

**PENGUJIAN KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS DAN FAKTOR  
GESEKAN PADA PENUKAR KALOR PIPA KONSENTRIK DENGAN  
*PERFORATED TWISTED TAPE INSERT***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar  
Sarjana teknik



Oleh:

NOVITA PARINGGA

NIM. I 0409036

**JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA**

**2014**

*commit to user*

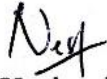
**PENGUJIAN KARAKTERISTIK PERPINDAHAN PANAS DAN FAKTOR  
GESEKAN PADA PENUKAR KALOR PIPA KONSENTRIK DENGAN  
PERFORATED TWISTED TAPE INSERT**

Disusun oleh :



Novita Paringga  
NIM. I0409036

Dosen Pembimbing I



Indri Yaningsih, S.T., M.T.  
NIP. 198607042012122004

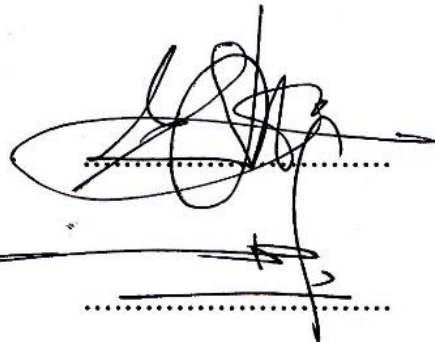
Dosen Pembimbing II



Tri Istanto, S.T., M.T.  
NIP. 197508202000121001

Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari Rabu, tanggal 24 Desember 2013

1. Dr. Budi Santoso, S.T., M.T.  
NIP. 197011052000031001
2. Dr. Eng. Syamsul Hadi, S.T., M.T.  
NIP. 197106151998021002



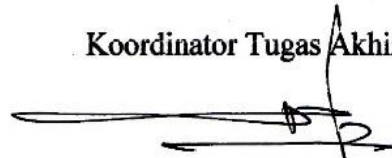
Mengetahui:

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Didik Djoko Susilo, ST., MT  
NIP. 197203171997021001

Koordinator Tugas Akhir



Dr. Eng. Syamsul Hadi, S.T., M.T.  
NIP. 197106151998021002

## MOTTO

"Anda tidak akan bisa lari dari tanggung jawab pada hari esok dengan  
menghindarinya pada hari ini"  
(Abraham Lincoln)

"Tidak ada jaminan kesuksesan, namun tidak mencobanya adalah jaminan  
kegagalan"  
(Bill Clinton)

"Kesempatan emas seringkali dilewatkan banyak orang karena selintas  
terlihat seperti hal yang biasa-biasa dan sepele saja"  
(Thomas Alva Edison)

"Man Jadda Wa Jada"  
(Negeri 5 Menara)

ALL IZ WELL  
(3 idiots)

*commit to user*

## PERSEMBAHAN

Dengan segala kerendahan hati seraya mengucapkan syukur kehadirat Illahi, kupersembahkan tulisan ini kepada :

1. Allah SWT, pemilik segala keagungan, kemuliaan, kekuatan dan keperkasaan. Segala yang kualami adalah kehendak-Mu, semua yang kuhadapi adalah kemauan-Mu, segala puji hanya bagi-Mu, ya Allah, pengatur alam semesta, tempat bergantung segala sesuatu, tempatku memohon pertolongan.
2. Junjungan Nabi besar Muhammad SAW, Manusia terbaik di muka bumi, uswatunhasanah, penyempurna akhlak, shollowat serta salam semoga selalu tercurah padanya, keluarga, sahabat dan pengikutnya yang istiqomah sampai akhir zaman.
3. Kasih sayang dan cinta yang tak pernah putus dari Bapak, Ibu, serta kakak-kakakku tercinta. Kasih sayang kalian tak akan pernah kulupakan sepanjang hidupku.
4. Pak Tri Istanto dan Bu Indri Yaningsih yang selalu cerah ceria dan selalu membawa aura ketenangan dan tak pernah lelah untuk membimbing tugas akhir saya.
5. Buat Abd Jalil terima kasih telah membantu saya dalam segala hal.
6. Buat teman-teman sekelompok tugas akhir saya Mas Himawan, Dito, Arifat, Praseky terima kasih telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir saya.
7. Seluruh dosen, karyawan, dan mahasiswa Teknik Mesin UNS.

## Pengujian Karakteristik Perpindahan Panas dan Faktor Gesekan Pada Penukar Kalor Pipa Konsentrik Dengan *Perforated Twisted Tape Insert*

Novita Paringga

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret

Surakarta, Indonesia

E-mail : novitaparingga@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh *axial spaced-pitch ratio* ( $s_x/W$ ) dan *perforation hole diameter ratio* ( $d/W$ ) terhadap karakteristik perpindahan panas dan faktor gesekan pada penukar kalor pipa konsentrik dengan *perforated twisted tape insert* (PT). Pada penelitian ini,  $s_x/W$  divariasi sebesar 0,56; 0,87; dan 1,19, sedangkan  $d/W$  divariasi sebesar 0,16; 0,19; dan 0,24. *Perforated twisted tape insert* adalah modifikasi dari *typical twisted tape insert* (TT) dengan pemberian lubang-lubang kecil untuk meningkatkan turbulensi fluida di dekat dinding pipa dan di tepi *tape*. Sebagai perbandingan, pada penelitian ini juga diuji penukar kalor tanpa sisipan (*plain tube*) dan dengan penambahan sisipan TT. Fluida kerja di pipa dalam adalah air panas dan di *annulus* adalah air dingin, dengan arah aliran berlawanan arah. Pengujian dilakukan pada bilangan Reynolds (Re) 5400-17.350. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sisipan PT, meningkatkan bilangan Nusselt (Nu), faktor gesekan ( $f$ ) dan unjuk kerja termal ( $\eta$ ) dibandingkan dengan penggunaan TT. Karakteristik perpindahan panas, faktor gesekan dan unjuk kerja termal penukar kalor dengan penggunaan sisipan PT meningkat dengan penurunan nilai  $s_x/W$  dan kenaikan nilai  $d/W$ . Penukar kalor dengan penambahan sisipan PT dengan nilai  $s_x/W = 0,56$  dan nilai  $d/W = 0,24$  menghasilkan bilangan Nusselt, penurunan tekanan, faktor gesekan, efektifnes dan unjuk kerja termal tertinggi. Bilangan Nusselt rata-rata pipa dalam ( $Nu_i$ ) dengan penambahan TT dan PT dengan  $s_x/W = 0,56$ ; 0,87; dan 1,19 berturut-turut meningkat dalam kisaran 29% - 37%; 70% - 79%; 58% - 67%; dan 46% - 55% dibandingkan dengan *plain tube*. Bilangan Nusselt rata-rata pipa dalam ( $Nu_i$ ) dengan penambahan TT dan PT dengan  $d/W = 0,16$ ; 0,19; dan 0,24 berturut-turut meningkat dalam kisaran 29% - 37%; 70% - 79%; 79% - 101%; dan 89% - 116% dibandingkan dengan *plain tube*. Faktor gesekan rata-rata pipa dalam dengan penambahan sisipan TT dan PT dengan  $s_x/W = 0,56$ ; 0,87; dan 1,19 berturut-turut meningkat 1,70; 2,95; 2,71; dan 2,46 kali lebih besar dibandingkan faktor gesekan *plain tube*. Faktor gesekan rata-rata di pipa dalam dengan penambahan sisipan TT dan PT dengan  $d/W = 0,16$ ; 0,19; dan 0,24 berturut-turut meningkat 1,70; 2,95; 3,18; dan 3,45 kali lebih besar dibandingkan faktor gesekan *plain tube*. Unjuk kerja termal penukar kalor dengan penambahan sisipan TT dan PT dengan  $s_x/W = 0,56$ ; 0,87; dan 1,19 berturut-turut dalam kisaran 1,19-0,86; 1,39-0,98; 1,34-0,93; dan 1,28-0,88. Unjuk kerja termal penukar kalor dengan penambahan sisipan TT dan PT dengan  $d/W = 0,16$ ; 0,19 dan 0,24 berturut-turut dalam kisaran 1,19-0,86; 1,39-0,98; 1,55-1,03; dan 1,62-1,08.

Kata kunci : *axial spaced-pitch ratio*, bilangan Nusselt, faktor gesekan, *perforation hole diameter ratio*, *perforated twisted tape insert*

## Investigation on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics on The Concentric Tube Heat Exchanger Fitted With Perforated Tape Insert

