

**PENGARUH VARIASI SUDUT ANGULAR *TURBULATOR*
TERHADAP *TRANSFER* ENERGI DAN MASSA
PADA *DIRECT CONTACT HUMIDIFIER***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun Oleh :

**JOKO RUDI SANTOSO
NIM. 0510620060-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2010

**PENGARUH VARIASI SUDUT ANGULAR TURBULATOR
TERHADAP TRANSFER ENERGI DAN MASSA PADA
DIRECT CONTACT HUMIDIFIER**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

**JOKO RUDI SANTOSO
NIM. 0510620060-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Djoko Sutikno, M.Eng.
NIP. 19541009 198303 1 002

Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M.Eng.
Sc.
NIP. 19490911 198403 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI SUDUT ANGULAR *TURBULATOR* TERHADAP
TRANSFER ENERGI DAN MASSA PADA *DIRECT CONTACT*
*HUMIDIFIER***

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

JOKO RUDI SANTOSO
NIM. 0510620060-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 2 Februari 2010

Skripsi 1

Skripsi 2

Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT
NIP. 19460804 198303 1 001

Ir. Bardji Hadi Pranoto
NIP. 19450714 198103 1 003

Komprehensif

Ir. Handono Sasmito, M.Eng.Sc
NIP. 19480216 198003 1 001

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas limpahan karunia yang telah diberikan oleh Tuhan Yang Maha Esa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih dan penghargaan kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ir. Djoko Sutikno, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing I, yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang konstruktif sehingga sangat penting dalam penyusunan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng. Sc selaku Dosen Pembimbing II, yang telah banyak memberikan bimbingan dan saran yang sangat membantu dalam penyusunan skripsi ini.
5. Ayah, Ibu dan saudara di Jombang yang telah memberikan dukungan moril dan nasehat yang sangat berarti sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan baik.
6. Teman-teman Markazz M-15 yang setia memberi dukungan semangat dalam penyusunan skripsi ini.
7. Teman-teman kontrakan Candi Mendut yang selalu membantu baik dengan doa maupun motivasinya.
8. Teman-teman '05 yang sangat kompak dan banyak membantu dalam kegiatan seminar dan lain-lain.

Akhirnya, penulis mengharapkan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca khususnya dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Diharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk ke depannya.

Malang, Januari 2010

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 <i>Humidifier</i>	4
2.2.1 Macam-macam <i>Humidifier</i>	5
2.3 Turbulator	7
2.4 <i>Spray Nozzle</i>	7
2.5 Analisa Aliran	10
2.5.1 Aliran Laminer	10
2.5.2 Aliran Turbulen	11
2.6 Istilah-Istilah Dalam Pengkondisian udara	12
2.6.1 Psikrometri dan Diagram Psikrometri	12
2.6.2 Massa Alir	15
2.7 Proses Difusi	16
2.8 <i>Reynold Number</i>	16
2.9 Keseimbangan Kalor Pada Sistem	17
2.10 Hipotesis	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	

3.1 Metode Penelitian.....	25
3.2 Variabel Penelitian.....	25
3.3 Alat-alat Penelitian.....	26
3.4 Instalasi Penelitian.....	32
3.5 Tempat Penelitian.....	34
3.6 Prosedur Penelitian.....	34
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	35
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisa Data.....	36
4.1.1 Data Hasil Pengujian.....	36
4.1.2 Contoh Perhitungan.....	37
4.1.3 Data Hasil Perhitungan.....	40
4.2 Grafik Hasil Perhitungan.....	44
4.2.1 Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Energi (ΔH).....	44
4.2.2 Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Massa ($\Delta \dot{m}$).....	45
4.3 Pembahasan Grafik.....	46
4.3.1 Pembahasan Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Energi (ΔH).....	46
4.3.2 Pembahasan Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Massa ($\Delta \dot{m}$).....	47
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Hubungan <i>Droplet</i> dengan Spesifikasi Nosel	10
Tabel 3.1	Spesifikasi penelitian	32
Tabel 4.1.	Data hasil pengujian	36
Tabel 4.2.	Data Hasil Perhitungan entalpi total sisi masuk (H_1), entalpi total sisi keluar (H_2) dan transfer energi (ΔH)	40
Tabel 4.3.	Data Hasil Perhitungan laju massa udara campuran masuk dan keluar (m_1 dan m_2), massa alir udara kering (m_a) dan transfer massa (Δm)	42

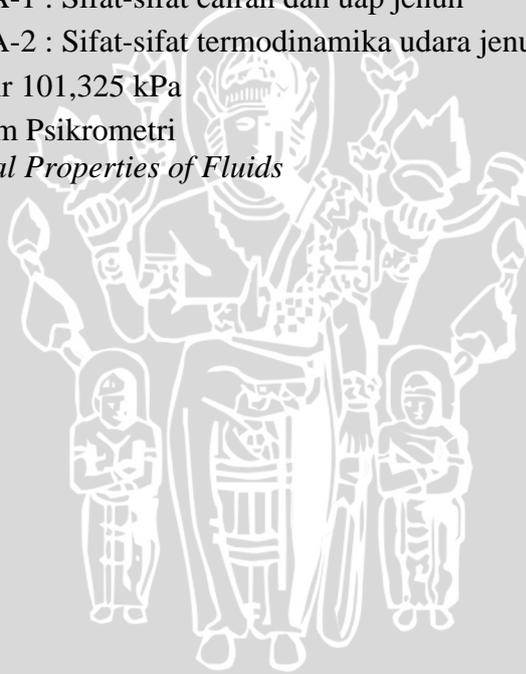


DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	<i>Impeller Humidifier</i>	5
Gambar 2.2.	<i>Vaporizer Humidifier</i>	6
Gambar 2.3.	<i>Hydro-Pneumatic Capillary System Humidifier (Non Electric Humidifier)</i>	6
Gambar 2.4.	<i>Ultrasonik Humidifier</i>	7
Gambar 2.5.	Turbulator	9
Gambar 2.6.	<i>Angular turbulator</i>	9
Gambar 2.7.	Diagram <i>Psycrometric</i>	12
Gambar 2.8.	Kesetimbangan kalor pada <i>Humidifier</i>	18
Gambar 3.1.	<i>Wind Tunnel</i>	27
Gambar 3.2.	<i>Inclined Manometer</i>	28
Gambar 3.3.	<i>Nozzle</i>	29
Gambar 3.4.	Gelas Ukur	29
Gambar 3.5.	Heater	30
Gambar 3.6.	Adaptor	31
Gambar 3.7.	Turbulator	31
Gambar 3.8.	Pemasangan Sudut Turbulator	31
Gambar 3.9.	Instalasi Penelitian	33
Gambar 3.10.	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1.	Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Energi (ΔH)	44
Gambar 4.2.	Grafik Hubungan Antara <i>Reynold Number</i> (Re) dengan Transfer Massa (Δm)	45

DAFTAR LAMPIRAN

- | No. | Judul |
|-------------|--|
| Lampiran 1. | Data pengujian dan hasil pengolahan tanpa pemasangan <i>angular turbulator</i> |
| Lampiran 2. | Data pengujian dan hasil pengolahan pada variasi sudut <i>angular turbulator</i> 17° |
| Lampiran 3. | Data pengujian dan hasil pengolahan pada variasi sudut <i>angular turbulator</i> 26° |
| Lampiran 4. | Data pengujian dan hasil pengolahan pada variasi sudut <i>angular turbulator</i> 31° |
| Lampiran 5. | Tabel A-1 : Sifat-sifat cairan dan uap jenuh |
| Lampiran 6. | Tabel A-2 : Sifat-sifat termodinamika udara jenuh pada tekanan atmosfer 101,325 kPa |
| Lampiran 7. | Diagram Psikrometri |
| Lampiran 8. | <i>Physical Properties of Fluids</i> |



RINGKASAN

Joko Rudi Santoso, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2010, *Pengaruh Variasi Sudut Angular Turbulator Terhadap Transfer Energi Dan Massa Pada Direct Contact Humidifier*, Dosen Pembimbing : Ir. Djoko Sutikno, M.Eng. dan Prof. Dr. Ir. Rudi Soenoko, M.Eng. Sc.

Kondisi udara merupakan faktor yang penting dalam kehidupan manusia. Parameter yang penting dalam menentukan kondisi udara yaitu temperatur dan kelembaban. Parameter tersebut sangat mempengaruhi keadaan organisme di dalamnya baik organisme biotik maupun abiotik. Misalnya pengaruh kelembaban terhadap kesehatan manusia, dimana untuk memperoleh keadaan yang ideal maka diperlukan kondisi udara dengan kelembaban antara 60-70%. Demikian juga pengaruhnya pada sektor industri dimana kelembaban yang terlalu tinggi akan menyebabkan korosi pada komponen-komponen yang terbuat dari logam. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkondisian udara sesuai dengan tujuan tertentu.

Alat yang berfungsi untuk mengatur tingkat kelembaban udara disebut *humidifier* dimana sistemnya disebut dengan *humidifying system*. Alat ini bekerja dengan prinsip alat penukar kalor dimana kelembaban udara ditingkatkan dengan cara menyemprotkan uap air ke udara secara *direct contact*. Karena itu alat ini juga disebut *direct contact humidifier*. Pada alat ini kecepatan udara sangat berpengaruh terhadap proses yang terjadi di dalamnya. Salah satu cara untuk meningkatkan kecepatan aliran udara yaitu dengan penambahan *angular turbulator* pada sudut tertentu. Pemasangan ini bertujuan untuk meningkatkan intensitas turbulensi aliran sehingga kecepatan meningkat yang ditandai dengan peningkatan harga *Reynold Number* yang akhirnya akan meningkatkan proses perpindahan kalor konveksi dan juga massa alirnya. Variasi sudut *angular turbulator* yang dipakai yaitu sebesar 17°, 26°, dan 31° dan dengan variasi bukaan blower sebesar 3 cm, 4cm, 5 cm, 6 cm, 7 cm, 8 cm, dan 9 cm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan *angular turbulator* pada *humidifier* mempengaruhi transfer energi dan massanya. Dengan pemasangan *angular turbulator* pada sudut tertentu nilai *transfer* energi dan massanya lebih besar daripada tanpa pemasangan *angular turbulator*. Transfer energi dan massa terbesar terjadi pada pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 26° yaitu $\Delta H = -3,178$ kJ/s pada $Re = 34103$ dan $\Delta \dot{m} = 0.0017$ (kg/s) juga pada $Re = 34103$. Hal ini dikarenakan pada sudut tersebut terjadi intensitas turbulensi tertinggi sehingga nilai *Reynold Number* mencapai maksimum, yang artinya kecepatan aliran udara juga tinggi sehingga massa udara yang mengalami kontak dengan air semakin banyak. Dengan semakin banyak massa udara yang mengalami kontak dengan air maka nilai *transfer* energi dan massa yang terjadi juga semakin tinggi.

Kata kunci : *angular turbulator*, transfer energi, transfer massa, *direct contact humidifier*.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelembaban udara suatu lingkungan sangat berpengaruh terhadap manusia maupun peralatan lain di lingkungan tersebut. Dalam dunia perindustrian hal ini sangatlah penting dimana faktor kelembaban udara akan sangat mempengaruhi kelangsungan industri tersebut. Kelembaban udara yang terlalu kecil akan membahayakan kesehatan manusia yang ada di dalamnya sedangkan kelembaban udara yang terlalu tinggi selain berbahaya bagi kesehatan manusia juga akan berdampak pada kerusakan komponen-komponen logam akibat korosi. Oleh karena itu perlu dilakukan pengkondisian tingkat kelembaban udara agar tidak berdampak buruk bagi manusia maupun bagi kelangsungan proses industri.

Untuk mengatur tingkat kelembaban udara kita dapat menggunakan suatu alat biasa dikenal dengan istilah *humidifier* atau alat pengatur kelembaban sedangkan sistem pengondisiannya disebut dengan *humidification system*. *Humidification system* merupakan suatu sistem penambahan uap air ke dalam udara dengan jalan menyemprotkan air atau uap air menuju ke aliran udara.

Humidifier bekerja dengan sistem pencampuran dan pertukaran kalor kontak langsung (*direct contact heating principles*), dimana udara bertemperatur tinggi disinggungkan secara langsung dengan air ataupun uap air. Karena kalor berpindah pada fluida yang mengalir, maka pada sistem terjadi perpindahan kalor secara konveksi.

Pada penelitian ini, kelembaban udara ditingkatkan dengan menyemprotkan air menuju aliran udara. Alat yang digunakan berupa *wind tunnel* yang pada bagian ujungnya diberi elemen pemanas dan *spray water* untuk menyemprotkan air sebagai penambah kelembaban udara. Fungsi dari elemen pemanas ini adalah untuk meningkatkan temperatur udara yang mengalir memasuki *wind tunnel*. Kemudian udara tersebut dialirkan

pada air yang disemprotkan sehingga akan terjadi proses perpindahan kalor pada sistem. Semakin tinggi laju perpindahan kalor maka kelembaban udara akan semakin meningkat karena panas yang keluar dari udara semakin besar digunakan menguapkan air, sehingga secara otomatis uap air yang dikandung oleh udara setelah melewati *spray water* semakin tinggi.

Salah satu cara untuk memperbesar laju perpindahan panas yaitu dengan menambahkan *turbulator* pada saluran masuk udara. *Turbulator* merupakan suatu penghalang yang dipasang pada suatu saluran dengan tujuan mengganggu aliran fluida. Akan tetapi perlu diketahui bahwa, pemasangan *turbulator* mempunyai pengaruh positif dan negatif pada alat penukar kalor. Dampak positifnya adalah peningkatan laju perpindahan kalor, sedangkan dampak negatifnya adalah peningkatan koefisien gesekan pada saluran yang dapat meningkatkan *pressure drop*.

Dampak negatif *turbulator* yaitu penurunan tekanan (*pressure drop*) yang akan menjadikan kerja blower menjadi harus diperbesar lagi untuk mengatasi kebutuhan alat penukar panas tersebut. Dengan adanya pemasangan *angular turbulator*, dimana pemasangannya secara miring dengan sudut tertentu, akan dapat mengurangi kerugian tekanan akibat gesekan yang berlebihan pada permukaan bidang sentuh yang dilalui fluida, sekaligus dapat mengarahkan fluida untuk mendapatkan permukaan sentuh yang tepat untuk mencapai proses perpindahan panas secara maksimal. Dengan kata lain, *angular turbulator* adalah suatu penghalang yang dipasang pada suatu saluran dengan tujuan mengganggu aliran fluida, sehingga akan tercipta aliran sekunder (*secondary flow*) yang berfungsi sebagai pengarah fluida untuk mencapai laju perpindahan panas yang maksimum dengan cara meletakkan *angular turbulator* pada sudut yang tepat.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

Bagaimana pengaruh variasi sudut *angular turbulator* terhadap *transfer* energi dan massa pada *direct contact humidifier*?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Debit air yang disemprotkan kedalam sistem ($8,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{detik}$).
2. Kondisi dianggap *steady state*.
3. Fluida yang digunakan adalah air dan udara.
4. Diasumsikan tidak ada perpindahan kalor ke lingkungan.
5. Temperatur air pendingin yang disemprotkan ke dalam sistem dibuat konstan (25°C).

