ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249551

การพัฒนากระบวนการผลิตท่อความร้อนที่ใช้วัสดุพรุนแบบไฟเบอร์

ธัศวเทพ ยงสุวรรณศิลป์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249551
b00253963

การพัฒนากระบวนการผลิตท่อความร้อนที่ใช้วัสดุพรุนแบบไฟเบอร์

อัศวเทพ ยงสุวรรณศิลป์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตุลาคม 2554

การพัฒนากระบวนการผลิตท่อความร้อนที่ใช้วัสดุพรุนแบบไฟเบอร์

อัศวเทพ ยงสุวรรณศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ศ. ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล

.....กรรมการ
ผศ. ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

.....กรรมการ
ผศ. ดร. เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล

.....กรรมการ
ดร. ถนัด เกษประดิษฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผศ. ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

14 ตุลาคม 2554

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความรู้คำแนะนำอย่างเอาใจใส่ในทุกๆขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์ ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนทำให้ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐ์ สัมภัตตะกุล ที่กรุณารับเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำการแก้ไขปัญหาต่างๆ และประสิทธิประสาทวิชาความรู้ในด้านต่าง ๆ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.นิติ คำเมืองลือ คุณอัศวินี ด่านพินิจ คุณประชา ยืนยงกุล คุณนำพร ปัญโญใหญ่ คุณณัฐ ธัชยะพงษ์ คุณทิพาพร คำแดง คุณวีระนุช อินทะกัณฑ์ คุณปรเมศก์ ปธิเก คุณพรรณไท คำแดงยอดไตย คุณโสภณ สินสร้าง คุณปรเมศวร์ สุทธิประภา คุณเพียงกัน ทองแต้ม และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ บริษัท ฟูจิคูระ อิเล็คทรอนิคส์ (ประเทศไทย) จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณวิชาญ กำธรกิตติกุล คุณสุนี ลิมป์ธีระกุล คุณณัฐพงษ์ แสงสิรคุปต์ โดยความร่วมมือกับ ห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งให้โอกาสและเวลาในการศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิตกระทั่งจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด และครอบครัว รวมถึง คุณ กาญจนา เหลืองไพรินทร์ ที่คอยให้กำลังใจ สนับสนุนและ เอาใจใส่ดูแลทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านตั้งแต่การศึกษาระดับประถมศึกษาจนถึงระดับปริญญาตรีที่ให้การศึกษาที่ดี อบรม สั่งสอน ผู้จัดทำตลอดมา

ขอขอบคุณ บริษัท นิวแม็ก จำกัด ที่จัดการอบรมด้านเทคโนโลยีสุญญากาศ รวมถึงจัดหาปั๊มสุญญากาศในการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆกระทั่งจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งใดผู้จัดทำล่วงเกินทั้งกายวาจาใจหรือผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยในข้อความผิดพลาดนั้น และหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้คงเป็นประโยชน์ต่อส่วนรวมและ ผู้ที่สนใจต่อไป

อัศวเทพ ยงสุวรรณศิลป์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตท่อความร้อนที่ใช้วัสดุพรุนแบบไฟเบอร์
ผู้เขียน	นาย อัศวเทพ ยงสุวรรณศิลป์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ. ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

บทคัดย่อ

249551

เนื่องจากในปัจจุบันมีความจำเป็นต้องปรับปรุงกระบวนการผลิตท่อความร้อนให้มีสมรรถนะทางความร้อนที่สูงขึ้นและลดของเสียในกระบวนการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตท่อความร้อนในส่วนของกระบวนการควบคุมปริมาณสารทำงานและความดันสุญญากาศ ซึ่งมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนโดยตรง เนื่องจากท่อความร้อนจะแสดงสมรรถนะทางความร้อนที่ดีที่สุดในช่วงปริมาณสารทำงานที่เหมาะสมเพียงช่วงเดียวเท่านั้น กล่าวคือมีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารทำงานและสมรรถนะทางความร้อนเป็นแบบพหุนามกำลังสอง (Quadratic polynomial) โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตจะเริ่มจากการเติมน้ำ สร้างสภาวะสุญญากาศ ต้มเพื่อไล่ก๊าซ และ คายไอน้ำส่วนเกินพร้อมทั้งก๊าซที่ไม่ควบแน่นออก โดยงานวิจัยนี้จะพิจารณาการจัดลำดับหรือตัดบางขั้นตอนออก เพื่อควบคุมปริมาณสารทำงานให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความเสถียร (Stability) ของสมรรถนะทางความร้อน ทำการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนที่มีโครงสร้างวัสดุพรุนแบบไฟเบอร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 250 มิลลิเมตร และใช้น้ำดีไอออไนซ์เป็นสารทำงาน โดยควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศทั้งแบบไล่ก๊าซและไม่ไล่ก๊าซ ให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ที่กำลังความร้อน 10, 20 และ 35 วัตต์ และวิเคราะห์ผลของกระบวนการควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศที่มีผลต่อปริมาณสารทำงานและ