Novita Paringga

Mechanical Engineering Departement

Engineering Faculty Sebelas Maret University

Surakarta, Indonesia

E-mail : novitaparingga@gmail.com

### Abstract

This study was conducted to examine the effect of axial spaced-pitch ratio ( $s_x/W$ ) and perforation hole diameter ratio ( $d/W$ ) on the characteristics of heat transfer and friction factor in a concentric tube heat exchanger fitted with perforated twisted tape insert (PT). In this study,  $s_x/W$  was varied by 0.56, 0.87, and 1.19, while the  $d/W$  varied by 0.16, 0.19, and 0.24. Perforated twisted tape insert was a modification of the typical twisted tape insert (TT) by administering small holes to increase fluid turbulence near the tube wall and the tape edge. For comparison, in this study also tested heat exchanger without insert (plain tube) and with the addition of the TT. The working fluid in the inner tube was hot water and in the annulus was cold water, with the flow direction was counterflow. Tests were conducted at a Reynolds number (Re) 5,400-17,500. The study results showed that the use of insert PT, increasing the Nusselt number (Nu), friction factor ( $f$ ) and thermal performance ( $\eta$ ) as compared with the use of insert TT. Characteristics of heat transfer, friction factor and thermal performance of the heat exchanger with the use of insert PT increases with a decrease in the value of the  $s_x/W$  and the increase in the value of  $d/W$ . The heat exchanger with the addition of the PT with a value of  $s_x/W = 0.56$  and the value of  $d/W = 0.24$  produces the Nusselt number, pressure drop, friction factor, effectiveness and the highest thermal performance. The average Nusselt number in the inner tube ( $Nu_i$ ) with the addition of the TT and the PT with  $s_x/W = 0.56, 0.87, \text{ and } 1.19$  increased in the range of 29% - 37%, 70% - 79%, 58% - 67%, and 46% - 55% compared to the plain tube, respectively. The average Nusselt number in the inner tube ( $Nu_i$ ) with the addition of the TT and the PT with  $d/W = 0.16, 0.19, \text{ and } 0.24$  increased in the range of 29% - 37%, 70% - 79%, 79% - 101%, and 89% - 116% compared to the plain tube, respectively. The average friction factor in the inner tube with the addition of the TT and the PT with  $s_x/W = 0.56, 0.87, \text{ and } 1.19$  increased 1.70, 2.95, 2.71, and 2.46 times greater than the friction factor of plain tube, respectively. The average friction factor in the inner tube with the addition of the TT and the PT with  $d/W = 0.16, 0.19, \text{ and } 0.24$  increased 1.70, 2.95, 3.18, and 3.45 times greater than the friction factor of plain tube, respectively. Thermal performance of the heat exchanger with the addition of the TT and the PT with  $s_x/W = 0.56, 0.87, \text{ and } 1.19$  in the range of 1.19-0.86, 1.39-0.98, 1.34-0.93, 1.28-0.88, respectively. Thermal performance of the heat exchanger with the addition of the TT and the PT with  $d/W = 0.16, 0.19, \text{ and } 0.24$  in the range of 1.19-0.86, 1.39-0.98, 1.55-1.03, and 1.62-1.08, respectively.

Keywords : axial spaced-pitch ratio, friction factor, Nusselt number, perforation hole diameter ratio, perforated twisted tape insert

## KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan Skripsi “Pengujian Karakteristik Perpindahan Panas Dan Faktor Gesekan Pada Penukar Kalor Pipa Konsentrik Dengan *Perforated Twisted Tape Insert*” ini dengan baik.

Skripsi ini disusun guna memenuhi persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret Surakarta.

Dalam Penyelesaian Skripsi ini tidaklah mungkin dapat terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik secara langsung ataupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Skripsi ini, terutama kepada :

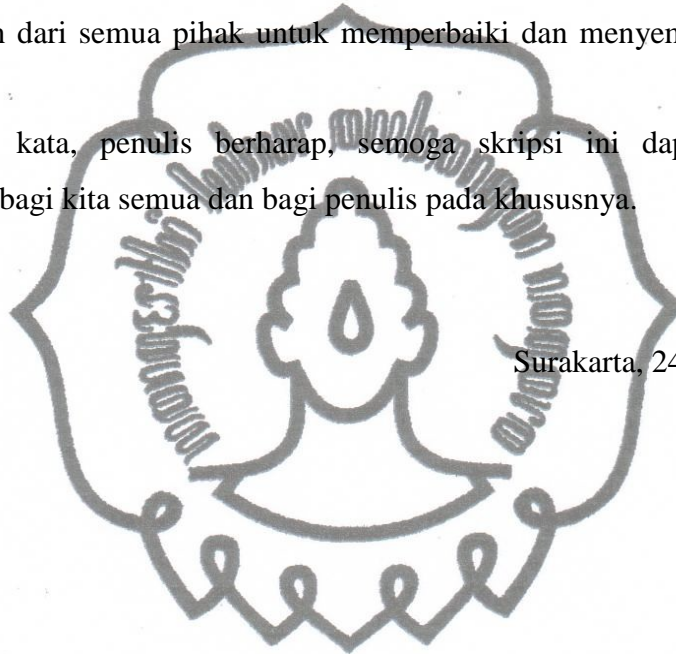
1. Bapak Didik Djoko Susilo, ST., MT, selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin UNS Surakarta.
2. Bu Indri Yaningsih, S.T., M.T. selaku Pembimbing I atas bimbingannya hingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini.
3. Bapak Tri Istanto, S.T., M.T. selaku Pembimbing II yang telah turut serta memberikan bimbingan yang berharga bagi penulis.
4. Bapak Dr. Budi Santoso, S.T., M.T. dan bapak Dr. Eng. Syamsul Hadi, S.T., selaku dosen penguji tugas akhir saya yang telah memberi saran yang membangun.
5. Bapak Prof. Muhammad Nizam, S.T., M.T., Ph.D selaku Pembimbing Akademis yang telah menggantikan sebagai orang tua penulis dalam menyelesaikan studi di Universitas Sebelas Maret ini.
6. Bapak Dr. Eng. Syamsul Hadi, S.T., selaku koordinator Tugas Akhir
7. Seluruh Dosen serta Staf di Jurusan Teknik Mesin UNS, yang telah turut mendidik dan membantu penulis hingga menyelesaikan studi S1.
8. Bapak, Ibu dan seluruh keluarga yang telah memberikan do’a restu, motivasi, dan dukungan material maupun spiritual selama penyelesaian Tugas Akhir.