1.4 Tujuan Penelitian

Mengetahui pengaruh variasi sudut *angular turbulator* terhadap *transfer* energi dan massa pada *direct contact humidifier*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut :

1. Mampu mengaplikasikan teori yang telah didapat selama perkuliahan tentang perpindahan panas.
2. Dengan penelitian ini, akan diperoleh sudut *angular turbulator* yang optimal untuk mendapatkan laju perpindahan kalor yang besar pada *direct contact humidifier*.
3. Memberikan kontribusi bagi perkembangan IPTEK dan dunia industri dalam mendisain *humidifier* untuk mendapatkan laju perpindahan kalor yang besar dengan debit media pendingin (air) yang optimal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Bunker, R.S. dan Osgood, S. J. (2003) melakukan penelitian eksperimental mengenai pengaruh pemasangan *turbulator* lurus terhadap laju perpindahan kalor dan koefisien gesekan pada saluran *rectangular*. Mereka bervariasi sudut antara *turbulator* terhadap penampang melintang saluran, yaitu 22,5°, 45°, 0°, -22,5°, dan -45°. Sedangkan *turbulator* yang digunakan mempunyai tinggi 6,985mm dan tebal 6,35mm. Dari hasil penelitiannya mereka menyimpulkan bahwa koefisien perpindahan kalor konveksi lokal mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan *turbulator*.

Seong-Yeon Yoo dan Hwa-Kil Kwon (2004) melakukan penelitian eksperimental mengenai performa dari udara atau air pada sistem pengondisian udara secara *Direct Contact*. Sistem ini memiliki lebih banyak keuntungan dari pada sistem pengondisian udara secara *Indirect Contact*. Pada sistem pengondisian udara secara *Direct Contact* ini *transfer* panas dan massa terjadi secara langsung antara udara dan *droplet* air. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki performa pendinginan dan pemanasan pada sistem pengondisian udara secara *Direct Contact* untuk berbagai variasi seperti kecepatan udara, temperatur udara, laju aliran air dan temperatur air. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah kelembaban dan temperatur outlet udara akan meningkat pada kondisi pemanasan seiring dengan peningkatan temperatur dan massa alir air dan juga seiring dengan penurunan kecepatan udara.

2.2 *Humidifier*

Humidifier adalah alat yang berfungsi untuk meningkatkan kelembaban udara. Alat ini bekerja melalui proses humidifikasi. Proses humidifikasi sendiri merupakan suatu proses yang dapat menambah kadar air dalam udara. Prinsip kerja dari *humidifier* yaitu dengan cara menyemprotkan air atau uap air ke aliran udara. Dengan penyemprotan ini diharapkan konsentrasi uap air di udara akan meningkat sehingga kelembabannya secara otomatis juga meningkat.

Macam-macam *humidifier*:

1. *Impeller Humidifier*

Jenis *impeller humidifier* (gambar 2.1) terdapat impeller pada bagian nosel yang berfungsi untuk memecah air yang akan disemprotkan ke udara. Dengan penambahan *impeller* ini butiran air yang terbentuk akan semakin kecil.

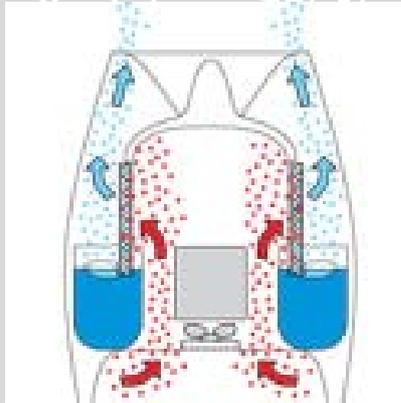


Gambar 2.1 : *Impeller Humidifier*

Sumber: <http://www.draftair.com/images/ph15.jpg&imgrefurl>

2. *Vaporizer Humidifier*

Vaporizer Humidifier (gambar 2.3) menggunakan energi listrik untuk menaikkan temperatur air sampai dengan temperatur uapnya. Setelah terbentuk uap maka uap air disemprotkan ke udara.



Gambar 2.2 : *Vaporizer Humidifier*

Sumber: <http://www.airoswiss.net/images/interior/vaporizer.jpg&imgrefurl>

3. *Hydro-Pneumatic Capillary System Humidifier (Non Electric Humidifier)*

Hydro-Pneumatic Capillary System Humidifier (gambar 2.3) ini menggunakan katup dan pipa kapiler untuk menguapkan air yang akan disemprotkan ke udara.

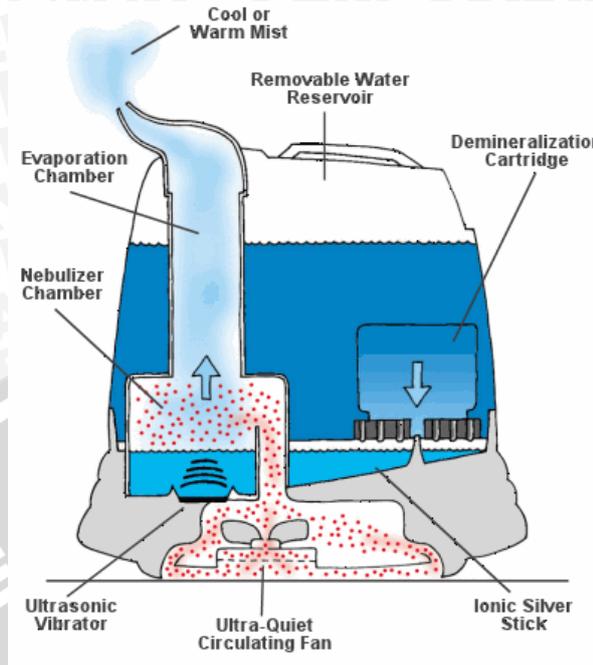


Gambar 2.3 : *Hydro-Pneumatic Capillary System Humidifier (Non Electric Humidifier)*

Sumber: www.rtmagazine.com/issues/articles/2006-09_02.asp

4. *Ultrasonik Humidifier*

Perbedaan *Ultrasonik Humidifier* (gambar 2.4) dengan yang lain yaitu adanya mekanisme getaran ultrasonik yang akan menghasilkan tetesan air. Tetesan ini diteruskan keluar menjadi kabut dingin. Dengan menyemprotkan kabut dingin ini maka kelembaban udara akan meningkat.



Gambar 2.4 : Ultrasonik Humidifier

Sumber: www.healthgoods.com/images/AirOSwiss_Ultrasonic_Humidification.gif

2.3 Turbulator

Turbulator merupakan alat atau penghalang yang berfungsi untuk menciptakan turbulensi pada suatu aliran fluida. *Turbulator* merupakan suatu penghalang yang akan mengubah orientasi dari aliran fluida sehingga akan terjadi aliran sekunder (*secondary flow*) dalam aliran tersebut. Dengan adanya aliran sekunder dalam aliran utama, maka pada aliran tersebut akan terjadi *vortex* yang merupakan awal dari terjadi turbulensi dalam aliran. Dengan adanya *vortex* tersebut maka akan meningkatkan difusivitas pusaran pada fluida, sehingga akan meningkatkan *transfer* kalor pada aliran tersebut. Adapun hubungan antara difuisivitas termal dan laju perpindahan kalor dapat dilihat pada persamaan berikut ini.

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{turb} = -\rho C_p \epsilon_M \frac{\partial T}{\partial y} \dots\dots\dots(\text{Holman,1991:224}) \quad (2-1)$$

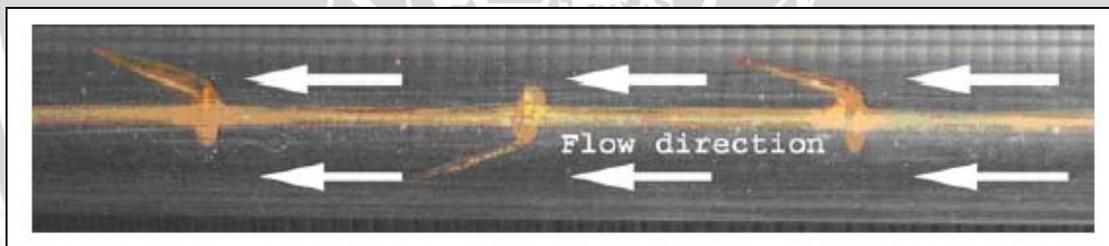


Dimana :

- $\left(\frac{q}{A}\right)_{turb}$ = Flux kalor pada aliran turbulen (W/m²)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
- C_p = Kalor spesifik pada tekanan konstan (J/kg.K)
- ϵ_M = Difusivitas pusaran (m²/s)
- $\frac{\partial T}{\partial y}$ = Gradient temperatur ke arah sumbu y (K/m)

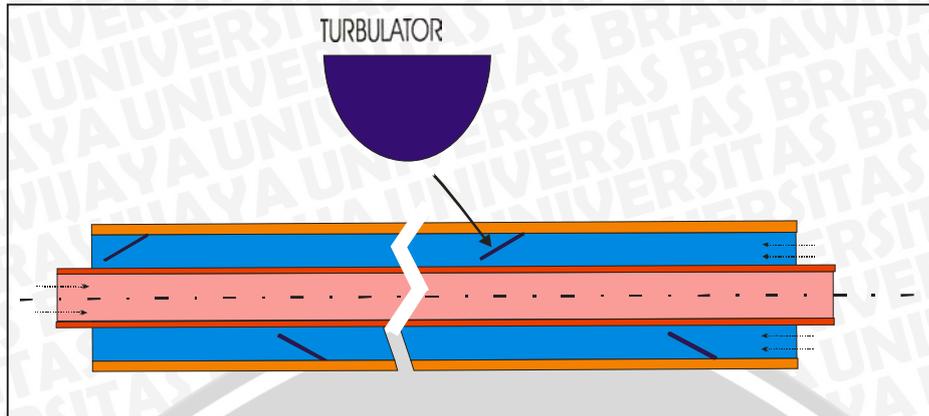
Bedasarkan persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa terjadinya pusaran dalam suatu aliran akan meningkatkan laju perpindahan kalor. Oleh karena itu, pemasangan *turbulator* (gambar 2.5) pada alat penukar kalor akan meningkatkan laju perpindahan kalor pada alat penukar kalor tersebut.

Angular turbulator yang dipasang sebagai pengacau aliran fluida, juga akan dapat berfungsi sebagai pengarah aliran fluida panas untuk dapat bersentuhan dengan fluida dingin. Bentuknya yang tipis dan mempunyai luasan, akan menciptakan aliran sekunder untuk memaksimalkan perpindahan panas yang berlangsung.



Gambar 2.5 : *Turbulator* dipasang pada bagian dalam
 Sumber: Somsak Pethkool, Smith Eiamsa-ard, Artit Ridluan and Pongjet Promvonge, 1:2006

Jika *turbulator* ini dipasang dalam keadaan miring dengan sudut tertentu dan dengan jarak yang tertentu (gambar 2.6) maka akan dapat sekaligus mengarahkan fluida panas untuk bersentuhan dengan permukaan fluida dingin yang temperaturnya lebih rendah.



Gambar 2.6 *Angular turbulator*
Sumber: dokumentasi pribadi

2.4 *Spray Nozzle*

Nozzle merupakan alat yang berbentuk pipa atau tabung dengan diameter masuk dan diameter keluar yang berbeda. Fungsi utama dari *nozzle* adalah mengubah energi tekanan fluida masuk *nozzle* menjadi energi kecepatan fluida keluar *nozzle*.

Spray nozzle merupakan salah satu jenis dari *nozzle* yang memiliki fungsi untuk memecah fluida cair menjadi butiran-butiran halus atau *droplet* dengan sudut semprot tertentu. Pada debit yang sama, semakin besar sudut semprot suatu *nozzle* maka *droplet* yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada tabel berikut ini (Panut, 1998:143)

Tabel 2.1 Hubungan *Droplet* Dengan Spesifikasi Nosel

Ukuran droplet	Orifice nozzle	Sudut spray	Kecepatan aliran fluida
Semakin kecil	Semakin kecil	Semakin besar	Semakin besar
Semakin besar	Semakin besar	Semakin kecil	Semakin kecil

2.5 Analisa aliran

Perpindahan panas konveksi sangat tergantung pada keadaan aliran lapisan batas dan apakah aliran tersebut laminer atau turbulen. Dalam menentukan keadaan suatu aliran (bersifat turbulen atau laminer) maka yang dapat dijadikan acuan adalah besarnya bilangan *Reynold* dari aliran tersebut.

2.5.1 Aliran Laminer

Pada suatu aliran fluida, aliran yang bergerak dalam lapisan-lapisan dengan gerakan yang teratur dan tiap *streamline* tidak bercampur disebut aliran laminar. Perpindahan massa dan momentum dalam aliran laminar terjadi secara molekular dalam skala submikroskopis, dari lapisan yang mempunyai kecepatan yang relatif tinggi menuju ke lapisan lain yang memiliki kecepatan yang relatif lebih rendah. Dengan adanya viskositas, maka kecenderungan aliran untuk dapat berubah karena gangguan dapat diperkecil. Pada aliran laminar partikel-partikel fluida bergerak secara berurutan mengikuti suatu lintasan dan memiliki kecepatan yang tetap pada titik yang sama. Untuk aliran laminar nilai bilangan *Reynold* adalah :

$Re < 2 \cdot 10^5$ untuk aliran eksternal.....(Cengel, 2001:745)

$Re < 2300$ untuk aliran internal.....(Cengel, 2001:512)

2.5.2 Aliran Turbulen

Pada suatu aliran fluida, saat partikel-partikel dalam aliran tersebut bergerak secara acak dengan kecepatan yang berfluktuasi dan tiap *streamline* bercampur maka aliran tersebut dinamakan aliran turbulen. Pada aliran turbulen tidak terbentuk lapisan-lapisan fluida. Dan aliran fluida dibayangkan sebagai bongkahan-bongkahan fluida. Bongkahan-bongkahan fluida bergerak secara acak yang menyebabkan proses perpindahan momentum dan massa terjadi dalam skala makroskopik. Partikel-partikel bongkahan berperan sebagai pembawa energi dan memindahkan energi dengan cara bercampur dengan partikel-partikel lain pada fluida tersebut. Jika suatu aliran tersebut dimanfaatkan sebagai media penyerap panas, maka aliran turbulen akan dapat menyerap panas lebih banyak dibanding dengan aliran laminar. Dimana tiap-tiap partikel fluida bisa bersentuhan dengan permukaan media yang mempunyai beda temperatur dan membawanya bercampur dengan partikel lain untuk selanjutnya mentransfer energi panas tersebut pada partikel yang lain

Untuk aliran turbulen, nilai bilangan *Reynold* adalah :

