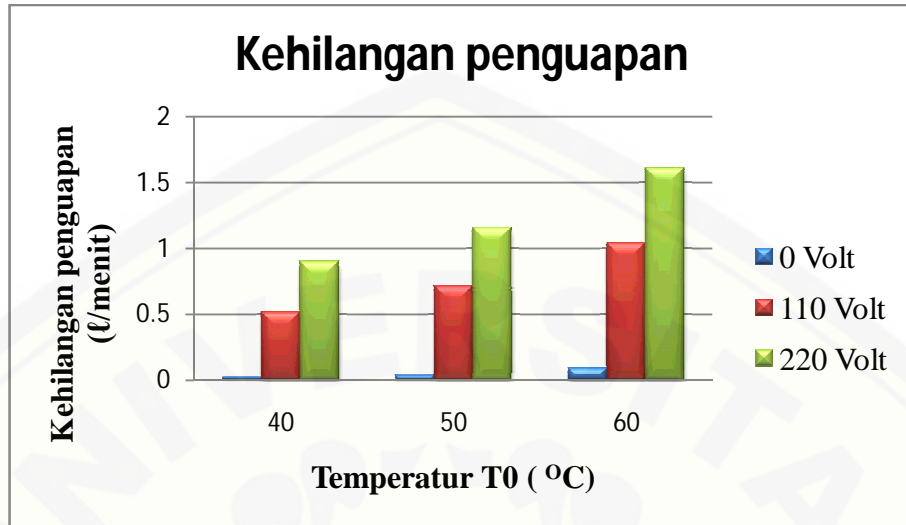
Penelitian ini adalah lanjutan penelitian dari Hidayat (2014) dan dihasilkan perbedaan pada rasio air dengan udara dikarenakan perbedaan debit udara yang dihasilkan kipas *cooling tower* dan jarak dari susunan bahan pengisi pada penelitian ini lebih besar yang mengakibatkan debit udara semakin banyak dan lancar tanpa menemui banyak hambatan karena terdapat rongga yang cukup untuk dilalui udara. Dalam penelitian Hidayat (2014) rasio air dengan udara 3,34 ℓ/min.m² pada suhu air masuk *cooling tower* 60 °C, ini berarti terdapat 3,34 ℓ/min.m² air pada debit udara 1 ℓ/min.m². Sedangkan pada penelitian ini rasio air dengan udara pada suhu air masuk *cooling tower* 60 °C adalah 0,07 ℓ/min.m², yang artinya terdapat 0,07 ℓ/min.m² air pada debit udara 1 ℓ/min.m².

4.8 Laju Penguapan Air

Merupakan jumlah air yang diuapkan untuk tugas pendinginan. Salah satu parameter kinerja menara pendingin yang penting adalah laju penguapan air ke udara. Proses penguapan inilah yang menjadi prinsip dasar suatu menara pendingin dalam mendinginkan air. Data hasil laju penguapan air rata-rata dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.10 dan grafik laju penguapan air dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.

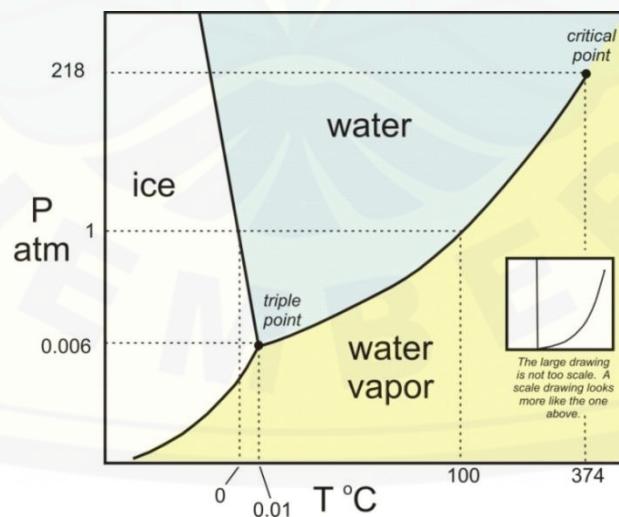
Tabel 4.10 Data rata-rata hasil debit laju penguapan air dari semua variasi.

| Tegangan motor (Volt) | Suhu awal air (T ₀) | | |
|-----------------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| | 40°C (ℓ/menit) | 50°C (ℓ/menit) | 60°C (ℓ/menit) |
| 0 | 0,023 | 0,040 | 0,095 |
| 110 | 0,521 | 0,716 | 1,045 |
| 220 | 0,903 | 1,160 | 1,610 |



Gambar 4.7 Grafik laju penguapan air semua variasi

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat laju penguapan air mengalami kenaikan pada semua variasi. Penambahan suhu awal akan menyebabkan penguapan meningkat serta kecepatan udara dalam *cooling tower* yang meningkat akibat variasi tegangan pada motor kipas menjadikan tekanan dalam *cooling tower* menurun dan mengakibatkan penguapan lebih cepat seperti dilihat dalam Gambar 4.8 dimana semakin tinggi suhu air maka penguapan semakin banyak dan semakin rendah tekanan udara maka penguapan terjadi lebih cepat dari tekanan udara normal.



