สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบาญรูปประกอบ	ญ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	4
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	11
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	11
1.5 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	11
บทที่ 2 หลักการทฤษฎี	
2.1 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรง	12
2.2 ขีดจำกัดอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของเทอร์โมไซฟอน	24
2.3 ลักษณะการถ่ายความร้อนของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง	28
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองขีดจำกัดสมรรถนะ	
3.1 โครงสร้างการทำแบบจำลอง	39
3.2 การหาค่าความหนาเฉลี่ยในส่วนควบแน่น	46
3.3 ปรากฏการณ์การแห้งเหือด	53
3.4 ปรากฏการณ์การท่วม	58
3.5 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด และค่ามุมเอียงที่เหมาะสม	65

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบแบบจำลองและการวิเคราะห์แบบจำลอง	
4.1 การทำนายค่าอัตราความร้อนวิกฤติด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง	68
4.2 ผลของค่าอัตราส่วนสนทรรศน์	69
4.3 ผลของชนิดสารทำงานต่อมุมเอียงที่เหมาะสม	71
4.4 ผลของความยาวส่วนควบแน่นต่อค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด	72
4.5 ผลของตัวเลขของบอนด์ต่อค่า Q_{ci}/Q_{c90}	73
4.6 อัตราส่วนการเติมที่มีผลต่ออัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติ	73
4.7 ผลของสารทำงานที่มีต่ออัตราส่วนการผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดต่อการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในแนวดิ่ง	74
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลแบบจำลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	94
ภาคผนวก ก รูปการหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติและรูปแสดงการแบบเทียบตัวคูณประจำมุมเอียง	95
ภาคผนวก ข ข้อมูลการคำนวณและข้อมูลการทดลอง	114
ภาคผนวก ค โปรแกรมช่วยคำนวณ	124
ประวัติผู้เขียน	129

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University

สารบาญรูปประกอบ

รูปประกอบ		หน้า
รูป 1.1	เทอร์โมไซฟอนแบบตั้งตรง	2
รูป 1.2	เทอร์โมไซฟอนแบบเอียง	2
รูป 1.3	ผลการคำนวณการส่งผ่านความร้อนในกรณีที่เกิดขีดจำกัดการท่วมจากสมการความสัมพันธ์และข้อมูลจากการทดลอง	5
รูป 1.4	เปรียบเทียบผลของ Bond number กับอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤตที่มุม 90 องศา กับค่าที่ได้จากสมการต่างๆ	6
รูป 1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่งผ่านความร้อนวิกฤตกับอัตราส่วนการเติม	6
รูป 1.6	ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับความสัมพันธ์ของ Wallis Bezrodnyi และ Tien and Chung	7
รูป 1.7	ลักษณะของ $Q_{critical}/Q_{C90}$ ที่มุมเอียงต่างๆ	9
รูป 1.8	อัตราส่วนของ $Q_{critical}/Q_{C90}$ ที่มุมเอียงใดๆ	10
รูป 2.1	แสดงกลไกของ Pool boiling ในส่วนของ Evaporator	16
รูป 2.2	แสดงการกลั่นตัวบนพื้นผิวในแนวตั้ง	18
รูป 2.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับมุมเอียง	20
รูป 2.4	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความต้านทานความร้อนภายในกับมุมเอียง	21
รูป 2.5	แสดงอุณหภูมิที่ระดับต่างๆในส่วนทำระเหย	23
รูป 2.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำ(T_s) กับอัตราการเปลี่ยนอุณหภูมิเทียบกับระดับความลึก(dT_s/dH)	23
รูป 2.7	แสดงถึงการเหือดแห้งเมื่อเติมสารทำงานน้อยเกินไป	25
รูป 2.8	แสดงถึงการเหือดแห้งเมื่อเติมสารทำงานมากเกินไป	25
รูป 2.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบอนด์นัมเบอร์กับค่าปัจจัย f_1	27
รูป 2.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของท่อกับ f_3	27
รูป 2.11	แสดงการไหลเวียนแบบที่สองในการควบแน่นแบบฟิล์มในท่อเอียง	28
รูป 2.12	แสดงการไหลเวียนแบบที่สองในการเดือดแบบแอ่งของท่อเอียง	30
รูป 2.13	แสดงการไหลเวียนแบบที่สองของแผ่นฟิล์มเดือดในท่อเอียง	30

