

**PENGARUH DEBIT AIR TERHADAP *TRANSFER* ENERGI DAN MASSA
PADA *DIRECT CONTACT HUMIDIFIER***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun Oleh :

NANO WILDA KHUSNATA.

NIM. 0510620072-62

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2010

**PENGARUH DEBIT AIR TERHADAP *TRANSFER* ENERGI DAN MASSA
PADA *DIRECT CONTACT HUMIDIFIER***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

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



Disusun Oleh :

**NANO WILDA KHUSNATA
NIM. 0510620072-62**

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

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan benar. Sholawat dan salam semoga selalu diberikan kepada Nabi besar Muhammad SAW yang telah menyempurnakan peradaban manusia dengan Islam.

Penyusunan dan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dan bantuan 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 masukan, bimbingan dan saran yang sangat bermanfaat 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. Bapak Harno dan Ibu Rini selaku kedua orang tua saya, mas Dhian dan dik Lia di Ngawi yang telah memberikan dukungan moril dan motivasi yang sangat berarti sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan baik dan benar.
6. Lailatul M dan Joko Rudi S selaku teman seperjuangan yang banyak sekali membantu dalam penyusunan skripsi ini.
7. Teman-teman asisten laboratorium Fluida Lailatul, Feri, Figur, Rizal, Andri yang selalu kompak selalu ada untuk tempat diskusi.
8. Teman-teman kos Sardo yang sangat "kreatif" dan mendukung dalam berdiskusi.
9. Teman-teman M'OLIMO yang sangat kompak dan banyak membantu dalam kegiatan seminar dan lain-lain.

Akhir kata, penulis mengharapkan skripsi ini dapat memberikan manfaat yang positif pada pembaca. Semoga memunculkan ide-ide baru, saran dan kritik yang membangun untuk kedepannya.

Malang, Januari 2010

Penulis

RINGKASAN

Nano Wilda Khusnata, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2010, *Pengaruh Debit Air Terhadap Trasfer Energi Dan Massa Pada Direct Contact Humidifier*, Dosen Pembimbing : Ir. Djoko Sutikno, M.Eng. dan Prof. Dr. Ir. Rudi Soenoko, M.Eng. Sc.

Ilmu pengetahuan dan teknologi pada saat ini mengalami perkembangan pesat dimana salah satu tujuannya adalah untuk menciptakan suatu kondisi udara yang nyaman dengan kelembaban yang diinginkan. Alat tersebut biasa dikenal dengan istilah *humidifier* atau alat pengatur atau penambah kelembaban sedangkan sistem pengondisiannya disebut dengan *humidification system*. *Humidifier* memiliki prinsip kerja dengan sistem pertukaran kalor kontak langsung (*direct contact heating principles*), dimana udara bertemperatur tinggi disinggungkan secara langsung dengan air ataupun uap air sehingga alat ini disebut *direct contact humidifier*. Untuk meningkatkan proses humidifikasi yang terjadi bisa dengan berbagai cara, salah satunya adalah dengan memvariasikan besar dari debit air yang disemprotkan ke udara.

Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimental nyata. Pada penelitian ini digunakan *wiper washer assy* sebagai alat bantu untuk memompakan air dari penampung yang akan disemprotkan melalui *spray nozzle*. Variasi debit air yang digunakan sebesar $8.66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7.83 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7.66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7.5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $5.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Sedangkan variasi temperatur udara masuk yang ditentukan sebesar 40°C , 45°C dan 50°C .

Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar debit air yang disemprotkan maka *transfer* energinya semakin kecil karena proses yang terjadi adalah pengembunan dan *transfer* massanya akan semakin besar. *Transfer* energy tertinggi yaitu 1,8108 kJ didapat pada debit air sebesar $5.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan temperatur udara masuk 50°C . Sedangkan *transfer* massa terbesar yaitu 0,0002 didapat pada debit air sebesar $8.66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ dan temperatur udara *inlet* 40°C .

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi pada saat ini mengalami perkembangan pesat yang bertujuan untuk menghasilkan sesuatu yang inovatif dan aplikatif. Banyak sekali cabang ilmu pengetahuan teknologi salah satunya adalah bidang engineering atau rekayasa, salah satu tujuan dari ilmu tersebut antara lain adalah untuk menciptakan suatu kondisi udara yang nyaman dengan kelembaban yang diinginkan.

Kondisi tiap ruangan memiliki persentase kelembaban udara yang berbeda-beda. Kondisi tersebut terjadi karena kadar uap air yang terkandung di udara pada tiap ruangan juga berbeda-beda. Tetapi kita bisa mengatur tingkat kelembaban yang diinginkan di tiap ruangan sesuai dengan kebutuhan. Dengan mengkondisikan kelembaban suatu ruangan kita dapat memperoleh nilai kelembaban yang sesuai untuk tujuan tertentu. Misalnya, kelembaban untuk udara yang bersirkulasi didalam rumah, memiliki kelembaban berkisar 40%-70% dengan suhu berkisar antara 18° - 30°C. Selain itu juga pada industri tekstil kelembaban relatif yang dibutuhkan berkisar antara 50% sampai 85% pada suhu 24°C sampai 30°C (Kulshresta, 1989). Dengan tujuan tersebut, kita dapat menggunakan suatu alat yang berfungsi untuk mengatur nilai kelembaban udara dari suatu ruangan. Alat tersebut biasa dikenal dengan istilah *humidifier* atau alat pengatur atau penambah kelembaban sedangkan sistem pengondisiannya disebut dengan *humidification system*. *Humidification system* merupakan suatu sistem penambahan uap air kedalam udara dengan jalan menyemprotkan air atau uap air ke kealiran udara.

Humidifier memiliki prinsip kerja dengan sistem 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 ujung 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. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh debit air yang disemprotkan pada sistem dengan jalan memvariasikan luas penampang dari saluran pipa pada *spray nozzle*. Dengan memvariasikan luas penampang dari saluran pipa pada *spray nozzle*, maka kita akan mendapatkan debit air yang berbeda sehingga kita dapat mengetahui pengaruh debit air terhadap *transfer* energi dan massa. Jika *transfer* energi dan massa meningkat maka proses humidifikasi yang terjadi pada sistem akan semakin tinggi, akibatnya kelembaban udara pada sistem akan meningkat. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu penelitian mengenai pengaruh variasi debit air terhadap *transfer* energi dan massa pada *direct contact humidifier*.

1.2 Rumusan Masalah

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

Bagaimana pengaruh debit air terhadap *transfer* energi dan massa pada *direct contact humidifier*?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran udara yang masuk sistem 1,482 m/s (pada bukaan *blower* 3 cm).
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 kedalam sistem dibuat konstan (25°C).
6. Temperatur udara *inlet* divariasikan berturut-turut sebesar 40 °C, 45 °C dan 50 °C .

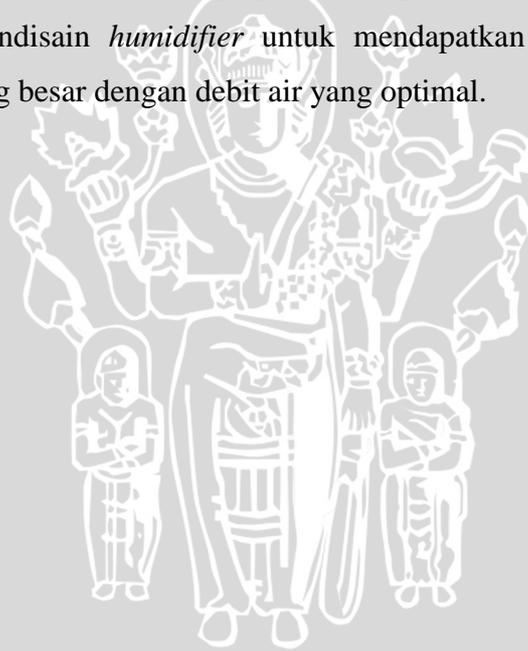
1.4 Tujuan Penelitian

Mengetahui pengaruh variasi debit air 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 termodinamika.
2. Dengan penelitian ini, akan diperoleh debit air yang optimal untuk mendapatkan *transfer* energi dan massa yang besar pada *direct contact humidifier*.
3. Memberikan kontribusi bagi perkembangan IPTEK dan dunia industri dalam mendisain *humidifier* untuk mendapatkan *transfer* energi dan massa yang besar dengan debit air yang optimal.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

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. Tujuan dari penelitian ini adalah 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. Kesimpulan dari penelitian ini adalah pada kondisi pendinginan, kelembaban dan temperatur outlet akan menurun seiring dengan peningkatan temperatur dan massa alir air serta seiring dengan penurunan temperatur dan kecepatan udara. Sebaliknya, kelembaban dan temperatur outlet udara akan semakin meningkat pada kondisi pemanasan seiring dengan peningkatan temperatur dan massa alir air dan juga seiring dengan penurunan kecepatan udara.

C. Dalet, O. Lottin, G. Maranzana, dan M. Diny (2008) melakukan penelitian mengenai kriteria untuk karakteristik dan performa dari *fuel cell humidifier*. Yang paling berpengaruh adalah pada membran pertukaran proton *fuel cell* (sel bahan bakar) atau PEMFC, dimana kita harus mengoptimalkan PEMFC untuk mendapatkan performa optimal dari *humidifier*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan dua parameter dari efisiensi yang sesuai untuk semua teknologi humidifikasi dan karakteristik dari performa udara *humidifier* pada *transfer* massa dan perpindahan panas. Parameter ini memungkinkan untuk membandingkan teknologi yang berbeda dan untuk menentukan untuk semuanya dalam kisaran performa yang diperlukan untuk memasok *fuel cell* (sel bahan bakar) secara tepat pada *humidifier* gas.