Gambar 4.8 Diagram PT
(sumber: Serc, 2015)

Debit udara yang masuk maupun yang keluar dari *cooling tower* sangat berpengaruh, semakin cepat laju aliran udara maka kehilangan penguapan akan semakin besar. Suhu lingkungan juga mempengaruhi rasio kelembaban udara yang terjadi di sekitar *cooling tower*.

Kehilangan penguapan tertinggi terjadi pada variasi suhu air masuk 60°C dan tegangan motor listrik penggerak kipas 220 volt yaitu 1,61 ℓ/menit . Nilai penguapan didapat karena pada variasi ini tekanan udara turun akibat kecepatan udara ditambah dengan suhu awal yang tinggi yaitu 60°C . Kehilangan penguapan terendah terjadi pada variasi suhu awal 40°C , tegangan motor listrik penggerak kipas 0 volt yaitu 0,023 ℓ/menit . Aliran udara yang kecil menyebabkan tekanan udara tidak menurun sehingga penguapanpun kecil, suhu awal yang 40°C juga menjadikan penguapan tidak banyak.

Kipas *cooling tower* pada penelitian ini berdiameter 40 cm dengan debit maksimal yang dihasilkan 33,78 m^3/menit , kipas ini lebih besar dari kipas dalam penelitian Hidayat (2014) yaitu berdiameter 25 cm dengan debit udara maksimum 4,82 m^3/menit . Perbedaan ini menyebabkan perbedaan nilai penguapan dimana pada penelitian ini penguapan terbesar yaitu 1,61 ℓ/menit atau dalam satu hari harus ada penambahan air sebanyak 2318,4 liter. Sedangkan pada penelitian Hidayat (2014) penguapan maksimum adalah 0,0053 ℓ/menit atau dalam satu hari diperlukan tambahan air sebanyak 7,63 liter. Kelemahan dari *cooling tower* pada penelitian ini adalah laju penguapan yang besar sehingga diperlukan *drift eliminators* yang sesuai sehingga uap air dapat ditangkap dan tidak terbuang ke atmosfer. Pemilihan kipas *cooling tower* juga harus dipertimbangkan karena semakin tinggi debit udara maka laju penguapan air semakin tinggi.

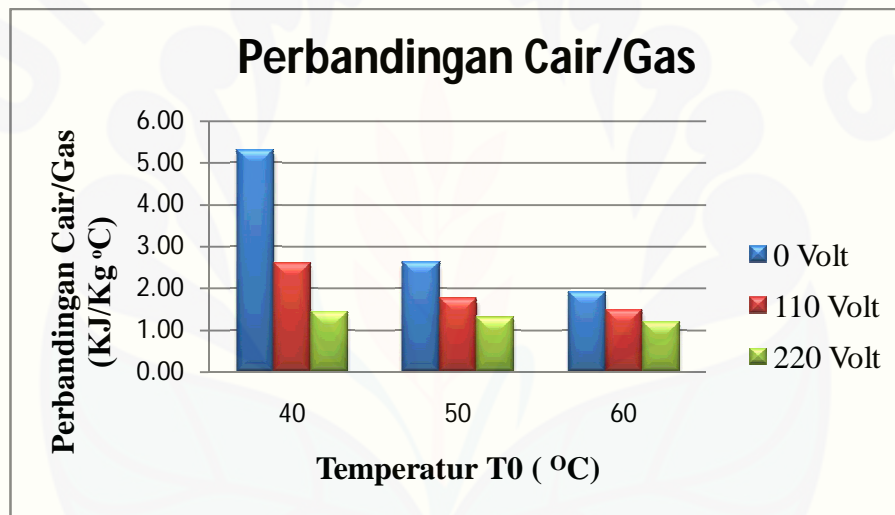
4.9 Perbandingan Aliran Massa Cair Terhadap Gas (L/G)

Perbandingan L/G menara pendingin merupakan perbandingan antara laju alir massa air dan udara. Data hasil laju perbandingan aliran massa cair dan gas rata-rata

dari semua variasi dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan grafik perbandingan aliran massa cair dan gas dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut.

