

**PENGARUH KECEPATAN PUTAR SILINDER
DAN KECEPATAN ALIRAN FLUIDA
TERHADAP KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI
PADA SILINDER BERPUTAR**

SKRIPSI

Konsentrasi Teknik Konversi Energi

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



DIDIK PURWANTO

NIM. 0310623029-62

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

TEKNIK MESIN

MALANG

2007

**PENGARUH KECEPATAN PUTAR SILINDER
DAN KECEPATAN ALIRAN FLUIDA
TERHADAP KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI
PADA SILINDER BERPUTAR**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

DIDIK PURWANTO

NIM. 0310623029-62

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. Sudjito, Ph.D

NIP. 130 809 065

Mega Nur Sasongko, ST., MT.

NIP. 132 283 660

**PENGARUH KECEPATAN PUTAR SILINDER
DAN KECEPATAN ALIRAN FLUIDA
TERHADAP KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI
PADA SILINDER BERPUTAR**

Disusun oleh:

Didik Purwanto

0310623029-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 14 Juni 2007

Dosen Penguji

Skripsi 1

Skripsi 2

Ir. Handono Sasmito M.Eng.Sc

NIP. 130 818 811

Ir. I Made Gunadiarta, MT

NIP. 130 604 495

Komprehensif

Ir. Saifuddin Baedowie

NIP. 130 350 753

Mengetahui:

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT

NIP. 132 159 708

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kesempatan kepada saya untuk menulis skripsi ini dengan baik.

Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat yang harus ditempuh oleh mahasiswa jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik. Selain itu penulisan skripsi ini akan dapat melatih mahasiswa untuk memahami, menganalisa, dan menyelesaikan masalah yang nantinya mungkin dapat dijumpai di dunia kerja.

Dalam kesempatan ini, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, Msc.CSE. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin
3. Bapak Prof. Ir. Sudjito, Ph.D selaku pembimbing 1 skripsi dan Bapak Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku pembimbing 2 skripsi
4. Semua Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmunya kepada saya
5. Kedua orang tua dan adik-adik saya atas doanya dan segala bantuan baik moril dan materiil
6. Tunangan saya Murni Wijayanti beserta keluarga atas doanya, kesabaran dan dukungannya
7. Teman-teman yang telah membantu penulisan skripsi ini yang tidak mungkin disebutkan satu-persatu.

Penulis sadar bahwa skripsi ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini berguna bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya.

Malang, 14 Juni 2007

Penulis

DAFTAR ISI

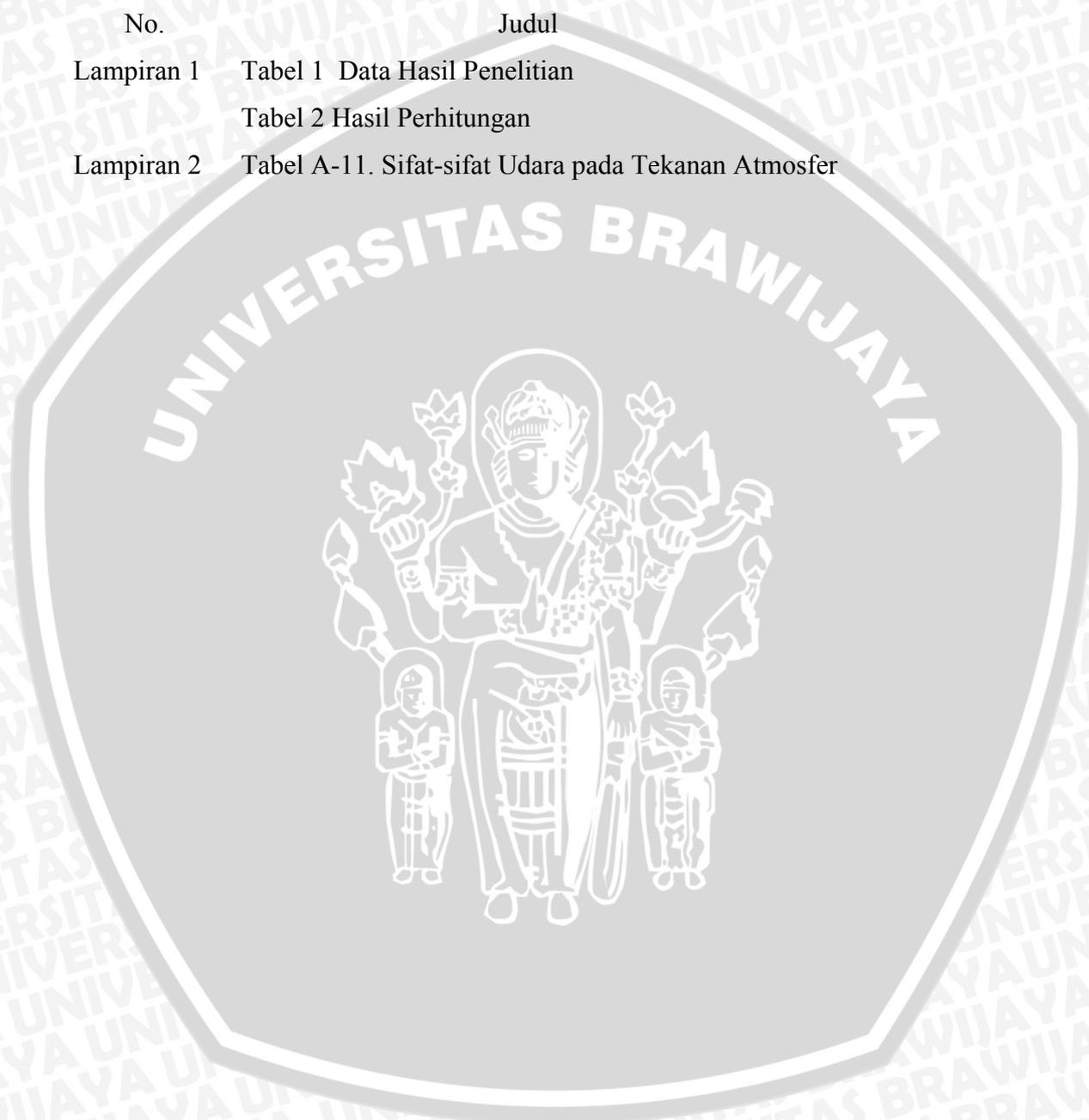
LEMBAR PENGESAHAN	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
RINGKASAN	vi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan masalah	2
1.3 Batasan masalah	2
1.4 Tujuan penelitian	3
1.5 Manfaat penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian sebelumnya	4
2.2 Fluida	5
2.2.1 Persamaan <i>Bernoulli</i>	6
2.2.2 Aliran laminar dan turbulen	6
2.3.3 Dasar-dasar lapisan batas	8
2.3.4 Pola aliran fluida yang dipengaruhi oleh putaran silinder	10
2.3 Perpindahan panas	12
2.3.1 Perpindahan panas konduksi	12
2.3.2 Perpindahan panas konveksi	13
2.3.3 Penentuan harga koefisien perpindahan panas konveksi	19
2.4 Analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa	20
2.5 Hipotesis	25

DAFTAR GAMBAR DAN GRAFIK

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Formasi lapisan batas dan <i>separation</i> pada aliran melintang silinder	9
Gambar 2.2.	Profil Kecepatan digabung dengan <i>Separation</i> pada aliran melintang silinder	10
Gambar 2.3.	aliran melalui silinder bulat dengan putaran untuk $\frac{a\omega}{U_\infty} = (a) 0; (b) 1; (c) 2; (d) 3$	12
Gambar 2.4.	Perpindahan panas konduksi melalui dinding	13
Gambar 2.5.	Perpindahan panas konveksi dari suatu permukaan	14
Gambar 2.6.	Perpindahan panas melewati lapisan fluida	15
Gambar 2.7.	Perpindahan panas melewati lapisan fluida	17
Gambar 2.8.	konveksi paksa pada aliran melintang silinder	19
Gambar 3.1.	Geometri Spesimen	29
Gambar 3.2.	Instalasi Penelitian	31
Gambar 3.3.	Diagram Alir Proses Penelitian	36
Gambar 4.1.	Grafik hubungan antara bilangan <i>Reynold</i> aliran dengan koefisien perpindahan massa	43
Gambar 4.2.	Grafik hubungan antara bilangan <i>Reynold</i> aliran dengan koefisien perpindahan panas konveksi	45
Gambar 4.3.	Grafik hubungan antara bilangan <i>Reynold</i> dengan bilangan <i>Nusselt</i>	48

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Tabel 1 Data Hasil Penelitian Tabel 2 Hasil Perhitungan
Lampiran 2	Tabel A-11. Sifat-sifat Udara pada Tekanan Atmosfer



RINGKASAN

Didik Purwanto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2007, Pengaruh kecepatan Putar Silinder dan Kecepatan Aliran Fluida Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Konveksi Pada Silinder Berputar. Dosen Pembimbing: Prof. Ir. Sudjito, Ph.D. dan Mega Nur Sasongko, ST., MT.

Dalam mesin-mesin konversi energi banyak digunakan komponen-komponen yang berbentuk silinder panas dan berputar pada berbagai variasi kecepatan putar. Seperti halnya pada rotor generator listrik atau motor starter dimana rotor yang berbentuk silinder mengalami pemanasan yang diakibatkan oleh arus listrik. Sehingga dibutuhkan suatu proses pelepasan kalor yang efektif. Kinerja perpindahan panas pada silinder panas yang berputar ditentukan oleh angka koefisien perpindahan panas, semakin besar koefisien perpindahan panas maka proses perpindahan panas semakin optimal. Usaha untuk menentukan angka koefisien perpindahan panas telah banyak dilakukan, namun terdapat beberapa kesulitan dalam penentuan angka koefisien perpindahan panas, karena memerlukan ketelitian yang tinggi. Dalam skripsi ini penulis melakukan penelitian bagaimana pengaruh dari variasi kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder terhadap koefisien perpindahan panas pada silinder berputar dengan menggunakan metode analogi perpindahan massa.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Bahan uji yang digunakan adalah *Naphthalene* yang dicetak berbentuk silinder. Variabel bebas dalam penelitian ini ialah kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah koefisien perpindahan massa yang akan dipergunakan sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan koefisien perpindahan kalor.

Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan bertambahnya kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder akan berpengaruh pada besarnya bilangan *Reynold*, besarnya bilangan *Reynold* akan berpengaruh pada besarnya nilai koefisien perpindahan panas yang terjadi pada silinder berputar. Nilai perpindahan panas yang terbesar adalah terjadi pada kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder yang terbesar yaitu $v = 6,0706$ m/s dan $n = 1250$ rpm, yang ditunjukkan dengan besarnya koefisien perpindahan panas yang dihasilkan sebesar $113,78$ W/m².°K. Sedangkan nilai perpindahan panas yang paling kecil terjadi pada kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder yang paling kecil yaitu $v = 1,524$ m/s dan $n = 500$ rpm, yang ditunjukkan dengan besarnya koefisien perpindahan panas yang dihasilkan sebesar $44,4454$ W/m².°K. Dari penelitian ini dihasilkan persamaan perpindahan panas yang dinyatakan dengan bilangan *Nusselt*, yaitu: $Nu = 0,5968.(Re^2 + Re_\omega^2)^{0,2738}$. Dengan Koefisien korelasinya adalah 95,56% dengan tingkat kesalahan (Standart deviation) 3,74%. Untuk kondisi batas $2000 < Re_D < 8000$ dan $700 < Re_\omega < 1800$ atau 500 (rpm) $< n < 1250$ (rpm).

Kata kunci : kecepatan putar silinder, kecepatan aliran fluida, koefisien perpindahan panas konveksi , silinder berputar.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada proses perpindahan panas konveksi, prediksi angka koefisien perpindahan panas sangat menentukan kinerja dari proses perpindahan panas alat penukar kalor. Semakin tinggi angka koefisien perpindahan panasnya maka dapat dipastikan proses perpindahan panas akan lebih optimal. Peningkatan angka koefisien perpindahan panas pada komponen penukar panas merupakan salah satu upaya untuk memperoleh penukar panas dengan kinerja yang tinggi. Untuk mencapai koefisien perpindahan panas yang tinggi maka model aliran fluida dan bentuk geometri dari permukaan yang dilalui fluida akan sangat berpengaruh dalam prediksi angka koefisien perpindahan panasnya.

Silinder merupakan bentuk komponen yang paling banyak digunakan, hampir disemua mesin-mesin konversi energi menggunakan komponen yang berbentuk silinder. Tidak jarang silinder tersebut menghasilkan panas, apabila panas tersebut dibiarkan akan merusak komponen tersebut, sehingga dibutuhkan proses pelepasan kalor dengan cara melakukan pendinginan pada silinder tersebut. Seperti halnya yang terjadi pada rotor generator listrik atau motor starter dimana rotor yang berbentuk silinder mengalami pemanasan yang diakibatkan oleh arus listrik, yang apabila panas tersebut dibiarkan akan merusak isolator pada rotor sehingga akan mengakibatkan rotor terbakar. Oleh karena itu dibutuhkan proses pelepasan kalor secara konveksi. Pada kondisi ini model aliran fluida diantaranya dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida bebasnya dan kecepatan putar silindernya.

Usaha untuk menentukan angka koefisien perpindahan panas telah banyak dilakukan diantaranya dengan mengukur suhu permukaan dan laju perpindahan panas. Hanya saja beberapa kesulitan dalam penentuan angka koefisien perpindahan panas konveksi melalui metode ini relatif memerlukan ketelitian yang tinggi. Hal ini terjadi karena tingkat kesulitan dalam pemasangan termokopel pada permukaan tabung silinder berputar yang dapat mengganggu aliran dan keseimbangan putaran poros, jumlahnya yang relatif banyak dan kesulitan dalam

pembacaan suhu rata-ratanya. Oleh karena itu diperlukan suatu metode alternatif yaitu metode analogi perpindahan massa. Metode analogi perpindahan massa ini dianggap relatif lebih mudah pelaksanaannya dan hasilnya sama dengan metode pengukuran suhu dan laju perpindahan panas.

Penganalogian dari sistem aliran panas dengan sistem aliran massa dapat ditentukan berdasarkan pada prinsip-prinsip dasar dari perpindahan panas dan perpindahan massa tersebut. Perpindahan panas terjadi karena adanya gradien suhu, dimana proses perpindahan panas akan berhenti apabila tidak terdapat beda suhu lagi. Sedangkan perpindahan massa terjadi karena adanya gradien konsentrasi, dimana proses perpindahan massa akan terhenti apabila gradien konsentrasi berkurang sampai menjadi nol.

Dalam penelitian ini digunakan bahan yang berupa *Naphthalene* atau kapur barus ($C_{10}H_8$) yang dicetak berbentuk tabung silinder, kemudian diputar dimana kecepatan putar tabung silinder di variasikan dan begitu juga dengan kecepatan fluidanya di variasikan pula. Kecepatan putar tabung silinder dan kecepatan fluida dibuat bervariasi untuk mengetahui nilai koefisien perpindahan panas yang paling besar. Hal ini ditinjau dari kehilangan massa *Naphthalene* yang paling besar.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah diatas, maka dapat ditarik rumusan masalah yang akan diteliti yaitu bagaimana pengaruh kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder berputar dengan menggunakan metode analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa?

1.3. Batasan Masalah

Untuk menjawab rumusan masalah diatas dan menghindari meluasnya permasalahan yang ada, maka dalam penelitian diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Fluida yang digunakan adalah udara.

