

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA SALURAN BERLIKU
DENGAN VARIASI SUDUT INKLINASI PARTISI
MENGUNAKAN ANALOGI PERPINDAHAN MASSA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**FARIED MIFTAHUR RIDLO
NIM. 0510620039-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2010**

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA SALURAN BERLIKU
DENGAN VARIASI SUDUT INKLINASI PARTISI
MENGUNAKAN ANALOGI PERPINDAHAN MASSA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**FARIED MIFTAHUR RIDLO
NIM. 0510620039-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

**Dr. Eng.Nurkholis Hamidi, ST.,M.Eng.
NIP. 19740112 199903 1 001**

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA SALURAN BERLIKU
DENGAN VARIASI SUDUT INKLINASI PARTISI
MENGUNAKAN ANALOGI PERPINDAHAN MASSA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**FARIED MIFTAHUR RIDLO
NIM. 0510620039-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 11 Februari 2010

Skripsi 1

Skripsi 2

Ir. Suharto, MT.
NIP. 19531030 198212 1 001

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

Komprehensif

Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. CSE
NIP. 19670923 199303 1 002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan karunia, berkah dan rahmat-Nya, serta sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW atas segala perjuangan dan tauladan kesabarannya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ” *Analisis Perpindahan Panas pada Saluran Berliku dengan Variasi Sudut Inklinasi Partisi Menggunakan Analogi Perpindahan Massa*”.

Secara keseluruhan, dalam penyusunan skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dari banyak pihak yang baik secara langsung maupun tidak langsung memiliki peran yang luar biasa dalam penyelesaian skripsi ini. Oleh karena itulah, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya sekaligus selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan banyak pengarahan dan bimbingan, serta meluangkan waktu untuk berdiskusi selama penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya untuk cerita-cerita kecil yang memotivasi penulis.
3. Bapak Ir. I Made Gunadiarta, MT., selaku Ketua Kelompok Dosen Konsentrasi Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin atas wawasan dan masukannya.
4. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan serta meluangkan waktu untuk berdiskusi selama penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Ir. Winarno Yahdi Atmodjo, MT., selaku dosen wali atas nasihat-nasihat akademis dan motivasinya selama kuliah.
6. Seluruh dosen pengajar Jurusan teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung dalam penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Mesin atas kerjasama dan bantuannya selama penyusunan skripsi ini.
8. Kedua orang tuaku, Bapak Idris dan Ibu Suliati serta kakak dan adik, dan keluarga yang selalu mendukung, memberi semangat dan doa, serta dukungan moril dan materiil selama penyelesaian skripsi ini.
9. Fatma Ayatiliulil Albab, atas segala doa, bantuan, dan semangat yang luar biasa.

10. Aris Kurniawan selaku rekan penelitian, atas kerja keras, motivasi dan semangat yang tinggi.
11. Teman-teman asisten Laboratorium Motor Bakar, Berka, Baladraf, Santi, Sunanto, Husein, Mas Huda, Mas Imam, Mas Azis, Agung, Putra, Ulem, Mas Eko atas semua masukan dan kebersamaannya.
12. Teman-teman Laboratorium Biologi Molekuler yang telah memberikan doa dan semangat.
13. Teman-teman Mesin 2005 untuk seluruh dukungan yang diberikan.
14. Seluruh pihak terkait yang telah banyak membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sebagai masukan di masa mendatang. Akhir kata, harapan penulis semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat yang besar kepada semua pihak. Amin.

Malang, Februari 2010

Penulis



DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR SIMBOL	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
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	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Perpindahan Kalor.....	4
2.2.1. Perpindahan Kalor Konduksi.....	4
2.2.2. Perpindahan Kalor Konveksi.....	6
2.3 Analisis Aliran.....	7
2.3.1. Aliran Laminar.....	7
2.3.2. Aliran Turbulen.....	8
2.3.3. Proses Berkembangnya Aliran.....	9
2.3.4. Angka Reynold (<i>Re</i>).....	10
2.3.5. Angka Prandtl (<i>Pr</i>).....	11
2.3.6. Angka Nusselt (<i>Nu</i>).....	11
2.4 Dasar-Dasar Lapisan Batas.....	12
2.4.1. Lapisan Batas Hidrodinamik.....	12
2.4.2. Lapisan Batas Termal.....	13
2.5 Perpindahan Massa.....	14
2.6 Analogi Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa.....	15
2.7 Saluran Konvergen – Divergen.....	19

2.8 Persamaan <i>Bernoulli</i>	20
2.9 Persamaan Kontinuitas.....	21
2.10 Hipotesis.....	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	22
3.1 Metode Penelitian.....	22
3.2 Variabel Penelitian.....	22
3.3 Alat-Alat Penelitian.....	23
3.3.1. Alat Utama.....	23
3.3.2. Peralatan Bantu.....	24
3.3.3. Bahan.....	25
3.4 Instalasi Alat Penelitian.....	25
3.5 Tempat dan Waktu Penelitian.....	25
3.6 Prosedur Penelitian.....	26
3.7 Diagram Alir Penelitian.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Analisis Data.....	28
4.1.1. Data Hasil Pengujian.....	28
4.1.2. Perhitungan Data.....	29
4.2 Pembahasan.....	32
4.2.1. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Massa (h_m) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi.....	32
4.2.2. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Panas (h) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi.....	35
4.2.3. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan <i>Bilangan</i> <i>Nusselt</i> (Nu) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi.....	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	39
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Data hasil pengujian pada sudut inklinasi partisi -6° (<i>convergent channels</i>)	28
Tabel 4.2	Data hasil pengujian pada sudut inklinasi partisi 0° (<i>standard channels</i>)	28
Tabel 4.3	Data hasil pengujian pada sudut inklinasi partisi $+6^{\circ}$ (<i>divergent channels</i>)	29

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

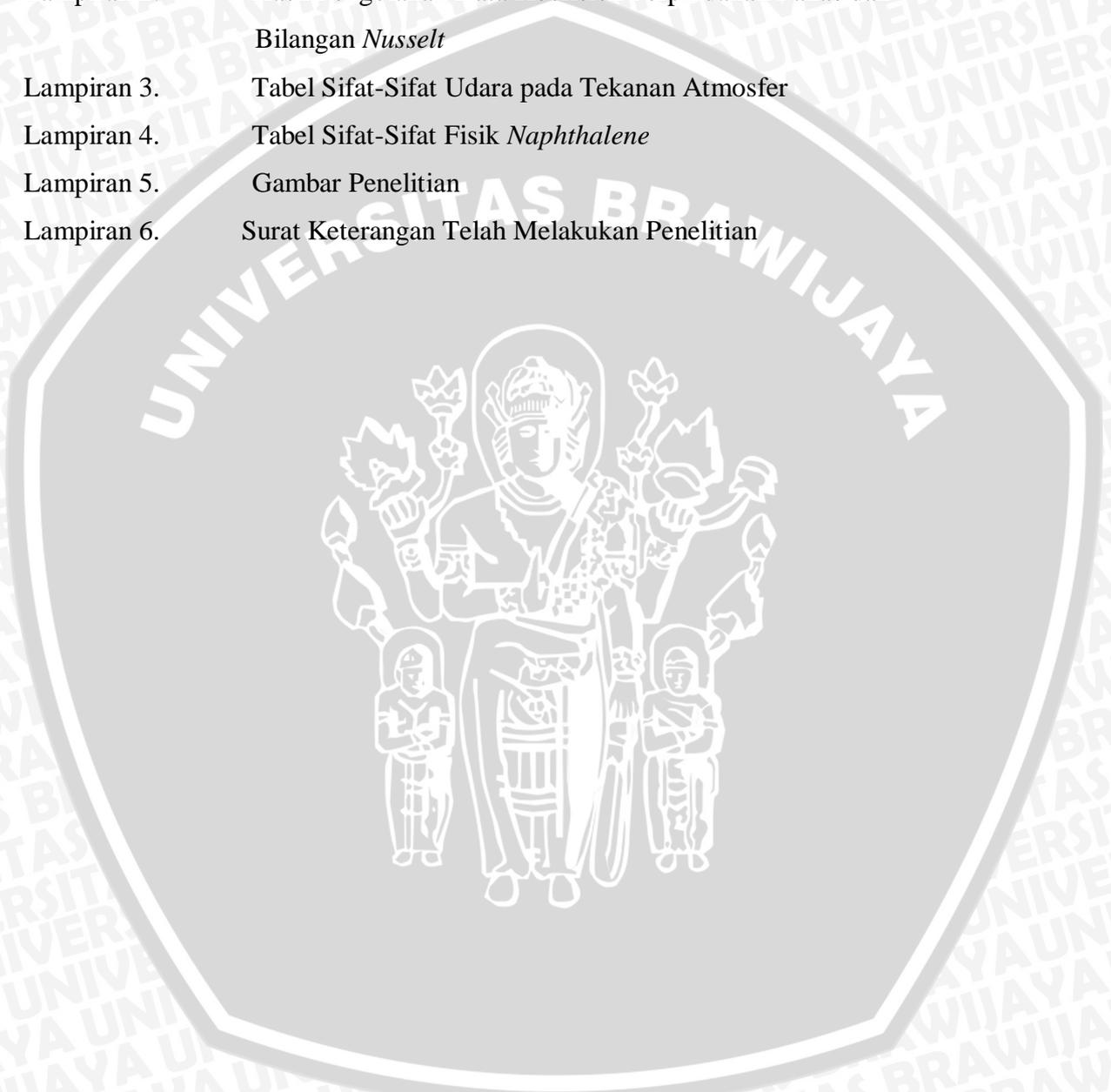


DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Perpindahan kalor konduksi	5
Gambar 2.2	Perpindahan kalor konveksi dari suatu permukaan panas yang ditiupkan udara dingin	6
Gambar 2.3	Aliran laminar	8
Gambar 2.4	Aliran turbulen	9
Gambar 2.5	Proses berkembangnya aliran di atas plat (aliran eksternal)	10
Gambar 2.6	Lapisan batas hidrodinamik	13
Gambar 2.7	Lapisan batas termal	14
Gambar 2.8	Mekanisme sederhana perpindahan massa	14
Gambar 2.9	Analogi perpindahan panas dan perpindahan massa	15
Gambar 2.10	Analogi perpindahan panas konduksi dengan difusi massa	16
Gambar 2.11	Analogi perpindahan panas konveksi dan perpindahan massa	16
Gambar 2.12	Saluran Konvergen dan Divergen	20
Gambar 3.1	<i>Wind Tunnel</i> (a)	23
Gambar 3.2	<i>Wind Tunnel</i> (b)	23
Gambar 3.3	Instalasi Alat Penelitian	25
Gambar 3.4	Diagram alir penelitian	27
Gambar 4.1	Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Massa	33
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Panas	35
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Bilangan <i>Nusselt</i> (Nu)	37

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Massa
Lampiran 2.	Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Panas dan Bilangan <i>Nusselt</i>
Lampiran 3.	Tabel Sifat-Sifat Udara pada Tekanan Atmosfer
Lampiran 4.	Tabel Sifat-Sifat Fisik <i>Naphthalene</i>
Lampiran 5.	Gambar Penelitian
Lampiran 6.	Surat Keterangan Telah Melakukan Penelitian



DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatan	Simbol
Daya	Watt atau W	P
Difusivitas Thermal fluida	Meter kuadrat per detik atau m^2/s	α
Gaya	Newton atau N	F
geometri benda dari mana panas mengalir	meter atau m	δ
Kerja, Banyaknya Panas	Joule atau J	Q
Kalor spesifik	Joule per kilogram derajat celcius atau $J/kg^\circ C$	C_p
Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi	Watt per meter kuadrat derajat celcius atau $W/m^2^\circ C$	h
Konduktivitas Thermal Bahan	Watt per meter derajat celcius atau $W/m^\circ C$	k
Koefisien Perpindahan Massa	meter/sekon atau m/s	hm
Laju Massa Alir	kilogram per detik atau kg/s	\dot{m}
Laju Energi Kalor	Watt atau w	\dot{Q}
Massa	kilogram atau kg	m
Massa jenis	kilogram per meter kubik atau kg/m^3	ρ
Panjang	meter atau m	l
Koefisien Difusi	meter/sekon atau m/s	D
Tekanan	Pascal atau Pa	p
Temperatur dalam Celcius	Derajat celcius atau $^\circ C$	T
Viskositas dinamik fluida	kilogram per meter sekon atau $kg/m.s$	μ
Viskositas kinematik	meter kuadrat per detik atau m^2/s	Y
Konstanta Gas Universal	Joule per kilomol Kelvin atau $J/kmol.K$	R
Berat Molekul	kilogram per kilomol atau $kg/kmol$	M_N

RINGKASAN

Faried Miftahur Ridlo, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Februari 2010, Analisis Perpindahan Panas pada Saluran Berliku dengan Variasi Sudut Inklinasi Partisi Menggunakan Analogi Perpindahan Massa. Dosen Pembimbing : Slamet Wahyudi dan Nurkholis Hamidi.

Ilmu pengetahuan dan teknologi telah berkembang dengan begitu pesat. Hal ini terlihat dengan beragamnya teknologi-teknologi baru yang dikembangkan dan diciptakan guna mempermudah dan memberikan kenyamanan kepada manusia. Namun, perkembangan teknologi ini tidak lepas pula dari permasalahan baru yang muncul sebagai sebuah dampak dan harus selalu dicari solusinya sehingga perkembangan ilmu pengetahuan berjalan secara dinamis. Salah satunya adalah munculnya permasalahan dalam penentuan nilai koefisien perpindahan panas pada suatu alat penukar kalor. Usaha-usaha dalam merancang alat penukar kalor dengan kinerja tinggi ditentukan juga oleh nilai koefisien perpindahan panasnya. Beberapa metode yang telah banyak dipakai untuk menentukan angka koefisien perpindahan panas kerap kali terdapat banyak kesulitan karena memerlukan ketelitian yang tinggi. Diantaranya tingkat kesulitan dalam pemasangan termokopel yang dapat mengganggu aliran, karena jumlahnya relatif banyak dan kesulitan dalam pembacaan suhu rata-ratanya. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, digunakan metode alternatif yaitu metode analogi perpindahan massa yang memanfaatkan adanya kesamaan bentuk persamaan antara fenomena perpindahan massa dengan perpindahan panas untuk meningkatkan koefisien perpindahan panas.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas pada saluran berliku dengan variasi sudut inklinasi partisi menggunakan analogi perpindahan massa. Karakteristik perpindahan panas yang diamati berupa koefisien perpindahan massa (h_m), koefisien perpindahan panas konveksi (h), dan Bilangan *Nusselt* (Nu). Penelitian ini diujikan pada suatu *wind tunnel* yaitu berupa suatu saluran berliku dengan belokan tajam dengan variasi sudut inklinasi partisi sebesar 0° (*standard channels*), -6° (*convergent channels*), dan $+6^\circ$ (*divergent channels*), yang mana dalam saluran dipasang sejumlah kapur barus (*Naphthalene*) pada tiap dindingnya untuk diukur besar kehilangan massa sebelum dan sesudah dialiri udara dengan laju massa alir udara yang bervariasi pula, sehingga dapat dihitung koefisien perpindahan massanya untuk kemudian digunakan sebagai parameter untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi dan bilangan *Nusselt*.

Dari hasil penelitian, didapatkan kesimpulan bahwa koefisien perpindahan massa tertinggi dicapai pada variasi laju massa alir udara yang tertinggi dan pada variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*) yaitu sebesar 0,0267 m/s. Hal ini dikarenakan adanya perubahan kecepatan akibat perubahan luas penampang pada saluran, sehingga meningkatkan intensitas turbulensi yang akan mempercepat terjadinya perpindahan massa. Dengan rumus analogi perpindahan massa, maka peningkatan koefisien perpindahan massa juga akan meningkatkan koefisien perpindahan panas yang juga berpengaruh terhadap peningkatan bilangan *Nusselt* (Nu).

Kata kunci : Karakteristik perpindahan panas, analogi perpindahan massa, variasi sudut inklinasi partisi.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi dalam berbagai disiplin ilmu pengetahuan telah berkembang dengan begitu pesatnya. Hal ini terlihat dengan begitu banyaknya teknologi-teknologi baru yang dikembangkan dan diciptakan guna mempermudah dan memberikan kenyamanan kepada manusia dalam beraktivitas. Selain itu, perkembangan tersebut diharapkan mampu menyelesaikan masalah-masalah yang muncul sebagai akibat atau dampak dari perkembangan tersebut, karena tidak dapat dipungkiri bahwa dalam setiap kemajuan teknologi pasti ada dampak negatif yang muncul sebagai suatu permasalahan baru yang harus selalu dicari solusinya sehingga perkembangan ilmu pengetahuan berjalan secara dinamis.

Salah satu perkembangan ilmu pengetahuan yang menarik untuk dibahas adalah mengenai teknologi perpindahan panas maupun desain alat penukar kalor yang masih memiliki kelemahan-kelemahan, sehingga harus dicari solusi untuk menyelesaikan permasalahan-permasalahan tersebut. Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam merancang suatu alat penukar kalor adalah faktor biaya. Berat dan ukuran adalah faktor biaya yang paling penting dalam setiap penerapan di bidang ini, dan karena itu dapat dianggap sebagai variabel ekonomi pula (Holman, 1988: 480). Oleh karena itu, prinsip-prinsip perpindahan panas maupun ilmu pengetahuan yang mendukung dalam penyelesaian permasalahan perpindahan panas perlu dikaji lebih lanjut.

