สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญภาพประกอบ	ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	6
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการศึกษาวิจัย	6
1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	8
2.1 ทฤษฎีของการพาความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ	8
2.1.1 การพาความร้อนในท่อแบบแผ่นขนาน	8
2.1.2 การวิเคราะห์ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน	10
2.2 หลักการและทฤษฎีสำหรับการคำนวณทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	11
2.2.1 แบบจำลองของปัญหา	11
2.2.2 สมการและการคำนวณทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	13
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย	22
3.1 การทดลอง	22
3.1.1 ชุดทดลอง	22
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	25
3.1.3 วิธีการทดลอง	27
3.2 การคำนวณโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	28
3.2.1 ข้อมูลนำเข้า	29

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

หน้า

3.2.2 การคำนวณและสรุปผล 30
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลจากการศึกษาวิจัย 31
4.1 ผลและวิเคราะห์ผลจากการทดลอง 31
4.1.1 คุณลักษณะของการติดปล่องที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ผนังท่อ 31
4.1.2 คุณลักษณะของการติดปล่องที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในรูปของค่า Nu 38
4.2 ผลและวิเคราะห์ผลการคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป 41
4.2.1 การติดปล่องกับลักษณะการกระจายของอุณหภูมิ 41
4.2.2 สัดส่วน B/b และ L/L_h กับการเพิ่มการระบายความร้อนและลักษณะการไหล 44
4.2.3 ค่า Nu จากผลการคำนวณทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข 46
4.3 การเปรียบเทียบผลจากการศึกษาวิจัย 49
4.3.1 เปรียบเทียบผลจากการศึกษาวิจัยทั้งสองวิธี กรณี q เท่ากับ 100 W/m^2 49
4.3.2 เปรียบเทียบผลจากการศึกษาวิจัยทั้งสองวิธี กรณี q เท่ากับ 300 W/m^2 50
4.3.3 เปรียบเทียบผลจากการศึกษาวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Auletta และคณะ (2000) 51
4.3.4 เปรียบเทียบลักษณะการไหลในแบบจำลองสำหรับการศึกษาวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Asako และคณะ (1989) 53
บทที่ 5 สรุปผลจากการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ 55
5.1 สรุปผลจากการศึกษาวิจัย 55
5.2 ข้อเสนอแนะ 58
บรรณานุกรม 59
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลจากการทดลอง 62
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลจากโปรแกรม 74

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

	หน้า
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์การถดถอย	78
ภาคผนวก ง กราฟค่า Nu เฉลี่ยทั้งท่อ	82
ภาคผนวก จ ตารางคุณสมบัติของอากาศ	86
ประวัติผู้เขียน	88

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟ Nu เฉลี่ยทั้งท่อ กับ $Ra^*(B/b)$ จากงานศึกษาวิจัยของ Auletta และคณะ (2000)	5
2.1	ลักษณะการกระจายอุณหภูมิ (Temperature profile) กรณีการพาความร้อนโดยวิธีธรรมชาติในท่อแบบแผ่นขนาน	8
2.2	การพาโดยธรรมชาติในท่อแบบแผ่นขนาน	9
2.3	ท่อติดปล่องแบบตรงแนวดิ่ง	11
2.4	แบบจำลองสำหรับกรณีติดปล่องแบบถ่าง	13
2.5	เส้นกระแสการไหลผ่านโหนดด้านท้ายกระแส	15
2.6	เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม	19
2.7	ขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม	21
3.1	ภาคตัดด้านข้างชุดทดลอง	23
3.2	ชุดทดลองกรณีติดปล่องแบบถ่าง	23
3.3	เครื่องทำความร้อน	24
3.4	ผนังปล่อง	24
3.5	ชุดทดลองจริง	25
3.6	เครื่องปรับกำลังไฟฟ้า	26
3.7	เครื่องวัดอุณหภูมิ	26
3.8	แคล้มป์มิเตอร์	27
3.9	ท่อแบบแผ่นขนาน (ก) ติดปล่องแบบถ่าง (ข) ติดปล่องแบบตรงแนวดิ่ง	27
3.10	แสดงการใส่เงื่อนไขที่ขอบทุกด้านในแบบจำลอง	29
4.1	อุณหภูมิที่ผนังท่อกรณีติดปล่องแบบถ่างซึ่งมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 โดยที่ (ก) L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 สำหรับ q เท่ากับ 100 W/m^2	32
4.2	อุณหภูมิที่ผนังท่อกรณีติดปล่องแบบถ่างซึ่งมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 โดยที่ (ก) L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 สำหรับ q เท่ากับ 300 W/m^2	33
4.3	อุณหภูมิที่ผนังท่อกรณีติดปล่องแบบถ่างซึ่งมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 โดยที่ (ก)	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
	L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 สำหรับ q เท่ากับ 100 W/m^2	35
4.4	อุณหภูมิที่ผนังท่อกรณีติดปล่องแบบถ่างซึ่งมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 โดยที่ (ก) L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 สำหรับ q เท่ากับ 300 W/m^2	36
4.5	อุณหภูมิที่ผนังท่อกรณีติดปล่องแบบตรงแนวดิ่งซึ่งมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 โดยที่ (ก) L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 สำหรับ q เท่ากับ 100 W/m^2	37
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 (จากการทดลอง)	38
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 (จากการทดลอง)	39
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 (จากการทดลอง)	40
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 (จากการทดลอง)	41
4.10	การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อให้ความร้อนแก่ผนังท่อ 300 W/m^2 (ก) ภาพการกระจายของอุณหภูมิ กรณีท่อไม่ติดปล่อง (ข) ภาพการกระจายของอุณหภูมิ กรณีท่อติดปล่องแบบถ่าง ($L/L_h = 2$ โดยที่ $B/b = 3$) และ (ค) ภาพการกระจายของความเร็วตามแนวแกน y กรณีท่อที่ติดปล่องแบบถ่าง ($L/L_h = 2$ โดยที่ $B/b = 3$)	42
4.11	เปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิในท่อกรณี (ก) ท่อไม่ติดปล่อง (ข) ท่อติดปล่องแบบตรงแนวดิ่ง ($L/L_h = 2$, $B/b = 3$) และ (ค) ท่อติดปล่องแบบถ่าง ($L/L_h = 3$, $B/b = 5$) โดยที่ L_h/b เท่ากับ 5 และ q เท่ากับ 100 W/m^2	43
4.12	เปรียบเทียบช่วงทางเข้าของอุณหภูมิในกรณี L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 สำหรับ (ก) ท่อไม่ติดปล่อง (ข) ท่อติดปล่องแบบถ่าง L/L_h เท่ากับ 2, B/b เท่ากับ 3 (ค) ท่อติดปล่องแบบถ่าง L/L_h เท่ากับ 2, B/b เท่ากับ 4 (ง) ท่อติดปล่องแบบถ่าง L/L_h เท่ากับ 3, B/b เท่ากับ 3 และ (จ) ท่อติดปล่องแบบถ่าง L/L_h เท่ากับ 3, B/b เท่ากับ 4	44