2. Kondisi pada setiap pengujian dianggap steady state.
3. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah *Naphthalene* atau kapur barus ($C_{10}H_8$) yang ada di pasaran.
4. Tidak membahas reaksi kimia dari kapur barus pada saat proses penyubliman.
5. Perpindahan kalor yang diukur hanya pada bagian permukaan selimut silinder kapur barus saja.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder berputar dengan menggunakan metode analogi perpindahan massa.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Dapat mengetahui koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder-silinder yang berputar.
2. Dapat digunakan sebagai dasar dalam menganalisa perpindahan panas pada silinder berputar.
3. Dapat dipakai sebagai bahan pertimbangan dalam merancang proses pendinginan pada komponen-komponen yang berbentuk silinder berputar.
4. Dapat memberikan kontribusi pada dunia industri dalam mendesain sistem pendinginan pada silinder yang berputar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian-penelitian sebelumnya

Penetapan koefisien perpindahan kalor dengan menggunakan metode analogi perpindahan kalor dan massa bukan merupakan metode yang baru, hanya saja metode ini kurang banyak dikenal. Beberapa studi tentang koefisien perpindahan kalor dengan menggunakan analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa, diantaranya kheumnam cho, dkk (1992) menggunakan teknik sublimasi *Naphthalene* untuk mengukur koefisien difusi *Naphthalene* ke udara dengan memvariasikan penggunaan temperatur. Penelitian dilakukan pada temperatur 15°-55°C dimana pada penelitian sebelumnya dilakukan penelitian pada satu temperatur saja (25°C). Dari eksperimen ini diperoleh hasil bahwa peningkatan temperatur sebanding dengan meningkatnya koefisien difusi *Naphthalene*.

J.S Lewis (1971) menggunakan analogi perpindahan panas dan massa pada aliran sekeliling sebuah silinder yang dibuat dari *Naphthalene* yaitu dengan mengukur uap *Naphthalene* yang berdifusi ke udara yang dilakukan pada *Wind Tunnel*. Penelitian dilakukan untuk meramalkan perpindahan panas dari pengukuran perpindahan massa. Nilai pengukuran untuk temperatur udara lingkungan dan hasil pengukuran digunakan untuk meramalkan nilai Nu dan Re.

Ian Kautsar (2005) dengan judul skripsinya Analisis Perpindahan Kalor Pada Permukaan Plat dengan Variasi Length (L) – Width (W) Ratio Menggunakan Analogi Perpindahan massa. Di dalam penelitian juga digunakan teknik sublimasi *Naphthalene* dimana digunakan 5 spesimen dengan variasi length dan width yang berbeda-beda yang diletakkan pada terowongan angin (*wind tunnel*). Dalam penelitiannya digunakan kecepatan aliran fluida yang konstan. Koefisien perpindahan panas diperoleh dari pengukuran perpindahan massa yang terjadi pada *Naphthalene*. Hasil dari penelitian ini didapatkan, dengan Length (L) – Width (W) Ratio *Naphthalene* yang semakin kecil (semakin besar luas permukaan) maka nilai koefisien perpindahan kalor juga akan semakin besar.

2.2 Fluida

Fluida didefinisikan sebagai suatu zat yang akan secara terus menerus akan berubah bentuk apabila dikenakan tegangan geser, meskipun tegangan geser tersebut sangat kecil. Fluida akan terus bergerak dan berubah selama tegangan geser itu bekerja. Makin besar laju deformasi fluida, makin besar pula tegangan geser yang terjadi pada fluida tersebut.

Definisi fluida ini menyatakan bahwa tegangan geser hanya ada jika fluida sedang mengalami deformasi (*deformation*) dan tegangan geser hanya terjadi pada fluida viskos (*viscous fluid*), seperti pada fluida aktual (*actual fluid*). Biasanya dalam dunia rekayasa fluida dianggap tidak viskos sehingga tidak terjadi tegangan geser meskipun fluida tersebut mengalami deformasi, fluida demikian disebut fluida ideal (*ideal fluid*).

Semua fluida memiliki sifat-sifat yang penting dalam dunia rekayasa. Kerapatan, kompresibilitas, dan kapilaritas merupakan sifat-sifat fluida yang diperlukan untuk fluida dalam keadaan diam, tetapi untuk fluida dalam keadaan bergerak masih ada satu sifat lagi yang penting yaitu viskositas.

Sifat-sifat gas seperti tetapan gas, energi dalam, entalpi, entropi untuk gas serta panas jenis dan konduktivitas baik untuk gas maupun zat cair, penting untuk analisa perpindahan panas dan dinamika gas, sedangkan temperatur dan tekanan dianggap sebagai sifat-sifat termodinamika yang menentukan sifat-sifat lain.

Kerapatan merupakan ukuran untuk konsentrasi zat tersebut dan dinyatakan dalam massa per satuan volume, sifat ini ditentukan dengan cara menghitung perbandingan massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian tersebut.

Kompresibilitas merupakan ukuran perubahan kerapatan fluida akibat gerakan viskos atau kompresi oleh suatu tekanan dari yang bekerja terhadap volume fluida, dinyatakan dengan perbandingan tekanan yang bekerja dari luar dengan perubahan volume fluida tiap satuan volumenya.

Viskositas merupakan ukuran ketahanan fluida terhadap tegangan geser (*shear stress*), viskositas itu sendiri tergantung dari dua hal yaitu tegangan geser dan laju perubahan bentuknya (*deformation*).

2.2.1 Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli sering dianggap sebagai persamaan energi karena suku $V^2/2gc$ menunjukkan energi kinetik, dan tekanan menunjukkan energi potensial. Tetapi haruslah diingat bahwa suku – suku tersebut diturunkan dari analisa dinamik, sehingga persamaan ini secara fundamental adalah persamaan dinamik. Bahkan konsep energi kinetik itu sebetulnya berdasarkan analisa dinamik.

Persamaan Bernoulli untuk aliran sepanjang garis arus ialah :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \frac{V^2}{g.c} = \text{kons tan} \quad (\text{J.P. Holman; 1991 ,196}) \quad (2-1)$$

Atau dalam bentuk diferensial :

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{VdV}{g.c} = 0 \quad (\text{J.P. Holman; 1991 ,196}) \quad (2-2)$$

Di mana :

P = Tekanan pada titik tertentu dalam aliran (N/m^2)

V = Kecepatan aliran (m/s)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

2.2.2 Aliran laminar dan turbulen

Aliran laminar didefinisikan sebagai aliran yang bergerak dalam lapisan – lapisan di mana perpindahan momentum dan massa terjadi secara molekuler dalam skala sub mikroskopis dari lapisan yang mempunyai kecepatan relatif tinggi menuju lapisan lain yang mempunyai kecepatan relatif lebih rendah. Kecenderungan ke arah turbulensi diredam habis oleh gaya – gaya viskos yang memberikan hambatan terhadap gerakan relatif lapisan – lapisan aliran fluida. Pada aliran laminar partikel fluida bergerak secara berurutan mengikuti lintasan yang lancar dengan kecepatan yang tetap.

Lain halnya Pada aliran turbulen, secara mikroskopik akan terdapat sejumlah partikel fluida yang bergerak secara acak dengan kecepatan yang

berfluktuasi dan saling interaksi antar gumpalan fluida. Pada aliran ini tidak terlihat lagi adanya lapisan – lapisan fluida sehingga aliran fluida dibayangkan sebagai bongkahan – bongkahan fluida. Partikel – partikel bongkahan berfungsi sebagai pembawa energi dan memindahkan energi dengan cara bercampur dengan partikel – partikel lain didalam fluida tersebut.

Obsorn *Reynold* memberikan suatu batas kualitatif tentang fenomena aliran laminer dan aliran turbulen sebagai berikut:

- aliran melintang silinder diam
 - a. Aliran laminer → $Re < 2 \times 10^5$
 - b. Aliran turbulen → $Re > 2 \times 10^5$
- Pada silinder berputar
 - c. Aliran laminer → $Re_{\omega} < 50$
 - d. Aliran turbulen → $Re_{\omega} \geq 50$

Dimana bilangan *Reynold* (Re) merupakan Perbandingan antara pengaruh inersia terhadap viskositas didalam suatu fluida, yang merupakan parameter tidak berdimensi. Hal ini dapat dirumuskan dengan persamaan umum sebagai berikut :

$$Re = \frac{V.L}{\nu} \quad (\text{J.P. Holman; 1991 ,94) (2-3)}$$

Dimana :

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

L = Panjang spesimen (m)

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = viskositas kinematik fluida (m^2/s)

Bilangan *Reynold* untuk aliran melintang silinder diam karakteristiknya ditentukan oleh diameternya, dan dipertegas dengan persamaan sebagai berikut:

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (\text{Yunus A. Cengel; 2003: 380) (2-4)}$$

Dimana:

ρ = densitas (kg/m^3)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter (m)

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = viskositas kinematik fluida (m^2/s)

μ = viskositas dinamik kg/s.m

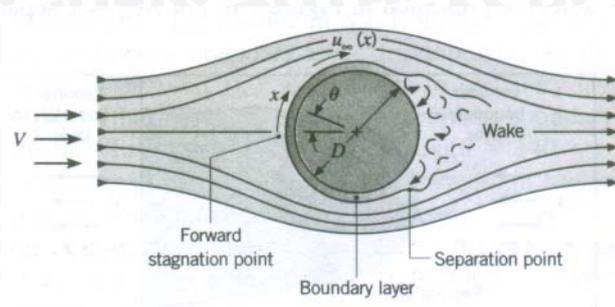
Sedangkan bilangan *Reynold* untuk silinder berputar didapatkan dari rumus:

$$Re_{\omega} = \frac{D^2 \omega}{2\nu} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 101}) \quad (2-5)$$

Dimana: ω = kecepatan sudut = $\frac{2\pi n}{60}$ (rad/s)

2.2.3 Dasar-dasar Lapisan Batas

Lapisan batas pada hakekatnya membagi medan aliran disekitar sebuah benda ke dalam dua wilayah, yaitu sebuah lapisan tipis yang menutupi permukaan benda di mana gradien kecepatan besar dan gaya viskos besar, dan sebuah daerah di luar lapisan ini di mana kecepatan hampir sama dengan harga aliran bebasnya dan pengaruh viskositas dapat diabaikan. Bentuk profil kecepatan di lapisan batas tergantung pada jenis alirannya. Sebagai contoh, Untuk fluida yang mengalir melintang silinder, aliran bebas fluida akan terhenti pada bagian depan silinder yang disebut dengan titik stagnasi, Dengan disertai naiknya tekanan. Dari titik ini tekanan akan menurun seiring dengan bertambahnya x , koordinat garis aliran (*streamline*) dan membentuk lapisan batas (*boundary layer*) dibawah pengaruh dari gradien tekanan yang menguntungkan (*favorable pressure gradient*) ($dp/dx < 0$). Sampai pada akhirnya tekanannya mencapai minimum, dan selanjutnya menuju bagian belakang silinder terjadi pengembangan lapisan batas (*boundary layer*) seiring dengan terjadinya gradien tekanan yang merugikan (*adverse pressure gradient*) ($dp/dx > 0$), seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.

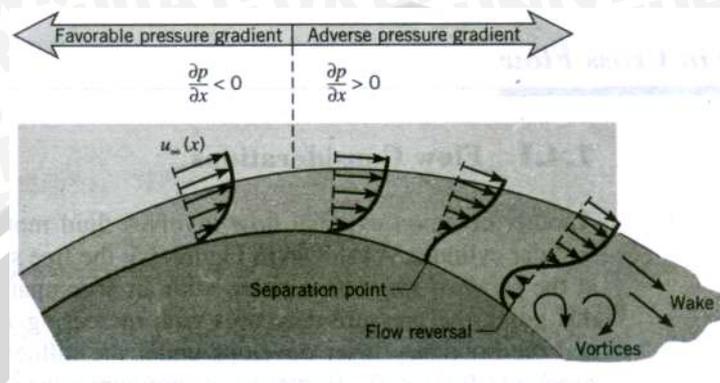


Gambar 2.1. Formasi lapisan batas dan *separation* pada aliran melintang silinder

Sumber : Frank P. Incropera; 2003: 407

Yang perlu diperhatikan pada aliran melintang silinder adalah perbedaan antara kecepatan aliran atas (*upstream velocity*) V dan kecepatan aliran bebas (*free stream velocity*) u_{∞} . Tidak seperti kondisi pada plat datar, pada aliran bercabang (*parallel flow*) aliran ini berbeda, dengan u_{∞} sekarang bergantung pada jarak x dari titik stagnasi (*stagnation point*). Dari persamaan Euler's untuk aliran inviscid, $u_{\infty}(x)$ harus menunjukkan perilaku yang berlawanan terhadap $P(x)$. Hal itu, berawal dari $u_{\infty} = 0$ pada titik stagnasi, kemudian fluida mengalami percepatan karena disebabkan oleh gradien tekanan yang menguntungkan (*favorable pressure gradient*) ($du_{\infty}/dx > 0$ when $dp/dx < 0$), sampai mencapai kecepatan maksimum ketika $dp/dx = 0$, dan kemudian fluida mengalami perlambatan karena disebabkan gradien tekanan yang merugikan (*adverse pressure gradient*) ($du_{\infty}/dx < 0$ when $dp/dx > 0$). Ketika fluida mengalami perlambatan, gradien kecepatan pada permukaan $\partial u/\partial y|_{y=0}$, sampai pada akhirnya menjadi nol seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Pada lokasi ini, merupakan titik perpisahan (*separation point*), fluida didekat permukaan cukup kekurangan momentum untuk menanggulangi gradien tekanan dan tidak mungkin meneruskan pergerakan dari aliran bawah (*downstream*). Sejak fluida yang mendekat juga mengalir balik menghalangi *upstream*, maka terjadi lapisan batas perpisahan (*separation*). Pada kondisi ini terjadi pelepasan lapisan batas dari permukaan, dan aliran tak beraturan (*Wake*) terbentuk pada daerah aliran bawah (*downstream*). Aliran pada daerah ini

digolongkan pada formasi vortex dan sangat tidak beraturan. Titik perpisahan (*separation point*) adalah lokasi dimana $(\partial u / \partial y)_s = 0$



Gambar 2.2. Profil Kecepatan digabung dengan *Separation* pada aliran melintang silinder

Sumber : Frank P. Incropera; 2003: 408

2.2.4 Pola aliran fluida yang dipengaruhi oleh putaran silinder

Kondisi aliran fluida sangat berpengaruh pada proses perpindahan panas konveksi. Untuk aliran fluida dengan kecepatan U_∞ yang melintasi silinder berputar dengan kecepatan n menghasilkan garis aliran fluida disekitar silinder, dimana semakin besar putaran silinder maka kecepatan fluida juga semakin besar dibagian bawah silinder dan sebaliknya semakin kecil dibagian atasnya. Bentuk garis aliran ditentukan oleh perbandingan antara kecepatan putar tepi silinder (V_θ) dan kecepatan fluida, dimana jika dinyatakan menjadi bentuk persamaan, menjadi:

$$\frac{a\omega}{U_\infty} \quad \text{(Frank M. White; 1986: 79) (2-6)}$$

Dimana:

$a\omega = v_\theta$ = kecepatan putar tepi silinder

$a = r$ = jari-jari lingkaran (m)

U_∞ = kecepatan fluida (m/s)

