ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
236059

การลดอุณหภูมิในระบบท่อลูกศีบน้ำโดยใช้ไนโตรเจนเหลวร้อน

ปรมะ สุทธิประภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
236059

การลดอุณหภูมิในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยท่อความร้อน

ปรเมศวร์ สุทธิประภา

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2554

การลดอุณหภูมิในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยท่อความร้อน

ปรเมศวร์ สุทธิประภา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....กรรมการ
ผศ. ดร. วิวัฒน์ คล่องพานิช

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

.....กรรมการ
ดร. ถนัด เกษประดิษฐ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผศ. ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

24 กุมภาพันธ์ 2554

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่าง-สัจจะทัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาอย่างเอาใจใส่ในทุก ๆ ขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์ทั้งในเรื่องการทดลอง การเขียนปริญญานิพนธ์ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ คล่องพานิช และดร. ฉนัด เกษประดิษฐ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ คุณประชา ยืนยงกุล คุณนำพร ปัญโญใหญ่ คุณโสภณ สินสร้าง คุณอัศวินี ด่านพินิจ คุณณัฐ ธัชยะพงษ์ คุณณัฐวุฒิ ธาราวดี คุณวีระนุช อินทะกัณฑ์ คุณทิพาพร คำแดง คุณปรเมศร์ ปธิเก คุณพรรณไท คำแดงยอดไตย คุณประภัสสร แสงปิ่น คุณเพียงกัน ทองแต้ม และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ

ขอขอบคุณ ห้องวิจัยท่อความร้อนและระบบความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นสถานที่ในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัท เอซีเคไฮโดรฟาร์ม จำกัด อ่อนนุช ที่ให้การสนับสนุนในด้านสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือ เกี่ยวกับการทดสอบจนทำให้การทดสอบสำเร็จลุล่วงตามที่ได้คาดหวังไว้

ขอขอบคุณ บริษัท ฟูจิคูระ (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนในด้านอุปกรณ์ (ท่อความร้อน) ที่ใช้ในการทดสอบจนทำให้การทดสอบสำเร็จลุล่วงตามที่ได้คาดหวังไว้

ขอขอบคุณ ทุน TRFMAG ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการสร้างกำลังคนเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมระดับปริญญาโท (สกว. - สสว.) จากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในระดับมหาบัณฑิตแก่ผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจเอาใจใส่ดูแลและสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดี โดยเฉพาะการให้การศึกษาที่ดีแก่ผู้จัดทำตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ หากมีสิ่งขาดตกบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขออภัยในข้อบกพร่องและความผิดพลาดนั้น และหวังว่าวิทยานิพนธ์นี้คงเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจต่อไป

ปรเมศวร์ สุทธิประภา

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การลดอุณหภูมิในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยท่อความร้อน
ผู้เขียน	นายปรเมศวร์ สุทธิประภา
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย

บทคัดย่อ

236059

งานวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษาการลดอุณหภูมิในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ด้วยท่อความร้อน โดยสร้างโปรแกรมแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของท่อความร้อน เพื่อใช้ลดอุณหภูมิอากาศก่อนผ่านเข้าระบบทำความเย็นแบบแผงระเหยของโรงเรือนในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้ ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขนาด 0.02858 ม. ความยาวรวมของท่อความร้อน 1.5 ม. โปรแกรมแบบจำลองคอมพิวเตอร์จะหาขนาดที่เหมาะสมของส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ซึ่งส่วนทำระเหยความยาวอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1.4 ม. โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ม.และส่วนควบแน่นความยาวอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 ม. โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ม. สัดส่วนการเติมเป็น 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย ใช้สารทำงานเป็น R134a จากเงื่อนไขข้างบนนี้โปรแกรมแบบจำลองคอมพิวเตอร์สามารถหาขนาดที่เหมาะสมของท่อความร้อนได้ดังนี้ ความยาวส่วนทำระเหยเป็น 0.9 ม. และความยาวส่วนควบแน่นเป็น 0.6 ม. หลังจากนั้นทำการสร้างท่อความร้อนตามขนาดที่ได้จากโปรแกรมแบบจำลองคอมพิวเตอร์และติดตั้งในระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ ที่ตำแหน่งหน้าระบบทำความเย็นแบบแผงระเหย (ด้านนอกโรงเรือน)และบันทึกอุณหภูมิอากาศ จากผลการทดลองพบว่าอากาศที่ผ่านท่อความร้อนมีอุณหภูมิลดลงประมาณ 1 ถึง 1.5 องศาเซลเซียส ท่อความร้อนสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าต่อเดือนได้เป็น 1,687.2 kWhr/เดือน และมีระยะเวลาการคืนทุนเท่ากับ 2 ปี 4 เดือน ในส่วนการลดอุณหภูมิของสารอาหารพืช ใช้ท่อความร้อน