249551

สมรรถนะท่อความร้อน จากผลการทดลอง พบว่า ชิ้นงานตัวอย่างแบบไม่ไล่ก๊าซสามารถควบคุมปริมาณสารทำงานได้ดีกว่าแบบไล่ก๊าซ และมีสมรรถนะทางความร้อนของท่อความร้อนที่ดีกว่าแบบไล่ก๊าซ โดยชิ้นงานที่ไม่ไล่ก๊าซมีค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดฮีตเตอร์กับจุดควบแน่นที่ 13.30 ºC ซึ่งต่ำกว่าชิ้นงานที่ไล่ก๊าซที่มีค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดฮีตเตอร์กับจุดควบแน่นที่ 17.49 ºC อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ไม่เข้าพวก (Outlier) ของท่อความร้อนแบบไม่ไล่ก๊าซ มีมากกว่าชิ้นงานที่ไล่ก๊าซ โดยมีชิ้นงานที่ไม่เข้าพวกจำนวน 17.17% และ 3% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการควบคุมสภาวะสุญญากาศให้ดีโดยเปลี่ยนปั๊มสุญญากาศที่สามารถทำความดันสุญญากาศได้ดีขึ้นโดยสร้างความดันสุญญากาศได้มากกว่า -95 กิโลปาสคาล จากผลการทดสอบท่อความร้อนที่ใช้ปั๊มสุญญากาศใหม่ พบว่าสามารถลดจำนวนชิ้นงานที่ไม่เข้าพวกเหลือเพียง 2.35% และเมื่อคำนวณทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่าการเปลี่ยนปั๊มสุญญากาศเพื่อสร้างสภาวะสุญญากาศและควบคุมปริมาณสารทำงานแบบไม่ไล่ก๊าซมีระยะคืนทุนประมาณ 1 เดือน

Thesis Title Development of Fibrous Porous-Media Heat Pipe Manufacturing Process

Author Mr. Atsawathep Yongsuwannasilp

Degree Master of Engineering (Mechanical Engineering)

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Phrut Sakulchangsatjatai

ABSTRACT

249551

At the present, it is necessary to develop the heat pipe manufacturing process for improving the thermal performance of heat pipe and reducing defects in processes. In this research, the working fluid and vacuum pressure control were selected to study and develop as the key process due to this process affect to thermal performance directly. Heat pipe will perform the best thermal performance with an optimum range of selective working fluid, and heat pipe characteristic was best fitted to a quadratic polynomial relation between working fluid and thermal performance. Currently, the manufacturing process were: water charge, vacuum, boil for degassing and exhaust excess working fluid vapor and non-condensable of gas but the re-order and/or eliminate some operations will be made for receiving the higher precision of working fluid control , which directly affected to heat pipe thermal performance stability. Fabricated heat pipe sample with fiber composite structure, diameter 6 mm., length 250 mm., deionized water as working fluid and control with both degas and non-degas operations. Then heat pipe were tested by heater with power input of 10, 20 and 35 watts for analysis effect of water charge and exhaust process to thermal performance. As a result, non-degas sample can be better controlled water quantity and thermal performance than degas sample. The temperature difference between heater and condenser (T_h-T_c) of non-degas sample at power input 35 watts was 13.30 °C, which was lower than degas sample as 17.49 °C, however, the outlier of non-degas sample was found more than

249551

degas sample. There were outliers 17.17% and 3% respectively. Moreover, the vacuum control would be improved by new type of vacuum pump, which can create better vacuum pressure (More than -95 kPa). The heat pipe with fabricated from new pump system, can reduce outlier to 2.35%. From engineering economy calculation, the pump change with non-degas operation could be used and payback period is 1 month approximately.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	7
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	7
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	7
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	8
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อน	8
2.2 หลักการและทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	14
2.3 หลักการและทฤษฎีอื่นๆที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดสอบ	19
3.1 แผนการดำเนินการ	19
3.2 วิธีการวิจัย	19
3.3 ตัวแปรในการทดสอบ	21
3.4 ชุดทดสอบ	22
3.5 อุปกรณ์ประกอบและเครื่องมือวัด	26
3.6 ขั้นตอนการทดสอบ	36