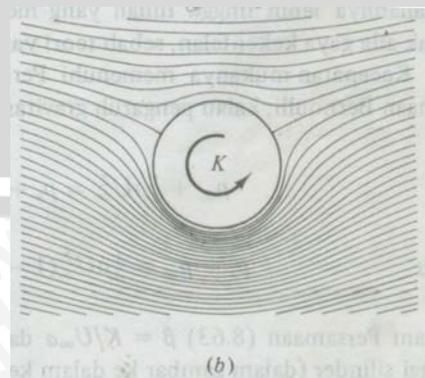
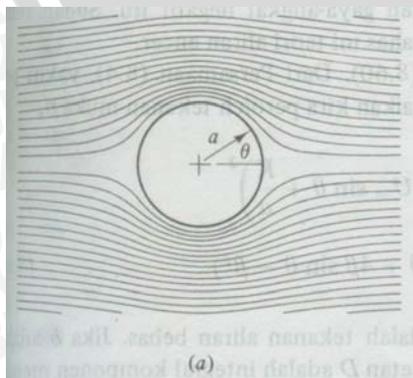
Gambar dibawah ini menunjukkan bentuk garis aliran untuk kondisi $\frac{a\omega}{U_\infty}$ yang berbeda. Pertama kondisi dimana silinder dalam keadaan diam tanpa putaran dan fluida mengalir dengan kecepatan U_∞ . Maka titik stagnasinya terjadi pada sudut $\theta_s = 0^\circ$ dan 180° , bentuk garis alirannya diperlihatkan pada gambar 2.3a. Yang kedua untuk kondisi $\frac{a\omega}{U_\infty} = 1$, maka titik stagnasinya terjadi pada sudut $\theta_s = 30^\circ$ dan 150° , bentuk garis alirannya diperlihatkan pada gambar 2.3b. Yang ketiga adalah untuk kondisi $\frac{a\omega}{U_\infty} = 2$, maka titik stagnasinya berpadu dipuncak silinder pada sudut $\theta_s = 90^\circ$, bentuk garis alirannya diperlihatkan pada gambar 2.3c. Dari ketiga kondisi diatas, untuk mencari posisi titik stagnasi berlaku persamaan sebagai berikut:

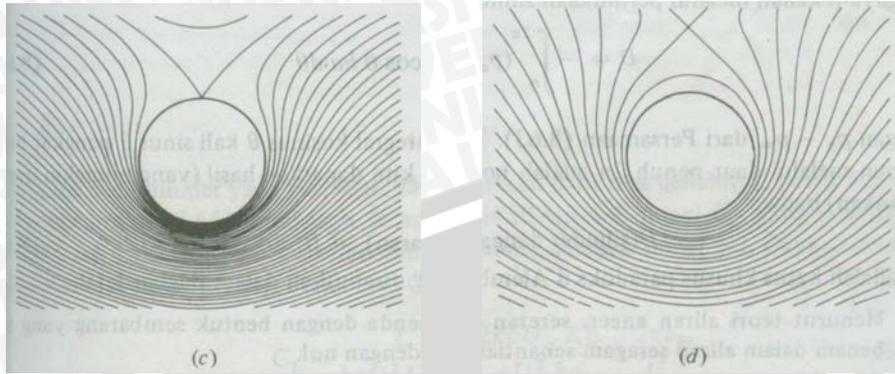
$$\sin \theta_s = \frac{a\omega}{2U_\infty} \quad (\text{Frank M. White; 1986: 80}) \quad (2-7)$$

Yang terakhir adalah kondisi dimana $a\omega > 2U_\infty$ persamaan untuk mencari titik stagnasi diatas tidak berlaku lagi dan titik stagnasinya hanya satu terletak diatas silinder, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.3d, pada suatu titik $y = h$ yang memenuhi persamaan:

$$\frac{h}{a} = \frac{1}{2} \left[\beta + (\beta^2 - 4)^{1/2} \right] \quad (\text{Frank M. White; 1986: 80}) \quad (2-8)$$

Dimana: $\beta = \frac{a\omega}{U_\infty} > 2$





Gambar 2.3. aliran melalui silinder bulat dengan putaran untuk $\frac{\alpha\omega}{U_\infty} =$ (a) 0; (b) 1; (c) 2; (d) 3

Sumber: Frank M. White; 1986: 79

2.3 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*Heat Transfer*) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi karena perbedaan suhu diantara benda atau material. Dari termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang berpindah itu dinamakan kalor (*Heat*). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga untuk meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi – kondisi tertentu.

2.3.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah proses perpindahan energi dimana energi mengalir dari daerah berenergi tinggi ke daerah berenergi rendah dalam suatu medium baik itu padat, cair, maupun gas atau antar medium berlainan yang bersinggungan secara langsung.

Jika pada suatu benda terdapat suatu gradien suhu (*temperatur gradient*), maka akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah. Kita katakan bahwa energi berpindah secara konduksi atau hantaran dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal.

$$\frac{Q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x}$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitasnya atau tetapan sebandingan, maka :

$$Q = -k \cdot A \frac{dT}{dX} \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998: 21}) \quad (2-9)$$

Dengan :

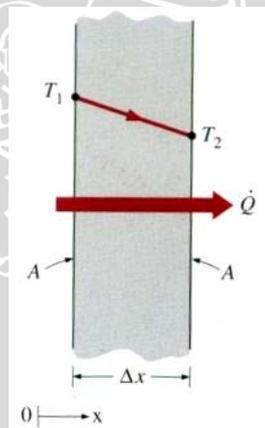
Q = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)

k = konduktifitas termal bahan ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), tanda minus diselipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu.

A = Luas panas (m^2)

dT = beda temperatur pada penampang ($^\circ\text{C}$)

dX = tebal material (m)



Gambar 2.4. Perpindahan panas konduksi melalui dinding

Sumber : Yunus A. Cengel; 2003: 18

2.3.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah proses perpindahan energi antara permukaan padat dan aliran fluida cair maupun gas yang bersinggungan,

merupakan gabungan dari konduksi dan angkutan (*transport*) massa. Untuk laju perpindahan panas konveksi berlaku persamaan *Newton* tentang pendinginan, yaitu:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{Yunus A. Cengel;1998:29}) \quad (2-10)$$

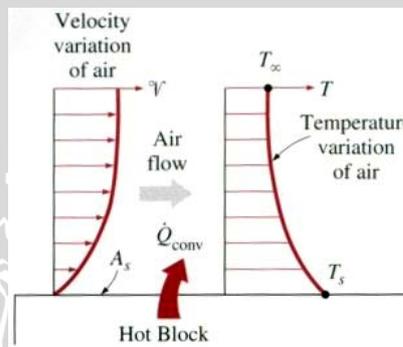
Di mana :

Q = Laju aliran panas konveksi (Watt)

A = Luas panas (m²)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (Watt/m²°C)

(T_s - T_∞) = beda temperatur permukaan dengan aliran bebas fluida (°C)



Gambar 2.5. Perpindahan panas konveksi dari suatu permukaan

Sumber : Yunus A. Cengel; 2003: 29

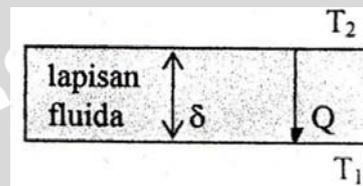
Jika batas tersebut bersuhu lebih tinggi daripada fluida itu, maka terlebih dahulu panas mengalir dengan cara konduksi dari benda padat ke partikel-partikel tipis fluida di dekat dinding. Karena lapisan tipis fluida yang bersinggungan dengan permukaan padat diasumsikan memiliki kecepatan nol dan tidak terdapat pergerakan fluida. Sehingga berlaku persamaan:

$$q_{conv} = q_{cond} = -k_{fluid} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{Yunus A. Cengel;1998:351}) \quad (2-11)$$

Dimana: $(\partial T/\partial y)_{y=0}$ adalah gradien temperatur pada permukaan

Kemudian panas berpindah dengan jalan konveksi dari permukaan sebagai akibat dari pergerakan fluida. Dari persamaan 2-10 dan 2-11 untuk *heat flux* didapatkan persamaan:

$$h = \frac{-k_{fluid} (\partial T / \partial y)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998:351}) \quad (2-12)$$



Gambar 2.6. Perpindahan panas melewati lapisan fluida

Sumber : Yunus A. Cengel; 1998: 352

Dalam penerapannya, untuk memudahkan dalam mempelajari perpindahan panas konveksi sering digunakan bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) yaitu yang disebut dengan bilangan *Nusselt*. Jika suatu lapisan fluida dengan tebal δ dan memiliki beda temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$, maka akan terjadi perpindahan panas melewati lapisan fluida tersebut. Mekanisme perpindahan panas bisa secara konveksi jika terdapat fluida yang bergerak atau bisa secara konduksi jika lapisan fluida tidak bergerak. Sehingga laju *heat flux* yang terjadi adalah:

$$q_{conv} = h\Delta T \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998:352}) \quad (2-13)$$

$$q_{kond} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998:352}) \quad (2-14)$$

Jika kedua *heat flux* dari persamaan 2-13 dan 2-14 dibandingkan, maka:

$$\frac{q_{conv}}{q_{kond}} = \frac{h\Delta T}{k \frac{\Delta T}{\delta}} = \frac{h\delta}{k} = Nu \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998:352}) \quad (2-15)$$

Dari uraian di atas, maka bilangan *Nusselt* dapat didefinisikan sebagai perbandingan perpindahan panas konveksi melalui lapisan fluida relatif terhadap perpindahan panas konduksi melalui lapisan fluida yang sama. Semakin besar bilangan *Nusselt*, maka semakin efektif perpindahan panas konveksi yang terjadi

Berdasarkan gerakan fluidanya perpindahan panas konveksi dikelompokkan menjadi :

a. Konveksi alamiah (*natural convection*)

Perpindahan panas konveksi alamiah terjadi bilamana sebuah benda ditempatkan dalam suatu fluida yang suhunya lebih tinggi atau yang lebih rendah daripada benda tersebut. Sebagai akibat perbedaan suhu tersebut, panas mengalir antara fluida dan benda itu serta mengakibatkan perubahan kerapatan lapisan-lapisan fluida di dekat permukaan. Perbedaan kerapatan menyebabkan fluida yang lebih berat mengalir ke bawah dan fluida yang lebih ringan mengalir ke atas. Dimana gerakan fluida itu disebabkan hanya oleh perbedaan kerapatan yang diakibatkan oleh gradien suhu, tanpa dibantu pompa atau kipas. Arus konveksi alamiah memindahkan energi-dalam yang tersimpan dalam fluida dengan cara yang pada hakekatnya sama dengan arus konveksi paksa. Namun, intensitas gerakan pencampurannya dalam konveksi alamiah pada umumnya lebih kecil, dan akibatnya koefisien perpindahan panasnya lebih kecil dari pada dalam konveksi paksa. Persamaan yang dihasilkan dinyatakan dengan persamaan *Nusselt*:

$$Nu = \frac{h\delta}{k} = C(Gr.Pr)^n = CRa^n \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998: 417})(2-16)$$

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)\delta^3}{\nu} Pr \quad (\text{Yunus A. Cengel; 1998: 417})(2-17)$$

Dimana:

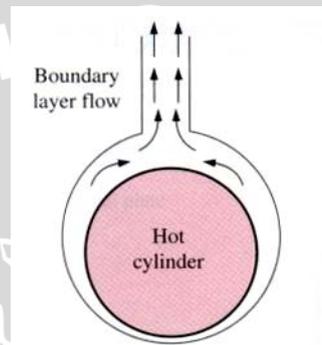
C = koefisien proporsional (tidak berdimensi)

g = percepatan gravitasi (981 m/s²)

β = koefisien volumetric dari ekspansi panas (k⁻¹)

T_s = temperatur permukaan (°C)

- T_{∞} = temperatur ruangan ($^{\circ}\text{C}$)
 ν = viskositas kinematik (m^2/s)
 n = exponent
 Nu = bilangan *Nusselt*
 Gr = bilangan *Grashof*
 Pr = bilangan *Prandtl*
 Ra = bilangan *Rayleigh*



Gambar 2.7. konveksi alamiah pada silinder

Sumber: Yunus A. Cengel; 2003: 470

b. Konveksi paksa (*forced convection*)

Suatu proses perpindahan panas konveksi dimana fluidanya dipaksa untuk mengalir dengan memanfaatkan peralatan luar seperti pompa, kipas, dan yang lainnya. Dalam menganalisa laju perpindahan kalor konveksi sangat dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panasnya, dimana Koefisien perpindahan panas konveksi bukan merupakan properti dari fluida tetapi secara eksperimental dapat ditentukan dan sangat bergantung pada geometri permukaan, aliran fluida, sifat – sifat fluida, dan kecepatan aliran fluida. Sehingga koefisien perpindahan panas konveksi dipengaruhi keadaan yang kompleks.

Perpindahan panas pada silinder berputar merupakan salah satu penerapan dari konveksi paksa. Perpindahan kalor pada silinder berputar yang ditempatkan pada terowongan angin berkecepatan tertentu, merupakan perpindahan kalor konveksi gabungan. Dalam hal ini terdapat tiga keadaan sebagai berikut:

- Konveksi paksa disebabkan aliran bebas
- Konveksi paksa disebabkan rotasi silinder

c. Konveksi bebas

1. Untuk kondisi perpindahan kalor dimana konveksi paksa yang disebabkan aliran bebas paling dominan, maka bentuk korelasi bilangan *Nusselt* keseluruhan adalah:

$$Nu = 0.046 Re^{0.76} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 101}) \quad (2-20)$$

Dengan syarat:

$$\left(Pr^{1/2} \cdot Re^{1/2} \right) / Ra^{1/4} > 2 \quad \text{dan} \quad Re^{1/2} / Re_{\omega}^{1/2} > 2$$

2. Untuk kondisi perpindahan kalor dimana konveksi paksa yang disebabkan rotasi silinder paling dominan maka korelasi bilangan *Nusselt* secara keseluruhan adalah:

$$Nu = 0,5 Re_{\omega}^{0.5} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 102}) \quad (2-21)$$

Dengan syarat:

$$\left(Pr^{1/2} \cdot Re_{\omega}^{1/2} \right) / Re^{1/4} > 2$$

3. Jika rotasi silinder sangat rendah, dengan putaran 2 rpm dan $Re_{\omega} = 25$ maka korelasi bilangan *Nusselt* keseluruhannya adalah:

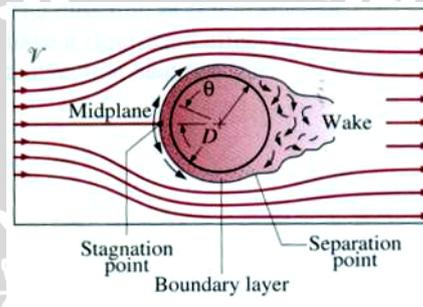
$$Nu = 0,27 Ra^{0.33} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 102}) \quad (2-22)$$

4. Untuk kondisi dimana mekanisme konveksi alamiah dan konveksi paksa rotasi bersama-sama mempengaruhi perpindahan kalor pada silinder berputar, maka korelasi bilangan *Nusselt*-nya adalah:

$$Nu = 0,1 \left(Re_{\omega}^2 + 2Ra \right)^{0.36} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 102}) \quad (2-23)$$

5. Untuk kondisi dimana konveksi alamiah, konveksi paksa akibat rotasi dan konveksi paksa akibat aliran bebas, secara bersamaan mempengaruhi perpindahan kalor pada silinder berputar, maka korelasi bilangan *Nusselt* keseluruhannya adalah:

$$Nu = 0,1(Re^2 + Re_\omega^2 + 2Ra)^{0,36} \quad (\text{Raldi Artono Koestoer; 2002: 103}) \quad (2-24)$$



Gambar 2.8. konveksi paksa pada aliran melintang silinder

Sumber: Yunus A. Cengel; 2003: 380

2.3.3 Penentuan Harga Koefisien Perpindahan panas konveksi

Tersedia empat cara umum untuk menentukan harga koefisien perpindahan panas konveksi:

1. Analisa dimensional yang digabungkan dengan percobaan-percobaan.

Analisa dimensional adalah sederhana dari segi matematika dan telah mendapatkan lingkup penerapan yang luas. Keterbatasan utama metode ini ialah bahwa hasil-hasil yang diperoleh dengan metode ini belum rampung serta tidak bermanfaat jika tidak dilengkapi dengan data eksperimental.