Perpindahan panas konveksi dipengaruhi oleh besarnya nilai koefisien perpindahan panasnya. Peningkatan nilai koefisien perpindahan panas konveksi pada komponen alat penukar kalor merupakan salah satu upaya untuk memperoleh alat penukar kalor dengan kinerja yang tinggi. Beberapa metode yang telah banyak dipakai untuk menentukan angka koefisien perpindahan panas diantaranya dengan mengukur suhu permukaan dan laju perpindahan panas dalam suatu sistem aliran. Hanya saja metode ini kerap kali terdapat banyak kesulitan karena memerlukan ketelitian yang tinggi. Diantaranya tingkat kesulitan dalam pemasangan termokopel pada permukaan yang dapat mengganggu aliran, jumlahnya relatif banyak dan kesulitan dalam pembacaan suhu rata-ratanya.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka diperlukan suatu metode alternatif yang akan digunakan untuk mengatasi kesulitan pada metode yang lama. Dalam

penelitian ini digunakan suatu metode yang disebut metode analogi perpindahan massa. Metode analogi perpindahan massa yaitu suatu metode dengan memanfaatkan adanya kesamaan-kesamaan antara persamaan-persamaan yang mengatur aliran panas dengan aliran massa. Metode ini digunakan untuk mengembangkan suatu analogi antara sistem aliran panas dengan sistem aliran massa. Bahan yang akan diukur besar kehilangan massanya untuk menentukan koefisien perpindahan massa dan panas adalah *Naphthalene* atau kapur barus ($C_{10}H_8$).

Hirota, dkk (2000) telah melaksanakan penelitian dengan menggunakan *Naphthalene* pada suatu saluran tajam dengan variasi sudut inklinasi partisi dan menghitung besarnya distribusi angka *Sherwood* rata-rata pada setiap variasi sudutnya dan memperoleh hasil dengan semakin besarnya sudut, maka angka *Sherwood* menunjukkan nilai yang semakin kecil.

Kautsar (2005) telah melaksanakan penelitian tentang analisis perpindahan kalor pada permukaan plat dengan variasi *length* (L)- *width* (W) menggunakan analogi perpindahan massa. Sungguh Setianto (2005) telah melaksanakan penelitian tentang analisis koefisien perpindahan panas pada permukaan plat datar dengan variasi sudut serang aliran fluida menggunakan analogi perpindahan massa. Dari beberapa penelitian ini dapat diketahui bahwa dengan metode ini, terjadi peningkatan koefisien perpindahan panas yang bisa dihitung menggunakan persamaan-persamaan dari perpindahan massa (analogi perpindahan massa). Oleh karena itu perlu dilaksanakan penelitian lebih lanjut dimana pada penelitian ini dilakukan pada suatu saluran dengan memanfaatkan variasi perubahan luas penampang saluran yaitu tentang analisis perpindahan panas pada suatu aliran saluran berliku dengan belokan tajam dengan variasi sudut inklinasi partisi untuk mencari koefisien perpindahan panas yang optimal pada suatu saluran.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang tersebut dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti yaitu bagaimana karakteristik perpindahan panas dengan variasi sudut inklinasi partisi pada saluran berliku menggunakan analogi perpindahan massa?

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini lebih terarah, maka perlu digunakan beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Kondisi aliran fluida dikondisikan dalam keadaan *steady state*.

2. Fluida yang digunakan adalah udara.
3. Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah *Naphthalene* atau kapur barus ($C_{10}H_8$).
4. Tidak membahas reaksi kimia dari *Naphthalene* pada saat terjadi penyubliman.
5. Aliran fluida masuk adalah aliran turbulen.
6. Kondisi kecepatan aliran fluida adalah *sub-sonic*.
7. Jarak belokan (*Clearance*) dibuat konstan yaitu sebesar 50 mm.
8. Variasi sudut inklinasi partisi sebesar 0° , -6° , $+6^\circ$.
9. Saluran yang digunakan berupa saluran berliku dengan belokan tajam (sudut belokan 180°).
10. Karakteristik perpindahan panas yang diamati berupa koefisien perpindahan massa, koefisien perpindahan panas konveksi dan bilangan *Nusselt*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas pada saluran berliku dengan variasi sudut inklinasi partisi menggunakan analogi perpindahan massa.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan khususnya tentang perpindahan panas.
2. Menambah wawasan mengenai penentuan angka koefisien perpindahan panas menggunakan metode analogi perpindahan massa.
3. Memberikan kontribusi terhadap dunia industri dalam merancang alat penukar kalor.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Hirota, dkk (2000) telah melaksanakan penelitian dengan menggunakan teknik sublimasi *Naphthalene* pada suatu saluran tajam dengan variasi sudut inklinasi partisi dan menghitung besarnya distribusi angka *Sherwood* rata-rata pada setiap variasi sudutnya dan memperoleh hasil dengan semakin besarnya sudut (divergen), maka angka *Sherwood* menunjukkan nilai yang semakin kecil. Angka *Sherwood* merupakan suatu bilangan yang menunjukkan perbandingan perpindahan massa secara konveksi terhadap perpindahan massa secara difusi antara dinding dengan fluida. Harga dari angka *Sherwood* dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa (cm/s), dimensi saluran (cm), dan koefisien difusi (cm²/s).

Zhao C.Y. dan Tao W.Q. (1997) telah melaksanakan penelitian tentang pengaruh orientasi *rib angle* pada distribusi perpindahan massa pada saluran dengan belokan tajam 180° dengan *rib turbulators* menggunakan teknik sublimasi *Naphthalene*. Penelitian ini dilakukan dengan memasang bahan yang dibentuk menyerupai rusuk-rusuk (*rib*) dengan variasi sudut serang sebesar 90°, 45°, 60°, -45°, -60° dan pada 3 variasi angka *Reynolds* sebesar 3.0×10^4 , 6.0×10^4 , dan 9.0×10^4 . Hasil menunjukkan bahwa angka *Sherwood* setelah belokan lebih tinggi daripada di belokan. Sedangkan angka *Sherwood* di belokan juga lebih tinggi daripada sebelum belokan pada saluran. Perbandingan angka *Sherwood* rata-rata paling tinggi didapatkan pada variasi sudut serang 60°, kemudian sudut 45°, dan paling rendah pada sudut serang 90° dan -45°.

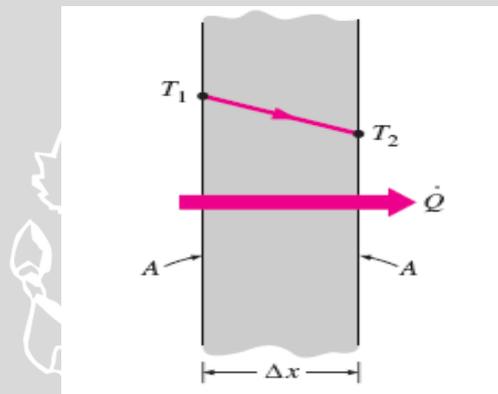
2.2 Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor didefinisikan sebagai *transfer* energi dari suatu sistem ke sistem lainnya karena perbedaan temperatur dan selalu terjadi dari suatu sistem bersuhu tinggi ke sistem lain yang bersuhu lebih rendah dan akan berhenti setelah kedua sistem mencapai temperatur yang sama. Perbedaan temperatur merupakan syarat utama untuk terjadinya perpindahan kalor.

2.2.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi didefinisikan sebagai suatu perpindahan kalor di mana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu rendah dalam satu medium atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan

atau berinteraksi secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Perpindahan kalor konduksi dapat terjadi baik pada benda padat, benda cair maupun gas. Pada benda cair dan gas perpindahan kalor konduksi terjadi karena adanya tumbukan (*collision*) serta *difusi* pada molekul selama mengalami gerak acak akibat kenaikan temperatur, sedangkan pada benda padat perpindahan kalor konduksi terjadi karena kombinasi getaran molekul pada kisi-kisinya serta perpindahan energi oleh elektron bebas, dimana pada saat dipanaskan, gerakan dari atom dan elektron bebas yang sebelumnya bergetar dengan setimbang akan berubah menjadi getaran yang lebih besar sehingga menumbuk atom-atom dan elektron di sekitarnya. Interaksi antar atom maupun elektron tersebut menyebabkan adanya *transfer* energi dari atom yang satu ke atom yang lain, sehingga kalor akan merambat dalam substansi tersebut secara atomik. Perpindahan kalor konduksi melalui sebuah dinding dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Perpindahan kalor konduksi
Sumber : Çengel (2003:18)

Laju perpindahan kalor konduksi dikemukakan oleh J.B.J. Fourier pada tahun 1822 yaitu besarnya laju perpindahan kalor konduksi proporsional terhadap luas permukaan yang dilalui kalor, perbedaan temperatur, dan konduktivitas termal material, namun berbanding terbalik terhadap ketebalan dari permukaan yang dilalui oleh kalor, sehingga dapat dinyatakan :

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \quad (\text{Çengel, 2003:18}) \quad (2-1)$$

dengan : \dot{Q}_{cond} = Laju perpindahan kalor konduksi (W)

k = Konduktivitas termal bahan (W/m °C)

A = Luas permukaan perpindahan kalor (m²)

$T_2 - T_1$ = Perbedaan temperatur permukaan perpindahan kalor (°C)

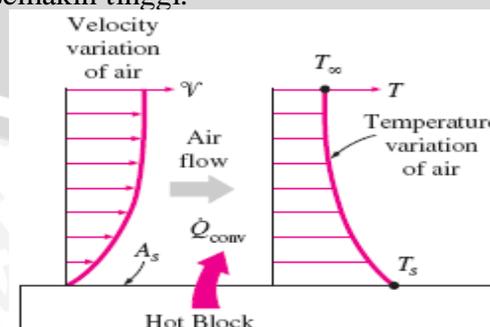
Δx = Ketebalan permukaan perpindahan kalor pada arah x (m)

Konduktivitas termal merupakan suatu konstanta proporsional yang menyatakan kemampuan suatu material untuk menghantarkan kalor. Konduktivitas termal di definisikan sebagai besarnya kalor yang dapat dihantarkan oleh setiap unit tebal dari material per unit area per unit perbedaan temperatur.

2.2.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi merupakan suatu mekanisme perpindahan kalor antara permukaan padat dengan fluida cair maupun gas yang bergerak dan melibatkan konduksi serta gerakan dari fluida tersebut. Semakin cepat gerakan fluida maka akan semakin besar laju perpindahan kalor konveksinya. Atas dasar suatu proses pendinginan balok panas yang ditiupkan udara dingin maka proses perpindahan kalor konveksi akan terjadi melalui beberapa tahap, pertama energi kalor akan mengalir secara konduksi dari permukaan benda padat ke partikel-partikel lapisan fluida yang berbatasan, kemudian energi ini akan terbawa menjauh dari permukaan benda padat melalui mekanisme konveksi, dimana terdapat dua proses yang terjadi secara bersamaan yaitu kombinasi dari efek konduksi di dalam fluida akibat gerakan acak antar partikel-partikel fluida yang terjadi secara mikroskopis sehingga partikel fluida yang memiliki energi lebih tinggi akan memindahkan sebagian energinya pada partikel fluida yang memiliki energi lebih rendah, serta adanya gerakan fluida secara makroskopis yang akan menggantikan fluida yang telah panas di sekitar permukaan benda padat dengan fluida dingin.

Semakin cepat fluida bergerak maka laju perpindahan kalor juga akan semakin tinggi. Adanya gerakan fluida akan semakin cepat menggantikan fluida yang telah panas di sekitar permukaan benda padat dengan fluida dingin atau sebaliknya sehingga dihasilkan temperatur fluida yang lebih dingin atau lebih panas pada lapisan-lapisan fluida yang saling berinteraksi melakukan perpindahan panas. Hal ini menyebabkan laju perpindahan kalor akan semakin tinggi.



Gambar 2.2 Perpindahan kalor konveksi dari suatu permukaan panas yang ditiupkan udara dingin

Sumber : Çengel (2003:26)

Perpindahan kalor konveksi akan melibatkan perpindahan massa dari fluida, sehingga dengan tidak adanya gerakan fluida maka perpindahan kalor yang terjadi merupakan murni perpindahan kalor konduksi.

Secara umum perpindahan kalor konveksi dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Konveksi bebas (*free convection*)

Pada konveksi bebas gerakan perpindahan fluida terjadi karena adanya perbedaan densitas atau kerapatan fluida yang disebabkan oleh adanya perbedaan atau gradien temperatur, proses ini terjadi secara alamiah sehingga sering disebut konveksi alamiah (*natural convection*).

2. Konveksi paksa (*forced convection*)

Pada konveksi paksa fluida dipaksa bergerak oleh adanya gaya atau energi dari luar, misalnya oleh pompa atau kipas (*fan*). *transfer* kalor yang dihasilkan akan lebih tinggi dari konveksi bebas.

Besarnya laju perpindahan kalor konveksi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (\text{Çengel, 2003:335}) \quad (2-2)$$

dengan :

\dot{Q}_{conv} = Laju perpindahan kalor konveksi (W)

h = Koefisien perpindahan kalor konveksi ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)

A = Luas permukaan perpindahan kalor (m^2)

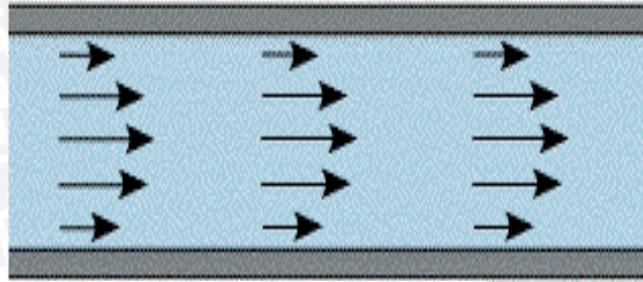
T_s = Temperatur permukaan benda ($^\circ\text{C}$)

T_∞ = Temperatur fluida pada jarak tertentu dari permukaan benda ($^\circ\text{C}$)

2.3. Analisis Aliran

2.3.1 Aliran Laminar

Aliran laminar adalah aliran yang bergerak dalam lapisan-lapisan dengan gerakan yang teratur (*highly-ordered motion*). Masing-masing partikel fluida bergerak mengikuti lintasan tertentu serta tetap ada dalam masing-masing lapisan dengan urutan yang teratur tanpa saling mendahului sehingga aliran laminar memiliki *streamline* yang tidak saling bercampur. Kecepatan fluida dapat berbeda antara *streamline* yang satu dengan yang lain. Aliran laminar dapat dilihat seperti pada gambar 2.3.



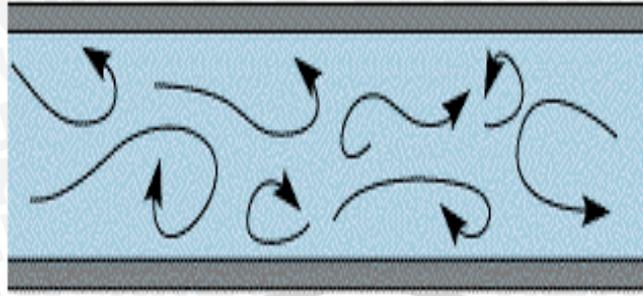
Gambar 2.3 Aliran laminar
Sumber : CREST (2008:1)

Perpindahan kalor dan momentum terjadi secara konduksi molekuler di dalam fluida maupun antara fluida dengan dinding. Tidak terdapat arus percampuran yang mengangkut energi yang tersimpan dalam partikel-partikel fluida tersebut melintasi garis-garis aliran dan kecenderungan aliran laminar menjadi turbulen masih dapat diredam oleh gaya-gaya viskos yang memberikan hambatan terhadap gerak relatif lapisan-lapisan fluida. Besar angka *Reynold* untuk aliran laminar adalah $Re < 5.10^5$ untuk aliran di atas plat (Çengel, 2003:372).

2.3.2 Aliran turbulen

Aliran turbulen adalah aliran yang partikel-partikel fluidanya bergerak secara acak dengan sangat cepat (*highly-disordered motion*) dengan kecepatan yang berfluktuasi. Mekanisme perpindahan kalor dan momentum pada aliran turbulen adalah dengan cara konduksi molekuler diubah serta dibantu oleh banyak sekali pusaran-pusaran (*eddy*) atau olakan-olakan yang membawa gumpalan-gumpalan makroskopik fluida melintasi garis-garis aliran sehingga tidak terbentuk lapisan-lapisan fluida karena tiap-tiap *streamline* akan saling bercampur. Partikel-partikel gumpalan-gumpalan fluida tersebut berperan sebagai pembawa energi dan memindahkan energi dengan cara bercampur dengan partikel-partikel lain dari fluida tersebut, semakin cepat gerakan fluida tersebut maka akan semakin besar energi yang dapat dipindahkan.

Besar angka *Reynold* untuk aliran turbulen adalah $Re > 5.10^5$ untuk aliran di atas plat (Çengel, 2003:372). Aliran turbulen dapat dilihat seperti pada gambar 2.4.