236059

แบบวัสดุพรุนซินเตอร์ ผลิตจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์ภายนอก 0.006 ม. ความยาวรวมท่อความร้อน 0.2 ม. โดยแบ่งออกเป็นส่วนทำระเหยความยาว 0.11 ม. และส่วนควบแน่นความยาว 0.09 ม. ใช้ R134a เป็นสารทำงาน โดยติดตั้งที่ทางเข้ารางปลูกของโต๊ะปลูก จากนั้นเก็บข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของสารอาหารพืชระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของสารอาหารพืชในตำแหน่งที่ติดตั้งท่อความร้อนเมื่อเทียบกับที่ไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนในโต๊ะปลูกเดียวกัน อุณหภูมิสารอาหารพืชของตำแหน่งที่ติดตั้งท่อความร้อนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าตำแหน่งที่ไม่ได้ติดท่อความร้อนอยู่ประมาณ 0.5 ถึง 0.7 องศาเซลเซียส ท่อความร้อนสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าต่อเดือนได้เป็น 105.84 kWhr/เดือน และมีระยะคืนทุนเท่ากับ 7 เดือน

Thesis Title	Temperature Reduction in Hydroponic Planting System by Heat Pipe
Author	Mr. Paramet Suttiprapa
Degree	Master of Engineering (Mechanical Engineering)
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Phurt Sakulchangsatjatai

ABSTRACT

236059

The objective of this study to reduce inlet air temperature in hydroponic planting system by used heat pipe. This paper presents an establishment of a computer model to determine the optimal size of heat pipe (thermosyphon) for reduce the inlet air temperature in evaporative cooling system of greenhouse in hydroponic planting system. The condition of a computer model is the outside diameter of copper tube is 0.02858 m. The total length of heat pipe is 1.5 m. A computer model will determine the optimal value of evaporator section and condenser section. The range of evaporator section length is 0.5 – 1.4 m with an increment of 0.1 m and condenser section length is in range of 0.1 – 1.0 m with an increment of 0.1 m. Filling ratio is 50% of evaporator section volume. Working fluid is R134a. From the conditions above, the results from a computer model are as follows: evaporator section length is 0.9 m and condenser section length is 0.6 m which both of length optimize. From the results can be build heat pipe and install in hydroponic planting system in position at front evaporative cooling system (outside of Greenhouse) and record air temperature. From the result, it was found that inlet air temperature was temperature reduce about 1-1.5 degree Celsius when pass heat pipe. While heat pipe was reduced electric consumption about 1,687.2 kWhr/month and payback period was 2 years and 4

236059

months. In part of nutrient solution temperature reduction, sinter wicked heat pipe was used to reduce temperature of nutrient. Heat pipe was constructed from copper tube outside diameter 0.006 m. Total length of heat pipe is 0.2 m which consist of evaporator length and condenser length was 0.11 m and 0.09 m, respectively. R134a was used the working fluid. Then was installed at inlet nutrient solution in the table and recorded temperature to compare temperature between table with and without heat pipe. As results, it was found that nutrient solution temperature at the table was installed heat pipe lower than table without heat pipe about 0.5-0.7 degree Celsius. While heat pipe was reduced electric consumption about 105.84 kWhr/month and payback period was 7 months.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญตาราง	ญ
สารบาญภาพ	ฎ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	16
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	17
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย	17
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	17
2.1 หลักการและทฤษฎีของท่อความร้อน	17
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดสอบ	51
3.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	51
3.2 แผนการดำเนินการ	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	77
4.1 ผลของการติดตั้งท่อความร้อนต่อการเจริญเติบโตของพืชไฮโดรโปนิกส์	77
4.2 การใช้พลังงานไฟฟ้า	83
4.3 ความแตกต่างอุณหภูมิของโรงเรือนที่ติดและไม่ติดตั้งท่อความร้อน	84

