



**ANALISA KINERJA *COOLING TOWER FORCED DRAFT*  
*COUNTERFLOW* DENGAN PENGISI *CALCIBOARD*  
(DITINJAU DARI KECEPATAN UDARA DAN  
KEMIRINGAN PENGISI)**

**SKRIPSI**

Oleh

**SYAFIUL ANWAR  
NIM 121910101069**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**



**ANALISA KINERJA *COOLING TOWER FORCED DRAFT*  
*COUNTERFLOW* DENGAN PENGISI *CALCIBOARD*  
(DITINJAU DARI KECEPATAN UDARA DAN  
KEMIRINGAN PENGISI)**

**SKRIPSI**

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

Oleh

**SYAFIUL ANWAR  
NIM 121910101069**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK MESIN  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2016**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Kedua orang tua saya, Bapak Misdin dan Ibu Sukarni yang tercinta;
2. Kakakku Sofiatun, Kholifah, dan seluruh keluargaku yang tercinta;
3. Saudaraku Teknik Mesin 2012 yang selalu menemani hari-hariku di Jember;
4. Keluarga seperantauan “Kontrakan Brantas AKB”, khususnya Prasetya Eka Indradianto, Agus Sobirin, M. Iman Tarnando, Danar Dwi P., Denni Rudiyanto, Nanda Choirul Amshori, Yahya Abidin, Teguh Ari Cahyono, yang selalu menghibur;
5. Seluruh teman SMK dan seluruh teman smp;
6. Guru-guruku sejak sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi;
7. Seluruh dosen, staff pengajar dan administrasi Fakultas Teknik Universitas Jember yang membantu penulis dalam menyelesaikan studi S1;
8. Kepada Teknisi laboratorium Konversi Energi yang sangat membantu dalam menyelesaikan alat dan, yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membantu saya mengambil data;
9. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

**MOTTO**

“Sebaik-baiknya kamu adalah orang yang belajar Al-Qur’an dan Yang mengajarkannya”

(HR.Bukhari)

“Barang siapa keluar untuk mencari ilmu maka dia berada di jalan Allah”

(HR.Turmudzi)

“Hai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalatmu sebagai penolongmu, sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar”

(Al-Baqarah: 153)

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Syafiul Anwar

NIM : 121910101069

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Analisa Kinerja *Cooling Tower Forced Draft Counterflow* Dengan Pengisi *Calciboard* (Ditinjau Dari Kecepatan Udara dan Kemiringan Pengisi)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada instansi mana pun, serta 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 adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 01 November 2016  
yang menyatakan,

Syafiul Anwar

NIM 121910101069

**SKRIPSI**

***Analisa Kinerja Cooling Tower Forced Draft Counterflow  
Dengan Pengisi Calciboard  
(Ditinjau Dari Kecepatan Udara dan Kemiringan Pengisi)***

Oleh  
Syafiul Anwar  
NIM 121910101069

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.

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

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Analisa Kinerja *Cooling Tower Forced Draft Counterflow* Dengan Pengisi *Calciboard* (Ditinjau Dari Kecepatan Udara dan Kemiringan Pengisi)” yang telah diuji dan disahkan pada:

Hari, Tanggal : 11 November 2016

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji:

DPU,

DPA,

Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T.  
NIP. 19681207 199512 1 002

Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc.  
NIP. 19680617 199501 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T.  
NIP. 19711114 199903 1 002

Santoso Mulyadi, S.T., M.T.  
NIP. 19700228 199702 1 001

Mengesahkan  
Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Jember,

Dr.Ir. Entin Hidayah, M.U.M.  
NIP.19661215 199503 2 001

## RINGKASAN

**Analisa Kinerja *Cooling Tower Forced Draft Counterflow* Dengan Pengisi *Calciboard* (Ditinjau Dari Kecepatan Udara dan Kemiringan Pengisi);** Syafiul Anwar, 121910101069; 2016; 68 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kecepatan udara merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap kinerja *cooling tower*. Sudut kemiringan pengisi juga termasuk salah satu faktor yang berpengaruh terhadap kinerja *cooling tower*. Kombinasi antara kedua variasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan kinerja *cooling tower* dengan semakin banyak panas yang dibuang ke atmosfer. Penambahan kecepatan udara dilakukan dengan mengatur voltase motor kipas. Bahan pengisi yang berfungsi untuk memfasilitasi perpindahan panas dengan memaksimalkan kontak antara air dan udara. Bahan pengisi yang digunakan yaitu *calciboard* diharapkan dapat memaksimalkan perpindahan panas air dengan udara.

Penelitian ini difokuskan tentang kinerja pendinginan *cooling tower* dengan variasi kecepatan udara dan kemiringan sudut pengisi. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah kecepatan udara 0,01 m/s, 2,6 m/s, dan 7,76 m/s. Variasi kemiringan sudut pengisi  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , dan  $75^{\circ}$ .

Dari hasil penelitian menunjukkan peningkatan kapasitas pendinginan dan efektivitas pendinginan. Kapasitas pendinginan tertinggi pada penelitian ini, terjadi pada variasi kemiringan pengisi  $45^{\circ}$  dan kecepatan udara 7,76 m/s yaitu 13,34 kJ/s. Sementara efektivitas tertinggi pada penelitian ini diperoleh pada variasi kemiringan pengisi  $45^{\circ}$  dan kecepatan udara 7,76 m/s, yaitu sebesar 89,83%. Penambahan kecepatan udara mengakibatkan panas yang berpindah ke udara semakin banyak. Semakin kecil sudut kemiringan membuat waktu kontak udara dengan air semakin lama dan panas yang berpindah juga semakin banyak.



## SUMMARY

**Performance Analysis Of Cooling Tower Forced Draft Counterflow With Calciboard Filler (Observed Of Air Speed and Slope The Filler);** Syafiul Anwar, 121910101069; 2016; 68 pages; Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Air velocity is one of the factors that influence the performance of cooling tower. The tilt angle charger also included one of the factors that influence the performance of cooling tower. The combination of the two variations is expected to improve the performance of cooling tower with more heat is dumped into atmsosfir. The addition of air speed is done by adjusting the voltage fan motor. The filler which serves to facilitate heat transfer by maximizing the contact between water and air. The filler used is calciboard expected to maximize the heat transfer water with air.

This study focused on cooling tower cooling performance with variations in air speed and tilt angle of fillers. Variations used in this study is the air speed of 0,01 m/s, 2,6 m/s, and 7,76 m/s. Variations filler tilt angle  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , and  $75^{\circ}$ .

The results showed increased cooling capacity and cooling effectiveness. The highest cooling capacity in this study, occurs in the slope variation  $45^{\circ}$  filler and air speed of 7.76 m/s is 13.34 kJ / s. While the highest effectiveness in this study were obtained on a slope variation  $45^{\circ}$  filler and air speed of 7.76 m/s, ie by 89.83%. The addition of lead to the air speed hot air to move more and more. The smaller the angle of inclination makes air contact time with the hot water and the longer the move is also growing.

## PRAKATA

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala nikmat hidup dan kesempatan menimba ilmu, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “analisa kinerja *cooling tower forced draft counterflow* dengan pengisi *calciboard* (ditinjau dari kecepatan udara dan kemiringan pengisi)”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik. Dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini, penulis banyak dibantu, dibimbing, dan didukung oleh berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Kedua orang tua saya, Bapak Misdin dan Ibu Sukarni, terima kasih atas dukungan moril dan materil sehingga saya dapat menyelesaikan studi S1;
2. Bapak Aris Zainul Muttaqin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Ir. Digdo Listyadi S., M.Sc. selaku dosen pembimbing anggota yang selalu memberikan ide, saran, motivasi, serta meluangkan waktunya untuk membimbing saya selama proses penelitian dan penyusunan laporan skripsi ini;
3. Bapak Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T. selaku dosen penguji I, dan Santoso Mulyadi, S.T., M.T. selaku dosen penguji II yang memberikan saran dan kritikan bersifat konstruktif untuk penyusunan skripsi ini;
4. Teknisi laboratorium konversi energy Feri Ramadhan yang telah membantu dalam penyelesaian alat dan pengambilan data;
5. Kakakku Sofiatun dan Kholifah serta seluruh keluarga besar dari Bapak dan Ibu saya yang selalu memberi dukungan kepada saya agar selalu maju;
6. Saudaraku Teknik Mesin 2012 yang selalu memotivasi saya untuk terus maju, salam Solidarity Forever;
7. Guru-guruku sejak sekolah dasar sampai dengan perguruan tinggi yang telah memberikan bekal ilmu dunia dan akhirat;

8. Seluruh staf pengajar dan administrasi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan ilmu, membimbing, dan membantu kelancaran saya selama saya duduk di bangku perkuliahan.
9. Kepada Arif Rahman Hakim, Danar Dwi Prasetya dan Agus Sobirin teman proyek alat ini dengan semangat menjadi anggota dan rekan dalam proses penelitian dan pengerjaan alat;
10. Semua pihak yang telah membantu proses penelitian dan penyusunan skripsi ini dari awal hingga akhir;

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, karena sempurna hanya milik Allah SWT. Harapan penulis adalah supaya informasi dari skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca.

Jember, 01 November 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>MOTO</b> .....	iii
<b>PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>PEMBIMBING</b> .....	v
<b>PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>RINGKASAN</b> .....	vii
<b>PRAKATA</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvii
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang Masalah</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Tujuan Penelitian</b> .....	3
<b>1.4 Manfaat Penelitian</b> .....	3
<b>1.5 Batasan Masalah</b> .....	4
<b>1.6 Hipotesis</b> .....	4
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
<b>2.1 Definisi <i>Cooling Tower</i></b> .....	5
<b>2.2 Konstruksi dan Komponen <i>Cooling Tower</i></b> .....	6
<b>2.3 Jenis-Jenis <i>Cooling Tower</i></b> .....	11
2.3.1 <i>Cooling Tower</i> Jenis <i>Natural Draft</i> .....	11

2.3.2 <i>Cooling Tower Draft</i> Mekanik .....	12
<b>2.4 Kinerja <i>Cooling Tower</i></b> .....	15
<b>2.5 Analisis <i>Cooling Tower Counterflow</i></b> .....	18
<b>2.6 <i>Calciboard</i></b> .....	21
<b>2.7 Air</b> .....	21
<b>2.8 Penelitian Terdahulu</b> .....	23
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	26
<b>3.1 Metode Penelitian</b> .....	26
<b>3.2 Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	26
<b>3.3 Alat dan Bahan</b> .....	26
3.3.1 Alat dan Instrumen penelitian.....	26
3.3.2 Bahan Penelitian .....	28
3.3.3 Spesifikasi <i>Cooling Tower</i> .....	29
<b>3.4 Prosedur Penelitian</b> .....	30
3.4.1 Persiapan Alat Pengujian .....	30
3.4.2 Pemeriksaan Alat Pengujian .....	31
3.4.3 Tahapan Pengambilan Data .....	31
<b>3.5 Rangkaian <i>Cooling Tower Forced Draft Counterflow</i></b> .....	34
<b>3.6 Variabel</b> .....	34
3.6.1 Variabel Bebas .....	34
3.6.2 Variabel Terikat .....	35
<b>3.7 Analisa Data</b> .....	35
<b>3.8 Diagram Alir</b> .....	37
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	38
<b>4.1 Data Hasil Pengujian</b> .....	38
<b>4.2 Range</b> .....	39