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 ลักษณะการไหลในกรณีท่อซึ่งติดปล่องแบบถ่าง โดยมีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 และ L/L_h เท่ากับ 2 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 สำหรับ (ก) B/b เท่ากับ 2 (ข) B/b เท่ากับ 3 (ค) B/b เท่ากับ 4 และ (ง) B/b เท่ากับ 5 45

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 (จากโปรแกรม) 47

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 (จากโปรแกรม) 47

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 (จากโปรแกรม) 48

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 (จากโปรแกรม) 49

4.18 เปรียบเทียบค่า Nu ที่ได้จากการศึกษาวิจัยกับสมการของ Auletta และคณะ (2000) ในกรณี (ก) L/L_h เท่ากับ 2 และ (ข) L/L_h เท่ากับ 3 52

4.19 เส้นกระแสการไหลภายในท่อที่ไม่ติดปล่องและท่อที่ติดปล่องแบบถ่าง 54

4.20 เส้นกระแสการไหล สำหรับ L/L_h เท่ากับ 2 โดยที่ (ก) ท่อไม่ติดปล่อง (ข) B/b เท่ากับ 1 (ค) B/b เท่ากับ 1.3 (ง) B/b เท่ากับ 1.7 (จ) B/b เท่ากับ 2.2 (ฉ) B/b เท่ากับ 2.9 และ (ช) B/b เท่ากับ 10.7 (จากงานวิจัยของ Asako และคณะ (1989) 54

ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับ Ra(B/b) ที่ได้จากการทดลอง 80

ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยกับ Ra(B/b) ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป 81

ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Nu เฉลี่ยทั้งท่อกับสัดส่วน B/b สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 83

ง.2 เปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยทั้งท่อ จากผลการทดลองและโปรแกรม สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 84

ง.3 เปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยทั้งท่อ จากผลการทดลองและโปรแกรม สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_h/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 100 W/m^2 84

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

ง.4 เปรียบเทียบค่า Nu เฉลี่ยทั้งท่อ จากผลการทดลองและโปรแกรม สำหรับท่อที่มีสัดส่วน L_t/b เท่ากับ 2.5 เมื่อ q เท่ากับ 300 W/m^2 85

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
b	ระยะห่างของผนังท่อ	m
B	ระยะห่างของปลายปล่อง	m
c_p	ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	J/kg $^{\circ}$C
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
Gr	ตัวเลขกราซอฟ (Grashof number)	
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$W/m^2 \cdot {}^{\circ}C$
H	ความยาวของผนังท่อ	m
k	ค่าการนำความร้อน	$W/m \cdot {}^{\circ}C$
L	ความสูงรวมของท่อและปล่อง	m
L_h	ความสูงของท่อ	m
M	ตัวเลขมัค (Mach number)	
Nu	ตัวเลขนัสเซลท์เฉลี่ยทั้งท่อ (Nusselt number)	
P	ความดัน	N/m^2
Pr	ตัวเลขพรันทล์ (Prandtl number)	
q″	ฟลักซ์ความร้อน	W/m^2
Ra	ตัวเลขเรย์ลีจ์ (Rayleigh number)	
Re	ตัวเลขเรย์โนลดส์ (Reynolds number)	
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}$C
v	ความเร็ว	m/s
Y	ระยะตามสัดส่วนความสูงของท่อ	
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงปริมาตร	K^{-1}
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
μ	ความหนืดสัมบูรณ์	kg/m·s
υ	ความหนืดเชิงจลน์	m^2/s
Δ	ค่าความแตกต่าง	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ตัวกำกับล่าง	ความหมาย
o	อากาศสิ่งแวดล้อม
w	ที่ผนังท่อ
a	ค่าเฉลี่ย
x, y	แนวแกนฉาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved