# การศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ

นาย ประพจน์ ชัยวรวิทย์กุล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0063-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# A STUDY OF HEAT PUMP APPLICATION TO TOBACCO CURING

Mr. Prapotch Chaiworawitgul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0063-8

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ |
| โดย | นายประพจน์ ชัยวรวิทย์กุล |
| ภาควิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประพจน์ ชัยวรวิทย์กุล : การศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ. (A STUDY OF HEAT PUMP APPLICATION TO TOBACCO CURING) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์, 189 หน้า. ISBN 974-13-0063-8.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ข้อมูลจริงจากการตรวจวัดการทำงานของโรงบ่มใบยาสูบประกอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก เป็นเครื่องมือในการศึกษา โดยกำหนดให้ปั๊มความร้อนทำงานใน 4 รูปแบบ คือ ทำงานด้วยวัฏจักรอุดมคติ, ทำงานด้วยวัฏจักรจริงโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น, ทำงานด้วยวัฏจักรอุดมคติโดยมีการควบคุมอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น และทำงานด้วยวัฏจักรจริงโดยมีการควบคุมอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น โดยแต่ละรูปแบบนั้นก็มีการทำงานที่ปลีกย่อยอีก 2 ลักษณะคือ มี และไม่มีการเก็บคืนความร้อนของอากาศระบายทิ้งเพื่อใช้งานที่เครื่องทำระเหย (Evaporator)

จากการศึกษาพบว่า ความแตกต่างของอุณหภูมิของเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย และข้อจำกัดทางคุณสมบัติของสารทำความเย็น เป็นปัจจัยสำคัญต่อการใช้พลังงานในปั๊มความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนในช่วงการเปลี่ยนสี กับการตรึงสี, การทำแห้งใบยาสูบ และการไล่น้ำที่ก้าน มีค่าเฉลี่ย 5.55, 3.43 และ 2.05 ตามลำดับ การเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายทิ้งเพื่อใช้งานที่เครื่องทำระเหย สามารถปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนให้มีค่าสูงขึ้น และสามารถลดการใช้พลังงานลงได้โดยเฉลี่ยประมาณ 16.5%

จากการศึกษาพบว่า การบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน มีความต้องการพลังงานจำเพาะเฉลี่ยเพียง 17 MJ/kg ใบยาแห้ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ถึง 50% แต่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้ามีราคาสูงกว่าลิกไนต์มาก ส่งผลให้การบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อีกทั้งเงินลงทุนเริ่มต้นของระบบปั๊มความร้อนมีค่าสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ 3 เท่า ทำให้ระบบปั๊มความร้อนไม่น่าสนใจในการลงทุน แต่เมื่อพิจารณาการบ่มใบยาสูบ ด้วยปั๊มความร้อนในแง่ของผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าไม่มีปัญหาเรื่องการกระจายมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงสู่ชุมชน ซึ่งมีผลกระทบต่อชาวบ้านที่อยู่อาศัยโดยรอบโรงบ่ม และในด้านความคล่องตัวในการจัดการ พบว่ามีความคล่องตัวในการจัดการใบยาสูบเข้าบ่มมากกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ ทำให้สามารถลดความเสียหายจากใบยาสูบเน่าเสียเนื่องจากเข้าบ่มไม่ทันได้อีกด้วย

| | | | |
|---|---|---|---|
| ภาควิชา | วิศวกรรมเครื่องกล | ลายมือชื่อนิสิต | |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา | |
| ปีการศึกษา | 2543 | ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | |

## 4070328521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: HEAT PUMP / TOBACCO CURING / MATHEMATICAL MODEL / COP

PRAPOTCH CHAIWORAWITGUL : A STUDY OF HEAT PUMP APPLICATION TO TOBACCO CURING. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. PONGTORN CHARUNYAKORN, 189 pp. ISBN 974-13-0063-8.

This study investigates heat pump application to tobacco curing, using actual working condition with a mathematical model for heat pump. This mathematical model is written in MS Visual Basic 6.0 program. Heat pump is modeled to operate in 4 modes: ideal mode, actual mode without limitation to condenser temperature, ideal mode with limitation to condenser temperature and actual mode with limitation to condenser temperature. In each mode, there are 2 options, i.e., with and without heat recovery from exhaust air to be used at evaporator.

It is found that the temperature difference between condenser and evaporator as well as the limitation of refrigerant properties were important factors on energy consumption in curing process using heat pump system. The coefficient of performance (COP) of heat pump system in yellowing and color fixing stage, leaf drying stage and stem drying stage were 5.55, 3.43 and 2.05, respectively. Operating mode with heat recovery from exhaust air can improve COP and reduce energy consumption in heat pump system for 16.5%.

This study also found that curing tobacco with heat pump system required average specific energy consumption (SEC) of only 17 MJ/kg dry tobacco. This is less than SEC, required by central heat curing system about 50%. Unfortunately, electricity price is much higher than lignite. Therefore, the operating cost of heat pump system is higher than that of central heat curing system inevitably. For initial investment of heat pump system, it is 3 times more expensive than that of central heat curing system. Thus, heat pump system is less attractive for investment. However, considering the environment impact from tobacco curing with heat pump system, it can reduce emission released to atmosphere due to the fact that there is no combustion involved in heat pump system. Moreover, it was found that curing tobacco with heat pump system could relieve decomposition problem of fresh tobacco leaves from late curing.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Department | Mechanical Engineering | Student's signature | |
| Field of study | Mechanical Engineering | Advisor's signature | |
| Academic Year | 2000 | Co-advisor's signature | |

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรัญญากรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง มาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยนี้ จนการวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฤชากร จิรกาลวสาน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ และชี้แนะแนวทางในการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้การวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นาย ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ พี่เบญจมาศ และพี่อัมพา ตลอดจนสมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงาน และสถาบันวิจัยพลังงาน ที่คอยดูแล และให้กำลังใจในระหว่างการทำงานวิจัยนี้

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้ความสนับสนุนทางด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูปภาพ..... ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ณ
บทที่
1. บทนำ..... 1
1.1 ความนำ..... 1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 4
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 10
1.4 ขอบเขตการวิจัย..... 10
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... 10
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 10
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 11
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา..... 11
2.1.1 การบ่มใบยาสูบ..... 11
2.1.2 การใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้ง..... 14
2.2 สรุปผลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา..... 17
3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 20
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบ่มใบยาสูบ..... 20
3.1.1 ความชื้นมาตรฐาน..... 22
3.1.1.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก..... 22
3.1.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง..... 23
3.1.2 คุณสมบัติของอากาศชื้น..... 23
3.1.2.1 คำจำกัดความของศัพท์ไซโครเมตริก..... 23
3.1.2.2 ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคุณสมบัติของอากาศชื้น..... 25
3.1.3 กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์..... 27
3.1.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง..... 28