2.2 Humidifier

Humidifier adalah suatu alat penukar kalor, dimana terjadi *transfer* kalor antara udara bertemperatur tinggi ke air yang bertemperatur lebih rendah. *Humidifier* memakai prinsip kontak langsung antara udara bertemperatur tinggi dengan air yang bertemperatur lebih rendah yang berfungsi untuk meningkatkan

kelembaban udara melalui proses humidifikasi. Proses humidifikasi, merupakan suatu proses yang dapat menambah kadar air dalam udara.. Dengan mengkondisikan kelembaban suatu ruangan kita dapat memperoleh nilai kelembaban yang sesuai untuk tujuan tertentu. Misalnya, kelembaban untuk udara yang bersirkulasi didalam rumah, memiliki kelembaban berkisar 40%-70% dengan suhu berkisar antara 18° - 30°C ([Gracia Emerentiana, 2009](#)). Dengan tujuan-tujuan tersebut, kita dapat menggunakan suatu alat yang berfungsi untuk mengatur nilai kelembaban udara dari suatu ruangan.

2.2.1 Jenis-Jenis *Humidifier*

1. *Impeller Humidifier*

Impeller bertujuan untuk memecah air yang keluar dari *spray nozzle* dengan cara diputar oleh impeller yang berputar sehingga air menjadi tetesan air yang akan terhanyut pada udara. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 2.1.

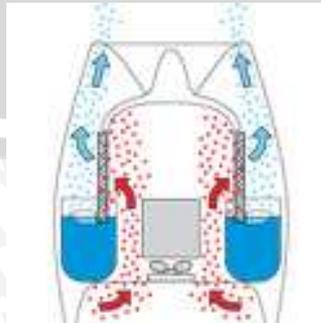


Gambar 2.1 : *Impeller Humidifier*

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

2. *Vaporizer Humidifier*

Humidifier jenis ini menggunakan energi listrik untuk memanaskan air sampai terbentuk uap air. Seperti bisa kita lihat pada gambar 2.2, uap air akan dilepaskan ke udara sehingga kelembaban udara akan meningkat.



Gambar 2.2 : *Vaporizer Humidifier*

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

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

Pada *humidifier* jenis ini, *humidifier* tidak menggunakan energi listrik sama sekali, hanya menggunakan sistem katup dan pipa kapiler yang bertujuan untuk mengembunkan air menjadi uap air. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 2.3.

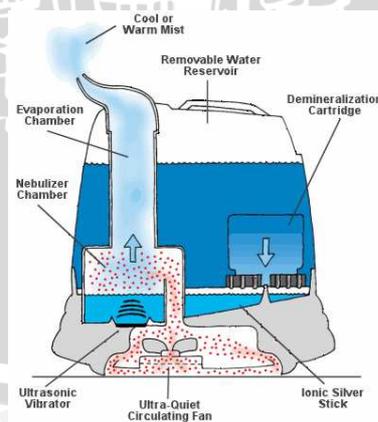


Gambar 2.3 : *Hydro-Pneumatic Capillary System Humidifier (Non Electric Humidifier)*

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

4. *Ultrasonik Humidifier*

Pada sistem *humidifier* didalamnya dibuat mekanisme getaran ultrasonik. Getaran ultrasonik membantu proses pembentukan tetesan air yang secara perlahan keluar dari *humidifier* membentuk kabut dingin. Kabut dingin ini kemudian bercampur dengan udara luar sehingga kelembaban udara menjadi meningkat. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.4 : *Ultrasonik Humidifier*

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

2.3 *Spray Nozzle*

Nozzle adalah suatu alat konversi energi yang merubah energi potensial fluida menjadi energi kinetik. Dimana fluida yang melalui *nozzle* akan meningkat kecepatannya dan tekanannya akan menurun. Hal tersebut terjadi karena adanya perbedaan luas penampang antara sisi masuk *nozzle* dengan sisi keluarannya. *Nozzle* juga merupakan alat mekanis yang dirancang untuk mengontrol arah atau karakteristik dari suatu aliran fluida ketika keluar atau masuk ruang tertutup atau pipa melalui *orifice*. *Nozzle* berbentuk pipa atau tabung dengan berbagai variasi luas penampang dan dapat digunakan untuk mengarahkan aliran fluida. Nozel sering digunakan untuk mengontrol laju aliran, kecepatan, arah, massa, bentuk, dan tekanan dari uap air yang muncul dari mereka. Fungsi utama dari *nozzle* adalah mengubah energi tekanan fluida masuk *nozzle* menjadi energi kecepatan fluida keluar *nozzle*.

Spray nozzle merupakan salah satu jenis dari nosel yang memiliki fungsi untuk mengubah energi tekanan fluida masuk *nozzle* menjadi energi kecepatan fluida keluar *nozzle* dan 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 2.1 berikut ini (Panut, 1998:143)

Tabel 2.1 Hubungan *Droplet* dengan Spesifikasi Nosel

Ukuran <i>droplet</i>	<i>Orifice nozzle</i>	Sudut <i>spray</i>	Kecepatan aliran fluida
Semakin kecil	Semakin kecil	Semakin besar	Semakin besar
Semakin besar	Semakin besar	Semakin kecil	Semakin kecil

Salah satu jenis dari *spray nozzle* ini adalah *swirl nozzle*. *Swirl nozzle* memiliki bagian-bagian utama yaitu inti yang memiliki alur/slot, *swirl chamber*, dan *orifice*.

Fungsi dasar dari *swirl nozzle* adalah :

1. Mengontrol laju aliran fluida.
2. Atomisasi cairan menjadi *droplet* butiran-butiran halus.
3. Menyebarkan *droplet* dengan pola tertentu.

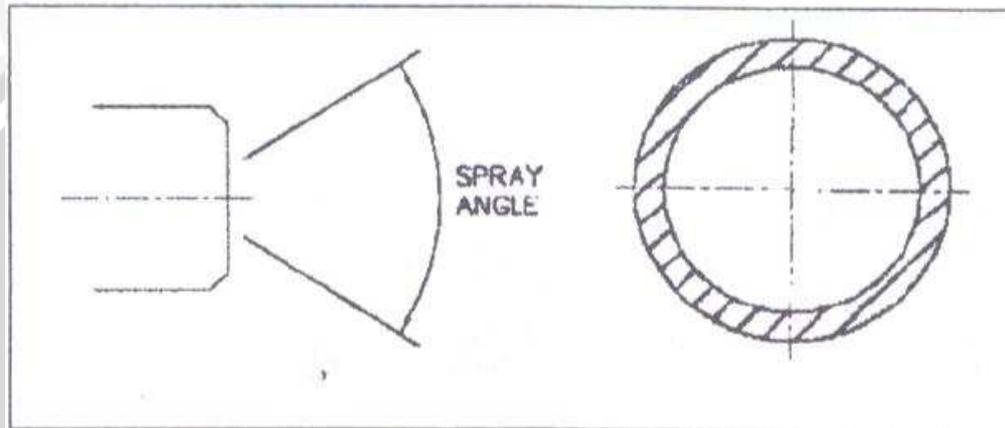
Untuk dapat berfungsi dengan baik, *swirl nozzle* memerlukan energi yang berasal dari pompa. Energi spesifik fluida keluar pompa diubah menjadi energi kinetik dengan cara mengalirkannya melalui alur/slot pada inti. Fluida yang

melalui alur ini akan memiliki kecepatan tinggi yang kemudian masuk *swirl chamber* pada arah tangensial, dan akan membentuk *vorteks* (pusaran). Hasil perubahan energi inilah yang digunakan untuk pembentukan *droplet* dan juga untuk membentuk sudut semprot tertentu dengan pola semprotan yang spesifik.

2.3.1 Macam-macam pola semprotan (*spray pattern*)

1. *Hollow cone spray*

Pola semprotan berupa lingkaran dengan konsentrasi *droplet* berada pada sisi luar. Pada sisi tengah hanya sedikit atau bahkan tidak ada sama sekali. Seperti yang bisa kita lihat pada gambar 2.1

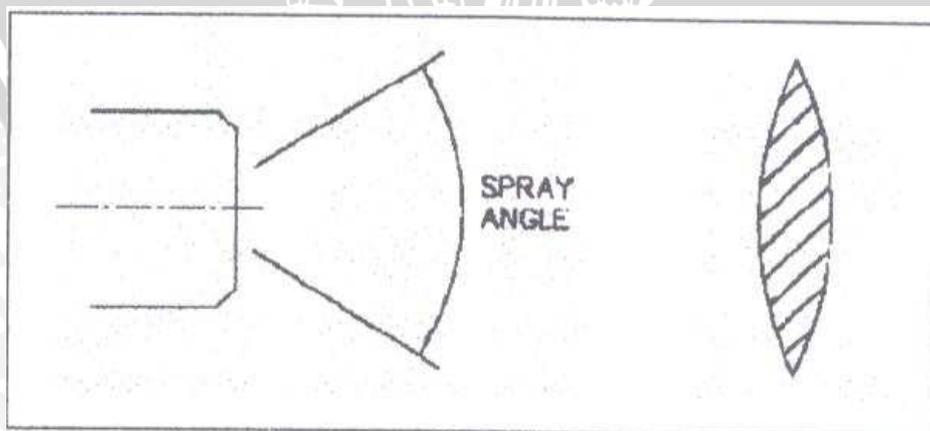


Gambar 2.5 : *Hollow cone spray*

Sumber : <http://www.Delavan.co.uk/pdffs/zNozzleTechnology.pdf>

2. *Flat spray*

Pola semprotan berupa lembaran tipis yang berbentuk elips atau oval. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 2.1.

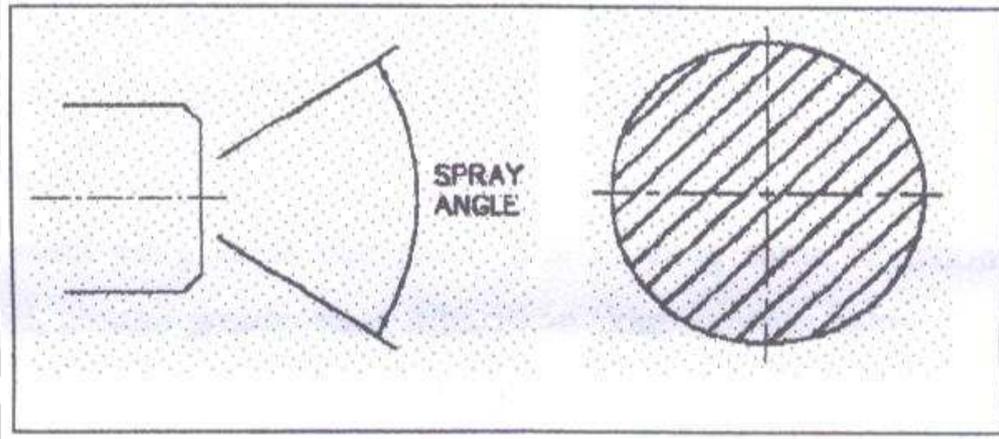


Gambar 2.6 : *Flat spray*

Sumber : <http://www.Delavan.co.uk/pdffs/zNozzleTechnology.pdf>

3. *Solid cone spray*

Pola semprotan berupa lingkaran dengan distribusi *droplet* merata pada seluruh luasan sudut semprot. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.7 *Solid cone spray*

Sumber : <http://www.Delavan.co.uk/pdffs/zNozzleTechnology.pdf>

2.4 Istilah-Istilah Dalam Pengkondisian udara

1. Psikrometri

Psikrometri (*psykometric*) adalah ilmu yang mempelajari sifat-sifat dari udara lembab. Dimana udara lembab tersebut terdiri dari campuran antara udara kering dan uap air serta udara jenuh. Psikrometri banyak diterapkan dalam desain dan analisis terhadap peralatan pengkondisian udara, menara pendingin (*cooling tower*) maupun pada proses-proses industri berhubungan dengan uap yang terkandung dalam udara. Diagram psikrometri menggambarkan beberapa sifat penting dari udara kering hingga udara lembab, baik harga entalpi, kelembaban dan volume spesifik dari suatu sampel udara.

2. Entalpi (h)

Energi kalor yang dimiliki oleh suatu zat pada suatu temperature tertentu. Sejumlah energi kalor yang diperlukan untuk memanaskan 1 kg udara kering dan 1 kg air (dalam fasa cair) dari 0° C sampai t° C menguapkannya menjadi uap air (fasa gas).

$$h = C_p \cdot T + \omega h_g (\text{kJ/kg}) \quad (\text{Stocker, 1992:42}) \quad (2-1)$$

dimana : h = entalpi (J/kg)

C_p = kapasitas spesifik udara kering pada tekanan konstan 1 kJ/kgK

T = temperature zat (°C)

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

h_g = entalpi uap (J/kg)

3. Kelembaban Relatif (*Relative Humidity*)

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

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

4. Kelembaban Absolut (*Absolute Humidity* atau *Humidity Ratio*)

Kelembaban absolut atau rasio kelembaban 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 sebagai berikut :

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

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

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} \\ \omega &= \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} \\ \omega &= \frac{P_v R_a}{P_a R_v} \\ \omega &= \frac{P_v R_a}{(p - p_v) R_v} \end{aligned} \quad (2-4)$$

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

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

dengan :

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)

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

Temperatur bola kering adalah temperatur dari udara sebagaimana yang biasanya diukur dan digunakan. Dalam psikrometri, disebut bola kering untuk membedakannya dari temperatur bola basah. Temperatur ini merupakan temperatur yang diukur dengan sebuah termometer raksa, termokopel, dan lain-lain.

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

Secara teori temperatur udara jenuh dapat diukur dengan alat penjenuh 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 penjenuh 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.

7. Titik Embun (*Dew Point*)

Temperatur dimana uap air yang diberikan dari udara mulai mengembun.

8. Udara Jenuh (*Saturated Air*)

Adalah udara yang tidak dapat lagi menerima uap air pada temperatur yang diberikan. Penurunan pada temperatur udara 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.

2.5 Perpindahan Panas dan Massa pada *Humidifier*

2.5.1 Proses Difusi

Difusi adalah peristiwa berpindahnya suatu zat dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian yang berkonsentrasi lebih rendah. Perbedaan konsentrasi yang ada pada dua larutan atau fluida tersebut disebut gradient konsentrasi. Difusi akan terus terjadi hingga seluruh partikel tersebar luas secara merata atau mencapai keadaan kesetimbangan dimana perpindahan molekul tetap terjadi walaupun tidak ada perbedaan konsentrasi.

Perpindahan kalor ini terjadi antara udara dengan partikel air, dimana udara bercampur dengan partikel air. Pada proses ini terjadi perubahan fasa dimana sebagian air berubah menjadi uap air dan kelembaban udara juga meningkat.

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 penjenuhan. Hal ini terjadi karena selama proses penjenuhan, 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 penjenuhan 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 penjenuhan 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.

2.5.2 Perpindahan kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi terjadi pada media yang bergerak dimana udara dan air temperaturnya berbeda dan saling bersinggungan. Pada penelitian ini, proses konveksi terjadi dari udara ke air. Besarnya nilai kalor yang berpindah tergantung pada beda temperatur fluida yang bersinggungan (ΔT), koefisien konveksi (h) dan luas permukaan perpindahan kalor (A). Sedangkan nilai koefisien konveksi dipengaruhi oleh bilangan *Nuselt*, *Reynold* dan koefisien konduksi. Semakin besar kecepatan udara maka bilangan *Reynold* akan semakin meningkat karena kecepatan udara berbanding lurus dengan bilangan *Reynold*, dimana dapat dirumuskan :

$$Re = \frac{Vd_H}{\nu} \quad (\text{Holman; 1984:174}) \quad (2-6)$$

Hubungan antara bilangan *Nuselt*, bilangan *Reynold* dan koefisien konveksi adalah sebagai berikut:

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (\text{Holman; 1984:230}) \quad (2-7)$$

$$Nu = \frac{hd_H}{k} \quad (\text{Holman; 1984:212}) \quad (2-8)$$

Dengan demikian dapat kita simpulkan, seiring dengan kenaikan kecepatan udara maka bilangan *Reynold*, bilangan *Nuselt* dan koefisien konveksi akan semakin besar, akibatnya perpindahan kalor akibat proses konveksipun akan semakin meningkat. Hal tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$q = h A \Delta T \quad (\text{Holman; 1984:229}) \quad (2-9)$$

Dimana :

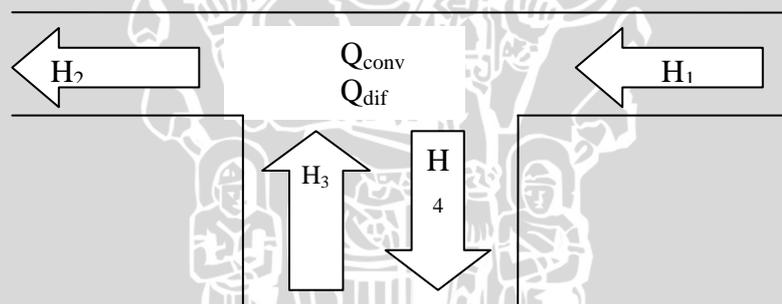
Re = bilangan *Reynold*

V = kecepatan udara (m/s)

- d_H = diameter hidrolik
- $C_{m,n}$ = konstanta
- Pr = bilangan *Prandlt*
- h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 K$)
- k = koefisien konduksi (W/mK)
- Nu = bilangan *Nuselt*
- ΔT = beda temperatur (K)
- q = laju perpindahan kalor konveksi (J/s)

2.5.3 Kestimbangan Kalor pada Sistem

Pada gambar dibawah ini menunjukkan kesetimbangan kalor yang terjadi didalam *humidifier*. Udara bertemperatur tinggi dimasukkan kedalam sistem dengan menggunakan blower dan disinggungkan dengan air bertemperatur lebih rendah yang disemprotkan oleh *spray nozzle*. Udara bersinggungan dengan air secara langsung sehingga timbul proses *transfer* kalor antara kedua zat tersebut. Gambar kesetimbangan kalor pada system bisa kita lihat pada gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8 : Kestimbangan kalor pada *Humidifier*

Keterangan :

- H_1 : Kalor udara yang masuk ke dalam sistem [watt]
- H_2 : Kalor yang ke luar dari sistem ($H_1 + Q_{dif} - Q_{conv}$) [watt]
- H_3 : Kalor air yang masuk ke dalam sistem [watt]
- H_4 : Kalor air tampung ($H_3 - Q_{dif} + Q_{conv}$) [watt]

Perpindahan panas total pada *humidifier* terdiri dari dua komponen perpindahan panas, yaitu :

- a. Perpindahan Kalor Difusi (q_d)

Perpindahan kalor ini terjadi antara udara dengan partikel air, dimana udara bercampur dengan pertikel air. Pada proses ini terjadi perubahan fasa

dimana sebagian air berubah menjadi uap air dan kelembaban udara juga meningkat.

b. Perpindahan kalor Konveksi (q_c)

Perpindahan kalor konveksi terjadi pada media yang bergerak dimana udara dan air temperaturnya berbeda dan saling bersinggungan. Pada penelitian ini, proses konveksi terjadi dari udara ke air.