Tabel 4.11 Data rata-rata hasil L/G dari semua variasi.

| Tegangan motor (Volt) | Suhu awal air (T0) | | |
|-----------------------|--|--|--|
| | 40 ^o c (KJ/Kg ^o C) | 50 ^o c (KJ/Kg ^o C) | 60 ^o c (KJ/Kg ^o C) |
| 0 | 5,31 | 2,63 | 1,91 |
| 110 | 2,60 | 1,77 | 1,50 |
| 220 | 1,45 | 1,31 | 1,20 |



Gambar 4.9 Grafik perbandingan massa cair dan gas semua variasi

Pada Gambar 4.9 dapat dilihat perbandingan aliran massa cair terhadap gas (L/G) dalam grafik terjadi penurunan pada semua variasi yang telah ditentukan. Hal ini disebabkan karena pengaruh Δh (perubahan entalpi). Kecil dan besarnya harga entalpi, dipengaruhi oleh besar-kecilnya suhu bola kering masuk dan keluar *cooling tower*, semakin besar entalpi yang dihasilkan bola kering, maka kemungkinan besar perbandingan L/G akan ikut besar. Semakin kecil nilai mendekati Δh , maka perbandingan L/G akan semakin baik.

Perbandingan L/G paling kecil terjadi pada, variasi suhu awal 60 °C dengan tegangan listrik pada motor penggerak kipas 220 volt yaitu 1,20 kJ/kg.°C. pada

variasi ini menjadi variasi terbaik karena nilai yang dihasilkan paling mendekati angka 1. Perbandingan L/G paling besar terjadi pada, variasi suhu awal 40 °C dengan tegangan listrik pada motor penggerak kipas 0 volt yaitu 5,31 kJ/kg.°C.

Penurunan Perbandingan L/G pada setiap variasi suhu awal menunjukkan bahwa penambahan suhu awal menjadikan Perbandingan L/G semakin kecil, dikarenakan *range* sangat mempengaruhi nilai L/G. Penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas juga mempengaruhi nilai dari L/G karena dari data *range*, kecepatan putaran motor kipas mengakibatkan nilai *range* semakin meningkat.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan perbedaan nilai L/G pada setiap bahan pengisi cooling tower. Penelitian oleh Mulyono (2010) dengan bahan pengisi poliester menghasilkan L/G terendah 1,40 kJ/kg.°C dan tertinggi 1,47 kJ/kg.°C. Penelitian oleh Wibisono (2005) bahan pengisi batu apung menghasilkan L/G terendah 0,91 kJ/kg.°C dan tertinggi 1,54 kJ/kg.°C, dan bahan pengisi spons menghasilkan L/G terendah 1,57 kJ/kg.°C dan tertinggi 2,33 kJ/kg.°C. Penggunaan bahan pengisi tali ijuk oleh Johanes (2011) menghasilkan L/G terendah 0,34 kJ/kg.°C dan tertinggi 1,54 kJ/kg.°C. Bahan pengisi keramik yang diteliti oleh Ramkrishnan (2013) menghasilkan L/G terendah 0,1 kJ/kg.°C dan tertinggi 1,2 kJ/kg.°C dan terakhir Bahan pengisi Bambu wulung Hidayat (2014) menghasilkan L/G terendah 0,34 kJ/kg.°C dan tertinggi 1,45 kJ/kg.°C.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang telah dibahas dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- a. Penambahan tegangan listrik pada motor penggerak kipas mengakibatkan debit udara yang masuk *cooling tower* meningkat sehingga pendinginan semakin maksimal. Kapasitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 *volt* dan suhu awal 60 °C, sebesar 14,19 kJ/s. kapasitas juga dipengaruhi oleh range dan debit air masuk *cooling tower*.
- b. Efektivitas pendinginan mengalami peningkatan pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas *cooling tower* yang semakin besar dan peningkatan suhu awal air masuk *cooling tower*. Efektivitas tertinggi terjadi pada variasi tegangan motor penggerak kipas 220 *volt* dengan suhu awal 40 °C, yaitu sebesar 78,11%. Nilai ini masih lebih kecil dari efektifitas *cooling tower* dengan bahan pengisi keramik yaitu 88 %.
- c. Laju penguapan air terbesar terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 *volt* dan suhu awal 60 °C yaitu dengan nilai penguapan sebesar 1,610 ℓ/menit. Peningkatan kecepatan udara keluar dari *cooling tower* dan peningkatan suhu awal mengakibatkan laju penguapan air semakin besar. Perlunya *drift eliminators* untuk menangkap uap air agar tidak terbang ke atmosfer.
- d. Perbandingan massa cair dan gas (L/G) terbaik terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 *volt* dan suhu awal 60 °C yaitu 1,2 kJ/kg°C. Perbandingan massa cair dan gas sebagai penilaian baik atau tidaknya *cooling tower*, semakin kecil nilai L/G mendekati angka 1 maka semakin baik kinerja dari *cooling tower*. Hampir semua bahan seperti poliester, batu apung, spons, tali ijuk dan keramik dapat memenuhi nilai L/G yang ditentukan.