4.3 <i>Approach</i> .....	41
4.4 Efektivitas Pendinginan.....	43
4.5 Kapasitas Pendinginan .....	45
4.6 Debit Air Spesifik.....	47
4.7 Rasio Air dan Udara.....	48
4.8 Laju Penguapan Air .....	50
4.9 Perbandingan Aliran Massa Cair Terhadap Gas.....	51
<b>BAB 5.PENUTUP</b> .....	54
5.1 Kesimpulan .....	54
5.2 Saran .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	56
<b>LAMPIRAN</b> .....	58

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Diagram skematik sistem <i>cooling tower</i> .....	6
2.2 Konstruksi <i>cooling tower</i> .....	7
2.3 <i>Splash fill</i> .....	9
2.4 <i>film fill</i> .....	10
2.5 Profil <i>drift eliminators</i> .....	10
2.6 <i>Cooling tower natural draft</i> aliran melintang .....	12
2.7 <i>Cooling tower induced draft cross flow</i> .....	13
2.8 <i>Cooling tower induced draft counterflow</i> .....	14
2.9 <i>Cooling tower forced draft</i> .....	14
2.10 Grafik <i>Range</i> dan <i>approach</i> temperatur pada <i>cooling tower</i> .....	15
2.11 Pertukaran energi <i>cooling tower</i> berlawanan arah .....	19
2.12 Diagram entalpi-suhu udara dan air .....	20
2.13 Skema rangkaian <i>cooling tower induced draft counter flow</i> .....	24
2.14 Skema rangkaian <i>cooling tower induced draft counterflow</i> .....	25
3.1 Kipas .....	27
3.2 <i>Nozzle</i> .....	28
3.3 Susunan pengisi <i>calciboard</i> .....	30
3.4 Penempatan titik-titik pengukuran suhu.....	32
3.5 Skema Rangkaian <i>Cooling tower forced draft counter flow</i> .....	34
3.6 Diagram alir penelitian.....	37
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.....	44
4.4 Grafik temperatur kapasitas pendinginan semua variasi.....	46
4.5 Grafik debit air spesifik semua variasi.....	47

4.6 Grafik rasio air dengan udara semua variasi .....	49
4.7 Grafik laju penguapan air semua variasi .....	50
4.8 Grafik perbandingan massa cair dan Gas semua variasi .....	52





**DAFTAR TABEL**

	Halaman
2.1 Kalor jenis zat .....	22
3.1 Spesifikasi pompa air .....	27
3.2 Spesifikasi motor kipas .....	28
4.1 Hasil pengujian variasi kecepatan udara 0,01 m/s .....	38
4.2 Hasil pengujian variasi kecepatan udara 2,6 m/s .....	38
4.3 Hasil pengujian variasi kecepatan udara 7,76 m/s .....	39
4.4 Data rata-rata hasil perhitungan <i>range</i> dari semua variasi.....	39
4.5 Data rata-rata hasil perhitungan <i>approach</i> dari semua variasi.....	41
4.6 Data rata-rata hasil perhitungan efektivitas Pendinginan.....	44
4.7 Data rata-rata hasil perhitungan kapasitas Pendinginan.....	45
4.8 Data rata-rata hasil debit air spesifik dari semua variasi.....	47
4.9 Data rata-rata hasil rasio air dengan udara semua variasi .....	48
4.10 Data rata-rata hasil debit laju penguapan .....	50
4.11 Data rata-rata hasil L/G semua variasi .....	51

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>LAMPIRAN 1. Tabel data hasil pengujian .....</b>	<b>58</b>
A.1 Kemiringan Sudut Pengisi 45° dan Kecepatan Udara 0,01 m/s.....	58
A.2 Kemiringan Sudut Pengisi 45° dan Kecepatan Udara 2,6 m/s.....	58
A.3 Kemiringan Sudut Pengisi 45° dan Kecepatan Udara 7,8 m/s.....	58
A.4 Kemiringan Sudut Pengisi 60° dan Kecepatan Udara 0,01 m/s.....	59
A.5 Kemiringan Sudut Pengisi 60° dan Kecepatan Udara 2,6 m/s.....	59
A.6 Kemiringan Sudut Pengisi 60° dan Kecepatan Udara 7,8 m/s.....	59
A.7 Kemiringan Sudut Pengisi 75° dan Kecepatan Udara 0,01 m/s.....	60
A.8 Kemiringan Sudut Pengisi 75° dan Kecepatan Udara 2,6 m/s.....	60
A.9 Kemiringan Sudut Pengisi 75° dan Kecepatan Udara 7,8 m/s.....	60
<b>LAMPIRAN 2. Nilai rata-rata Q udara, Volume spesifik, Rasio Kelembaban, Entalpi.....</b>	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN 3. PERHITUNGAN.....</b>	<b>62</b>
<b>LAMPIRAN 4. Hasil semua perhitungan rata-rata .....</b>	<b>64</b>
<b>LAMPIRAN 5. Gambar pengujian .....</b>	<b>65</b>

## 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 panas berlebih (*over heating*). *Cooling tower* merupakan alat penukar kalor dengan fluida kerja menggunakan air dan udara. *Cooling tower* menggunakan penguapan dimana sebagian air diuapkan ke aliran udara yang bergerak dan kemudian dibuang ke atmosfer. 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. Hampir seluruh *cooling tower* menggunakan bahan pengisi terbuat dari plastik atau kayu untuk memfasilitasi perpindahan panas dengan memaksimalkan kontak udara dan air (Sudrajad, 2015).

Menurut Johanes (2010), dua faktor yang menentukan laju perpindahan kalor dari air panas ke udara pendingin, adalah waktu kontak dan luas permukaan antar fase (air dan udara). Dengan memberikan bahan isian pada *cooling tower*, maka ke dua faktor di atas diperbesar.

Penelitian yang dilakukan oleh Sudrajad (2015), tentang Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas *Cooling Tower Induced Draft Counterflow* Dengan Pengisi Bambu Wulung. Dihilangkan kapasitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 volt dan suhu awal 60 °C, sebesar 14,19 kJ/s. Efektivitas tertinggi terjadi pada variasi tegangan motor penggerak kipas 220 volt dengan suhu awal 40 °C, yaitu sebesar 78,11%. 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. 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<sup>0</sup>C. Penelitian Hidayat (2014) meneliti tentang Analisis Beban Kalor *Cooling Tower Induced Draft Counterflow* 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 kJ/kg.<sup>0</sup>C. Dengan demikian *cooling tower* berperan penting untuk pelepasan panas atau mendinginkan suatu mesin.

Pengembangan pendinginan fluida pada *cooling tower forced draft counterflow* dapat dilakukan dengan bahan pengisi *calciboard*. *Calciboard* adalah material bangunan yang terbuat dari campuran semen, pasir silica dan serat selulosa. Bahan-bahan tersebut diproses sedemikian rupa, kemudian dikeringkan dengan dengan memakai tekanan dan temperatur yang sangat tinggi atau proses *autoclave*. Hal inilah yang membuat material ini bersifat aman bagi kesehatan serta ramah lingkungan, stabil, tahan lama. Dengan materi penyusun tersebut membuat bahan ini tahan air dan tahan rayap. Kelebihan lainnya adalah mudah ringkas dan cepat dalam pemasangan. Sifat dari *calciboard* diantaranya tahan air atau cuaca, tahan rayap, tahan api, fleksibel karena ketebalan 3-8 mm bisa dilengkungkan, dimensi stabil karena mempunyai nilai susut muai sangat kecil, sehingga tidak retak karena perubahan suhu ekstrim. Konduktivitas termal *calciboard* hampir sama dengan konduktivitas termal yang dimiliki *cementboard* 0,58 watt/ m.K.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini akan dilakukan analisa kinerja *Cooling tower* dengan variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi untuk mempercepat pelepasan kalor.

Variasi kecepatan udara dapat dilakukan dengan cara menambah tegangan listrik pada motor kipas *cooling tower*. Adapun perumusannya :

- a. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap kapasitas pendinginan *cooling tower*?
- b. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap efektivitas pendinginan *cooling tower*?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

- a. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap kapasitas pendinginan *cooling tower*.
- b. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap efektivitas pendinginan *cooling tower*.

### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap kapasitas pendinginan *cooling tower*.
- b. Mengetahui pengaruh variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi terhadap efektivitas pendinginan *cooling tower*.
- c. Sebagai informasi untuk perusahaan ataupun dunia pendidikan mengenai pengembangan *cooling tower*.

### 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. Tekanan fluida diasumsikan konstan sepanjang aliran.
- d. Kondisi dalam sistem setelah penyalan diasumsikan *steady state*.

### 1.6 Hipotesis

Semakin tinggi kecepatan udara dengan debit air yang konstan, maka pelepasan kalor semakin tinggi karena udara yang kontak dengan air semakin banyak. Semakin kecil sudut kemiringan pengisi, panas yang diserap udara dari air semakin tinggi karena waktu kontak udara dengan air semakin lama.

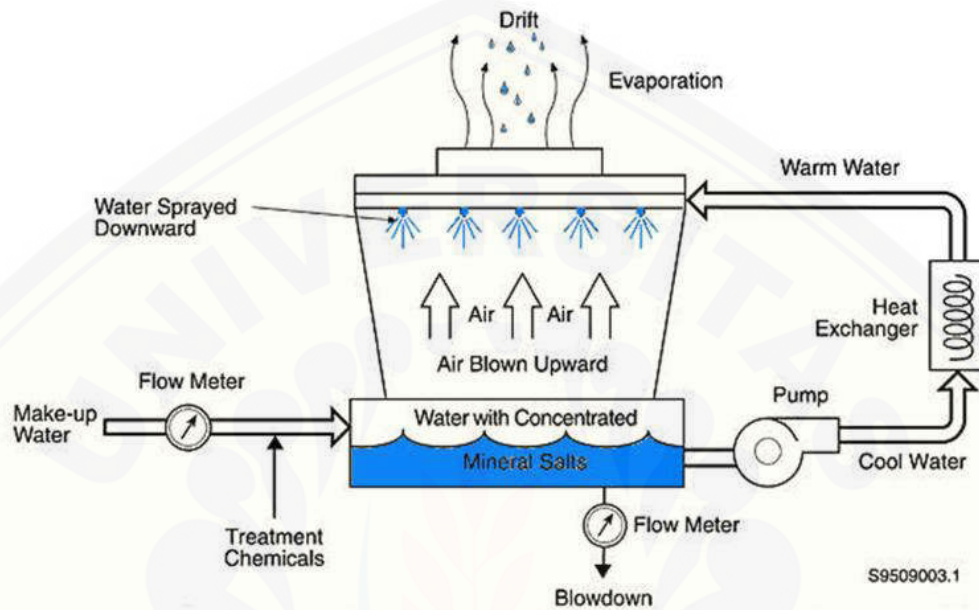
## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Definisi *Cooling Tower*

*Cooling tower* merupakan suatu peralatan yang digunakan untuk menurunkan suhu aliran air dengan cara mengekstraksi panas dari air dan mengemisikannya ke atmosfer. *Cooling tower* mampu menurunkan suhu air lebih dari peralatan-peralatan yang hanya menggunakan udara untuk membuang panas seperti radiator dalam mobil, oleh karena itu biayanya lebih efektif dan efisien energinya. Kegunaan utama dari *cooling tower* adalah untuk membuang panas yang diserap akibat sirkulasi air sistem pendingin yang digunakan pada pembangkit daya, kilang petroleum, pabrik petrokimia, pabrik pemrosesan gas alam, pabrik makanan, pabrik semi konduktor, dan fasilitas-fasilitas industri lainnya. Jika suatu pabrik tidak dilengkapi dengan *cooling tower* dan hanya menggunakan sirkulasi air pendingin sekali pakai, air pendingin yang telah digunakan akan mengalami kenaikan temperatur akan dibuang ke laut, danau atau sungai yang ditentukan. Pembuangan sejumlah air hangat tersebut dapat meningkatkan temperatur sungai atau danau tersebut sehingga dapat merusak ekosistem lingkungan. *Cooling tower* dapat digunakan untuk membuang panas ke atmosfer sebagai pengganti angin serta difusi udara yang menyebarkan panas ke area yang lebih luas.