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า


3.1.5 ค่าความชื้นสมดุล..... 30
3.1.6 การไล่ความชื้นในใบยาสูบแบบเป็นชั้นๆ..... 30
3.1.6.1 สมดุลมวลไอน้ำของชั้นใบยาสูบ..... 31
3.1.6.2 ความชื้นในใบยาสูบ..... 32
3.1.6.3 สมดุลความร้อนของใบยาสูบ..... 33
3.1.7 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มใบยาสูบ..... 34
3.1.7.1 พลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีของใบยาสูบ..... 34
3.1.7.2 พลังงานของอากาศระบาย..... 35
3.1.7.3 พลังงานที่สูญเสียให้กับโครงสร้างห้องบ่มใบยาสูบและสูญเสียผ่านห้องบ่มใบยาสูบ..... 35
3.1.7.4 พลังงานที่สะสมอยู่ในใบยาสูบเนื่องจากการบ่มใบยาสูบ... 39
3.2 ทฤษฎีปั๊มความร้อน..... 40
3.2.1 ระบบปั๊มความร้อน..... 40
3.2.2 วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์..... 40
3.2.3 วัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... 42
3.2.4 วัฏจักรจริงของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... 44
3.2.5 อุปกรณ์ในระบบปั๊มความร้อน..... 45
3.2.5.1 เครื่องอัดไอ..... 46
3.2.5.2 เครื่องควบแน่น..... 48
3.2.5.3 เครื่องทำระเหย..... 49
3.2.5.4 วาล์วลดความดัน..... 50
3.2.6 การเก็บคืนความร้อนจากการระบายอากาศทิ้ง..... 50
3.2.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน..... 51
3.2.7.1 การวิเคราะห์ค่าCOP จากวงจรสารทำความเย็น..... 52
3.2.7.2 การวิเคราะห์ค่าCOP จากวงจรอากาศ..... 54
3.2.8 ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์..... 57
3.2.8.1 เครื่องอัดไอ(กระบวนการ 1-2)..... 58
3.2.8.2 เครื่องควบแน่น(กระบวนการ 2-3)..... 58
3.2.8.3 วาล์วลดความดัน(กระบวนการ 3-4)..... 58
3.2.8.4 เครื่องทำระเหย(กระบวนการ 4-1)..... 59

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า


3.2.9 สารทำความเย็น..... 59

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มความร้อน..... 61

4.1 แบบจำลองการสภาวะอากาศหลังผ่านชั้นใบยาสูบ..... 62

4.2 แบบจำลองพลังงานต่าง ๆที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มใบยาสูบ..... 66

4.3 แบบจำลองคุณสมบัติของอากาศชื้น..... 67

4.4 แบบจำลองอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศผสมบริเวณพัดลมหมุนเวียนอากาศ..... 68

4.5 แบบจำลองอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศผสมบริเวณทางเข้าเครื่องทำระเหย..... 70

4.6 แบบจำลองคุณสมบัติทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่าง ๆภายในระบบปั๊มความร้อน..... 72

4.7 แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบปั๊มความร้อน..... 73

4.8 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 74

5. ผลของการศึกษา..... 78

5.1 ผลการทดลองและผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์..... 78

5.2 ผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อน..... 94

5.3 การวิเคราะห์..... 110

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 116

6.1 สรุปผลการวิจัย..... 116

6.2 ข้อเสนอแนะ..... 117

รายการอ้างอิง..... 118

ภาคผนวก ก รูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... 122

ภาคผนวก ข ข้อมูลเบื้องต้นและสมดุลพลังงานความร้อนภายในห้องบ่มใบยาสูบ..... 130

ภาคผนวก ค ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อน..... 145

ภาคผนวก ง ข้อมูลราคาอุปกรณ์ระบบปั๊มความร้อนและระบบความร้อนรวมศูนย์..... 187

ประวัติผู้เขียน..... 189

# สารบัญตาราง


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.1 | พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FE) โดย Yang และ Johnson(1984)..... | 37 |
| 3.2 | พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการทดลองโดย Chang et. Al(1978)..... | 37 |
| 3.3 | คุณสมบัติสารทำความเย็นตามข้อกำหนดพิธีสารมอนทรีออล..... | 60 |
| 5.1 | ข้อมูลเบื้องต้นของการทดลองบ่มใบยาสูบ..... | 78 |
| 5.2(ก) | สรุปผลการจำลองแบบการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อนเมื่อทำงานในรูปแบบต่างๆ ของ บ. สหใบยาสูบไทย จก..... | 96 |
| 5.2(ข) | สรุปผลการจำลองแบบการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อนเมื่อทำงานในรูปแบบต่างๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก..... | 97 |
| 5.3 | ข้อมูลเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบด้วยระบบต่างๆ..... | 112 |
| 5.4 | ข้อมูลเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยระบบต่างๆ..... | 113 |


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูปภาพ


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงเวลาในการบ่มใบยาสูบ..... | 3 |
| 1.2 | ลักษณะการไหลของอากาศของการบ่มใบยาสูบแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Flue Curing or Natural Convection Curing)..... | 4 |
| 1.3 | รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม..... | 5 |
| 1.4 | แสดงการไหลของอากาศในรูปแบบการบ่มแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced-convection or bulk-curing)..... | 6 |
| 1.5 | รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์..... | 8 |
| 1.6 | รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ปั๊มความร้อน.... | 9 |
| 3.1 | กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงเวลาในการบ่มใบยาสูบ..... | 22 |
| 3.2 | การเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง... | 28 |
| 3.3 | รูปแสดงชั้นใบยาสูบอัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ..... | 31 |
| 3.4 | กราฟแสดงข้อมูลและผลการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ A.E. DELSANTE(1990)และผลการทดลองของ Yang (1984)..... | 38 |
| 3.5 | รูปแสดงหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปั๊มความร้อนและกลจักรความร้อน | 40 |
| 3.6 | ภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนและองค์ประกอบหลักของปั๊มความร้อน..... | 41 |
| 3.7 | แผนภูมิ P-v แสดงการทำงานของวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์..... | 41 |
| 3.8 | แผนภูมิแสดงวัฏจักรการทำงานทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ<br>(ก) แผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปี (T-s Diagram)..... | 43 |
| | (ข) แผนภูมิความดันและเอนทาลปี (P-h Diagram)..... | 43 |

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.9 | แผนภูมิแสดงความแตกต่างระหว่างวัฏจักรจริงกับวัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... | 44 |
| 3.10 | กระบวนการของอากาศในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ระบบปั๊มความร้อนที่มีการเก็บคืนความร้อนบนแผนภูมิความชื้น..... | 51 |
| 3.11 | แผนภูมิความดันและเอนทาลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... | 52 |
| 3.12 | รูปแสดงระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ..... | 57 |
| 4.1 | รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบแบบอัดแน่น..... | 62 |
| 4.2 | รูปแสดงชั้นใบยาสูบที่อัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ..... | 63 |
| 4.3 | รูปแสดงลักษณะการแบ่งชั้นใบยาสูบที่อัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ..... | 64 |
| 4.4 | รูปแสดงสมดุลพลังงานภายในห้องบ่มใบยาสูบ..... | 66 |
| 4.5 | รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศผสมบริเวณพัดลมหมุนเวียนอากาศ..... | 68 |
| 4.6 | รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศผสมบริเวณทางเข้าเครื่องทำระเหย..... | 70 |
| 4.7 | แผนภูมิความดันและเอนทาลปี การทำงานของสารทำความเย็น R-22 (HCFC-22) ในระบบปั๊มความร้อน..... | 72 |
| 4.8 | รูปแสดงตำแหน่งต่างๆ ในระบบปั๊มความร้อน..... | 73 |
| 4.9 | รูปแสดง Flow Chart การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน..... | 76<br>77 |
| 5.1(ก) | รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางเข้าชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... | 80 |
| 5.1(ข) | รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางเข้าชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... | 81 |
| 5.2(ก) | รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... | 82 |
| 5.2(ข) | รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... | 83 |


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)


ภาพประกอบ หน้า

5.3(ก) รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศสิ่งแวดล้อมรอบห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 84

5.3(ข) รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศสิ่งแวดล้อมรอบห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 85

5.4(ก) รูปแสดงความเร็วลมของอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องบ่มฯและอากาศที่ระบายออกจากห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 86