5.2 Saran

Penelitian mengenai Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas *Cooling tower Induced Draft Counterflow* dengan Pengisi Bambu Wulung telah selesai dilaksanakan, maka disarankan beberapa hal berikut :

- a. Kajian ini masih terbatas pada analisa pengaruh tegangan listrik pada motor penggerak kipas udara keluar *cooling tower*. Penelitian lanjutan diharapkan dapat memvariasikan komponen lebih banyak seperti variasi bahan pengisi, jarak antar bahan pengisi, profil bahan pengisi dan variasi debit air sehingga memperoleh prestasi kerja *cooling tower* semakin baik.
- b. Variasi dapat dilakukan pada *nozzle* agar air dapat terdistribusi merata pada seluruh bagian *cooling tower*. Variasi debit air dan bahan pengisi juga akan mempengaruhi kinerja dari *cooling tower*.
- c. Pengambilan data kecepatan udara keluar sebaiknya dilakukan pada beberapa tempat karena kecepatan setiap sisi berbeda. Pengambilan data dapat dilakukan pada minimal 3 sisi atau lebih. Pengambilan data juga bisa dilakukan dengan membuat udara dalam aliran laminar, sehingga kecepatan udara sama setiap luasannya.
- d. Hasil penelitian ini merupakan data pendukung lanjutan yang dapat digunakan oleh pihak-pihak yang berkepentingan dalam pemilihan jenis *cooling tower* sebagai mesin pendingin fluida dan bambu wulung sebagai bahan pengisi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim 1. 2015. *Air*. Wikipedia. <http://id.wikipedia.org/wiki/Air> [5 maret 2015]
- Anonim 2. 2015. *Bambu*. Wikipedia. <http://id.wikipedia.org/wiki/Bambu> [5 mei 2015]
- Beniz Endüstri, 2015, *Product LT156*. <http://www.benizparts.com/Details/en/1856> [17 Maret 2015]
- Chemical and Oil Refning. 2015. *Cooling towers*. <https://nationalvetcontent.edu.au/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/dc6a7f1f-e3d3-44d8-9bf1-984ea8cb3c01/204/pmaops205b/proc205-010305-cooling-towers.htm> [17 Maret 2015]
- EL-Wakil, M.M., dan Jasjfi, E, 1992. *Instalai Pembangkit Daya. Power Plant Technology*. Jakarta: Erlangga.
- Elfi Yulia 2013. *Cooling tower*. <https://3lfiyulia.files.wordpress.com/2013/11/cooling-tower1.jpg> [25 November 2014]
- Fulkerson & Associates, Inc.2012. *SplashFill*. http://www.bobf.biz/Cooling%20Tower%20Improvements/SplashFill_web.jpg [25 November 2014]
- Gurumuda. 2014. *Konduktivitas termal*. <http://gurumuda.net/konduktivitas-termal.html> [25 November 2014]
- Hidayat, T. A. 2014. *Analisis Beban Kalor Cooling tower Induced Draft Counterflow Dengan Bahan Pengisi Bambu Wulung*. Jember: Jurnal Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.
- Johanes, S. 2011. *Karakteristik Menara Pendingin Dengan Bahan Isian Tali Ijuk*. Yogyakarta: Jurnal Jurusan Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada
- Kristanta, arif. 2012. *kalor*. <https://arifkristanta.files.wordpress.com/2012/10/kalor-jenis.png> [17 Maret 2015]
- Linley, RK., Franzini., JB. 1991. *Teknik Sumber Daya Air*. Jakarta, Erlangga.
- Morisco. 2006. *Pemberdayaan Bambu Untuk Kesejahteraan Dan Kelestarian Lingkungan*. Yogyakarta: Rangkuman Hasil Penelitian Laboraturium Teknik Struktur Jurusan Teknik Sipil Dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM.

- Mulyono. 2010. *Analisa Beban Kalor Menara Pendingin Basah Induced-Draft Aliran Lawan Arah*. Semarang: Jurnal Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang.
- Pacific Northwest National Laboratory. 2001. *Photo Library*. www.cce.iastate.edu/courses/ce525/Cooling%20Towers.doc [25 November 2014]
- Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia. 2006. *Peralatan Energi Listrik Menara Pendingin*. – www.energyefficiencyasia.org [25 November 2014]
- Perry. 1997. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 7 ed. Mc. Graw Hill Book Company, Inc. New York.
- Ramkrishnan, R. 2013. *Experimental Study Of Cooling Tower Performance Using Ceramic Tile Packin*. India: Department of Mechanical Engineering, Annamalai University
- SPX Cooling Technologies. 2014. *Counterflow Film Fill*. <http://spxcooling.com/images/DF254fill-480.jpg> [17 Maret 2015]
- Stoecker, W. F., dan Jones, J. W. 2009. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Terjemahan Oleh Supratman Hara. Jakarta: Erlangga
- Serc. 2015. *Diagram PT*. http://serc.carleton.edu/images/research_education/equilibria/h2o_phase_diagram_-_color.v2.jpg [6 Juni 2015]
- Tower Components, Inc. 2012. *Splash fills*. <http://www.towercomponentsinc.com/images/new/splash-fill-po.jpg> [25 November 2014]
- Wibisono, Y. 2005. *Perbandingan Unjuk Kerja Atas Bahan Pengisi Pada Menara Pendingin Tipe Induced Counter Flow*. Jurnal teknologi pertanian. Unibraw.