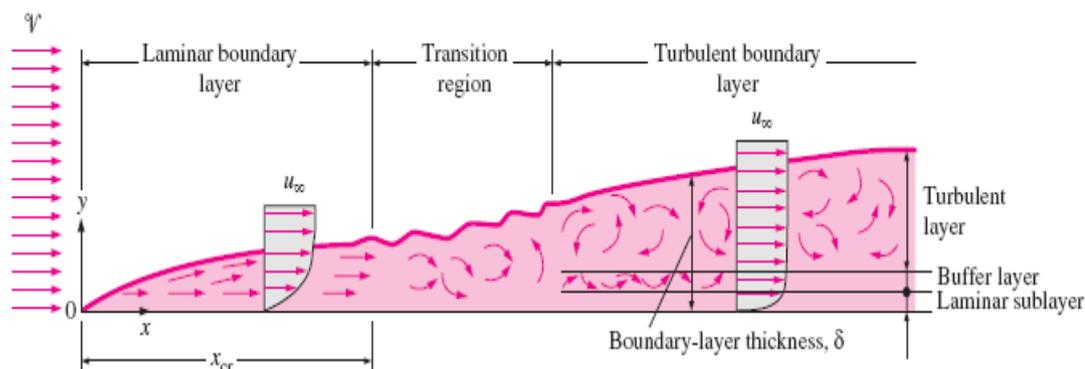


Gambar 2.4 Aliran turbulen
Sumber : CREST (2008:1)

2.3.3 Proses Berkembangnya Aliran

Pada suatu aliran fluida berviskositas yang melewati suatu permukaan plat diam, fluida yang mengalir dianggap terdiri dari lapisan-lapisan yang saling berdekatan dan bertumpukan satu dengan yang lain. Kecepatan partikel fluida pada lapisan pertama yang berdekatan langsung dengan dinding plat akan sama dengan nol atau cenderung melekat pada dinding plat (*no-slip condition*). Hal ini disebabkan oleh adanya gesekan yang tinggi serta adanya viskositas dari fluida tersebut, sehingga menyebabkan fluida yang besebelahan dengan lapisan fluida pertama akan menjadi lambat gerakannya akibat adanya faktor gesekan dari kedua partikel lapisan fluida karena kedua partikel memiliki kecepatan yang berbeda. Kemudian lapisan fluida ini akan menurunkan kecepatan partikel fluida pada lapisan selanjutnya, begitu seterusnya sampai pada suatu lapisan dimana kecepatan fluida mendekati kecepatan aliran bebas u_∞ , sehingga kecepatan fluida akan bervariasi dari nol pada $y = 0$ dan mendekati u_∞ (*free stream velocity*) pada $y = \delta$. Profil kecepatan di dekat tepi paling depan plat datar (*leading edge*) merupakan profil yang khas untuk lapisan batas laminar, namun aliran di dalam lapisan batas akan tetap laminar hanya sepanjang jarak tertentu dari tepi paling depan plat datar (*leading edge*) dan kemudian menjadi turbulen. Dalam fluida yang mengalir senantiasa terdapat gangguan-gangguan serta gelombang-gelombang kecil, tetapi selama gaya-gaya viskos besar maka gaya tersebut akan mencegah timbulnya gangguan-gangguan. Dengan menebalnya lapisan batas laminar, perbandingan gaya-gaya viskos terhadap gaya-gaya inersia menurun dan akhirnya mencapai suatu titik dimana gangguan-gangguan tersebut akan semakin besar dan tumbuh bersama waktu. Lapisan batas menjadi tidak stabil dan mulailah peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen. Terbentuklah pusaran-pusaran yang memusnahkan keteraturan gerakan lapisan batas. Gerakan laminar hanya bertahan dalam suatu lapisan tipis yang berdekatan langsung dengan permukaan. Bagian ini disebut lapisan bawah laminar (*laminar*

sublayer), sedangkan wilayah di antara lapisan bawah laminar dan bagian lapisan batas yang sepenuhnya turbulen (*turbulent layer*) dinamakan lapisan penyangga (*buffer layer*). Proses berkembangnya aliran ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Proses berkembangnya aliran di atas plat (aliran eksternal)
Sumber : Çengel (2003:339)

2.3.4 Angka Reynold (Re)

Angka *Reynold* merupakan perbandingan gaya inersia terhadap gaya viskos yang digunakan sebagai kriteria yang menunjukkan apakah aliran itu laminar atau turbulen (Holman, 1988:195). Fluida yang mengalir memiliki suatu pola aliran tertentu, baik dapat berupa aliran laminar yang bergerak secara teratur dan *streamline* maupun aliran turbulen yang bergerak tidak teratur (acak). Pola aliran fluida ini tergantung dari perbandingan gaya inersia terhadap gaya viskos yang dinyatakan dengan angka *Reynold*, jika angka *Reynold* rendah maka gaya viskos dapat menghambat gaya inersia akibat kecepatan fluida sehingga aliran fluida menjadi laminar, jika angka *Reynold* tinggi maka gaya inersia yang berhubungan dengan densitas dan kecepatan fluida nilainya relatif lebih besar terhadap gaya viskos, sehingga gaya viskos tidak dapat menahan fluktuasi fluida yang cepat dan acak. Hal ini menimbulkan turbulensi pada aliran tersebut. Secara matematis besarnya angka *Reynold* untuk suatu aliran pada plat datar dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{V_m D_h}{\nu} \quad (\text{Çengel, 2003:442}) \quad (2-3)$$

dengan : V_m = Kecepatan rata-rata fluida (m/s)

D_h = Diameter hidrolis (m)

ν = μ/ρ = Viskositas kinematik fluida (m^2/s)

μ = Viskositas dinamik (kg/m.s)

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

2.3.5 Angka Prandtl (Pr)

Angka *Prandtl* merupakan parameter yang menghubungkan ketebalan relatif antara lapisan batas hidrodinamik dengan lapisan batas termal yaitu menyatakan perbandingan viskositas kinematik fluida terhadap difusivitas termal. Viskositas kinematik fluida menunjukkan laju difusi momentum dalam fluida karena gerakan molekul-molekul dari fluida tersebut, sedangkan difusivitas termal merepresentasikan seberapa cepat kalor berdifusi di dalam suatu fluida, yang mana difusivitas termal didefinisikan sebagai besarnya kalor yang dikonduksikan dibanding dengan kalor yang dapat tersimpan dalam material tersebut (Çengel, 2003:23).

Perbandingan kedua kuantitas tersebut menunjukkan besaran relatif antara difusi momentum dan difusi kalor dalam fluida. Kedua laju difusi ini akan menentukan seberapa tebal lapisan batas termal pada suatu medan aliran fluida, sehingga angka *Prandtl* merupakan penghubung antara medan kecepatan dengan medan suhu dan dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu/\rho}{k/C_p \cdot \rho} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \quad (\text{Holman, 1988:213}) \quad (2-4)$$

dengan :

- α = Difusivitas termal fluida (m^2/s)
- C_p = Panas spesifik pada tekanan konstan ($\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
- k = Konduktivitas termal fluida ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)
- μ = Viskositas dinamik fluida ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)
- ν = Viskositas kinematik (m^2/s)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

2.3.6 Angka Nusselt (Nu)

Angka *Nusselt* merupakan kelompok angka yang didapat dari pengukuran eksperimental terdiri dari angka *Reynold*, angka *Prandtl* dan konstanta yang harganya tergantung pada geometri saluran dan pola aliran. Angka *Nusselt* menunjukkan besar rasio perpindahan kalor melalui proses konveksi terhadap besar perpindahan kalor melalui proses konduksi pada lapisan fluida yang sama (Çengel, 2001:351). Semakin besar angka *Nusselt* maka perpindahan kalor konveksi akan semakin efektif. Laju perpindahan kalor tiap waktu tiap unit luas pada proses konveksi dan konduksi adalah sebagai berikut:

$$\dot{q}_{conv} = h\Delta T \quad (\text{Çengel, 2003:336}) \quad (2-5)$$

$$\dot{q}_{cond} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (\text{Çengel, 2003:336}) \quad (2-6)$$

Sehingga rasionya:

$$\frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T/\delta} = \frac{h\delta}{k} = Nu \quad (\text{Çengel, 2003:336}) \quad (2-7)$$

dengan : δ = geometri benda dari mana panas mengalir (m)

Sedangkan hubungan angka *Reynold* dan angka *Prandtl* terhadap angka *Nusselt* untuk aliran dalam saluran dapat dinyatakan sebagai berikut:

- Untuk aliran laminar

$$Nu_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (Re_L < 5 \times 10^5) \quad (\text{Çengel, 2003:374}) \quad (2-8)$$

dengan :

Nu = Angka *Nusselt*

Re = Angka *Reynold*

Pr = Angka *Prandtl*

L = Panjang plat (m)

- Untuk aliran turbulen

$$Nu = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad \begin{matrix} (0.6 \leq Pr \leq 60) \\ (5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7) \end{matrix} \quad (\text{Çengel, 2003:374}) \quad (2-9)$$

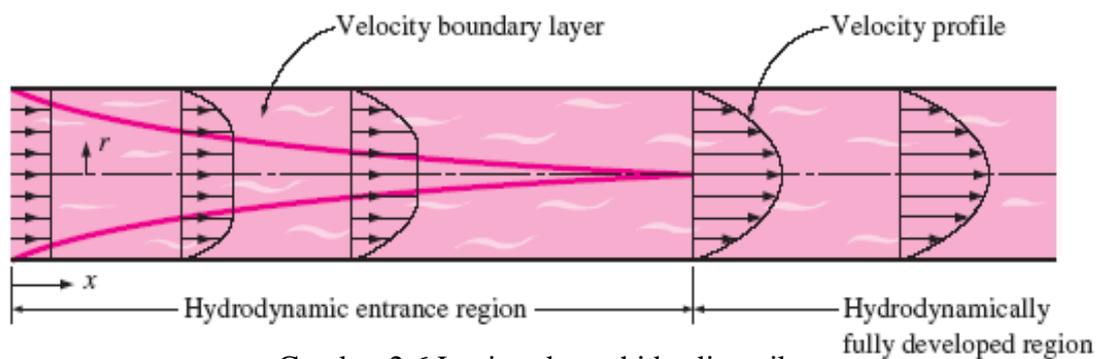
2.4 Dasar-Dasar Lapisan Batas

Lapisan batas merupakan lapisan fluida yang membagi medan aliran ke dalam dua wilayah, lapisan tersebut meliputi daerah dimana di sekitar daerah tersebut terdapat perbedaan gradien temperatur atau gradien kecepatan yang besar.

2.4.1 Lapisan Batas Hidrodinamik

Lapisan batas hidrodinamik merupakan suatu daerah dimana gaya-gaya viskos fluida berpengaruh pada kecepatan fluida, pada saat fluida mengalir dengan kecepatan yang seragam (*uniform*) pada sebuah saluran yang permukaannya sejajar terhadap arah aliran fluida tersebut, partikel-partikel fluida pada lapisan yang bersinggungan langsung dengan permukaan plat akan cenderung melekat pada dinding plat (*no-slip condition*). Lapisan tersebut menyebabkan partikel-partikel fluida yang berada pada lapisan-lapisan yang berdekatan akan ikut menjadi lambat gerakannya akibat gesekan terhadap lapisan

fluida tersebut, sebagai akibat dari penurunan kecepatan tersebut maka kecepatan fluida pada tengah saluran akan meningkat mengingat laju aliran massa yang mengalir sepanjang saluran selalu konstan. Sebagai akibat dari hal tersebut maka akan terbentuk lapisan batas kecepatan (*velocity boundary layer*) pada aliran fluida sepanjang saluran yaitu daerah dimana efek dari gaya geser viskos masih dapat dirasakan. Tebal lapisan batas ini akan terus meningkat sepanjang aliran fluida hingga lapisan batas kecepatan tersebut mencapai pusat saluran. Pertumbuhan lapisan batas hidrodinamik serta profil-profil kecepatan dalam saluran ditunjukkan pada gambar 2.6.



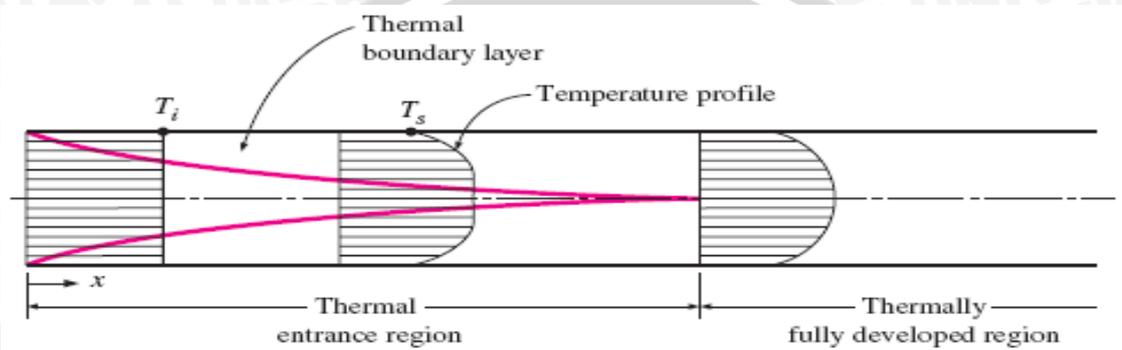
Gambar 2.6 Lapisan batas hidrodinamik
Sumber : Çengel (2003:423)

Tebal lapisan batas hidrodinamik di dalam saluran didefinisikan sebagai jarak antara titik yang mempunyai kecepatan 99% kecepatan arus bebas (*free stream velocity*) terhadap permukaan saluran sehingga dapat dinyatakan dengan $u = 0.99 u_{\infty}$ dimana u adalah kecepatan fluida pada titik tertentu dengan arah melintang terhadap permukaan saluran dan u_{∞} adalah kecepatan arus bebas dari aliran fluida pada saluran tersebut (Çengel, 2003:341).

2.4.2 Lapisan Batas Termal

Lapisan batas termal merupakan daerah dimana terdapat gradien suhu dalam aliran terhadap arah normal permukaan (Holman, 1988:208). Gradien suhu itu terjadi akibat proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding, ketika fluida yang mengalir di dalam saluran dipanaskan atau didinginkan. Temperatur fluida pada penampang berubah dari T_s pada permukaan dinding sampai maksimum (atau minimum dalam kasus pemanasan) pada pusat saluran. Pada proses pendinginan, temperatur minimum terjadi pada permukaan dinding saluran dan maksimum pada pusat saluran. Sedangkan pada proses pemanasan, temperatur maksimum terjadi pada permukaan dinding saluran dan temperatur minimum pada pusat saluran. Tebal lapisan batas termal pada setiap

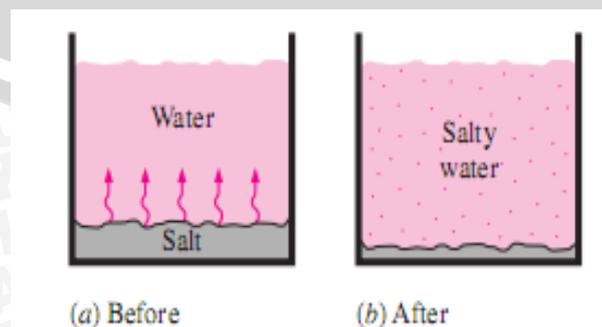
lokasi sepanjang saluran didefinisikan sebagai jarak dari permukaan saluran yang memiliki temperatur T_s dengan titik dengan temperatur T yang memenuhi persamaan berikut $(T - T_s) = 0.99 (T_\infty - T_s)$ dimana T_∞ adalah temperatur dari arus bebas, pada kasus khusus dimana $T_s = 0$ maka tebal lapisan batas termal merupakan jarak dari permukaan saluran dengan titik yang memiliki temperatur $T = 0.99 T_\infty$ (Çengel, 2003:341). Pertumbuhan lapisan batas termal dan profil suhu dalam saluran ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Lapisan batas termal
Sumber : Çengel (2003:424)

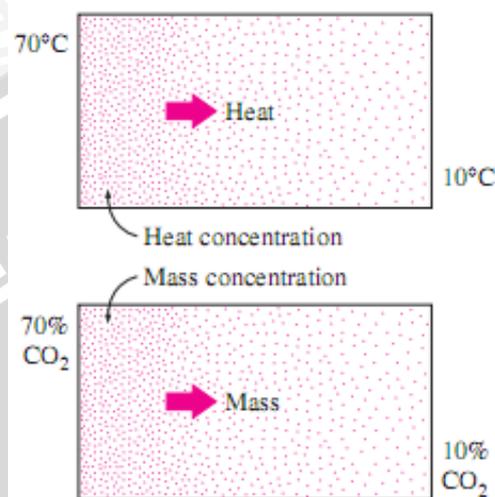
2.5 Perpindahan Massa

Perpindahan massa terjadi ketika terdapat dua zat yang bercampur dan terdapat gradien konsentrasi. Perpindahan massa (*mass transfer*) dapat terjadi karena beberapa macam fenomena yang berlainan, ada perpindahan massa yang berlangsung dengan cara konveksi, dalam arti massa berpindah dari satu tempat ke tempat yang lain dalam sistem aliran. Apabila suatu campuran gas dan zat cair terkandung sedemikian rupa sehingga terdapat perbedaan konsentrasi dari salah satu atau beberapa konstituen dalam sistem itu, maka akan terjadi perpindahan massa sebagai akibat difusi atau pembauran dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi rendah. Perpindahan massa hanya bisa terjadi secara konduksi (biasa disebut difusi) dan konveksi (Çengel, 2002:720).



