

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น โดยส่วนใหญ่ใช้ถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย โดยปกติจะให้ความชื้นเป็นตัวบ่งบอกปริมาณของน้ำที่อยู่ในวัสดุซึ่งสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์ชื้น โดยมีสมการดังนี้

$$M_w = \left[\frac{w-d}{w} \right] \times 100 \quad (1)$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis) คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในผลิตภัณฑ์ต่อน้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง โดยมีสมการดังนี้

$$M_d = \left[\frac{w-d}{d} \right] \times 100 \quad (2)$$

โดย M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก

M_d คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง

w คือ น้ำหนักเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์

d คือ น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้ง

ทฤษฎีความสัมพันธ์ของพลังงาน

จากสมการความร้อนและอุณหพลศาสตร์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พบว่าความสัมพันธ์มวลของน้ำส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิ เช่น ถ้าอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องน้ำอุ่นน้อยหมายถึงมวลของน้ำในกระบวนการทำความร้อนน้อย ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำให้ร้อนจะใช้เวลาน้อยลง ในทางกลับกันถ้าอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องอุ่นมากหมายถึงมวลของน้ำในกระบวนการทำความร้อนมาก ซึ่งทำให้การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำร้อนจะใช้เวลานานขึ้น จากทั้งสองกรณีที่ผ่านมาพลังงานที่สามารถถ่ายโอนผ่านขอบเขตของระบบ สามารถอธิบายได้โดย

$$Q = mc\Delta T \quad (3)$$

โดย Q คือ ปริมาณความร้อน

m คือ มวล

c คือ ความจุความร้อนจำเพาะ

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ทฤษฎีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำซึ่งมีอุณหภูมิสูงและอากาศซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า สามารถคำนวณได้จาก

$$Q = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{ao} - T_{ai}) \quad (4)$$

$$Q = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{wi} - T_{wo}) \quad (5)$$

$$Q = (UA)\Delta T_{LMTD} \quad (6)$$

โดย Q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W)

A คือ พื้นที่ (m^2)

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (W/m^2K)

C_{p_a} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kgK)

C_{p_w} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J/kgK)

\dot{m}_a คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

\dot{m}_w คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

T_{ai} คือ อุณหภูมิอากาศด้านเข้า ($^{\circ}C$)

T_{ao} คือ อุณหภูมิอากาศด้านออก ($^{\circ}C$)

T_{wi} คือ อุณหภูมิน้ำด้านเข้า ($^{\circ}C$)

T_{wo} คือ อุณหภูมิน้ำด้านออก ($^{\circ}C$)

ΔT_{LMTD} คือ อุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก ($^{\circ}C$)

จากการศึกษางานวิจัยเรื่อง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งคัดแปลงมาจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ (ขวัญชัย ไกรทอง และอดิพงษ์ นันทพันธุ์, 2005) โดยในงานวิจัยนี้ได้้นำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวาง จำนวน 2 เครื่อง ซึ่งมีค่าประสิทธิผลของคอนเดนเซอร์ดังนี้

$$\varepsilon = 0.617NTU^{0.887} C^{*0.020} n^{-0.388} d^{-0.127} \quad (7)$$

โดย ε คือ ประสิทธิภาพ

NTU คือ จำนวนหน่วยถ่ายเท

C^* คือ อัตราส่วนของ Heat capacity flow rate

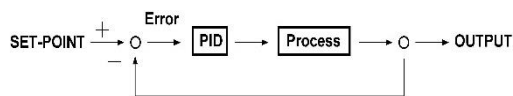
d คือ ทิศทางการไหลของอากาศและน้ำ

n คือ จำนวนแผงคอนเดนเซอร์รถยนต์

ทฤษฎีเรื่องการควบคุมแบบพีไอดี (PID)

การควบคุมแบบพีไอดี เป็นการควบคุมแบบรวมกัน โดยอาศัยสัดส่วน (Proportional), ปริพันธ์ (Integral) และอนุพันธ์ (Derivative) เป็นตัวควบคุมระบบ เพื่อให้การตอบสนองของระบบ มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น สมการเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอดีในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงลาปลาซแสดงดังสมการ

$$Co(s) = K_p e(s) + \frac{K_i}{s} e(s) + K_d s e(s) \quad (8)$$



ภาพที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID

โดย Co คือ เอาต์พุตของตัวควบคุม

e คือ ค่าความผิดพลาด (error)