*commit to user*

9. Teman-teman Skripsi *Heat Exchanger*, Mas Himawan, Dito, Arifat dan Praseky yang telah menemani penulis baik dalam keadaan suka maupun duka.
10. Teman-teman teknik mesin angkatan 2009 beserta kakak dan adik angkatan di teknik mesin UNS.
11. Semua pihak yang telah membantu dalam melaksanakan dan menyusun laporan Tugas Akhir ini yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak untuk memperbaiki dan menyempurnakan skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap, semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua dan bagi penulis pada khususnya.



Surakarta, 24 Desember 2014

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Halaman Surat Penugasan.....	ii
Halaman Pengesahan .....	iii
Halaman Motto.....	iv
Halaman Persembahan .....	v
Abstrak .....	vi
Kata Pengantar .....	viii
Daftar Isi .....	x
Daftar Tabel .....	xiii
Daftar Gambar .....	xiv
Daftar Persamaan .....	xvi
Daftar Notasi .....	xix
Daftar Lampiran .....	xxi
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Dan Manfaat .....	4
1.5. Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II LANDASAN TEORI</b>	
2.1. Tinjauan Pustaka .....	6
2.2. Dasar Teori .....	9
2.2.1. Dasar perpindahan panas .....	9
2.2.2. Aliran dalam sebuah pipa ( <i>internal flow in tube</i> ) .....	10
2.2.2.1. Kondisi aliran .....	10
2.2.2.2. Kecepatan rata-rata ( <i>mean velocity</i> ) .....	12
2.2.2.3. Temperatur rata-rata .....	12
2.2.3. Lapis Batas ( <i>boundary layer</i> ) .....	13
2.2.3.1. Lapis Batas Kecepatan ( <i>velocity boundary layer</i> ) .....	13
2.2.3.2. Lapis Batas Termal ( <i>thermal boundary layer</i> ) .....	16
2.2.4. Penukar Kalor.....	19
2.2.5. Parameter Tanpa Dimensi .....	23
2.2.6. Teknik Peningkatan Perpindahan Panas Pada Penukar kalor.....	24
2.2.7. Sisipan Pipa Terpilin ( <i>twisted tape insert</i> ).....	28
2.2.8. Karakteristik Perpindahan Panas dan Faktor Gesekan .....	29

2.2.8.1. Korelasi perpindahan panas dan faktor gesekan di daerah aliran laminar dan turbulen melalui sebuah pipa bulat halus ...	29
2.2.8.2. Korelasi empiris perpindahan panas dengan <i>typical twisted tape insert</i> di daerah aliran laminar.....	31
2.2.8.3. Korelasi empiris perpindahan panas dengan <i>typical twisted tape insert</i> di daerah aliran turbulen.....	32
2.2.8.4 Karakteristik perpindahan panas dan faktor gesekan pada penukar kalor pipa konsentrik .....	32
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1. Tempat Penelitian .....	42
3.2. Bahan Penelitian .....	42
3.3. Skema Alat Penelitian .....	42
3.4. Alat dan Instrumentasi Penelitian .....	44
3.5. Diagram Alir Penelitian .....	52
3.6. Prosedur Penelitian .....	53
3.6.1. Tahap persiapan .....	53
3.6.2. Pengujian penukar kalor tanpa <i>twisted tape insert</i> ( <i>plain tube</i> ) .....	53
3.6.3. Pengujian penukar kalor dengan <i>twisted tape insert</i> .....	54
3.7. Metode Analisis Data .....	56
<b>BAB IV DATA DAN ANALISIS</b>	
4.1. Data Hasil Pengujian .....	57
4.2. Perhitungan Data .....	58
4.2.1. Perhitungan unjuk kerja termal .....	59
4.2.2. Contoh perhitungan unjuk kerja termal pada PT variasi $s_x/W$ dan $d/W$ .....	59
4.3. Analisis Data .....	66
4.3.1. Validasi karakteristik perpindahan panas <i>plain tube</i> .....	66
4.3.2. Validasi karakteristik faktor gesekan <i>plain tube</i> .....	67
4.3.3. Validasi karakteristik perpindahan panas pipa dalam dengan <i>typical twisted tape insert</i> (TT).....	68
4.3.4. Pengaruh <i>axial spaced-pitch ratio</i> dari PT.....	68
4.3.4.1. Pengaruh <i>axial spaced-pitch ratio</i> terhadap karakteristik perpindahan panas penukar kalor dengan penambahan PT.....	68
4.3.4.2. Pengaruh <i>axial spaced-pitch ratio</i> terhadap karakteristik faktor gesekan penukar kalor dengan penambahan PT .....	70