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ	39
4.1 ผลของการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างและการตั้งค่าอุปกรณ์ต่างๆ	39
4.2 ผลของการเติมสารทำงานและควบคุมปริมาณสารทำงาน	46
4.3 ผลการทดสอบสมรรถนะท่อความร้อนในแนวดิ่งด้วยน้ำร้อน	52
4.4 ผลการทดสอบสมรรถนะท่อความร้อนในแนวนอนด้วยฮีตเตอร์	59
4.5 ผลของการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิและความดันสุญญากาศ ขณะดำเนินการควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	85
4.6 ผลของการปรับปรุงเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศและผลการทดสอบทางฮีตเตอร์หลังการปรับปรุงเครื่องจักร	91
4.7 การคำนวนและเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม	96
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	111
5.1 สรุปผลงานวิจัย	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112
บรรณานุกรม	113
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์และผลการทดลองการกระจายตัวของความดันสุญญากาศภายในท่อความร้อน	115
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผล Q และ q จากการเปลี่ยนอัตราส่วนการเติม	119
ประวัติผู้เขียน	128

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 การตั้งค่าของเครื่องเติมสารทำงานและเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงาน และสภาวะสุญญากาศ	45
4.2 ตัวอย่างการบันทึกค่าการเติมสารทำงานและการควบคุมสารทำงานในแต่ละช่วง	46
4.3 การวางแผนการทดสอบการกระจายอุณหภูมิ 16 รูปแบบ	73
4.4 เงื่อนไขในการควบคุมการเติมสารและควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	92
4.5 รายละเอียด ความถี่ และต้นทุนในการซ่อมบำรุงหัวน้ำร้อน	101
4.6 แสดงทางเลือกในการแก้ปัญหาทั้ง 3 ทางเลือก	103
4.7 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องทางเศรษฐศาสตร์ทางเครื่องจักร	104
4.8 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องทางเศรษฐศาสตร์ทางเครื่องจักร	106
4.9 แสดงเวลาการทำงานของขั้นตอนการควบสภาวะสุญญากาศ และการเติมสารทำงานของทั้ง 3 ทางเลือกในการแก้ปัญหา	106
4.10 แสดงผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ทางวิธีการ	107
4.11 แสดงการประเมินค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องทางเศรษฐศาสตร์ทางวัสดุ	107
4.12 แสดงผลการประเมินค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องทางเศรษฐศาสตร์ทางวัสดุ	108
4.13 ข้อมูลเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่าง แบบที่1กับแบบที่2	109
4.14 ข้อมูลเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ระหว่าง แบบที่1กับแบบที่3	109
5.1 สรุปผลค่าเฉลี่ยของผลต่างอุณหภูมิ (T_e-T_c) และ (T_h-T_c) ทั้งการควบคุมปริมาณสารทำงานแบบที่มีการไล่ก๊าซและไม่มีการไล่ก๊าซ	111
5.2 สรุปผลการทดสอบทางน้ำร้อนและเปอร์เซ็นท์ขึ้นงานที่ไม่เข้าพวก	112