Gambar 2.8 Mekanisme sederhana perpindahan massa
Sumber : Çengel (2002:718)

Dalam hal memahami perpindahan massa dapat ditarik suatu analogi (kesamaan fenomena) dengan perpindahan panas. Perpindahan panas terjadi jika terdapat perbedaan temperatur pada suatu sistem sehingga terjadi transfer energi dari sistem bersuhu tinggi menuju sistem bersuhu rendah. Fenomena perpindahan panas berhenti apabila sudah tidak ada perbedaan temperatur lagi, sedangkan perpindahan massa berhenti bila gradien konsentrasi telah berkurang sampai menjadi nol.



Gambar 2.9 Analogi perpindahan panas dan perpindahan massa
Sumber : Çengel (2002:720)

2.6 Analogi Perpindahan Panas dan Perpindahan Massa

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

$$\dot{m}_{diff} = -D_{AB} \cdot A \frac{dC_A}{dx} \quad (\text{Çengel, 2002:720}) \quad (2-10)$$

dengan :

\dot{m}_{diff} = Laju aliran massa difusi (kg/s)

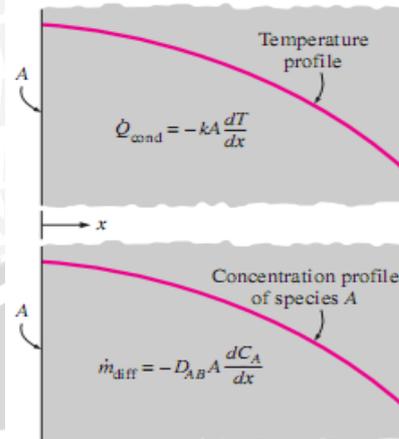
D_{AB} = Koefisien difusi (m²/s)

A = Luas penampang (m²)

dC_A/dx = Gradien konsentrasi (kg/m³)

Persamaan ini sangat identik dengan Hukum Fourier tentang perpindahan panas konduksi yaitu persamaan (2-1).

Berikut adalah mekanisme sederhana analogi perpindahan panas konduksi dengan difusi massa.



Gambar 2.10 Analogi perpindahan panas konduksi dengan difusi massa
Sumber : Çengel (2002:720)

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

$$\dot{m}_{conv} = \dot{h}_{mass} \cdot A \cdot (C_s - C_\infty) \quad (\text{Çengel, 2002:720}) \quad (2-11)$$

dengan :

\dot{m}_{conv} = Laju aliran massa konveksi (kg/s)

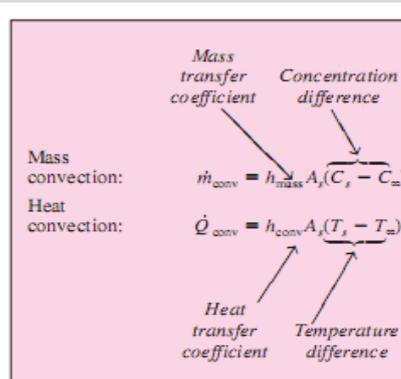
\dot{h}_{conv} = Koefisien perpindahan massa (m/s)

A = Luas permukaan perpindahan massa (m²)

(C_s-C_∞) = Perbedaan konsentrasi pada lapisan batas (kg/m³)

Persamaan (2-11) di atas analog dengan Hukum *Newton* tentang pendinginan yang berlaku untuk perpindahan panas konveksi, yaitu persamaan (2-2).

Berikut adalah mekanisme sederhana analogi perpindahan panas konveksi dengan perpindahan massa.



Gambar 2.11 Analogi perpindahan panas konveksi dengan perpindahan massa
Sumber : Çengel (2002:721)

Pada permukaan plat datar terdapat proses perpindahan panas menyeluruh. Persamaan tentang laju aliran panas menyeluruh yang merupakan hasil gabungan dari proses perpindahan panas secara konduksi dan konveksi adalah:

$$\dot{Q} = U.A.(\Delta T) \quad (\text{Çengel, 2003:680}) \quad (2-12)$$

dengan :

\dot{Q} = Laju perpindahan kalor menyeluruh (W)

U = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

A = Luas permukaan perpindahan kalor (m^2)

ΔT = Perbedaan temperatur ($^\circ C$)

Pada perpindahan massa terdapat laju aliran massa menyeluruh yang analog dengan persamaan (2-12) di atas. Untuk mendapatkan laju aliran massa menyeluruh dirumuskan dalam suatu persamaan berikut:

$$N_A = K.(y_{A,G} - y^*_A) \quad (\text{Çengel, 2003:680}) \quad (2-13)$$

$$\dot{m} = K.A.(y_{A,G} - y^*_A) \quad (\text{Çengel, 2003:680}) \quad (2-14)$$

dengan :

\dot{m} = Laju aliran massa konveksi (kg/s)

K = Koefisien perpindahan massa menyeluruh (m/s)

A = Luas permukaan perpindahan massa (m^2)

$(y_{A,G} - y^*_A)$ = Gradien konsentrasi (kg/m^3)

Dari persamaan (2-10) sampai dengan persamaan (2-14) dapat dilihat bahwa terdapat hubungan kesamaan (analog) antara persamaan-persamaan yang menjelaskan tentang proses perpindahan panas dengan 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 konveksi (h) dengan perpindahan massa (h_m) adalah :

$$St \cdot Pr^{2/3} = St_m \cdot Sc^{2/3} \quad (\text{Çengel, 2002:759}) \quad (2-15)$$

Hubungan perpindahan kalor dan perpindahan massa dapat diperoleh dengan mengikuti persamaan (2-15), yaitu:

$$St \cdot Pr^{2/3} = \left(\frac{h}{\rho \cdot u \cdot C_p} \right) Pr^{2/3} = j = f(Re) \quad (\text{Çengel, 2002:663}) \quad (2-16)$$

$$St_m \cdot Sc^{2/3} = \left(\frac{h_m}{u} \right) Sc^{2/3} = j_m = f(Re) \quad (\text{Çengel, 2002:663}) \quad (2-17)$$

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 :

$$\text{Log}P = 13,564 - \frac{3729,4}{T} \quad (\text{Ling, 1994: 486}) \quad (2-18)$$

dimana : P = Tekanan uap *Naphthalene* (N/m²)

T = Temperatur udara lingkungan rata-rata (°K)

Angka *Schmidt Naphthalene* pada kondisi temperatur antara (15-55) °C dapat dihitung dari persamaan :

$$Sc = 8,0743 \cdot T^{-0,2165} \quad (\text{Ling, 1994: 486}) \quad (2-19)$$

Sedangkan koefisien perpindahan massa dihitung dengan persamaan dasar, yaitu:

$$h_m = \frac{\dot{m}}{A \cdot \Delta C} \quad (\text{Çengel, 2002:627}) \quad (2-20)$$

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

$$h_m = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N} \quad (\text{Çengel, 2002:10}) \quad (2-21)$$

dengan :

h_m = Koefisien perpindahan massa (m/s)

\dot{m} = Laju aliran massa *Naphthalene* (kg/s)

ΔP = P - P_∞

P = Tekanan uap jenuh *Naphthalene* di permukaan benda uji pada suhu ruang (N/m^2)

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

A = Luas selimut benda uji (m^2)

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

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

R = Konstanta gas universal (8315 J/kmol.K)

Dari persamaan (2-16) dan (2-17), untuk faktor "j" yang sama (dengan asumsi bahwa angka Reynold pada kedua sistem sama) dapat diperoleh hubungan sehingga koefisien perpindahan kalor konveksi (h) dapat dihitung, yaitu :

$$h = h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (\text{Çengel, 2002:666}) \quad (2-22)$$

dengan:

h_m = Koefisien perpindahan massa (m/s)

C_p = kalor jenis spesifik ($J/kg.K$)

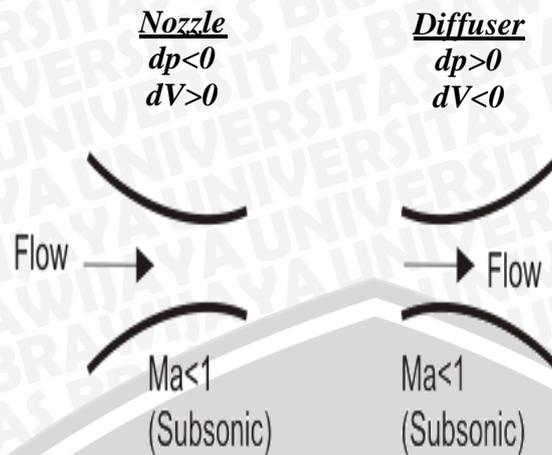
ρ = Massa jenis (kg/m^3)

Sc = Angka *Schmidt*

Pr = Angka *Prandtl*

2.7 Saluran Konvergen - Divergen

Dengan mempertimbangkan bahwa pengaruh variasi luasan area terhadap sifat-sifat fluida merupakan aliran isentropis, maka kita bisa menentukan perubahan kecepatan dan tekanan sebagai akibat dari perubahan luasan area (Robert W. Fox, 1976: 628). Pada aliran *subsonic* ($M < 1$), percepatan aliran pada *nozzle* membutuhkan pengurangan luasan penampang, karena jika luasan area dikurangi, maka kecepatan akan meningkat (*converging channel*). Sedangkan pada *diffuser*, dibuat dengan luas penampang yang semakin membesar, sehingga kecepatan akan berkurang (*diverging channels*).



Gambar 2.12 Saluran Konvergen dan Divergen
Sumber : Robert W. Fox (1976: 629)

2.8 Persamaan *Bernoulli*

Persamaan *Bernoulli* untuk fluida ideal menyatakan hukum kekekalan energi pada fluida. Dalam mendapatkan persamaan *Bernoulli* terdapat asumsi-asumsi yang harus diperhatikan antara lain fluida dengan aliran *steady*, tidak memiliki viskositas (*frictionless flow*), massa jenis fluida (ρ) konstan, tak mampu mampat (*incompressible*), sehingga tidak ada kehilangan energi selama fluida mengalir. Berdasarkan asumsi untuk fluida ideal tersebut, maka dirumuskan persamaannya sebagai berikut :

$$W = m \cdot g \cdot Z + m \cdot \frac{p}{\rho} + m \cdot \frac{V^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991:4}) \quad (2-23)$$

Apabila pada aliran tersebut diambil suatu jumlah fluida untuk tiap 1 Kg, maka persamaannya dinamakan persamaan energi tiap satuan massa fluida. Oleh karena dibagi massa (m) maka persamaan (2-23) akan menjadi persamaan energi spesifik yaitu :

$$w = g \cdot Z + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991:4}) \quad (2-24)$$

Apabila persamaan tersebut dibagi lagi dengan percepatan gravitasi g , maka akan didapat salah satu ruas dari persamaan *Bernoulli* yang mempunyai arti *total head*. *Total head* adalah energi fluida tiap satuan berat fluida.

Persamaan *total head* yaitu dinyatakan sebagai berikut :

$$H = Z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1991:4}) \quad (2-25)$$

dengan :

p = Tekanan statis fluida (N/m^2)

V = Kecepatan fluida (m/s)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

z = Elevasi terhadap datum yang sama (m)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

H = *Total Head* (m)

2.9 Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas dikembangkan dari asas-asas umum kekekalan energi. Hukum kekekalan massa menyatakan bahwa massa dalam suatu sistem adalah konstan terhadap waktu. Jika aliran di dalam saluran *steady*, sehingga tidak terjadi akumulasi tambahan fluida dalam volume tersebut, laju massa alir yang masuk saluran harus sama dengan laju aliran yang keluar saluran.

Persamaan kontinuitas dinyatakan dalam:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{Çengel, 1994:98}) \quad (2-26)$$

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2$$

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

dengan :

\dot{m} = Laju aliran massa (kg/s)

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

A = Luas penampang (m^2)

V = Kecepatan rata-rata (m/s)

2.10 Hipotesis

Berkurangnya sudut inklinasi partisi menyebabkan perubahan luas penampang pada saluran akan mengecil, dengan demikian kecepatan fluida menjadi tinggi dan membuat aliran menjadi lebih turbulen, sehingga koefisien perpindahan panas meningkat.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental nyata (*true experimental research*). Metode ini dilaksanakan dengan melakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik perpindahan panas dengan variasi sudut inklinasi partisi pada saluran berliku menggunakan analogi perpindahan massa dengan variasi yang telah ditentukan.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini ada tiga macam yaitu:

1. Variabel bebas (*independent variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang bebas ditentukan nilainya oleh peneliti sebelum melakukan penelitian. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Massa alir fluida : 2.5335 Kg/jam, 5.6651 Kg/jam, 6.7030 Kg/jam, 7.6005 Kg/jam, 9.1346 Kg/jam.

2. Variabel terikat (*dependent variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tidak dapat ditentukan oleh peneliti, melainkan bergantung pada variabel bebas. Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah :

- Koefisien perpindahan massa
- Koefisien perpindahan panas
- Bilangan *Nusselt*

3. Variabel terkontrol (*controlled variable*)

Variabel terkontrol adalah variabel yang ditentukan oleh peneliti, dan nilainya dikondisikan konstan. Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah:

- Besar sudut inklinasi partisi sebesar 0° , -6° , $+6^{\circ}$.
- Jarak belokan (*clearance*) sebesar 50 mm.

3.3 Alat –Alat Penelitian

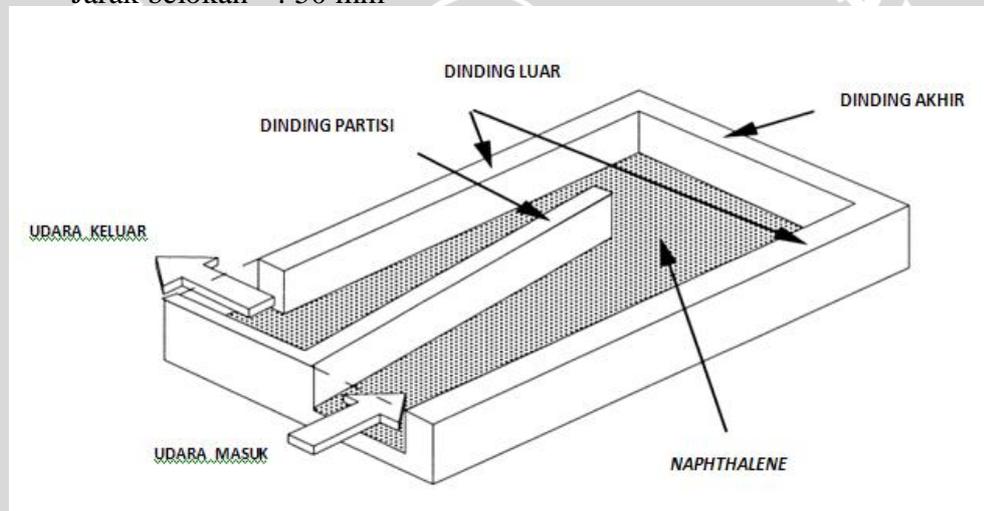
Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu peralatan utama dan peralatan tambahan yang digunakan untuk mencatat data dan mengkondisikan pengujian (Lampiran 5)

3.3.1. Alat Utama

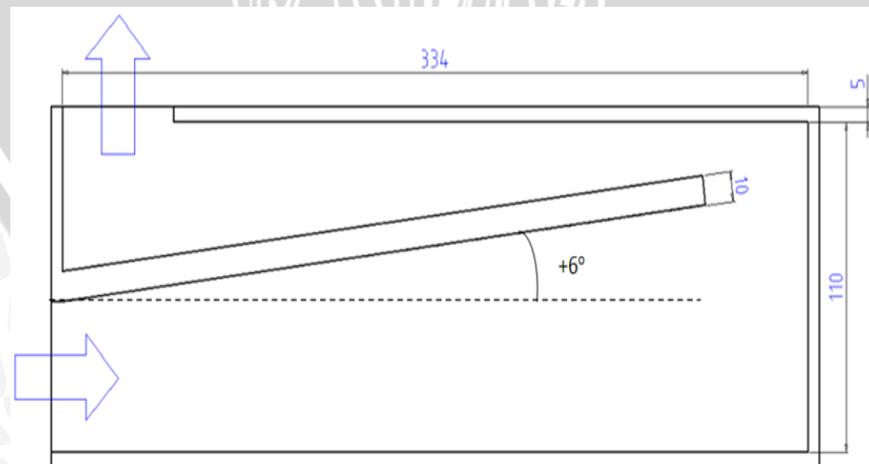
1. Wind Tunnel (Terowongan Angin)

Wind Tunnel (gambar 3.1 dan 3.2) merupakan saluran uji yang dilewati fluida udara yang mana pada penelitian ini berbentuk segiempat dan memiliki spesifikasi berdasarkan penelitian sebelumnya (Hirota, 2000) sebagai berikut:

- panjang : 334 mm
- lebar : 50 mm
- tinggi : 25 mm
- Jarak belokan : 50 mm



Gambar 3.1 *Wind Tunnel* (a)



Gambar 3.2 *Wind Tunnel* (b)

2. Fan

Fan digunakan untuk menghisap udara dari lingkungan masuk ke dalam *wind tunnel*.

3.3.2. Peralatan Bantu

Adapun peralatan bantu yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut (Lampiran 5):

1. *Inclined Manometer*

Digunakan untuk mengukur perbedaan tekanan udara pada saluran masuk (*inlet*) *wind tunnel*. Perbedaan tekanan tersebut ditunjukkan dengan perbedaan ketinggian permukaan air pada *Inclined Manometer*.

2. Pipa pitot

Digunakan untuk mengukur kecepatan udara masuk yang dihembuskan fan.