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูป 2.14 แสดงแบบจำลองเทอร์โมไซฟอนแบบสองสถานะในแนวเอียง	31
รูป 2.15 แสดงผลของมุมเอียงที่มีต่ออัตราความร้อนสูงสุดในเทอร์โมไซฟอนสองสถานะ	33
รูป 2.16 แสดงช่วงมุมเอียงของเทอร์โมไซฟอนสองสถานะภายใต้สภาวะขีดจำกัด	33
รูป 2.17 แสดงผลของมุมเอียงต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบเดือดที่ความดันสูง	35
รูป 2.18 แสดงผลของมุมเอียงที่มีต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบควบแน่นที่ความดันสูง	35
รูป 2.19 แสดงผลของความดันและตัวเลข Reynolds ต่อการถ่ายเทความร้อนในส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง	38
รูป 2.20 แสดงการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่วัดค่าได้กับการคำนวณ	38
รูป 3.1 แสดงรูปแบบการไหลในเทอร์โมไซฟอนปิดสองสถานะแบบเอียง	40
รูป 3.2 แสดงรูปแบบการไหลแบบแยกชั้นและแบบฟองในส่วนทำระเหย	42
รูป 3.3 แสดงความหนาฟิล์มที่ส่วนควบแน่น	44
รูป 3.4 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่เกิดขึ้นจริงในเทอร์โมไซฟอนแบบเอียง	45
รูป 3.5 แสดงแผนภูมิของแรงในส่วนควบแน่นตามแนวยาวท่อ	47
รูป 3.6 แสดงแผนภูมิของแรงในส่วนควบแน่นตามแนวสัมผัส	47
รูป 3.7 แสดงสมดุลย์มวลที่เกิดขึ้นในฟิล์มของเหลว	47
รูป 3.8 แสดงความหนาฟิล์มของเหลวเฉลี่ย	52
รูป 3.9 แสดงตำแหน่ง Le, Lb และ Lc ในแบบจำลอง	52
รูป 3.10 การหาค่าอัตราส่วนการเติมที่ฟิล์มเคลือบผนังเทอร์โมไซฟอนได้ทั่วพอดี	55
รูป 3.11 แสดงกลไกการเกิดปรากฏการณ์การท่วมในส่วนทำระเหยตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น	59
รูป 3.12 แสดงแรงที่กระทำบนผิวรอยต่อไอของเหลว	61
รูป 3.13 การหาค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุดและค่ามุมเอียงที่เหมาะสม	67

สารบัญรูปประกอบ(ต่อ)