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนรวม และ สัดส่วนการเติม	4
1.2	ผลของการเติมสารทำงานต่อความต้านทานทางความร้อนของท่อความร้อนที่ทำงานในแนวระดับ	5
1.3	ผลของสัดส่วนการเติมสารทำงานต่อค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดและความต้านทานทางความร้อน(เมทานอล – 1.0 ไมครอน)	6
2.1	หลักการทำงานของท่อความร้อน	8
2.2	เครือข่ายทางอุดมคติของค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของท่อความร้อน	9
2.3	ขีดจำกัดการส่งถ่ายความร้อนของท่อความร้อน	13
3.1	แผนภาพขั้นตอนการวิจัย	20
3.2	ชุดทดสอบทางน้ำร้อน	22
3.3	เงื่อนไขการทดสอบด้วยน้ำร้อนสำหรับท่อความร้อนในแนวดิ่ง	23
3.4	ชุดทดสอบทางฮีทเตอร์สำหรับท่อกลม (A) ฮีทซิ้งค์ทำหน้าที่ระบายความร้อนในส่วนควบแน่นโดยมีร่องกลมเพื่อรองรับท่อความร้อน (B) กล่องทองแดงทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเสมือนหน่วยประมวลผลกลาง(CPU)โดยมีร่องกลมเพื่อรองรับท่อความร้อน (C) ชุดทดสอบทางฮีทเตอร์สำหรับท่อกลมที่ประกอบส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน	24
3.5	ชุดทดสอบทางฮีทเตอร์สำหรับท่อแบน (A) ฮีทซิ้งค์ทำหน้าที่ระบายความร้อนในส่วนควบแน่นโดยมีร่องกลมเพื่อรองรับท่อความร้อน (B) กล่องทองแดงทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนเสมือนหน่วยประมวลผลกลาง(CPU)โดยมีผิวหน้าเรียบเพื่อรองรับท่อความร้อน (C) ชุดทดสอบทางฮีทเตอร์สำหรับท่อแบนที่ประกอบส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน	25
3.6	เงื่อนไขการทดสอบทดสอบด้วยฮีตเตอร์สำหรับท่อความร้อนในแนวระดับ	26

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.7 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply) ยี่ห้อ Good Will รุ่น GPR-7550D	27
3.8 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply) ยี่ห้อ Good Will รุ่น GPC-3030D	27
3.9 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data acquisition)	28
3.10 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) และตัวต่อ (Thermal connector) Type K	28
3.11 ลักษณะการติดตั้งชุดทดสอบและอุปกรณ์ต่างๆ	29
3.12 เครื่องเติมสารทำงาน	30
3.13 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น AY-220	30
3.14 เครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	31
3.15 ปั๊มสุญญากาศชนิด Liquid ring และ ชิลเลอร์ (Chiller) ทำงานร่วมกันเพื่อดูดอากาศออกจากท่อความร้อน , ถังสำรองแรงดัน และระบบท่อต่างๆ เพื่อสร้างสุญญากาศในท่อความร้อน	31
3.16 เกจ์วัดความดันแบบดิจิตอลและถังสำรองแรงดัน ซึ่งประกอบเข้าด้วยกัน เพื่อลดเวลาในการดูดอากาศพร้อมทั้งเพิ่มความเสถียรของแรงดันสุญญากาศให้กับระบบ โดยมีเกจน์วัดความดันแบบดิจิตอลเป็นส่วนตรวจสอบแรงดันภายในของถังสำรองแรงดัน	32
3.17 โซลินอยด์วาล์ว (Solenoid valve) เป็นวาล์วแบบแม่เหล็ก โดยสั่งการเปิดและปิดด้วยเครื่องตั้งเวลา (Timer) และชุดควบคุมซึ่งเป็นแบบ PLC (Programmable logic controller) เพื่อตัดหรือต่อท่อความร้อนเข้ากับระบบทำสุญญากาศ	32
3.18 เครื่องตั้งเวลา (Timer) ควบคุมการทำงานแต่ละช่วงของเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	33
3.19 เกจ์วัดความดันแบบดิจิตอล (Digital pressure sensor) ยี่ห้อ Keyence, รุ่น AP-C30W และข้อต่อทองเหลืองแบบ 4 ทาง	33