3. Sensor *thermocouple*

Digunakan untuk mengubah suatu besaran fisis berupa temperatur menjadi bentuk elektrik berupa beda potensial, *thermocouple* yang digunakan adalah *thermocouple* tipe K.

4. *Hygrometer*

Digunakan untuk mengukur kelembaban udara ruangan saat pengujian.

5. *Waterpass*

Digunakan untuk mengukur kerataan permukaan.

6. *Digital Thermometer*

Digunakan untuk mengubah data elektrik dari *thermocouple* menjadi data temperatur dengan tampilan *digital*, alat ini juga dapat menyimpan data hasil pengukuran. Adapun spesifikasi alat yang digunakan adalah :

- Merek : KRISBOW
- Ketelitian pembacaan : 1 °C
- *Measurement range* : -99.9 °C – 999.9 °C
- *Input thermocouple* : 2 channel type K

7. Timbangan *digital*

Digunakan untuk mengukur massa *Naphthalene* sebelum dan sesudah pengujian.

8. *Stereofoam*

Digunakan untuk mengisolasi *wind tunnel*.

9. Jangka Sorong

Digunakan untuk mengukur ketebalan *Naphthalene*.

10. Katup

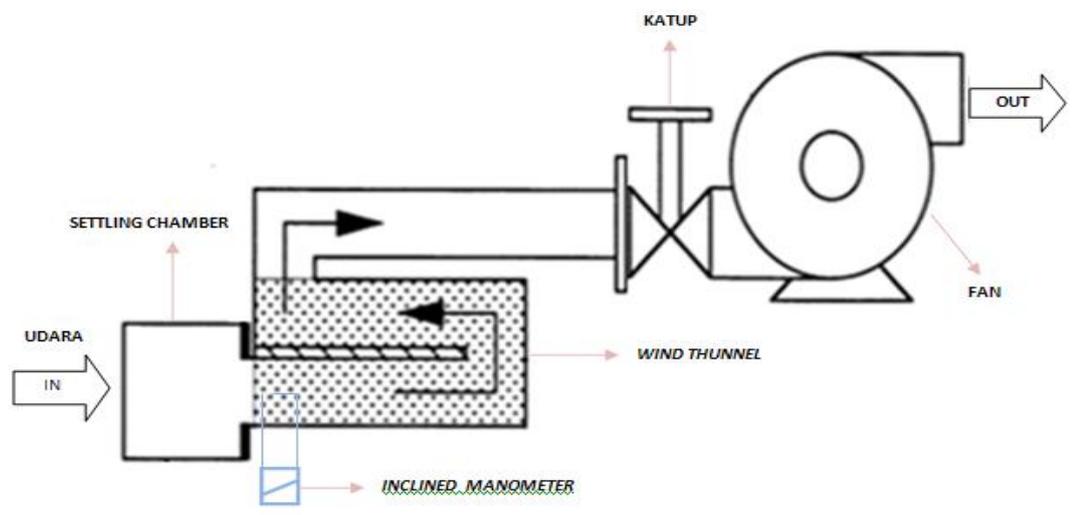
Digunakan untuk mengatur laju massa alir udara masuk *wind tunnel*.

3.3.3. Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapur barus (*Naphthalene*) yang tersedia di pasaran dengan spesifikasi bahan pada Lampiran 4.

3.4 Instalasi Alat Penelitian

Berikut adalah instalasi penelitian yang dirancang dan diuji dalam penelitian (Lampiran 5) :



Gambar 3.3 Instalasi Alat Penelitian

3.5 Tempat dan Waktu Penelitian

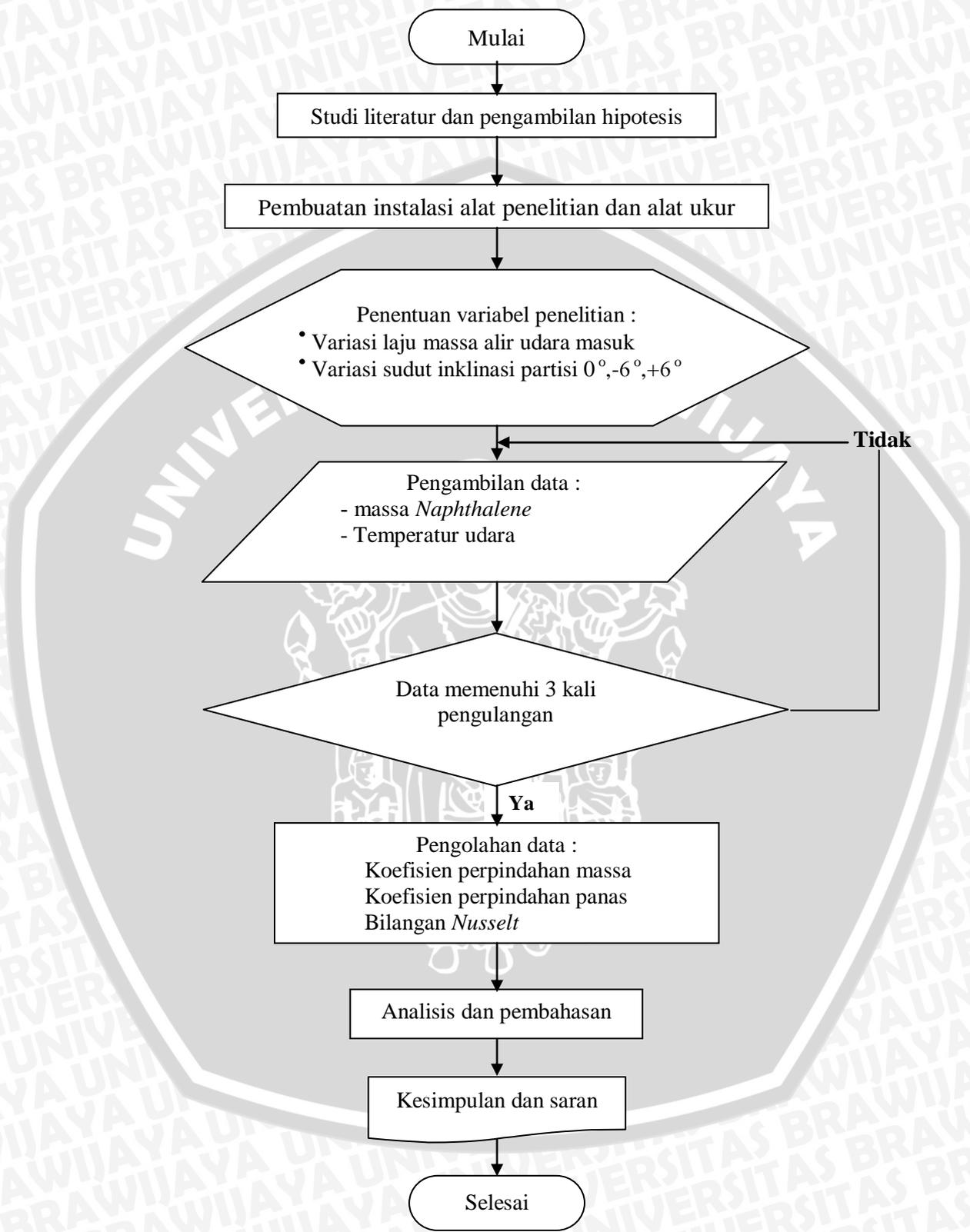
Penelitian mengenai perpindahan panas pada saluran berliku dengan variasi sudut inklinasi partisi menggunakan analogi perpindahan massa ini dilakukan di Laboratorium Motor Bakar, jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang pada bulan November-Desember 2009 (Lampiran 6).

3.6 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian (Lampiran 5) adalah sebagai berikut yang meliputi :

- Persiapan penelitian
 1. Menyiapkan instalasi penelitian (*wind tunnel*) dengan variasi sudut inklinasi partisi sesuai gambar.
 2. Memasang alat ukur yang dibutuhkan seperti *inclined manometer* dan *digital thermometer*.
 3. Mengecek kondisi alat ukur beserta alat pendukung lainnya.
 4. Mencetak *Naphthalene* dengan ketebalan 50 mm.
 5. Menimbang massa *Naphthalene*.
- Pelaksanaan penelitian
 1. Mengatur variasi sudut inklinasi partisi *wind tunnel* sebesar 0° .
 2. Memasang *Naphthalene* pada setiap sisi *wind tunnel*.
 3. Mengisolasi *wind tunnel* menggunakan *stereofom* untuk mengkondisikan tidak ada perpindahan kalor keluar masuk sistem.
 4. Mengatur massa alir udara *fan* masuk (*inlet*) ke dalam *wind tunnel* sebesar 2.5335 kg/jam dan dialirkan selama satu jam.
 5. Setelah keadaan mencapai kondisi *steady*, pengambilan data dilakukan.
 6. Mencatat data temperatur udara awal pengujian (T_1), temperatur udara akhir (T_2).
 7. Menimbang dan mencatat massa *Naphthalene* dalam *wind tunnel* setelah dialiri udara selama satu jam.
 8. Mengulang langkah 1 pada variasi sudut inklinasi partisi *wind tunnel* sebesar -6° dan $+6^{\circ}$.
 9. Mengulang langkah 1 sampai dengan 5 pada variasi massa alir udara *fan* masuk (*inlet*) selanjutnya.
 10. Mengolah data penelitian yang didapatkan.
 11. Menganalisis data penelitian yang didapatkan untuk mengetahui hubungan antar variabel yang telah ditentukan.
 12. Menarik kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan.

3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.4 Diagram Alir Penelitian



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis Data

4.1.1. Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian pada penelitian ini dapat dilihat dalam tabel berikut :

- Data pengujian pada sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*) ditunjukkan dalam table 4.1.

Tabel 4.1. Data hasil pengujian pada sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*)

Δh (inci)	Laju massa alir udara (Kg/jam)	m_1 ($\times 10^{-3}$ Kg)	m_2 ($\times 10^{-3}$ Kg)	Δm (Kg)	Laju massa alir Naphthalene (Kg/s)	$T_{RATA-RATA}$ ($^\circ K$)	hm (m/s)	h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Nu
0.01	2.5335	298.04	295.64	0.0024	6.66667E-07	300.8	0.0142	0.0351	7.10
		307.5	305.82	0.0017	4.66667E-07	300.8			
		302.77	300.73	0.0020	5.66667E-07	300.7			
0.05	5.6651	295.64	293.97	0.0028	7.75688E-07	300.7	0.0201	0.0496	10.03
		305.82	303.15	0.0027	7.41667E-07	300.9			
		300.73	297.165	0.0036	9.91667E-07	300.9			
0.07	6.7030	294.80	290.85	0.0035	1.08148E-06	300.8	0.0227	0.0561	11.34
		303.15	300.22	0.0034	9.14684E-07	300.7			
		298.98	295.54	0.0034	9.55556E-07	300.8			
0.09	7.6005	290.85	287.63	0.0032	8.94444E-07	301.1	0.0224	0.0553	11.18
		300.22	297.11	0.0031	8.63889E-07	300			
		295.54	292.37	0.0032	8.77778E-07	300.7			
0.13	9.1346	287.63	283.52	0.0041	1.14167E-06	300.8	0.0267	0.0659	13.33
		297.11	293.67	0.0034	9.55556E-07	300.3			
		292.37	288.60	0.0038	1.04722E-06	300.7			

- Data pengujian pada sudut inklinasi partisi 0° (*standard channels*) ditunjukkan dalam tabel 4.2.

Tabel 4.2. Data hasil pengujian pada sudut inklinasi partisi 0° (*standard channels*)

Δh (inci)	Laju massa alir udara (Kg/jam)	m_1 ($\times 10^{-3}$ Kg)	m_2 ($\times 10^{-3}$ Kg)	Δm (Kg)	Laju massa alir Naphthalene (Kg/s)	$T_{RATA-RATA}$ ($^\circ K$)	hm (m/s)	h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Nu
0.01	2.5335	265.87	264.27	0.0016	4.44444E-07	301.6	0.0105	0.0259	5.24
		245.36	243.69	0.0017	4.63889E-07	301.6			
		255.62	253.98	0.0016	4.52778E-07	301.7			
0.05	5.6651	264.27	261.73	0.0025	7.05556E-07	301.3	0.0174	0.0428	8.66
		243.69	240.84	0.0029	7.91667E-07	301.7			
		253.98	251.29	0.0027	7.47222E-07	301.8			
0.07	6.7030	261.73	258.65	0.0031	8.55556E-07	300.9	0.0214	0.0526	10.65
		240.84	237.65	0.0032	8.86111E-07	301.5			
		251.29	248.15	0.0031	8.72222E-07	300.7			
0.09	7.6005	258.65	255.65	0.0034	9.51441E-07	301.3	0.0218	0.0536	10.85
		237.65	234.53	0.0031	8.66667E-07	300.9			
		248.15	245.09	0.0031	0.0000085	300.9			
0.13	9.1346	255.65	252.86	0.0034	9.3864E-07	301.2	0.022	0.0541	10.94
		234.53	231.37	0.0032	8.77778E-07	300.6			
		245.09	242.12	0.0030	0.00000825	300.7			

- Data pengujian pada sudut inklinalasi partisi $+6^\circ$ (*divergent channels*) ditunjukkan dalam table 4.3.

Tabel 4.3. Data hasil pengujian pada sudut inklinalasi partisi $+6^\circ$ (*divergent channels*)

Δh (inchi)	Laju massa alir udara (Kg/jam)	m_1 ($\times 10^{-3}$ Kg)	m_2 ($\times 10^{-3}$ Kg)	Δm (Kg)	Laju massa alir Naphthalene (Kg/s)	$T_{\text{RATA-RATA}}$ ($^\circ\text{K}$)	hm (m/s)	h ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$)	Nu
0.01	2.5335	265.73	264.49	0.0012	3.44444E-07	300.9	0.01	0.03	5.75
		264.69	262.63	0.0021	5.72222E-07	300.7			
		265.21	263.56	0.0017	4.58333E-07	300.7			
0.05	5.6651	264.49	261.77	0.0027	7.55556E-07	301.4	0.02	0.04	8.35
		262.63	260.42	0.0022	6.13889E-07	300.9			
		263.56	261.10	0.0025	6.83333E-07	300.8			
0.07	6.7030	261.77	258.79	0.0027	8.60707E-07	301.7	0.02	0.05	9.22
		260.42	258.25	0.0025	7.12726E-07	300.8			
		261.10	258.52	0.0026	7.16667E-07	300.8			
0.09	7.6005	258.79	254.10	0.0037	8.65054E-07	301.7	0.02	0.05	10.23
		258.25	255.81	0.0034	9.55556E-07	300			
		258.52	254.96	0.0036	9.91667E-07	300.1			
0.13	9.1346	254.10	250.85	0.0033	9.02778E-07	301.6	0.02	0.05	10.29
		255.81	253.22	0.0026	7.19444E-07	299.9			
		254.96	252.04	0.0029	8.11111E-07	300.3			

4.1.2. Perhitungan Data

Data hasil pengujian diolah dengan perhitungan rumus yang sesuai untuk mendapatkan data koefisien perpindahan massa, koefisien perpindahan panas dan bilangan *Nusselt* (Nu). Berikut adalah contoh perhitungan yang diambil dari data pengujian dengan variasi sudut inklinalasi partisi -6° :

- Δh (inchi) = 0.01 inchi = 0,254 mm
- Waktu (t) = 3600 detik
- Massa awal (m_1) = 298,04 gram
- Massa akhir (m_2) = 295,64 gram
- Temperatur awal (T_1) = 300,7 K
- Temperatur akhir (T_2) = 300,8 K
- Temperatur rata-rata (T) = 300,8 K

Dari data pengujian di atas, kemudian dihitung :

- Laju massa alir udara

Menghitung kecepatan udara berdasarkan persamaan :

$$V_{\text{udara}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$$

$$= \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta P}{\gamma}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\rho_{\min \text{ yak}} \cdot g \cdot h_{\min \text{ yak}}}{g \cdot \rho_{\text{udara}}}} \\
 &= \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{air}} \cdot SG_{\min \text{ yak}} \cdot \left(\frac{z \sin 3,75}{1000} \right)}{\rho_{\text{udara}}}} \\
 &= \sqrt{2 \times 9,81 \frac{1000 \times 0,826 \left(\frac{0,254 \sin 3,75}{1000} \right)}{1,1774}} \\
 &= 0,4782 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Kemudian dihitung laju massa alir udara :

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{\text{udara}} &= \rho \cdot V \cdot A \left[\frac{\text{kg}}{\text{jam}} \right] \\
 &= 1,1774 \times 0,4782 \times \left(\frac{50 \times 25}{1000} \right)^2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{jam}} \right] \\
 &= 2,5335 \left[\frac{\text{kg}}{\text{jam}} \right]
 \end{aligned}$$

➤ Laju massa alir *Naphthalene*

$$\begin{aligned}
 \dot{m} &= \frac{\Delta m}{t} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \\
 &= \frac{(298,04 - 295,64) \times 10^{-3}}{3600} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \\
 &= 0,0024 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]
 \end{aligned}$$

➤ Tekanan uap *Naphthalene* dihitung dengan persamaan (2-18) :

$$\begin{aligned}
 \text{Log}P &= 13,564 - \frac{3729,4}{T} \\
 &= 13,564 - \frac{3729,4}{300,8} \\
 &= 1,166 \text{ N/m}^2 \\
 P &= 14,646 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}$$