➤ Keseimbangan energi secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

Σ Kalor keluar :

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

Sehingga dapat disimpulkan :

Σ Kalor keluar = Σ Kalor masuk

$$H_2 + H_4 = H_1 + H_3 \quad (2-10)$$

Udara tidak hanya terdiri dari udara kering saja, tetapi juga mengandung uap air sehingga untuk menghitung entalpinya digunakan persamaan :

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

Keterangan :

- h = entalpi campuran antara udara kering dengan uap air (J/kg)
- C_p = kapasitas spesifik udara kering pada tekanan konstan 1,0 kJ/kgK
- T_c = Suhu campuran antara udara dan uap ($^{\circ}$ C)
- ω = kelembaban absolut (%)
- h_g = entalpi uap (J/kg)

Sehingga nilai energi kalor udara masuk dihitung dengan rumus :

$$H_1 = m_{a1} (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) \quad (2-12)$$

Keterangan :

- m_{a1} = massa alir udara kering yang masuk ke dalam sistem (kg/s)
- T_1 = temperatur udara *inlet* ($^{\circ}$ C)
- ω_1 = kelembaban absolut udara *inlet* (%)
- h_{g1} = entalpi uap udara *inlet* (J/kg)

Nilai kalor udara keluar dihitung dengan menggunakan persamaan :

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

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

T_2 = temperatur udara keluar (°C)

ω_2 = kelembaban absolut udara keluar (%)

h_{g2} = entalpi uap udara keluar (J/kg)

Massa udara kering yang masuk ke dalam sistem besarnya sama dengan massa udara kering yang keluar dari sistem, sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut

:

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

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

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

$$\omega \times m_a = m_v \quad (2-15)$$

$$m = \rho \times V \times A \quad (\text{Cengel, 1994:98}) \quad (2-16)$$

Dari persamaan (2-12) dan (2-13) akan diperoleh :

$$m = m_a + m_v$$

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

$$m = (1 + \omega) \times m_a \quad (2-17)$$

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

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

:

$$V = c \times \sqrt{2gh} \quad (2-18)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (2-19)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{MINYAK}} g h_{\text{MINYAK}}}{g \rho_{\text{udara}}}} \quad (2-20)$$

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{air}} SG_{\text{MINYAK}} (z \sin 3,75 / 1000)}{\rho_{\text{udara}}}} \quad (2-21)$$

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 grafity $(0,826 \frac{\text{kg} / \text{m}^3_{\text{minyak}}}{\text{kg} / \text{m}^3_{\text{udara}}})$

Sedangkan H_3 dan H_4 masing-masing dihitung dengan rumus :

$$H_3 = m_3 \times h_3$$

$$H_4 = m_4 \times h_4 \quad (2-22)$$

Keterangan :

- m_3 = massa alir air yang masuk ke dalam sistem (kg/s)
- m_4 = massa alir air yang ke luar dari sistem (kg/s)
- h_3 = entalpi air yang masuk ke dalam sistem (J/kg)

h_4 = entalpi air yang ke luar dari sistem (J/kg)

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

$$\begin{aligned} \dot{m}_3 &= \rho_{air} \times \dot{Q}_3 \\ \dot{m}_4 &= \rho_{air} \times \dot{Q}_4 \end{aligned} \quad (2-23)$$

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 :

$$\begin{aligned} H_1 + H_3 &= H_2 + H_4 \\ H_1 + \dot{m}_3 h_3 &= \dot{m}_{a2} (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4 \\ H_1 + \dot{m}_3 h_3 &= \dot{m}_{a2} (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4 \\ \dot{m}_{a1} (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_3 h_3 &= \dot{m}_{a2} (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4 \end{aligned} \quad (2-24)$$

$\dot{m}_a (C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_a (C_p T_2 + \omega_2 h_{g2}) + \dot{m}_4 h_4$ Nilai transfer energi dihitung dengan persamaan :

$$\Delta H = H_1 - H_2 = H_4 - H_3 \quad (2-25)$$

Sedangkan besarnya massa uap air yang ditransfer ke udara adalah :

$$\Delta m = m_2 - m_1 = m_3 - m_4 \quad (2-26)$$

2.6 Hipotesa

Semakin besar debit air yang disemprotkan mengakibatkan laju massa air dan luasan kontak antara udara dengan air bertambah, hal tersebut akan menyebabkan naiknya kecepatan udara dan diikuti meningkatnya bilangan *Reynold*, bilangan *Nuselt* dan koefisien konveksi, sehingga proses *transfer* energi dan massa akan menjadi tinggi pula.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode eksperimental (*true experimental research*) yang secara langsung digunakan ke obyek yang akan diteliti. Obyek tersebut akan diambil datanya pada tahapan-tahapan tertentu yang akan menghasilkan beberapa data yang bisa dibandingkan dan akan menunjukkan suatu pola perbandingan tertentu yang bisa dihubungkan.

3.2 Variabel Penelitian

1. Variabel bebas (*independent variabel*)

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya dapat ditentukan secara bebas dan dapat diubah-ubah dengan metode tertentu. Sehingga akan menghasilkan nilai dari variabel terikat atau bentuk perubahan dari variabel terikat obyek penelitian tersebut. Hal ini juga akan menghasilkan suatu bentuk hubungan antara kedua variabel tersebut. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah:

- Variasi debit air sebesar $8,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7,83 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $7,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, $5,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Variabel terikat (*dependent variabel*)

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya tergantung pada nilai dari variabel bebasnya. Dengan adanya hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat akan menghasilkan perubahan nilai dari variabel terikat tersebut. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah:

- Transfer energi dan massa

3. Variabel terkontrol.

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

- Temperatur udara *inlet* divariasikan masing-masing sebesar 40°C , 45°C dan 50°C .

3.3 Alat-alat Penelitian

Peralataan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

1. *Windtunnel*

Windtunnel merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dari model yang akan diteliti, selain itu juga digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara yang mengalir didalamnya. Gambar dari *Windtunnel* bisa kita lihat pada gambar 3.1. Kecepatan udara dapat dihitung melalui beda tekanan yang diukur dengan *inclined* manometer. Dimana kecepatan udara dapat dihitung dengan rumus :

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

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

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

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

Dimana :

- 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/m^3)
- ρ_{udara} = Massa jenis udara outlet (campuran antara air dan uap air)
- SG_{minyak} = *spesifik grafity* ($0,826 \frac{\text{kg/m}^3_{\text{minyak}}}{\text{kg/m}^3_{\text{udara}}}$)

sedangkan ρ_{udara} dapat kita peroleh dari :

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



Gambar 3.1: *Wind Tunnel*

Sumber : Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Teknik Mesin, UB.

2. Sensor dan peralatan pendukung lainnya.

a. *Thermocouple*

Thermocouple yang digunakan adalah tipe K. *Thermocouple* ini digunakan untuk mengukur temperatur masuk udara panas dan dihubungkan dengan *Thermo Controller* yang akan digunakan untuk mengatur besarnya temperature *inlet* dari udara. Dalam hal ini *thermocouple* digunakan untuk mengubah suatu besaran fisis yang berupa suhu menjadi bentuk elektrik berupa tegangan.

b. Peralatan pendukung

- *Digital Multimeter*

Alat ini berfungsi mengubah data *analog* dari *termocouple* menjadi temperatur dengan tampilan *digital*.

- *Thermo Controller*

Fungsi dari alat ini adalah mematikan aliran listrik menuju elemen pemanas ketika temperatur udara yang masuk pada alat *duck* melebihi 40°C, 45°C dan 50°C pada setiap pengambilan data serta menghidupkannya kembali jika temperatur di bawah 40°C, 45°C dan 50°C. Toleransi dari pengaturan temperatur ini adalah $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

3. *Inclined Manometer*

Digunakan untuk mengukur beda tekanan udara masuk dan keluar *duck* yang ditunjukkan oleh perbedaan ketinggian cairan pada *inclined* manometer, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan kecepatan udara *outlet duck*. *Inclined* manometer bisa kita lihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 : *Inclined Manometer*

Sumber : Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Teknik Mesin, UB.

4. Pompa

Pompa yang digunakan dalam penelitian ini adalah *wiper washer assy* mobil yang digunakan untuk memompa air. Adapun spesifikasi pompa tersebut adalah sebagai berikut :

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

5. *Nozzle*

Nosel merupakan alat yang berbentuk pipa atau tabung dengan diameter masuk dan diameter keluar yang berbeda. Fungsi utama dari nosel adalah mengubah energi tekanan fluida masuk nosel menjadi energi kecepatan fluida keluar nosel. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3: *Nozzle*

Sumber : Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Teknik Mesin, UB.

6. Gelas ukur

Alat ini berfungsi untuk mengetahui debit air pendingin yang disemprotkan ke dalam sistem. Debit dihitung dengan membagi volume air yang berkumpul pada gelas ukur dengan waktu proses pengumpulan air tersebut.

Dimana secara matematis dapat ditunjukkan dengan :

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

Dimana :

\dot{Q} = debit air pendingin (m^3/detik)

V = volume air pendingin (m^3)

t = waktu (detik)

7. *Heater*

Alat ini digunakan untuk mengkondisikan udara *inlet* dengan temperatur yang diinginkan. *Heater* ini mengkonversikan energi listrik menjadi energi panas melalui elemen pemanas yang selanjutnya digunakan untuk memanaskan udara *inlet*. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 : Heater

Sumber : Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Teknik Mesin, UB.

8. *Adaptor*

Seperti yang kita lihat pada gambar 3.5 berikut *adaptor* adalah suatu alat ini digunakan untuk mengubah arus AC pada listrik menjadi arus DC yang akan digunakan sebagai sumber listrik untuk pompa, sehingga pompa dapat menekan air menuju *nozzle* dan tersembur keluar menjadi partikel-partikel kecil. Adapun spesifikasi *adaptor* adalah sebagai berikut :

- Arus : 5 A
- Voltase : 12 Volt



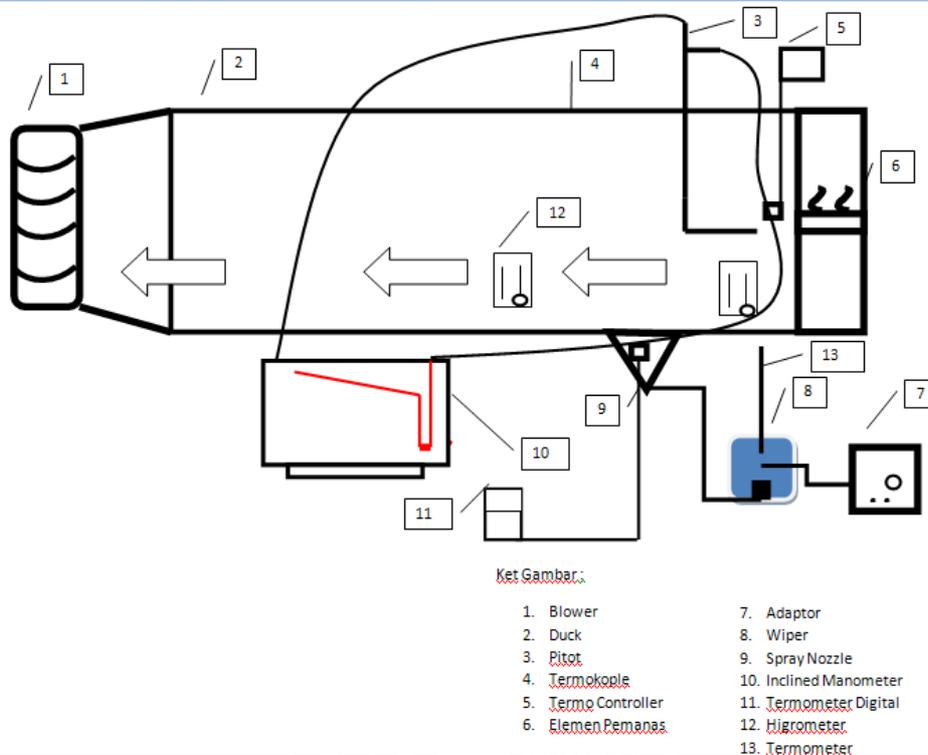
Gambar 3.5: Adaptor

Sumber : Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Teknik Mesin, UB.