4.3.4.3. Pengaruh <i>axial spaced-pitch ratio</i> terhadap karakteristik efektifnes penukar kalor dengan penambahan PT .....	73
4.3.4.4. Pengaruh <i>axial spaced-pitch ratio</i> terhadap karakteristik unjuk kerja termal penukar kalor dengan penambahan PT.....	74
4.3.5. Pengaruh <i>perforation hole diameter ratio</i> dari PT..	76
4.3.5.1. Pengaruh <i>perforation hole diameter ratio</i> terhadap karakteristik perpindahan panas penukar kalor dengan penambahan PT.....	76
4.3.5.2. Pengaruh <i>perforation hole diameter ratio</i> terhadap karakteristik faktor gesekan penukar kalor dengan penambahan PT.....	78
4.3.5.3. Pengaruh <i>perforation hole diameter ratio</i> terhadap karakteristik efektifnes penukar kalor dengan penambahan PT.....	80
4.3.5.4. Pengaruh <i>perforation hole diameter ratio</i> terhadap karakteristik unjuk kerja termal penukar kalor dengan penambahan PT.....	81
<b>BAB V PENUTUP</b>	
5.1. Kesimpulan .....	84
5.2. Saran .....	85
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	86
<b>LAMPIRAN</b> .....	89

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Tabel hasil perhitungan karakteristik perpindahan panas dan faktor gesekan <i>plain tube</i> .....	171
Tabel 2. Tabel hasil perhitungan karakteristik perpindahan panas dan faktor gesekan pipa dalam dengan penambahan TT dan PT .....	172
Tabel 4. Rekapitulasi perhitungan nilai unjuk kerja termal untuk TT dan PT variasi $s_x/W = 0,56; 0,87$ dan $1,19$ .....	176
Tabel 5. Rekapitulasi perhitungan nilai unjuk kerja termal untuk TT dan PT variasi $d/W = 0,16; 0,19$ dan $0,24$ .....	177



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Ilustrasi jenis-jenis perpindahan panas .....	9
Gambar 2.2. Perkembangan profil kecepatan dan perubahan tekanan pada saluran masuk aliran pipa.....	11
Gambar 2.3. Profil temperatur aktual dan rata – rata pada aliran dalam pipa .....	12
Gambar 2.4. Lapis batas kecepatan dan profil kecepatan laminar, transisi dan turbulen aliran fluida melewati plat datar .....	13
Gambar 2.5. Ketebalan lapis batas kecepatan .....	14
Gambar 2.6. Lapis batas termal di atas plat datar (permukaan plat lebih panas daripada fluida).....	16
Gambar 2.7. Lapis batas termal di atas plat datar (fluida lebih panas daripada permukaan plat datar) .....	16
Gambar 2.8. Fluk panas pada permukaan plat datar .....	17
Gambar 2.9. Lapis batas termal fluida dingin melalui plat panas.....	18
Gambar 2.10. (a) arah aliran fluida, dan (b) perubahan temperatur fluida pada penukar kalor searah.....	19
Gambar 2.11. (a) arah aliran fluida, dan (b) perubahan temperatur fluida pada penukar kalor berlawanan arah .....	20
Gambar 2.12. Penukar kalor pipa konsentrik.....	21
Gambar 2.13. Analogi listrik untuk perpindahan panas pada penukar kalor pipa konsentrik .....	22
Gambar 2.14. Konfigurasi geometri sebuah <i>twisted tape insert</i> .....	29
Gambar 2.15. Efektivenes penukar kalor pipa ganda aliran berlawanan arah .....	39
Gambar 3.1. Skema pengujian penukar kalor pipa konsentrik dengan <i>perforated twisted tape insert</i> .....	42
Gambar 3.2. Penukar kalor pipa konsentrik .....	43
Gambar 3.3. Nomenklatur <i>perforated twisted tape insert</i> .....	46
Gambar 3.4. <i>Typical twisted tape insert</i> .....	46
Gambar 3.5. <i>Perforated twisted tape insert</i> variasi <i>axial spaced-pitch rasio</i> ( $s_x/W$ ) pada $y/W = 3,97$ , $d/W = 0,16$ dan $s_y/W = 0,32$ .....	46
Gambar 3.6. <i>Perforated twisted tape insert</i> variasi <i>perforation hole diameter ratio</i> ( $d/W$ ) pada $y/W = 3,97$ , $s_x/W = 0,56$ dan $s_y/W = 0,32$ .....	46
Gambar 3.7. (a) Gambar detail <i>flange</i> , (b) <i>flange</i> setelah dilakukan proses pembubutan .....	47
Gambar 3.8. Skema pemasangan termokopel untuk mengukur temperatur air masuk dan keluar di <i>inner tube</i> dan di <i>annulus</i> .....	48