K_p คือ Proportional Gain

K_i คือ Integral Gain

K_d คือ Derivative Gain

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

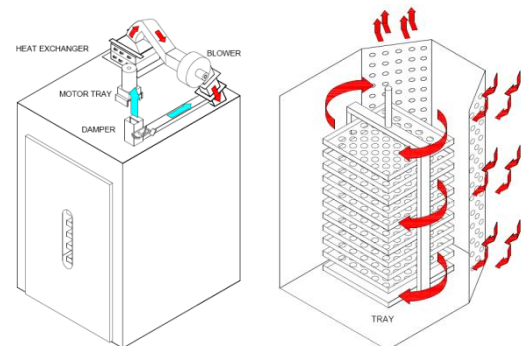
อุปกรณ์ทดสอบ

ตู้อบ สามารถบรรจุกล้วยน้ำว้าปริมาณ 60 กิโลกรัม มีขนาดของตู้อบ ลึก 120 เซนติเมตร กว้าง 108 เซนติเมตร สูง 164 เซนติเมตร โดยส่วนประกอบของตู้อบและลักษณะการไหลเวียนของอากาศที่ออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีทิศทางเดียวกันกับ

การหมุนของรอกกล้วยน้ำว้าผ่านทางรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของตู้อบ โดยใช้พลังงานร่วมระหว่างแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว



ภาพที่ 3 ลักษณะการไหลเวียนอากาศร้อนของตู้อบ

งานวิจัยนี้มีการใช้พลังงานความร้อน 2 แหล่ง ได้แก่ แหล่งพลังงานความร้อนจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (Solar collector) จำนวน 2 แผง ซึ่งมีขนาดพื้นที่รับแสง 3.8 ตารางเมตร/แผง โดยมีคุณลักษณะสมบัติของแต่ละแผง ดังนี้ มีขนาดของแผงยาว 2,000 มิลลิเมตร กว้าง 2,380 มิลลิเมตร สูง 180 มิลลิเมตร น้ำหนักของแผงเท่ากับ 100 กิโลกรัม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดแก้วเท่ากับ 58 มิลลิเมตร

(ขอบนอก) และ 47 มิลลิเมตร (ขอบใน) จำนวน
 หลอดแก้วต่อแผงเท่ากับ 30 หลอด และระยะห่าง
 ระหว่างหลอดสูญญากาศเท่ากับ 22 มิลลิเมตร และมี
 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหา
 อุณหภูมิน้ำร้อน

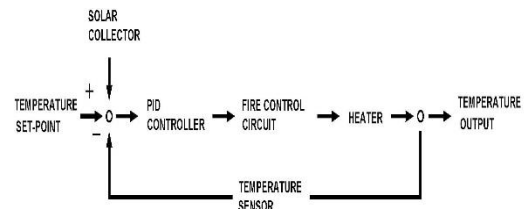
รายละเอียด	จำนวน	หน่วย
มาตรฐานการคำนวณอัตราการไหลเข้าแผงรับรังสีอาทิตย์	0.02	L/s/m ²
1 แผง มีพื้นที่รับรังสี (Absorber Area) แผงรับรังสี	3.8	m ²
อัตราการไหลต่อชุดแผงเท่ากับ (m)	0.076	L/s (kg/s)
ค่าความจุความร้อนของน้ำ (C _p)	4.18	KJ/Kg.K
C _p x m	0.318	
ประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ 1	0.81	
ประสิทธิภาพแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ 2	0.72	

ที่มา : Heat Pipe Solar Collector Mode TSU Vac-30 ของ TSUS EXCELLENT
 ENGINEERING.CO.,LTD

พื้นฐานของระบบทำน้ำร้อนด้วยรังสีอาทิตย์
 ประกอบไปด้วย ตัวเก็บรังสีอาทิตย์ที่ทำหน้าดูดกลืน
 รังสีอาทิตย์ เปลี่ยนเป็นความร้อนถ่ายโอนให้กับสาร
 ตัวกลาง ซึ่งสารตัวกลางที่นิยมใช้คือ น้ำ เนื่องจากค่า
 ความจุความร้อนจำเพาะมีค่าเท่ากับ 4.178 kJ/kg °C
 ส่งผลให้กักเก็บความร้อนได้ดีและสามารถถ่ายโอน
 ความร้อนให้กับสารทำงานชนิดอื่นที่มีค่าความจุความร้อน
 จำเพาะต่ำกว่า เช่น อากาศ (จารูวัฒน์ เจริญจิต,
 2554)