3.4 Spesifikasi alat penelitian

3.5 Instalasi Penelitian

Berikut merupakan gambar dari instalasi penelitian yang digunakan. Instalasi penelitian bisa kita lihat pada gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6: Instalasi Penelitian

3.6 Tempat penelitian

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

3.7 Prosedur penelitian

Persiapan meliputi :

1. Menyiapkan instalasi penelitian dengan berbagai variasi debit air.
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.
4. Ulangi langkah 1 sampai 3 untuk setiap pengesetan temperatur udara *inlet* sebesar 45°C dan 50°C .

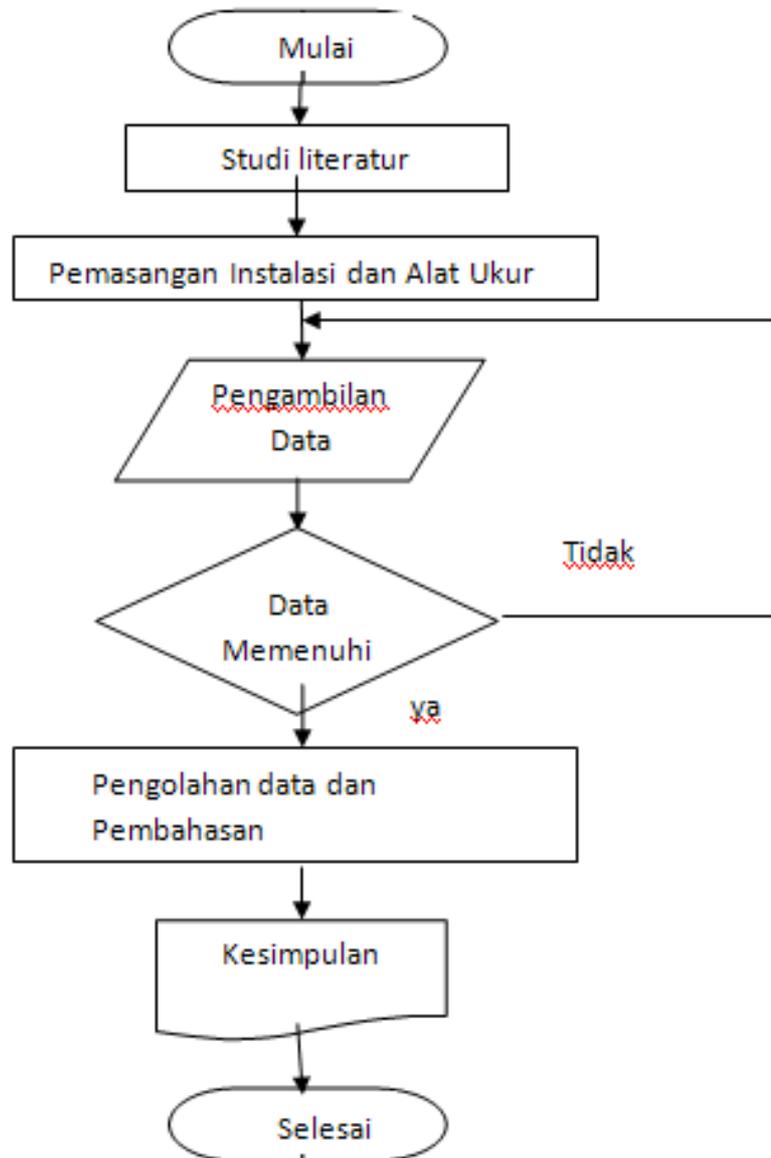
Pelaksanaan percobaan :

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. Setelah keadaan mencapai kondisi *steady*, pengambilan data dapat dilakukan.
4. Mengambil data temperatur masuk air dingin, temperatur keluar air pendingin, temperatur masuk udara, temperatur keluar udara dan perbedaan tekanan udara keluar pada *inclined manometer*.
5. Mengulangi langkah 2 sampai 4 pada variasi debit air sebagai media pendingin sebesar $8,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; $7,83 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; $7,66 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; $7,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; $7,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$; $5,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$.
6. Mengulangi langkah 2 sampai 5 pada temperatur udara *inlet* sebesar 45°C dan 50°C.
7. Data diolah, kemudian dianalisa pengaruh debit air terhadap *transfer* energi dan massa. 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.



3.8 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan gambar dari diagram alir penelitian yang dilakukan penulis selama penelitian. Hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 3.7 dibawah ini.



Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data hasil pengujian

Data yang didapatkan selama pengujian kita catat dan kita tampilkan dalam bentuk tabel berikut ini. Tabel tersebut bisa kita lihat pada gambar tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Data hasil pengujian *humidifier* pada dengan berbagai variasi debit air dan temperatur udara *inlet*

Temperatur udara *inlet* (T_1) 40°C

No	Debit Air (m/s)	$T_{d,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	z (mm)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	40	30	37	27	3
2	$7,33 \times 10^{-7}$	40	30	36	27	3
3	$7,5 \times 10^{-7}$	40	30	35	27	3
4	$7,66 \times 10^{-7}$	40	30	35	27	3
5	$7,83 \times 10^{-7}$	40	30	34	27	3
6	$8,66 \times 10^{-7}$	40	30	34	27	3

Temperatur udara *inlet* (T_1) 45°C

No	Debit Air (m/s)	$T_{d,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	z (mm)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	45	32,5	38	28	2,88
2	$7,33 \times 10^{-7}$	45	32,5	38	28	2,88
3	$7,5 \times 10^{-7}$	45	32,5	37	28	2,88
4	$7,66 \times 10^{-7}$	45	32,5	36	28	2,88
5	$7,83 \times 10^{-7}$	45	32,5	36	28	2,88
6	$8,66 \times 10^{-7}$	45	32,5	36	28	2,88

Temperatur udara *inlet* (T_1) 50°C

No	Debit Air (m/s)	$T_{d,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{d,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{w,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	z (mm)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	50	34	41	27	2,75
2	$7,33 \times 10^{-7}$	50	34	41	27	2,75
3	$7,5 \times 10^{-7}$	50	34	39	27	2,75
4	$7,66 \times 10^{-7}$	50	34	41	27	2,75

5	$7,83 \times 10^{-7}$	50	34	38	27	2,75
6	$8,66 \times 10^{-7}$	50	34	40	27	2,75

4.1.2 Contoh perhitungan

Data pengujian alat direct contact *humidifier* dengan variasi debit air :

- Debit Air (Q_3) = $5,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
- $T_{\text{dry inlet}}$ = $40 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{wet inlet}}$ = $30 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{dry outlet}}$ = $37 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{\text{wet outlet}}$ = $27 \text{ }^\circ\text{C}$
- Relatif Humidity 1 (RH_1) = 48%
- Relatif Humidity 2 (RH_2) = 47%
- Absolut Humidity 1 (ω_1) = $0,023$
- Absolut Humidity 2 (ω_2) = $0,0185$
- Rapat massa udara *inlet* (ρ) = $1,046$
- Rapat massa udara *outlet* (ρ) = $1,0678$
- Kecepatan masuk udara *inlet* (V_{inlet}) = $1,482 \text{ m/s}$
- Entalpi uap udara *inlet* (h_{g1}) = $2566,4 \text{ kJ/kg}$
- Entalpi uap udara *outlet* (h_{g2}) = $2550,9 \text{ kJ/kg}$

1. Kecepatan udara *inlet*

Rumus (2.20)

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

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

$$V = c \times \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{MINYAK}} g h_{\text{MINYAK}}}{g \rho_{\text{udara}}}}$$

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

$$V = 0,85 \times \sqrt{2 \times 9,8 \frac{1000 \times 0,826 (3 \sin 3,75 / 1000)}{1,046}}$$

$$V = 1,482 \frac{m}{s}$$

2. Laju massa alir

a. Laju massa alir campuran udara dan uap air

Rumus (2-18)

m_1 inlet

$$m_1 = \rho_1 \times V_1 \times A$$

$$m_1 = 1,046 \times 1,482 \times 0,0465$$

$$m_1 = 0,072 \frac{kg}{s}$$

m_2 outlet

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

$$m_2 = 0,070 \times (1 + 0,0185)$$

$$m_2 = 0,07177 \frac{kg}{s}$$

b. Laju massa alir udara kering

Rumus (2-19)

m_a udara kering

$$m_a = \frac{m_1}{(1 + \omega_1)}$$

$$m_a = \frac{0,072}{(1 + 0,023)}$$

$$m_a = 0,070 \frac{kg}{s}$$

ρ_1 (massa jenis) pada kondisi $T_1 = 40^\circ\text{C}$ dan $P = 1 \text{ atm}$ yang harganya 1,046 [lihat pada lampiran 5 Tabel A-2 ; Sifat-sifat termodinamika udara jenuh pada tekanan atmosfer 101,325 kPa]

ω_2 (kelembaban absolut) pada kondisi $T_2 = 37^\circ\text{C}$ dan $P = 1 \text{ atm}$ yang harganya 0.0185 [lihat pada lampiran 6 Diagram Psicrometri]

ω_1 (kelembaban absolut) pada kondisi $T_1 = 40^\circ\text{C}$ dan $P = 1 \text{ atm}$ yang harganya 0.023 [lihat pada lampiran 6 Diagram Psicrometri]