*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* merupakan alat penukar kalor dengan fluida kerja menggunakan air dan udara. *Cooling tower* 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. *cooling tower* mampu menurunkan suhu air lebih dari peralatan-peralatan yang hanya menggunakan udara

untuk membuang panas, seperti radiator dalam mobil, biayanya lebih efektif dan efisien energinya.

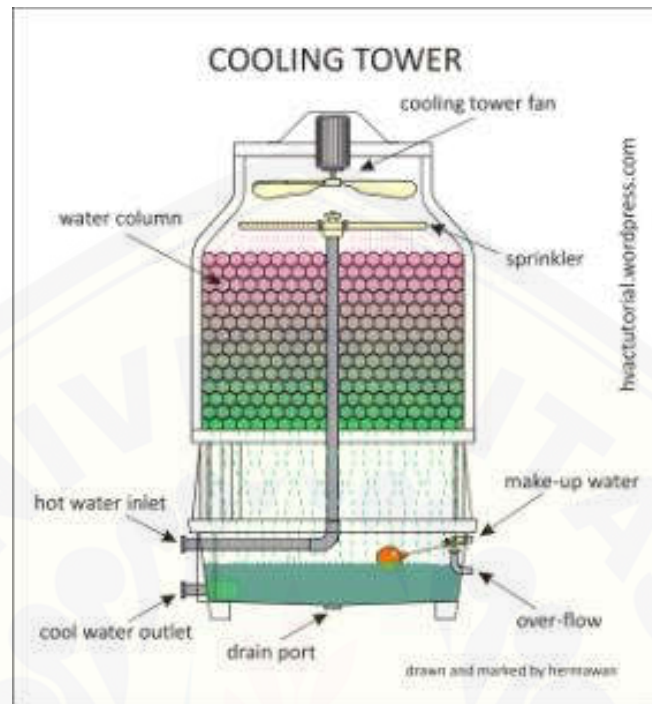


Gambar 2.1. Diagram skematik sistem *cooling tower*  
(Sumber: Laboratorium Nasional Pacific Northwest, 2001)

## 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 *cooling tower*.  
(Sumber: Yulia, 2013)

1. Kerangka pendukung menara (*tower supporter*)

*Tower supporter* berfungsi untuk mendukung *cooling tower* agar dapat berdiri kokoh dan tegak.

2. Rumah *cooling tower* (*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 *cooling tower*, 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 menyembrotkan 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*)

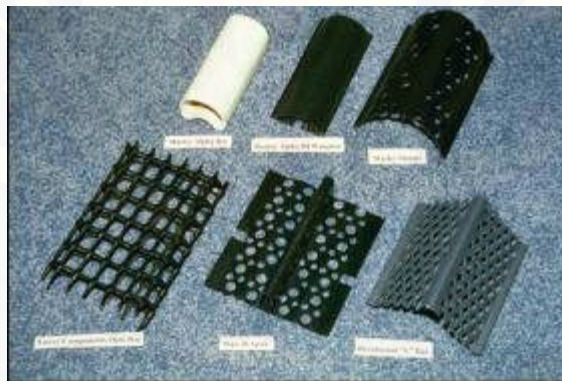
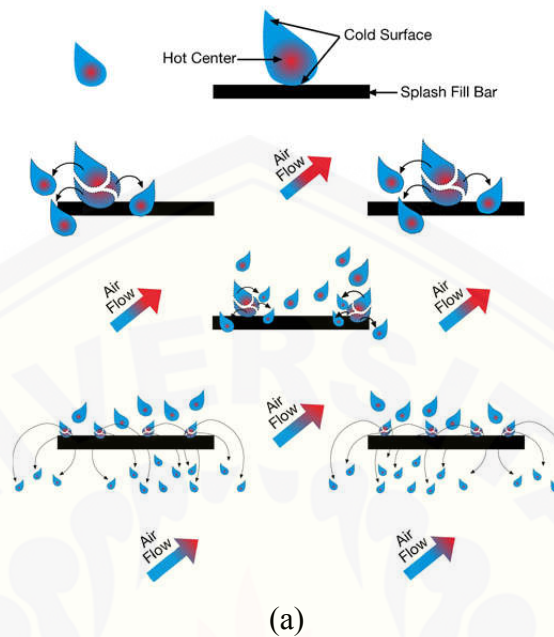
*Inlet louver* berfungsi sebagai tempat masuknya udara melalui celah-celah yang ada. Melalui *inlet louver* akan terlihat kualitas dan kuantitas air yang akan di distribusikan.

#### 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*.

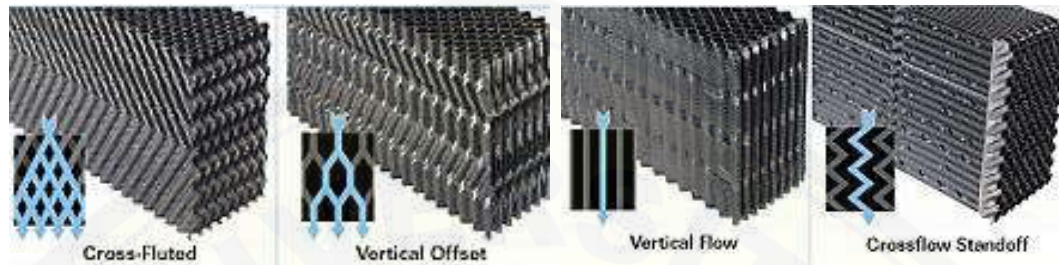


Gambar 2.3 (a) Aliran *splash fill*. (b) Profil *splash fill*  
(Sumber:(a) *Tower component inc*, 2012. (b) Fulkerson, 2012)

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: Spx cooling technologies, 2014)

#### 7. *Drift eliminators*.

Alat ini berfungsi menangkap uap air yang terbentuk selama proses pendinginan. Udara ditabrakkan pada sebuah bidang sehingga tetesan air yang terjebak dalam aliran udara terpisah dari fluida udara. Proses ini untuk meminimalisir terbuangnya air ke atmosfer. Gambar 2.5 berikut ini merupakan *Drift eliminators*.



Gambar 2.5 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*.

#### 10. Kipas.

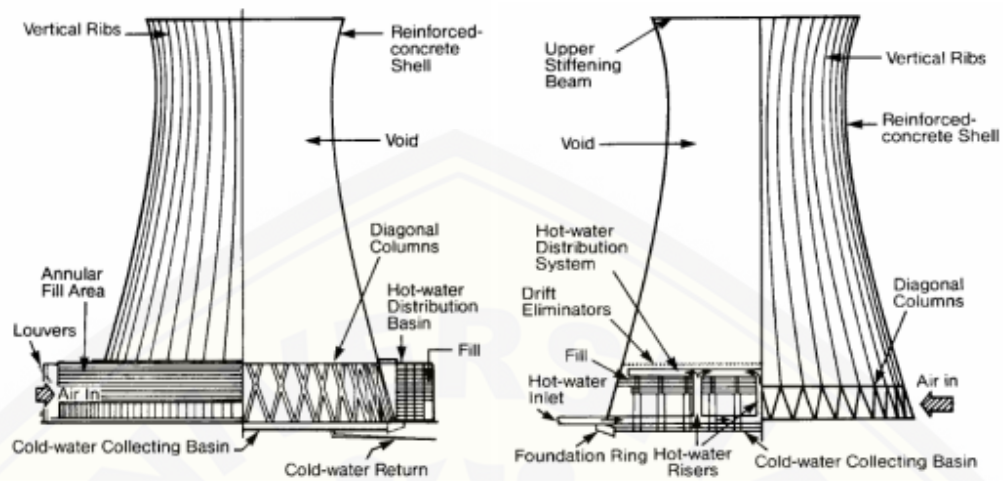
Kipas merupakan bagian terpenting dari sebuah *cooling tower* karena berfungsi untuk menarik udara dingin dan mensirkulasikan udara tersebut di dalam menara untuk mendinginkan air. Jika kipas tidak berfungsi maka kinerja *cooling tower* tidak akan optimal. Kipas digerakkan oleh motor listrik yang dikopel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

### 2.3 Jenis-Jenis *Cooling Tower*

*Cooling Tower* secara garis besar dibagi menjadi dua, yaitu jenis *natural draft* dan jenis *mechanical draft*.

#### 2.3.1 *Cooling tower* Jenis *Natural Draft*

*Cooling tower* jenis *natural draft* 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 *cooling tower* 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. *Cooling tower* ini kebanyakan hanya digunakan untuk jumlah panas yang besar sebab struktur beton yang besar cukup mahal seperti terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Cooling tower natural draft* aliran melintang  
(Sumber: Marta, 2014)

### 2.3.2 *Cooling tower Draft* Mekanik

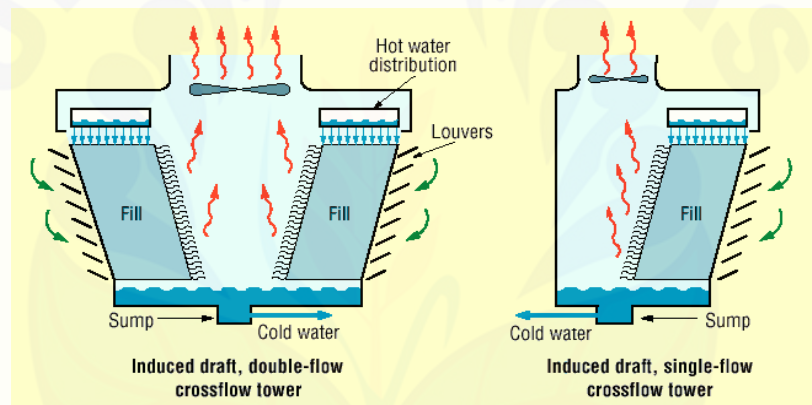
Menara *draft* mekanik memiliki *fan* yang besar untuk mendorong atau mengalirkan udara melalui air yang disirkulasi. Air yang dijatuhkan diatas permukaan bahan pengisi akan menjadikan kontak udara dan air lebih lama, hal ini membantu dalam memaksimalkan perpindahan panas diantara keduanya. Beberapa parameter yang mempengaruhi laju pendinginan menara *draft* mekanis adalah diameter *fan* dan kecepatan operasi, bahan pengisi untuk tahanan sistem dan lain-lain. Menara tersedia dalam bentuk rakitan pabrik atau didirikan dilapangan. Banyaknya *cooling tower* tergantung kapasitas yang dikehendaki. *Cooling tower* bisa rakitan dari dua atau lebih *cooling tower* individu. Ada dua jenis *cooling tower draft* mekanik yaitu jujut isap (*induced draft*) dan jujut dorong (*forced draft*).