2. Penyelesaian matematik yang eksak terhadap persamaan-persamaan lapisan batas.

Analisa matematik eksak memerlukan penyelesaian serentak terhadap persamaan-persamaan yang menggambarkan gerakan fluida serta perpindahan energi didalam fluida yang bergerak. Metode tersebut mensyaratkan difahaminya mekanisme-mekanisme fisiknya secara cukup baik agar dapat dirumuskan dalam

bahasa matematika. Syarat pendahuluan ini membatasi ruang lingkup penyelesaian eksak karena persamaan-persamaan matematik yang menggambarkan aliran fluida serta mekanisme perpindahan panasnya hanya dapat ditulis selengkapnya amat rumit.

3. Analisa pengira-iraan terhadap lapisan batas dengan metode integral

Analisa pengira-iraan tentang lapisan batas menghindari uraian matematik yang terperinci tentang aliran didalam lapisan batas. Guna menggambarkan distribusi kecepatan serta suhu didalam lapisan batas dipakai persamaan yang masuk akal tetapi sederhana. Maka soalnya dianalisa dalam skala mikroskopik dengan menerapkan persamaan gerakan serta persamaan energi pada kumpulan (*aggregate*) partikel-partikel fluida yang terdapat didalam lapisan batas. Metode ini relatif sederhana dan metode ini memberikan penyelesaian terhadap soal-soal yang tidak dapat dikerjakan dengan analisa matematik yang eksak.

4. Analogi antara perpindahan panas, massa dan momentum

Ada kesamaan yang utama diantara proses fisik yang mendasar pada proses perpindahan momentum, panas dan massa pada kondisi lapisan batas aliran yang steady untuk fluida *incompressible Newtonian*. Dimana pada perpindahan momentum tegangan geser adalah sebanding dengan gradien kecepatan, sedangkan untuk perpindahan panas adalah sebanding dengan gradien temperatur, dan untuk perpindahan massa adalah sebanding dengan gradien konsentrasinya (kerapatannya). Karena adanya kesamaan kondisi inilah metode ini banyak dipakai dalam memprediksi koefisien perpindahan panas konveksi.

2.4 Analogi Perpindahan Kalor dan Perpindahan Massa

Angkutan salah satu unsur fluida dari daerah yang konsentrasinya lebih tinggi ke daerah yang konsentrasinya lebih rendah disebut perpindahan massa (*mass transfer*). Perpindahan massa dapat terjadi karena beberapa fenomena yang berlainan. Ada perpindahan massa yang berlangsung dengan konveksi, dalam arti massa berpindah dari suatu tempat ke tempat lain dalam satu aliran. Perpindahan massa jenis ini terjadi pada tingkat makroskopis dan biasanya ditangani sebagai masalah mekanika fluida. Bila suatu campuran gas dan zat cair terkandung

sedemikian rupa sehingga terdapat gradien konsentrasi dari salah satu atau beberapa konstituen dalam sistem itu sehingga akan terjadi perpindahan massa sebagai akibat difusi (*diffusion*) dari daerah konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah.

Dalam memahami mekanisme perpindahan panas dapat ditarik suatu analogi terhadap perpindahan massa. Perpindahan massa dengan perpindahan panas mempunyai mekanisme yang hampir sama dalam perpindahannya untuk medium tertentu, seperti misalnya perpindahan massa *naphthalene* ke udara. Pada perpindahan massa *naphthalene* secara konveksi, perpindahan massanya dipengaruhi oleh dua hal yaitu difusifitas massa dan pergerakan acak fluida. Sedangkan pada perpindahan panas, melalui proses konduktifitas dan pergerakan acak fluida. Untuk perpindahan massa karena gerakan acak fluida kondisinya sama halnya dengan perpindahan panas, dimana pada perpindahan panas gerakan acak fluida mempertinggi perpindahan panas dengan cara memindahkan panas fluida yang berada di dekat permukaan dan melepaskannya ke fluida yang bertemperatur lebih rendah. Sedangkan pada perpindahan massa, gerakan acak fluida juga mempertinggi tingkat perpindahan massa dengan cara memindahkan konsentrasi (*density*) fluida yang tinggi di dekat permukaan ke fluida yang konsentrasinya lebih rendah. Sedangkan pada fluida yang diam tanpa ada pergerakan perpindahan panas beralangsur dengan proses konduksi, sedangkan pada perpindahan massa melalui proses difusivitas massa. Perpindahan massa dapat terjadi dalam arah yang mengurangi gradien konsentrasi yang ada. Perpindahan panas terhenti bila tidak terdapat beda suhu lagi, sedangkan perpindahan massa akan terhenti bila gradien konsentrasi telah berkurang sampai menjadi nol.

Persamaan tentang perpindahan massa dengan cara difusi molekuler diberikan oleh Hukum Fick tentang difusi, yaitu :

$$m_{dif} = -D_{AB} \cdot A \cdot \frac{dC_A}{dx} \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 626}) \quad (2-25)$$

Di mana :

m_{dif} = Laju aliran massa difusi (kg/s)

D_{AB} = Koefisien difusi (m/s)

A = Luas permukaan kontak (m²)

$\frac{dC_A}{dx}$ = Gradien konsentrasi (kg/m³)

Persamaan ini sangat identik dengan Hukum Fourier tentang perpindahan panas konduksi yaitu persamaan 2 – 9

Fenomena yang lain yaitu adanya perpindahan massa dalam aliran turbulen. Persamaan ini dapat ditulis sebagai berikut :

$$m_{conv} = h_m \cdot A \cdot (C_s - C_\infty) \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 627}) \quad (2-26)$$

Dimana :

m_{conv} = Laju aliran massa konveksi (kg/s)

h_m = Koefisien perpindahan massa (m/s)

$(C_s - C_\infty)$ = Perbedaan konsentrasi pada lapisan batas (kg/m³)

Persamaan 2-26 diatas analog dengan Hukum Newton tentang pendinginan yang berlaku untuk perpindahan panas konveksi, yaitu pada persamaan 2-10.

Pada perpindahan massa terdapat laju aliran massa menyeluruh yang analog dengan perpindahan panas menyeluruh. Untuk mendapatkan laju aliran massa menyeluruh dirumuskan dalam suatu hubungan persamaan, yaitu :

$$N_A = K \cdot (Y_{A,G} - Y_A) \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 640}) \quad (2-27a)$$

$$m = K \cdot A \cdot (Y_{A,G} - Y_A) \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 640}) \quad (2-27b)$$

Dengan :

m = Laju aliran massa menyeluruh (kg/s)

K = Koefisien perpindahan massa menyeluruh (m/s)

$(Y_{A,G} - Y_A)$ = Gradien konsentrasi (kg/m³)

Dari persamaan 2-25 sampai persamaan 2-27 dapat dilihat bahwa terdapat hubungan kesamaan (analog) antara persamaan – persamaan yang menjelaskan tentang proses perpindahan panas dan proses perpindahan massa.

Metode analogi perpindahan massa dengan menggunakan teknik sublimasi *Naphthalene* mempunyai karakteristik dasar menyelidiki masalah perpindahan kalor melalui analogi perpindahan massa, yaitu mendapatkan koefisien perpindahan kalor dengan menghitung koefisien perpindahan massa terlebih dahulu. Metode analogi perpindahan massa ini didasarkan pada teori Chilton – Colburn (1934). Persamaan yang umum digunakan untuk menghubungkan koefisien perpindahan kalor (h) dengan perpindahan massa (h_m) adalah :

$$St \cdot Pr^{2/3} = St_m \cdot Sc^{2/3} \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 666}) \quad (2-28)$$

Hubungan perpindahan kalor dan perpindahan massa dapat diperoleh dengan persamaan 2-28 diatas, yaitu :

$$St \cdot Pr^{2/3} = \left(\frac{h}{\rho \cdot u \cdot Cp} \right) \cdot Pr^{2/3} = j = f(Re) \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 663}) \quad (2-29)$$

$$St_m \cdot Sc^{2/3} = \left(\frac{h_m}{u} \right) \cdot Sc^{2/3} = j_m = f(Re) \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 663}) \quad (2-30)$$

Laju kehilangan massanya dihitung dari perbandingan massa yang hilang dengan lama waktu yang digunakan. Tekanan uap *Naphthalene* sebagai fungsi dari temperatur dihitung dengan persamaan yang disarankan oleh Chang Ming Ling, dkk (1994) sebagai berikut :

$$\text{Log}P = 13,564 - \frac{3729,4}{T} \quad (\text{Chang Ming Ling, 1994}) \quad (2-31)$$

Dimana :

P = Tekanan Uap *Naphthalene* (N/m^2)

T = Temperatur udara lingkungan rata – rata ($^{\circ}K$)

Angka Schmidt *Naphthalene* dihitung dari persamaan :

$$Sc = 8,0743 \cdot T^{-0.2165} \quad (\text{Chang Ming Ling, 1994}) \quad (2-32)$$

Ini berlaku pada kondisi temperatur antara ($15-55$) $^{\circ}C$

Sedangkan koefisien perpindahan massa dihitung dengan menggunakan persamaan dasar, yaitu

$$h_m = \frac{m}{A \cdot \Delta C} \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 627}) \quad (2-33)$$

Dimana ΔC adalah beda konsentrasi *Naphthalene* dari benda pada aliran fluida. Diasumsikan bahwa konsentrasi pada benda dari *Naphthalene* ekuivalen dengan tekanan uap jenuhnya. Karena tekanan uap *Naphthalene* sangat rendah maka konsentrasi massa *Naphthalene* pada saat menguap dapat dihitung dengan persamaan gas ideal. Jadi koefisien perpindahan massa (h_m) menjadi :

$$h_m = \frac{m \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N} \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 10}) \quad (2-34)$$

Dimana :

ΔP = $P - P_{\infty}$

P = Tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji pada suhu ruang.

P_{∞} = Tekanan *Naphthalene* di aliran udara (=0)

A = Luas selimut benda uji

M_N = Berat molekul *Naphthalene* ($C_{10}H_8$; $C = 12,01$; $H = 1,008$)

$$T = \text{Temperatur udara lingkungan rata - rata} : T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Dari persamaan 2-29 dan 2-30, untuk faktor “j” yang sama (dengan asumsi bahwa angka *Reynold* pada kedua sistem sama) dapat diperoleh hubungan sehingga koefisien perpindahan kalor (h) dapat dihitung, yaitu :

$$h = h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (\text{Yunus A. Cengel ; 1998: 666}) \quad (2-35)$$

Dimana :

h_m = Koefisien perpindahan massa (m/dtk)

C_p = Heat spesifik (J/kg.K)

ρ = Massa jenis (kg/m³)

Sc = Angka *Schmidt*

Pr = Angka *Prandtl*

Perpindahan massa karena konveksi paksa yang terjadi pada *naphthalene* dikarenakan oleh proses sublimasi. Sublimasi pada *naphthalene* bisa terjadi jika ada panas luar yang menyentuh permukaan *naphthalene*, semakin tinggi temperatur fluida maka sublimasi yang terjadi pada *naphthalene* akan semakin besar. Jika temperatur fluida dan temperatur permukaan *naphthalene* sama maka sublimasi terjadi karena efek dari gesekan antara fluida dan permukaan *naphthalene*. Karena gesekan yang terjadi secara terus menerus akan menimbulkan kalor, yang kemudian kalor akan menyebabkan terjadinya sublimasi pada *naphthalene* sehingga massa *naphthalene* akan berkurang.

2.5 Hipotesis

Semakin tinggi kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida akan meningkatkan nilai bilangan *Reynold* sehingga menyebabkan lapisan batas fluida yang terbentuk semakin tipis serta turbulensi alirannya semakin besar yang mengakibatkan meningkatnya koefisien perpindahan panas konveksi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk memperoleh data sebab akibat melalui eksperimen guna mendapatkan data empiris. Dalam hal ini obyek penelitian yang diamati adalah pengaruh kecepatan putaran silinder dan kecepatan aliran fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder berputar, dengan menggunakan metode sublimasi *Naphthalene*.

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

3.2. Variabel Penelitian

Variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Variabel bebas (*independent variable*)

adalah variabel yang besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya diubah-ubah dengan metode tertentu untuk mendapatkan nilai variabel terikat dari obyek penelitian sehingga diperoleh hubungan diantara keduanya. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- Kecepatan putaran benda uji (silinder) yaitu; 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm dan 1250 rpm.
- Kecepatan aliran fluida didalam *Wind Tunnel* yaitu; 1,524 m/s, 2,667 m/s, 4,7244 m/s dan 6,0706 m/s.

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

adalah variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah koefisien perpindahan massa (h_m) yang akan dipergunakan sebagai dasar perhitungan untuk mendapatkan koefisien perpindahan kalor (h).

3.3. Diagram Instalasi Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Terowongan Udara (*Wind Tunnel*)

Terowongan udara yang biasa digunakan didesain dengan khusus, udara ditarik dengan *blower* yang dihubungkan dengan *Nozzle* untuk menaikkan kecepatan udara, udara yang masuk kedalam saluran dikondisikan dalam keadaan laminar. Bahan yang digunakan adalah kayu dengan diberi pelapis untuk menghaluskan permukaan. Terowongan udara dibagi dalam tiga bagian utama yaitu:

a. Saluran udara

Mempunyai luas penampang 450 cm^2 yang di bagi dalam tiga bagian yang dapat dipisah untuk memudahkan penempatan spesimen, dimulai dari pintu masuknya udara, bagian pertama mempunyai panjang 97 cm dimana terdapat dua jendela untuk pengamatan dan terdapat instalasi tabung pitot untuk mengukur kecepatan serta dibagian depan saluran ini sebagai pintu masuk diberikan penghalang yang belubang-lubang yang berfungsi untuk membuat udara yang masuk dalam keadaan laminar, bagian kedua yang terletak ditengah-tengah mempunyai panjang 25 cm dimana terdapat lubang-lubang untuk meletakkan termometer, dan bagian ketiga yang terhubung dengan *Nozzle* mempunyai panjang 72 cm dimana terdapat dua jendela kiri dan kanan yang dalam penelitian ini digunakan untuk penempatan spesimen.

b. *Nozzle*

Yang berfungsi untuk menaikkan kecepatan, mempunyai panjang 45 cm dimana diameter yang besar dihubungkan dengan saluran udara dan diameter yang kecil dihubungkan dengan rumah *Blower*.

c. Rumah *Blower*

Merupakan rumah pelindung *Blower* yang terdapat pintu keluar angin yang dapat diatur lebarnya dibagian saluran keluar udara yang berfungsi untuk mengatur kecepatan udara didalam *Wind Tunnel*.