3. Transfer Massa (Δm)

Didapat dari persamaan keseimbangan massa

Rumus (2-28)

$$\Delta m = m_2 - m_1$$

$$\Delta m = 0,07177 \text{ kg/s} - 0,072 \text{ kg/s}$$

$$\Delta m = -0,0003 \text{ kg/s}$$



4. Energi Kalor (H)

- a. Energi kalor udara masuk (ΔH_1)

Rumus (2-14)

$$H_1 = m_{a1}(C_p T_1 + \omega_1 h_{g1})$$

$$H_1 = 0,070(1 \times 40 + 0,023 \times 2566,4)$$

$$H_1 = 6,978 \text{ kJ}$$

- b. Energi kalor udara keluar (ΔH_2)

Rumus (2-15)

$$H_2 = m_{a2}(C_p T_c + \omega h_g)$$

$$H_2 = 0,070(1 \times 37 + 0,0185 \times 2550,9)$$

$$H_2 = 5,932 \text{ kJ}$$

ω_1 (kelembaban absolut) pada kondisi $T_1 = 40$ °C dan $P = 1$ atm yang harganya 0.023 [lihat pada lampiran 6 Diagram Psicrometri] dan nilai h_{g1} (entalpi uap) kondisi $T_1 = 40$ °C dan $P = 1$ atm yang harganya 2566,4 kJ/kg [lihat pada lampiran 5 Tabel A-1 Air : Sifat-sifat cairan dan uap jenuh]

ω_2 (kelembaban absolut) pada kondisi $T_2 = 37$ °C dan $P = 1$ atm yang harganya 0.0185 [lihat pada lampiran 6 Diagram Psicrometri] dan nilai h_{g1} (entalpi uap) kondisi $T_2 = 37$ °C dan $P = 1$ atm yang harganya 2550,9 kJ/kg [lihat pada lampiran 5 Tabel A-1 Air : Sifat-sifat cairan dan uap jenuh]

5. Transfer Energi Kalor (ΔH)

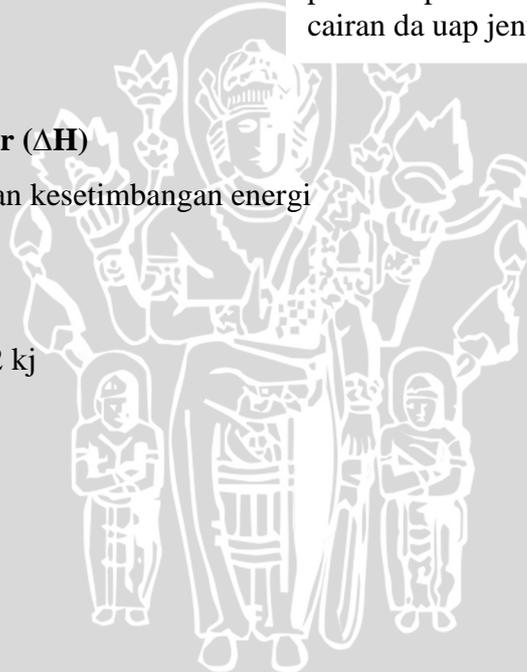
Didapat dari persamaan kesetimbangan energi

Rumus (2-28)

$$\Delta H = H_1 - H_2$$

$$\Delta H = 6,978 \text{ kJ} - 5,932 \text{ kJ}$$

$$\Delta H = 1,045 \text{ kJ}$$



4.1.3 Data Hasil Perhitungan

Berikut merupakan data hasil perhitungan pada variasi temperatur udara *inlet* (T_1) pada debit yang berbeda. Data hasil perhitungan tersebut bisa kita lihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3 dibawah ini.

A. Tabel 4.2 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)

Temperatur udara *inlet* (T_1) 40°C

No	Debit Air (m/s)	m_1 (kg/s)	m_a (kg/s)	m_2 (kg/s)	Δm (kg/s)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07177	-0,0003
2	$7,33 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07180	-0,0003
3	$7,5 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07182	-0,0003
4	$7,66 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07182	-0,0003
5	$7,83 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07186	-0,0002
6	$8,66 \times 10^{-7}$	0,072	0,070	0,07186	-0,0002

Temperatur udara *inlet* (T_1) 45°C

No	Debit Air (m/s)	m_1 (kg/s)	m_a (kg/s)	m_2 (kg/s)	Δm (kg/s)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06881	-0,00042
2	$7,33 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06881	-0,00042
3	$7,5 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06883	-0,00040
4	$7,66 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06886	-0,00037
5	$7,83 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06886	-0,00037
6	$8,66 \times 10^{-7}$	0,069	0,067	0,06886	-0,00037

Temperatur udara *inlet* (T_1) 50°C

No	Debit Air (m/s)	m_1 (kg/s)	m_a (kg/s)	m_2 (kg/s)	Δm (kg/s)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06563	-0,00048
2	$7,33 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06563	-0,00048
3	$7,5 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06570	-0,00041
4	$7,66 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06563	-0,00048
5	$7,83 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06572	-0,00039
6	$8,66 \times 10^{-7}$	0,066	0,064	0,06566	-0,00044

B. Tabel 4.3 Data Hasil Perhitungan entalpi total sisi masuk (H_1), entalpi total sisi keluar (H_2) dan *transfer energi* (ΔH)

Temperatur udara *inlet* (T_1) 40⁰C

No	Debit Air (m/s)	H_1 (kJ)	H_2 (kJ)	ΔH (kJ)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	6,978	5,932	1,0453
2	$7,33 \times 10^{-7}$	6,978	5,952	1,0259
3	$7,5 \times 10^{-7}$	6,978	5,917	1,0605
4	$7,66 \times 10^{-7}$	6,978	5,917	1,0605
5	$7,83 \times 10^{-7}$	6,978	5,955	1,0231
6	$8,66 \times 10^{-7}$	6,978	5,955	1,0231

Temperatur udara *inlet* (T_1) 45⁰C

No	Debit Air (m/s)	H_1 (kJ)	H_2 (kJ)	ΔH (kJ)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	7,579	6,007	1,5716
2	$7,33 \times 10^{-7}$	7,579	6,007	1,5716
3	$7,5 \times 10^{-7}$	7,579	5,991	1,5874
4	$7,66 \times 10^{-7}$	7,579	6,010	1,5687
5	$7,83 \times 10^{-7}$	7,579	6,010	1,5687
6	$8,66 \times 10^{-7}$	7,579	6,010	1,5687

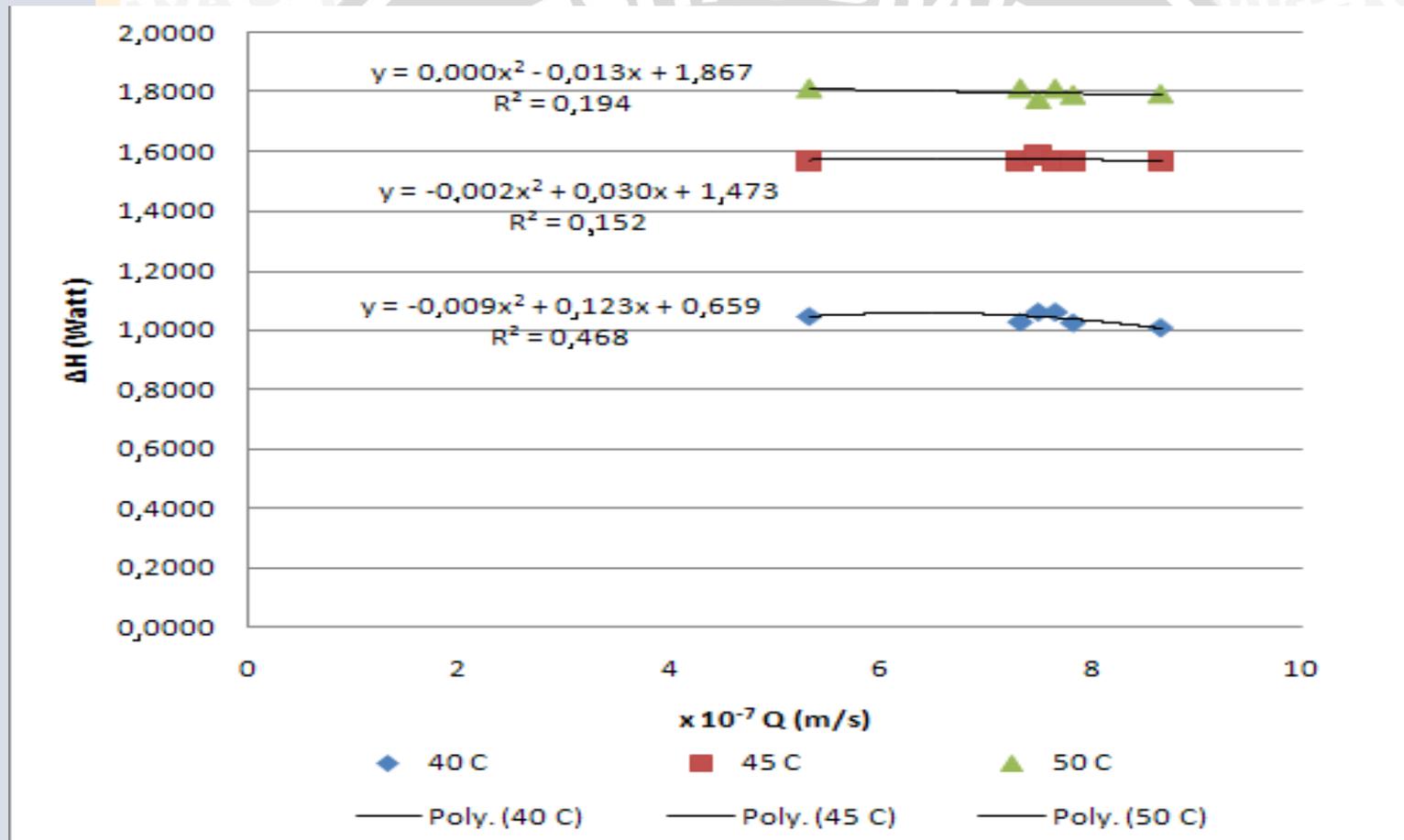
Temperatur udara *inlet* (T_1) 50⁰C

No	Debit Air (m/s)	H_1 (kJ)	H_2 (kJ)	ΔH (kJ)
1	$5,33 \times 10^{-7}$	7,816	6,005	1,8108
2	$7,33 \times 10^{-7}$	7,816	6,005	1,8108
3	$7,5 \times 10^{-7}$	7,816	6,041	1,7752
4	$7,66 \times 10^{-7}$	7,816	6,005	1,0605
5	$7,83 \times 10^{-7}$	7,816	6,026	1,8108
6	$8,66 \times 10^{-7}$	7,816	6,023	1,7930