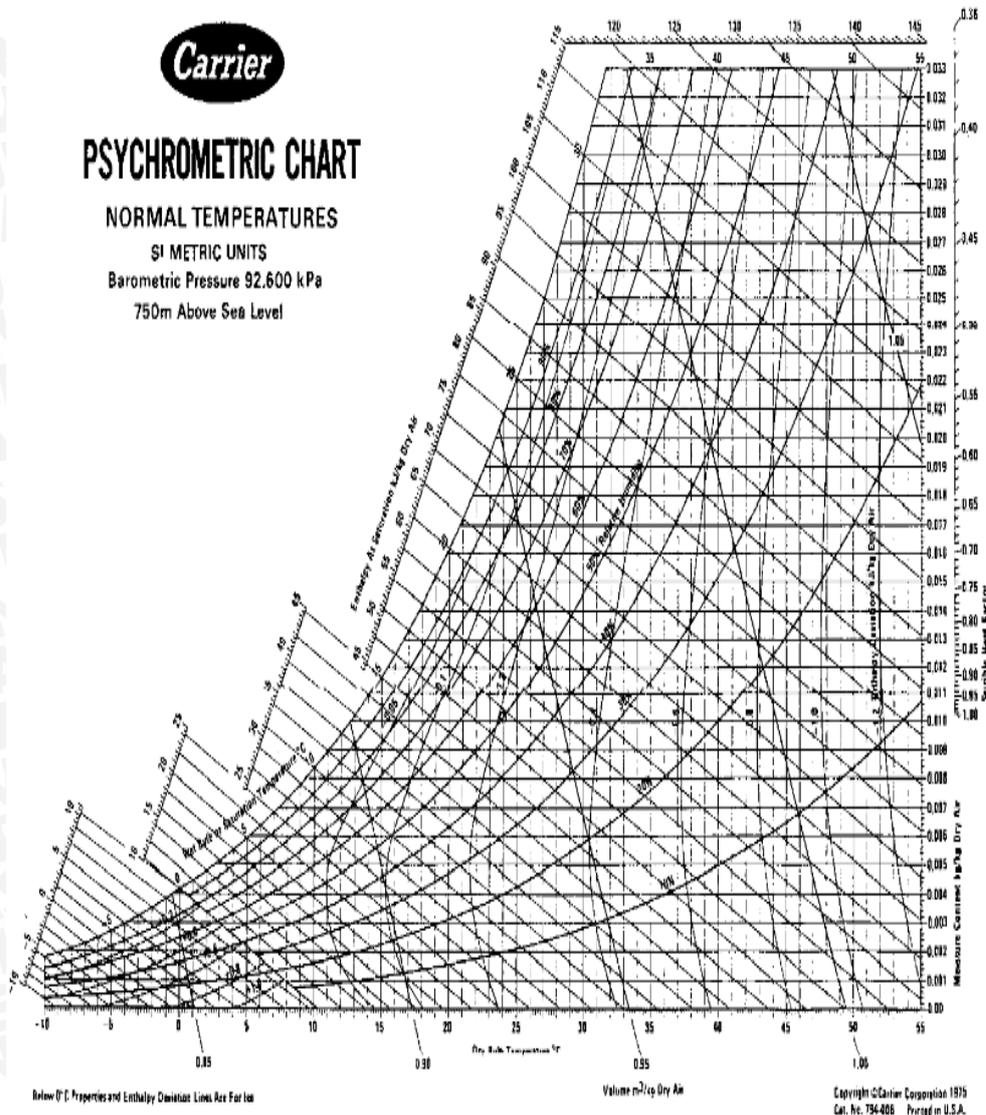
$Re > 5 \cdot 10^5$ untuk aliran eksternal(Cengel, 2001:745)

$Re > 4000$ untuk aliran internal(Cengel, 2001:512)

Pada aliran fluida, sebelum aliran menjadi turbulen maka, aliran akan mengalami proses transisi. Untuk aliran *internal*, aliran transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen terjadi pada bilangan *Reynold* antara 2300 – 4000.

2.6 Istilah-Istilah Pada Mesin Pengkondisian Udara

2.6.1 Psikometri dan Diagram Psikometri



Gambar 2.7 : Diagram Psikometri

Sumber : <http://www.fao.org/docrep/S1250E/S1250EEW.GIF>

Psikometri (*psychrometric*) adalah ilmu yang mempelajari sifat-sifat dari udara lembab. udara lembab terdiri dari udara kering dan uap air. Diagram

psikrometri (gambar 2.7) menggambarkan beberapa sifat penting dari udara kering hingga udara lembab, baik harga entalpi, kelembaban dan volume spesifik dari suatu keadaan udara.

- Udara Jenuh (*Saturated Air*)

Adalah udara yang tidak dapat lagi menerima uap air pada temperatur yang diberikan. Penurunan pada temperatur tersebut akan menghasilkan kondensasi. Peningkatan pada temperatur ini akan membuatnya menjadi tak jenuh lagi sehingga akan dapat menerima uap air lagi. Dalam udara jenuh, tekanan parsial uap air adalah sama dengan tekanan jenuh P_{sat} (didapat dari tabel uap) pada temperatur udara.

- Kelembaban Relatif (*Relative Humidity*)

Kelembaban relatif merupakan perbandingan tekanan parsial dari uap air dalam udara (P_v) dengan tekanan parsial dari uap air yang akan menjenuhkan udara pada temperatur tersebut, P_{sat} . Kelembaban relatif disimbolkan dengan Φ .

$$\Phi = P_v/P_{sat} \dots\dots\dots(\text{El Wakil, 1984:284}) \quad (2-2)$$

-Kelembaban Absolut (*Absolute Humidity* atau *Humidity Ratio*)

Kelembaban absolut adalah perbandingan massa uap air dengan massa udara kering dalam udara atmosfer, atau dapat pula didefinisikan sebagai massa uap air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Sehingga dapat dinyatakan dengan rumusan sebagai berikut :

$$\omega = m_v/m_a \dots\dots\dots(\text{El Wakil, 1992: 266}) \quad (2-3)$$

karena uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal (Stoecker, 1992: 41), maka :

$$\omega = \frac{P_v V/R_v T}{P_a V/R_a T}$$

$$\omega = \frac{P_v/R_v}{P_a/R_a}$$

$$\omega = \frac{P_v R_a}{P_a R_p}$$

$$\omega = \frac{P_v R_a}{(p - P_v) R_p} \tag{2-4}$$

dengan harga $R_a = 287 \text{ (J/Kg K)}$, maka diperoleh :

$$\omega = 0,622 P/(p - P_v) \dots\dots\dots(\text{El-Wakil, 1992:266}) \tag{2-5}$$

dimana:

ω = kelembaban absolut (kg uap air/kg udara kering)

V = volume campuran udara uap (m^3)

P = tekanan atmosfer = $P_a + P_v$ (Pa)

P_a = tekanan parsial udara kering (Pa)

P_v = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh (Pa)

T = temperatur mutlak campuran udara uap (K)

R_v = tetapan gas untuk uap air (J/Kg K)

R_a = tetapan gas untuk udara kering (J/Kg K)

-Temperatur Bola Kering (*Dry-Bulb Temperature*)

Temperatur bola kering adalah temperatur yang biasanya dibaca oleh alat ukur secara langsung.

-Temperatur Bola Basah (*Wet-Bulb Temperature*)

Secara teori temperatur udara jenuh dapat diukur dengan alat penjenh adiabatik, yaitu suatu alat yang mengalirkan udara melewati percikan air. Air tersebut didaurkan secara terus-menerus hingga mencapai kesetimbangan dan diberi penyekat agar tidak ada kalor yang masuk maupun keluar. Karena hal ini sulit sekali dilakukan, maka digunakan alat pengukur temperatur bola basah yang lebih sederhana. Temperatur bola basah adalah temperatur yang ditunjukkan oleh termometer dimana pada bagian bolanya dilengkapi dengan sumbu yang selalu basah. Temperatur yang diperoleh merupakan pendekatan dari temperatur udara jenuh yang diukur dengan alat penjenh adiabatik. Selama udara yang ada di sekitarnya belum jenuh, maka temperatur yang ditunjukkan selalu di bawah temperatur bola



keringnya. Hal ini terjadi karena apabila udara tidak jenuh dan sumbu yang digunakan selalu basah, maka tekanan parsial uap air di sekitar sumbu bola basah akan lebih besar daripada tekanan parsial di atmosfer, sehingga terjadilah penguapan.

Penguapan akan terjadi pada temperatur konstan atau apabila ada tambahan kalor dari luar. Karena tidak ada kalor yang ditambahkan maka untuk mengubah fase menjadi uap, air pada sumbu akan melepas sebagian kalor yang dimilikinya sehingga akan menurunkan temperaturnya. Temperatur bola basah akan sama dengan temperatur bola kering apabila udara sudah mencapai kondisi jenuh.

- Entalpi (h)

Adalah energi kalor yang dimiliki oleh suatu zat pada suatu temperatur tertentu. Besarnya entalpi dapat diperoleh dengan persamaan:

$$h = C_p \cdot T \dots\dots\dots(\text{Wiranto Arismunandar, 1980:12}) \quad (2-6)$$

dimana:

h = Entalpi fluida (kj/kg)

C_p = Kalor jenis pada tekanan konstan (kj/kg °K)

T = Temperatur fluida (°K)

2.6.2. Massa Alir (ṁ)

Adalah jumlah massa udara yang dialirkan tiap satuan waktu. Besar massa alir fluida dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A$$

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \dots\dots\dots(2-7)$$

dimana:

ṁ = massa alir fluida (kg/dtk)

ρ = massa jenis fluida (kg/m³)

V = kecepatan fluida (m/dtk)

A = luas penampang (m²)

Q = debit fluida (m³/dtk)



2.7 Proses Difusi

Bila udara kering pada temperatur konstan dijenuhkan oleh air pada temperatur yang sama pada alat perpindahan kalor kontak langsung (*direct contact heat transfer*), uap air memasuki udara dengan membawa kalor latennya untuk penguapan. Kelembaban campuran udara-uap air meningkat selama penjuhan. Hal ini terjadi karena selama proses penjuhan, terjadi proses penguapan dimana penguapan timbul karena tekanan uap air yang keluar dari cairan adalah lebih besar dibandingkan tekanan uap parsial air yang berada dalam udara tidak jenuh. Ketika tekanan parsial uap air dalam udara sama dengan cairan, udara menjadi jenuh dan penguapan berhenti. Temperatur penguapan air dapat dijaga konstan selama proses penjuhan udara jika terdapat suplai panas pada air yang digunakan untuk mengganti panas yang hilang sebagai panas laten penguapan. Dari uraian di atas dapat diketahui bahwa perpindahan kalor selama penjuhan dapat terjadi meskipun tanpa ada perbedaan temperatur.

Pergerakan material (massa) antara dua fase karena perbedaan tekanan uap (konsentrasi) disebut difusi, dan dapat digambarkan dengan *transfer* material dari satu fase ke fase lain atau keduanya. Fenomena ini disebut perpindahan massa (untuk memisahkannya dengan konsep perpindahan panas). Pada sebuah sistem dengan fase tidak homogen, maka akan memungkinkan terjadinya difusi sendiri (*self-diffusion*) sampai fase mendekati homogen.

2.8 Reynold Number

Pada saat suatu fluida mengalir dan memiliki suatu pola tertentu. Pola pertama adalah aliran laminar, yaitu aliran yang mulus dan *streamline* dan memiliki kecenderungan bergerak secara teratur. Pola kedua adalah aliran turbulen yaitu aliran bergerak acak dan tidak teratur dengan kecepatan yang berfluktuasi. Perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang merupakan ukuran gaya gesekan antar lapisan fluida disebut bilangan *Reynold* (Re), ini merupakan parameter yang tidak berdimensi dan dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{V \cdot \delta}{\nu} \dots\dots\dots(\text{Cengel, 2003:343}) \quad (2-8)$$

Dimana :

V = Kecepatan aliran fluida (m/s)

δ = Panjang karakteristik geometri (m)

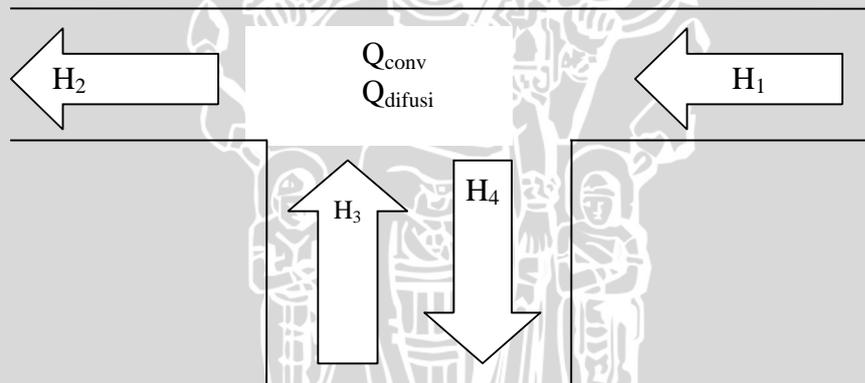
$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = Viskositas kinematik fluida (m²/s)

μ = viskositas dinamik (kg/m.s)

ρ = massa jenis (kg/m³)

2.9 Keseimbangan Kalor Pada Sistem

Gambar berikut ini menunjukkan keseimbangan kalor yang terjadi pada *humidifier*. Udara yang memiliki temperatur tinggi dialirkan melalui saluran *inlet* dengan *blower*. Pada saat melewati *spray nozzle* udara tersebut akan bersinggungan langsung dengan uap air yang disemprotkan sehingga terjadi proses perpindahan kalor dari udara ke uap air.



Gambar 2.8 : Keseimbangan kalor pada *Humidifier*

Sumber: dokumentasi pribadi

Keterangan :

H_1 : Kalor udara yang masuk ke dalam sistem [watt]

H_2 : Kalor yang ke luar dari sistem ($H_1 + Q_{diff} - Q_{conv}$) [watt]

H_3 : Kalor air yang masuk ke dalam sistem [watt]

H_4 : Kalor air tampung ($H_3 - Q_{diff} + Q_{conv}$) [watt]

Perpindahan kalor total pada *humidifier* terdiri dari dua macam proses, yaitu :

a. Perpindahan Kalor Difusi (q_d)

Pada proses ini terjadi perubahan fasa dimana sebagian air berubah menjadi uap air akibat proses percampuran yang terjadi antara udara dan partikel air.

b. Perpindahan kalor Konveksi (q_c)

Perpindahan kalor konveksi terjadi pada media yang bergerak dimana udara dan air yang memiliki beda temperatur saling bersinggungan. Pada penelitian ini, proses konveksi terjadi dari udara ke air. Hal ini terjadi karena udara memiliki temperatur yang lebih tinggi. Besarnya nilai kalor yang berpindah dapat kita ketahui dengan mengukur beda temperatur antara air yang masuk dengan air yang keluar.

Perpindahan kalor konveksi dapat dihitung berdasarkan besar nilai bilangan *Nusselt*, *Reynold*, dan *Prandlt* dimana ketiga parameter tersebut mempunyai hubungan yang saling berkaitan. Peningkatan bilangan *Reynold* berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan alir fluida, selain itu juga akan berpengaruh terhadap bilangan *Nusselt* dan *Prandlt*. Semakin besar nilai bilangan *Nusselt* dan *Prandlt* maka koefisien perpindahan panas konveksi juga akan meningkat sehingga *transfer* energi juga akan meningkat. Hubungan ketiga parameter tersebut dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$\begin{aligned} Re &= V_{DH} \delta / \nu \\ Nu &= C.Re^m, Pr^n \\ Nu &= h.D_H/k \quad \dots\dots\dots(J.P Holman, 1995:214) \quad (2-9) \end{aligned}$$

Keterangan :

- V = Kecepatan aliran fluida (m/s)
- δ = Panjang karakteristik geometri (m)
- $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = Viskositas kinematik fluida (m²/s)
- μ = Viskositas dinamik (kg/m.s)
- ρ = Massa jenis (kg/m³)



Re = Reynold Number

Nu = Nusselt Number

Pr = Prandlt Number

C,m,n = Konstanta

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (w/m² °K)

k = Koefisien perpindahan panas konduksi (w/m °K)

Dh = Diameter hidrolik (m)

Kesetimbangan energi secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

∑ Kalar keluar :

$$H_2 + H_4 = H_1 + \cancel{Q_{diff}} - \cancel{Q_{conv}} + H_3 - \cancel{Q_{diff}} + \cancel{Q_{conv}}$$

maka:

∑Kalar keluar = ∑Kalar masuk

$$H_2 + H_4 = H_1 + H_3 \tag{2-10}$$

Entalpi fluida (udara kering + uap air):

$$h = C_p T_c + \omega h_g \dots\dots\dots(\text{Stoeker, 1992:42}) \tag{2-11}$$

Keterangan :

h = Entalpi campuran antara udara kering dengan uap air (kJ/kg)

C_p = Kapasitas spesifik udara kering pada tekanan konstan 1,0 kJ/kg °K

T_c = Suhu campuran antara udara dan uap (°C)

ω = Kelembaban absolut (%)

h_g = Entalpi uap (kJ/kg)

Sehingga nilai energi kalar udara masuk dihitung dengan rumus :

$$H_1 = m_{al} \cdot h_1$$

$$H_1 = m_{al} (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) \tag{2-12}$$

Keterangan :

m_{al} = Massa alir udara kering yang masuk ke dalam sistem (kg/s)

T₁ = Temperatur udara *inlet* (°C)

ω₁ = Kelembaban absolut udara *inlet* (%)

h_{g1} = Entalpi uap udara *inlet* (J/kg)



Nilai kalor udara keluar dihitung dengan persamaan :

$$H_2 = m_{a2} \cdot h_2$$

$$H_2 = m_{a2} (C_p T_c + \omega h_g) \quad (2-13)$$

m_{a2} = Massa alir udara kering yang keluar ke dalam sistem (kg/s)

T_2 = Temperatur udara keluar ($^{\circ}\text{C}$)

ω_2 = Kelembaban absolut udara keluar (%)

h_{g2} = Entalpi uap udara keluar (kJ/kg)

Massa udara kering yang masuk ke dalam sistem besarnya sama dengan massa udara kering yang keluar dari sistem, sehingga:

$$m_{a1} = m_{a2} = m_a$$

m_a merupakan massa alir udara kering, dimana nilainya dapat dihitung dengan rumus :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \dots\dots\dots(\text{Stoeker},1992:41) \quad (2-14)$$

$$\omega \times m_a = m_v$$

$$m = \rho \times V \times A \quad \dots\dots\dots(\text{Cengel},1994:98) \quad (2-15)$$

Dari persamaan (2-15) dan (2-16) akan diperoleh :

$$m = m_a + m_v$$

$$m = m_a + \omega \times m_a$$

$$m = (1 + \omega) \times m_a \quad (2-16)$$

$$m_a = \frac{m}{(1 + \omega)}$$

Keterangan :

ω = Kelembaban absolut campuran udara dan uap air.

m = Laju massa alir campuran udara dan uap air (kg/s)



m_a = Laju massa alir udara kering (kg/s)

m_v = Laju massa alir uap air (kg/s)

V = Kecepatan campuran udara dan uap air (m/s)

ρ = Massa jenis campuran udara dan uap air.

Sedangkan V , kecepatan campuran antara udara dan uap air, diperoleh dari rumus:

$$V = c \times \sqrt{2gh} \quad (2-17)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (2-18)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{MINYAK} g h_{MINYAK}}{g \rho_{udara}}} \quad (2-19)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{air} SG_{MINYAK} (z \sin 3,75/1000)}{\rho_{udara}}} \quad (2-20)$$

Dimana :

c = Konstanta tabung pitot (0,85)

ΔP = Beda tekanan rata-rata fluida.

γ = Berat jenis udara dan uap air pada saat pengujian

ρ_{minyak} = Massa jenis minyak pada manometer

z = Beda tekanan yang diukur oleh tabung pitot (mm minyak manometer)

ρ_{udara} = Massa jenis udara outlet (campuran antara air dan uap air)

SG_{minyak} = Spesifik gravity (0,826)

Sedangkan H_3 dan H_4 masing-masing dihitung dengan rumus :

$$H_3 = m_3 \times h_3$$

$$H_4 = m_4 \times h_4 \quad (2-21)$$

Keterangan :

m_3 = Massa alir air yang masuk ke dalam sistem (kg/s)

\dot{m}_4 = Massa alir air yang ke luar dari sistem (kg/s)

h_3 = Entalpi air yang masuk ke dalam sistem (kJ/kg)

h_4 = Entalpi air yang ke luar dari sistem (kJ/kg)

Massa alir air masing-masing dihitung dari perkalian antara massa jenis air dengan debitnya atau secara matematis dapat ditulis :

$$\dot{m}_3 = \rho_{air} \times Q_3$$

$$\dot{m}_4 = \rho_{air} \times Q_4 \quad (2-22)$$

Sedangkan nilai entalpinya dilihat pada tabel udara dan uap air yang tergantung dengan besarnya temperatur dan tekanan masing-masing kondisi. Dengan menggabungkan persamaan-persamaan sebelumnya, maka persamaan energinya menjadi :

$$H_1 + H_3 = H_2 + H_4 \quad (2-23)$$

$$H_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{a2} (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4$$

$$H_1 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{a1} (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_4 h_4$$

$$\dot{m}_{a1} (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_{a2} (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4$$

$$\dot{m}_a (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4$$

Nilai *transfer* energi dihitung dengan persamaan :

$$\Delta H = H_1 - H_2 = H_4 - H_3$$

(2-24)

Sedangkan besarnya massa uap air yang ditransfer ke udara adalah :

$$\Delta m = m_2 - m_1 = m_3 - m_4 \quad (2-25)$$

2.10 Hipotesa

Variasi sudut *angular turbulator* akan meningkatkan intensitas turbulensi yang ditandai dengan adanya *vortex* sehingga akan meningkatkan harga bilangan *Reynold* dimana semakin tinggi bilangan *Reynold* maka proses perpindahan panas konveksi serta proses difusi semakin besar, akibatnya *transfer* energi dan massa juga meningkat.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Pada penelitian ini metode penelitian yang digunakan yaitu menggunakan metode eksperimental (*true experimental research*). Metode ini dapat langsung digunakan pada obyek yang akan diteliti. Cara pengambilan data dilakukan pada tahapan-tahapan tertentu dimana beberapa data diambil untuk diolah. Setelah data tersebut diolah maka dilakukan perbandingan sehingga terbentuk suatu pola perbandingan. Pola perbandingan tersebut akan dihubungkan satu dengan lainnya.

3.2 Variabel Penelitian

1. Variabel bebas (*independent variabel*)

Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah:

Variasi kecepatan udara inlet pada bukaan blower sebesar 3cm, 4cm, 5cm, 6cm, 7cm, 8cm, dan 9cm. Variasi kecepatan ini berbanding lurus dengan bilangan *Reynold*

2. Variabel terikat (*dependent variabel*)

Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah:

- *Transfer energi*
- *Transfer massa*

3. Variabel terkontrol.

Variabel terkontrol pada penelitian ini nilainya dikonstankan pada waktu penelitian dilakukan. Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah:

Variasi sudut pemasangan *turbulator* yaitu sebesar 17° , 26° , 31° , dan tanpa *turbulator*.

3.3 Alat-alat Penelitian

Peralataan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Windtunnel*

Windtunnel (gambar 3.1) adalah suatu tempat atau wadah fluida yang mengalir. Di dalam *windtunnel* ini kecepatan udara dapat diketahui dengan cara mengukur beda tekanannya menggunakan *inclined manometer*.

Dimana persamaannya :

$$V_2 = c \times \sqrt{2gh}$$

$$V_2 = c \times \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}}$$

$$V_2 = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{MINYAK}} gh}{g \rho_{\text{udara}}}}$$

$$V_2 = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{air}} SG_{\text{MINYAK}} (z \sin 3,75 / 1000)}{\rho_{\text{udara}}}}$$

keterangan :

c = Konstanta tabung pitot (0,85)

ΔP = Beda tekanan rata-rata yang diukur oleh tabung pitot.

γ = Berat jenis udara dan uap air pada saat pengujian

ρ_{air} = Massa jenis air (1000kg/m³)

ρ_{udara} = Massa jenis udara outlet (campuran antara air dan uap air)

SG_{minyak} = *spesific grafity* (0,826)

sedangkan ρ_{udara} dapat kita peroleh dari :

$$\rho_{\text{udara}} = \frac{m_A + m_B}{v}$$



Gambar 3.1: Windtunnel

Sumber : Dokumentasi Pribadi

2. *Thermocouple*

Berfungsi untuk mengukur temperatur air panas, temperatur keluar air panas, temperatur masuk air dingin dan, temperatur keluar dingin. Dalam hal ini *thermocouple* digunakan untuk mengubah suatu besaran fisis yang berupa suhu menjadi bentuk elektris berupa tegangan.

3. *Thermo Controler*

Berfungsi untuk mengontrol temperatur udara *inlet* ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cara kerja alat ini yaitu memutus arus listrik pada *heater* secara otomatis apabila temperatur telah mencapai $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toleransi dari pengaturan temperatur ini adalah $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

4. *Digital Multimeter*

Berfungsi untuk mengubah data *analog* dari *termocouple* menjadi temperatur dengan tampilan *digital*.

5. *Inclined Manometer*

Inclined Manometer (gambar 3.2) berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran udara. Alat ini menggunakan zat cair (minyak) sebagai fluida pengukurnya. Prinsipnya adalah mengukur beda tekanan udara saat

keluar dari *duct* yang ditunjukkan oleh perbedaan ketinggian cairan, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan kecepatan udara pada *duct*.



Gambar 3.2: *Inclined Manometer*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

6. Pompa

Berfungsi untuk memompa air menuju *nozzle*. Adapun spesifikasi pompa tersebut adalah sebagai berikut :

- No. Part : MZS38017
- Merk : G
- Daya : 0,175 kW
- Kapasitas : 25 ml/menit

7. *Spray Nozzle*

Spray nozzle (gambar 3.3) berfungsi mengubah energi tekanan fluida masuk *nozzle* menjadi energi kecepatan fluida keluar *nozzle*. Alat ini digunakan untuk memecah air menjadi partikel-partikel dengan ukuran yang jauh lebih kecil.



Gambar 3.3: *Nozzle*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

8. Gelas ukur

Gelas ukur (gambar 3.4) berfungsi untuk mengetahui debit air yang disemprotkan oleh *nozzle*. Dimana secara matematis dapat ditunjukkan dengan :

$$\dot{Q} = \frac{V}{t}$$

keterangan :

\dot{Q} = debit air pendingin (m³/detik)

V = volume air pendingin (m³)

t = waktu (detik)



Gambar 3.4: Gelas Ukur

Sumber : Dokumentasi Pribadi

7. Heater

Heater (gambar 3.5) berfungsi untuk meningkatkan temperatur udara *inlet*. Cara kerja alat ini yaitu dengan merubah energi listrik menjadi panas. Instalasi *heater* disambungkan dengan *thermocontroller* sehingga temperatur pemanasan dapat dibuat konstan.



Gambar 3.5: Heater

Sumber : Dokumentasi Pribadi

8. Adaptor

Adaptor (gambar 3.6) berfungsi untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah sehingga bisa digunakan sebagai sumber arus pompa. Adapun spesifikasi adaptor adalah sebagai berikut :

- Arus : 5 A
- Voltase : 12 Volt

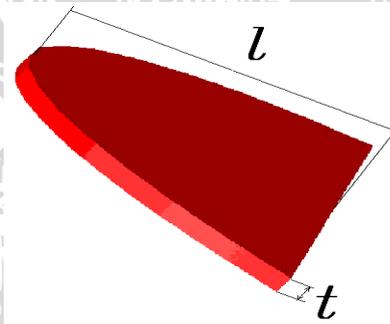


Gambar 3.6: Adapter

Sumber : Dokumentasi Pribadi

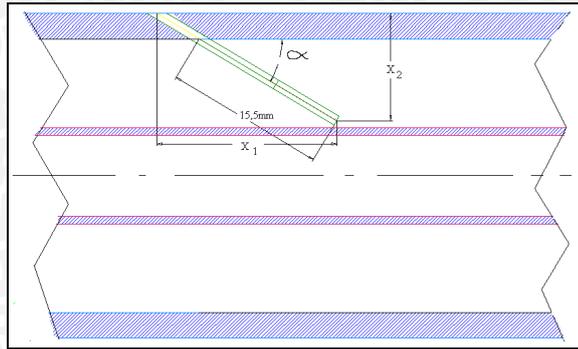
9. Turbulator

Turbulator (gambar 3.7) merupakan plat tipis dari bahan fiberglass dengan bentuk tertentu yang mempunyai tebal (t) 3 mm, lebar 50 mm dan panjang (l) 150 mm.



Gambar 3.7: Turbulator

Sumber : Dokumentasi Pribadi



Gambar 3.8 Pemasangan sudut *turbulator*

Sumber : Dokumentasi Pribadi

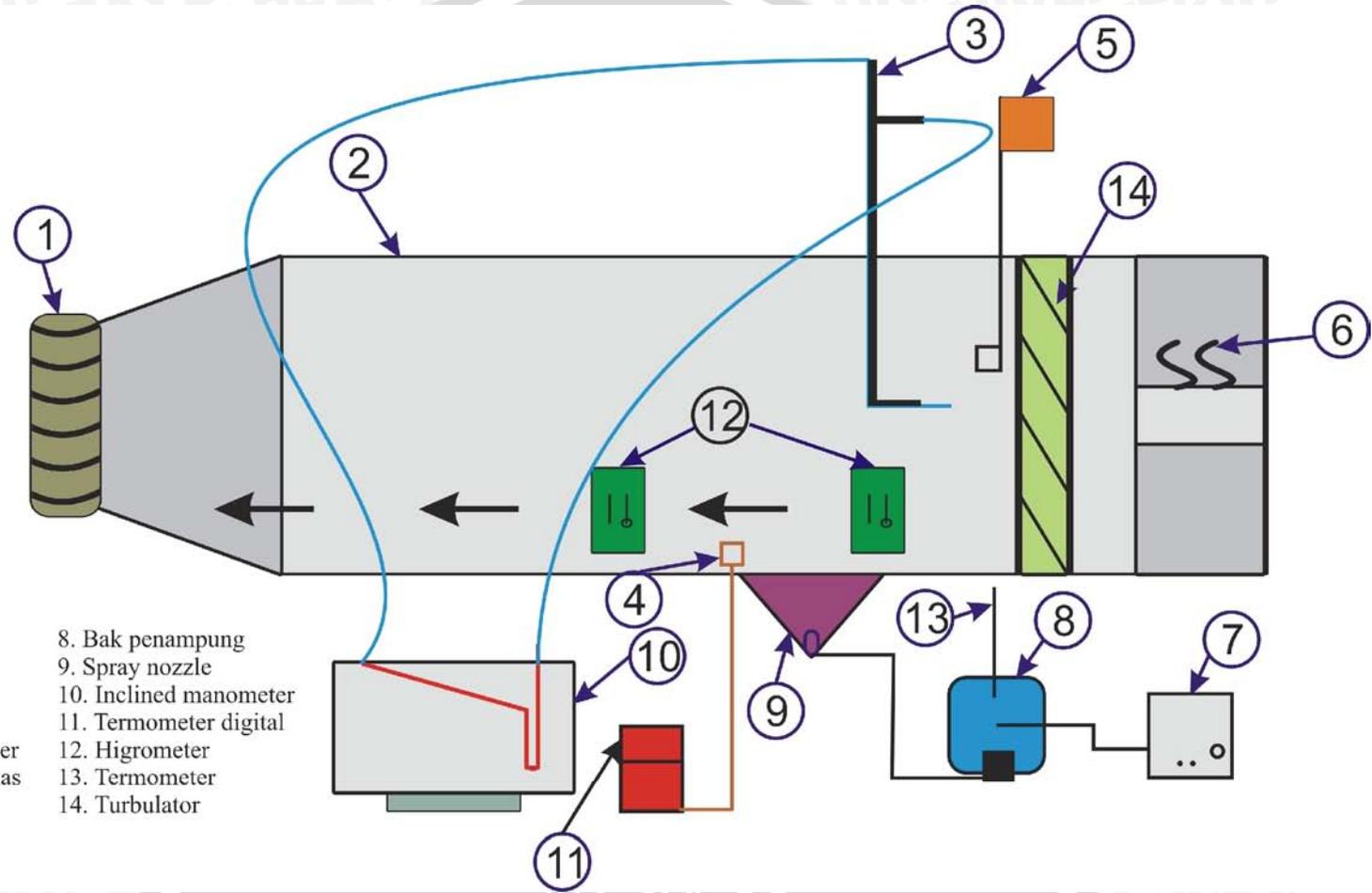
Dimana: α = sudut *turbulator* ($17^\circ, 26^\circ, 31^\circ$)
 X_1 dan X_2 = jarak setelah posisi *turbulator* dipasang

3.4 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian beserta keterangannya terlihat pada gambar 3.9 yang menunjukkan instalasi penelitian serta alat pendukungnya.

Tabel 3.1 Spesifikasi penelitian

Jumlah <i>turbulator</i>	Jarak antar <i>turbulator</i> (mm)	Tebal <i>turbulator</i> (mm)	Sudut <i>turbulator</i>
0 (tanpa)	-	-	-
4	20	3	17°
4	20	3	26°
4	20	3	31°

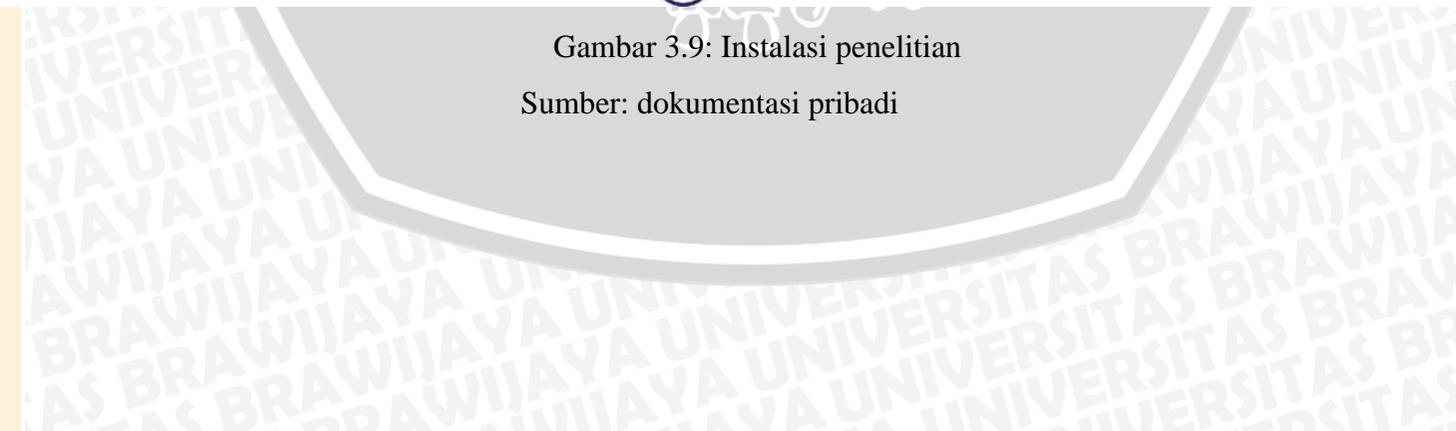


Keterangan :

- 1. Blower
- 2. Duct
- 3. Pitot
- 4. Termokopel
- 5. Thermo controller
- 6. Elemen pemanas
- 7. Adaptor
- 8. Bak penampung
- 9. Spray nozzle
- 10. Inclined manometer
- 11. Termometer digital
- 12. Higrometer
- 13. Termometer
- 14. Turbulator

Gambar 3.9: Instalasi penelitian

Sumber: dokumentasi pribadi



3.5 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mesin-mesin Fluida, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya.

3.6 Prosedur Penelitian

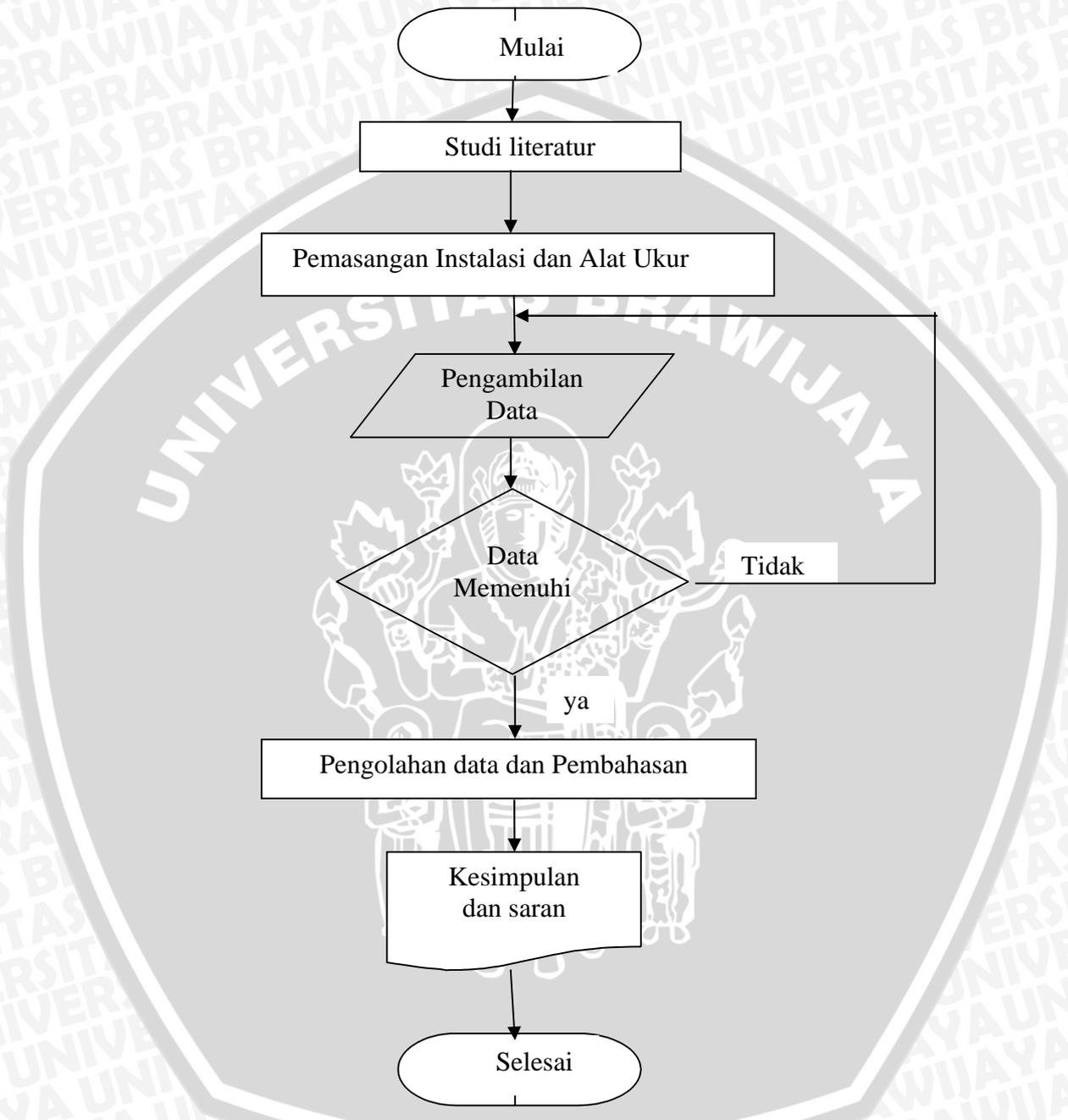
Persiapan meliputi :

1. Menyiapkan instalasi penelitian dengan berbagai variasi sudut turbulator
2. Memanaskan udara dengan elemen pemanas sampai pada temperatur 40°C sebagai persiapan udara inlet.
3. Pengecekan kondisi alat ukur meliputi manometer dan sensor beserta alat pendukungnya.

Pelaksanaan percobaan :

1. Memasang semua instalasi penelitian pada *wind tunnel* dengan temperatur udara inlet sebesar 40°C
2. Menghidupkan pompa dan mengatur debit air sesuai dengan yang diinginkan.
3. Hidupkan blower pada bukaan 3 cm
4. Mengambil data temperatur air masuk, temperatur air keluar, temperatur udara masuk, temperatur udara keluar dan perbedaan tekanan udara keluar pada *inclined manometer*
5. Mengulangi langkah 2 sampai 4 pada variasi bukaan blower 4cm, 5cm, 6cm, 7cm, 8cm, dan 9cm
6. Mengulangi langkah 2 sampai 5 pada variasi sudut *turbulator*
7. Data diolah, kemudian dianalisa pengaruh kecepatan udara *inlet* terhadap laju perpindahan kalor. Data dianalisa dengan rumusan dan persamaan sesuai dengan ilmu perpindahan panas, mekanika fluida maupun termodinamika. Dari analisa tersebut nantinya akan dapat diketahui hubungan antara variabel bebas dan variabel terkontrol terhadap variabel terikatnya. Dari hubungan tersebut akan digunakan untuk menjawab rumusan masalah yang telah dikemukakan lebih awal
8. Menarik kesimpulan.

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian



BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data hasil pengujian

Berikut ini adalah data hasil pengujian pengaruh variasi sudut *angular turbulator* terhadap *transfer* energi dan massa pada *direct contact humidifier* :

Tabel 4.1 Tabel Hasil Pengambilan Data yang Diperoleh

A. Tanpa *turbulator*

Bukaan Blower (cm)	T _{d in} (°C)	T _{win} (°C)	T _{d out} (°C)	T _{w out} (°C)	Z (mm minyak manometer)
3	40	26	36	27	3
4	40	26	35	27	4
5	40	25,5	35	27	6
6	40	25,3	36	27	7
7	40	25	31	27	9
8	40	25	29	26	11
9	40	25	28	27	13

B. *Turbulator* sudut 17°

Bukaan Blower (cm)	T _{d in} (°C)	T _{win} (°C)	T _{d out} (°C)	T _{w out} (°C)	Z (mm minyak manometer)
3	40	26	37	29	4
4	40	26	36	29	5
5	40	25,5	35	28,5	6,5
6	40	25,3	35	29	8
7	40	25	35	28,5	9
8	40	25	34	28,5	11
9	40	25	33	28,5	13

C. Turbulator sudut 26°

Bukaan Blower (cm)	T _{d in} (°C)	T _{win} (°C)	T _{d out} (°C)	T _{w out} (°C)	Z (mm minyak manometer)
3	40	26	33	29	5
4	40	26	34	29,5	6
5	40	25,5	34	29	6,5
6	40	25,3	34	29,6	9
7	40	25	33	29	11
8	40	25	33	29,1	12
9	40	25	33	29,2	16

D. Turbulator sudut 31°

Bukaan Blower (cm)	T _{d in} (°C)	T _{win} (°C)	T _{d out} (°C)	T _{w out} (°C)	Z (mm minyak manometer)
3	40	26	34	27,8	5
4	40	26	33	27,6	6
5	40	25,5	33	27,8	6,5
6	40	25,3	32	27,5	7
7	40	25	31	27,5	7
8	40	25	30	27,5	8
9	40	25	29	27,5	10

4.1.2 Contoh perhitungan

Data yang diperoleh dari pengujian *humidifier* untuk dengan pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 17° :

a. Data dari hasil pengujian

- T_{din} = 40°C
- T_{win} = 26°C
- T_{dout} = 37°C
- T_{wout} = 29°C
- Z₁ = 4 cm
- A = 30 cm x 15,5 cm

b. Data yang diambil dari diagram psikrometri

- RH₁ = 33%

- $RH_2 = 56\%$
- $\omega_1 = 0,015$
- $\omega_2 = 0,022$

c. Data yang diperoleh dari table A₁ dan A₂ sifat-sifat cairan dan uap jenuh

- $\rho_{\text{udara inlet}} = 1,046 \text{ kg/m}^3$
- $hg_1 = 2549,1 \text{ kJ/kg}$
- $hg_2 = 2554,55 \text{ kJ/kg}$

Pengolahan Data :

1. Perhitungan Kecepatan (V_1)

$$V_1 = c \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{air}} SG_{\text{MINYAK}} (Z \sin 3,75) \times 10^{-3}}{\rho_{\text{UDARA}}}}$$

$$V_1 = 0,85 \times \sqrt{2 \times 9,81 \frac{1000 \times 0,826 \times (4 \sin 3,75) \times 10^{-3}}{1,046}}$$

$$V_1 = 1,7051 \text{ m/s}$$

2. Laju massa alir udara inlet (\dot{m}_1)

$$\dot{m}_1 = \rho_{\text{udara}} \times V_1 \times A$$

$$\dot{m}_1 = 1,046 \times 1,7051 \times 0,3 \times 0,155$$

$$\dot{m}_1 = 0,0829 \text{ kg/s}$$

3. Laju massa alir udara kering inlet (\dot{m}_a)

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_1}{(1 + \omega_1)}$$

$$\dot{m}_a = \frac{0,0829}{(1 + 0,015)}$$

$$\dot{m}_a = 0,0817 \text{ kg/s}$$

4. Laju massa alir udara outlet (m_2)

$$m_2 = m_a \times (1 + \omega_2)$$

$$m_2 = 0,0817 \times (1 + 0,022)$$

$$m_2 = 0,0835 \text{ kg / s}$$

5. *Transfer* Massa (Δm)

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

$$\Delta m = 0,0834 - 0,0829$$

$$\Delta m = 0,0005 \text{ kg / s}$$

6. Entalpi total udara sisi masuk (H_1)

$$H_1 = m_a \times (C_p T_{d1} + h_{g1} \times \omega_1)$$

$$H_1 = 0,0817 \times (1 \times 40 + 2549,1 \times 0,015)$$

$$H_1 = 6,3919 \text{ J / s}$$

7. Entalpi total sisi keluar (H_2)

$$H_2 = m_a \times (C_p T_{d2} + h_{g2} \times \omega_2)$$

$$H_2 = 0,0817 \times (1 \times 37 + 2554,55 \times 0,022)$$

$$H_2 = 7,6144 \text{ kJ / s}$$

8. *Transfer* Energi (ΔH)

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

$$\Delta H = 6,3919 - 7,6144$$

$$\Delta H = - 1,139 \text{ kJ/s}$$

(Tanda negatif menunjukkan udara pada sisi *outlet* mengalami penambahan energi hingga melebihi jumlah energi udara ketika masuk ke dalam *duct*).