5.4(ข) รูปแสดงความเร็วลมของอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องบ่มฯและอากาศที่ระบายออกจากห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 87

5.5(ก) รูปแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 88

5.5(ข) รูปแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 89

5.6(ก) รูปแสดงผลการจำลองแบบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศณ. ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)..... 90

5.6(ข) รูปแสดงผลการจำลองแบบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ. ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)..... 91

5.7(ก) รูปแสดงผลการจำลองแบบพลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)..... 92

5.7(ข) รูปแสดงผลการจำลองแบบพลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)..... 93

5.8.1(ก) รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 98

5.8.2(ก) รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 98

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

5.8.1(ข) รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. 99

5.8.2(ข) รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 99

5.9.1(ก) รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 100

5.9.2(ก) รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 100

5.9.1(ข) รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 101

5.9.2(ข) รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 101

5.10.1(ก) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 102

5.10.2(ก) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 102

5.10.3(ก) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 103

5.10.4(ก) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 103

5.10.1(ข) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 104

5.10.2(ข) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 104

5.10.3(ข) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. .. 105

5.10.4(ข) รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 105

# สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ หน้า

5.11.1(ก) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 106

5.11.2(ก) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 106

5.11.3(ก) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. สหใบยาสูบ จก. 107

5.11.4(ก) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก. ..... 107

5.11.1(ข) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 108

5.11.2(ข) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 108

5.11.3(ข) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 109

5.11.4(ข) รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ..... 109

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $A$ | พื้นที่การถ่ายเทความร้อน | $m^2$ |
| $A_{cd}$ | พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น | $m^2$ |
| $A_{ev}$ | พื้นที่ผิวภายนอก | $m^2$ |
| $a_{f_2}$ | อะเวเลบิลิตี้ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่ง 2 | kJ/kg |
| $a_{f_3}$ | อะเวเลบิลิตี้ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่ง 3 | kJ/kg |
| $a_{q_{2-3}}$ | อะเวเลบิลิตี้ของการถ่ายเทความร้อน | kJ/kg |
| $A_S$ | พื้นที่ผนังข้างห้องบ่มใบยาสูบ | $m^2$ |
| $A_U$ | พื้นที่ผนังบนของห้องบ่มใบยาสูบ | $m^2$ |
| $C_a$ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ | kJ/kg·$^{\circ}$C |
| $C_c$ | ความจุความร้อนจำเพาะของคอนกรีต | kJ/kg·K |
| $C_c$ | ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลางระบายความร้อน | kJ/kg·K |
| $C_e$ | ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน | kJ/kg·K |
| $C_s$ | ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก | kJ/kg·K |
| $C_t$ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของใบยาสูบ | kJ/kg·K |
| $C_v$ | ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ | kJ/kg·$^{\circ}$C |
| $C_W$ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ | kJ/kg·$^{\circ}$C |
| COP | ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน | |
| $d_p$ | เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ | m |
| $\dot{E}_e$ | อัตราสิ้นเปลืองไฟฟ้าใช้ที่พัดลมในห้องบ่มใบยาสูบ | kW |
| $h$ | เอนทาลปี | kJ/kg |
| $h_{fg}$ | ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ | kJ/kg |
| $h_{fg,0^{\circ}C}$ | ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0$^{\circ}$C | kJ/kg |
| $h_1$ | เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าสู่เครื่องอัดไอ | kJ/kg |
| $h_2$ | เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องอัดไอ, | kJ/kg |
| $h_3$ | เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องควบแน่น | kJ/kg |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $h_4$ | เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าสู่เครื่องทำระเหย | kJ/kg |
| H | Surface air film conductance | |
| k | Soil Conductivity | W/m.K |
| $l_p$ | ระยะชักของก้านสูบ | m |
| $\dot{m}_a$ | อัตราการไหลของอากาศแห้งออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | $kg_a/s$ |
| $m_{ac}$ | อัตราไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเครื่องควบแน่น | kg/h |
| $m_{ae}$ | อัตราไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเครื่องทำระเหย | kg/h |
| $m_c$ | อัตราไหลเชิงมวลของสารตัวกลางระบายความร้อน | kg/s |
| $m_e$ | อัตราการไหลเชิงมวลของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน | kg/s |
| $m_r$ | อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น | kg/s |
| $\dot{m}_a$ | อัตราการไหลของน้ำร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน | kg/s |
| $M_c$ | มวลของคอนกรีตในห้องบ่ม | kg |
| $M_i$ | น้ำหนักน้ำในใบยาสูบที่เวลา t | kg |
| $M_{i-1}$ | น้ำหนักน้ำในใบยาสูบที่เวลา $t-\Delta t$ | kg |
| $M_r$ | มวลของอุปกรณ์แขวนใบยาสูบ | kg |
| $M_s$ | มวลของโครงสร้างของห้องบ่ม | kg |
| $MC_e$ | ความชื้นสมดุลย์ของใบยาสูบมาตรฐานแห้ง | |
| MER | อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย | kg water/h |
| N | ความเร็วของมอเตอร์เครื่องอัดไอ | rev/min |
| $P_W$ | ความดันไอน้ำ | kPa |
| $P_{WS}$ | ความดันไอน้ำอิ่มตัว | kPa |
| $P_1$ | ความดันไอก่อนการอัดไอ | $N/m^2$ |
| $P_2$ | ความดันไอหลังการอัดไอ | $N/m^2$ |
| $q_c$ | ความสามารถในการระบายความร้อนจำเพาะของเครื่องควบแน่น | kJ/kg |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $q_e$ | ความสามารถในการทำความเย็นจำเพาะของเครื่องทำระเหย | kJ/kg |
| $q_w$ | งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุดมคติต่อหน่วย | kJ/kg |
| Q | ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมผ่านผนังของปริมาตรควบคุม | kW |
| $Q_c$ | ความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น | kW |
| $Q_e$ | ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย | kW |
| $Q_{ev}$ | อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย | kW |
| $\dot{Q}_f$ | พลังงานสูญเสียจากก๊าซร้อนที่ปล่อยทิ้งออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | kW |
| $Q_{sl}$ | พลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้าง | kJ |
| $Q_{ss}$ | พลังงานที่สะสมอยู่ในโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบ | kJ |
| TD | ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล๊อกมีนระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในท่อ | $^{o}C$ |
| $T_{amb.(d)}$ | อุณหภูมิกระเปาะแห้งของบรรยากาศรอบโรงบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{amb.(W)}$ | อุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศรอบโรงบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_e$ | อุณหภูมิของสารทำงานในเครื่องทำระเหย | $^{o}C$ |
| $T_{ci}$ | อุณหภูมิขาเข้าของสารตัวกลางระบายความร้อน | $^{o}C$ |
| $T_{co}$ | อุณหภูมิขาออกของสารตัวกลางระบายความร้อน | $^{o}C$ |
| $T_{dp}$ | อุณหภูมิจุดน้ำค้าง | $^{o}C$ |
| $T_{ei}$ | อุณหภูมิขาเข้าของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน | $^{o}C$ |
| $T_{eo}$ | อุณหภูมิขาออกของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน | $^{o}C$ |
| $\overline{T}_{ev}$ | อุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย | $^{o}C$ |
| $T_i$ | อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา t | K |
| $T_{i-1}$ | อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา $t-\Delta t$ | K |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $T_{in(d)}$ | อุณหภูมิกระเปาะแห้งทางเข้าบริเวณบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{in(W)}$ | อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้าบริเวณบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{inroom}$ | อุณหภูมิภายในห้องบ่ม | K |
| $T_{out.(d)}$ | อุณหภูมิกระเปาะแห้งทางออกบริเวณบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{out(W)}$ | อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางออกบริเวณบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{outroom}$ | อุณหภูมิภายนอกห้องบ่ม | K |
| $T_{si}$ | อุณหภูมิที่ผิวผนังข้างในของห้องบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $T_{so}$ | อุณหภูมิที่ผิวผนังข้างนอกของห้องบ่มใบยาสูบ | $^{o}C$ |
| $U_{cd}$ | ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องควบแน่น | $kW / m^2 \cdot K$ |
| $U_{ev}$ | ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องทำระเหย | $kW/m^2 \cdot K$ |
| $U_w$ | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งประกอบด้วยการถ่ายเทความร้อน การนำความร้อนและการพาความร้อน | $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$ |
| $v_1$ | ปริมาตรจำเพาะของไอก่อนการอัดไอ | $m^3/kg$ |
| $v_2$ | ปริมาตรจำเพาะของไอหลังการอัดไอ | $m^3/kg$ |
| $V_a$ | ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบจริง | $m^3$ |
| $V_d$ | ปริมาตรที่ถูกแทนที่ของกระบอกสูบเครื่องอัด | $m^3/s$ |
| $V_D$ | ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่ | $m^3$ |
| W | อัตราส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้ง | $kg_w/kg_a$ |
| W | งานเพลาที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมรวมกับงานจากการหดหรือขยายตัวของปริมาตรควบคุม | kW |
| $W_a$ | งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางความเป็นจริง | kW |
| $W_c$ | กำลังงานที่สารทำงานได้รับโดยเครื่องอัดไอ | kW |
| $w_c$ | งานจำเพาะที่สารทำงานได้รับโดยเครื่องอัดไอหรืองานที่เครื่องอัดไอป้อนให้กับวัฏจักร | kJ/kg |
| $W_{ei}$ | อัตราความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องทำระเหย | $kg_w/kg_a$ |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|
| $W_{eo}$ | อัตราความชื้นของอากาศขาออกเครื่องทำระเหย | $kg_w/kg_a$ |
| $W_{in}$ | อัตราส่วนความชื้นของอากาศทางเข้าห้องบ่มใบยาสูบ | $\frac{kg_w}{kg_a}$ |
| $W_{isen}$ | งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางอุดมคติ | kW |
| $W_m$ | งานที่ใช้ในมอเตอร์เครื่องอัดไอ | kW |
| $W_{out}$ | อัตราส่วนความชื้นของอากาศทางออกห้องบ่มใบยาสูบ | $\frac{kg_w}{kg_a}$ |
| $\Delta H$ | การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระแสการไหลของของไหล | kW |
| $\Delta KE$ | การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ | kW |
| $\Delta PE$ | การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ | kW |
| $\Delta U_c$ | การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม | kW |
| $\phi$ | ความชื้นสัมพัทธ์ | % |
| $\varepsilon_{cy}$ | ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักร | |
| $\upsilon$ | ความหนาของพื้น | m |
| $\eta_m$ | ประสิทธิภาพมอเตอร์ | |
| $\eta_{mech}$ | ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องอัดไอ | |
| $\eta_{isen}$ | ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิก | |
| $\eta_v$ | ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร | |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1.1 ความนำ

ยาสูบเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของภาคเหนือของประเทศไทย จากการสำรวจพบว่ามีประชากรมากกว่า 100,000 ครอบครัวที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมการบ่มใบยาสูบ ซึ่งในแต่ละปีมีผลผลิตที่ได้จากยาสูบเป็นปริมาณมากกว่า 30,000 ตัน(ชัชวาล ตัณฑกิตติ, 2541) ประมาณ 80% ของยาสูบทั้งหมดที่ปลูกในประเทศไทยนั้นเป็นยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย การที่ยาสูบพันธ์เวอร์จิเนียได้รับความนิยมในการปลูกมากกว่ายาสูบพันธ์อื่น(ยาสูบพันธ์เบอร์เลย์และพันธ์เตอร์กิช) ก็เนื่องมาจากใบยาสูบที่ได้ มีปริมาณนิโคตินต่ำ และมีปริมาณน้ำตาลสูง อีกทั้งยังเป็นส่วนผสมหลักในการผลิตยาสูบ จึงทำให้ใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียเป็นที่ต้องการของตลาดโลก

ใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียที่ตลาดโลกต้องการนั้น ต้องผ่านกระบวนการบ่มโดยควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมตลอดระยะเวลาที่ทำการบ่ม เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของใบยาสดไปเป็นใบยาแห้งที่มีคุณภาพเหมาะแก่การนำไปใช้ผลิตเป็นยาสูบต่อไป

กรรมวิธีในการบ่มใบยาสูบพันธ์เวอร์จิเนียนี้ต้องใช้การบ่มโดยอาศัยลมร้อน(Flue-Curing) อุณหภูมิโดยเฉลี่ยประมาณ 70□C โดยการบ่มนี้มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 2 ประการ ประการแรกเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวเคมีให้เหมาะสม โดยการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในโรงบ่ม และประการที่สองคือให้ใบยาสูบแห้งที่ได้มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งใบยาสูบแห้งที่ผ่านการบ่มแล้วควรจะมีสัดส่วนน้ำหนักใบยาสูบสดต่อน้ำหนักใบยาสูบแห้งประมาณ 8:1

กระบวนการบ่มใบยาสูบนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการหลัก ต่อไปนี้

**1. การเปลี่ยนสีหรือการทำสี(Yellowing Stage)** เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสีของใบยาสูบจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำตาล ในช่วงเวลานี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีในใบยาสูบขึ้น โดยน้ำตาลจะถูกสันดาปไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้มีความร้อนเกิดขึ้น และยังมีการไล่น้ำออกจากใบยาสูบเล็กน้อยระหว่างกระบวนการนี้ด้วย ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30□C) จนถึง 42□C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มลงจาก 85% เหลือ 65% โดยใช้เวลาประมาณ 35 ชั่วโมง และน้ำหนักของใบยาสูบจะลดลงประมาณ 20-40%ของน้ำหนักใบยาสูบเริ่มต้น โดยในกระบวนการนี้จะมีสสารของแข็งในใบยาสูบหายไปประมาณ 10-30%ของน้ำหนักสสารของแข็งเริ่มต้นของใบ