4.2 Grafik Hasil Perhitungan

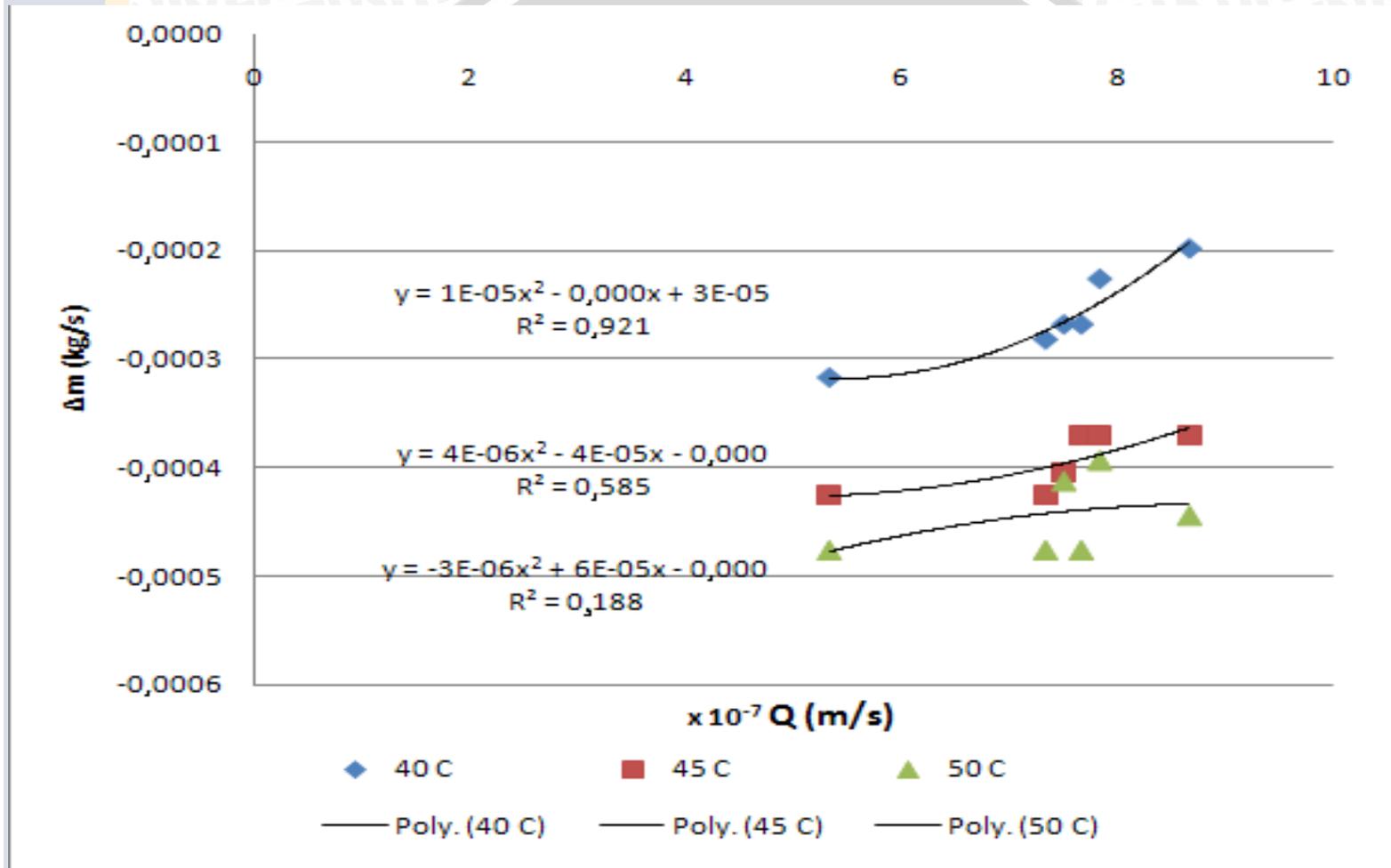
Data hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk grafik, dan hal tersebut bisa kita lihat pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 dibawah ini.

4.2.1 Pengaruh Debit Air Terhadap *Transfer Energi* (ΔH) Pada *Direct Contact Humidifier*



Gambar 4.1 Grafik Pengaruh debit air terhadap *transfer energi* (ΔH) pada *direct contact humidifier*

4.2.2 Pengaruh Debit Air Terhadap *Transfer* Massa (Δm) Pada *Direct Contact Humidifier*



Gambar 4.2 Grafik pengaruh debit air terhadap *transfer* massa (Δm) pada *direct contact humidifier*

4.3 Pembahasan Grafik

4.3.1 Pembahasan Grafik Pengaruh Debit Air (Q_3) terhadap *Transfer Energi*

(ΔH)

Pada grafik gambar 4.1 menunjukkan adanya hubungan antara debit air dan temperatur udara *inlet* terhadap *transfer energi*. Pada grafik gambar 4.1, juga bisa kita lihat bahwa pada debit yang sama, semakin besar temperatur dari udara *inlet* maka nilai *transfer* energinya juga akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan persamaan

$$\begin{aligned}\Delta H &= H_1 - H_2 \\ &= \dot{m}_{a1}(C_p T_1 + \omega_1 h_{g1}) - \dot{m}_{a2}(C_p T_c + \omega h_g)\end{aligned}$$

dimana *transfer energi* merupakan pengurangan antara entalpi total masuk (H_1) dengan entalpi total sisi keluar (H_2). Dengan demikian, semakin tinggi temperature udara *inlet* (T_1) maka nilai dari entalpi total masuk (H_1) akan meningkat pula, sehingga *transfer energi* (ΔH) yang terjadi akan semakin besar pula.

Pada teori sebelumnya dijelaskan bahwa semakin besar nilai dari debit air (Q) yang disemprotkan oleh *spray nozzle* maka akan mengakibatkan laju massa air akan meningkat dan juga diikuti semakin besarnya luas kontak (A) antara air dengan udara yang masuk, sehingga nilai dari *transfer* energinya (ΔH) juga akan meningkat. Pada grafik gambar 4.1 bisa kita lihat, semakin besar nilai dari debit air yang disemprotkan oleh *spray nozzle* maka yang terjadi adalah *transfer energi* akan (ΔH) semakin menurun. Hal tersebut dikarenakan proses yang terjadi adalah penguapan. Penguapan adalah proses dimana terjadinya perpindahan kalor dari udara ke air, hal tersebut terjadi karena energi kalor udara *inlet* yang diserap tidak mencukupi untuk mengubah air menjadi uap, sehingga jumlah massa uap air pada sisi *outlet* akan berkurang. Hal tersebut bisa kita lihat pada nilai kelembaban absolutnya (ω), seperti pada persamaan berikut :

$$\omega = m_v/m_a$$

dimana kelembaban absolut (ω) merupakan perbandingan dari massa uap dibagi dengan masa udara kering, sehingga semakin berkurangnya jumlah massa uap air

pada sisi *outlet* juga akan mengakibatkan nilai dari kelembaban absolutnya (ω) juga akan menurun.

Selain itu, turunnya nilai dari *transfer* energi (ΔH) seiring bertambahnya debit air (Q) yang disemprotkan juga dikarenakan semakin besar debit air yang disemprotkan, maka laju massa air juga meningkat. Hal tersebut mengakibatkan jumlah massa air yang akan mengembunkan uap air juga akan besar, maka jumlah massa uap (m_v) pada sisi *outlet* juga akan menurun, sehingga nilai dari kelembaban absolut dan *transfer* energinya juga akan menurun.

4.3.2 Pembahasan Grafik Pengaruh Debit Air (Q_3) terhadap *Transfer* Massa (Δm)

Transfer massa merupakan selisih antara laju massa alir udara keluar (m_2) dengan laju massa alir udara masuk (m_1), sehingga bisa disimpulkan semakin besar massa udara yang keluar maka proses *transfer* massanya (Δm) juga akan semakin besar. Sedangkan *transfer* massa itu sendiri dapat bernilai positif ataupun negatif. *Transfer* massa akan bernilai positif apabila udara pada sisi keluar mendapat tambahan uap akibat proses penguapan air. Sedangkan *transfer* massa akan bernilai negatif jika massa uap diudara mengalami proses pengembunan. Kedua proses tersebut membutuhkan energi, energi kalor udara *inlet* akan diserap oleh air pada saat keduanya bersinggungan hingga air mampu menghasilkan uap air. Peristiwa yang terjadi tersebut disebut dengan penguapan yang mengakibatkan udara *outlet* mengalami tambahan uap air. Namun jika energi kalor udara *outlet* yang diserap tidak mencukupi untuk mengubah air menjadi uap, maka udara akan mengalami proses pengembunan. Karena uap air berubah menjadi air akibat proses perpindahan energi kalor dari udara ke air, sehingga jumlah massa uap pada sisi *outlet* akan berkurang.

Pada grafik gambar 4.2 bisa kita lihat bahwa nilai dari *transfer* massa pada setiap variable terkontrolnya bernilai negatif. Seperti yang udah dijelaskan diatas, bahwa jika *transfer* massa bernilai negatif maka proses yang terjadi bukanlah proses penguapan melainkan adalah proses pengembunan. Hal yang terjadi adalah nilai dari massa uap pada sisi *outlet* akan bernilai lebih kecil. Sehingga

kelembaban absolut pada sisi *outlet* juga akan lebih kecil dibandingkan dengan kelembaban absolut pada sisi *inlet* karena kelembaban absolut merupakan perbandingan antara massa uap dibagi dengan massa udara kering. Jumlah massa udara kering pada sisi masuk dan keluar bernilai sama, dengan massa uap yang semakin besar maka akan terjadi peningkatan kelembaban absolut udara.