#### 1. *Cooling tower induced draft*

Untuk *cooling tower* tipe *induced draft*, *fan* yang ada dipasang pada bagian atas dari struktur *cooling tower* sehingga udara yang mengalir ditarik keatas untuk dibuang. Tipe *induced draft* berdasarkan aliran udara masuk dibedakan lagi menjadi dua tipe yaitu :

a. *Cooling tower induced draft crossflow*

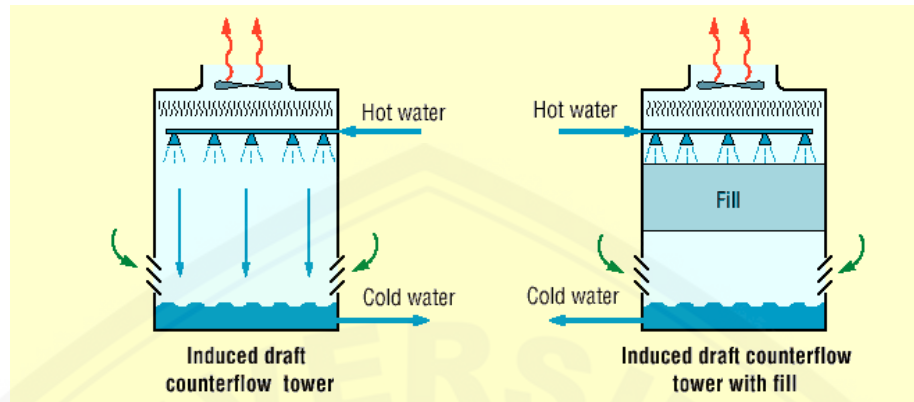
Pada tipe ini aliran udara diarahkan tegak lurus terhadap aliran air. Air masuk pada puncak dan melewati *filler*, udara masuk dari salah satu sisi (menara aliran tunggal), atau pada sisi berlawanan (menara aliran ganda) mengalirkan udara melintasi *filler* menuju saluran keluar pada puncak seperti terlihat pada Gambar 2.7. Keuntungan dari tipe ini adalah lebih sedikit dari pada resirkulasi menara *forced draft* 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 2.7 *Cooling tower induced draft cross flow*  
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

b. *Cooling tower induced draft counterflow*

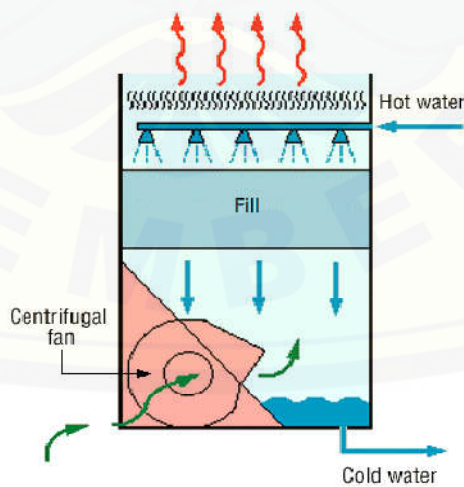
Pada tipe ini, air didinginkan dalam arah berlawanan dengan arah aliran udara di dalam *cooling tower*. Udara yang ditarik oleh *fan* mengarah ke atas sedangkan air yang didinginkan mengalir jatuh ke bawah. Keuntungan *cooling tower induced draft counterflow* sama dengan *cooling tower induced draft crossflow* 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 2.8 *Cooling tower induced draft counterflow*  
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

## 2. *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 *Cooling tower forced draft*  
(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

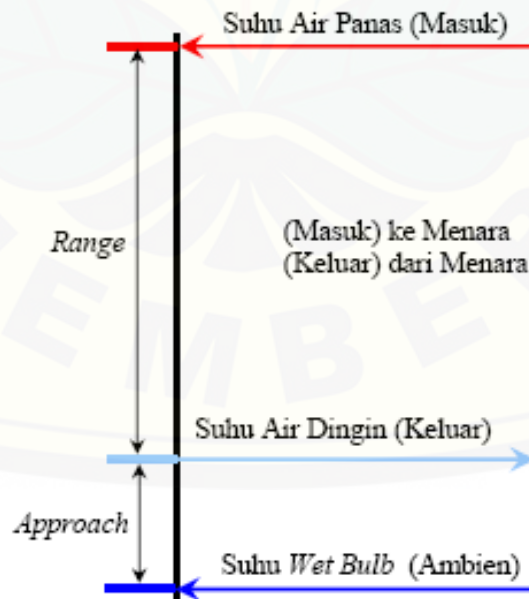


## 2.4 Kinerja *Cooling Tower*

Bagian ini menjelaskan tentang bagaimana kinerja tenaga pendinginan dapat dikaji. Kinerja *cooling tower* 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 *cooling tower*
4. Temperatur air keluar *cooling tower*
5. Temperatur udara keluar
6. Laju aliran air
7. Laju aliran udara.

Prestasi *cooling tower* biasanya dinyatakan dalam *range* dan *approach* seperti yang terlihat pada Gambar 2.10 berikut:



Gambar 2.10. Grafik *Range* dan *approach* temperatur pada *cooling tower*  
(Sumber: Pedoman Efisiensi Energi, 2006)

Parameter terukur tersebut kemudian digunakan untuk menentukan kinerja *cooling tower* dengan beberapa cara. yaitu:

a) *Range*

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

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

b) *Approach*

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

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

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 *cooling tower*.

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

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 *cooling tower* adalah setara dengan kemampuan *cooling tower* tersebut dalam membuang panas ke lingkungan. Kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

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

Sedangkan kapasitas pendinginan spesifik persatuan luas penampang *cooling tower* 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.m<sup>2</sup>)

$Q$  = kapasitas pendinginan (KJ/s)

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

$C_p$  = kalor jenis air (KJ/kg °C)

$\Delta T$  = perbedaan suhu air masuk dan suhu air keluar (°C)

$A_{tower}$  = luas penampang *cooling tower* (m<sup>2</sup>)

e) Debit air spesifik

Sesuai dengan ukuran luas penampang *cooling tower* 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 (kg/s.m<sup>2</sup>)

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

$A_{tower}$  = luas penampang *cooling tower* (m<sup>2</sup>)

f) Rasio air dengan udara

Nilai rasio air-udara adalah parameter yang sangat penting dalam pemilihan suatu *cooling tower*, 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.

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

g) Kehilangan penguapan

Merupakan jumlah air yang diuapkan untuk tugas pendinginan. Secara teoritis jumlah penguapan mencapai 1,8 m<sup>3</sup> untuk setiap 10.000.000 kKal panas yang dibuang. Rumus berikut dapat digunakan Perry (1997):

$$\text{Penguapan (m}^3\text{/jam } ^\circ\text{C)} = 0,00085 \times 1,8 \times \text{laju sirkulasi (m}^3\text{/jam)} \times (T_1 - T_2)$$

Dimana:

$T1 - T2$  = perbedaan suhu antara air masuk dan keluar ( °C )

Salah satu parameter kinerja *cooling tower* yang penting adalah laju penguapan air ke udara. Proses penguapan inilah yang menjadi prinsip dasar suatu *cooling tower* dalam mendinginkan air kondensor. Adapun rumus untuk menghitung laju penguapan air ke udara pada suatu *cooling tower* 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)

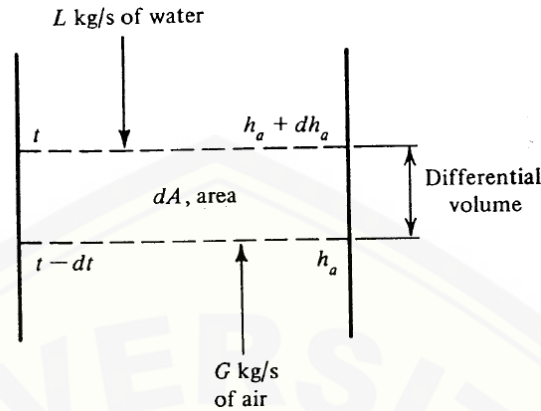
$V$  = debit aliran udara ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

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

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

### 2.5 Analisis *Cooling Tower Counterflow*

Salah satu rancang bangun *cooling tower* yaitu *cooling tower* aliran berlawanan, didalamnya udara bergerak keatas melalui semburan air yang jatuh, Gambar 2.11 menjelaskan tentang volume diferensial sebuah *cooling tower* 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 2.11 Pertukaran energi *cooling tower* 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 tetesan 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:

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

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

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

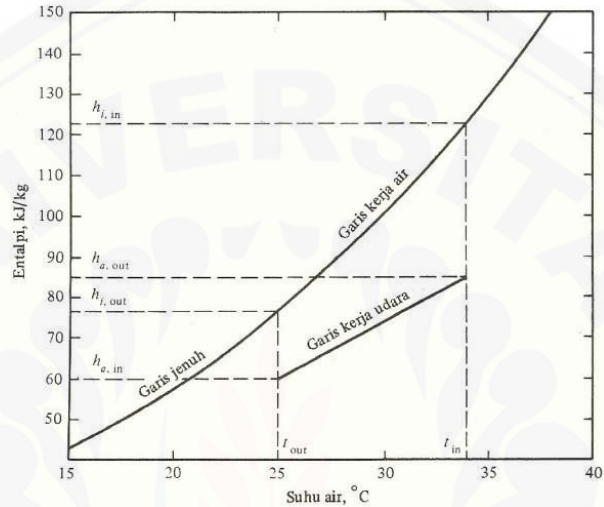
Dengan :

- $hc$  = koefisien konveksi, kW/m<sup>2</sup> .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 *cooling tower*, 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 2.12 menjelaskan tentang suhu dan entalpi udara dan air.



Gambar 2.12 Diagram entalpi-suhu udara dan air.

(Sumber: Stoecker dan Jones, 2009)

Visualisasi grafik suhu dan entalpi dapat dibuat seperti pada Gambar 2.12. 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 2.12 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.

## 2.6 Calciboard

*Calciboard* adalah material bangunan yang terbuat dari campuran semen, pasir silica dan serat selulosa. Kemudian bahan-bahan tersebut diproses sedemikian rupa, lalu dikeringkan dengan dengan memakai tekanan dan temperatur yang sangat tinggi atau proses *autoclave*. Hal inilah yang membuat material ini bersifat aman bagi kesehatan serta ramah lingkungan dan produk yang stabil dan tahan lama. Dengan materi penyusun tersebut membuat bahan ini tahan air dan tahan rayap, kemudahan lain adalah mudah ringkas dan cepat dalam pemasangan. Pada umumnya *calciboard* ini adalah papan pengganti gypsum, triplek, dan asbes. Keistimewaan *calciboard* sebagai material konstruksi antara lain:

- a. Tahan air atau cuaca
- b. Tahan rayap
- c. Tahan api
- d. Fleksibel karena ketebalan 3-8 mm bisa dilengkungkan
- e. Dimensi stabil karena mempunyai nilai susut memuai sangat kecil, sehingga tidak retak karena perubahan suhu ekstrim
- f. Tahan benturan
- g. Pemasangan mudah variasi *finishing*
- h. Variasi ketebalan 3-20 mm sehingga bisa diaplikasikan untuk plafon, partisi dinding bahkan lantai.