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.20	การติดตั้งเกจ์วัดความดันแบบดิจิตอลเข้ากับเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	34
3.21	เครื่องกดทับเพื่อทับแบนและควบคุมความหนาให้ชิ้นงาน	34
3.22	ถังความดันสำหรับทดสอบการรั่วด้วยวิธีความดันอากาศ	35
3.23	ตู้อบแบบพาความร้อนใช้สำหรับบ่มท่อความร้อน	35
3.24	แผนผังขั้นตอนการทดสอบ	36
4.1	ลักษณะของปลายท่อที่ลดรูปและขนาดรูเติมสารทำงาน	39
4.2	ข้อมูลของขนาดรูเติมสารจากการสุ่มจำนวน 13 ชิ้นในการผลิตจริงแบบเชิงปริมาณ	40
4.3	ข้อมูลของขนาดรูเติมสารจากการสุ่มจำนวน 30 ชิ้นในการผลิตชิ้นงานตัวอย่าง	40
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารทำงานและความต้านทานทางความร้อน (R_{e-c} , R_{h-c}) และอุณหภูมิฮีตเตอร์ (T_h) แบบท่อกลมที่ กำลังความร้อน 35วัตต์	42
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารทำงานและความต้านทานทางความร้อน (R_{e-c} , R_{h-c}) และอุณหภูมิฮีตเตอร์ (T_h) แบบท่อแบนที่ กำลังความร้อน 35วัตต์	43
4.6	การกำหนดค่าที่เครื่องตั้งเวลา (Timer) เพื่อดูดอากาศที่ 10 วินาที จุ่มและต้มในน้ำร้อนที่ 40 วินาที และ คายไอน้ำส่วนเกินที่ 6.5 วินาทีในกรณีที่มีการไล่ก๊าซ	45
4.7	การกำหนดค่าที่เครื่องตั้งเวลา (Timer) เพื่อดูดอากาศที่ 10 วินาที จุ่มและต้มในน้ำร้อนที่ 5 วินาที และ คายไอน้ำส่วนเกินที่ 3 วินาทีในกรณีที่ไม่มีการไล่ก๊าซ	45
4.8	ตวงน้ำร้อนออกเพื่อไม่เกิดการต้มสำหรับการควบคุมปริมาณสารทำงานสำหรับทำท่อความร้อนแบบไม่ไล่ก๊าซ	46
4.9	ผลของการเติมสารทำงานแบบมีการไล่ก๊าซซึ่งจะเติมเกินจากค่าที่ต้องการ	47
4.10	ผลของการเติมสารทำงานแบบไม่มีการไล่ก๊าซซึ่งจะเติมพอดีกับค่าที่ต้องการ	47
4.11	ผลของการควบคุมปริมาณสารทำงานแบบมีการไล่ก๊าซ	48
4.12	ผลของการควบคุมปริมาณสารทำงานแบบไม่มีการไล่ก๊าซ	48

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.13 ผลการเปรียบเทียบการควบคุมปริมาณสารทำงานแบบมีการไล่ก๊าซ และไม่มีการไล่ก๊าซ	49
4.14 ผลของการคายสารทำงานออกจากท่อในกรณีมีการไล่ก๊าซ	50
4.15 ผลของการคายสารทำงานออกจากท่อในกรณีไม่มีการไล่ก๊าซ	50
4.16 ผลเปรียบเทียบการคายสารทำงานออกจากท่อทั้งแบบมีการไล่ก๊าซ และไม่มีการไล่ก๊าซ	51
4.17 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ทดสอบที่เวลา 30 และ 60 วินาที	53
4.18 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ทดสอบที่เวลา 30 และ 60 วินาที	54
4.19 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่เวลา 30 วินาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C	54
4.20 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่เวลา 60 วินาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C	55
4.21 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C ทดสอบที่เวลา 30 และ 60 วินาที	56
4.22 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C ทดสอบที่เวลา 30และ60 วินาที	56
4.23 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่เวลา 30 วินาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C	57
4.24 การเปรียบเทียบผลการทดสอบน้ำร้อนที่เวลา 60 วินาที ทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80 °C	57
4.25 การเปรียบเทียบผลการทดสอบทางน้ำร้อนทั้ง 4 สภาวะ	58
4.26 จุดวัดในแต่ละตำแหน่งเพื่อทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิ	590

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.27	ผลการกระจายอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบกลมที่มีการไล่ก๊าซโดยเลือกชิ้นงานที่มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิจุดปลายท่อที่อยู่ในเกณฑ์ค่าเฉลี่ย	60
4.28	ผลการกระจายอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบแบนที่มีการไล่ก๊าซโดยเลือกชิ้นงานที่มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิจุดปลายท่อที่อยู่ในเกณฑ์ค่าเฉลี่ย	60
4.29	ผลการกระจายอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบกลมที่ไม่มีการไล่ก๊าซโดยเลือกชิ้นงานที่มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิจุดปลายท่อที่สูงที่สุด	61
4.30	ผลการกระจายอุณหภูมิของท่อความร้อนแบบแบนที่ไม่มีการไล่ก๊าซโดยเลือกชิ้นงานที่มีผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิจุดปลายท่อที่สูงที่สุด	61
4.31	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดทำระเหยและจุดควบแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่มีการไล่ก๊าซที่กำลังความร้อน 10 , 20 และ 35 วัตต์	63
4.32	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดฮีตเตอร์และจุดควบแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่มีการไล่ก๊าซที่กำลังความร้อน 10 , 20 และ 35 วัตต์	64
4.33	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดทำระเหยและจุดควบแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีการไล่ก๊าซที่กำลังความร้อน 10 , 20 และ 35 วัตต์	65
4.34	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดฮีตเตอร์และจุดควบแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่ไม่มีการไล่ก๊าซที่กำลังความร้อน 10 , 20 และ 35 วัตต์	66
4.35	ผลการ X-Ray เพื่อตรวจสอบสภาพของวัสดุพรุนแบบไฟเบอร์ภายใน	68
4.36	ผลการ X-Ray ด้านข้างเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบช่องว่างไอ	69
4.37	แบบของชิ้นงานที่ต้องการแก้ไขโดยความหนาที่ส่วนทำระเหยเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร	69
4.38	ช่วงการเปลี่ยนแปลงความหนาจาก 1.9 มิลลิเมตร ไปยัง 2.5 มิลลิเมตร	70
4.39	ลักษณะของพื้นที่การรับความร้อนและความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและความกว้าง	70
4.40	ผลหลังจากการทำซ้ำแสดงจากด้านบนและด้านข้างของชิ้นงาน	71
4.41	ปัญหาเรื่องความเรียบของชิ้นงาน (Flatness) หลังจากการทำซ้ำ	71

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.42	ปัญหาเรื่องการเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานซึ่งไม่เป็นไปตามแบบหลังจากการทำซ้ำ	71
4.43	ลักษณะชุดทดสอบเพื่อทดสอบการกระจายอุณหภูมิในแนวดิ่ง	72
4.44	ตัวอย่างการแสดงผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิบนท่อความร้อนตามระยะทาง	73
4.45	ผลการทดสอบของแบบที่1 การทดสอบในแนวนอน ชิ้นงานหนา 1.9 มิลลิเมตร	74
4.46	ผลการทดสอบของแบบที่ 2 การทดสอบในแนวตั้ง ชิ้นงานหนา 1.9 มิลลิเมตร	74
4.47	ผลการทดสอบของแบบที่ 3 การทดสอบในแนวนอน ชิ้นงานหนา 2.5 มิลลิเมตร	75
4.48	ผลการทดสอบของแบบที่4 การทดสอบในแนวตั้งนอน ชิ้นงานหนา 2.5 มิลลิเมตร	75
4.49	ผลของตัวแปรสัมพัทธ์ใหม่ ที่การทดสอบในแนวนอน ชิ้นงานหนา 1.9 มิลลิเมตร	78
4.50	ผลของตัวแปรสัมพัทธ์ใหม่ ที่การทดสอบในแนวตั้ง ชิ้นงานหนา 1.9 มิลลิเมตร	79
4.51	ผลของตัวแปรสัมพัทธ์ใหม่ ที่การทดสอบในแนวนอน ชิ้นงานหนา 2.5 มิลลิเมตร	80
4.52	ผลของตัวแปรสัมพัทธ์ใหม่ ที่การทดสอบในแนวตั้ง ชิ้นงานหนา 2.5 มิลลิเมตร	81
4.53	ผลของตัวแปรสัมพัทธ์ใหม่ของการทดสอบทั้ง 4 แบบ	83
4.54	ผลการเปรียบเทียบค่าความต้านทานทางความร้อนระหว่างจุดทำระเหยและจุดควบแน่น	84
4.55	ชุดวัดอุณหภูมิประกอบด้วย คอมพิวเตอร์, Data acquisition และ โปรแกรมวัดอุณหภูมิ	85
4.56	เครื่องเติมสารทำงานและเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและควบคุมสภาวะสุญญากาศ	86
4.57	การติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิบนท่อความร้อน โดยกำหนดให้จุด T102 อยู่บนสุดในบริเวณของท่อลด และจุด T103 อยู่ตรงกลางต่ำลงมาจากจุด T102 ประมาณ 15 มิลลิเมตรและจุด T104 อยู่ด้านล่างสุดต่ำลงมาจากจุด T103 ประมาณ 15 มิลลิเมตร	86

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.58	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่คาดหวังในขณะดำเนินการควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	87
4.59	ผลการวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดบนตัวท่อและอุณหภูมิน้ำร้อนที่ตั้งค่าไว้ที่ 70 °C โดยที่ กราฟ Time series 101 แสดงอุณหภูมิน้ำร้อน และกราฟ Time series 102,103 และ 104 แสดงอุณหภูมิในแต่ละจุดบนตัวท่อตามรูปที่ 4.57	88
4.60	ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงในขณะดำเนินการควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	89
4.61	ผลการควบคุมปริมาณสารทำงานในแต่ละหัว	90
4.62	ตัวอย่างของข้อต่อทั้งแบบอ่อนและแบบแข็งในระบบของเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	93
4.63	ลักษณะชิ้นงานตัวอย่างและเงื่อนไขในการผลิตเพื่อยืนยันผลหลังการปรับปรุงเครื่องจักร	94
4.64	ผลการเติมสารทำงาน	94
4.65	ผลการทดสอบทางฮีตเตอร์	95
4.66	การทำความเข้าใจกับปัญหาและวิเคราะห์ปัญหาก่อนการวิจัยและปรับปรุง	96
4.67	การวิเคราะห์ปัญหาด้วยหลักการ 4M	97
4.68	ลักษณะปั๊มสุญญากาศแบบ Oil re-circulating rotary vane	98
4.69	กระบอกสูบของเครื่องควบคุมปริมาณสารทำงานและสภาวะสุญญากาศ	99
4.70	หัวน้ำร้อนทำหน้าที่ในการควบคุมอุณหภูมิน้ำ	99
4.71	แผนการคำนวนค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับหัวน้ำร้อน	100
4.72	เวลาดำเนินการแต่ละช่วงที่กำหนดโดยเครื่องตั้งเวลา	101
4.73	เวลาที่ใช้ในแต่ละช่วงการทำงานตามความสัมพันธ์ของความดันและเวลา โดยที่ ช่วงที่ 1 ดูดอากาศออกจากถัง เวลาที่ใช้ไม่แน่นอนแล้วแต่ปริมาณการเติม ช่วงที่ 2 รักษาสถานะสุญญากาศ เวลาที่ใช้ 120 วินาที ช่วงที่ 3 ทำลายสุญญากาศ เวลาที่ใช้ 20 วินาที	102

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	m^2
B	มูลค่าเริ่มต้น	THB
B_t	มูลค่าในบัญชีหลังปีที่ t	THB
C_{pk}	ความสามารถของกระบวนการ	
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
d	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	J/kg·K
HPD	ท่อความร้อนที่ผ่านการไล่ก๊าซ	
HPND	ท่อความร้อนที่ไม่ผ่านการไล่ก๊าซ	
i	อัตราดอกเบี้ย	%
K	ค่าความสามารถในการซึมผ่าน	m^2
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m·K
k_{eff}	ค่าการนำความร้อนประสิทธิผล	W/m·K
l	ความยาว	m
l_a	ความยาวส่วนกันความร้อน	m
l_c	ความยาวส่วนควบแน่น	m
l_e	ความยาวส่วนทำระเหย	m
l_{eff}	ความยาวประสิทธิผล	m
n	อายุการใช้งานของสินทรัพย์	yr
n_p	ระยะเวลาคืนทุน	yr
NCF	กระแสเงินสดสุทธิ	THB
P	ความดัน	Pa
P	ค่าการลงทุนเบื้องต้น	THB

Q	อัตราการส่งถ่ายความร้อน	W
r	รัศมี	m
$R_{e\text{-}c}$	ความต้านทานความร้อนระหว่างส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น	$^{o}C/W$
$R_{h\text{-}c}$	ความต้านทานความร้อนระหว่างฮีตเตอร์และส่วนควบแน่น	$^{o}C/W$
S	พื้นที่ผิว	m^2
S	มูลค่าซากประมาณ	THB
SL	ค่าเสื่อมราคาคิดแบบเส้นตรง	THB
t	ปีที่	
T	อุณหภูมิ	^{o}C
Z	ความต้านทานทางความร้อน	K/W
Δ	ผลต่าง	
μ	ความหนืด	kg/m·s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
σ	แรงตึงผิว	N/m
θ	มุมสัมผัสวัดผ่านสถานะของเหลว	o

ตัวกำกับล่าง	ความหมาย
a	ส่วนกันความร้อน
c	ส่วนควบแน่น
co	ผิวด้านนอกของส่วนควบแน่น
e	ส่วนทำระเหย
eo	ผิวด้านนอกของส่วนทำระเหย
h	ฮีตเตอร์
i	ด้านใน
int	ภายใน
l	ของเหลว
o	ด้านนอก

total	ทั้งหมด
v	ไอ
w	วัสดุพรุน
w	น้ำ
x	ผนังท่อบรรจุ