Pada grafik gambar 4.2 menunjukkan adanya pengaruh debit air (Q_3) dan temperatur udara *inlet* (T_1) terhadap *transfer* massa (Δm). Pada grafik gambar 4.2 diatas terlihat bahwa nilai dari besaran debit yang sama, semakin besar temperatur *inlet* (T_1) maka nilai dari *transfer* massanya (Δm) juga akan semakin kecil. Pada persamaan dari *transfer* massa berikut :

$$\begin{aligned}\Delta m &= m_2 - m_1 \\ &= \rho_2 \cdot V_2 \cdot A_2 - \rho_1 \cdot V_1 \cdot A_1\end{aligned}$$

dimana temperatur sangat berpengaruh pada nilai dari rapat massa udara campuran (ρ). Semakin tinggi temperatur maka nilai rapat massa dari udara campurannya (ρ) akan semakin kecil. Hal tersebut bisa kita lihat pada tabel udara lembab. Jadi dengan bertambahnya temperatur udara *inlet* (T_1) maka akan menyebabkan nilai dari rapat massa pada sisi *inlet* (ρ_1) juga akan kecil, sehingga *transfer* massanya (Δm) juga akan semakin kecil.

Seiring dengan bertambahnya nilai dari debit air (Q_3), pada grafik gambar 4.2 juga bisa kita lihat bahwa nilai dari *transfer* massa (Δm) juga akan meningkat. Hal tersebut terjadi karena semakin besar debit air yang disemprotkan oleh spray nozzle maka akan menyebabkan laju massa air akan semakin meningkat pula dan akan menyebabkan jumlah massa air yang akan mengembunkan uap air juga semakin besar, sehingga *transfer* massa antara udara ke air juga akan semakin besar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

Dengan bertambahnya debit air yang disemprotkan *spray nozzle* pada *humidifier* akan meningkatkan *transfer* energi apabila yang terjadi adalah proses penguapan dan akan berlaku sebaliknya jika yang terjadi adalah proses pengembunan, sedangkan pada *transfer* massanya akan meningkat seiring dengan bertambahnya debit air.

- *Transfer* energi dan massa pada *humidifier* bisa bernilai positif ataupun negatif dikarenakan adanya proses penguapan dan pengembunan.
- Semakin besar temperatur udara *inlet* akan meningkatkan *transfer* energi dan akan menurunkan *transfer* massa.
- *Transfer* energi (ΔH) tertinggi didapatkan pada temperatur *inlet* (T_1) 50^0 C dan pada debit air sebesar $5,33 \times 10^{-7}$ yaitu sebesar 1,1801 Watt.
- *Transfer* massa (Δm) tertinggi didapatkan pada temperatur *inlet* (T_1) 40^0 C dan pada debit air sebesar $8,66 \times 10^{-7}$ yaitu sebesar 0,0002 Watt.

5.2 Saran

Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut :

1. Penambahan *Impeller* pada sisi keluar dari *spray nozzle* untuk didapatkan besar butiran *droplet* air yang lebih kecil.
2. Untuk penelitian berikutnya diharapkan bisa diteliti tentang besar butiran *droplet* yang dihasilkan terhadap laju perpindahan kalornya.

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 Company, 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.
- Holman, J.P; 1991: *Perpindahan Kalor*; Alih bahasa: Ir. E. Jasfi M.Sc.; Edisi kelima; 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..
- Leinhard, John H; 2005: *A Heat Transfer Textbook*; 3rd edition; Phlogiston Press, Massachusetts.
- Mikheyev, M; 1964: *Fundamentals of Heat Transfer* ; Union of Soviet Socialist Republics, Moscow.

Lampiran 1 : Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 40 °C

Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 40 °C secara lengkap kita tampilkan pada lampiran 1 berikut ini.

T inlet 40 °C

P_{atm} : 1 atm

Debit Air (m ³ /s)	Td in °C	T _{oin} °C	Td out °C	T _{oout} °C	RH1 (%)	RH2 (%)	ω1	ω2	ρ UDR _{INLET} (m/s)	ρ UDR _{OUTLET} (m/s)	V _{INLET} (m/s)	m ₁ (kg/s)	m _a (kg/s)	m ₂ (kg/s)
5,33	40	30	37	27	48	47	0,023	0,0185	1,046	1,0678	1,482	0,072	0,070	0,07177
7,33	40	30	36	27	48	50	0,023	0,0190	1,046	1,075	1,482	0,072	0,070	0,07180
7,5	40	30	35	27	48	55	0,023	0,0192	1,046	1,0821	1,482	0,072	0,070	0,07182
7,66	40	30	35	27	48	55	0,023	0,0192	1,046	1,0821	1,482	0,072	0,070	0,07182
7,83	40	30	34	27	48	59	0,023	0,0198	1,046	1,089	1,482	0,072	0,070	0,07186
8,66	40	30	33	27	48	64	0,023	0,0202	1,046	1,096	1,482	0,072	0,070	0,07189

Δm (kg/s)	h _{g1} (kJ/kg)	h _{g2} (kJ/kg)	H ₁ (Watt)	H ₂ (Watt)	ΔH(Watt)
-0,0003	2566,4	2550,9	6,978	5,932	1,0453
-0,0003	2566,4	2550,9	6,978	5,952	1,0259
-0,0003	2566,4	2550,9	6,978	5,917	1,0605
-0,0003	2566,4	2550,9	6,978	5,917	1,0605
-0,0002	2566,4	2550,9	6,978	5,955	1,0231
-0,0002	2566,4	2561,8	6,978	5,972	1,0061

Lampiran 2 : Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 45 °C

Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 45 °C secara lengkap kita tampilkan pada lampiran 2 berikut ini.

T inlet 45 °C

P_{atm} : 1 atm

Debit Air (m ³ /s)	Td in °C	Tωin °C	Td out °C	Tω out °C	RH1 (%)	RH2 (%)	ω1	ω2	ρ UDR _{INLET} (m/s)	ρ UDR _{OUTET} (m/s)	V _{INLET} (m/s)	m ₁ (kg/s)	m _a (kg/s)	m ₂ (kg/s)
5,33	45	32,5	38	28	43	48	0,026	0,0200	1,0046	1,0604	1,482	0,069	0,067	0,06881
7,33	45	32,5	38	28	43	48	0,026	0,0200	1,0046	1,0604	1,482	0,069	0,067	0,06881
7,5	45	32,5	37	28	43	52	0,026	0,0203	1,0046	1,0678	1,482	0,069	0,067	0,06883
7,66	45	32,5	36	28	43	55	0,026	0,0208	1,0046	1,075	1,482	0,069	0,067	0,06886
7,83	45	32,5	36	28	43	55	0,026	0,0208	1,0046	1,075	1,482	0,069	0,067	0,06886
8,66	45	32,5	36	28	43	55	0,026	0,0208	1,0046	1,075	1,482	0,069	0,067	0,06886

Δm (kg/s)	h _{g1} (kJ/kg)	h _{g2} (kJ/kg)	H□ (Watt)	H□ (Watt)	ΔH(Watt)
-0,00042	2560,9	2552,7	7,579	6,007	1,5716
-0,00042	2560,9	2552,7	7,579	6,007	1,5716
-0,00040	2560,9	2552,7	7,579	5,991	1,5874
-0,00037	2560,9	2552,7	7,579	6,010	1,5687
-0,00037	2560,9	2552,7	7,579	6,010	1,5687
-0,00037	2560,9	2552,7	7,579	6,010	1,5687

Lampiran 3 : Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 50 °C

Data pengujian dan hasil pengolahan pada temperatur inlet 50 °C secara lengkap kita tampilkan pada lampiran 3 berikut ini.

T inlet 50 °C

P_{atm} : 1 atm

Debit Air	Td in	T _o in	Td out	T _o out	RH1	RH2	ω1	ω2	ρ UDR _{INLET}	ρ UDR _{OUTLET}	V _{INLET} (m/s)	m ₁ (kg/s)	m _a (kg/s)	m ₂ (kg/s)
5,33	50	34	41	29	36	42	0,0279	0,0205	0,9593	1,0374	1,482	0,066	0,064	0,06563
7,33	50	34	41	29	36	42	0,0279	0,0205	0,9593	1,0374	1,482	0,066	0,064	0,06563
7,5	50	34	39	29	36	40	0,0279	0,0215	0,9593	1,0529	1,482	0,066	0,064	0,06570
7,66	50	34	41	29	36	42	0,0279	0,0205	0,9593	1,0374	1,482	0,066	0,064	0,06563
7,83	50	34	38	29	36	52	0,0279	0,0218	0,9593	1,0604	1,482	0,066	0,064	0,06572
8,66	50	34	40	29	36	45	0,0279	0,0210	0,9593	1,0452	1,482	0,066	0,064	0,06566

Δm (kg/s)	h _{g1} (kJ/kg)	h _{g2} (kJ/kg)	H□ (kJ)	H□ (kJ)	ΔH(kJ)
-0,00048	2563,6	2554,55	7,816	6,005	1,8108
-0,00048	2563,6	2554,55	7,816	6,005	1,8108
-0,00041	2563,6	2554,55	7,816	6,041	1,7752
-0,00048	2563,6	2554,55	7,816	6,005	1,8108
-0,00039	2563,6	2554,55	7,816	6,026	1,7902

Lampiran 4 : Tabel A-1 : Sifat-sifat cairan dan uap jenuh

Untuk melihat sifat-sifat cairan dan uap jenuh yang diinginkan kita dapat menggunakan tabel A-1 pada lampiran 4 berikut ini.

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

Untuk melihat sifat-sifat termodinamika udara jenuh pada tekanan atmosfer 101,325 kPa kita dapat menggunakan tabel A-2 pada lampiran 5 berikut ini.

Apendiks

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 6: Diagram Psicrometri

Diagram psikrometri menggambarkan beberapa sifat penting dari udara kering hingga udara lembab, baik harga entalpi, kelembaban dan volume spesifik dari suatu sampel udara. Hali tersebut bisa kita lihat pada lampiran 6 berikut ini.