Konduktivitas termal *calciboard* hampir sama dengan konduktivitas termal yang dimiliki *cemenboard* 0,58 watt/ m.K.

## 2.7 Air

Air adalah zat cair yang tidak mempunyai rasa, warna dan bau pada kondisi standar, yaitu pada tekanan 100 kPa (1 bar) dan temperatur 273,15 K (0 °C), yang terdiri dari hidrogen dan oksigen dengan rumus kimiawi H<sub>2</sub>O. 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  $4,2 \times 10^3 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ . Berikut ini adalah Tabel 2.3 kalor jenis beberapa zat.

Tabel 2.1 kalor jenis zat.

Zat	Kalor jenis ( c )	
	Kal/g <sup>o</sup> C	J/Kg K
<b>Air</b>	1,00	4200
<b>Air Laut</b>	0,93	3900
<b>Alkohol</b>	0,55	230
<b>Minyak Tanah</b>	0,52	220
<b>Raksa</b>	0,033	140
<b>Es</b>	0,595	2500
<b>Alumunium</b>	0,214	900
<b>Kaca</b>	0,16	670
<b>Besi</b>	0,11	460
<b>Tembaga</b>	0,093	390
<b>Kuningan</b>	0,90	380
<b>Perak</b>	0,056	230
<b>Emas</b>	0,031	130
<b>Timbal</b>	0,031	130

(Sumber: Arif kristanta, 2012)

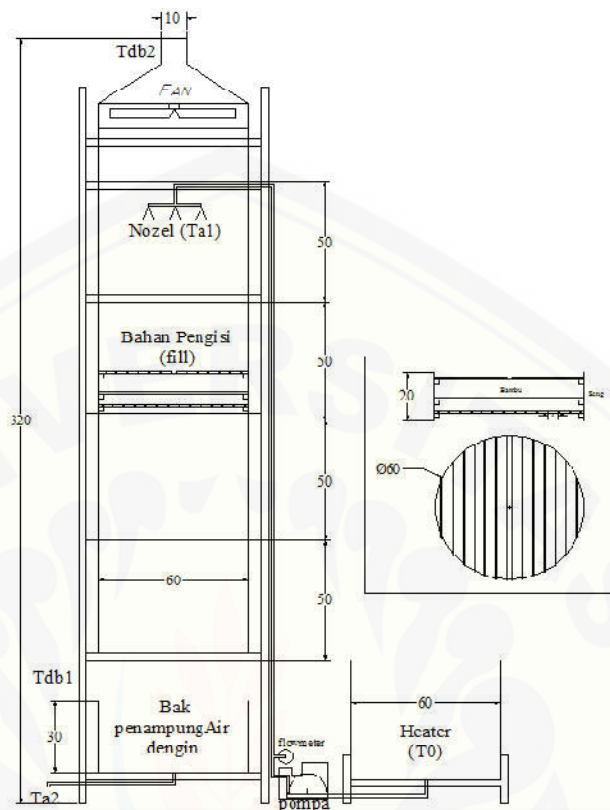
Sifat air yang penting, dapat digolongkan ke dalam sifat fisis, kimiawi, dan biologis. Sifat fisis dari air yaitu didapatkan dalam ketiga wujudnya, yakni, bentuk padat sebagai es, bentuk cair sebagai air, dan bentuk gas sebagai uap air. Bentuk



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

## 2.8 Penelitian Terdahulu

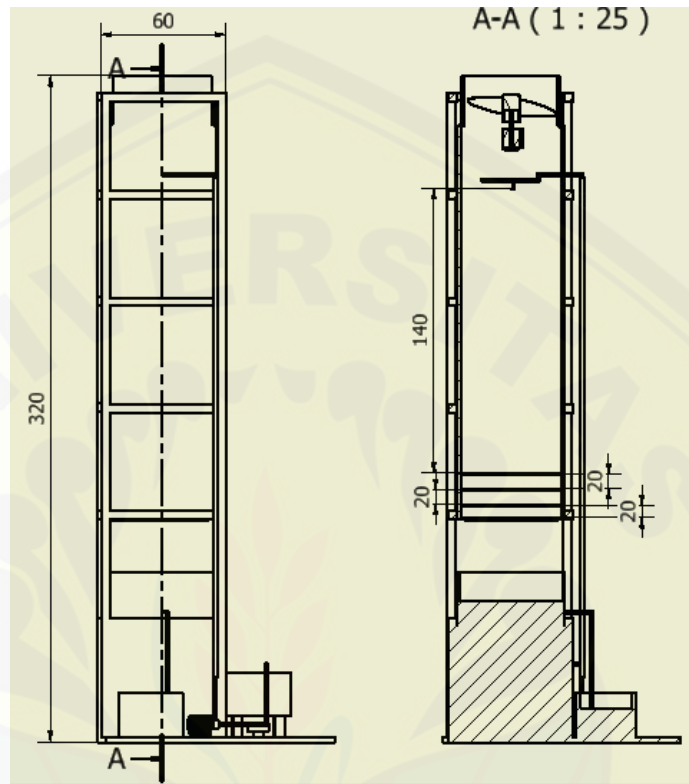
Penelitian Hidayat (2014) meneliti tentang Analisis Beban Kalor *Cooling tower Induced Draft Counterflow* Dengan Bahan Pengisi Bambu Wulung. Pelaksanaan percobaan dilakukan pada *cooling tower* dengan dimensi tinggi keseluruhan 320 cm, luas 70 cm<sup>2</sup>, dan penampang tabung dalam berdiameter 60 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, ta1 70 °C, sebesar 41,54 kJ/s, dibandingkan dengan tanpa menggunakan *fill* dengan variasi yang sama beban kalor sebesar 31,42 kJ/s. Perbandingan massa liquid/gas (L/G) tertinggi terjadi pada variasi, ta1 70 °C, menggunakan *fill* sebesar 1,45 kJ/kg. °C, dan (L/G) terendah 0,5 kJ/kg. °C, terjadi pada variasi ta1 40 °C. Gambar 2.13 merupakan skema Rangkaian *Cooling tower induced draft counterflow* yang di buat oleh Hidayat (2014).



Gambar 2.13 Skema rangkaian *cooling tower induced draft counter flow* (Sumber: Hidayat, 2014)

Penelitian Sudrajad (2015), tentang Analisis Variasi Tegangan Listrik Kipas *Cooling Tower Induced Draft Counterflow* Dengan Pengisi Bambu Wulung. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kinerja maksimal dari *cooling tower* dengan variasi suhu awal  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$ , dan tegangan listrik pada motor penggerak kipas 0 volt, 110 volt, 220 volt. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi suhu awal dan tegangan listrik pada motor penggerak kipas mengakibatkan laju pelepasan kalor semakin meningkat, laju pelepasan kalor tertinggi pada variasi dengan suhu awal  $60^{\circ}\text{C}$ , tegangan listrik pada motor penggerak kipas 220 volt sebesar 14,19 kJ/s. Efektivitas pendinginan tertinggi terjadi pada variasi dengan suhu awal  $40^{\circ}\text{C}$  tegangan listrik pada motor penggerak kipas 220 volt sebesar 78,11 %. Laju penguapan air terbesar terjadi pada variasi tegangan listrik motor penggerak kipas 220 volt dan suhu awal  $60^{\circ}\text{C}$  yaitu dengan nilai penguapan sebesar 1,61 liter/menit.

Gambar 2.14 merupakan skema rangkaian *Cooling tower induced draft counterflow* yang dibuat oleh Sudrajad (2015).



Gambar 2.14 Skema rangkaian *cooling tower induced draft counterflow* (Sumber: Sudrajad, 2015)

## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Yaitu dengan menggunakan variasi kecepatan udara dan kemiringan pengisi dari *cooling tower*. Air ditempatkan dalam suatu wadah dan 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.

### 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan rencana kerja yang telah disusun. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pada bulan April 2016 sampai dengan Juni 2016.

### 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 forced draft counterflow* dengan diameter 60 cm
- b. *Thermocouple*
- c. *Thermoreader*
- d. *Stopwatch*
- e. *Flowmeter*
- f. *Anemometer*
- g. *Stavolt*
- h. Pompa air, dengan spesifikasi pompa dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 spesifikasi pompa air.

Spesifikasi komponen	
<b>Merk</b>	Sanyo tipe, PWH137A
<b>Daya pompa</b>	125 Watt
<b>Daya hisap</b>	9 meter
<b>Daya dorong</b>	9 meter
<b>Total head</b>	18 meter
<b>Kapasitas</b>	30 liter/ menit(max)

i. Kipas



Gambar 3.1 Kipas

Tabel 3.2 spesifikasi motor kipas.

Spesifikasi komponen	
<b>Merk</b>	Sanyo tipe, PW H137A
<b>Daya motor</b>	125 Watt
<b>kipas</b>	Kipas kondensor AC

- j. Pipa
- k. Kompor LPG
- l. Panci Bak penampungan
- m. *Nozzle*

Gambar 3.2 *Nozzle*

### 3.3.2 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

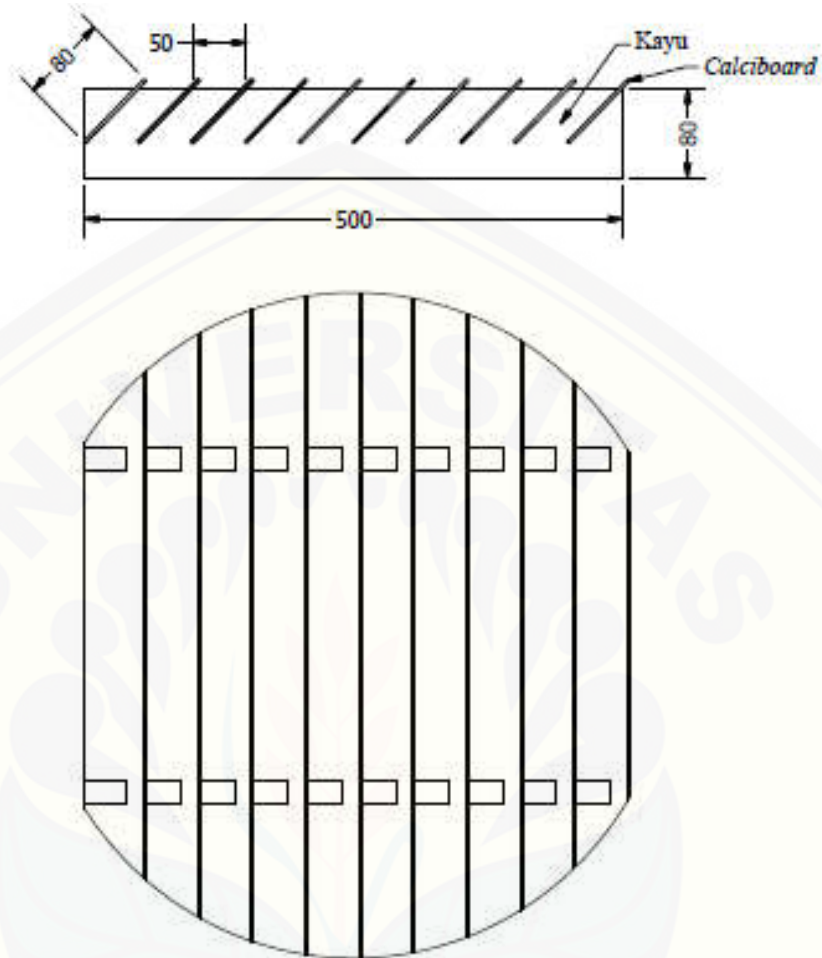
- a. *Calciboard* sebagai bahan pengisi *cooling tower*,
- b. Air yang dipanaskan dalam wadah sebagai fluida kerja.