Gambar 3.9. Skema pemasangan termokopel untuk mengukur temperatur dinding luar pipa dalam.....	48
Gambar 3.10. <i>Thermocouple reader</i> .....	48
Gambar 3.11. <i>Temperature controller</i> .....	49
Gambar 3.12. Pemanas air elektrik .....	49
Gambar 3.13. Rotameter .....	50
Gambar 3.14. Penjebak air .....	51
Gambar 4.1. Skema pipa dalam dan pipa luar penukar kalor pipa konsentrik .....	58
Gambar 4.2. Grafik hubungan antara $Re$ dengan $W_{\text{pump}}$ variasi $s_x/W$ .....	74
Gambar 4.3. Grafik hubungan antara $Re$ dengan $W_{\text{pump}}$ variasi $d/W$ .....	76
Gambar 4.4. Grafik hubungan antara $h_i$ dengan $W_{\text{pump}}$ variasi $s_x/W$ .....	77
Gambar 4.5. Grafik hubungan antara $h_i$ dengan $W_{\text{pump}}$ variasi $d/W$ .....	79
Gambar 4.6. Grafik hubungan $Nu_i$ dengan $Re$ untuk <i>plain tube</i> .....	83
Gambar 4.7. Grafik hubungan $f$ dengan $Re$ untuk <i>plain tube</i> .....	84
Gambar 4.8. Grafik hubungan $Nu_i$ dengan $Re$ untuk TT .....	85
Gambar 4.9. Grafik hubungan $Nu_i$ dengan $Re$ untuk variasi $s_x/W$ .....	86
Gambar 4.10. Grafik hubungan $\Delta P$ dengan $Re$ untuk variasi $s_x/W$ .....	88
Gambar 4.11. Grafik hubungan $f$ dengan $Re$ untuk variasi $s_x/W$ .....	89
Gambar 4.12. Grafik hubungan $\epsilon$ dengan $Re$ untuk variasi $s_x/W$ .....	91
Gambar 4.13. Grafik hubungan $\eta$ dengan $Re$ untuk variasi $s_x/W$ .....	92
Gambar 4.14. Grafik hubungan $Nu_i$ dengan $Re$ untuk variasi $d/W$ .....	93
Gambar 4.15. Grafik hubungan $\Delta P$ dengan $Re$ untuk variasi $d/W$ .....	95
Gambar 4.16. Grafik hubungan $f$ dengan $Re$ untuk variasi $d/W$ .....	96
Gambar 4.17. Grafik hubungan $\epsilon$ dengan $Re$ untuk variasi $d/W$ .....	98
Gambar 4.18. Grafik hubungan $\eta$ dengan $Re$ untuk variasi $d/W$ .....	99

## DAFTAR PERSAMAAN

		Halaman
Persamaan (2.1)	Bilangan Reynolds untuk pipa bulat .....	10
Persamaan (2.2)	Diameter hidrolis .....	11
Persamaan (2.3)	Nilai bilangan Reynolds untuk aliran laminar .....	11
Persamaan (2.4)	Nilai bilangan Reynolds untuk aliran transisi .....	11
Persamaan (2.5)	Nilai bilangan Reynolds untuk aliran turbulen .....	11
Persamaan (2.6)	Laju aliran massa .....	12
Persamaan (2.7)	Temperatur <i>bulk</i> rata-rata fluida .....	13
Persamaan (2.8)	Tegangan geser.....	14
Persamaan (2.9)	Bilangan Reynolds .....	15
Persamaan (2.10)	Hukum Fourier .....	17
Persamaan (2.11)	Perpindahan panas konveksi .....	17
Persamaan (2.12)	Tahanan termal total pada penukar kalor konsentrik .....	17
Persamaan (2.13)	Laju perpindahan panas antara dua fluida .....	17
Persamaan (2.14)	Bilangan Nusselt.....	18
Persamaan (2.15)	Bilangan Nusselt.....	18
Persamaan (2.16)	Bilangan Nusselt.....	18
Persamaan (2.17)	Laju perpindahan panas di <i>annulus</i> .....	20
Persamaan (2.18)	laju perpindahan panas di dalam pipa dalam.....	20
Persamaan (2.19)	laju perpindahan panas .....	20
Persamaan (2.20)	Beda temperatur rata-rata logaritmik ( $\Delta T_{LMTD}$ ) .....	21
Persamaan (2.21)	Tahanan termal total.....	22
Persamaan (2.22)	Laju perpindahan panas antara dua fluida.....	23
Persamaan (2.23)	Koefisien perpindahan panas <i>overall</i> .....	23
Persamaan (2.24)	Perbandingan kedua gaya.....	23
Persamaan (2.25)	Bilangan Prandtl .....	24
Persamaan (2.26)	Bilangan Nusselt.....	26
Persamaan (2.27)	<i>Twist ratio</i> .....	29
Persamaan (2.28)	Sudut heliks .....	29
Persamaan (2.29)	Bilangan Nusselt aliran laminar .....	29
Persamaan (2.30)	Faktor gesekan Darcy ( <i>Darcy friction factor</i> ).....	29
Persamaan (2.31)	Persamaan Petukhov pertama ( <i>first Petukhov equation</i> ).....	30
Persamaan (2.32)	Korelasi Dittus-Boelter.....	30
Persamaan (2.33)	persamaan Petukhov kedua ( <i>second Petukhov equation</i> ).....	30
Persamaan (2.34)	Persamaan Gnielinski .....	30
Persamaan (2.35)	Persamaan Colebrook.....	31
Persamaan (2.36)	Persamaan Miller.....	31
Persamaan (2.37)	Persamaan Blasius .....	31