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	101
5.1 ค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการคำนวณ (แบบจำลองท่อความร้อนใช้ลดอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าโรงเรือน)	101
5.2 ค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการทดลอง	106
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	112
6.1 สรุปผลการทดสอบ	112
6.2 ข้อเสนอแนะ	114
บรรณานุกรม	115
ภาคผนวก	118
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	119
ภาคผนวก ข ตารางแสดงคุณสมบัติของสารทำงาน	131
ภาคผนวก ค รายละเอียดรูปร่างและขนาดของท่อความร้อนและชุดติดตั้ง	140
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณหาค่าการส่งถ่ายความร้อน	147
ประวัติผู้เขียน	157

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ผลของอุณหภูมิสารอาหารต่อการเจริญเติบโตของรากของผักสลัด (Te-Chen Kao, 1991)	12
1.2	แสดงค่า ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ความเข้มข้นสารอาหารพืช (EC) และน้ำหนักของผักสลัดสดที่เจริญเติบโตภายใต้สภาวะสารอาหารที่ต่างกัน (Te-Chen Kao, 1991)	13
1.3	แสดงการเติบโตของมันฝรั่งอุณหภูมิ 29/27 °C และ 19/17 °C หลังการปลูก 2 สัปดาห์ (Lafta et al., 1995)	14
1.4	แสดงการเติบโตของมันฝรั่งที่อุณหภูมิ 31/29 °C และ 19/17 °C หลังการปลูก 4 สัปดาห์ (Lafta et al., 1995)	14
3.1	ตัวแปรเริ่มต้นของท่อความร้อน	54
3.2	ตัวแปรเริ่มต้นของโรงเรือน	55
3.3	ผลลัพธ์ค่าตัวแปรท่อความร้อนที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม	59
3.4	เงื่อนไขเริ่มต้นใหม่ของท่อความร้อน	60
3.5	ผลลัพธ์ขนาดท่อความร้อนที่เหมาะสมที่ได้การใส่เงื่อนไขเริ่มต้นใหม่	61
4.1	ตารางแสดงน้ำหนักผักสลัดคอสที่เก็บได้ในช่วงเดือนสิงหาคม 2553	80
4.2	ตารางแสดงน้ำหนักผักสลัดคอสที่เก็บได้ในช่วงเดือนกันยายน 2553	81
4.3	ตารางแสดงน้ำหนักผักสลัดคอสที่เก็บได้ในช่วงเดือนตุลาคม 2553	82
4.4	ตารางแสดงน้ำหนักผักเฉลี่ย กก./โต๊ะ ของเดือนสิงหาคม-ตุลาคม 2553	83
4.5	ตารางแสดงน้ำหนักผักเฉลี่ย กก./ต้น ของเดือนสิงหาคม-ตุลาคม 2553	84
4.6	ตารางแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของโรงเรือนที่ติดและไม่ติดตั้งท่อความร้อน	85
4.7	ตารางอุณหภูมิเฉลี่ยและความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ ของโรงเรือนที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน	89
4.8	แสดงค่าอุณหภูมิสารอาหารพืชในตำแหน่งก่อนและหลังผ่านท่อความร้อน (การทดลองช่วงแรก)	91

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4.9	แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของสารอาหารพืชในตำแหน่งก่อนและหลังผ่านท่อความร้อน (ช่วงแรก)	95
4.10	แสดงค่าอุณหภูมิสารอาหารพืชในตำแหน่งก่อนและหลังผ่านท่อความร้อน (การทดลองช่วงสอง)	97
4.11	แสดงค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของสารอาหารพืชในตำแหน่งก่อนและหลังผ่านท่อความร้อน (ช่วงสอง)	99

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	การกระจายตัวอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนที่ได้ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (Srihajong et al., 2005)	10
1.2	Heating load ของระบบทำความเย็นแบบแผงระเหยของที่ได้ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (Srihajong et al., 2005)	11
1.3	การกระจายตัวอุณหภูมิสารอาหารในโรงเรือนที่ได้ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (Srihajong et al., 2005)	11
1.4	Heating load ของระบบทำความเย็นสารอาหารของระบบที่ได้ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน (Srihajong et al., 2005)	12
1.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแบบของการปลูกพืชต่อการเจริญเติบโตของพืช (Laurent et al., 1997)	15
1.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแบบโรงเรือนต่อสมดุลพลังงานของโรงเรือน (Mathala et al., 2001)	16
1.7	แบบของโรงเรือน (Gupta and Chandra, 2002)	17
2.1	เทอร์โมไซฟอนหรือท่อความร้อนแบบไม่มีวัสดุพรุน (Dunn and Reay, 1982)	20
2.2	ท่อความร้อนแบบมีวัสดุพรุน (Dunn and Reay, 1982)	20
2.3	เครือข่ายทางอุดมคติของค่าความต้านทานทางความร้อนรวมของท่อความร้อน (Dunn and Reay, 1982)	22
2.4	ระบบปลูกพืชแบบให้รากพืชสัมผัสสารอาหาร (Water Culture หรือ Hydroponics) (Hydroponics Department of Agriculture Ministry of Agriculture)	30
2.5	ระบบปลูกพืชแบบสารละลายธาตุอาหารพืชไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นบางบนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง (NFT) (www.hhydro.com/images/NFT)	31
2.6	รางหรือรางปลูก (www.kmitl.ac.th/soilkmitl)	31
2.7	โรงเรือน (Gupta and Chandra, 2002)	35