2. *Blower*

Blower digunakan untuk membangkitkan aliran udara didalam terowongan udara. Dengan cara menghisap udara masuk melalui saluran udara dan *Nozzle* yang kemudian dikeluarkan melalui saluran keluar yang berupa pintu keluar angin. *Blower* digerakkan oleh sebuah motor listrik yang mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

Merk : DAYTON

Putaran : 1060 rpm

Tegangan : 115/230 V

Daya : 1/6 HP

Frekuensi : 50/60 Hz

3. *Pitot tube* dan *manometer*

Pitot tube dan *manometer* digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara dalam terowongan udara (*wind tunnel*). *Pitot tube* diposisikan pada jarak 53 cm dari pintu masuk Udara. *Manometer* yang digunakan adalah:

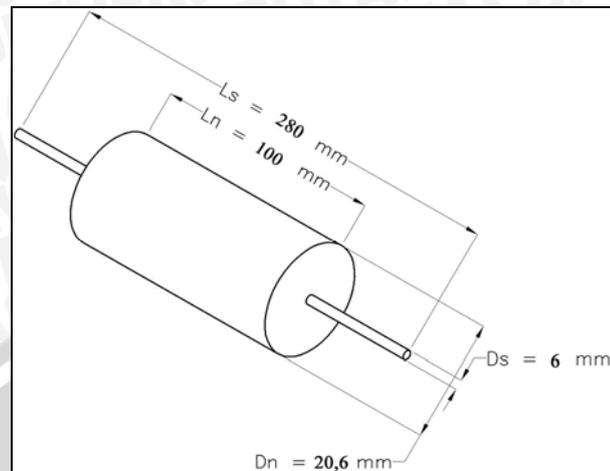
Merk : DWYER

Maksimum *pressure* : 160 psi (690 kpa)

Maksimum temperatur : 150°F (65°C)

4. Benda uji (spesimen)

Bahan yang digunakan sebagai benda uji (spesimen) dalam penelitian ini adalah *Naphthalene* atau kapur barus ($C_{10}H_8$) yang banyak dijual di pasaran. Kapur barus yang pada awalnya berbentuk bongkahan-bongkahan kemudian dicairkan terlebih dahulu, dengan cara dipanaskan sampai pada temperatur cairnya $\pm 80^{\circ}C$ yang selanjutnya kapur barus atau *Naphthalene* yang sudah berbentuk cairan dituangkan kedalam cetakan silinder, dimana dibagian tengahnya telah diletakkan poros pemegang *Naphthalene*. Dimana geometri spesimen yang ditunjukkan pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1. Geometri Spesimen

5. Termometer digital

Termometer digital digunakan untuk mengukur suhu awal dan suhu akhir percobaan. Termometer digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Merk	: ACEZ
Skala temperatur	: <i>Celsius / Fahrenheit</i>
Range pengukuran	: $-50^{\circ}\text{C} + 1300^{\circ}\text{C}$, (-58°F to 2000°F)
Resolution	: 1°C or 1°F ; $0,1^{\circ}\text{C}$ or $0,1^{\circ}\text{F}$

6. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk menimbang benda uji sebelum dan sesudah percobaan, sehingga pengurangan berat dapat diketahui. Timbangan digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Merk	: METTLER
Frekuensi	: 50 – 60 Hz
Tegangan	: 100 – 120 V – 80 mA 200 – 240 V – 45 mA
Beban maksimum	: 3 kg
Beban minimum	: 0 kg

7. Pemegang benda uji

Pemegang benda uji yang berupa rangka konstruksi yang digunakan untuk memegang benda uji saat pengujian pada lorong udara (*Wind Tunnel*), yang terdiri atas rangka dudukan yang terbuat dari besi dengan profil L dengan dimensi panjang (P); 812mm, lebar (L); 216mm dan pemegang poros benda uji berupa dua buah *chuck* mata bor yang diposisikan pada jarak tinggi (t); 260mm dari dasar rangka sampai pada garis sumbu *chuck*.

8. Motor Listrik

Motor listrik digunakan untuk memutar benda uji didalam terowongan udara berupa bor listrik dengan spesifikasi sebagai berikut:

Merk : BLACK AND DECKER

Tegangan : 220/240 V AC

Putaran : 1800 rpm (tanpa beban)

1200 rpm (beban penuh)

Daya : 370 W

Frekuensi : 50/60 Hz

9. Rangkaian Pengatur Kecepatan Motor (*motor speed control*)

Rangkaian pengatur kecepatan motor digunakan untuk memvariasikan kecepatan putaran motor, yang berupa rangkaian elektronik, yang dapat mengatur kecepatan putar motor mulai dari 0 rpm sampai dengan 1800 rpm.

10. *Tachometer digital*

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putaran motor listrik.

Tachometer yang digunakan mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

Merk : LUTRON

Test range : 5 sampai 100.000 rpm

Resolution : 0,1 rpm (0,5 sampai 999,9 rpm)

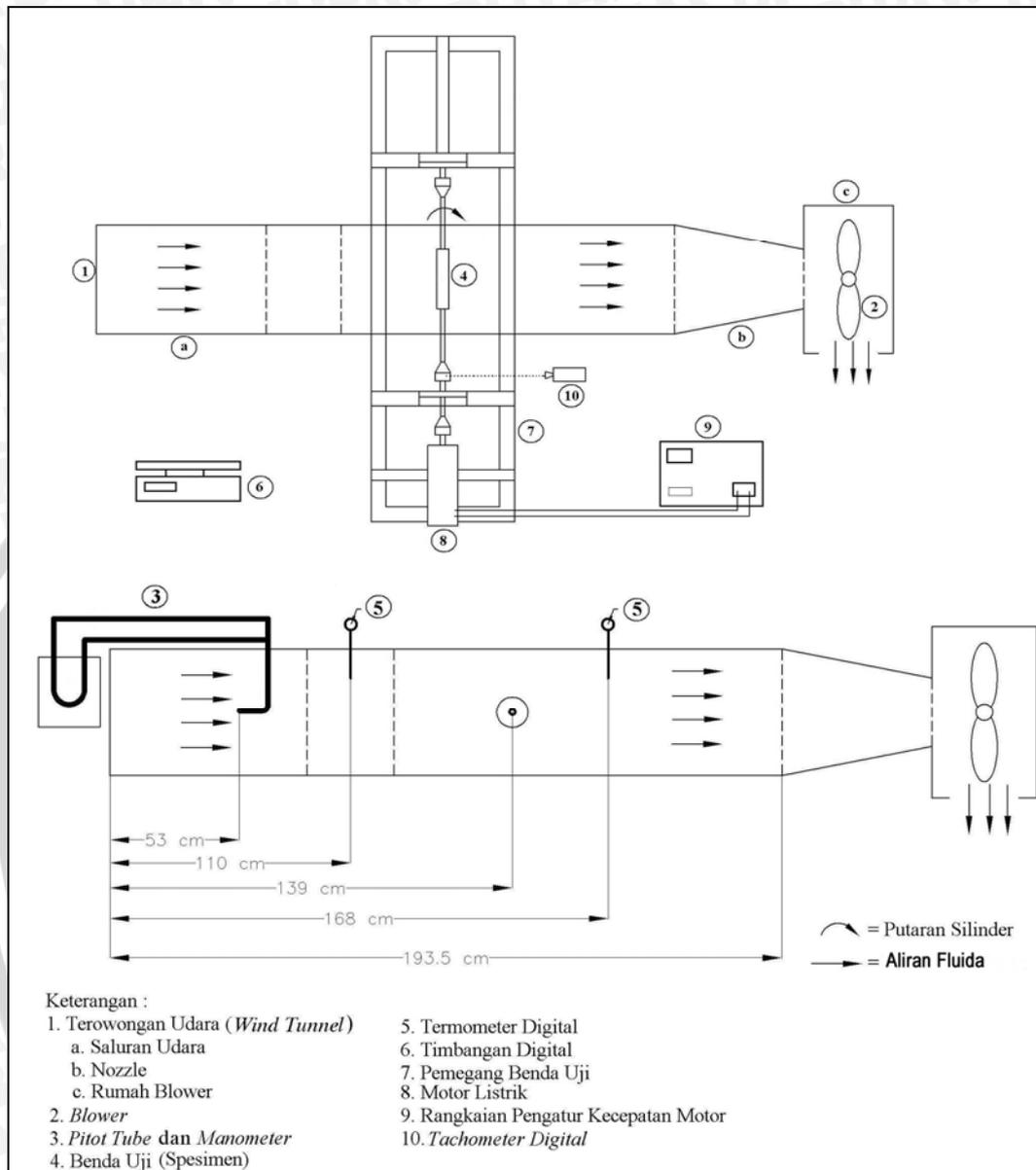
1 rpm (diatas 1000 rpm)

Keakuratan : $\pm(0,05 \% + 1 \text{ digit})$

Sampling time : 1 detik (diatas 60 rpm)

Jarak deteksi : 50 – 150 mm

Temperatur operasi : 0 – 50°C (32 – 122°F)



Gambar 3.2. Instalasi Penelitian

Instalasi alat penelitian bekerja sebagai berikut, benda uji diposisikan melintang dengan arah aliran udara yang masuk kedalam *Wind Tunnel* seperti pada gambar instalasi 3.2 di atas, dimana poros pemegang benda uji diikat pada kedua *chuck*. Kemudian benda uji diputar dengan menggunakan motor listrik, dimana kecepatan putar motor listrik diatur oleh rangkaian pengatur kecepatan motor.

Untuk mengalirkan udara didalam *Wind Tunnel* digunakan *Blower*, dimana *Blower* akan menarik udara dari luar masuk kedalam *Wind Tunnel*.

Kecepatan udara didalam *Wind Tunnel* diatur dengan cara merubah bukaan pintu keluar angin pada rumah *Blower*.

3.4. Prosedur Pengambilan Data

Langkah-langkah pengambilan data dalam penelitian ini adalah:

1. Pembuatan benda uji.
2. Mempersiapkan alat-alat yang dibutuhkan dan merangkai peralatan yang akan digunakan.
3. Mengatur kecepatan udara (V) yang melalui *Wind Tunnel* sesuai dengan nilai variabel bebas kecepatan udara yang akan diteliti.
4. Mengatur kecepatan putar motor (n) pemutar spesimen sesuai dengan nilai variabel bebas kecepatan putar motor yang akan diteliti.
5. Menimbang benda uji dengan menggunakan timbangan digital untuk mengetahui berat awal benda uji.
6. Kemudian benda uji diposisikan pada bagian tengah *Wind Tunnel* dengan penempatan permukaan yang melintang terhadap aliran udara, dengan cara mengikat poros benda uji pada chuck.
7. Kemudian *Blower* dan motor pemutar benda uji dihidupkan secara bersamaan selama selang waktu satu jam.
8. Suhu awal dan akhir didalam *Wind Tunnel* diukur dengan menggunakan termometer kemudian dicatat untuk mencari suhu rata-ratanya untuk masing-masing percobaan.
9. Setelah satu jam benda uji dilepas dan ditimbang lagi menggunakan timbangan digital untuk mendapatkan berat akhir.
10. untuk pengujian berikutnya ulangi langkah 3 – 9 dengan kecepatan aliran udara dan kecepatan putar motor yang bervariasi sesuai dengan variabel bebasnya.
11. Pengolahan data yang diperoleh
12. Menganalisa dan membahas data yang telah diperoleh.
13. Mengambil kesimpulan.

3.5. Rencana Analisa Data

Untuk menganalisa pengaruh kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder berputar dengan menggunakan metode analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Pengambilan data pada tiap kondisi penelitian sesuai dengan variasi bebasnya,

Data yang diambil antara lain:

1. Berat awal benda uji, M_1 (kg)
2. Berat akhir benda uji, M_2 (kg)
3. Temperatur *wind tunnel* sebelum benda uji, T_1 ($^{\circ}$ K)
4. Temperatur *wind tunnel* sesudah benda uji, T_2 ($^{\circ}$ K)

Kemudian dibuat tabel untuk masing-masing kondisi kecepatan aliran fluida sebagai berikut:

No	n	V (m/s)															
		1,524				2,667				4,724				6,071			
		M1	M2	T1	T2	M1	M2	T1	T2	M1	M2	T1	T2	M1	M2	T1	T2
(rpm)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	
1	500																
2	750																
3	1000																
4	1250																

2. Kemudian dilakukan analisa data dengan menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut:

- a. Menghitung massa yang hilang (M)

$$M = M_1 - M_2$$

- b. Laju perpindahan massa (m)

$$m = \frac{M}{t}$$

- c. Menghitung temperatur rata-rata wind tunnel (T)

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

- d. Menghitung tekanan uap jenuh *Naphthalene* (P)

$$\text{Log}P = 13,564 - \frac{3729,4}{T}$$

- e. Menghitung beda tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji dengan di aliran fluida (ΔP).

$$\Delta P = P - P_{\infty}$$

- f. Menghitung bilangan *schmidt* (Sc)

$$Sc = 8,0743 \cdot T^{-0,2165}$$

- g. Perhitungan koefisien perpindahan massa (h_m)

$$h_m = \frac{m \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N}$$

- h. Perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi (h)

$$h = h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3}$$

- i. Perhitungan bilangan *Nusselt* (Nu)

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k}$$

- j. Perhitungan bilangan *Reynold* (Re)

- Bilangan *Reynold* untuk aliran fluida

$$Re_D = \frac{VD}{\nu}$$

- Bilangan *reynold* untuk putaran silinder

$$Re_{\omega} = \frac{D^2 \omega}{2\nu}$$

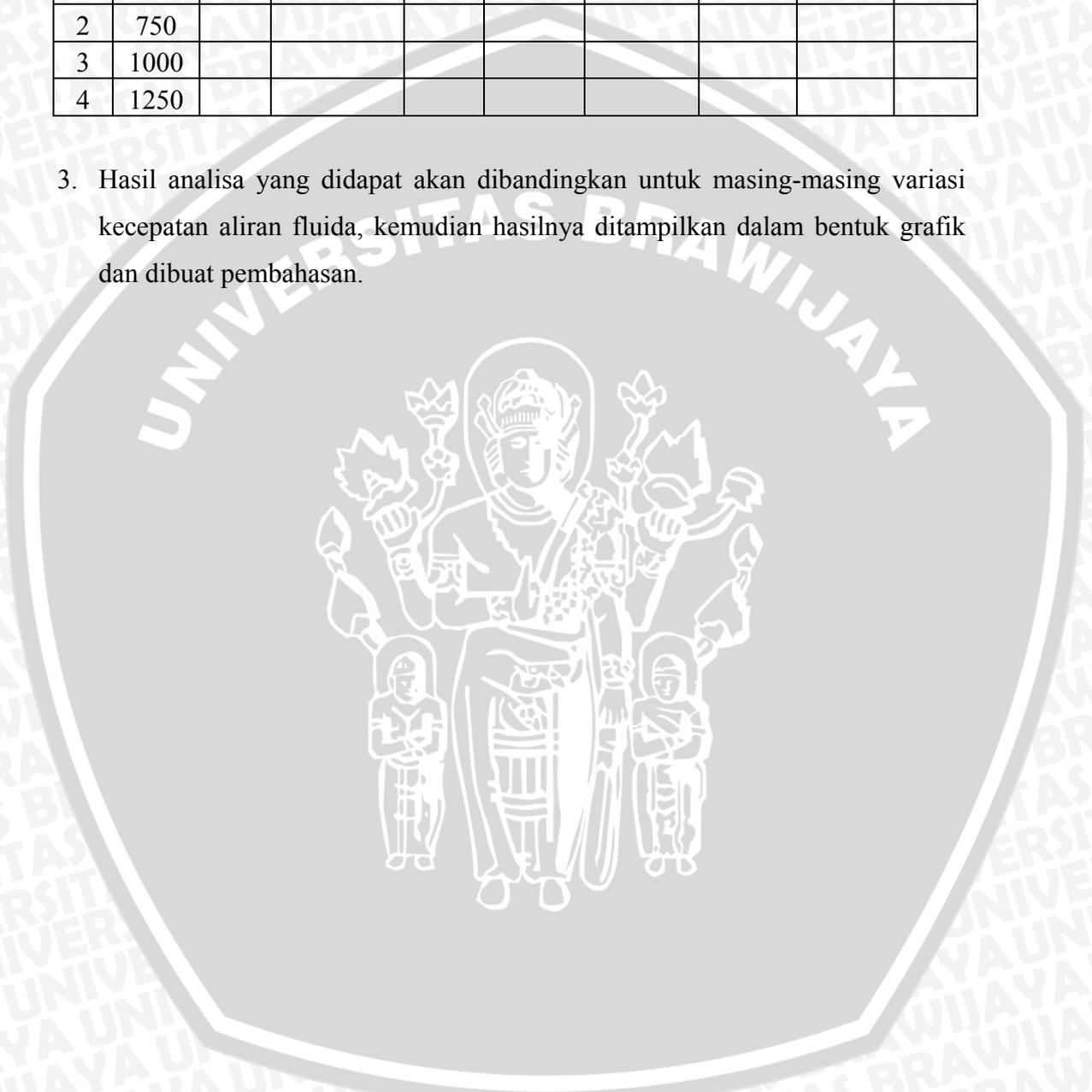
- Bilangan *reynold* gabungannya adalah sebagai berikut:

$$Re_D^2 + Re_{\omega}^2$$

Kemudian dibuat tabel hasil perhitungan data untuk masing-masing kondisi kecepatan aliran fluida sebagai berikut:

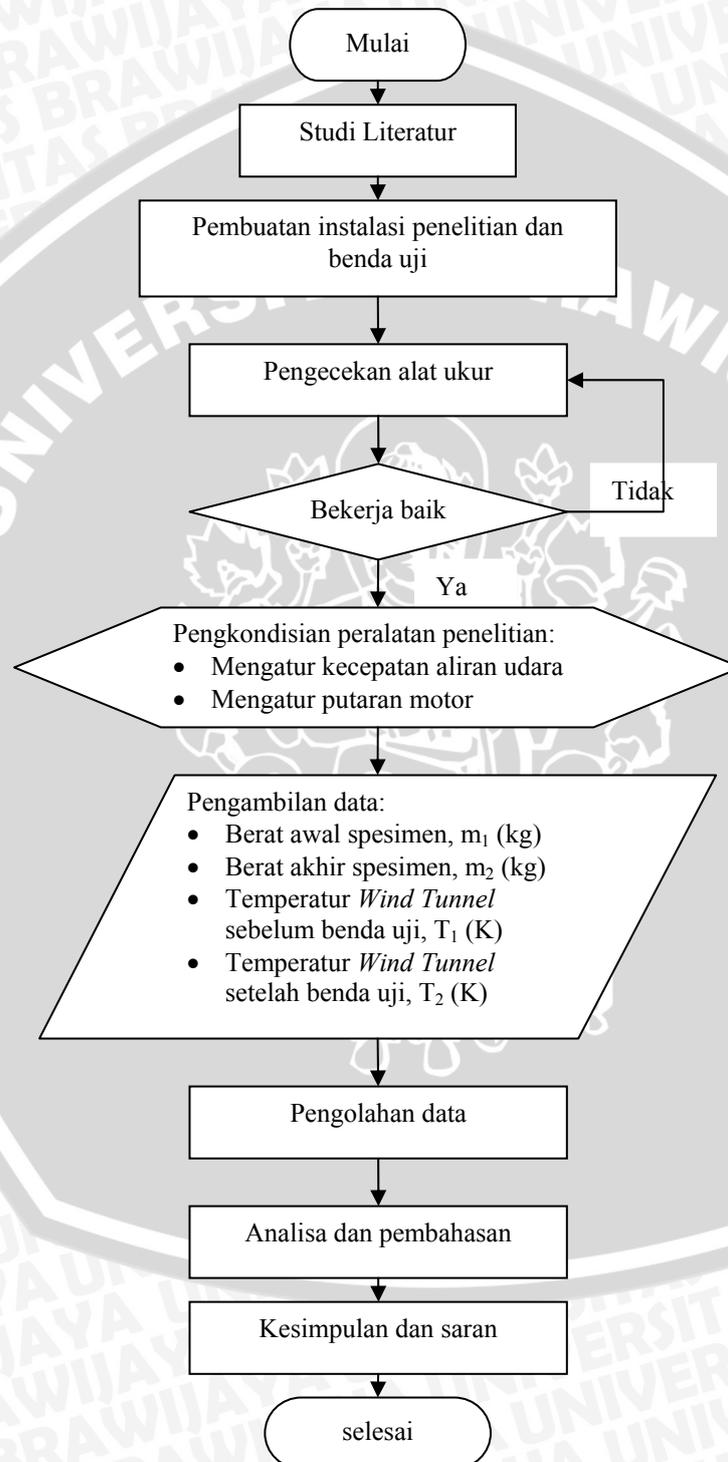
No	n	V (m/detik)							
		M	m	T	P	ΔP	Sc	hm	h
	(rpm)	(gr)	(kg/detik)	(K)	(N/m ²)	(N/m ²)		(m/s)	
1	500								
2	750								
3	1000								
4	1250								

- Hasil analisa yang didapat akan dibandingkan untuk masing-masing variasi kecepatan aliran fluida, kemudian hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik dan dibuat pembahasan.



3.6. Diagram Alir Proses Penelitian

Untuk memudahkan dalam melakukan penelitian ini maka dibuat diagram alir penelitian seperti ditunjukkan pada gambar 3.3.



Gambar 3.3. Diagram Alir Proses Penelitian

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Data

4.1.1. Data Hasil Penelitian

Setelah melakukan penelitian, maka didapatkan data hasil penelitian untuk setiap variasi kecepatan putar motor dan kecepatan aliran fluida. Dalam sub bab ini hanya ditampilkan perhitungan data dari salah satu variasi kecepatan putar motor dan kecepatan aliran fluida, sedangkan perhitungan data pada variasi yang lain sama dengan perhitungan ini yang akan ditampilkan dalam bentuk tabel pada lampiran. Sebagai contoh, perhitungan diambil pada perlakuan dengan kecepatan putar motor 500 rpm dan kecepatan aliran fluida 1,524 m/detik, didapatkan data sebagai berikut

5. Berat awal benda uji (M_1): 100,2 gr
6. Berat akhir benda uji (M_2): 99,95 gr
7. Temperatur *wind tunnel* sebelum benda uji (T_1): 26 °K
8. Temperatur *wind tunnel* sesudah benda uji (T_2): 26 °K

Dari data yang diperoleh dilakukan pengolahan data untuk mencari besaran-besaran yang diperlukan untuk menunjang perhitungan-perhitungan selanjutnya, pengolahan data yang dilakukan antara lain:

- a. Massa spesimen (*Naphthalene*) yang hilang (M)

Nilai massa spesimen yang hilang merupakan selisih antara berat awal spesimen (M_1) dan berat akhir spesimen (M_2), maka didapatkan besar massa spesimen yang hilang adalah:

$$\begin{aligned} M &= M_1 - M_2 \\ &= 100,2 - 99,95 \\ &= 0,25 \text{ gr} = 0,25 \times 10^{-3} \text{ kg} \end{aligned}$$

- b. Temperatur Rata-rata *Wind Tunnel* (T)

Temperatur rata-rata *Wind Tunnel* didapatkan dari rata-rata antara temperatur udara sebelum spesimen dan temperatur udara setelah spesimen, yaitu:

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{T_1 + T_2}{2} \\
 &= \frac{26 + 26}{2} \\
 &= 26 \text{ } ^\circ\text{C} = 299 \text{ } ^\circ\text{K}
 \end{aligned}$$

- c. Tekanan uap jenuh *Naphthalene* (P)

Tekanan uap jenuh *Naphthalene* didapat dengan cara memasukkan nilai temperatur rata-rata *wind tunnel* kedalam persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Log}P &= 13,564 - \frac{3729,4}{T} \\
 &= 13,564 - \frac{3729,4}{299} \\
 &= 13,564 - 12,473 \\
 \text{Log}P &= 1,091 \\
 P &= 12,33 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

- d. Beda tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji dengan di aliran fluida (ΔP).

Perbedaan tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji dengan di aliran fluida didapatkan dari selisih antara tekanan uap jenuh *Naphthalene* (P) dan tekanan parsial *Naphthalene* didalam aliran udara (P_∞), karena dalam hal ini udara yang dihembuskan ke dalam *wind tunnel* adalah udara murni maka tekanan parsial *Naphthalene* didalam aliran udara (P_∞) dianggap 0 (nol), maka didapatkan besar beda tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji dengan di aliran fluida adalah:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P - P_\infty \\
 &= 12,33 - 0 \\
 &= 12,33 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

- e. Bilangan *schmidt* (Sc)

Bilangan *schmidt* diperoleh dari:

$$Sc = 8,0743 \cdot T^{-0,2165}$$

$$= 8,0743 \times 299^{-0,2165}$$

$$= 2,35029$$

4.1.2. Perhitungan Data

Dari pengolahan data di atas dilakukan perhitungan matematis untuk mencari besaran-besaran yang diperlukan sehingga dapat diketahui besarnya pengaruh kecepatan putar silinder dan kecepatan aliran fluida terhadap koefisien perpindahan panas konveksi pada silinder berputar dengan menggunakan metode analogi perpindahan kalor dan perpindahan massa, perhitungan yang dilakukan antara lain:

4.1.2.1. Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa (h_m)

Setelah melakukan pengolahan data, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan untuk menghasilkan koefisien perpindahan massa.

$$h_m = \frac{m.R.T}{A.\Delta P.M_N}$$

Dimana:

- Konstanta gas universal (R): $R = 8314 \left(\frac{Nm}{kmol^{\circ}K} \right)$
- Luas selimut benda uji (A): $A = \pi \times D \times L$
 $= 3.14 \times 20.6 \times 100$
 $= 6468,4 \text{ (mm}^2\text{)}$
 $= 6,4684 \times 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$
- Laju perpindahan massa (m):

Dalam pengujian ini lama waktu yang dipergunakan adalah 60 menit untuk setiap spesimennya.

$$T = \text{Lama waktu yang dipergunakan}$$

$$= 60 \text{ (menit)} = 60 \times 60 \text{ (detik)}$$

$$= 3600 \text{ (detik)}$$

$$m = \frac{M}{t}$$

$$= \frac{0,25 \cdot 10^{-3} (\text{kg})}{3600 (\text{dtk})}$$

$$= 6,94 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dtk}} \right)$$

- Berat molekul *Naphthalene* (M_N):

Dimana: $C_{10}H_8$; C = 12,01, H = 1,008

$$\text{Berat molekul } Naphthalene (M_N) = (10 \times 12,01) + (8 \times 1,008)$$

$$= 120,1 + 8,064$$

$$= 128,164 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$$

Maka koefisien perpindahan massa (h_m) dapat diketahui, yaitu:

$$h_m = \frac{m \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N}$$

$$h_m = \frac{6,94 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dtk}} \right) \times 8314 \left(\frac{\text{Nm}}{\text{kmol}^\circ\text{K}} \right) \times 299 (\text{K})}{6,4684 \cdot 10^{-3} (\text{m}^2) \times 12,334 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \times 128,164 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)} = 0,0169 \left(\frac{\text{m}}{\text{dtk}} \right)$$

4.1.2.2. Perhitungan Koefisien Perpindahan Panas (h)

Koefisien perpindahan panas pada silinder berputar didapatkan dari hubungan analogi antara perpindahan massa dengan perpindahan panas. Hasil perhitungan dari koefisien perpindahan massa dipergunakan untuk memperhitungkan koefisien perpindahan panas.

$$h = h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3}$$

Pada: T = 299 ($^\circ\text{K}$)

Dari tabel A-11 pada lampiran 2 didapatkan sifat udara sebagai berikut

$$Pr = 0,712$$

$$\rho = 1,1815 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$C_p = 1005 \left(\frac{J}{kg^{\circ}C} \right) = 1005 \left(\frac{J}{kg^{\circ}K} \right)$$

Maka koefisien perpindahan kalor dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} h &= h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \\ &= 0,0169 \left(\frac{m}{dtk} \right) \cdot 1005 \left(\frac{J}{kg^{\circ}K} \right) \cdot 1,1815 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot \left[\frac{2,350}{0,712} \right]^{2/3} \\ &= 44,445 \left(\frac{J}{m^2 \cdot dtk \cdot ^{\circ}K} \right) \\ &= 44,445 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K} \right) \end{aligned}$$

4.1.2.3. Perhitungan Bilangan *Nusselt* (Nu)

Dari nilai koefisien perpindahan panas (h) yang telah didapatkan, maka dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai bilangan *Nusselt* pada setiap variasi kecepatan putar dan kecepatan aliran fluida, yaitu:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k}$$

Dimana: h = koefisien perpindahan panas konveksi $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K} \right)$

$$= 44,445 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K} \right)$$

D = Diameter spesimen

$$= 20,6 \text{ (mm)}$$

$$= 0,0206 \text{ (m)}$$

Untuk T = 299 (°K) dari tabel A-11 pada lampiran 2 didapatkan:

k = konduktivitas fluida $\left(\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K} \right)$

$$= 0,026 \left(\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K} \right)$$

$$\begin{aligned} \nu &= \text{Viskositas Kinematik (m}^2/\text{dtk)} \\ &= 0,0000156 \text{ (m}^2/\text{dtk)} \end{aligned}$$

Maka kita dapatkan bilangan *Nusselt* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{44,445 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right) \cdot 0,0206(m)}{0,0000156 \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right)} \\ &= 35,214 \end{aligned}$$

4.1.2.4. Perhitungan Bilangan *Reynold* (Re)

Untuk selanjutnya variabel kecepatan aliran fluida (V) diubah menjadi bilangan *Reynold* aliran (Re_D), dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

- Bilangan *Reynold* untuk aliran fluida

$$Re_D = \frac{VD}{\nu}$$

Dimana: V = 1,524 (m/dtk)

Maka bilangan *Reynold* untuk aliran fluida sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Re_D &= \frac{1,524 \left(\frac{m}{dtk} \right) \cdot 0,0206(m)}{0,0000156 \left(\frac{m^2}{dtk} \right)} \\ &= 2012,46154 \end{aligned}$$

- Bilangan *Reynold* untuk putaran silinder

$$Re_\omega = \frac{D^2 \omega}{2\nu}$$

Dimana: n = 500 rpm

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2\pi \cdot n}{60} \\ &= \frac{2\pi \cdot 500(\text{rpm})}{60(\text{dtk})} \\ &= 52,333 \text{ (rad/dtk)} \end{aligned}$$

Maka bilangan *Reynold* untuk putaran silinder sebagai berikut:

$$Re_{\omega} = \frac{0,0206(m)^2 \cdot 52,333(rad/dtk)}{2,0,0000156(m^2/dtk)}$$

$$= 711,80043$$

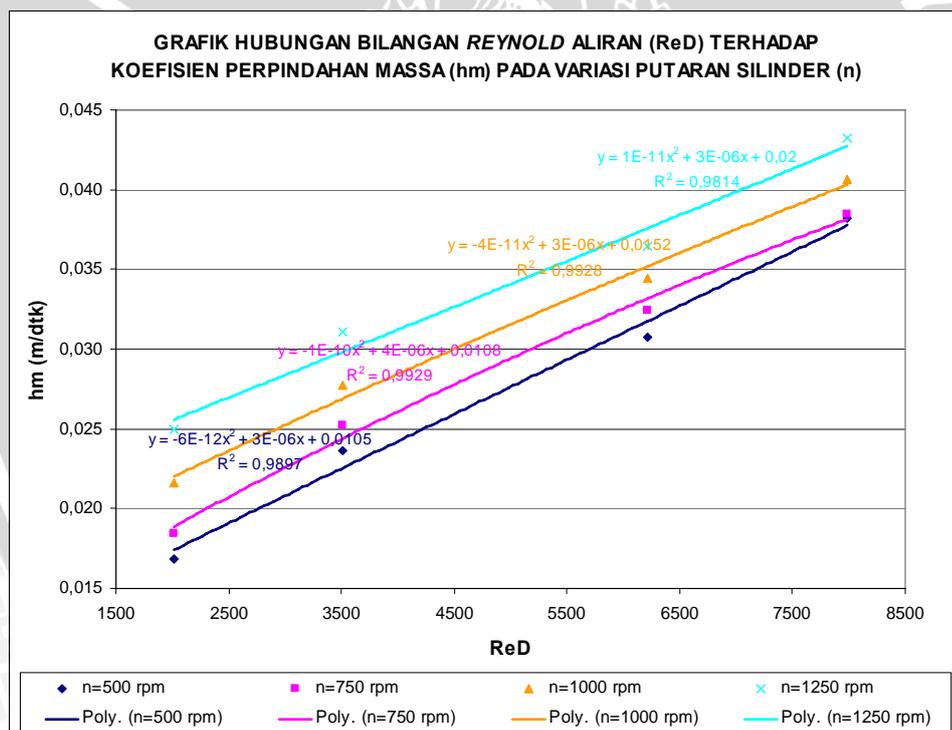
Bilangan *Reynold* gabungannya adalah sebagai berikut:

$$Re_D^2 + Re_{\omega}^2 = 2012,4615^2 + 711,8004^2$$

$$= 4556661$$

4.2. Pembahasan

4.2.1. Grafik Hubungan Antara Bilangan *Reynold* Aliran terhadap Koefisien Perpindahan Massa dan Koefisien Perpindahan Panas Konveksi