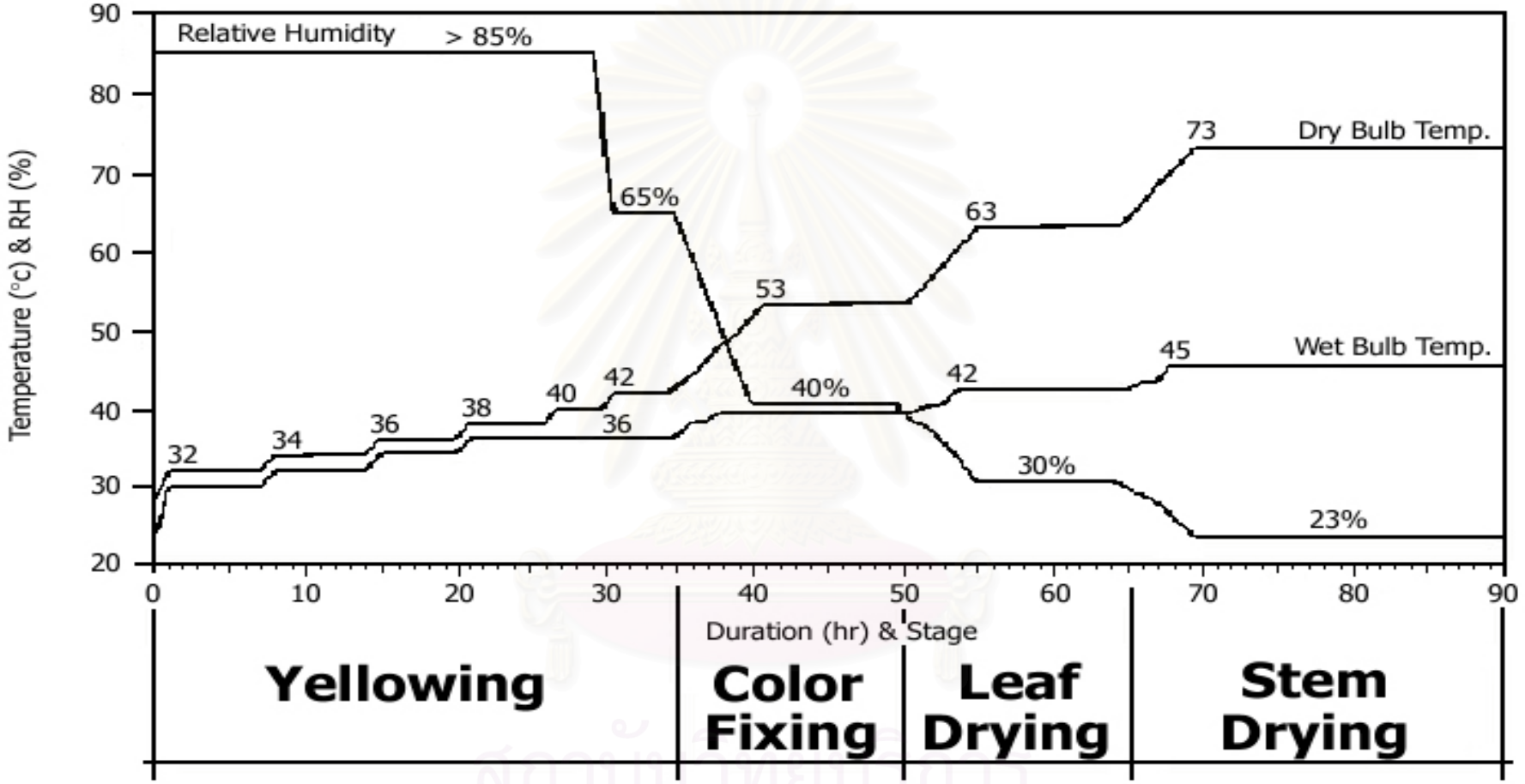
ยาสูบ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นนั่นเอง ในระหว่างกระบวนการนี้จะมีการเปิดช่องระบายอากาศเป็นเพียงบางส่วน

**2. การตรึงสี(Color Fixing)** ระหว่างกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และระดับการลดลงของความชื้นให้เป็นไปตามกำหนดเวลา โดยควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 42°C จนถึง 53°C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในโรงบ่มลงจาก 65% จนเหลือ 40% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ตลอดช่วงเวลาระหว่างกระบวนการนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบขึ้น และน้ำหนักของใบยาสูบจะลดลงเหลือประมาณ 50% ของน้ำหนักใบยาสูบเริ่มต้น

**3. การไล่น้ำที่ใบหรือการทำแห้งใบยาสูบ(Leaf Drying Stage)** เป็นกระบวนการไล่น้ำออกจากส่วนใบให้แห้ง โดยการควบคุมอุณหภูมิ และระดับการลดลงของความชื้นให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่กำหนด ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 53°C จนถึง 63°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มให้ลดลงจาก 40% จนเหลือ 30% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบเกิดขึ้น และน้ำหนักของใบยาสูบจะลดลงไปประมาณ 77% ของน้ำหนักใบยาสดเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้มีความต้องการพลังงานในปริมาณสูง เนื่องจากอุณหภูมิในห้องบ่ม และอัตราการระบายความชื้นมีค่าอยู่ในระดับที่สูง

**4. การไล่น้ำที่ก้าน(Stem Drying or Killing the Stem Stage)** เป็นกระบวนการไล่น้ำออกจากส่วนก้านและในใบที่ยังหลงเหลืออยู่ให้แห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิให้เปลี่ยนแปลงไปตามกำหนดอย่างถูกต้อง ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 63°C ไปเป็น 73°C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มลงจาก 30% จนเหลือ 23% โดยใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ในระหว่างช่วงเวลานี้ช่องระบายอากาศถูกเปิดแง้มไว้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (เกือบปิด) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดพลังงานความร้อน และเมื่อจบกระบวนการนี้ น้ำหนักใบยาสูบจะลดลงประมาณ 89% ของน้ำหนักใบยาสดเริ่มต้น

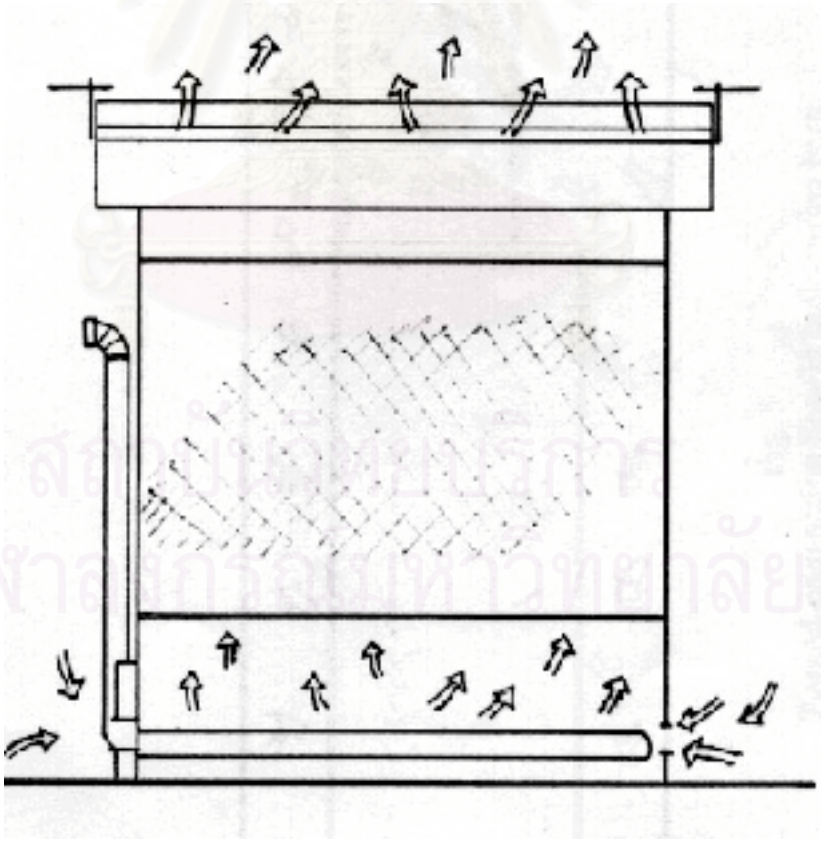
หลังจากผ่านกระบวนการบ่มทั้ง 4 ขั้นตอนแล้ว ก็จะปล่อยให้ใบยาสูบเย็นตัวลงในห้องบ่ม เพื่อช่วยให้การเก็บรักษาใบยาสูบแห้งได้คุณภาพดี ในช่วงเวลานี้ใบยาสูบไม่มีความต้องการพลังงานความร้อนอีกแล้ว โดยจะมีการควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิลดลงจาก 73°C จนถึงอุณหภูมิของบรรยากาศ (ประมาณ 30°C) และในช่วงเวลานี้ใบยาสูบจะมีการดูดน้ำกลับเข้าไปในเซลล์ ดังนั้นน้ำหนักใบยาสูบสุดท้ายหลังจากที่ปล่อยให้เย็นตัวแล้วจะมีค่าประมาณ 86% ของน้ำหนักใบยาเริ่มต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของใบยาสูบ ตลอดช่วงระยะเวลาในการบ่มใบยาสูบได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.1