- c. Tegangan listrik yang divariasikan untuk mengatur putaran motor listrik pada kipas.

### 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 lebar 0.7 m
2. Diameter *cooling tower* 60 cm
3. Bak penampung menggunakan drum oli berdiameter 60 cm dan tinggi 30 cm.
4. Bahan pengisi menggunakan *calciboard* yang dipotong memanjang dengan lebar 8 cm, panjang *calciboard* menyesuaikan dengan diameter dari *casingnya* yang disusun menyerupai susunan *splash fill*. Sedangkan untuk jarak antar lembaran pengisi adalah 5 cm, seperti Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Susunan pengisi *Calciboard*

### 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 *calciboard* dan pemanas air berupa kompor LPG.



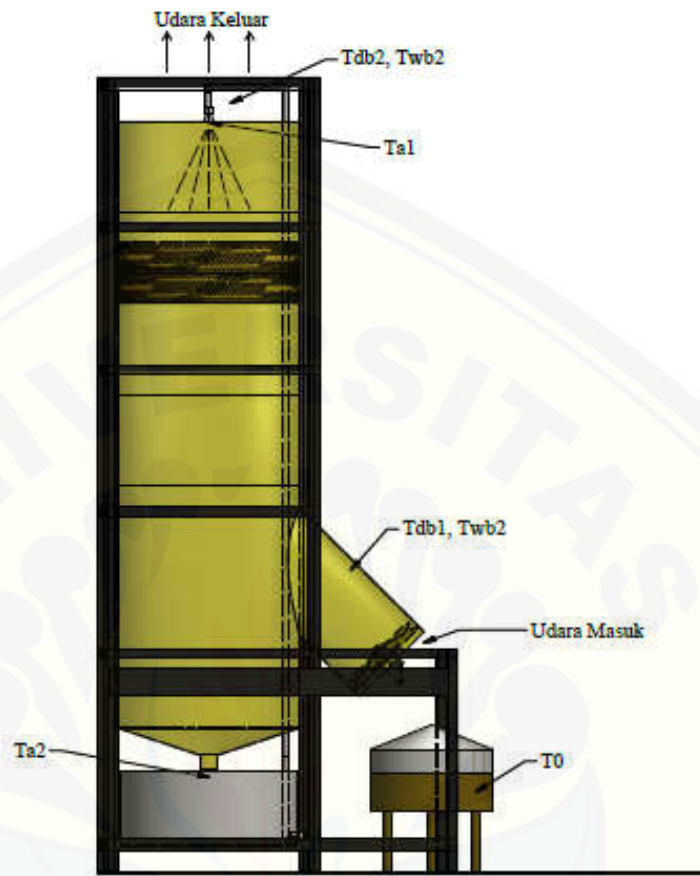
### 3.4.2 Pemeriksaan alat pengujian

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 *calciboard*, dan kompor LPG dengan benar yaitu dengan menaruh bahan pengisi *calciboard* di bawah *nozzle*. Pemasangan alat ukur suhu (*thermocople*) pada titik-titik yang telah ditentukan menggunakan terminal port pada 7 titik yang diamati, Yaitu pada  $T_0$ ,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{db1}$ ,  $T_{bd2}$ ,  $T_{wb1}$ ,  $T_{wb2}$ . Seperti terlihat pada gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4 Penempatan titik-titik pengukuran suhu

Keterangan:

- $T_0$  : 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*  
 $T_{db2}$  : 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 wadah menggunakan kompor LPG dengan suhu  $50^{\circ}\text{C}$ .
3. Hubungkan pompa *cooling tower* dengan tegangan listrik 220 Volt.

4. Pemasangan pengisi dengan variasi kemiringan  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , dan  $75^{\circ}$ .
5. Atur kecepatan udara dengan variasi 0,01 m/s, 2,6 m/s, dan 7,76 m/s.
6. Selanjutnya menjalankan alat uji sampai sistem dan aliran air bersirkulasi dengan baik pada *cooling tower*.
7. 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.
8. Pengumpulan data.

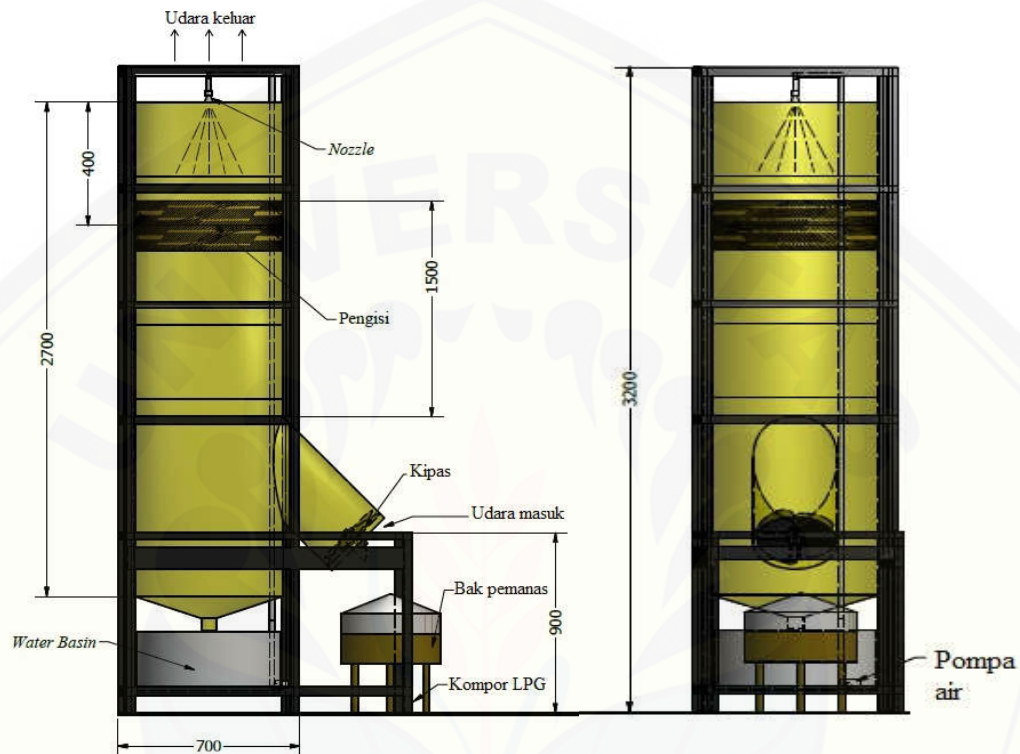
Tabel 3.3 Pengambilan data

Kecepatan Udara (m/s)	Sudut Kemiringan ( $^{\circ}$ )	Data yang diambil							
		$T_0$	$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{db1}$	$T_{wb1}$	$T_{db2}$	$T_{wb2}$	$Q_a(m^3/s)$
0,01	45								
	60								
	75								
2,6	45								
	60								
	75								
7,76	45								
	60								
	75								

9. Penghitungan data.

### 3.5 Rangkaian *Cooling Tower Forced Draft Counterflow*.

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



Gambar 3.5 Skema Rangkaian *Cooling tower forced 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 0,01 m/s, 2,6 m/s, dan 7,76 m/s, dan kemiringan bahan pengisi sebesar  $45^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ , dan  $75^{\circ}$ .

### 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  $T_0$ ,  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{db1}$ ,  $T_{db2}$ ,  $T_{wb1}$ , dan  $T_{wb2}$ .

### 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)

$C_p$  = kalor jenis air (KJ/kg  $^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta T$  = perbedaan suhu air masuk dan suhu air keluar ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### e) Debit air spesifik

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

Dimana:

$\dot{m}_{sp}$  = debit air spesifik (kg/s.m<sup>2</sup>)

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

$A_{tower}$  = luas penampang *cooling tower* (m<sup>2</sup>)

f) Rasio air dengan udara

$$\text{Rasio air - udara} = \frac{\text{debitairspesifik}(\text{kg/s.m}^2)}{\text{debitudaraspesifik}(\text{kg/s.m}^2)}$$

g) Kehilangan penguapan

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

Dimana:

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

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

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

$v$  = 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:

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

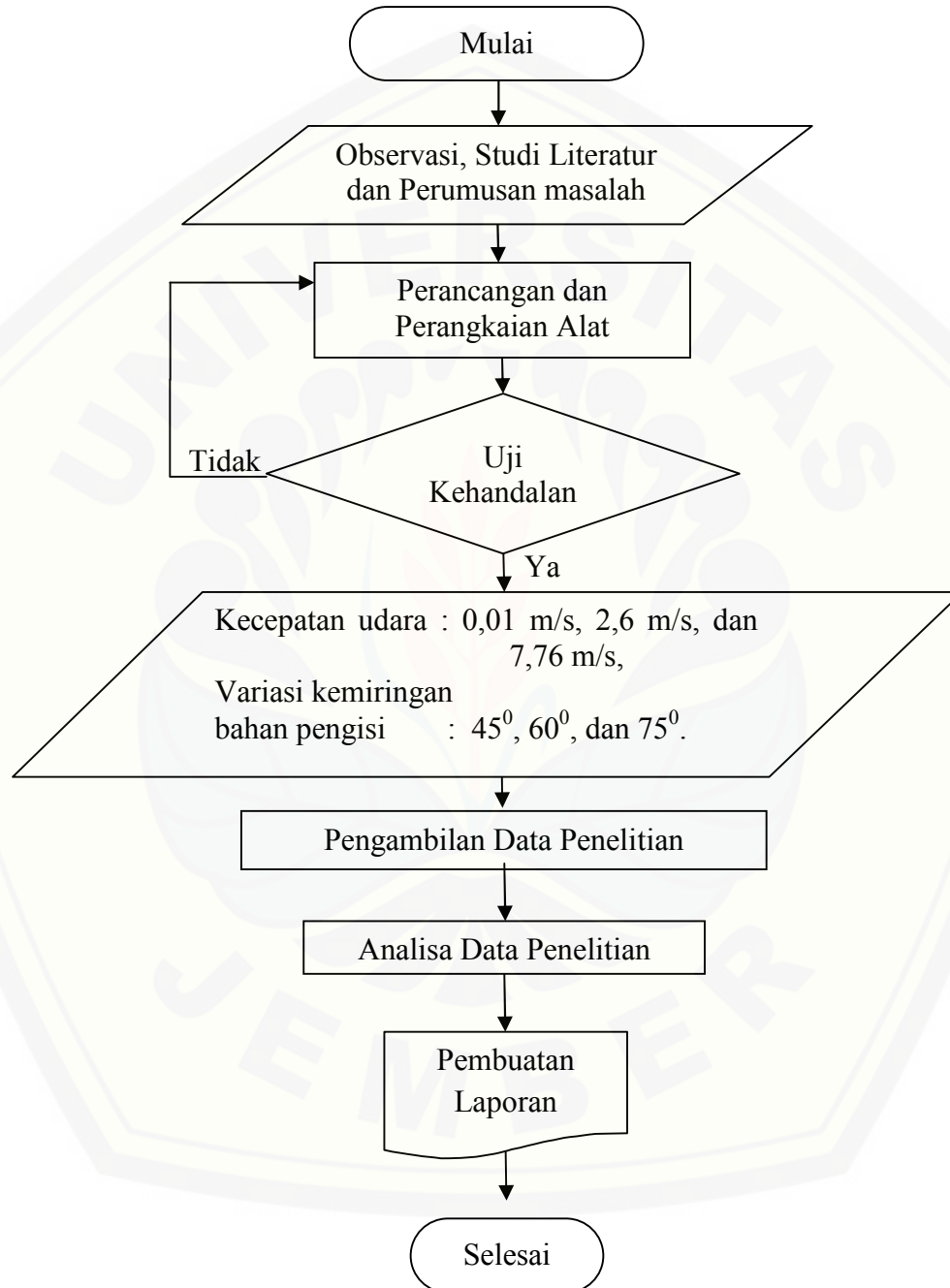
$h_2$  = Entalpi uap campuran udara-air pada suhu *wet-bulb* keluar (satunya sama dengan diatas)

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

$\Delta T$  = *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 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

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

- a. Penambahan kecepatan udara mengakibatkan panas yang berpindah ke udara semakin banyak. Semakin kecil sudut kemiringan membuat waktu kontak udara dengan air semakin lama dan panas yang berpindah juga semakin banyak. Penambahan kecepatan udara dan semakin kecil sudut kemiringan pengisi menyebabkan pendinginan semakin maksimal dan kapasitas pendinginan meningkat. Kapasitas pendinginan tertinggi pada penelitian ini, terjadi pada variasi kemiringan pengisi  $45^{\circ}$  dan kecepatan udara 7,76 m/s yaitu 13,34 kJ/s. Kapasitas pendinginan juga dipengaruhi oleh *range* dan debit air masuk *cooling tower*.
- b. Efektivitas pendinginan mengalami peningkatan dengan penambahan kecepatan udara. Namun mengalami penurunan pada variasi kemiringan tertinggi pada penelitian ini. Efektivitas tertinggi pada penelitian ini diperoleh pada variasi kemiringan pengisi  $45^{\circ}$  dan kecepatan udara 7,76 m/s, yaitu sebesar 89,83%. Efektivitas terendah yaitu 25,66% pada kemiringan pengisi  $75^{\circ}$  dan kecepatan udara 0,01 m/s.

### 5.2 Saran

Penelitian mengenai analisis kinerja *cooling tower forced draft counterflow* berbahan pengisi *calciboard* telah selesai dilaksanakan, maka disarankan beberapa hal berikut :

- a. Kajian ini masih terbatas pada analisa pengaruh kecepatan udara dan kemiringan pengisi berbahan *calciboard*. 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 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 laminer, 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 *calciboard* sebagai bahan pengisi.

**DAFTAR PUSTAKA****BUKU**

- EL-Wakil, M.M., dan Jasjfi, E, 1992. *Instalasi Pembangkit Daya. Power Plant Technology*. Jakarta: Erlangga.
- Perry. 1997. *Perry's Chemical Engineers Handbook*. 7 ed. Mc. Graw Hill Book Company, Inc. New York.
- Stoecker, W. F., dan Jones, J. W. 2009. *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*. Terjemahan Oleh Supratman Hara. Jakarta: Erlangga.

**JURNAL**

- 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. 1(1): 1-5.
- Johanes, S. 2011. Karakteristik Menara Pendingin Dengan Bahan Isian Tali Ijuk. Yogyakarta: Jurnal Jurusan Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada. 4(1): 1-11.
- Mulyono. 2010. Analisa Beban Kalor Menara Pendingin Basah Induced-Draft Aliran Lawan Arah. Semarang: Jurnal Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang. 7(1): 145-151.
- Sudrajat, R. M. M. 2015. Analisa Variasi Tegangan Kipas Cooling Tower Induced Draft Counterflow dengan Pengisi Bambu Wulung. Jember: Jurnal Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember. 1(1): 1-4.
- Wibisono, Y. 2005. Perbandingan Unjuk Kerja Atas Bahan Pengisi Pada Menara Pendingin Tipe Induced Counter Flow. Jurnal teknologi pertanian. Unibraw. 6(3): 152-162.

**INTERNET**

Beniz Endüstri, 2015, *Product LT156*. <http://www.benizparts.com/Details/en/1856> [17 Maret 2016]

Elfi Yulia 2013. *Cooling tower*. <https://31fiyulia.files.wordpress.com/2013/11/cooling-tower1.jpg> [ 25 Maret 2016]

Fulkerson & Associates, Inc.2012. *SplashFill*. [http://www.bofbiz.com/Cooling%20Tower%20Improvements/SplashFill\\_web.jpg](http://www.bofbiz.com/Cooling%20Tower%20Improvements/SplashFill_web.jpg) [ 25 Maret 2016]

Kristanta arif. 2012. *kalor*. <https://arifkristanta.files.wordpress.com/2012/10/kalor-jenis.png> [17 Maret 2016]

Pacific Northwest National Laboratory. 2001. *Photo Library*. [www.cce.iastate.edu/courses/ce525/Cooling%20Towers.doc](http://www.cce.iastate.edu/courses/ce525/Cooling%20Towers.doc) [25 Maret 2016]

Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia. 2006. *Peralatan Energi Listrik Menara Pendingin*. – [www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org) [25 Maret 2016]

SPX Cooling Technologies. 2014. *Counterflow Film Fill*. <http://spxcooling.com/images/DF254fill-480.jpg> [17 Maret 2016]

Tower Components, Inc. 2012. *Splash fills*. <http://www.towercomponentsinc.com/images/new/splash-fill-po.jpg> [ 25 Maret 2016]

**LAMPIRAN 1. Tabel data hasil pengujian****A.1 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 45° dan KECEPATAN UDARA 0,01 m/s**

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	50,40	40,30	33,20	28,20	34,10	32,40	0,00014
40	50,00	50,80	41,70	30,30	28,20	35,00	31,00	0,00014
60	50,00	51,70	42,60	29,50	27,90	35,10	31,90	0,00014
80	50,00	50,50	42,60	29,50	27,80	35,90	32,40	0,00014
100	50,00	51,10	42,30	29,80	23,90	35,90	32,60	0,00014
120	50,00	50,90	43,50	29,30	27,80	37,10	34,70	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>50,90</b>	<b>42,17</b>	<b>30,27</b>	<b>27,30</b>	<b>35,52</b>	<b>32,50</b>	<b>0,00014</b>

**A.2 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 45° dan KECEPATAN UDARA 2,6 m/s**

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	51,20	34,80	29,90	27,40	33,70	33,10	0,00014
40	50,00	50,80	35,90	30,30	27,40	33,70	33,00	0,00014
60	50,00	51,20	35,80	30,60	27,50	33,90	33,00	0,00014
80	50,00	50,60	36,40	31,00	27,40	33,90	32,40	0,00014
100	50,00	51,50	35,70	29,80	27,40	35,90	32,40	0,00014
120	50,00	50,30	35,10	32,10	27,40	33,80	32,50	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>50,93</b>	<b>35,62</b>	<b>30,62</b>	<b>27,42</b>	<b>34,15</b>	<b>32,73</b>	<b>0,00014</b>

**A.3 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 45° dan KECEPATAN UDARA 7,8 m/s**

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	52,10	30,70	31,40	27,60	32,60	32,60	0,00014
40	50,00	52,60	29,50	32,20	27,20	32,80	32,70	0,00014
60	50,00	52,40	29,40	32,70	27,10	33,00	32,80	0,00014
80	50,00	52,60	30,10	33,10	27,10	32,90	32,80	0,00014
100	50,00	52,50	29,60	33,20	27,10	32,80	32,80	0,00014
120	50,00	52,40	29,20	33,30	27,00	32,80	32,60	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>52,43</b>	<b>29,75</b>	<b>32,65</b>	<b>27,18</b>	<b>32,82</b>	<b>32,72</b>	<b>0,00014</b>

## A.4 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 60° dan KECEPATAN UDARA 0,01 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	52,2	43,8	31,8	28,2	34,5	32,8	0,00014
40	50,00	52,1	44,2	31,2	28,3	33,7	33,2	0,00014
60	50,00	52,3	44,3	32,6	27,6	33,3	33,1	0,00014
80	50,00	52,3	43,7	32,2	27,7	34,5	32,9	0,00014
100	50,00	51,9	43,7	31,9	27,7	33,4	32,8	0,00014
120	50,00	51,8	44,1	32,8	27,8	34,9	32,8	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>52,10</b>	<b>43,97</b>	<b>32,08</b>	<b>27,88</b>	<b>34,05</b>	<b>32,93</b>	<b>0,00014</b>

## A.5 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 60° dan KECEPATAN UDARA 2,6 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	50,90	36,20	29,90	27,90	32,60	32,40	0,00014
40	50,00	51,10	36,30	30,10	28,30	32,60	32,30	0,00014
60	50,00	51,50	37,40	30,70	28,70	32,50	32,30	0,00014
80	50,00	51,40	38,10	30,50	28,50	32,80	32,30	0,00014
100	50,00	51,90	38,10	29,80	27,90	32,90	32,40	0,00014
120	50,00	52,00	38,30	31,20	27,70	32,90	32,10	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>51,47</b>	<b>37,40</b>	<b>30,37</b>	<b>28,17</b>	<b>32,72</b>	<b>32,30</b>	<b>0,00014</b>

## A.6 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 60° dan KECEPATAN UDARA 7,8 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	52,20	33,20	32,50	28,00	33,30	32,50	0,00014
40	50,00	52,30	35,50	32,20	28,10	33,50	33,50	0,00014
60	50,00	52,10	35,30	32,70	28,30	33,70	33,70	0,00014
80	50,00	51,70	35,30	32,60	27,90	33,90	33,90	0,00014
100	50,00	51,70	34,10	32,60	27,90	33,80	33,80	0,00014
120	50,00	50,30	34,30	32,80	28,00	33,80	33,80	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>51,72</b>	<b>34,62</b>	<b>32,57</b>	<b>28,03</b>	<b>33,67</b>	<b>33,53</b>	<b>0,00014</b>

## A.7 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 75° dan KECEPATAN UDARA 0,01 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	50,9	45,2	30,3	28,2	34,2	33,1	0,00014
40	50,00	50,9	45,3	30,6	28,3	34,2	32,7	0,00014
60	50,00	51,1	45,3	30,6	28,3	33,8	32,9	0,00014
80	50,00	51,1	45,2	30,5	28,2	33,6	32,9	0,00014
100	50,00	51,1	45,2	30,6	28,2	33,5	33,1	0,00014
120	50,00	51,2	44,9	30,5	27,9	33,2	32,2	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>51,05</b>	<b>45,18</b>	<b>30,52</b>	<b>28,18</b>	<b>33,75</b>	<b>32,82</b>	<b>0,00014</b>

## A.8 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 75° dan KECEPATAN UDARA 2,6 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	51,20	39,60	30,10	28,50	33,70	32,50	0,00014
40	50,00	51,20	39,60	30,40	28,40	33,90	32,40	0,00014
60	50,00	51,30	39,30	30,40	28,50	33,80	32,50	0,00014
80	50,00	51,40	39,20	30,40	28,50	32,80	32,50	0,00014
100	50,00	51,40	38,90	30,50	28,60	32,60	32,10	0,00014
120	50,00	51,50	38,80	30,40	28,70	32,50	32,10	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>51,33</b>	<b>39,23</b>	<b>30,37</b>	<b>28,53</b>	<b>33,22</b>	<b>32,35</b>	<b>0,00014</b>

## A.9 KEMIRINGAN SUDUT PENGISI 75° dan KECEPATAN UDARA 7,8 m/s

waktu (s)	T <sub>0</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>db1</sub>	T <sub>wb1</sub>	T <sub>db2</sub>	T <sub>wb2</sub>	Q <sub>a</sub> (m <sup>3</sup> /s)
20	50,00	51,30	35,9	31,5	29,20	34,00	32,20	0,00014
40	50,00	51,30	35,8	31,5	29,30	33,80	33,10	0,00014
60	50,00	51,40	36,1	31,6	28,40	34,50	32,40	0,00014
80	50,00	51,40	35,9	31,7	28,80	33,50	31,90	0,00014
100	50,00	51,30	36,2	32,1	29,80	34,30	32,10	0,00014
120	50,00	51,20	36,3	32	28,30	34,30	32,40	0,00014
<b>x</b>	<b>50,00</b>	<b>51,32</b>	<b>36,03</b>	<b>31,73</b>	<b>28,97</b>	<b>34,07</b>	<b>32,35</b>	<b>0,00014</b>

Keterangan:

- $T_0$  : 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*  
 $T_{db2}$  : Suhu bola kering keluar *Cooling Tower*  
 $T_{wb1}$  : Suhu bola basah masuk *Cooling Tower*  
 $T_{wb2}$  : Suhu bola basah keluar *Cooling Tower*  
 $Q_a$  : Debit Air  
 $X$  : Rata-rata

**LAMPIRAN 2. Nilai rata-rata Q udara, Volume spesifik, Rasio Kelembaban, Entalpi**

Kecepatan Udara (m/s)	Sudut Kemiringan (°)	Debit Udara $Q_u$	Volume Spesifik $V_1$	Rasio kelembaban		Entalpi	
				WH1	WH2	h1	h2
0,01	45	0,001	0,902	0,022	0,031	87,09	114,48
	60	0,001	0,904	0,023	0,033	89,84	117,20
	75	0,001	0,904	0,024	0,032	91,32	116,51
2,6	45	0,189	0,903	0,022	0,032	87,64	115,94
	60	0,189	0,904	0,024	0,031	91,28	113,45
	75	0,189	0,905	0,024	0,031	93,06	113,73
7,8	45	0,566	0,907	0,021	0,032	86,41	115,96
	60	0,566	0,909	0,023	0,034	90,48	120,89
	75	0,566	0,910	0,025	0,031	95,21	113,70

Keterangan:

- $Q_u$  : Debit udara  
 $V_1$  : 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:

- Sudut kemiringan : 45°
- Kecepatan udara : 0,01 m/s
- Diameter : 60 cm
- Densitas air ( $\rho$ ) : 0,99285 kg/l
- Kalor jenis air ( $C_p$ ) : 4200 J/kg. °C

Mencari nilai:

- a). *Range* = temperatur air masuk – temperatur air keluar  
 =  $T_{a1} - T_{a2}$   
 =  $50,90\text{ }^{\circ}\text{C} - 42,17\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 =  $8,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- b). *Approach* = temperatur air keluar – suhu bola basah  
 =  $T_{a2} - T_{wb1}$   
 =  $42,17\text{ }^{\circ}\text{C} - 27,30\text{ }^{\circ}\text{C}$   
 =  $14,87\text{ }^{\circ}\text{C}$
- c). Efektifitas pendinginan (%) =  $100 \times (\textit{Range}) / (T_{a1} - T_{wb1})$   
 =  $100 (8,73\text{ }^{\circ}\text{C}) / (50,90\text{ }^{\circ}\text{C} - 27,30\text{ }^{\circ}\text{C})$   
 = 37,01 %.



d). Kapasitas pendinginan (KJ/s)

$$\begin{aligned}
 &= \dot{m} \times C_p \times \Delta T \\
 &= (0,00014 \times 1000) \text{ kg/s} \times 4,2 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times 8,73 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 &= 5,15 \text{ KJ/s.}
 \end{aligned}$$

e). Debit air spesifik  $\dot{m}_{sp}$  (kg/s.m<sup>2</sup>).

$$\begin{aligned}
 &= \dot{m} : A \text{ tower} \\
 &= 0,14 / (3,14 \times 0,3 \times 0,3) \\
 &= 0,495 \text{ kg/s.m}^2
 \end{aligned}$$

f). Rasio A/U =  $\dot{m}_{sp} : \dot{m}_u$

$$\begin{aligned}
 &= 0,495 : 0,011 \\
 &= 45,75
 \end{aligned}$$

g). Kehilangan Penguapan (L/min)

$$\begin{aligned}
 &= (\omega_{H2} - \omega_{H1}) \times \frac{V}{\rho \cdot v} \times 60 \\
 &= (0,0307 - 0,0222) \times (0,001 / (0,99285 \times 0,9016)) \times 60 \\
 &= 0,0003 \text{ l/min.}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 &= (h_2 - h_1) / (4,19 \times \text{range}) \\
 &= (114,4772 - 87,0922) / (4,19 \times 8,73 \text{ } ^\circ\text{C.}) \\
 &= 0,67 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C.}
 \end{aligned}$$

## LAMPIRAN 4. Hasil Semua Perhitungan Rata-rata

Kecepatan udara (m/s)	sudut kemiringan (°)	T0	$\Delta T$	A	EP	Q
		(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(KJ/s)
0,01	45	50	8,73	14,87	37,01	5,14
	60	50	8,13	16,08	33,59	4,78
	75	50	5,87	17,00	25,66	3,45
2,6	45	50	15,32	8,20	65,13	9,01
	60	50	14,07	9,23	60,37	8,27
	75	50	12,10	10,70	53,07	7,11
7,76	45	50	22,68	2,57	89,83	13,34
	60	50	17,10	6,58	72,20	10,05
	75	50	15,28	7,07	68,38	8,99

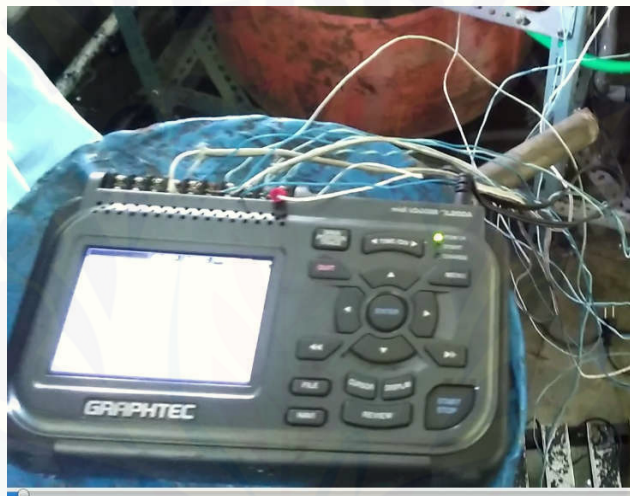
Kecepatan udara (m/s)	sudut kemiringan (°)	$\dot{m}_{sp}$	$\dot{m}_u$	R	LPA	L/G
		kg/s.m <sup>2</sup>	kg/s.m <sup>2</sup>	A/U	L/menit	KJ/Kg °C
0,01	45	0,495	0,011	45,75	0,0003	0,6732
	60	0,495	0,011	45,75	0,0004	0,7593
	75	0,495	0,011	45,75	0,0003	1,1743
2,6	45	0,495	2,815	0,18	0,0989	0,3843
	60	0,495	2,815	0,18	0,0793	0,3460
	75	0,495	2,815	0,18	0,0719	0,5389
7,76	45	0,495	8,446	0,06	0,3560	0,2681
	60	0,495	8,446	0,06	0,3549	0,3585
	75	0,495	8,446	0,06	0,2008	1,7755

Keterangan:

- $\Delta T$  : Range
- 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



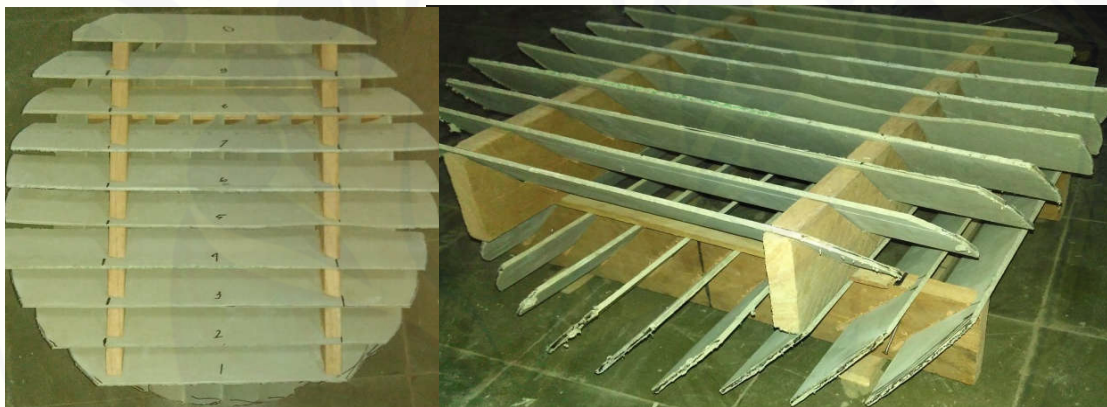
Gambar alat pembaca suhu *cooling tower*

CH	VALUE	ALARM	LOGIC	Max	Ave
1	+ 52.6 °C			+ 56.9	+ 50.0
2	+ 48.6 °C			+3276.5	+ 89.9
3	+ 30.3 °C			+ 264.9	+ 29.3
4	+ 28.2 °C			+ 29.7	+ 27.3
5	+ 31.0 °C			+ 34.9	+ 32.3
6	+ 35.0 °C			+ 35.8	+ 32.6
7	+ 41.7 °C			+ 42.3	+ 29.7
8	BURNOUT			+3276.5	+3270.7
9	BURNOUT			+3276.5	+3269.9
10	BURNOUT			+3276.5	+3269.0
PLS					

Gambar pengambilan data



Gambar *Stavolt*



Gambar susunan pengisi *calciboard*



Gambar *Nozzle*



Gambar Kipas *cooling tower*



Gambar pemanasan air



Gambar Cooling Tower