Persamaan (2.38)	Korelasi perpindahan panas daerah laminar .....	32
Persamaan (2.39)	Korelasi perpindahan panas Manglik bergles .....	32
Persamaan (2.40)	Sudut $\phi$ .....	32
Persamaan (2.41)	Laju perpindahan panas di dalam pipa dalam .....	33
Persamaan (2.42)	Laju perpindahan panas di <i>annulus</i> .....	33
Persamaan (2.43)	Temperatur rata-rata dinding luar pipa dalam .....	34
Persamaan (2.44)	Temperatur fluida rata-rata <i>bulk</i> dingin di <i>annulus</i> ....	34
Persamaan (2.45)	Ketidaksetimbangan energi ( <i>heat balance error</i> ) .....	34
Persamaan (2.46)	Persentase ketidaksetimbangan energi ( <i>heat balance error</i> ) .....	34
Persamaan (2.47)	Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata.....	34
Persamaan (2.48)	Bilangan Nusselt rata-rata di sisi <i>annulus</i> .....	34
Persamaan (2.49)	Koefisien perpindahan panas <i>overall</i> .....	34
Persamaan (2.50)	Beda temperatur rata-rata logaritmik berlawanan arah ( <i>counter-flow</i> ) .....	35
Persamaan (2.51)	Koefisien perpindahan panas <i>overall</i> .....	35
Persamaan (2.52)	Penjabaran dari persamaan (2.41), (2.49) dan (2.50) .	35
Persamaan (2.53)	Penjabaran Koefisien perpindahan panas <i>overall</i> dari persamaan (2.52) .....	35
Persamaan (2.54)	Koefisien perpindahan panas rata-rata di sisi pipa dalam .....	35
Persamaan (2.55)	Bilangan Nusselt rata-rata pada sisi pipa dalam.....	35
Persamaan (2.56)	Bilangan Reynolds (Re) aliran fluida di pipa dalam ..	36
Persamaan (2.57)	Penjabaran dari persamaan (2.56) .....	36
Persamaan (2.58)	Kapasitas panas ( <i>heat capacity rate</i> ) $C_h$ .....	36
Persamaan (2.59)	Kapasitas panas ( <i>heat capacity rate</i> ) $C_c$ .....	36
Persamaan (2.60)	Penjabaran persamaan ( 2.41 ) $Q_h$ .....	36
Persamaan (2.61)	Penjabaran persamaan ( 2.42 ) $Q_c$ .....	36
Persamaan (2.62)	Efektivenes penukar kalor .....	37
Persamaan (2.63)	Laju perpindahan panas aktual .....	37
Persamaan (2.64)	Perbedaan temperatur maksimum .....	37
Persamaan (2.65)	Laju perpindahan panas maksimum .....	37
Persamaan (2.66)	Nilai laju kapasitas panas yang lebih kecil.....	37
Persamaan (2.67)	Nilai laju kapasitas panas yang lebih kecil.....	37
Persamaan (2.68)	Laju perpindahan panas aktual .....	38
Persamaan (2.69)	Korelasi efektivitas penukar kalor pipa konsentrik aliran berlawanan arah.....	38
Persamaan (2.70)	<i>Number of transfer units</i> .....	38
Persamaan (2.71)	Rasio kapasitas .....	38
Persamaan (2.72)	Korelasi efektivitas penukar kalor pipa konsentrik aliran berlawanan arah.....	38
Persamaan (2.73)	Penurunan tekanan untuk semua jenis <i>internal flow</i> ..	39



Persamaan (2.74) Penurunan tekanan .....	39
Persamaan (2.75) Faktor gesekan.....	40
Persamaan (2.76) Daya pemompaan .....	40
Persamaan (2.77) Daya pemompaan konstan.....	40
Persamaan (2.78) Hubungan faktor gesekan dengan bilangan Reynolds	40
Persamaan (2.79) Unjuk kerja termal.....	41