- Koefisien perpindahan massa (h_m) dihitung dengan persamaan (2-21) :

$$\begin{aligned}
 h_m &= \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T}{A \cdot \Delta P \cdot M_N} \\
 &= \frac{0,024 \text{ kg/s} \cdot 8315 \text{ J/kmol.K} \cdot 300,8 \text{ K}}{0,0433 \text{ m}^2 \cdot 14,646 \text{ N/m}^2 \cdot 128 \text{ kg/kmol}} \\
 &= 0,0167 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

- *Properties* udara pada suhu 300,8 K didapatkan dari tabel sifat-sifat udara (Lampiran 3) dengan cara interpolasi, sehingga didapatkan :

$$\begin{aligned}
 C_p &= \frac{1.0057 - 1.009}{(350 - 300)} \cdot (300.8 - 300) + 1.009 \\
 &= 1.008497 \text{ J/kg}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{0.998 - 1.1774}{(350 - 300)} \cdot (300.8 - 300) + 1.1774 \\
 &= 1.17453 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, didapatkan :

$$\begin{aligned}
 Pr &= \frac{0.697 - 0.708}{(350 - 300)} \cdot (300.8 - 300) + 0.708 \\
 &= 0,773742
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{0.03003 - 0.02624}{(350 - 300)} \cdot (300.8 - 300) + 0.02624 \\
 &= 0,0035 \text{ W/m}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

- Angka *Schmidt Naphthalene* dihitung dengan persamaan (2-19) :

$$\begin{aligned}
 Sc &= 8,0743 \cdot T^{-0,2165} \\
 &= 8,0743 \cdot 300,8^{-0,2165} \\
 &= 2,3472
 \end{aligned}$$

Sehingga dapat dihitung koefisien perpindahan panas konveksi dengan persamaan (2-22):

$$\begin{aligned}
 h &= h_m \cdot C_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \\
 &= 0,0167 \text{ m/s} \cdot 1,008947 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \cdot 1,17453 \text{ kg/m}^3 \cdot \left[\frac{2,3472}{0,773742} \right]^{2/3} \\
 &= 0,0412 \text{ W/m}^2\text{C}
 \end{aligned}$$

➤ Bilangan Nusselt (Nu) dapat dihitung dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
 Nu &= \frac{h \cdot L}{k} \\
 &= \frac{0,0412 \text{ W/m}^2\text{C} \cdot 0,7080 \text{ m}}{0,0035 \text{ W/m}^\circ\text{C}}
 \end{aligned}$$

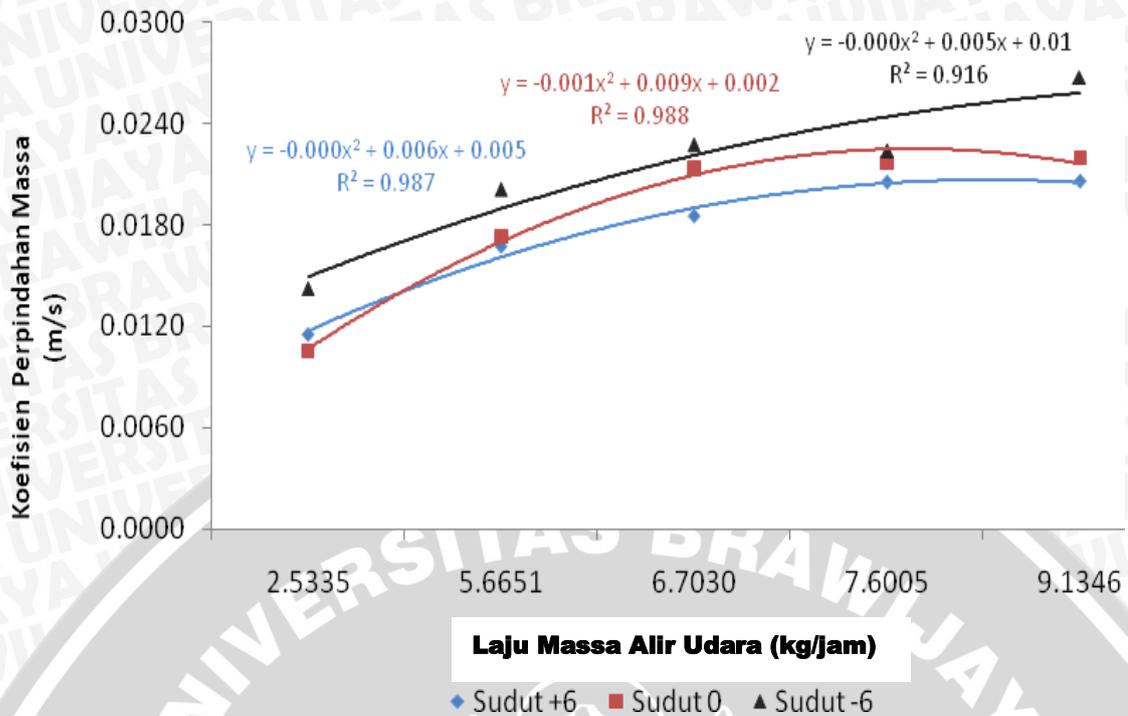
(Data hasil pengolahan data dapat dilihat pada lampiran 1 dan 2)

4.2. Pembahasan

Hasil pengolahan data pada pengujian ini dibuat dalam bentuk grafik hubungan antara laju massa alir udara dengan koefisien perpindahan massa (h_m), koefisien perpindahan panas (h), dan bilangan *Nusselt* (Nu) pada tiap-tiap variasi sudut inklinasi partisi.

4.2.1. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Massa (h_m) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi

Hubungan antara laju massa alir udara dengan koefisien perpindahan massa (h_m) pada tiap-tiap variasi sudut inklinasi partisi dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Massa

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambahnya laju massa alir udara yang dialirkan pada saluran (*wind tunnel*) akan menyebabkan koefisien perpindahan massa (h_m) akan meningkat. Meningkatnya laju massa alir udara akan menyebabkan aliran menjadi semakin turbulen dan proses perpindahan massa dari *Naphthalene* menuju aliran bebas berlangsung semakin cepat. Gradien konsentrasi massa akan tetap terjaga di sepanjang saluran akibat adanya gerakan fluida udara yang konstan di sepanjang saluran pula dan akan meningkat seiring dengan peningkatan laju massa alir udaranya.

Di samping itu, adanya variasi sudut inklinasi partisi pada saluran juga akan mempengaruhi besarnya koefisien perpindahan massa. Hal ini berlaku untuk semua variasi sudut berturut-turut besarnya yaitu pada sudut -6° , 0° , dan $+6^\circ$. Variasi sudut inklinasi partisi pada saluran akan menyebabkan adanya perubahan pada luas penampang pada saluran (*wind tunnel*) dan membagi saluran menjadi 3 bentuk saluran yaitu pada variasi sudut inklinasi partisi 0° disebut *standard channel*, sudut inklinasi partisi -6° disebut *convergent channels*, dan sudut inklinasi partisi $+6^\circ$ disebut *divergent channels*.

Secara keseluruhan, koefisien perpindahan massa (h_m) tertinggi terjadi pada variasi sudut inklinasi -6° (*convergent channels*), kemudian berturut-turut menurun pada variasi sudut inklinasi 0° (*standard channel*), dan yang terendah pada variasi sudut



inklinasi $+6^\circ$ (*divergent channels*). Koefisien perpindahan massa yang tinggi pada pengujian dengan perlakuan variasi sudut inklinasi partisi -6° disebabkan karena dengan laju massa alir udara yang sama, terjadi akselerasi atau percepatan kecepatan aliran akibat adanya pengurangan luas penampang pada saluran, sehingga angka *Reynold* akan semakin meningkat dan mengakibatkan aliran akan menjadi semakin turbulen sesuai dengan persamaan 2-3 bahwa :

$$Re = \frac{V_m D_h}{\nu}$$

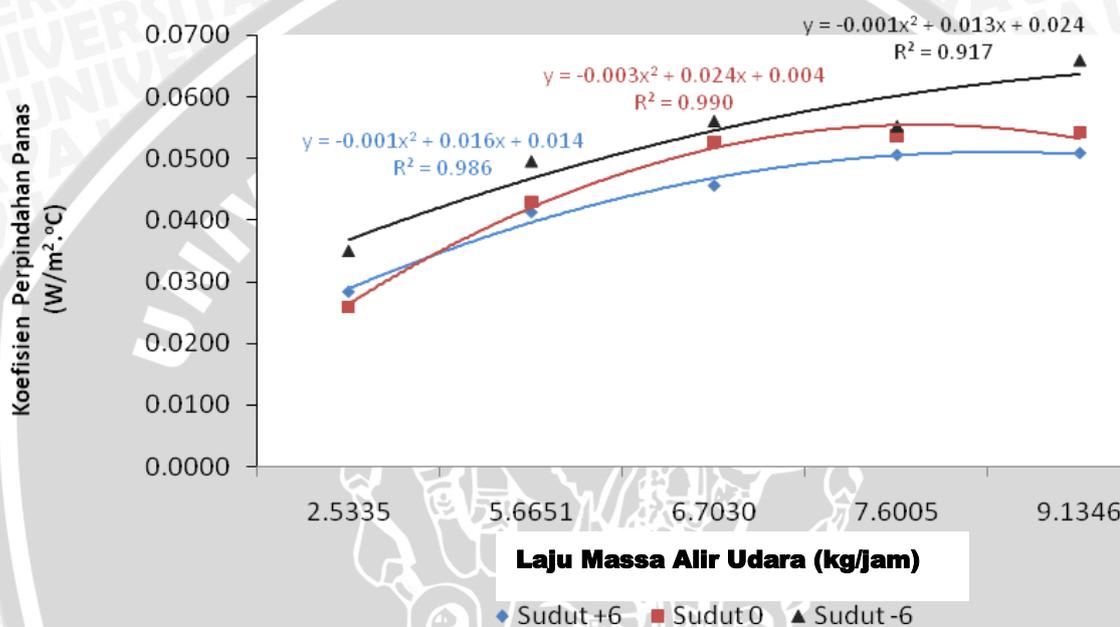
Dimana angka *Reynold* merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan intensitas turbulensi pada aliran. Pada saluran konvergen, distribusi angka *Sherwood* rata-rata akan meningkat seiring dengan berkurangnya sudut inklinasi partisi. Konsekuensi dari pengurangan sudut inklinasi partisi adalah penurunan luas penampang sehingga kecepatannya jauh lebih tinggi (Hirota, 2000). Sedangkan pada variasi sudut inklinasi partisi 0° kecepatan aliran cenderung konstan karena luas permukaan yang dilalui fluida juga konstan. Sebaliknya, pada variasi sudut inklinasi partisi $+6^\circ$ kecepatan aliran akan mengalami penurunan karena luas penampang saluran akan semakin bertambah, sehingga intensitas turbulensi menjadi lebih kecil dibandingkan dengan variasi sudut inklinasi partisi -6° . Perpindahan massa lokal akan meningkat lebih efektif dengan sudut inklinasi partisi yang semakin besar pada saluran konvergen (Hirota, 2000). Metode penghitungan koefisien perpindahan massa didasarkan pada proses penyubliman kapur barus (*Naphthalene*), dimana proses ini terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antara *Naphthalene* dengan fluida udara yang dialirkan dalam saluran, sehingga terjadi proses perpindahan massa dari *Naphthalene* (konsentrasi tinggi) ke udara (konsentrasi rendah). Gerakan aliran fluida udara yang semakin turbulen akan menyebabkan koefisien perpindahan massa (h_m) semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan semakin bertambahnya pula laju massa alir *Naphthalene* (\dot{m}) akibat jumlah massa *Naphthalene* yang menyublim semakin banyak, sehingga gradien massa sebelum dan sesudah dialiri udara akan semakin bertambah pula. Hal ini sesuai dengan persamaan 2-21 bahwa :

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

Secara berturut-turut, besarnya koefisien perpindahan massa pada variasi laju massa alir udara dari yang tertinggi adalah 0,0267 m/s, 0,0220 m/s, dan 0,0206 m/s untuk variasi sudut inklinasi partisi sebesar -6° , 0° , dan $+6^\circ$.

4.2.2. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Panas (h) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi

Hubungan antara laju massa alir udara dengan koefisien perpindahan panas (h) pada tiap-tiap variasi sudut inklinasi partisi dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Koefisien Perpindahan Panas

Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya laju massa alir udara yang dialirkan pada saluran (*wind tunnel*) akan menyebabkan koefisien perpindahan panas konveksi (h) akan meningkat. Hal ini dikarenakan peningkatan laju massa alir udara berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan aliran fluida yang melewati suatu penampang dengan luasan konstan. Hal ini sesuai dengan persamaan kontinuitas bahwa:

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

dengan :

\dot{m} = Laju massa alir udara (kg/s)

ρ = Massa jenis (kg/m³)

A = Luas penampang (m²)

V = Kecepatan rata-rata (m/s)

Sebagai akibat dari peningkatan kecepatan aliran fluida, maka akan berpengaruh terhadap peningkatan angka *Reynolds*, sehingga aliran akan menjadi lebih turbulen yang menyebabkan gerakan aliran akan menjadi semakin acak. Di samping itu, adanya variasi sudut inklinasi partisi pada saluran juga akan mempengaruhi besarnya koefisien perpindahan panas. Hal ini berlaku untuk semua variasi sudut berturut-turut besarnya yaitu pada sudut -6° , 0° , dan $+6^\circ$. Perubahan sudut inklinasi partisi akan mempengaruhi perubahan kecepatan aliran fluida akibat adanya perubahan luas penampang dari saluran (*wind tunnel*). Sesuai dengan sifat aliran pada saluran konvergen, maka dengan berkurangnya luasan pada saluran, maka menyebabkan kecepatan aliran fluida akan semakin meningkat, namun sebaliknya akan terjadi penurunan kecepatan aliran pada saluran divergen karena adanya penambahan luasan pada saluran. Hal ini akan mempengaruhi besarnya koefisien perpindahan panas. Dengan menggunakan persamaan analogi perpindahan massa, dapat dihitung koefisien perpindahan panas berdasarkan teori Chilton-Colburn (1934), sehingga didapatkan hubungan antara koefisien perpindahan massa (h_m) dengan koefisien perpindahan panas konveksi (h), sesuai persamaan 2-22 bahwa :

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

dengan :

h_m = Koefisien perpindahan massa (m/s)

C_p = kalor jenis spesifik (J/kg.K)

ρ = Massa jenis (kg/m^3)

Sc = Angka *Schmidt*

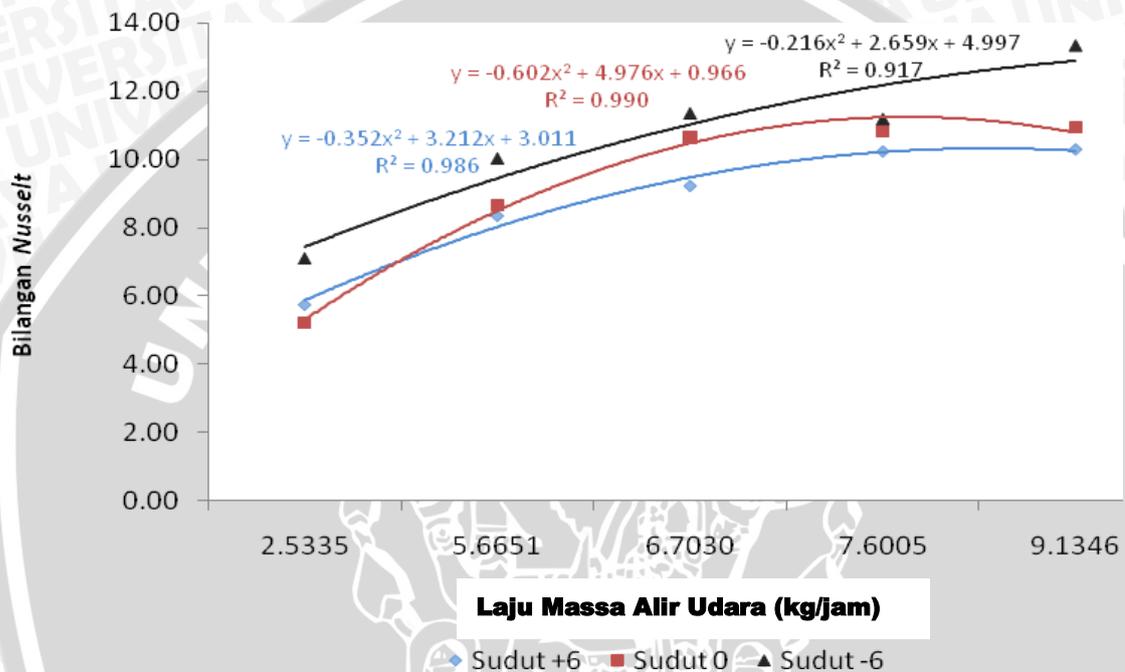
Pr = Angka *Prandtl*

Dari persamaan 2-22 di atas diketahui bahwa peningkatan koefisien perpindahan panas ini seiring dengan peningkatan koefisien perpindahan massa karena koefisien perpindahan panas berbanding lurus dengan koefisien perpindahan massa. Secara keseluruhan, pada variasi laju massa alir paling tinggi yaitu 9.1346 kg/jam, koefisien perpindahan panas konveksi (h) tertinggi terjadi pada variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*) sebesar $0.0659 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, kemudian menurun pada variasi sudut inklinasi partisi 0° (*standard channels*) sebesar $0.0541 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ dan yang

terendah pada variasi sudut inklinasi partisi $+6^\circ$ (*divergent channels*) sebesar $0.0509 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.3. Hubungan antara Laju Massa Alir Udara dengan *Bilangan Nusselt* (Nu) pada Tiap-Tiap Variasi Sudut Inklinasi Partisi

Hubungan antara laju massa alir udara dengan bilangan *Nusselt* pada tiap-tiap variasi sudut inklinasi partisi dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Laju Massa Alir Udara dengan Bilangan *Nusselt* (Nu)

Pada proses perpindahan panas konveksi, bilangan *Nusselt* (Nu) merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan keefektifan suatu perpindahan panas konveksi. Semakin besar bilangan *Nusselt* (Nu), maka perpindahan panas konveksi akan semakin efektif. Besarnya bilangan *Nusselt* (Nu) dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas (h), sesuai dengan persamaan (2-7) :

$$\frac{h\delta}{k} = Nu$$

Dengan semakin besarnya koefisien perpindahan panas konveksi (h), maka laju perpindahan panas antara permukaan padat dengan fluida yang bergerak tiap satuan luas permukaan perpindahan panas akan semakin meningkat. Sehingga dapat dikatakan bahwa proses perpindahan panas yang terjadi akan semakin efektif.

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya laju massa alir udara yang dialirkan pada saluran (*wind tunnel*) akan menyebabkan bilangan *Nusselt* (Nu) akan meningkat. Selain itu, bilangan *Nusselt* (Nu) juga akan mengalami perbedaan nilai antara satu dengan lainnya akibat variasi sudut inklinasi partisi yang ditentukan. Dengan menggunakan metode analogi perpindahan massa, penghitungan bilangan *Nusselt* (Nu) didasarkan pada proses perpindahan massa berupa penyubliman *Naphthalene* yang memiliki konsentrasi lebih tinggi menuju udara bebas yang dialirkan dengan kecepatan tertentu dengan konsentrasi lebih rendah.

Secara keseluruhan, dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa bilangan *Nusselt* (Nu) cenderung mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan laju massa alir udara dan berkurangnya variasi sudut inklinasi partisi. Pada variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*), didapatkan bilangan *Nusselt* (Nu) paling tinggi sebesar 13,33. Hal ini dikarenakan terjadi peningkatan kecepatan aliran fluida akibat pengurangan luas penampang saluran, sesuai dengan sifat aliran pada saluran konvergen yaitu apabila suatu fluida melewati penampang yang mengecil, maka kecepatan aliran tersebut akan meningkat. Peningkatan kecepatan ini akan mengakibatkan laju perpindahan massa semakin cepat karena intensitas turbulensi pada aliran akan meningkat, sehingga koefisien perpindahan massa akan bertambah besar. Hal ini ditunjukkan dengan semakin banyaknya jumlah massa *Naphthalene* yang terbawa aliran dan proses penyubliman *Naphthalene* pada dinding juga semakin cepat, sehingga perbedaan massanya juga bertambah. Dengan menggunakan analogi perpindahan massa, maka fenomena tersebut akan analog dengan peningkatan koefisien perpindahan panas. Peningkatan koefisien perpindahan panas akan mempengaruhi besarnya bilangan *Nusselt* (Nu), sehingga proses perpindahan panas konveksi akan semakin efektif. Sedangkan pada variasi sudut inklinasi partisi 0° (*standard channels*) dan $+6^\circ$ (*divergent channels*), kecepatan aliran pada saluran jauh lebih kecil dibandingkan variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*) karena luas penampang salurannya jauh lebih besar masing-masing besarnya berturut-turut 10,94 dan 10,29.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian analisis perpindahan panas pada saluran berliku dengan variasi sudut inklinasi partisi menggunakan analogi perpindahan massa didapatkan kesimpulan bahwa :

- Dengan berkurangnya sudut inklinasi partisi pada *wind tunnel* dan semakin bertambahnya laju massa alir udara menyebabkan terjadinya peningkatan koefisien perpindahan massa (h_m), koefisien perpindahan panas konveksi (h), dan bilangan *Nusselt*.
- Dengan menggunakan persamaan analogi perpindahan massa, koefisien perpindahan panas konveksi (h) dapat dihitung dari koefisien perpindahan massa (h_m). Koefisien perpindahan panas konveksi tertinggi sampai terendah berturut-turut didapatkan dari variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*), 0° (*standard channels*), dan $+6^\circ$ (*divergent channels*) masing-masing sebesar $0,0659 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $0,0541 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, dan $0,0509 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$.
- Koefisien perpindahan massa (h_m), koefisien perpindahan panas konveksi (h), dan bilangan *Nusselt* tertinggi didapatkan pada variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*).
- Nilai tertinggi didapatkan pada variasi sudut inklinasi partisi -6° (*convergent channels*) karena adanya pengurangan luas penampang pada saluran, sehingga akan menimbulkan percepatan udara yang mengalir dalam saluran yang akan meningkatkan intensitas turbulensi dan mempercepat terjadinya *transfer* massa.

5.2 Saran

Sebagai bahan untuk penelitian selanjutnya, maka saran yang dapat kami berikan adalah :

- Perlu dilakukan analisis visual untuk mengetahui keseragaman heat transfer (*heat transfer uniformity*) di sepanjang saluran uji.
- Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan dengan variasi sudut inklinasi partisi dengan jarak belokan (*clearance*) yang berbeda.

- Untuk penelitian selanjutnya, dapat dibuat bentuk saluran uji yang berbeda (belokan tajam dengan radius).
- Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan penelitian yang lebih mendalam mengenai distribusi tekanan pada saluran uji.



DAFTAR PUSTAKA

- Çengel, Yunus A. 1994. *Heat Transfer A Practical Approach*. New York: McGraw-Hill Companies Inc.
- Çengel, Yunus A. & Turner, Robert H. 2001. *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*. New York: McGraw-Hill Companies Inc.
- Çengel, Yunus A. 2002. *Heat Transfer A Practical Approach, 2nd edition*. New York: McGraw-Hill Companies Inc.
- Çengel, Yunus A. 2003. *Heat Transfer A Practical Approach, 2nd edition*. New York: McGraw-Hill Companies Inc.
- CREST. 2008. *Hydrodynamics*. Ukraina: University of Cambridge. http://www.cheng.cam.ac.uk/research/groups/electrochem/JAVA/electrochemistry/EL_C/17.html/hydro.html (diakses 22 Februari 2010)
- Fox, Robert W., Alan T. McDonald. 1976. *Introduction to Fluid Mechanics, Fourth Edition*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Hirota, Masafumi., Hideomi Fujita., Hiroshi Nakayama., Ahmad Syuhada. 2000. *Heat (Mass) Transfer Characteristics In Serpentine Flow Passages With a Sharp Turn*. Japan: Nagoya University.
- Holman, J.P. 1988. *Perpindahan Kalor*, Edisi keenam, Terjemahan Ir. E. Jasfi M.Sc. Jakarta: Erlangga.
- Kautsar, Yan. 2005. *Analisis Perpindahan Kalor pada Permukaan Plat dengan Variasi Length (L)-Width (W) Menggunakan Analogi Perpindahan Massa*. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Kreith, Frank. 1986. *Prinsip-Prinsip Perpindahan Kalor*, Terjemahan Arko Prijono M.S.E. Jakarta: Erlangga.
- Ling, Chang Ming., Yuan-Yue Jin., Zhong-Qi Chen. 1994. *Heat, Mass Transfer and Pressure Drop in Triangular-Ribbed-Roughened Rectangular Channel*. *International Journal Heat and Fluid Flow*, Vol.15, no.16, hal 486-490.
- Perkin Elmer. 2004. *Material Safety Data Sheet*. USA: <http://www.MSDS.com> (diakses 13 Februari 2010)
- Streeter, Victor L., E. Benjamin Wylie. 1991. *Mekanika Fluida*, Edisi delapan, Terjemahan Arko Prijono, M.S.E. Jakarta: Erlangga.
- Setianto, Sungguh. 2005. *Analisis Koefisien Perpindahan Panas pada Permukaan Plat Datar dengan Variasi Sudut Serang Aliran Fluida Menggunakan Analogi Perpindahan Massa*. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Zhao, C.Y. dan Tao W.Q. 1996. *Effect of Rib Angle Orientation on Local Mass Transfer Distribution Around Sharp 180° Deg Turn with Rib- Turbulators Mounted in Entire Two- Pass Channels*. Chinese: Xi'an Jiaotong University.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LAMPIRAN

LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Massa (1)

Laju massa alir udara (Kg/jam)	Sudut	Ulangan	Δm (g)	Δm (Kg)	Laju massa alir <i>Naphthalene</i> (Kg/s)	T (°K)	log P	P (N/m ²)	R (J/Kmol.K)	M _N	A (m ²)	h _m (m/s)	Rerata h _m
2.5335	6	I	1.24	0.001	3.44444E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0085	0.0115
		II	2.06	0.002	5.72222E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0145	
		III	1.65	0.002	4.58333E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0116	
	-6	I	2.4	0.002	6.66667E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0167	0.0142
		II	1.68	0.002	4.66667E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0117	
		III	2.04	0.002	5.66667E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0143	
	0	I	1.6	0.002	4.44444E-07	301.6	1.199	15.798	8315	128	0.0533	0.0103	0.0105
		II	1.67	0.002	4.63889E-07	301.6	1.199	15.798	8315	128	0.0533	0.0108	
		III	1.63	0.002	4.52778E-07	301.7	1.203	15.948	8315	128	0.0533	0.0104	
5.6651	6	I	2.72	0.003	7.55556E-07	301.4	1.190	15.503	8315	128	0.0533	0.0179	0.0168
		II	2.21	0.002	6.13889E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0152	
		III	2.46	0.002	6.83333E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0171	
	-6	I	2.79	0.003	7.75688E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0173	0.0201
		II	2.67	0.003	7.41667E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0184	
		III	3.57	0.004	9.91667E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0246	
	0	I	2.54	0.003	7.05556E-07	301.3	1.186	15.357	8315	128	0.0533	0.0169	0.0174
		II	2.85	0.003	7.91667E-07	301.7	1.203	15.948	8315	128	0.0533	0.0183	
		III	2.69	0.003	7.47222E-07	301.8	1.207	16.099	8315	128	0.0533	0.0171	

Lampiran 1. Tabel Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Massa (2)

Laju massa alir udara (Kg/jam)	Sudut	Ulangan	Δm (g)	Δm (Kg)	Laju massa alir <i>Naphthalene</i> (Kg/s)	T (°K)	log P	P (N/m ²)	R (J/Kmol.K)	M _N	A (m ²)	h _m (m/s)	Rerata h _m
6.7030	6	I	2.68	0.003	8.60707E-07	301.7	1.203	15.948	8315	128	0.0533	0.0198	0.0185
		II	2.47	0.002	7.12726E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0178	
		III	2.58	0.003	7.16667E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0180	
	-6	I	3.45	0.003	1.08148E-06	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0239	0.0227
		II	3.43	0.003	9.14684E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0204	
		III	3.44	0.003	9.55556E-07	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0239	
	0	I	3.08	0.003	8.55556E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0212	0.0214
		II	3.19	0.003	8.86111E-07	301.5	1.195	15.650	8315	128	0.0533	0.0208	
		III	3.14	0.003	8.72222E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0220	
7.6005	6	I	3.69	0.004	8.65054E-07	301.7	1.203	15.948	8315	128	0.0533	0.0199	0.0205
		II	3.44	0.003	9.55556E-07	300	1.133	13.573	8315	128	0.0533	0.0192	
		III	3.57	0.004	9.91667E-07	300.1	1.137	13.703	8315	128	0.0533	0.0224	
	-6	I	3.22	0.003	8.94444E-07	301.1	1.178	15.069	8315	128	0.0533	0.0231	0.0224
		II	3.11	0.003	8.63889E-07	300	1.133	13.573	8315	128	0.0533	0.0225	
		III	3.16	0.003	8.77778E-07	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0216	
	0	I	3.43	0.003	9.51441E-07	301.3	1.186	15.357	8315	128	0.0533	0.0227	0.0218
		II	3.12	0.003	8.66667E-07	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0215	
		III	3.06	0.003	0.00000085	300.9	1.170	14.786	8315	128	0.0533	0.0211	
9.1346	6	I	3.25	0.003	9.02778E-07	301.6	1.199	15.798	8315	128	0.0533	0.0210	0.0206
		II	2.59	0.003	7.19444E-07	299.9	1.129	13.444	8315	128	0.0533	0.0196	
		III	2.92	0.003	8.11111E-07	300.3	1.145	13.966	8315	128	0.0533	0.0213	
	-6	I	4.11	0.004	1.14167E-06	300.8	1.166	14.646	8315	128	0.0533	0.0286	0.0267
		II	3.44	0.003	9.55556E-07	300.3	1.145	13.966	8315	128	0.0533	0.0251	
		III	3.77	0.004	1.04722E-06	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0265	
	0	I	3.38	0.003	9.3864E-07	301.2	1.182	15.212	8315	128	0.0533	0.0226	0.0220
		II	3.16	0.003	8.77778E-07	300.6	1.157	14.371	8315	128	0.0533	0.0224	
		III	2.97	0.003	0.000000825	300.7	1.162	14.508	8315	128	0.0533	0.0209	

Lampiran 2. Tabel Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Panas dan Bilangan *Nusselt* (1)

Laju massa alir udara (Kg/jam)	Sudut	Ulangan	T (°K)	h_m (m/s)	C_p (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)	Sc	Pr	h (W/m ² .°C)	RERATA h	k (W/m.°C)	L (m)	Nu	RERATA Nu
2.5335	6	I	300.9	0.0085	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0211	0.0284	0.0035	0.7080	4.2615	5.7522
		II	300.7	0.0145	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0357				7.2156	
		III	300.7	0.0116	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0286				5.7795	
	-6	I	300.8	0.0167	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0412	0.0351	0.0035	0.7080	8.3272	7.1007
		II	300.8	0.0117	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0288				5.8291	
		III	300.7	0.0143	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0353				7.1459	
	0	I	301.6	0.0103	1.0089	1.1717	2.3459	0.7737	0.0254	0.0259	0.0035	0.7080	5.1452	5.2360
		II	301.6	0.0108	1.0089	1.1717	2.3459	0.7737	0.0265				5.3704	
		III	301.7	0.0104	1.0089	1.1713	2.3457	0.7737	0.0257				5.1923	
5.6651	6	I	301.4	0.0179	1.0089	1.1724	2.3462	0.7737	0.0441	0.0413	0.0035	0.7080	8.9143	8.3481
		II	300.9	0.0152	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0375				7.5950	
		III	300.8	0.0171	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0422				8.5350	
	-6	I	300.7	0.0173	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0427	0.0496	0.0035	0.7080	8.6297	10.0252
		II	300.9	0.0184	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0454				9.1763	
		III	300.9	0.0246	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0607				12.2695	
	0	I	301.3	0.0169	1.0089	1.1727	2.3464	0.7737	0.0415	0.0428	0.0035	0.7080	8.4037	8.6569
		II	301.7	0.0183	1.0089	1.1713	2.3457	0.7737	0.0449				9.0786	
		III	301.8	0.0171	1.0089	1.1709	2.3456	0.7737	0.0420				8.4883	
6.7030	6	I	301.7	0.0198	1.0089	1.1713	2.3457	0.7737	0.0487	0.0456	0.0035	0.7080	9.8413	9.2228
		II	300.8	0.0178	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0439				8.8759	
		III	300.8	0.0180	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0443				8.9514	
	-6	I	300.8	0.0239	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0589	0.0561	0.0035	0.7080	11.9176	11.3431
		II	300.7	0.0204	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0503				10.1760	
		III	300.8	0.0239	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0590				11.9357	
	0	I	300.9	0.0212	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0523	0.0526	0.0035	0.7080	10.5849	10.6465
		II	301.5	0.0208	1.0089	1.1720	2.3461	0.7737	0.0512				10.3560	
		III	300.7	0.0220	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0544				10.9985	

Lampiran 2. Tabel Hasil Pengolahan Data Koefisien Perpindahan Panas dan Bilangan *Nusselt* (2)

Laju massa alir udara (Kg/jam)	Sudut	Ulangan	T (°K)	h_m (m/s)	C_p (J/Kg.°C)	ρ (Kg/m ³)	Sc	Pr	h (W/m ² .°C)	RERATA h	k (W/m.°C)	L (m)	Nu	RERATA Nu
7.6005	6	I	301.7	0.0199	1.0089	1.1713	2.3457	0.7737	0.0489	0.0506	0.0035	0.7080	9.8910	10.2301
		II	300.0	0.0192	1.0090	1.1774	2.3486	0.7737	0.0475				9.6016	
		III	300.1	0.0224	1.0090	1.1770	2.3484	0.7737	0.0554				11.1978	
	-6	I	301.1	0.0231	1.0089	1.1735	2.3467	0.7737	0.0569	0.0553	0.0035	0.7080	11.5063	11.1776
		II	300.0	0.0225	1.0090	1.1774	2.3486	0.7737	0.0556				11.2518	
		III	300.7	0.0216	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0533				10.7746	
	0	I	301.3	0.0227	1.0089	1.1727	2.3464	0.7737	0.0559	0.0536	0.0035	0.7080	11.2989	10.8458
		II	300.9	0.0215	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0530				10.7224	
		III	300.9	0.0211	1.0089	1.1742	2.3471	0.7737	0.0520				10.5162	
9.1346	6	I	301.6	0.0210	1.0089	1.1717	2.3459	0.7737	0.0517	0.0509	0.0035	0.7080	10.4513	10.2897
		II	299.9	0.0196	1.0090	1.1778	2.3488	0.7737	0.0484				9.7922	
		III	300.3	0.0213	1.0090	1.1763	2.3481	0.7737	0.0525				10.6256	
	-6	I	300.8	0.0286	1.0089	1.1745	2.3472	0.7737	0.0705	0.0659	0.0035	0.7080	14.2604	13.3282
		II	300.3	0.0251	1.0090	1.1763	2.3481	0.7737	0.0619				12.5184	
		III	300.7	0.0265	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0653				13.2059	
	0	I	301.2	0.0226	1.0089	1.1731	2.3466	0.7737	0.0556	0.0541	0.0035	0.7080	11.2532	10.9436
		II	300.6	0.0224	1.0090	1.1752	2.3476	0.7737	0.0552				11.1745	
		III	300.7	0.0209	1.0090	1.1749	2.3474	0.7737	0.0514				10.4031	

Lampiran 3. Tabel Sifat-Sifat Udara pada Tekanan Atmosfer

Nilai μ , k , c_D , dan Pr tidak terlalu bergantung pada tekanan dan dapat digunakan untuk rentang tekanan yang cukup luas.

T, K	ρ kg/m ³	c_p , kJ/kg · °C	μ , kg/m · s × 10 ⁵	ν , m ² /s × 10 ⁶	k , W/m · °C	α , m ² /s × 10 ⁴	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.5990	11.31	0.02227	0.15675	0.722
300	1.1774	1.0057	1.8462	15.69	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	31.71	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

† Dari Natl. Bur. Stand (U. S.) Circ. 564, 1965

Daftar ini menggunakan satuan SI.

Sumber: Holman (1988:589)

Lampiran 4. Tabel Sifat-Sifat Fisik *Naphthalene*



Material Safety Data Sheet
acc. to ISO/DIS 11014

Page 4/7

Printing date 03/24/2004

Reviewed on 03/24/2004

Trade name: *Naphthalene*

(Contd. of page 3)

- **Explosion limits:**
 - Lower: 0.9 Vol %
 - Upper: 5.9 Vol %
- **Vapor pressure at 20°C (68°F):** 0.04 hPa (0 mm Hg)
- **Density at 20°C (68°F):** 1.14 g/cm³
- **Solubility in / Miscibility with**
 - Water at 20°C (68°F): 0.03 g/l
 - Organic solvents: 0 %

9 Physical and chemical properties

- **General Information**
 - Form: Crystalline
 - Color: White
 - Odor: Characteristic
- **Change in condition**
 - Melting point/Melting range: 80°C (176°F)
 - Boiling point/Boiling range: 218°C (424°F)
- **Flash point:** 80°C (176°F)
- **Ignition temperature:** 540°C (1004°F)
- **Danger of explosion:** Product does not present an explosion hazard.

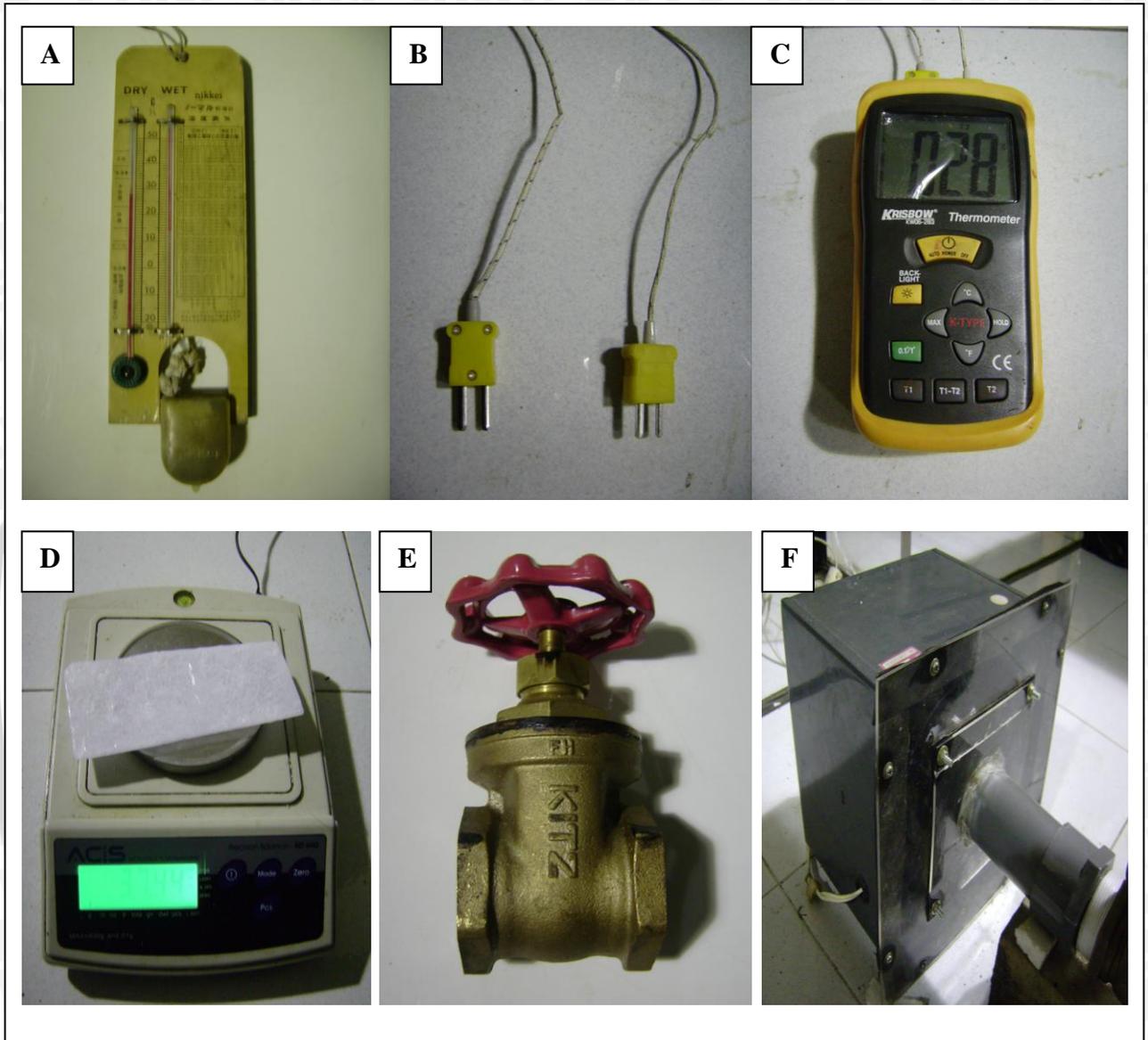
(Contd. on page 4)

Sumber: <http://www.MSDS.com> (diakses 24 Maret 2004)



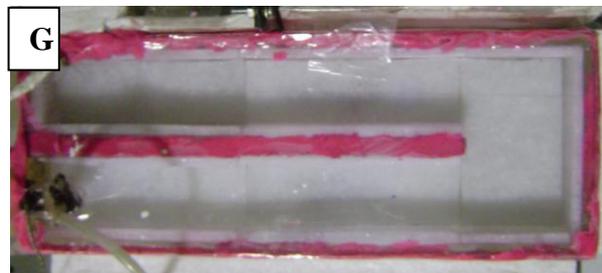
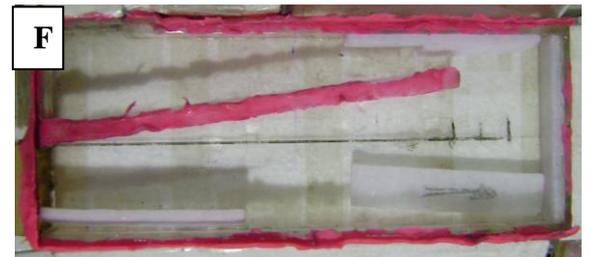
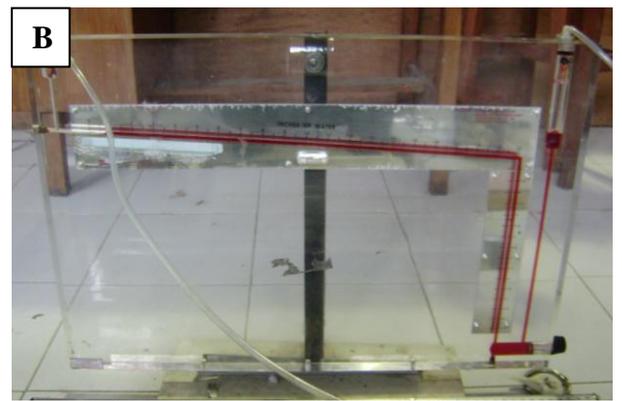
Lampiran 5. Gambar Penelitian

Alat-Alat Penelitian (Bagian 1)



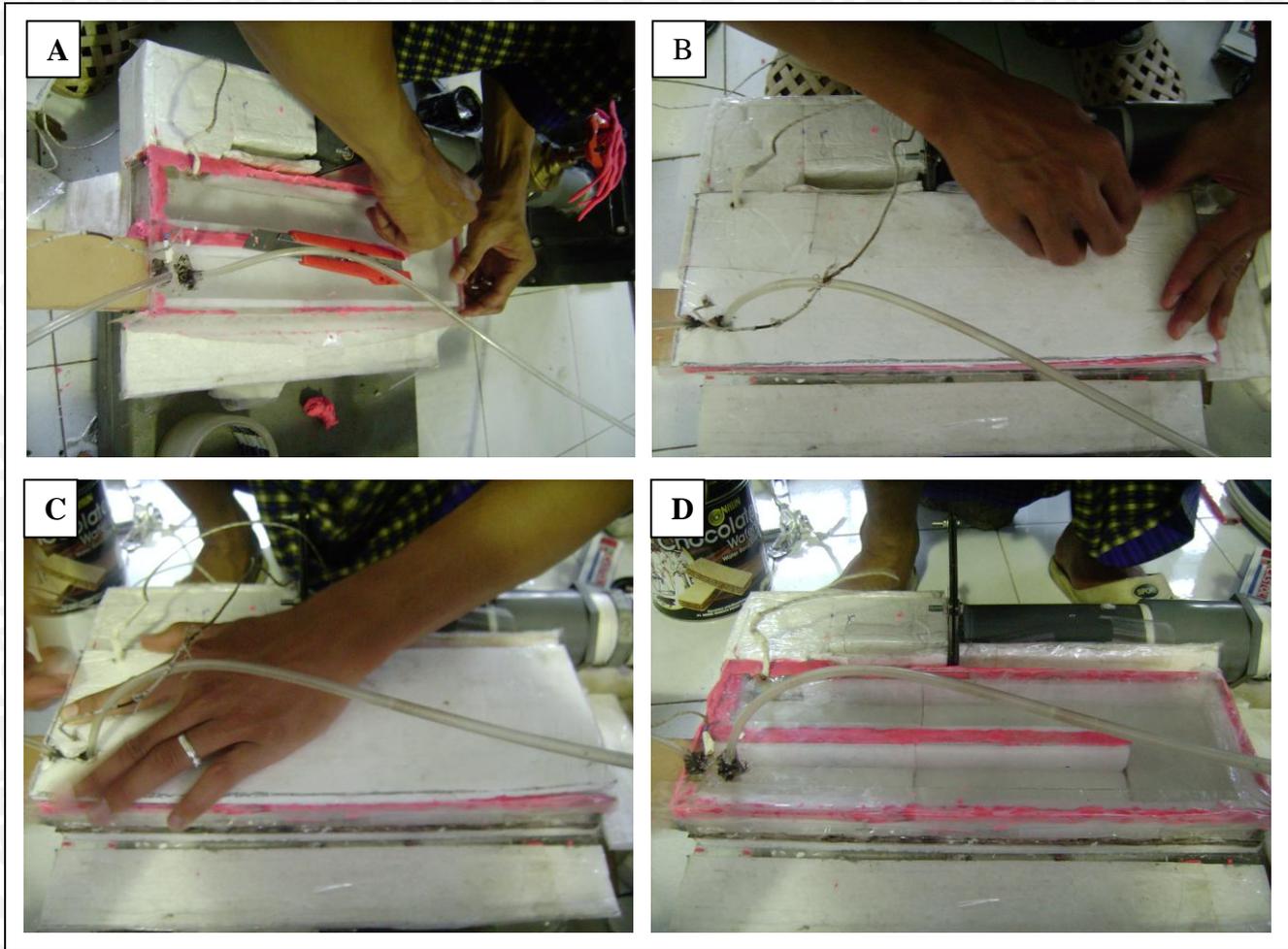
Keterangan : *Hygrometer* (A); *Thermocouple* (B); *Digital Thermometer* (C); *Timbangan digital* (D); *Katup* (E); *Fan* (F)

Alat-Alat Penelitian (Bagian 2)



Keterangan : *Waterpass* (A); *Inclined Manometer* (B); *Jangka Sorong* (C); *Cutter* (D) *Wind Tunnel* variasi sudut -6° (E); *Wind Tunnel* variasi sudut $+6^\circ$ (F); *Wind Tunnel* variasi sudut 0° (G)

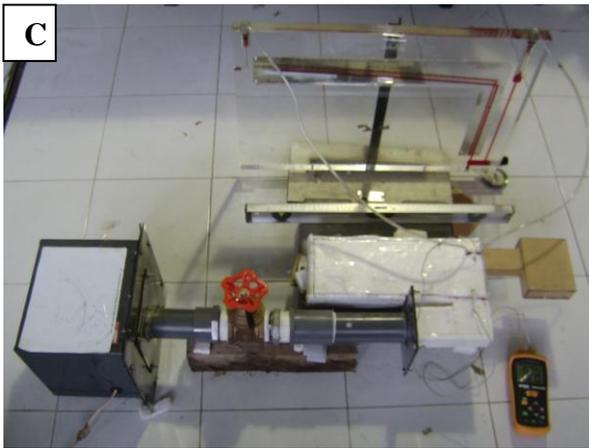
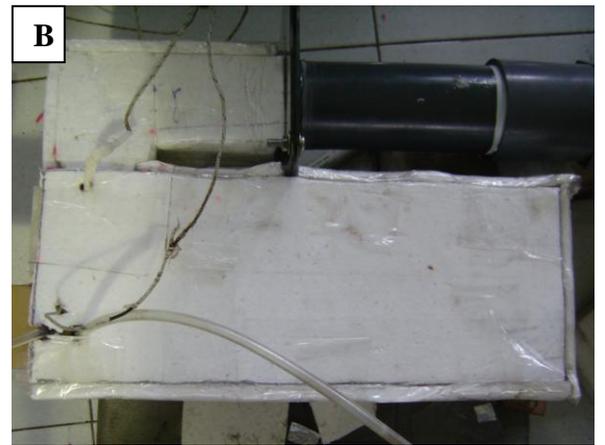
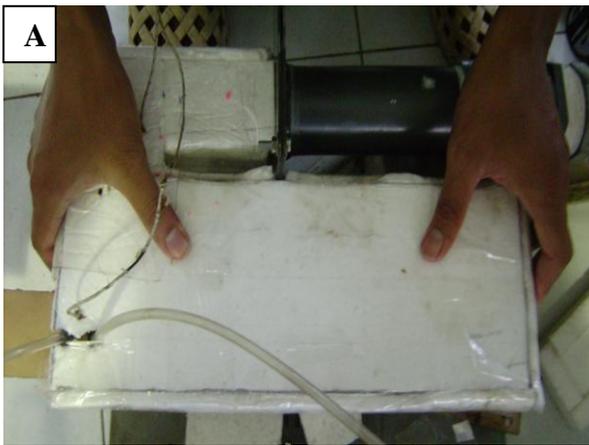
Prosedur Penelitian (Bagian 1)



Keterangan : Perancangan instalasi penelitian (A); Isolasi instalasi penelitian (B) dan (C); Instalasi *Wind Tunnel* (D)



Prosedur Penelitian (Bagian 2)



Keterangan : *Wind Tunnel* yang telah diisolasi (A) dan (B); Instalasi penelitian (C) dan (D)



Lampiran 6. Surat Keterangan Telah Melakukan Penelitian



DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN
LABORATORIUM MOTOR BAKAR

Jl. Mayjen Haryono 167 Malang 65145 Telp. 0341-554291 pes.222
motorbakar_mesinub@yahoo.com



SURAT KETERANGAN

No : 013/II/Lab MB/2010

Yang bertanda tangan dibawah ini menerangkan bahwa :

No.	Nama	NIM	Jurusan
1.	Faried Miftahur Ridlo	0510620039	Teknik Mesin

dari Universitas Brawijaya Malang.

Telah melakukan pengujian dalam rangka penyelesaian Skripsi dengan judul **Analisis Perpindahan Panas Pada Saluran Berliku Dengan Variasi Sudut Inklinasi Partisi Menggunakan Analogi Perpindahan Massa** yang dilaksanakan pada bulan November - Desember 2009 di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

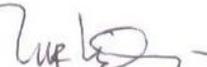
Demikian surat keterangan yang kami buat supaya digunakan sebaik-baiknya.

Malang, 23 Februari 2010

Mengetahui,

Lab. Motor Bakar




Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST, M. Eng

NIP. 19740121 199903 1 001