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
2.8	โรงเรือนระบบปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์และระบบทำความเย็น (Srihajong et al., 2005)	37
2.9	ระบบทำความเย็นแบบแผงความเย็นหรือ Pad System (Baird ,1993)	38
2.10	วงจรระบบทำความเย็นแบบแผงความเย็นหรือ Pad System (Chung-Min Liao, 2002)	38
2.11	ระบบทำความเย็นของสารอาหารพืช (Srihajong et al., 2005)	39
2.12	การถ่ายเทความร้อนของสารอาหาร (Srihajong et al., 2005)	40
2.13	การถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็น (Srihajong et al., 2005)	41
2.14	แสดงลักษณะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อความร้อน	41
2.15	กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง (Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)	42
2.16	กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง (ก) $(\dot{m}c_p)_c < (\dot{m}c_p)_h$ (ข) $(\dot{m}c_p)_h < (\dot{m}c_p)_c$ (Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)	44
2.17	กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามกัน (Frank P. Incropera, Fundamentals of heat and mass transfer, 1996)	46
3.1	แผนผังการทำงานโปรแกรม	57
3.2	ความสัมพันธ์ค่าการลงทุนและมูลค่ากำไรสุทธิ	58
3.3	ค่ากำไรสุทธิสูงสุดต่อการลงทุนหลังปรับเงื่อนไขใหม่	61
3.4	ท่อทองแดงความยาว 1.5 m	62
3.5	ภาพฝาปิด (ก) ท้ายท่อและ (ข) หัวท่อทองแดง	62
3.6	ท่อทองแดงที่เชื่อมฝาปิดหัวท้ายและพร้อมเติมสารทำงาน	63
3.7	แสดงการเติมสารทำงาน	63

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.8	เหล็กแผ่นซิงค์ (ก) ก่อนและ (ข) หลังเจาะรู	64
3.9	แสดงดอกสว่านขนาด 0.032 ม. ที่ใช้เจาะรูแผ่นซิงค์	65
3.10	โครงสร้างที่ติดตั้งท่อความร้อน	65
3.11	ติดตั้งแผ่นประคองท่อความร้อน	66
3.12	ติดตั้งแผ่นสังกะสีกันน้ำกระเด็นและรางน้ำ	66
3.13	ติดตั้งท่อความร้อน	67
3.14	ทาซิลิโคนกันน้ำรั่ว	67
3.15	ติดตั้งระบบฉีดน้ำระบายความร้อนและระบบควบคุมเปิดปิดน้ำ	68
3.16	ติดตั้งแผ่นสังกะสีกันน้ำกระเด็นด้านหน้า	68
3.17	เชื่อมโครงด้านล่าง	69
3.18	ติดตั้งแผ่นประคองท่อความร้อน	69
3.19	ติดตั้งท่อความร้อนและระบบฉีดน้ำชุดด้านล่าง	70
3.20	ติดตั้งแผ่นสังกะสีและทาซิลิโคนกันน้ำรั่วชุดด้านล่าง	70
3.21	ติดแผ่นพลาสติกกันลมไหลผ่าน	69
3.22	ติดแผ่นไม้อัดกันลมไหลผ่าน	69
3.23	เครื่องบันทึกอุณหภูมิ	72
3.24	สายเทอร์โมคับเปิ้ลชนิด K	72
3.25	จุดติดตั้งเทอร์โมคับเปิ้ล	73
3.26	โต๊ะปลูกภายในโรงเรือน	73
3.27	ท่อความร้อน	75
3.28	ชุดติดตั้งท่อความร้อนทำจากอะคริลิค	75
3.29	ชุดท่อความร้อน	76
3.30	ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดท่อความร้อน	76
3.31	ตำแหน่งที่ติดเทอร์โมคับเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิสารอาหารพืช	77
4.1	ผักสลัดคอสที่ปลูกในโรงเรือน	79