Gambar 4.1

Grafik hubungan antara bilangan *Reynold* aliran dengan koefisien perpindahan massa

Gambar 4.1 menunjukkan grafik hubungan antara bilangan *Reynold* aliran dengan koefisien perpindahan massa. Pada grafik terlihat bahwa antara bilangan *Reynold* aliran 2000 hingga 8000, semakin meningkatnya bilangan *Reynold* aliran

mengakibatkan koefisien perpindahan massa yang terjadi semakin meningkat. Jadi peningkatan koefisien perpindahan massa sebanding dengan peningkatan bilangan *Reynold* aliran. Kecenderungan ini terjadi karena dengan meningkatnya bilangan *Reynold* aliran maka laju perpindahan massanya akan meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan:

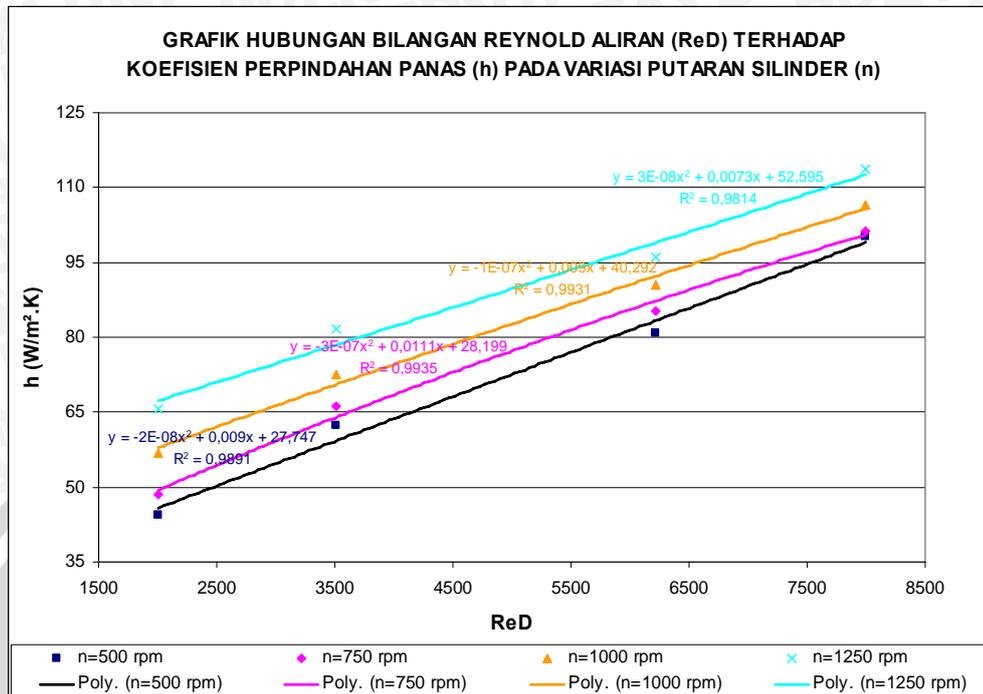
$$\dot{m} = h_m \cdot A \cdot (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty})$$

Dalam persamaan diatas ditunjukkan bahwa laju perpindahan massa dipengaruhi oleh tiga faktor yaitu luas permukaan (A), koefisien perpindahan massa (h_m) dan beda konsentrasi antara permukaan dan aliran fluida ($\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}$). Dimana jika nilai luas permukaan dan beda konsentrasi tetap maka yang mempengaruhi laju perpindahan massa adalah koefisien perpindahan massanya dan begitu pula dengan sebaliknya. Jika persamaan diatas diuraikan lagi menggunakan ketetapan gas ideal maka didapatkan persamaan yang menunjukkan hubungan koefisien perpindahan massa dengan laju perpindahan massanya sebagai berikut:

$$h_m = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N}$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa koefisien perpindahan massa dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu laju kehilangan massa (\dot{m}), temperatur udara lingkungan rata-rata (T), konstanta gas universal (R), luas selimut benda uji (A), Tekanan penggerak sublimasi (ΔP) dan berat molekul dari *Naphthalene* (M_N). Dari keenam faktor diatas yang mempunyai pengaruh paling besar terhadap besarnya angka koefisien perpindahan massa (h_m) adalah laju kehilangan massanya (\dot{m}). Laju kehilangan massa sangat ditentukan oleh besarnya atau banyaknya masa *Naphthalene* yang hilang ke udara, yang sebagian besar bergantung pada gerakan pencampuran partikel-partikel fluidanya. Gerakan pencampuran terjadi karena efek dari konveksi paksa yang diterapkan pada tiap-tiap kondisi penelitian.

Dengan menggunakan analogi perpindahan massa dan perpindahan panas, maka nilai koefisien perpindahan panas konveksi dapat dicari dari koefisien perpindahan massanya.



Gambar 4.2

Grafik hubungan antara bilangan *Reynold* aliran dengan koefisien perpindahan panas konveksi

Gambar 4.2 menunjukkan grafik hubungan antara bilangan *Reynold* aliran dengan koefisien perpindahan panas konveksi. Pada grafik terlihat bahwa trendnya hampir sama dengan grafik hubungan antara bilangan *Reynold* aliran dengan koefisien perpindahan massa. Hal ini disebabkan karena Nilai koefisien perpindahan panas bergantung pada besarnya nilai koefisien perpindahan massa. Jika koefisien perpindahan massanya naik maka akan menyebabkan koefisien perpindahan panasnya juga ikut naik. Hal ini sesuai dengan persamaan berikut:

$$h = h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3}$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa besarnya nilai koefisien perpindahan panas dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu koefisien perpindahan massa (h_m), kerapatan fluida (ρ), panas jenis pada tekanan konstan (C_p) dan bilangan *lewis* (Le) yaitu perbandingan antara bilangan *Schmidt* dan *Prandtl* $\left(\frac{Sc}{Pr} \right)$. Karena kondisi kerapatan fluida (ρ), panas jenis pada tekanan konstan (C_p) dan bilangan

lewis (Le) pada tiap penelitian hampir sama, maka dari kelima faktor yang mempengaruhi koefisien perpindahan panas, faktor yang paling dominan adalah koefisien perpindahan massa (h_m). Jika koefisien perpindahan massanya naik maka nilai koefisien perpindahan panasnya akan ikut naik dan begitu juga sebaliknya. Hal ini disebabkan karena untuk kondisi tertentu antara perpindahan massa dengan perpindahan panas mempunyai mekanisme yang sama dalam perpindahannya.

Pada kedua grafik di atas masing-masing terdapat empat kurva yang menunjukkan variasi putaran silinder. Putaran silinder yang digunakan adalah 500 rpm, 750 rpm, 1000 rpm dan 1250 rpm. Semakin tinggi putaran silinder menghasilkan koefisien perpindahan massa dan koefisien perpindahan panas konveksi yang tinggi pula. Nilai koefisien perpindahan massa dan koefisien perpindahan panas konveksi terbesar terjadi pada bilangan *Reynold* aliran yang paling besar yaitu 7991,302. Dari data yang didapat, terlihat bahwa putaran 1250 mampu menghasilkan koefisien perpindahan massa dan koefisien perpindahan panas konveksi yang paling tinggi pada bilangan *Reynold* ini. Hal ini disebabkan karena besarnya laju perpindahan massa bergantung sebagian besar pada gerakan pencampuran partikel-partikel fluida. Semakin tinggi *Reynold* aliran maka tingkat turbulensi aliran yang terbentuk di sekitar silinder akan semakin tinggi dan begitu pula dengan semakin tinggi putaran yang akan membangkitkan *Reynold* putaran akan menimbulkan tingkat turbulensi aliran yang terjadi pada fluida juga akan tinggi. Apabila dua kondisi ini digabungkan yaitu putaran dan *Reynold* aliran akan menimbulkan gerakan pencampuran yang terjadi pada partikel-partikel fluida yang berkonsentrasi tinggi dengan yang berkonsentrasi rendah semakin besar, sehingga akan menyebabkan laju kehilangan massa menjadi semakin besar. Karena laju kehilangan massa semakin besar maka koefisien perpindahan massa juga akan semakin besar. Sehingga akan didapatkan nilai koefisien perpindahan panas (h) yang semakin besar pula. Hal ini menunjukkan adanya kesebandingan antara perpindahan massa dan perpindahan panas.

4.2.2. Persamaan perpindahan Panas Konveksi Pada Silinder Berputar

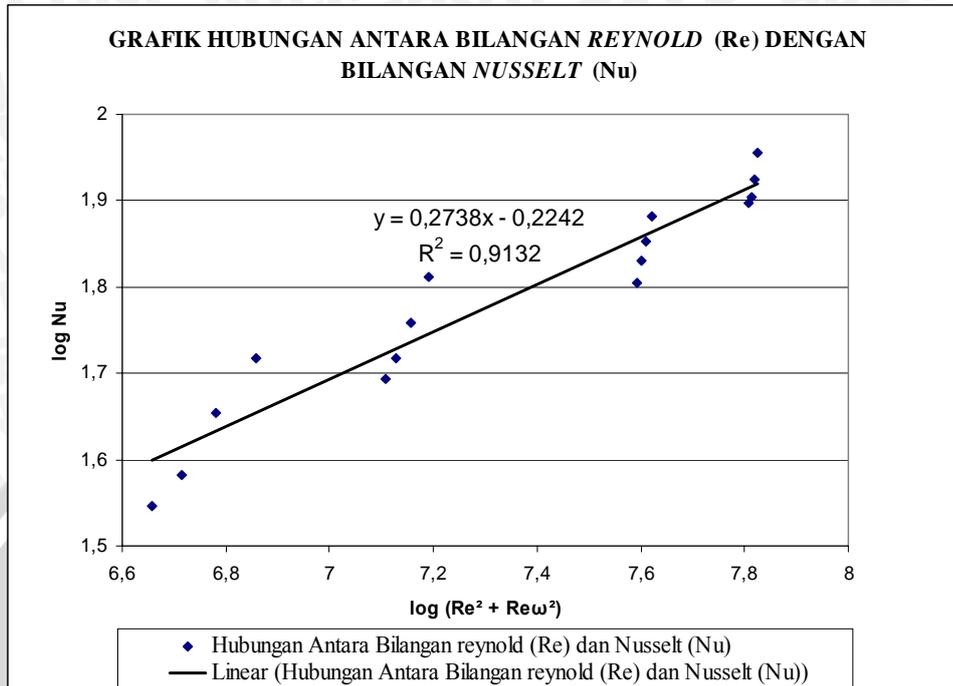
Persamaan perpindahan panas dinyatakan dengan bilangan *Nusselt*. Bilangan *Nusselt* merupakan bilangan tak berdimensi yang berfungsi untuk memudahkan dalam menganalisa proses perpindahan panas, dimana jika nilai bilangan *Nusselt*-nya semakin besar maka semakin efektif perpindahan panas konveksi yang terjadi. Nilai bilangan *Nusselt* dapat diperoleh dari besarnya nilai bilangan *Reynold*-nya, hal ini sesuai dengan persamaan:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Dalam persamaan diatas dapat dilihat bahwa bilangan *Nusselt* merupakan fungsi dari bilangan *Reynold* (*Re*) dan bilangan *Prandtl* (*Pr*). Yang artinya bahwa besarnya nilai bilangan *Nusselt* dipengaruhi oleh besarnya bilangan *Reynold* (*Re*) dan bilangan *Prandtl* (*Pr*). Jika propertis fluida dalam penelitian sama maka bilangan *Prandtl*-nya (*Pr*) akan tetap. Sehingga yang mempengaruhi besarnya nilai bilangan *Nusselt* adalah bilangan *Reynold*-nya. Jika nilai bilangan *Reynold*-nya besar maka bilangan *Nusselt* yang dihasilkan juga besar, hal ini disebabkan karena dengan bilangan *Reynold* yang besar maka lapisan batas yang terbentuk akan semakin tipis, sehingga kondisi aliran laminernya semakin kecil dan kondisi aliran turbulennya semakin besar, dimana pada kondisi aliran yang turbulen laju perpindahan panasnya akan semakin cepat.

Dalam penelitian ini diterapkan konveksi gabungan antara dua konveksi paksa, yaitu konveksi paksa yang disebabkan oleh aliran bebas dan konveksi paksa yang disebabkan oleh putaran silinder. Dimana pada masing-masing konveksi ini menghasilkan bilangan *Reynold*, yaitu bilangan *Reynold* aliran didapatkan dari aliran bebas fluida, yang dilambangkan dengan Re_D dan bilangan *Reynold* putaran yang didapatkan dari kecepatan putar silinder, yang dilambangkan dengan Re_ω . Karena kedua bilangan *Reynold* berpengaruh dalam perpindahan panasnya, maka untuk mencari hubungan antara bilangan *Reynold* dengan bilangan *Nusselt*, kedua bilangan *Reynold* ini harus digabungkan menjadi $(Re^2 + Re_\omega^2)$. Sehingga Persamaan *Nusselt*-nya menjadi:

$$Nu = a.(Re^2 + Re_\omega^2)^b$$



Gambar 4.3

Grafik hubungan antara bilangan *Reynold* dengan bilangan *Nusselt*

Dalam grafik 4.3, yang merupakan grafik hubungan antara bilangan *Reynold* (Re) dengan bilangan *Nusselt*, digunakan regresi linier untuk mempermudah dalam menganalisa hubungan antara bilangan *Reynold* dan bilangan *Nusselt*-nya. Dimana pada persamaan diatas ada dua variabel yang belum diketahui, yang keduanya merupakan konstanta. Sehingga untuk mendapat kedua nilai konstanta tersebut dipakai persamaan berikut untuk menghasilkan regresi linier pada grafik.

$$\log Nu = \log a + b \log(Re^2 + Re \omega^2)$$

$$Y = A + bX$$

Sehingga dari persamaan garis yang didapatkan pada grafik dapat diketahui besarnya variabel a dan b, yaitu:

$$Y = 0,2738X - 0,2242$$

Sehingga:

$$\log a = A = -0,2242$$

$$a = 0,5968$$

Dan

$$b = 0,2738$$

Dengan:

- koefisien determination (R^2) sebesar 0,9132, yang artinya bahwa kira-kira 91,32% dari pada variasi di dalam nilai-nilai Nu dapat dijelaskan oleh ($Re^2 + Re_{\omega}^2$).
- Koeffisien korelasinya (R)

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{(R^2)} \\ &= \sqrt{0,9132} \\ &= 0,9556 \\ &= 95,56\% \end{aligned}$$

- Standart deviation (*standart error of the estimate*) ($s_{y,x}$)

$$\begin{aligned} s_{y,x} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{n-2}} \\ &= 0,0374 \\ &= 3,74\% \end{aligned}$$