LAMPIRAN 1. Tabel data hasil pengujian

| A.1 Tegangan 0 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 40 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu (s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 40 | 41,5 | 35,2 | 32,7 | 35 | 28,4 | 38 | 0,00014 | 0,20 |
| 40 | 40 | 41,3 | 38,1 | 33,1 | 36,2 | 28,4 | 39,2 | 0,00014 | 0,20 |
| 60 | 40 | 40 | 38,1 | 32,7 | 36,2 | 28,7 | 39,2 | 0,00014 | 0,20 |
| 80 | 40 | 40,4 | 38,1 | 32,8 | 36,2 | 28,2 | 39,2 | 0,00014 | 0,20 |
| 100 | 40 | 40,4 | 38,3 | 32,8 | 35,3 | 28,2 | 38,3 | 0,00014 | 0,20 |
| 120 | 40 | 40,3 | 38,3 | 32,5 | 35,4 | 28,2 | 38,4 | 0,00014 | 0,20 |
| x | 40 | 40,7 | 37,68 | 32,77 | 35,72 | 28,35 | 38,72 | 0,00014 | 0,20 |

| A.2 Tegangan 0 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 50 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu (s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 50 | 50,7 | 39,4 | 32,9 | 39,4 | 29 | 42,4 | 0,00014 | 0,27 |
| 40 | 50 | 51,1 | 44,3 | 33,4 | 38,7 | 29 | 41,7 | 0,00014 | 0,27 |
| 60 | 50 | 51,8 | 44,5 | 32,9 | 38,5 | 28,9 | 41,5 | 0,00014 | 0,27 |
| 80 | 50 | 52,5 | 44,6 | 33,4 | 37,8 | 29 | 40,8 | 0,00014 | 0,27 |
| 100 | 50 | 52,5 | 46,2 | 33,1 | 37,6 | 29 | 40,6 | 0,00014 | 0,27 |
| 120 | 50 | 52,4 | 46,1 | 33,4 | 37,7 | 29,3 | 40,7 | 0,00014 | 0,27 |
| x | 50 | 51,83 | 44,18 | 33,18 | 38,28 | 29,03 | 41,28 | 0,00014 | 0,27 |

| A.3 Tegangan 0 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 60 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu (s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 60 | 61,1 | 41 | 33,1 | 41,3 | 29,3 | 44,3 | 0,00014 | 0,53 |
| 40 | 60 | 61,4 | 48,8 | 32,7 | 40,5 | 28,8 | 43,5 | 0,00014 | 0,50 |
| 60 | 60 | 62,3 | 50,5 | 33,2 | 40,2 | 28,8 | 43,2 | 0,00014 | 0,50 |
| 80 | 60 | 61,4 | 49,3 | 31,9 | 39,7 | 28,2 | 42,7 | 0,00014 | 0,53 |
| 100 | 60 | 62,4 | 50,8 | 32,4 | 40,3 | 28,3 | 43,3 | 0,00014 | 0,50 |
| 120 | 60 | 62 | 50,4 | 32 | 40,2 | 28 | 43,2 | 0,00014 | 0,53 |
| x | 60 | 61,77 | 48,47 | 32,55 | 40,37 | 28,57 | 43,37 | 0,00014 | 0,51 |

| A.4 Tegangan 110 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 40 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 40 | 40,5 | 33,7 | 32,2 | 35,2 | 28 | 38,2 | 0,00014 | 4,42 |
| 40 | 40 | 40,4 | 34,4 | 32,2 | 35,2 | 27,8 | 38,2 | 0,00014 | 4,52 |
| 60 | 40 | 40,3 | 35,1 | 32,7 | 35,5 | 28,2 | 38,5 | 0,00014 | 4,52 |
| 80 | 40 | 39,8 | 33,9 | 32,4 | 35,4 | 27,8 | 38,4 | 0,00014 | 4,62 |
| 100 | 40 | 40,3 | 33,9 | 32,3 | 35,4 | 27,9 | 38,4 | 0,00014 | 4,32 |
| 120 | 40 | 40,6 | 33,9 | 31,9 | 35,3 | 27,6 | 38,3 | 0,00014 | 4,42 |
| x | 40 | 40,32 | 34,15 | 32,28 | 35,33 | 27,88 | 38,33 | 0,00014 | 4,47 |

| A.5 Tegangan 110 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 50 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 50 | 51,2 | 36,3 | 33,4 | 40,5 | 29,3 | 43,5 | 0,00014 | 4,32 |
| 40 | 50 | 50,2 | 38,1 | 33,3 | 39,7 | 29,3 | 42,7 | 0,00014 | 4,42 |
| 60 | 50 | 49,8 | 38,6 | 33,2 | 39,2 | 29,3 | 42,2 | 0,00014 | 4,52 |
| 80 | 50 | 49,5 | 37,8 | 33 | 38,8 | 29,1 | 41,8 | 0,00014 | 4,62 |
| 100 | 50 | 50,1 | 37,8 | 32,9 | 38,5 | 28,8 | 41,5 | 0,00014 | 4,42 |
| 120 | 50 | 50,3 | 37,6 | 32,9 | 38,7 | 29,3 | 41,7 | 0,00014 | 4,52 |
| x | 50 | 50,18 | 37,70 | 33,12 | 39,23 | 29,18 | 42,23 | 0,00014 | 4,47 |

| A.6 Tegangan 110 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 60 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 60 | 61,7 | 38,6 | 31,3 | 44,2 | 27,5 | 47,2 | 0,00014 | 4,52 |
| 40 | 60 | 61,8 | 40,4 | 31,5 | 42,7 | 27,7 | 45,7 | 0,00014 | 4,52 |
| 60 | 60 | 61,8 | 39,9 | 31,1 | 42,6 | 27,7 | 45,6 | 0,00014 | 4,62 |
| 80 | 60 | 61,9 | 40,4 | 31,4 | 42,5 | 27,7 | 45,5 | 0,00014 | 4,42 |
| 100 | 60 | 61,7 | 40,2 | 31,3 | 42,1 | 27,5 | 45,1 | 0,00014 | 4,32 |
| 120 | 60 | 61,3 | 40 | 31,3 | 42,2 | 27,2 | 45,2 | 0,00014 | 4,42 |
| x | 60 | 61,70 | 39,92 | 31,32 | 42,72 | 27,55 | 45,72 | 0,00014 | 4,47 |

| A.7 Tegangan 220 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 40 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 40 | 42,8 | 31 | 32,7 | 36 | 28,2 | 39 | 0,00014 | 7,74 |
| 40 | 40 | 42,6 | 31,4 | 32,7 | 35,6 | 28,2 | 38,6 | 0,00014 | 7,81 |
| 60 | 40 | 42,2 | 31,5 | 32,8 | 35,4 | 28,4 | 38,4 | 0,00014 | 7,77 |
| 80 | 40 | 42 | 31,1 | 32,4 | 35,4 | 28,2 | 38,4 | 0,00014 | 7,71 |
| 100 | 40 | 42,1 | 31,5 | 32,9 | 35,6 | 28,5 | 38,6 | 0,00014 | 7,77 |
| 120 | 40 | 41,7 | 31,6 | 32,4 | 35,4 | 28,3 | 38,4 | 0,00014 | 7,74 |
| x | 40 | 42,23 | 31,35 | 32,65 | 35,57 | 28,30 | 38,57 | 0,00014 | 7,76 |

| A.8 Tegangan 220 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 50 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 50 | 52 | 33,7 | 34,2 | 40,3 | 29,7 | 43,3 | 0,00014 | 7,71 |
| 40 | 50 | 51,8 | 36,9 | 33,7 | 39,1 | 29,7 | 42,1 | 0,00014 | 7,77 |
| 60 | 50 | 52 | 37,9 | 34 | 38,3 | 29,4 | 41,3 | 0,00014 | 7,81 |
| 80 | 50 | 51,7 | 36,5 | 33,8 | 38,2 | 29,3 | 41,2 | 0,00014 | 7,77 |
| 100 | 50 | 52 | 36,5 | 33,8 | 37,9 | 29,2 | 40,9 | 0,00014 | 7,74 |
| 120 | 50 | 52 | 36,7 | 33,7 | 38,2 | 29,8 | 41,2 | 0,00014 | 7,74 |
| x | 50 | 51,92 | 36,37 | 33,87 | 38,67 | 29,52 | 41,67 | 0,00014 | 7,76 |

| A.9 Tegangan 220 volt pada kipas <i>cooling tower</i> dengan suhu awal 60 °C | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-------------|
| Waktu(s) | T0 | Ta1 | Ta2 | Tdb1 | Tdb2 | Twb1 | Twb2 | Qa | Au |
| 20 | 60 | 60,3 | 33,5 | 31 | 42,1 | 27,5 | 45,1 | 0,00014 | 7,77 |
| 40 | 60 | 61,1 | 38,1 | 31,4 | 41,5 | 27,5 | 44,5 | 0,00014 | 7,81 |
| 60 | 60 | 61,3 | 37,4 | 31 | 41,1 | 27,4 | 44,1 | 0,00014 | 7,77 |
| 80 | 60 | 61,8 | 38,3 | 30,9 | 40,7 | 27,1 | 43,7 | 0,00014 | 7,74 |
| 100 | 60 | 61,4 | 37,2 | 31,1 | 41,4 | 28,1 | 44,4 | 0,00014 | 7,74 |
| 120 | 60 | 61,5 | 38,1 | 31,7 | 41,2 | 28,2 | 44,2 | 0,00014 | 7,74 |
| x | 60 | 61,23 | 37,10 | 31,18 | 41,33 | 27,63 | 44,33 | 0,00014 | 7,76 |

Ket:

- T0 : Suhu air *heater*
- Ta1 : Suhu air masuk *Cooling tower*
- Ta2 : Suhu air keluar *Cooling tower*
- Tdb1 : Suhu bola kering masuk *Cooling tower*
- Tbd2 : Suhu bola kering keluar *Cooling tower*
- Twb1 : Suhu bola basah masuk *Cooling tower*
- Twb2 : Suhu bola basah keluar *Cooling tower*
- Qa : Debit air
- au : Kecepatan udara
- X : Nilai rata-rata dari semua data

LAMPIRAN 2. Nilai rata-rata. Q air , Volume Spesifik, Rasio Kelembaban, Entalpi

| Tegangan motor | Suhu air | Debit udara | Volum spesifik | Rasio Kelembaban | | Entalpi | |
|----------------|----------|-------------|----------------|------------------|--------|---------|---------|
| | T0 | Qu | V1 | wh1 | wh2 | h1 | h2 |
| 0 volt | 40 | 0,014 | 0,910 | 0,023 | 0,0476 | 92,052 | 158,084 |
| | 50 | 0,020 | 0,913 | 0,024 | 0,0550 | 95,464 | 179,822 |
| | 60 | 0,037 | 0,910 | 0,024 | 0,0618 | 93,141 | 199,715 |
| 110 volt | 40 | 0,324 | 0,908 | 0,022 | 0,0466 | 89,791 | 157,002 |
| | 50 | 0,324 | 0,914 | 0,025 | 0,0580 | 96,236 | 188,609 |
| | 60 | 0,324 | 0,905 | 0,022 | 0,0705 | 88,236 | 224,718 |
| 220 volt | 40 | 0,563 | 0,910 | 0,023 | 0,0472 | 91,811 | 157,891 |
| | 50 | 0,563 | 0,916 | 0,025 | 0,0562 | 97,921 | 183,380 |
| | 60 | 0,563 | 0,905 | 0,022 | 0,0652 | 88,641 | 209,571 |

- Ket: T0 = Suhu air *heater*
 Qu = Debit udara
 V1 = Volume Spesifik
 Wh1 = Rasio kelembaban udara masuk *cooling tower*
 Wh2 = Rasio kelembaban udara keluar *cooling tower*
 H1 = Entalpi udara masuk *cooling tower*
 H2 = Entalpi udara keluar *cooling tower*

LAMPIRAN 3. PERHITUNGAN.**Data cooling tower:**

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Tegangan variasi | : 220 volt |
| Suhu variasi | : 60 °C |
| Diameter | : 60 cm |
| Densitas air (ρ) | : 0,9929 kg/ ℓ |
| Kalor jenis air (C_p) | : 4200 kJ/kg. $^{\circ}$ C |

Mecari nilai:

a). *Range* = temperatur air masuk – temperature air keluar
 $= T_{a1} - T_{a2}$
 $= 61,23 \text{ }^{\circ}\text{C} - 37,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $= 24,13 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

b). *Approach* = temperatur air keluar – suhu bola basah
 $= T_{a2} - T_{wb1}$
 $= 37,1 \text{ }^{\circ}\text{C} - 27,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $= 9,47 \text{ }^{\circ}\text{C}$

c). Efektifitas pendinginan (%)
 $= 100 (\textit{Range}) / (T_{a1} - T_{wb1})$
 $= 100 (24,13 \text{ }^{\circ}\text{C}) / (61,23 \text{ }^{\circ}\text{C} - 27,63 \text{ }^{\circ}\text{C})$
 $= 71,83 \text{ } \%$.

d). Kapasitas pendinginan (kJ/s)
 $= \dot{m} \times C_p \times \Delta T$
 $= 0,00014 \text{ m}^3/\text{s} \times 4200 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C} \times 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $= 14,19 \text{ kJ/s}.$

e). Debet air spesifik (L/min/m²).
 $= \dot{m} : A_{\text{tower}}$
 $= 0,00014 * 1000 / 0,2826 * 60$
 $= 29,72 \text{ L/min/m}^2$

f). Rasio A/U = $m_{sp} : m_u$

$$= 29,72 : 420,25$$

$$= 0,07$$

g). Kehilangan Penguapan (L/min)

$$= (\omega_{H2} - \omega_{H1}) \times \frac{V}{\rho \cdot v} \times 60$$

$$= (0,0652 - 0,022) \times (0,563 : 0,9929 \times 0,905) \times 60$$

$$= 1,6106 \text{ L/min.}$$

h). Perbandingan aliran massa cair / gas (L/G)

$$= (h_2 - h_1) / (4,19 \times \text{range})$$

$$= (209,571 - 88,641) / (4,19 \times 24,13 \text{ } ^\circ\text{C.})$$

$$= 1,20 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C.}$$

Data pipa pitot:

$$\rho_{udara} = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{zat \text{ cair}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$v = \frac{\sqrt{2\rho_{zc}gh}}{\rho\mu}$$

$$v = \frac{\sqrt{2(1000)(10)(0.003)}}{1}$$

$$v = \sqrt{60}$$

$$v = 7,74 \text{ m/s}$$

LAMPIRAN 4. Hasil Semua Perhitungan Rata-rata.