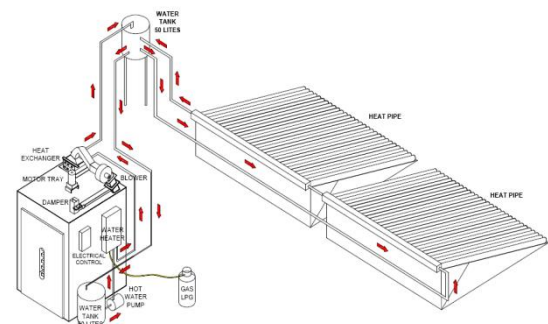
ส่วนของรูปแบบการผลิตน้ำร้อนจากแผงรับ
 รังสีอาทิตย์จะใช้ระบบการหมุนเวียนน้ำร้อนแบบ
 ธรรมชาติ (Thermosyphon) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยน
 สถานะจากการระเหยและควบแน่นร่วมกับแรงโน้ม
 ถ่วงของน้ำ ซึ่งไม่ใช่พลังงานจากภายนอก น้ำร้อนที่ได้
 จะถูกจัดเก็บในถังขนาด 50 ลิตร บนชั้นดาดฟ้าและ
 ปล่อยให้ไหลด้วยแรงโน้มถ่วงลงมาถังขนาด 50
 ลิตร ซึ่งมีความต่างระดับกันอยู่ที่ 4 เมตร หลังจากนั้น
 ปั๊มน้ำจะหมุนเวียนน้ำในการทำงานแบบ Active
 systems ส่งผ่านน้ำไปยังเครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซ
 ปิโตรเลียมเหลวด้วยอัตราการไหลของน้ำคงที่ที่ 2.75
 ลิตรต่อนาที โดยน้ำที่ไหลผ่านจะถูกควบคุมอุณหภูมิ

ด้วยการปรับปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียม
 เหลวแบบพีไอดี ตามภาพที่ 4



ภาพที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ PID

ซึ่งหลังจากน้ำร้อนถูกปรับอุณหภูมิตามค่าที่
 กำหนดไว้แล้ว น้ำจะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความ
 ร้อนแบบไหลตามขวางซึ่งตัดแปลงมาจากคอนเดนเซอร์
 ระบบปรับอากาศรถยนต์ จำนวน 2 ชุด ต่อกันแบบ
 อนุกรม โดยมีพัดลมดูดอากาศจากเครื่องแลกเปลี่ยน
 ความร้อนส่งผ่านอากาศร้อนเข้าไปภายในตู้อบ ซึ่งมี
 อัตราการไหลของอากาศภายในตู้อบคงที่ที่ 1 เมตรต่อ
 วินาที หลังจากนั้นน้ำที่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความ
 ร้อนจะถูกหมุนเวียนกลับไปยังถังน้ำขนาด 50 ลิตร บน
 ดาดฟ้า ตามภาพที่ 5



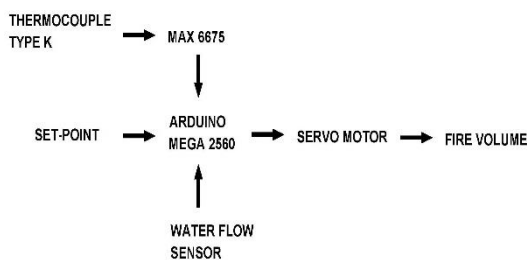
ภาพที่ 5 ลักษณะการไหลเวียนของน้ำร้อนที่ได้รับ
 พลังงานจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์และการ
 เผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียม

การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID)

ในการออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิของ
 เครื่องผลิตน้ำร้อนด้วยก๊าซปิโตรเลียมเหลวจะใช้การ
 ควบคุมแบบพีไอดี (PID) ด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols

(ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย $K_p = 0.246$, $K_i = 3.333$
 และ $K_d = 0.833$)

ผ่าน ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ซึ่งเป็นบอร์ดสำเร็จรูป โดยวงจรจะเป็นวงจรพอร์ตเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ภายนอก เช่น อุปกรณ์ IC MAX6675 สำหรับต่อเข้ากับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิชนิด เค (Thermocouple type K) มีค่าความผิดพลาด ± 1.0 อุปกรณ์เซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) สำหรับควบคุมปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว อุปกรณ์รีเลย์ (Relay) สำหรับการเปิด - ปิดการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว และหน้าจอแสดงผลแอลอีดี ในการสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 ทำงานนั้นจะเขียนผ่านโปรแกรม Arduino 1.0.5-r2 โดยมีบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม Arduino Mega 2560 ดังภาพที่ 6

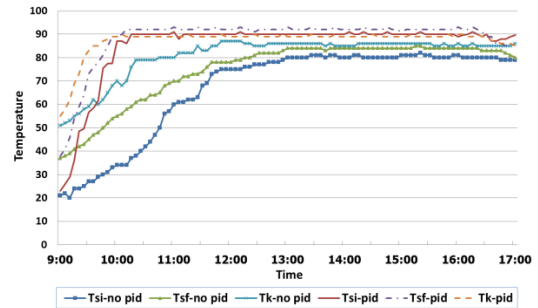


ภาพที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม Arduino Mega 2560

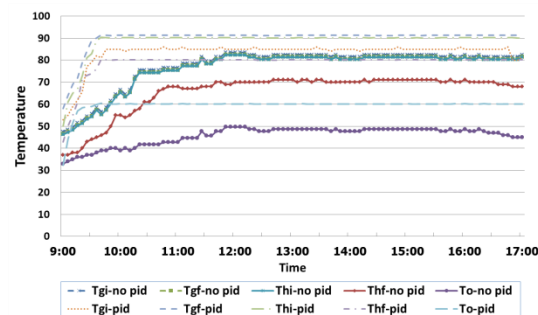
ผลการวิจัยและอภิปราย

ในการวิจัยหาได้ทำตรวจวัดอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ของตู้อบพลังงานร่วมระหว่างแสงอาทิตย์และก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยได้ทำแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยการปรับปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มี การควบคุมอุณหภูมิของน้ำ โดยในการวิจัยทั้ง 2 กรณี จะทำงานร่วมกับระบบน้ำร้อนที่ได้รับ

พลังงานจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ในสภาวะมีโหลด และไม่มีโหลด



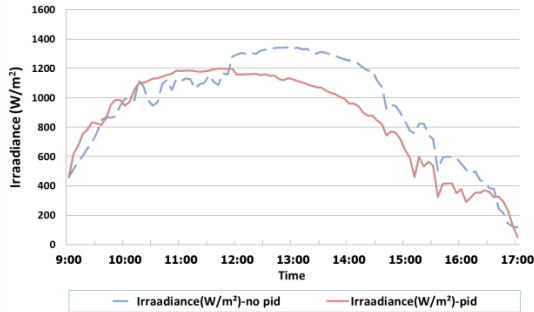
ภาพที่ 7 แสดงอุณหภูมิของน้ำที่ได้รับพลังงานจากแผงรับแสงอาทิตย์



ภาพที่ 8 แสดงอุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิภายในตู้อบตามตำแหน่งต่างๆ

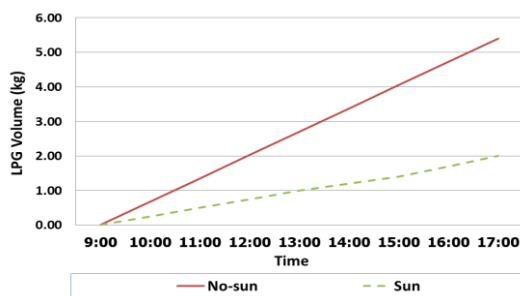
จากค่าอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ ทั้ง 2 กรณีตามภาพที่ 7 และ 8 พบว่าอุณหภูมิภายในตู้อบ กรณีที่ไม่มี การควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยการปรับปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวนั้น มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 47.4 องศาเซลเซียส อีกทั้งผลการตอบสนองในช่วงเวลาไต่ขึ้น (Rise Time) นั้นช้ากว่ากรณีที่มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วยการปรับปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลวโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งได้ทำตั้งค่าการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบอยู่ที่ 60.2 องศาเซลเซียส จากการวิจัยทั้ง 3 ครั้ง พบว่ามีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวไม่เกิน ± 0.3 องศาเซลเซียส โดยระยะเวลาในการวิจัยอยู่ในช่วงเวลา 9:00

– 17:00 น. ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มเฉลี่ย ของ
 แสงอาทิตย์ (Irradiance) ทั้ง 2 กรณี ได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงอาทิตย์ 3 ครั้ง ทั้ง 2
 กรณี (วัดต่อตารางเมตร)

ในกรณีที่มีการควบคุมอุณหภูมิของน้ำด้วย
 การปรับปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว
 โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีร่วมกับระบบน้ำร้อนที่
 ได้รับพลังงานจากแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ ได้ทำการ
 เปรียบเทียบปริมาณการใช้อำนาจปิโตรเลียมเหลว โดย
 แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีแสงแดดและกรณีที่
 ไม่มีแสงแดด ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 เปรียบเทียบปริมาณการใช้อำนาจปิโตรเลียม
 เหลว กรณีที่มีแสงแดดและกรณีที่ไม่มี
 แสงแดด โดยเฉลี่ย 3 ครั้ง