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผักเฉลี่ยในโรงเรือนที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนกับเดือนที่เก็บในหน่วย กก./โต๊ะ	83
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักผักเฉลี่ยในโรงเรือนที่ติดตั้งและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อนกับเดือนที่เก็บในหน่วย กก./ต้น	84
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศตลอดทั้งวันของโรงเรือนที่ติดและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน	88
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างวันที่กับการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดทั้งเดือนกันยายน 2553 ของโรงเรือนที่ติดและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน	89
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิอากาศกับการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดทั้งเดือนกันยายน-ตุลาคม 2553 ของโรงเรือนที่ติดและไม่ได้ติดตั้งท่อความร้อน	90
4.7	การกระจายตัวอุณหภูมิสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T1 (ช่วงแรก)	92
4.8	การกระจายตัวอุณหภูมิสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T2 (ช่วงแรก)	93
4.9	ตำแหน่งที่ติดเทอร์โมคับเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อน	94
4.10	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T1 และ T2 (ช่วงแรก)	95
4.11	การกระจายตัวอุณหภูมิสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T1 (ช่องสอง)	97
4.12	การกระจายตัวอุณหภูมิสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T2 (ช่วงสอง)	98

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.13	อุณหภูมิเฉลี่ยของสารอาหารพืชก่อนและหลังผ่านท่อความร้อนโรงเรือน T1 และT2 (ช่วงสอง)	99

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัด	m^2
AR	อัตราส่วนสนทัศน์ (ความยาวส่วนทำระเหยต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน)	-
Bo	ตัวเลขของบอนด์	-
C	ค่าคงที่	-
C_{sf}	ค่าคงที่	-
D	เส้นผ่าศูนย์กลาง	m
d	เส้นผ่าศูนย์กลาง	m
F,FR	อัตราส่วนการเติม	-
f_1	เป็นฟังก์ชันของ Bond number	-
f_2	เป็นฟังก์ชันของไร้มิติของ K_p	-
f_3	เป็นฟังก์ชันของมุมเอียงเมื่อท่ออยู่ในแนวตั้งฉากมีค่า 1	-
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
h_e	สัมประสิทธิ์ถ่ายเทความร้อนด้วยการเดือด	$W/m^2 \cdot K$
h_{fg}	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ	J/kg·K
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m·K
Ku	ตัวเลขของคูทาเทลาดเซ	-
l	ความยาว	m
l_a	ความยาวส่วนกันความร้อน	m
l_c	ความยาวส่วนควบแน่น	m
l_e	ความยาวส่วนทำระเหย	m
l_{eff}	ความยาวประสิทธิผล	m
P	ความดัน	Pa

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_{atm}	ความดันบรรยากาศ	Pa
P_{cr}	ความดันวิกฤต	Pa
P_{sat}	ความดันสภาวะไออิ่มตัว	Pa
Pr	ตัวเลขพรันด์เทิล	-
$Q,\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
Q_{max}	อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด	W
q	ความหนาแน่นความร้อน	W/m^2
$q*$	ความหนาแน่นความร้อนวิกฤต	W/m^2
Re	ตัวเลขเรย์โนลสด์	-
S	พื้นที่ผิว	m^2
t	ค่าคงที่	-
T	อุณหภูมิ	^oC
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 \cdot K$
U_{90}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมวิกฤต	$W/m^2 \cdot K$
V	ปริมาตรของเหลวที่เติม	m^3
Z	ความต้านทานทางความร้อน	K/W
Z_{int}	ความต้านทานทางความร้อนภายใน	K/W
Z_{total}	ความต้านทานทางความร้อนทั้งหมด	K/W
Z	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการเดือด	$W/m^2 \cdot K$
Φ_2,Φ_3	ค่าคงที่ของสารทำงาน Figure of Merit	-
θ_{opt}	ค่ามุมเอียงที่เหมาะสมที่สุด	o

อักษรกรีก

สัญลักษณ์กรีก	ความหมาย	หน่วย
σ	แรงตึงผิว	N/m
Δ	ผลต่าง	-
μ	ความหนืด	kg/m·s
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
θ, ϕ	มุมเอียงของท่อวัดจากแนวระดับ	°

ตัวกำกับล่าง

ตัวกำกับล่าง	ความหมาย
a	ส่วนกันความร้อน
av	ค่าเฉลี่ย
c	ส่วนควบแน่น
e	ส่วนทำระเหย
e	ภายใน
i	ด้านใน
l	ของเหลว
o	ด้านนอก
v	ไอ