รูปประกอบ	หน้า
รูป 4.1 แสดงผลการทำนายค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดๆ โดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นเทียบกับข้อมูลการทดลอง	76
รูป 4.2 ค่าตัวคูณประจำมุมเอียงของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเทียบกับแบบจำลองของนักวิจัยท่านอื่น กรณีสารทำงานเป็น Ethanol Le/d = 21.5 ความดันทำงาน 1 บรรยากาศ	77
รูป 4.3 ค่าตัวคูณประจำมุมเอียงของแบบจำลองที่สร้างขึ้นเทียบกับแบบจำลองของนักวิจัยท่านอื่น กรณีสารทำงานเป็นน้ำ Le/d = 21.5 ความดันทำงาน 1 บรรยากาศ	78
รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Qcimax/Qc90 กับ Le/d โดยใช้ข้อมูลการทดลองของ Shiraishi et al. [16] เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้น	79
รูป 4.5 กราฟแสดงผลของ Le/d ต่อค่าความหนาแน่นความร้อนวิกฤติ	80
รูป 4.6 กราฟแสดงมุมที่เหมาะสมของสารทำงานชนิดต่างๆ กรณี Le = 0.15, 0.30 และ 0.45 เมตร Lc = 0.44 เมตร d = 14 มิลลิเมตร	81
รูป 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงที่เหมาะสมและค่าเส้นผ่าศูนย์กลางต่อค่าความยาวคลื่นวิกฤติ	82
รูป 4.8 ผลของความยาวส่วนควบแน่นต่อค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติ และค่ามุมเอียงที่เหมาะสม กรณีสารทำงานเป็น R113 Tv = 50 C	83
รูป 4.9 แสดงผลการทำนายของ Saber ในการทำนายผลของความยาวส่วนควบแน่นต่ออัตราการส่งผ่านความร้อน	84
รูป 4.10 แสดงผลของ Bo ต่อค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดๆ ต่อค่าอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่แนวดิ่ง Qci/Qc90	85
รูป 4.11 แสดงค่าอัตราส่วนการเติมที่ฟิล์มเคลือบผนังเทอร์โมไซฟอนได้ทั่วพอดี ในกรณีที่สารทำงานเป็น R113 Le/d = 21 d = 21mm. Tv = 50 C	86
รูป 4.12 แสดงผลของสารทำงานต่อค่า Qci/Qc90	87

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	m
Ku	Kutatelaze number, $\frac{\left(\frac{Q}{\pi d L_e}\right)}{\rho_v h_{fg}\left[\sigma g(\rho_l-\rho_v)/\rho_v^2\right]^{\frac{1}{4}}}$	
Ku*	Modified Kutatelaze number, $Ku \times \frac{L_e}{d} \times \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{\frac{1}{2}}$	
Ku′	Modified Kutatelaze number of Shiraishi et al. (1995), $Ku \times \frac{L_e}{d} \times \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{\frac{1}{2}}$	
Lc	ความยาวของส่วนควบแน่น	m
Le	ความยาวของส่วนทำระเหย	m
La	ความยาวของส่วนฉนวน	m
P	ความดันทำงานในเทอร์โมไซฟอน	Pa
Q_{ci}	อัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติที่มุมเอียงใดๆ	W
Q_{c90}	อัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติในแนวดิ่ง	W
Q_{cimax}	อัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด	W
Re_v	Vapor Reynolds number	
Re_l	Liquid Reynolds number	
T_c	อุณหภูมิแหล่งรับความร้อน	°C
T_H	อุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน	°C
T_v	อุณหภูมิไอ	°C
Ts	อุณหภูมิผิว	°C
Tsat	อุณหภูมิอิ่มตัว	°C
U_L	ความเร็วที่ผิวของของเหลว	m/s
U_G	ความเร็วที่ผิวของไอ	m/s

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
d	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของส่วนทำระเหย	m
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝงไอ-ของเหลว	J/kg
$\dot{m}$	อัตราการไหลโดยมวล	kg/s
q_{cmax}	ความหนาแน่นอัตราการส่งผ่านความร้อนวิกฤติสูงสุด ต่อหน่วยพื้นที่	W/m^2
r	ศมีภายในของส่วนทำระเหย	m
v	ความเร็วไอในส่วนทำระเหย	m/s
α	มุมเอียงของท่อจากแนวดิ่ง	degree
β	มุมเอียงจากแนวระดับ	degree
δ	ความหนาฟิล์มของเหลว	m
μ_L	ความหนืดสัมบูรณ์ของของเหลว	m^3/s
ρ_v	ความหนาแน่นของไอ	kg/m^3
ρ_l	ความหนาแน่นของของเหลว	kg/m^3
σ	ความตึงผิว	N/m
ΔT_H	ความแตกต่างของอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อน กับอุณหภูมิไอ	°C
τ_1	ความเค้นเฉือนที่ผนังกระทำกับของฟิล์มเหลวในทิศทาง ตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของเทอร์โมไซฟอน	Pa
τ_2	ความเค้นเฉือนที่ผนังกระทำกับของฟิล์มเหลวในทิศทาง ตามแนวเทอร์โมไซฟอน	Pa

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University