4.1.3 Data Hasil Perhitungan

Berikut ini merupakan data hasil perhitungan pada variasi sudut *angular turbulator* dan tanpa pemasangan *angular turbulator*

A. Tabel 4.2 : Data hasil perhitungan entalpi total sisi masuk (H_1), entalpi total sisi keluar (H_2), dan *transfer energi* (ΔH)

Tanpa *angular turbulator*

No	Bukaan Blower	H_1 (kJ)	H_2 (kJ)	ΔH (kJ)
1	3	5,609	5,942	-0,333
2	4	6,477	6,925	-0,448
3	5	8,030	8,478	-0,448
4	6	8,298	9,085	-0,787
5	7	9,227	10,383	-1,156
6	8	10,201	10,856	-0,655
7	9	11,089	12,563	-1,474

Sudut 17°

No	Bukaan Blower	H_1 (kJ)	H_2 (kJ)	ΔH (kJ)
1	3	6,473	7,612	-1,139
2	4	7,238	8,536	-1,299
3	5	8,354	9,516	-1,163
4	6	8,867	10,840	-1,973
5	7	9,475	11,560	-2,085
6	8	10,195	12,372	-2,177
7	9	11,083	13,5531	-2,477

Sudut 26°

No	Bukaan Blower	H ₁ (kJ)	H ₂ (kJ)	ΔH (kJ)
1	3	7,238	8,589	-1,351
2	4	7,928	9,536	-1,608
3	5	8,354	9,840	-1,486
4	6	9,405	11,754	-2,350
5	7	10,195	12,725	-2,539
6	8	10,649	13,327	-2,679
7	9	12,296	15,474	-3,178

Sudut 31°

No	Bukaan Blower	H ₁ (kJ)	H ₂ (kJ)	ΔH (kJ)
1	3	7,238	7,999	-0,762
2	4	7,928	8,764	-0,836
3	5	8,354	9,172	-0,819
4	6	8,294	9,422	-1,128
5	7	8,133	9,658	-1,435
6	8	8,695	10,138	-1,444
7	9	9,721	11,343	-1,622

B. Tabel 4.3 : Data hasil perhitungan laju massa alir udara campuran masuk dan keluar (\dot{m}_1 dan \dot{m}), massa alir udara kering (\dot{m}_a) dan *transfer* massa ($\Delta \dot{m}$)

Tanpa *angular turbulator*

No	Bukaan blower (cm)	\dot{m}_1 (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_2 (kg/s)	$\Delta \dot{m}$ (kg/s)
1	3	0,0719	0,0708	0,0721	0,0002
2	4	0,0830	0,0817	0,0833	0,0003
3	5	0,1016	0,1000	0,1020	0,0004
4	6	0,1098	0,1082	0,1102	0,0005

5	7	0,1245	0,1228	0,1254	0,0009
6	8	0,1376	0,1357	0,1384	0,0008
7	9	0,1496	0,1476	0,1509	0,0013

Sudut 17°

No	Bukaan blower (cm)	\dot{m}_1 (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_2 (kg/s)	$\Delta \dot{m}$ (kg/s)
1	3	0,0829	0,0817	0,0835	0,0005
2	4	0,0927	0,0913	0,0934	0,0006
3	5	0,1057	0,1041	0,1064	0,0007
4	6	0,1173	0,1156	0,1183	0,0010
5	7	0,1278	0,1261	0,1289	0,0011
6	8	0,1375	0,1357	0,1387	0,0012
7	9	0,1495	0,1475	0,1509	0,0014

Sudut 26°

No	Bukaan blower (cm)	\dot{m}_1 (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_2 (kg/s)	$\Delta \dot{m}$ (kg/s)
1	3	0,0930	0,0910	0,0940	0,0008
2	4	0,1020	0,1000	0,1020	0,0009
3	5	0,1060	0,1040	0,1070	0,0008
4	6	0,1240	0,1230	0,1260	0,0012
5	7	0,1380	0,1360	0,1390	0,0014
6	8	0,1440	0,1420	0,1450	0,0014
7	9	0,1660	0,1640	0,1680	0,0017

Sudut 31°

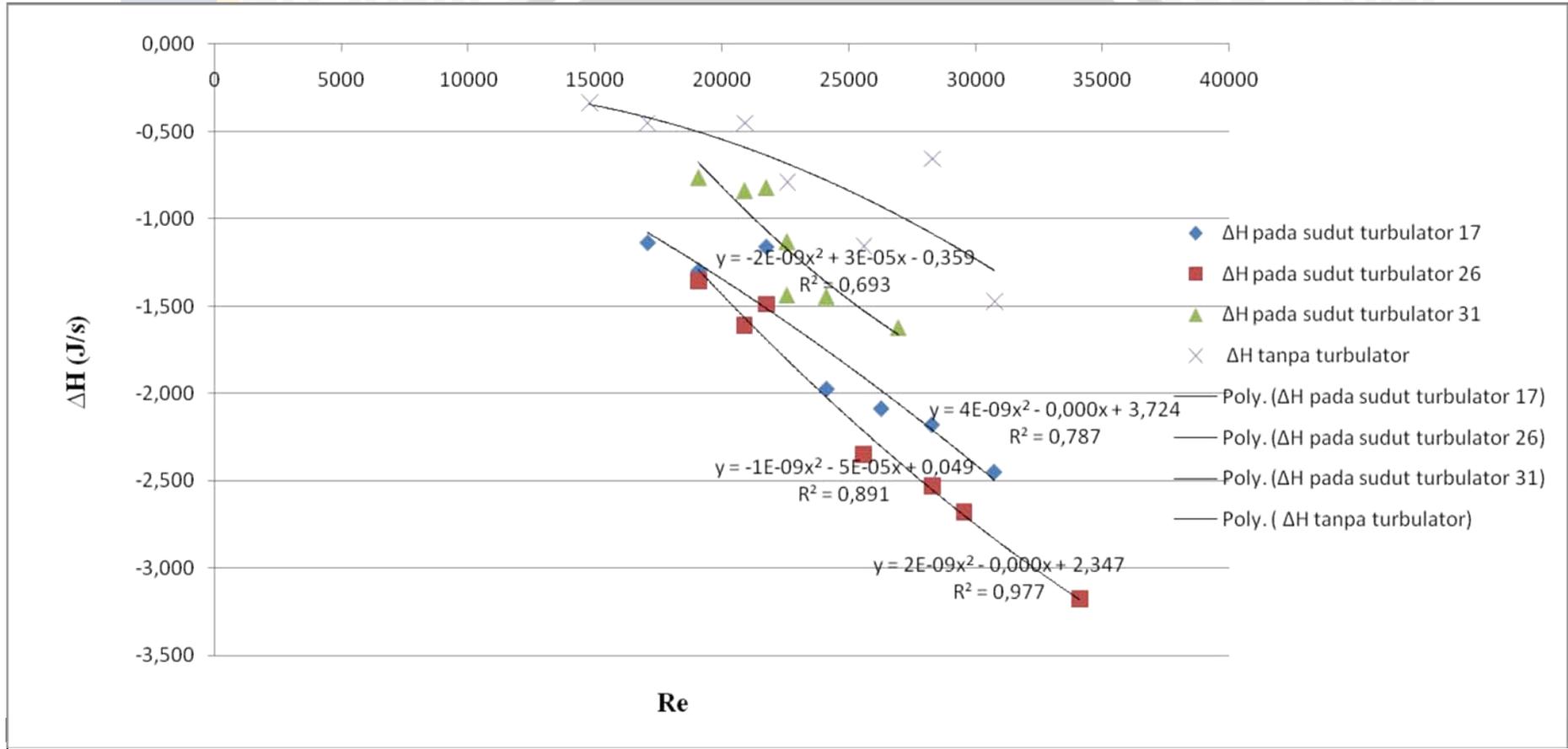
No	Bukaan blower (cm)	\dot{m}_1 (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_2 (kg/s)	$\Delta \dot{m}$ (kg/s)
1	3	0,0927	0,0913	0,0932	0,0005
2	4	0,1015	0,1000	0,1021	0,0005

3	5	0,1057	0,1040	0,1063	0,0006
4	6	0,1097	0,1081	0,1104	0,0008
5	7	0,1097	0,1082	0,1106	0,0009
6	8	0,1172	0,1156	0,1183	0,0010
7	9	0,1311	0,1293	0,1323	0,0012



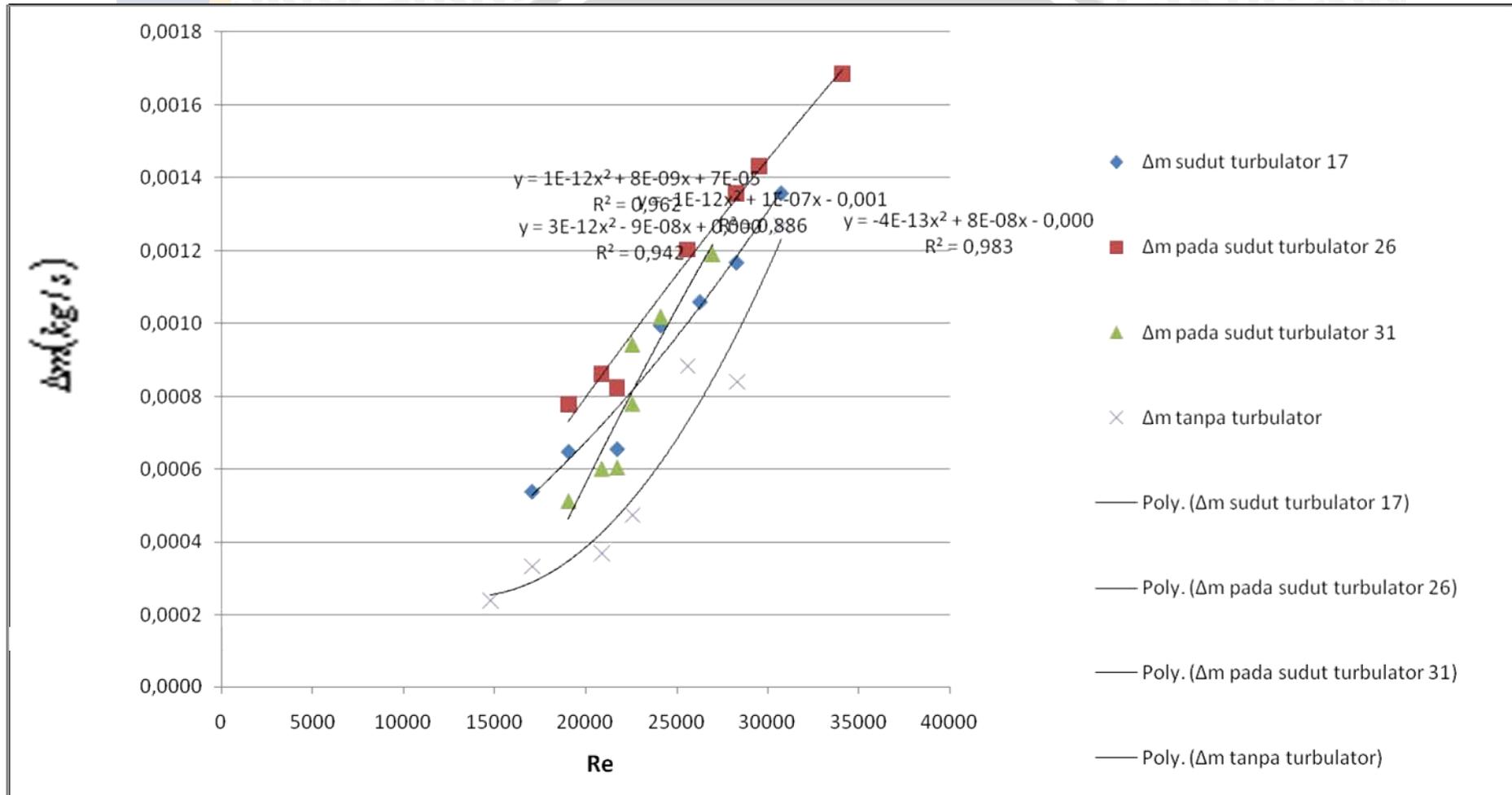
4.2 Grafik Hasil Perhitungan

4.2.1 Grafik Hubungan Antara *Reynold Number* (Re) dengan *Transfer Energi* (ΔH)



Gambar 4.1: Grafik Hubungan antara *Reynold Number* (Re) dengan *Transfer Energi* (ΔH)

4.2.2 Grafik Hubungan Antara *Reynold Number* (Re) dengan *Transfer Massa* ($\Delta\dot{m}$)



Gambar 4.2: Grafik Hubungan Antara *Reynold Number* (Re) dengan *Transfer Massa* ($\Delta\dot{m}$)

4.3 Pembahasan Grafik

4.3.1 Pembahasan Grafik Hubungan Antara *Reynold Number* (Re) Dengan *Transfer Energi* (ΔH)

Grafik pada gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara *Reynold Number* dengan *transfer energi* (H) pada *humidifier* tanpa *angular turbulator* dan dengan penambahan *angular turbulator* dengan sudut 17° , 26° , dan 31° . Nilai *transfer energi* (H) di atas menunjukkan nilai negatif. Hal ini disebabkan karena energi total yang dikandung udara pada sisi keluar (H2) lebih besar dari energi total yang dikandung oleh udara pada sisi masuk (H1). Kenaikan ini dikarenakan udara menerima energi dari air pada saat melewati semburan. *transfer energi* dirumuskan :

$$\Delta H = H1 - H2$$

Rumusan di atas memperlihatkan bahwa jumlah *transfer energi* (ΔH) merupakan selisih antara energi total udara pada sisi masuk (H1) dan energi total udara pada sisi keluar (H2). Apabila udara menerima energi dari air saat melewati semburan maka kandungan energi totalnya semakin besar. Oleh karena itu *transfer energi* bernilai negatif.

Energi total udara dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain massa alir udara kering (m_a), temperatur udara (T), kelembaban absolut (ω), dan entalpi uap (h_g). Hubungan antar parameter di atas dapat dilihat pada rumusan berikut :

$$H = \dot{m}_a(C_p T + \omega h_g)$$

Semakin besar nilai keempat parameter di atas maka semakin besar pula nilai energi total udara.

Pada grafik gambar 4.1 terlihat bahwa nilai *transfer energi* (ΔH) semakin meningkat seiring dengan peningkatan harga bilangan *Reynold* (Re) dimana harga bilangan tersebut menunjukkan besarnya kecepatan aliran udara. Kecepatan udara yang semakin besar maka bilangan *Reynold* juga semakin meningkat. Hubungan antara bilangan *Reynold* dan kecepatan udara terlihat pada persamaan berikut :

$$Re = V_{DH} \delta / \mu$$

Dengan pemasangan *angular turbulator* pada sudut tertentu maka akan mempengaruhi intensitas turbulensi dari aliran. Semakin turbulen aliran udara maka semakin besar harga bilangan *Reynold* yang diakibatkan meningkatnya kecepatan aliran udara sehingga laju massa alir udara yang mengalir semakin besar. Karena laju massa alir udara semakin besar maka udara yang mengalami proses perpindahan energi saat melewati semburan bertambah banyak. Hal inilah yang menyebabkan energi total udara pada sisi keluar lebih tinggi daripada energi total udara pada sisi masuk. Dari fenomena inilah terlihat

bahwa pemasangan *angular turbulator* mempunyai pengaruh yang nyata terhadap proses *transfer* energi udara.

Pada grafik gambar 4.1 terlihat bahwa pemasangan *angular turbulator* pada sudut tertentu memiliki harga *transfer* energi (ΔH) lebih besar daripada tanpa pemasangan *angular turbulator*. Nilai *transfer* energi tertinggi terjadi pada pemasangan *angular turbulator* 26° yaitu $\Delta H = -3,178$ kJ/s pada $Re = 34103$, kemudian $\Delta H = -2,679$ kJ/s pada $Re = 29534$, dan $\Delta H = -2,529$ kJ/s pada $Re = 28276$. Nilai *transfer* energi pada pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 26° memiliki nilai terbesar dibanding sudut lain karena pada sudut ini terjadi intensitas turbulensi tertinggi dibandingkan yang lain. Semakin tinggi intensitas turbulensi maka harga bilangan *Reynold* yang menunjukkan nilai kecepatan aliran udara meningkat sehingga massa udara yang mengalir semakin banyak yang akhirnya meningkatkan nilai *transfer* energi udara.

4.3.2 Pembahasan Grafik Hubungan Antara *Reynold Number* (Re) Dengan *Transfer* Massa ($\Delta \dot{m}$)

Grafik gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara bilangan *Reynold* (Re) dan *transfer* massa pada *humidifier* yang dipasang *angular turbulator* dengan sudut 17° , 26° , 31° dan tanpa *angular turbulator*. Pemasangan *angular turbulator* dengan sudut tertentu dimaksudkan untuk meningkatkan intensitas turbulensi aliran dimana semakin turbulen suatu aliran maka harga bilangan *Reynold* semakin besar. Bilangan *Reynold* menunjukkan kecepatan aliran udara, dimana semakin besar harga bilangan *Reynold* maka kecepatan aliran juga semakin besar. Nilai bilangan *Reynold* di atas didapat pada bukaan blower sebesar 3-9cm. Semakin besar bukaan blower maka kecepatan aliran udara semakin besar sehingga harga bilangan *Reynold* juga meningkat.

Transfer massa merupakan selisih antara massa uap air yang dikandung oleh udara pada sisi keluar dan massa uap air yang dikandung oleh udara pada sisi masuk. Kandungan uap air udara dapat diketahui dengan mengukur nilai kelembaban absolut. Kelembaban absolut sendiri didapatkan berdasarkan harga temperatur bola kering dan temperatur bola basah. Hubungan antara kelembaban absolut dan massa uap air dapat dilihat dari persamaan berikut :

$$\omega = \dot{m}_v / \dot{m}_a$$

Dari rumusan di atas terlihat bahwa nilai kelembaban absolut merupakan perbandingan antara massa uap air (\dot{m}_v) dan massa udara kering (\dot{m}_a). Dengan massa udara

kering tetap dan massa uap air yang semakin besar maka kelembaban absolut udara akan meningkat. Pada proses *humidifying* terjadi penambahan kandungan uap air ke dalam udara dimana prosesnya dilakukan dengan cara melewati udara yang memiliki temperatur lebih tinggi melewati semburan air sehingga terjadi proses perpindahan massa uap air akibat proses penguapan.

Transfer massa kita hitung dengan mengukur selisih antara massa uap air udara pada sisi keluar dengan massa uap air udara pada sisi masuk sesuai dengan rumus :

$$\Delta \dot{m} = \dot{m}_2 - \dot{m}_1$$

Semakin besar kandungan uap air udara pada sisi keluar menunjukkan bahwa *transfer* massa yang terjadi juga besar sebagai akibat dari penguapan.

Pada grafik gambar 4.2 terlihat bahwa dengan pemasangan *angular turbulator* dengan sudut tertentu memiliki harga *transfer* energi lebih tinggi daripada tanpa angular turbulator. Harga *transfer* massa tertinggi terjadi pada pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 26° yaitu $\Delta \dot{m} = 0,0017$ (kg/s) pada bilangan *Reynold* = 34103, kemudian diikuti $\Delta \dot{m} = 0,0014$ (kg/s) pada bilangan *Reynold* = 29534, dan $\Delta \dot{m} = 0,0012$ (kg/s) pada bilangan *Reynold* = 25577. Nilai *transfer* massa pada pemasangan angular turbulator dengan sudut 26° memiliki harga tertinggi karena pada sudut ini terjadi intensitas turbulensi terbesar dibandingkan sudut lain. Dengan semakin besar intensitas turbulensi maka harga bilangan *Reynold* juga meningkat sehingga kecepatan aliran udara bertambah besar yang artinya semakin banyak massa udara yang mengalir. Hal inilah yang menyebabkan proses penguapan saat di semburan semakin besar sehingga *transfer* massa yang terjadi menjadi lebih tinggi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Penambahan *angular turbulator* pada sudut tertentu dapat meningkatkan intensitas turbulensi sehingga nilai *Reynold Number* semakin besar sebagai akibat dari peningkatan kecepatan udara, hal ini mengakibatkan proses *transfer* energi dan massa juga meningkat.

Transfer energi bernilai negatif karena energi ditransfer dari air ke udara akibat proses penguapan udara.

Nilai *transfer* energi tertinggi terjadi pada pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 26° yaitu sebesar $-3,178$ kJ/s dengan *Reynold Number* = 34103. Begitu pula *transfer* massa tertinggi terjadi pada pemasangan *angular turbulator* dengan sudut 26° yaitu sebesar $0,0017$ (kg/s) dengan *Reynold Number* = 34103.

5.2 Saran

1. Dilakukan penelitian lebih lanjut dengan penambahan *angular turbulator* dengan variasi bentuk yang berbeda
2. Perhitungan *transfer* energi dan massa dilakukan dengan pendekatan metode perpindahan panas sehingga dapat diketahui nilai energi yang terlibat.

DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Yunus A; 2003: *Heat Transfer A Practical Approach*: 2nd edition; McGraw-Hill Companies Inc, New York.
- Cengel, Yunus A. dan Robert H. Turner; 2001: *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*; McGraw-Hill Companies Inc, New York.
- Daugherty, Robert L; 1977: *Fluid Mechanics With Engineering Application*; McGraw-Hill Book Companies, New York.
- El-Wakil, M.M; 1992: Instalasi Pembangkit Daya; Alih bahasa: Ir. E. Jasfi M. Sc; Erlangga, Jakarta.
- Holman, J.P; 1995: *Perpindahan Kalor*; Erlangga, Jakarta.
- Incropera, F.P. dan De Witt, D. P; 1981: *Fundamental Of Heat Transfer*; 2nd edition; John Willey and Sons, New York.
- Kreith, Frank; 1986: *Prinsip-prinsip Perpindahan Kalor*; Alih bahasa: Arko Prijono M.Sc.; Erlangga, Jakarta.



Lampiran 1 : Pengolahan data tanpa pemasangan *angular turbulator*

Bukaan	Td in	Twin	Td out	Tw out	z	RH ₁ (%)	RH ₂ (%)	ω ₁ (%)	ω ₂ (%)	ρ udara (kg/m ³)	V1 (m/s)	Re	ṁ ₁ (kg/s)	ṁ _a (kg/s)	ṁ ₂ (kg/s)	Δṁ(kg/s)	hg1 (kJ/kg)
3	40	26	36	27	3	33	42	0,015	0,0188	1,046	1,4774	14774	0,0719	0,0708	21	0,0002	2549,1
4	40	26	35	27	4	33	47	0,015	0,0195	1,046	1,7060	17060	0,0830	0,0817	33	0,0003	2549,1
5	40	25,5	35	27	6	32	47	0,016	0,0195	1,046	2,0894	20894	0,1016	0,1000	20	0,0004	2548,2
6	40	25,25	36	27	7	31	42	0,014	0,0188	1,046	2,2568	22568	0,1098	0,1082	02	0,0005	2547,8
7	40	25	31	27	9	29	73	0,014	0,0210	1,046	2,5590	25590	0,1245	0,1228	54	0,0009	2547,3
8	40	25	29	26	11	29	78	0,014	0,0200	1,046	2,8291	28291	0,1376	0,1357	84	0,0008	2547,3
9	40	25	28	27	13	29	92	0,014	0,0224	1,046	3,0755	30755	0,1496	0,1476	09	0,0013	2547,3

hg2 (kJ/kg)	H ₁ (kJ/s)	H ₂ (kJ/s)	ΔH(kJ/s)
2550,9	5,609	5,942	-0,333
2550,9	6,477	6,925	-0,448
2550,9	8,030	8,478	-0,448
2550,9	8,298	9,085	-0,787
2550,9	9,227	10,383	-1,156
2549,1	10,201	10,856	-0,655
2550,9	11,089	12,563	-1,474

Lampiran 2 : Pengolahan data untuk variasi sudut *angular turbulator* 17°

Bukaan	Td in	Twin	Td out	Tw out	z	RH ₁ (%)	RH ₂ (%)	ω_1	ω_2	ρ udara (kg/m ³)	V1 (m/s)	Re	\dot{m}_1 (kg/s)	\dot{m}_a (kg/s)	\dot{m}_2 (kg/s)	$\Delta\dot{m}$ (kg/s)	hg1 (kJ/kg)
3	40	26	37	29	4	33	56	0,015	0,0220	1,046	1,705131	17051	0,0829	0,0817	35	0,0005	2549,1
4	40	26	36	29	5	33	60	0,015	0,0225	1,046	1,906395	19064	0,0927	0,0913	34	0,0006	2549,1
5	40	25,5	35	28,5	6,5	32	63	0,016	0,0221	1,046	2,173624	21736	0,1057	0,1041	64	0,0007	2548,2
6	40	25,25	35	29	8	31	64	0,014	0,0230	1,046	2,41142	24114	0,1173	0,1156	83	0,0010	2547,8
7	40	25	35	28,5	9,5	29	63	0,014	0,0222	1,046	2,627784	26278	0,1278	0,1261	89	0,0011	2547,3
8	40	25	34	28,5	11	29	63	0,014	0,0224	1,046	2,82764	28276	0,1375	0,1357	87	0,0012	2547,3
9	40	25	33	28,5	13	29	63	0,014	0,0230	1,046	3,073969	30740	0,1495	0,1475	09	0,0014	2547,3

hg2 (kJ/kg)	H ₁ (kJ/s)	H ₂ (kJ/s)	ΔH (kJ/s)
2554,55	6,473	7,612	-1,139
2554,55	7,238	8,536	-1,299
2553,625	8,354	9,516	-1,163
2554,55	8,867	10,840	-1,973
2553,625	9,475	11,560	-2,085
2553,625	10,195	12,372	-2,177
2554,18	11,083	13,531	-2,447

Lampiran 3 : Pengolahan data untuk variasi sudut *angular turbulator* 26°

Bukaan	Td in	Twin	Td out	Tw out	z	RH ₁ (%)	RH ₂ (%)	ω ₁ (%)	ω ₂ (%)	ρ udara (kg/m ³)	V1 (m/s)	Re	m ₁ (kg/s)	m _a (kg/s)	m ₂ (kg/s)	Δm(kg/s)	hg1 (kJ/kg)
3	40	26	33	29	5	33	74	0,015	0,0239	1,046	1,906	19064	0,093	0,091	0,094	0,0008	2549,1
4	40	26	34	29,5	6	33	72	0,015	0,0240	1,046	2,088	20884	0,102	0,100	0,102	0,0009	2549,1
5	40	25,5	34	29	6,5	32	69	0,016	0,0237	1,046	2,174	21736	0,106	0,104	0,107	0,0008	2548,2
6	40	25,25	34	29,6	9	31	73	0,014	0,0242	1,046	2,558	25577	0,124	0,123	0,126	0,0012	2547,8
7	40	25	33	29	11	29	74	0,014	0,0238	1,046	2,828	28276	0,138	0,136	0,139	0,0014	2547,3
8	40	25	33	29,1	12	29	76	0,014	0,0239	1,046	2,953	29534	0,144	0,142	0,145	0,0014	2547,3
9	40	25	33	29,2	16	29	78	0,014	0,0241	1,046	3,410	34103	0,166	0,164	0,168	0,0017	2547,3

hg2 (kJ/kg)	H ₁ (kJ/s)	H ₂ (kJ/s)	ΔH(kJ/s)
2554,55	7,238	8,589	-1,351
2555,475	7,928	9,536	-1,608
2554,55	8,354	9,840	-1,486
2555,66	9,405	11,754	-2,350
2554,55	10,195	12,725	-2,529
2554,735	10,649	13,327	-2,679
2554,92	12,296	15,474	-3,178

Lampiran 4 : Pengolahan data untuk variasi sudut *angular turbulator* 31°

Bukaan	Td in	Twin	Td out	Tw out	z	RH ₁ (%)	RH ₂ (%)	ω ₁ (%)	ω ₂ (%)	ρ udara (kg/m ³)	V1 (m/s)	Re	ṁ1 (kg/s)	ṁa (kg/s)	ṁ2 (kg/s)	Δṁ(kg/s)	hg1 (kJ/kg)
3	40	26	34	27,8	5	33	61	0,015	0,0210	1,046	1,906	19064	0,09273	0,09132	0,09324	0,0005	2549,1
4	40	26	33	27,6	6	33	66	0,015	0,0214	1,046	2,088	20884	0,10158	0,10003	0,10218	0,0006	2549,1
5	40	25,5	33	27,8	6,5	32	67	0,016	0,0216	1,046	2,174	21736	0,10572	0,10408	0,10633	0,0006	2548,2
6	40	25,25	32	27,5	7	31	70	0,014	0,0216	1,046	2,256	22557	0,10971	0,10816	0,11049	0,0008	2547,8
7	40	25	31	27,5	7	29	76	0,014	0,0225	1,046	2,256	22557	0,10971	0,10822	0,11066	0,0009	2547,3
8	40	25	30	27,5	8	29	81	0,014	0,0226	1,046	2,411	24114	0,11729	0,11569	0,11831	0,0010	2547,3
9	40	25	29	27,5	10	29	90	0,014	0,0230	1,046	2,696	26960	0,13113	0,12935	0,13232	0,0012	2547,3

hg2 (kJ/kg)	H ₁ (kJ/s)	H ₂ (kJ/s)	ΔH(kJ/s)
2552,34	7,238	7,999	-0,762
2551,98	7,928	8,764	-0,836
2552,34	8,354	9,172	-0,819
2551,8	8,294	9,422	-1,128
2551,8	8,133	9,568	-1,435
2550	8,695	10,138	-1,444
2551,8	9,721	11,343	-1,622

Lampiran 5 : Tabel A-1 : Sifat-sifat cairan dan uap jenuh

APPENDIKS

Tabel A-1 Air: Sifat-sifat cairan dan uap jenuh

t, °C	Tekanan jenuh, kPa	Volume spesifik, m ³ /kg		Entalpi, kJ/kg		Entropi, kJ/kg · K	
		Cairan	Gas	Cairan	Gas	Cairan	Gas
0	0,6108	0,0010002	206,3	-0,04	2501,6	-0,0002	9,1577
2	0,7055	0,0010001	179,9	8,39	2505,2	0,0306	9,1047
4	0,8129	0,0010000	157,3	16,80	2508,9	0,0611	9,0526
6	0,9345	0,0010000	137,8	25,21	2512,6	0,0913	9,0015
8	1,0720	0,0010001	121,0	33,60	2516,2	0,1213	8,9513
10	1,2270	0,0010003	106,4	41,99	2519,9	0,1510	8,9020
12	1,4014	0,0010004	93,84	50,38	2523,6	0,1805	8,8536
14	1,5973	0,0010007	82,90	58,75	2527,2	0,2098	8,8060
16	1,8168	0,0010010	73,38	67,13	2530,9	0,2388	8,7593
18	2,062	0,0010013	65,09	75,50	2534,5	0,2677	8,7135
20	2,337	0,0010017	57,84	83,86	2538,2	0,2963	8,6684
22	2,642	0,0010022	51,49	92,23	2541,8	0,3247	8,6241
24	2,982	0,0010026	45,93	100,59	2545,5	0,3530	8,5806
26	3,360	0,0010032	41,03	108,95	2549,1	0,3810	8,5379
28	3,778	0,0010037	36,73	117,31	2552,7	0,4088	8,4959
30	4,241	0,0010043	32,93	125,66	2556,4	0,4365	8,4546
32	4,753	0,0010049	29,57	134,02	2560,0	0,4640	8,4140
34	5,318	0,0010056	26,60	142,38	2563,6	0,4913	8,3740
36	5,940	0,0010063	23,97	150,74	2567,2	0,5184	8,3348
38	6,624	0,0010070	21,63	159,09	2570,8	0,5453	8,2962
40	7,375	0,0010078	19,55	167,45	2574,4	0,5721	8,2583
42	8,198	0,0010086	17,69	175,31	2577,9	0,5987	8,2209
44	9,100	0,0010094	16,04	184,17	2581,5	0,6252	8,1842
46	10,086	0,0010103	14,56	192,53	2585,1	0,6514	8,1481
48	11,162	0,0010112	13,23	200,89	2588,6	0,6776	8,1125
50	12,335	0,0010121	12,05	209,26	2592,2	0,7035	8,0776
52	13,613	0,0010131	10,98	217,62	2595,7	0,7293	8,0432
54	15,002	0,0010140	10,02	225,98	2599,2	0,7550	8,0093
56	16,511	0,0010150	9,159	234,35	2602,7	0,7804	7,9759
58	18,147	0,0010161	8,381	242,72	2606,2	0,8058	7,9431
60	19,920	0,0010171	7,679	251,09	2609,7	0,8310	7,9108
62	21,84	0,0010182	7,044	259,46	2613,2	0,8560	7,8790
64	23,91	0,0010193	6,469	267,84	2616,6	0,8809	7,8477
66	26,15	0,0010205	5,948	276,21	2620,1	0,9057	7,8168
68	28,56	0,0010217	5,476	284,59	2623,5	0,9303	7,7864
70	31,16	0,0010228	5,046	292,97	2626,9	0,9548	7,7565

Lampiran 6 : Tabel A-2 : Sifat-sifat termodinamika udara jenuh pada tekanan atmosfer 101,325 kPa

Apendix

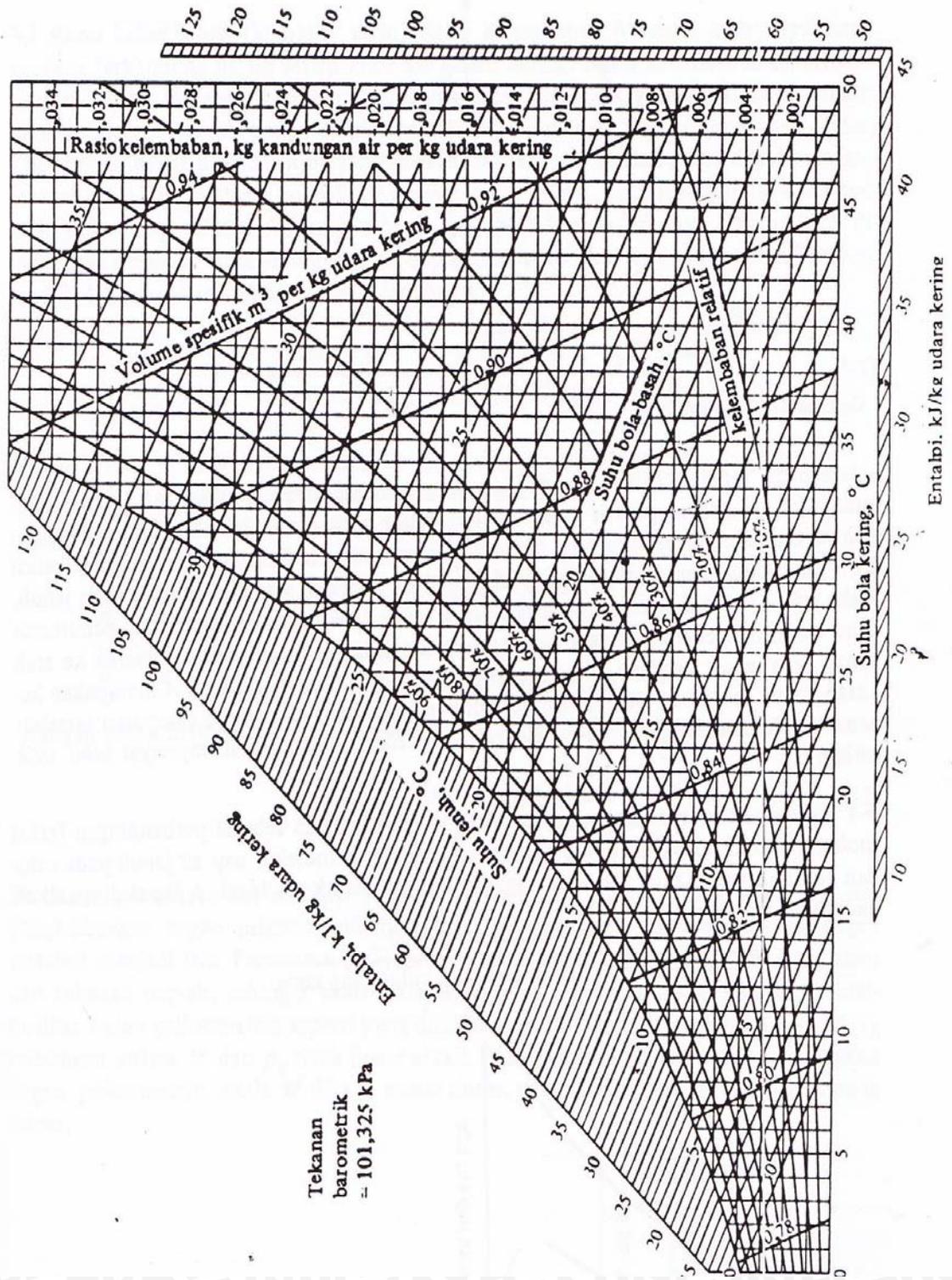
391

Tabel A-2 Lembab udara:² sifat-sifat termodinamik udara jenuh pada tekanan atmosfer 101,325 kPa.

$t, ^\circ\text{C}$	Tekanan gas, kPa	Perbandingan kelembaban, kg/kg	Volume spesifik, m^3/kg	Entalpi, kJ/kg
-40	0,01283	0,000079	0,6597	-40,041
-35	0,02233	0,000138	0,6740	-34,868
-30	0,03798	0,000234	0,6884	-29,600
-25	0,06324	0,000390	0,7028	-24,187
-20	0,10318	0,000637	0,7173	-18,546
-18	0,12482	0,000771	0,7231	-16,203
-16	0,15056	0,000930	0,7290	-13,795
-14	0,18107	0,001119	0,7349	-11,314
-12	0,21716	0,001342	0,7409	-8,745
-10	0,25971	0,001606	0,7469	-6,073
-8	0,30975	0,001916	0,7529	-3,285
-6	0,36846	0,002280	0,7591	-0,360
-4	0,43716	0,002707	0,7653	2,724
-2	0,51735	0,003206	0,7716	5,991
0	0,61072	0,003788	0,7781	9,470
1	0,6566	0,00407	0,7813	11,200
2	0,7055	0,00438	0,7845	12,978
3	0,7575	0,00471	0,7878	14,807
4	0,8130	0,00505	0,7911	16,692
5	0,8719	0,00542	0,7944	18,634
6	0,9347	0,00582	0,7978	20,639
7	1,0013	0,00624	0,8012	22,708
8	1,0722	0,00668	0,8046	24,848
9	1,1474	0,00716	0,8081	27,059
10	1,2272	0,00766	0,8116	29,348
11	1,3119	0,00820	0,8152	31,716
12	1,4017	0,00876	0,8188	34,172
13	1,4969	0,00937	0,8225	36,719
14	1,5977	0,01001	0,8262	39,362
15	1,7044	0,01069	0,8300	42,105
16	1,8173	0,01141	0,8338	44,955
17	1,9367	0,01218	0,8377	47,918
18	2,0630	0,01299	0,8417	50,998
19	2,1964	0,01384	0,8457	54,205
20	2,3373	0,01475	0,8498	57,544
21	2,4861	0,01572	0,8540	61,021
22	2,6431	0,01674	0,8583	64,646
23	2,8086	0,01781	0,8626	68,425
24	2,9832	0,01896	0,8671	72,366
25	3,1671	0,02016	0,8716	76,481
26	3,3609	0,02144	0,8763	80,777
27	3,5649	0,02279	0,8811	85,263
28	3,7797	0,02422	0,8860	89,952
29	4,0055	0,02572	0,8910	94,851
30	4,2431	0,02732	0,8961	99,977
31	4,4928	0,02900	0,9014	105,337
32	4,7552	0,03078	0,9068	110,946
33	5,0308	0,03266	0,9124	116,819
34	5,3201	0,03464	0,9182	122,968
35	5,6237	0,03674	0,9241	129,411
36	5,9423	0,03895	0,9302	136,161
37	6,2764	0,04129	0,9365	143,239
38	6,6265	0,04376	0,9430	150,660
39	6,9935	0,04636	0,9497	158,445
40	7,3778	0,04911	0,9567	166,615



Lampiran 7: Diagram Psikrometri



Lampiran 8 : Physical properties of fluids

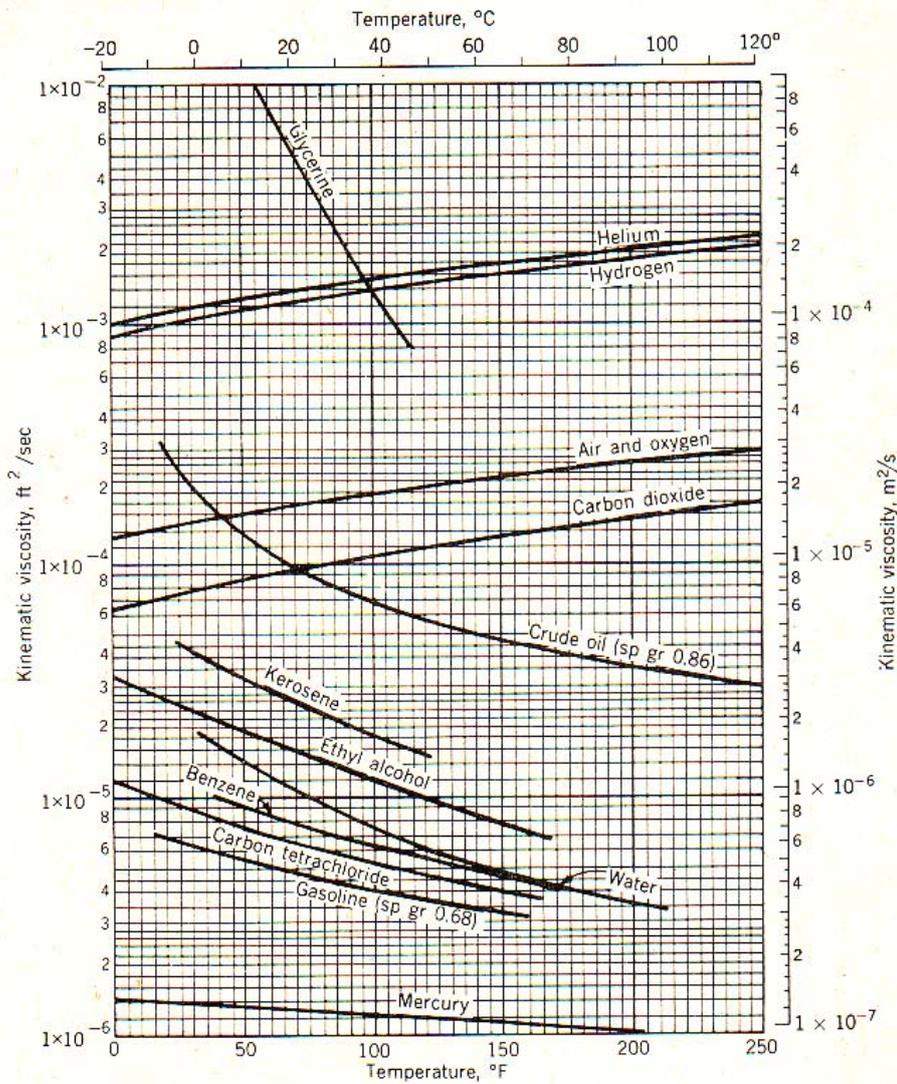


Figure C.2 Kinematic viscosities of certain gases and liquids. The gases are at standard pressure.