จากภาพที่ 10 พบว่าปริมาณการใช้อำนาจ
 ปิโตรเลียมเหลวในการควบคุมอุณหภูมิของน้ำ ใน
 กรณีที่ไม่มีแสงแดด มีอัตราปริมาณการใช้อำนาจ

ปิโตรเลียมเหลวเฉลี่ย 0.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ
 กรณีที่มีแสงแดด มีอัตราปริมาณการใช้อำนาจปิโตรเลียม
 เหลวเฉลี่ย 0.25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการออกแบบและ
 พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบแบบพีไอดี
 (PID) ด้วยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำโดยการควบคุม
 ปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ร่วมกับ
 อุณหภูมิของน้ำที่ได้รับจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์
 ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 เพื่อ
 รักษาอุณหภูมิภายในตู้อบให้คงที่ เนื่องจากอุณหภูมิ
 ของน้ำที่ได้รับจากแผงรับพลังงานแสงอาทิตย์นั้นมีการ
 เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมและปริมาณ
 แสงอาทิตย์ จึงส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้อบนั้นขาด
 ความเสถียรภาพ จนทำให้ผลผลิตที่จะนำมาแปรรูป ใน
 รูปของการอบแห้งนั้นเสียหายได้จากผลการทดลอง
 ตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่
 หาได้จากวิธี Ziegler-Nichols ทั้งในสภาวะมีโหลดและ
 ไม่มีโหลด พบว่าเมื่อทำการควบคุมปริมาณการเผา
 ไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ผลการตอบสนองใน
 ช่วงเวลาไต่ขึ้น (Rise Time) ได้เร็วกว่ากรณีไม่มีการ
 ควบคุมปริมาณการเผาไหม้ของก๊าซปิโตรเลียมเหลว
 และตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) มีค่าผิดพลาดที่
 สถานะอยู่ตัวไม่เกิน ± 0.3 องศาเซลเซียส และกรณีที่มี
 แสงแดด ปริมาณการใช้อำนาจปิโตรเลียมเฉลี่ย 0.25
 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จากผลที่ได้สามารถนำอุปกรณ์
 ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับอบแห้งผลผลิตทางการ
 เกษตรได้

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงาน
 คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research
 Council of Thailand)



เอกสารอ้างอิง

ขวัญชัย ไกลทอง และอดิพงษ์ นันทพันธุ์. การ

ประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ

ไหลตามขวางตัดแปลงจากคอนเดนเซอร์

ระบบปรับอากาศรถยนต์: กรณีศึกษาการ

ดึงความร้อนทิ้งจากน้ำร้อนมาใช้อุ่นอากาศ.

Naresuan University Journal 2005; 13(1):

13-23.

จรรุวัฒน์ เจริญจิต, ยะฟาด คุณะเหมา, สุวัฒน์ เดชโสภณ

และสุริยา ชำยอินทร์. ตู้อบแห้งและกลั่น

ความชื้นรังสีอาทิตย์แบบเทอร์โมไซฟอน.

วิศวกรรมสาร มช 2554; 38(1): 35-42.

B.O. Bolaji Development and Performance

Evaluation of a Box-type Absorber Solar

Air Collector for Crop Drying. Journal of

Food Technology 2005; 3(4): 763-769.

Lyes Bennamoun and Azeddine Belhamri. Design

and simulation of a solar dryer for

agriculture products. Journal of Food

Engineering 59; 2003. p 2629-66.

P.Gbaha, H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka,

B. Kamenan Koua and S.Toure.

Experimental investigation of a solar dryer

with natural convective heat flow.

Renewable Energy 32; 2007. p 1817-1829.

Sarsilmaz, C., Yildiz, C., Pehlivan, D. Drying of

apricots in a rotary column cylindrical dryer

(RCCD) supported with solar energy.

Renewable Energy 21; 2000. p117-127.

Segun R. Bello and Simon O. Odey.

Development of Hot Water Solar Oven for

Low Temperature Thermal Processes.

Leonardo Electronic Journal of Practices

and Technologies Issue 14; January-June

2009. p.73-84.

Somchart Soponronnarit, Adisak Nathakaranakule,

Weeravout Limtrakool, Woravit

Runggiwaruk, Ukrudee NNathakaranakule

and Wattanapong Rakwichien. Banana Fruit

Drying RERIC International Energy

Journal; vol.19; No.2, December 1997.