Dimana: y_i = Nu data

y_i' = Nu perhitungan dari persamaan garis

n = jumlah data

Maka persamaan untuk bilangan *Nusselt* mejadi:

$$Nu = 0,5968.(Re^2 + Re_{\omega}^2)^{0,2738}$$

Untuk kondisi: $2000 < Re_D < 8000$

$$700 < Re_{\omega} < 1800 \text{ atau } 500 \text{ (rpm)} < n < 1250 \text{ (rpm)}$$

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa dengan semakin meningkatnya nilai bilangan *Reynold* gabungan maka bilangan *Nusselt*-nya akan naik pula. Hal ini disebabkan karena dengan bilangan *Reynold* yang besar maka lapisan batas yang terbentuk akan semakin tipis, sehingga kondisi aliran laminernya semakin kecil dan kondisi aliran turbulennya semakin besar, dimana pada kondisi aliran yang turbulen laju perpindahan panasnya akan semakin cepat.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi bilangan *Reynold* gabungan jarak antara kondisi semakin rapat, yang ditunjukkan dengan titik-titik yang terlihat pada grafik. Hal ini dikarenakan pada bilangan *Reynold* gabungan yang rendah konveksi gabungan yang terjadi tidak seimbang, terdapat perbedaan yang jauh antara bilangan *Reynold* aliran dan bilangan *Reynold* putaran. Tetapi dengan semakin naiknya *Reynold* gabungan kondisinya mendekati keseimbangan, hal ini disebabkan karena pada *Reynold* gabungan yang tinggi antara aliran dan putaran sama-sama berpengaruh dalam proses perpindahan panasnya. Dimana *Reynold* gabungan yang paling besar adalah 67027531 yang merupakan gabungan dari bilangan *Reynold* aliran $Re = 7991,302$ dan bilangan *Reynold* putaran $Re_{\omega} = 1779,501$ yang menghasilkan bilangan *Nusselt* sebesar 90,149.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan yaitu sebagai berikut:

- 1.a. Dengan bertambahnya kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder akan berpengaruh pada besarnya bilangan *Reynold*, besarnya bilangan *Reynold* akan berpengaruh pada besarnya nilai koefisien perpindahan panas (h) yang terjadi pada silinder berputar.
- 1.b. Nilai perpindahan panas yang terbesar adalah terjadi pada kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder yang terbesar yaitu $v = 6,0706$ m/s dan $n = 1250$ rpm, yang ditunjukkan dengan besarnya koefisien perpindahan panas yang dihasilkan sebesar $113,78$ W/m².°K. Sedangkan nilai perpindahan panas yang paling kecil terjadi pada kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder yang paling kecil yaitu $v = 1,524$ m/s dan $n = 500$ rpm, yang ditunjukkan dengan besarnya koefisien perpindahan panas yang dihasilkan sebesar $44,4454$ W/m².°K.
- 1.c. Dari penelitian ini dihasilkan persamaan perpindahan panas yang dinyatakan dengan bilangan *Nusselt*, yaitu:

$$Nu = 0,5968.(Re^2 + Re_{\omega}^2)^{0,2738}$$

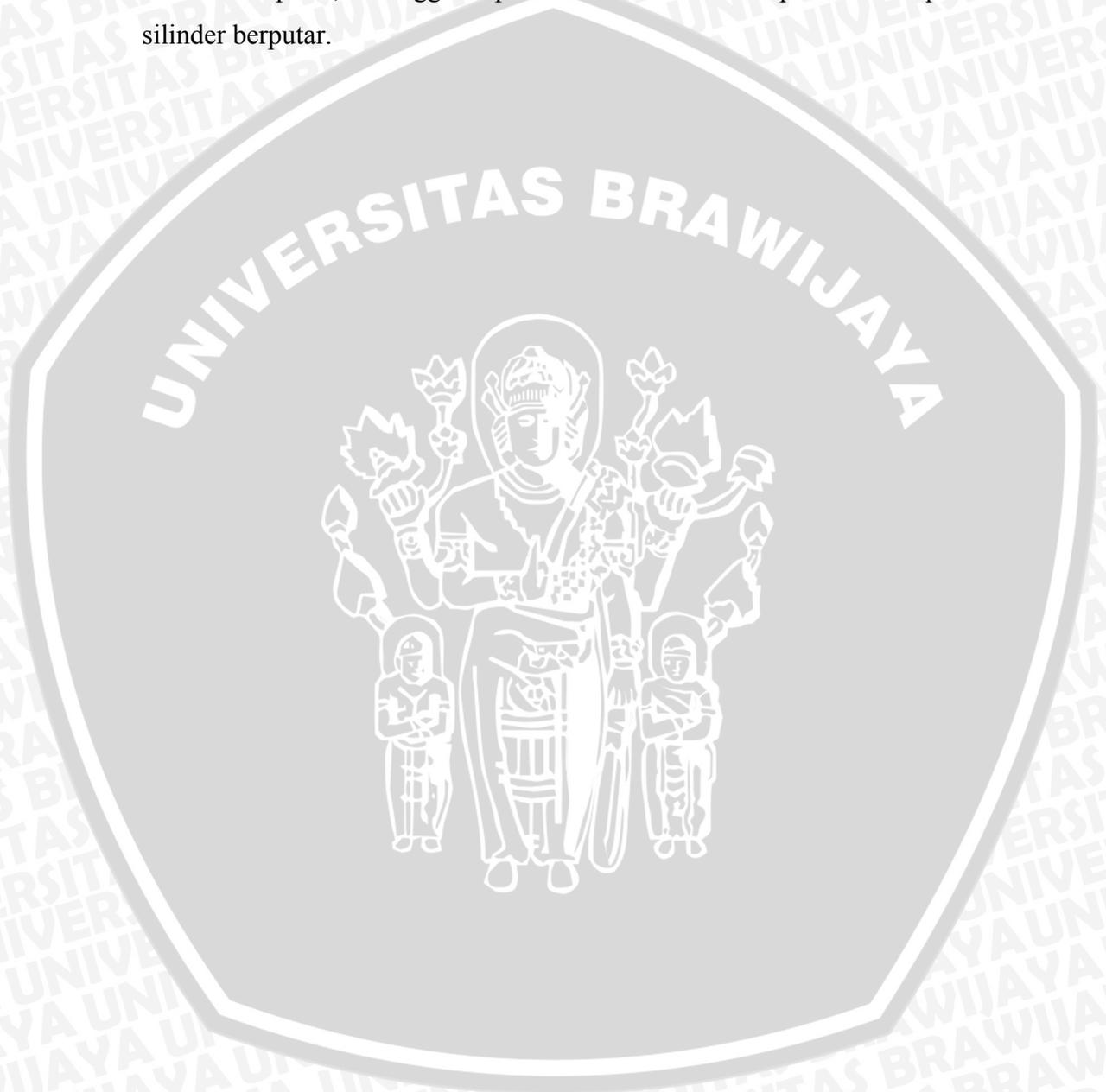
Dengan Koefisien korelasinya adalah 95,56% dengan tingkat kesalahan (Standart deviation) 3,74%. Untuk kondisi batas $2000 < Re_D < 8000$ dan $700 < Re_{\omega} < 1800$ atau 500 (rpm) $< n < 1250$ (rpm).

5.2 Saran

1. Berdasarkan hasil penelitian ini maka masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk variasi kecepatan aliran fluida dan kecepatan putar silinder, serta variasi diameter silinder untuk menghasilkan data yang lebih

banyak, sehingga akan menghasilkan persamaan perpindahan panas yang lebih akurat dan untuk batasan yang lebih luas.

2. Perlu adanya penelitian yang lebih lanjut mengenai model aliran pada silinder berputar, sehingga dapat diketahui kondisi lapisan batas pada silinder berputar.



DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Yunus A.; 2003: *Heat Transfer Practical Approach*; Mc Graw Hill Ltd., USA.
- Cengel, Yunus A.; 1998: *Heat Transfer Practical Approach*; Mc Grow Hill Ltd., USA.
- Chang-Ming Ling, Yuan-Yue Jin, Zhong-Qi Chen; 1994: *Heat, Mass Transfer and Pressure Drop in Triangular- Rib-Roughned Rectangular chanel*; Internet Journal Heat and Fluid Flow, vol. 15, No. 6, hal 486-490.
- Cho, K. Thomas F. Irvine, JR. Jaccob Karni; 1992: *Measurement of Diffusion Coeffisien of Naphthalene into Air*; Internet Journal Heat mass Transfer, vol. 35, No. 4, hal 957-966.
- Holman, J. P.; 1991: *Perpindahan Kalor*; Edisi 6; Mc Graw Hill Ltd., USA.
- Incropera, F. P. dan De Witt, D. P.; 2002: *Fundamentals of Heat Transfer*; John Willey & Sons, New York.
- James K, Welty dan Charles E. Witch; 1983: *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*; Mc Graw Hill Ltd., USA.
- Koestoer, Raldi Artono; 2002: *Perpindahan Kalor*; Salemba Teknika, Jakarta.
- Kreith, Frank; 1997: *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*; Terjemahan A. Priyono Bandung, Erlangga.
- Olson, R. M. Dan Steven J, Wright; 1990: *Dasar-dasar Mekanika Fluida Teknik*; Edisi 5; PT Grmedia Pustaka Utama, Jakarta.

Lampiran 1

Tabel 1 Data Hasil Penelitian

No	n	V (m/s)															
		1,524				2,667				4,724				6,071			
		m1	m2	T1	T2	m1	m2	T1	T2	m1	m2	T1	T2	m1	m2	T1	T2
(rpm)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	(gr)	(gr)	(K)	(K)	
1	500	100,2	99,95	26	26	101,92	101,57	26	26	102,37	101,87	27	27	102,51	101,89	27	27
2	750	103,92	103,62	27	27	102,42	102,01	27	27	102,52	102,04	26	26	103,77	103,2	26	26
3	1000	105,26	104,94	26	26	102,72	102,27	27	27	101,46	100,9	27	27	101,48	100,82	27	27
4	1250	101,45	101,08	26	26	101,59	101,13	26	26	102,73	102,19	26	26	100,91	100,27	26	26

Tabel 2 Hasil Perhitungan

No	n	V (m/s)	1,524									
		Re _D	2009,257									
		Re _ω	Re ² +Re _ω ²	M	m	T	P	ΔP	Sc	hm	h	Nu
(rpm)	(rpm)	(gr)	(kg/detik)	(K)	(N/m ²)	(N/m ²)		(m/s)	W/m ² .K			
1	500	709,53	4540551	0,25	6,94E-08	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,01688	44,4454	35,2144
2	750	1064,3	5169848	0,3	8,33E-08	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,01847	48,4189	38,3627
3	1000	1416,8	6044436	0,32	8,89E-08	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,02161	56,8901	45,0745
4	1250	1779,5	7203738	0,37	1,03E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,02499	65,7792	52,1173

2,667									
3510,592									
Re ² +Re ω^2	M	m	T	P	ΔP	Sc	hm	h	Nu
	(gr)	(kg/detik)	(K)	(N/m ²)	(N/m ²)		(m/s)	W/m ² .K	
12827694	0,35	9,72E-08	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,02364	62,2235	49,3002
13456991	0,41	1,14E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,02525	66,1725	52,429
14331578	0,45	1,25E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,02771	72,6284	57,544
15490880	0,46	1,28E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,03107	81,7795	64,7945

4,724									
6218,236									
Re ² +Re ω^2	M	m	T	P	ΔP	Sc	hm	h	Nu
	(gr)	(kg/detik)	(K)	(N/m ²)	(K)		(m/s)	W/m ² .K	
39169897	0,5	1,389E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,03079	80,6982	63,9378
39799193	0,48	1,333E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,03242	85,3351	67,6117
40673781	0,56	1,556E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,03448	90,382	71,6103
41833083	0,54	1,500E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,03647	96,002	76,0631

6,071									
7991,302									
Re ² +Re ω ²	M	m	T	P	ΔP	Sc	hm	h	Nu
	(gr)	(kg/detik)	(K)	(N/m ²)	(K)		(m/s)	W/m ² .K	
64364345	0,62	1,722E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,03818	100,066	79,2829
64993642	0,57	1,583E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,03849	101,335	80,2889
65868230	0,66	1,833E-07	300	13,5727	13,5727	2,34859	0,04064	106,522	84,3979
67027531	0,64	1,778E-07	299	12,3336	12,3336	2,35029	0,04322	113,78	90,1489



LAMPIRAN II

TABLE A-11

Properties of gases at 1 atm pressure

Temperature, T K	Density, ρ kg/m ³	Specific heat, C_p J/kg \cdot $^{\circ}$ C	Thermal conductivity, k W/m \cdot $^{\circ}$ C	Thermal diffusivity, α m ² /s	Dynamic viscosity, μ kg/m \cdot s	Kinematic viscosity, ν m ² /s	Prandtl number, Pr
<i>Air</i>							
200	1.766	1003	0.0181	1.02×10^{-5}	1.34×10^{-5}	0.76×10^{-5}	0.740
250	1.413	1003	0.0223	1.57×10^{-5}	1.61×10^{-5}	1.14×10^{-5}	0.724
280	1.271	1004	0.0246	1.95×10^{-5}	1.75×10^{-5}	1.40×10^{-5}	0.717
290	1.224	1005	0.0253	2.09×10^{-5}	1.80×10^{-5}	1.48×10^{-5}	0.714
298	1.136	1005	0.0259	2.18×10^{-5}	1.84×10^{-5}	1.55×10^{-5}	0.712
300	1.177	1005	0.0261	2.21×10^{-5}	1.85×10^{-5}	1.57×10^{-5}	0.712
310	1.143	1006	0.0268	2.35×10^{-5}	1.90×10^{-5}	1.67×10^{-5}	0.711
320	1.110	1006	0.0275	2.49×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.77×10^{-5}	0.710
330	1.076	1007	0.0283	2.64×10^{-5}	1.99×10^{-5}	1.86×10^{-5}	0.708
340	1.043	1007	0.0290	2.78×10^{-5}	2.03×10^{-5}	1.96×10^{-5}	0.707
350	1.009	1008	0.0297	2.92×10^{-5}	2.08×10^{-5}	2.06×10^{-5}	0.706
400	0.883	1013	0.0331	3.70×10^{-5}	2.29×10^{-5}	2.60×10^{-5}	0.703
450	0.785	1020	0.0363	4.54×10^{-5}	2.49×10^{-5}	3.18×10^{-5}	0.700
500	0.706	1029	0.0395	5.44×10^{-5}	2.68×10^{-5}	3.80×10^{-5}	0.699
550	0.642	1039	0.0426	6.39×10^{-5}	2.86×10^{-5}	4.45×10^{-5}	0.698
600	0.589	1051	0.0456	7.37×10^{-5}	3.03×10^{-5}	5.15×10^{-5}	0.698
700	0.504	1075	0.0513	9.46×10^{-5}	3.35×10^{-5}	6.64×10^{-5}	0.702
800	0.441	1099	0.0569	11.7×10^{-5}	3.64×10^{-5}	8.25×10^{-5}	0.704
900	0.392	1120	0.0625	14.2×10^{-5}	3.92×10^{-5}	9.99×10^{-5}	0.705
1000	0.353	1141	0.0672	16.7×10^{-5}	4.18×10^{-5}	11.8×10^{-5}	0.709
1200	0.294	1175	0.0759	22.2×10^{-5}	4.65×10^{-5}	15.8×10^{-5}	0.720
1400	0.252	1201	0.0835	27.6×10^{-5}	5.09×10^{-5}	20.2×10^{-5}	0.732
1600	0.221	1240	0.0904	33.0×10^{-5}	5.49×10^{-5}	24.9×10^{-5}	0.753
1800	0.196	1276	0.0970	38.3×10^{-5}	5.87×10^{-5}	29.9×10^{-5}	0.772
2000	0.177	1327	0.1032	44.1×10^{-5}	6.23×10^{-5}	35.3×10^{-5}	0.801