| Tegangan motor | T0 (°C) | ΔT (°C) | A (°C) | EP (%) | Q (KJ/s) |
|----------------|---------|-----------------|--------|--------|----------|
| 0 volt | 40 | 2,967 | 9,333 | 24,119 | 1,744 |
| | 50 | 7,650 | 15,150 | 33,553 | 4,498 |
| | 60 | 13,300 | 19,900 | 40,060 | 7,820 |
| 110 volt | 40 | 6,167 | 6,267 | 49,598 | 3,626 |
| | 50 | 12,483 | 8,517 | 59,444 | 7,340 |
| | 60 | 21,783 | 12,367 | 63,787 | 12,809 |
| 220 volt | 40 | 10,883 | 3,050 | 78,110 | 6,399 |
| | 50 | 15,550 | 6,850 | 69,420 | 9,143 |
| | 60 | 24,133 | 9,467 | 71,825 | 14,190 |

| Tegangan motor | T0 (°C) | \dot{m}_{sp} (L/menit) | \dot{m}_u (m/menit) | R (A/U) | LPA (L/menit) | L/G (KJ/Kg °C) |
|----------------|---------|--------------------------|-----------------------|---------|---------------|----------------|
| 0 volt | 40 | 29,724 | 10,791 | 2,755 | 0,0235 | 5,31 |
| | 50 | 29,724 | 14,640 | 2,030 | 0,0399 | 2,63 |
| | 60 | 29,724 | 27,877 | 1,066 | 0,0947 | 1,91 |
| 110 volt | 40 | 29,724 | 241,897 | 0,123 | 0,5215 | 2,60 |
| | 50 | 29,724 | 241,897 | 0,123 | 0,7165 | 1,77 |
| | 60 | 29,724 | 241,897 | 0,123 | 1,0455 | 1,50 |
| 220 volt | 40 | 29,724 | 419,948 | 0,071 | 0,9035 | 1,45 |
| | 50 | 29,724 | 419,948 | 0,071 | 1,1604 | 1,31 |
| | 60 | 29,724 | 420,247 | 0,071 | 1,6106 | 1,20 |

- Ket: ΔT = Renge
 A = Approach
 EP = Efektivitas pendinginan
 Q = Beban kalor
 \dot{m}_{sp} = debit air spesifik
 \dot{m}_u = debit udara spesifik
 R a/u = rasio air/udara
 LPA = laju penguapan air
 (L/G) = perbandingan liquid/gas

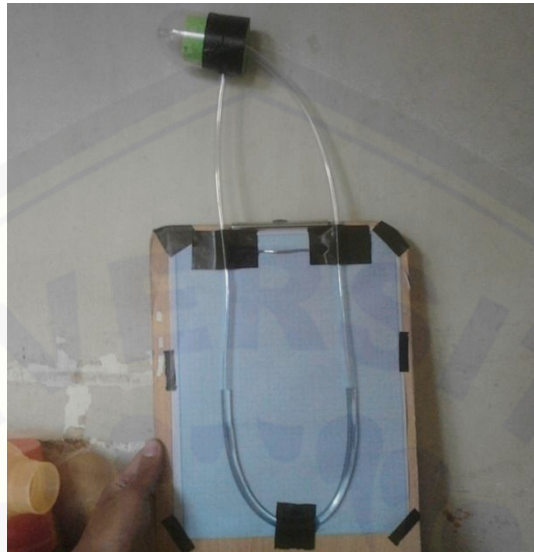
LAMPIRAN 5. Gambar Pengujian



Gambar alat pengontrol *cooling tower*

| CH | VALUE | ALARM | LO |
|-----|-----------|-------|----|
| 1 | + 40.5 °C | * | * |
| 2 | + 38.4 °C | * | * |
| 3 | + 28.9 °C | * | * |
| 4 | + 33.7 °C | * | * |
| 5 | + 34.4 °C | * | * |
| 6 | + 28.3 °C | * | * |
| 7 | + 32.8 °C | * | * |
| 8 | BURNOUT | * | * |
| 9 | BURNOUT | * | * |
| 10 | BURNOUT | * | * |
| PLS | | | |

Gambar pengambilan data



Gambar pipa pitot



Gambar *cooling tower*



Gambar kompor pemanas air



Gambar *heater*



Gambar kipas *cooling tower*



Gambar bahan pengisi