*commit to user*

## DAFTAR NOTASI

$A_c$	= Luas penampang melintang aliran	(m <sup>2</sup> )
$A_i$	= Luas permukaan dalam pipa dalam	(m <sup>2</sup> )
$A_o$	= Luas permukaan luar pipa dalam	(m <sup>2</sup> )
$A_s$	= Luas perpindahan panas	(m <sup>2</sup> )
$A_{t,i}$	= Luas penampang pipa dalam	(m <sup>2</sup> )
$C_{p,c}$	= Panas jenis fluida dingin di <i>annulus</i>	(kJ/kg.°C)
$C_{p,h}$	= Panas jenis fluida panas di dalam pipa dalam	(kJ/kg.°C)
$d$	= Diameter lubang di <i>twist</i>	(m)
$d_i$	= Diameter dalam pipa dalam	(m)
$d_o$	= Diameter luar pipa dalam	(m)
$D_i$	= Diameter dalam pipa luar	(m)
$D_o$	= Diameter luar pipa luar	(m)
$D_h$	= Diameter hidrolis <i>annulus</i>	(m)
$f$	= Faktor gesekan	
$g$	= Percepatan gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$H$	= Panjang <i>pitch twisted tape insert</i>	(m)
$h_i$	= Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata di pipa dalam	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$h_o$	= Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata di <i>annulus</i>	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$h_p$	= Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata tanpa <i>twisted tape insert</i>	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$h_s$	= Koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata dengan <i>twisted tape insert</i>	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$k_i$	= Konduktivitas termal material dinding pipa dalam	(W/m.°C)
$k_o$	= Konduktivitas termal rata-rata fluida dingin di <i>annulus</i>	(W/m.°C).
$L$	= Panjang pipa dalam	(m)
$L_t$	= Panjang jarak titik pengukuran beda tekanan di pipa dalam	(m)
$\dot{m}_c$	= Laju aliran massa fluida dingin di <i>annulus</i>	(kg/s)
$\dot{m}_h$	= Laju aliran massa fluida panas di dalam pipa dalam	(kg/s)
$Nu_i$	= Bilangan Nusselt rata-rata di pipa dalam	
$Nu_o$	= Bilangan Nusselt rata-rata di sisi <i>annulus</i>	
$p$	= <i>Plain tube</i> (pipa tanpa <i>twisted tape insert</i> )	
$pp$	= Daya pemompaan konstan	
$Pr$	= Bilangan Prandtl	
$Q$	= Laju perpindahan panas	(W)
$Q_c$	= Laju perpindahan panas di <i>annulus</i>	(W)
$Q_h$	= Laju perpindahan panas di dalam pipa dalam	(W)
$Re$	= Bilangan Reynolds	
$Re_d$	= Bilangan Reynolds berdasarkan diameter dalam pipa	
$t$	= Tebal <i>twisted tape insert</i>	(m)
$T_{c,i}$	= Temperatur fluida dingin masuk <i>annulus</i>	(°C)

$T_{c,o}$	= Temperatur fluida dingin keluar <i>annulus</i>	(°C)
$T_{h,i}$	= Temperatur fluida panas masuk pipa dalam	(°C)
$T_{h,o}$	= Temperatur fluida panas keluar pipa dalam	(°C)
$T_{b,i}$	= Temperatur <i>bulk</i> rata-rata fluida di dalam pipa dalam	(°C)
$T_{b,o}$	= Temperatur <i>bulk</i> rata-rata fluida dingin di <i>annulus</i>	(°C)
$\bar{T}_{w,i}$	= Temperatur rata-rata dinding dalam pipa dalam	(°C)
$\bar{T}_{w,o}$	= Temperatur rata-rata dinding luar pipa dalam	(°C)
$U$	= Koefisien perpindahan panas overall	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$u_c$	= Kecepatan aksial rata-rata fluida	(m/s)
$u_m$	= Kecepatan rata-rata fluida	(m/s)
$u_{sw}$	= Kecepatan pusaran ( <i>swirl velocity</i> )	(m/s)
$U_i$	= Koefisien perpindahan panas overall berdasarkan permukaan dalam pipa dalam	(W/m <sup>2</sup> .°C)
$\nu$	= Viskositas kinematis fluida di pipa dalam	(m <sup>2</sup> /s)
$V$	= Kecepatan rata-rata fluida di pipa dalam	(m/s)
$s$	= Jarak lubang	(m)
$s_x$	= Jarak antar pusat lubang dalam arah aksial	(m)
$s_y$	= Jarak antar lubang lubang dalam arah transversal	(m)
$W$	= Lebar <i>twist</i>	
$\dot{V}$	= Laju aliran volumetrik fluida di pipa dalam	(m <sup>3</sup> /s)
$y$	= <i>Twist ratio</i>	
$\theta$	= Sudut heliks	(°)
$\Delta h$	= Beda ketinggian fluida manometer	(m)
$\Delta P$	= Penurunan tekanan di pipa dalam	(Pa)
$\Delta T_1$	= Perbedaan temperatur antara dua fluida pada sisi <i>inlet</i> kalor	(°C)
$\Delta T_2$	= Perbedaan temperatur antara dua fluida pada sisi <i>outlet</i> penukar kalor	(°C)
$\Delta T_{LMTD}$	= Beda temperatur rata-rata logaritmik ( <i>logarithmic mean temperature different</i> )	(°C)
$\mu$	= Viskositas dinamik fluida	(kg/m.s)
$\mu_i$	= Viskositas dinamik fluida di pipa dalam	(kg/m.s)
$\mu_o$	= Viskositas dinamik fluida di <i>annulus</i>	(kg/m.s)
$\eta$	= Unjuk kerja termal	
$\rho_h$	= Densitas fluida di pipa dalam	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$	= Densitas fluida di <i>annulus</i>	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_m$	= Densitas fluida manometer	(kg/m <sup>3</sup> )

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Data hasil eksperimen .....	89
Lampiran B. Contoh perhitungan untuk data pengujian dengan laju aliran volumetric 3,0 LPM .....	135
Lampiran C. Tabel hasil perhitungan .....	171
Lampiran D. Grafik hubungan $\epsilon$ dengan NTU untuk variasi $s_x/W$ .....	178
Lampiran E. Grafik hubungan $\epsilon$ dengan NTU untuk variasi $d/W$ .....	179
Lampiran F. Tabel konduktivitas termal material .....	180
Lampiran G. Properties air .....	181