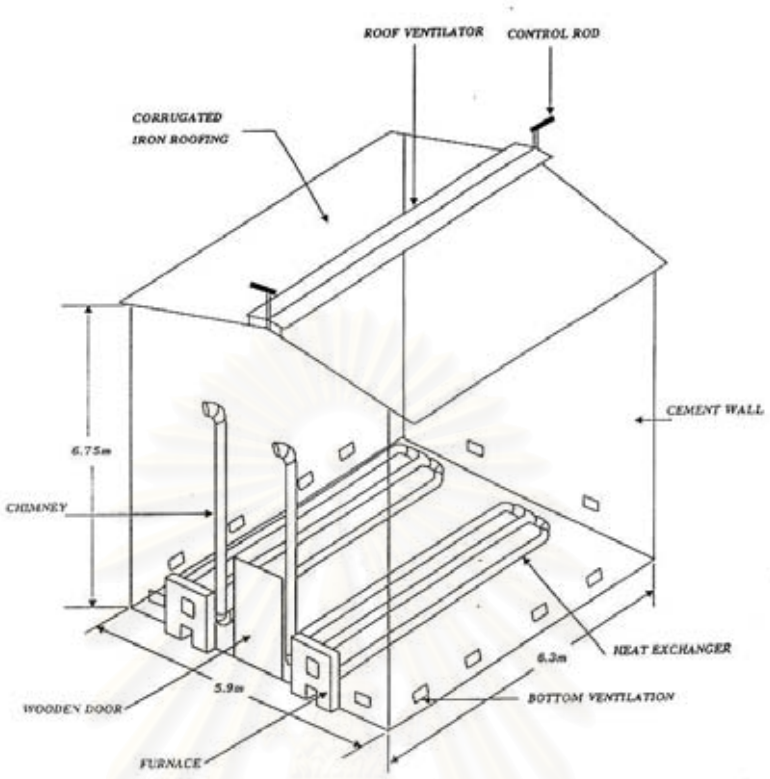

**รูปที่ 1.1** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงเวลาในการบ่มใบยาสูบ

## 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากยาสูบเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของภาคเหนือของประเทศไทย ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ดังนั้นอุตสาหกรรมบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียจึงเป็นอุตสาหกรรมที่แพร่หลายมากในภาคเหนือของประเทศไทย ในอดีตผู้ประกอบการบ่มใบยาสูบในประเทศไทยจำนวนกว่า 90% ใช้วิธีการบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม ซึ่งใช้การพาความร้อนแบบธรรมชาติผ่านใบยาสูบ และเตาเผาที่ใช้เป็นแบบเปิดโดยใช้ฟืนไม้เป็นเชื้อเพลิง (Natural Convection Barns with Fire-Tubes and Opened-Firewood Furnaces) โดยปล่อยให้อากาศร้อนไหลผ่านชั้นของใบยาสูบเองตามธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องแขวนใบยาสูบอย่างหลวมๆ ทำให้โรงบ่มใบยาสูบมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้มีการสูญเสียพลังงานผ่านโครงสร้างเป็นจำนวนมาก และลมร้อนที่ผ่านชั้นสุดท้ายของใบยาสูบแล้วจะถูกปล่อยทิ้งออกไปทางหลังคา ทำให้ต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมากในการบ่มใบยาสูบ(ดังแสดงในรูปที่ 1.2 และ 1.3) อีกทั้งการพาความร้อนตามธรรมชาติของลมร้อนจะทำให้คุณภาพของใบยาสูบไม่สม่ำเสมอทั่วกันทั้งโรงบ่มใบยาสูบ การบ่มใบยาสูบด้วยวิธีการและโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิมนี้ให้ประสิทธิภาพทางพลังงานที่ต่ำมาก ถึงแม้ว่าฟืนไม้จะเป็นแหล่งพลังงานที่สามัญที่สุดก็ตาม



**รูปที่ 1.2** ลักษณะการไหลของอากาศของการบ่มใบยาสูบแบบการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Flue Curing or Natural Convection Curing).



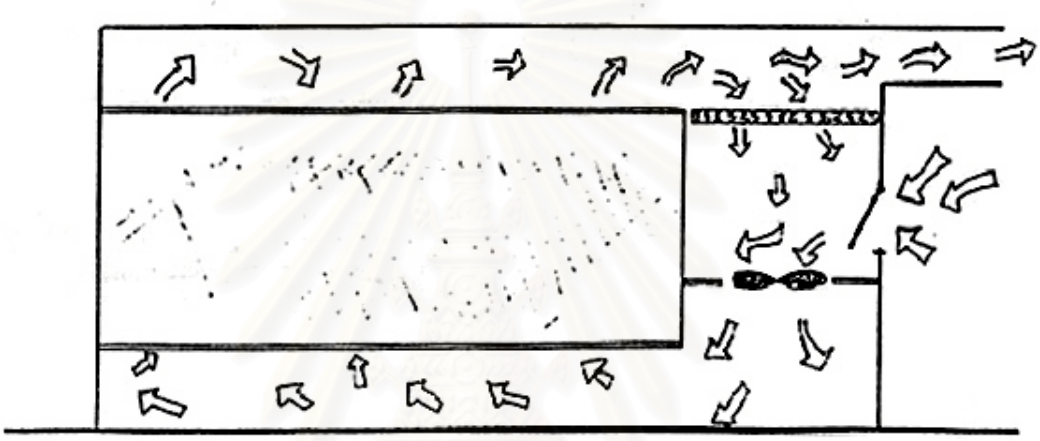

**รูปที่ 1.3** รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม

เนื่องจากปริมาณป่าไม้ในประเทศลดลงเป็นอย่างมากส่งผลให้เกิดการขาดแคลนฟืนไม้อย่างหนัก จึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากฟืนไม้มาเป็นลิกไนต์แทน เพราะลิกไนต์ให้ค่าพลังงานความร้อนในการเผาไหม้ได้สูงกว่า และประกอบกับมีแหล่งลิกไนต์อยู่ในภาคเหนืออยู่แล้ว ถึงแม้ว่าลิกไนต์จะให้ค่าพลังงานความร้อนได้มากกว่าฟืนไม้ แต่ด้วยประสิทธิภาพทางด้านพลังงานโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิมที่ต่ำ พบว่าจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนในการบ่มใบยาสูบ 140-160 MJ/kgใบยาแห้ง(ชัชวาล ตัณฑกิตติ, 2541) และจากข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า ในปีหนึ่งๆ มีการใช้ลิกไนต์สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการบ่มใบยาสูบเป็นปริมาณสูงถึง 250,000 ตัน ซึ่งการใช้ลิกไนต์ในปริมาณมากถึง 250,000 ตันต่อปี ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแน่นอน และเนื่องจากในลิกไนต์มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการเผาไหม้ก็ย่อมที่จะเกิดก๊าซ $SO_2$ ขึ้น ซึ่งก๊าซ $SO_2$ นี้เป็นก๊าซมลพิษที่ร้ายแรงชนิดหนึ่ง

เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งหมายถึงการลดลงของปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการบ่มใบยาสูบ ย่อมส่งผลให้มีการปล่อยสารมลพิษ เช่น $SO_2$ สู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณที่ลดลงด้วย จึงมีความพยายามที่จะลดปริมาณการใช้ลิกไนต์ในการบ่มใบยาสูบ โดยเปลี่ยนวิธีการบ่มใบยาสูบจากการบ่มใบยาสูบแบบการพาความร้อนตามธรรมชาติ(Flue-Curing or Natural Convection Curing) ซึ่งเป็นวิธีการบ่มแบบดั้งเดิมที่มีประสิทธิภาพทางพลังงานต่ำ

มาเป็นวิธีการบ่มใบยาสูบแบบพาความร้อนแบบบังคับ(Forced-Convection Curing or Bulk Curing) แทน

การบ่มใบยาสูบแบบพาความร้อนแบบบังคับ ที่มีการติดตั้งใช้โดยทั่วไปในภาคเหนือของประเทศไทยเป็นแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ ซึ่งหลักการทำงานของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้ ใช้พัดลมพัดลมร้อนผ่านชั้นของใบยาสูบและช่วยบังคับให้ลมร้อนจำนวนหนึ่งหมุนเวียนอยู่ในห้องบ่มใบยาสูบ โดยลมที่อุณหภูมิบรรยากาศจะถูกดูดเข้ามาแลกเปลี่ยนความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้น้ำร้อนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน(ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และ 1.5)



**รูปที่ 1.4** แสดงการไหลของอากาศในรูปแบบการบ่มแบบการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced-convection or bulk-curing)

จากผลการศึกษาโครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยหน่วยประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จะเห็นได้ว่าโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึงประมาณ 3 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานในโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม(ชัชวาล ตัณฑกิตติ, 2541) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการบ่มใบยาสูบในโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ ใบยาสูบจะถูกแขวนรวมกันแบบอัดแน่น ทำให้ขนาดของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์มีขนาดเล็กกว่าโรงบ่มแบบดั้งเดิม เมื่อเปรียบเทียบขนาดของโรงบ่มทั้งสองชนิดที่ความจุเดียวกัน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนผ่านโครงสร้างน้อยลง และมีการนำลมร้อนที่ผ่านชั้นใบยาสูบแล้วบางส่วนกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย นอกเหนือจากพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบมีค่าลดลงแล้ว การบ่มใบยาสูบแบบใหม่นี้ยังช่วยเพิ่มคุณภาพของผลผลิตใบยาสูบแห้งให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้นอีกด้วย แต่เนื่องจากโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้จำเป็นต้องใช้เงินลงทุนสูง จึงทำให้ไม่เป็นที่นิยมกันมากนัก ต่อมาสำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติได้เล็งเห็นประโยชน์ของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ จึงได้ดำเนินแผนงานให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายบางส่วนใน

การลงทุนก่อสร้างโรงบ่มใบยาสูบแบบใหม่นี้ ทำให้มีการนำเอาโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้ มาใช้ทดแทนโรงบ่มใบยาสูบแบบเก่าเพิ่มมากขึ้น

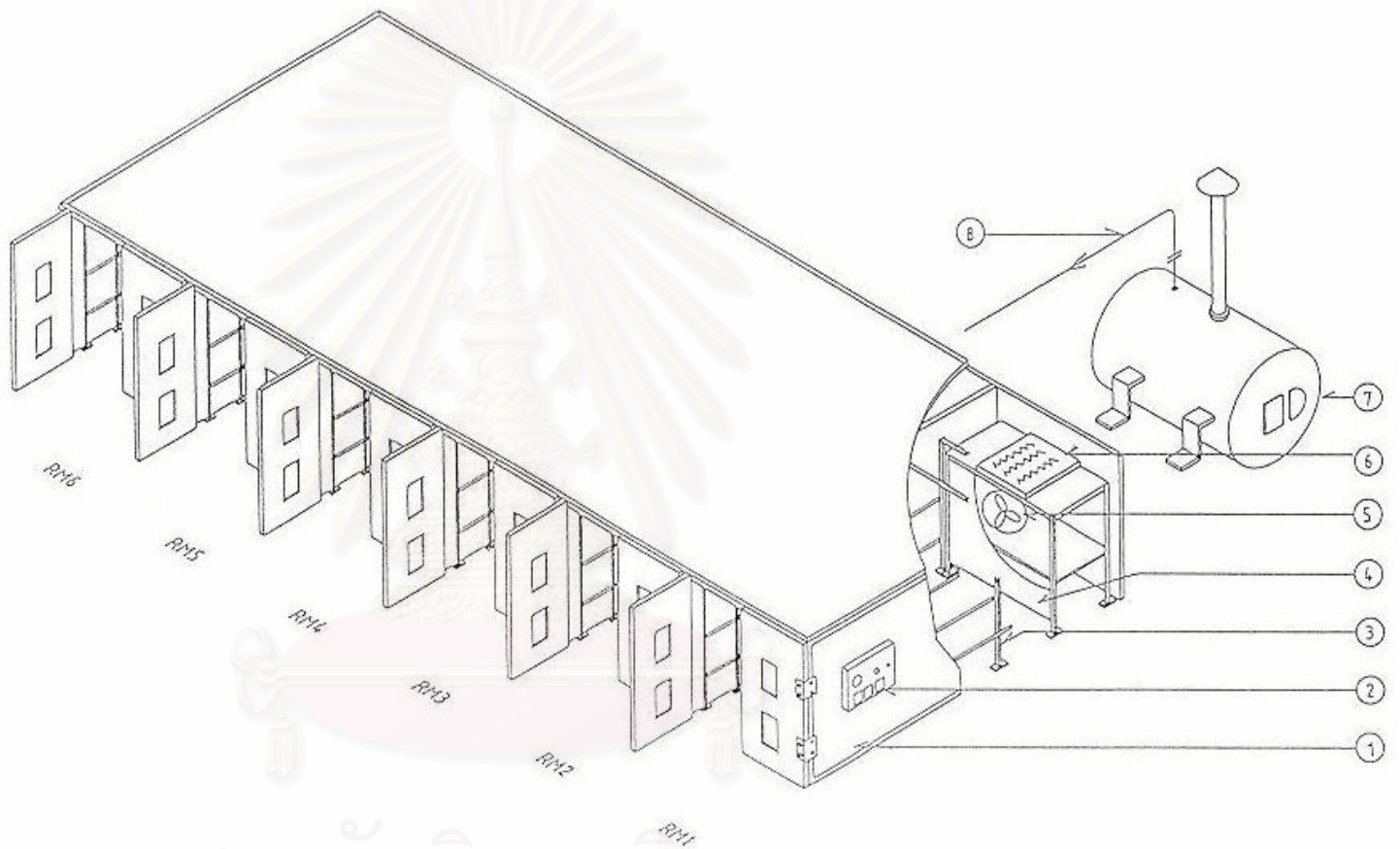
โรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ ใช้หม้อน้ำร้อนเป็นศูนย์กลางการผลิตความร้อน เพื่อแจกจ่ายให้กับห้องบ่มใบยาทั้งหมดภายในโรงบ่ม(หม้อน้ำร้อน 1 ตัว จ่ายน้ำร้อนให้กับห้องบ่มใบยาประมาณ 6 ห้องหรือมากกว่า) ดังนั้นในการบ่มใบยาสูบในโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการให้มีการบ่มใบยาสูบของแต่ละห้องบ่มใบยาในโรงบ่มอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของหม้อน้ำร้อนและเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงในเวลาเดียวกันนี้ด้วย

ถึงแม้ว่า โรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้จะมีประสิทธิภาพทางพลังงานสูงกว่าโรงบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิมก็ตาม แต่ปัญหาเรื่องมลพิษจากการเผาไหม้(เขม่าและก๊าซ $SO_2$) ก็ยังคงมีอยู่ ทั้งนี้เนื่องจากหม้อน้ำร้อนที่ใช้ในปัจจุบันยังคงมีประสิทธิภาพในการการเผาไหม้ที่ต่ำ อีกทั้งเชื้อเพลิงที่ใช้ยังคงเป็นลิกไนต์ ซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้การควบคุมมลพิษหรือการกำจัดมลพิษจากการเผาไหม้นี้เป็นไปได้ยาก และผู้ประกอบการมีความจำเป็นที่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม

โรงบ่มใบยาแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์เป็นระบบที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้การลงทุนเริ่มต้นมีมูลค่าสูง จึงมีเพียงผู้ประกอบการบ่มใบยาสูบขนาดกลางถึงขนาดใหญ่เท่านั้นที่สามารถเปลี่ยนมาใช้การบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์นี้ได้ ถึงแม้ว่าทางสำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติมีแผนงานที่ให้การสนับสนุนอยู่แล้วก็ตาม ส่งผลให้ผู้ประกอบการบ่มใบยาสูบรายย่อยเป็นจำนวนมากยังคงใช้วิธีการบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิมอยู่ จึงทำให้ปริมาณการใช้ลิกไนต์ยังคงมีค่าสูงและยากแก่การควบคุมมลภาวะ

จากเหตุผลดังกล่าวทั้งหมดข้างต้น จึงมีการนำแนวความคิดเรื่อง การนำปั๊มความร้อนมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนในห้องบ่มใบยาสูบแทนการใช้ความร้อนแบบรวมศูนย์ซึ่งมีหม้อน้ำร้อนเป็นแหล่งผลิตความร้อน(ดังแสดงในรูปที่ 1.6) ทั้งนี้เพราะปั๊มความร้อนสามารถให้พลังงานความร้อนในปริมาณที่มากกว่าพลังงาน(เมื่อเทียบเป็นพลังงานความร้อน)ที่มันต้องการใช้ อีกทั้งปั๊มความร้อนใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อน จึงไม่มีก๊าซเสียซึ่งเกิดจากการเผาไหม้มาก่อให้เกิดมลภาวะให้กับชุมชนที่มีการประกอบการบ่มใบยาสูบอีกด้วย นอกจากนั้นปั๊มความร้อนยังมีสมรรถนะการทำงานอยู่ในเกณฑ์ที่สูง และยังง่ายต่อการจัดการการบ่มใบยาสูบกว่าโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ เพราะการใช้ความร้อนจากปั๊มความร้อนในห้องบ่มใบยาสูบแต่ละห้องของโรงบ่มจะแยกจากกันโดยอิสระ และมีความเป็นไปได้ที่การลงทุนเริ่มต้นจะมีมูลค่าต่ำกว่าโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ

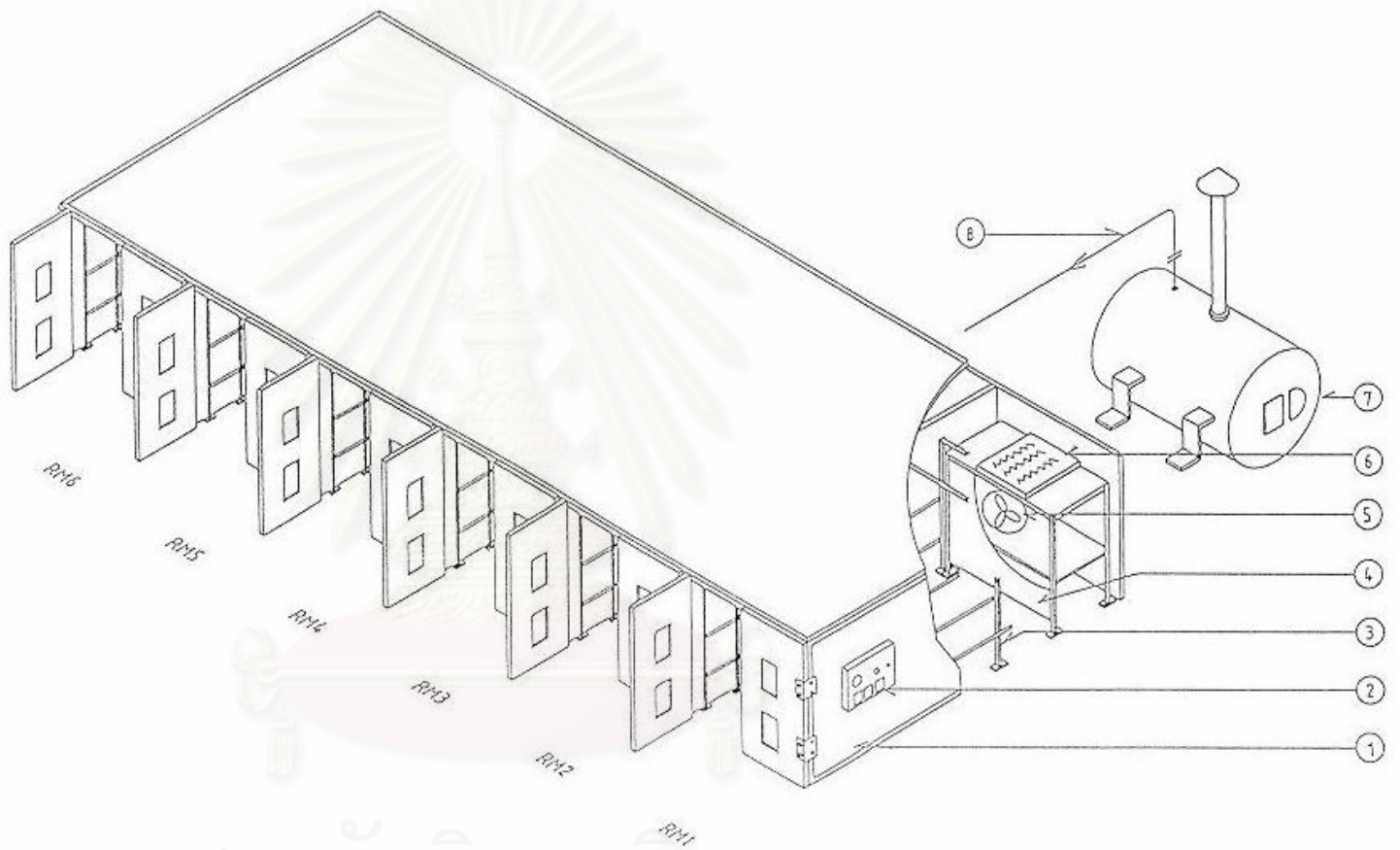
| No. | Name |
|---|---|
| 1. | โรงบ่มใบยา |
| 2. | ชุดควบคุม |
| 3. | โครงเหล็ก |
| 4. | ผนังแจกลม |
| 5. | พัดลมพร้อมมอเตอร์ |
| 6. | คอล์ยร้อน |
| 7. | หม้อต้มน้ำ |
| 8. | ท่อน้ำร้อน |




**รูปที่ 1.5** รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| No. | Name |
|---|---|
| 1. | โรงบ่มใบยา |
| 2. | ชุดควบคุม |
| 3. | โครงเหล็ก |
| 4. | ผนังแจกลม |
| 5. | พัดลมพร้อมมอเตอร์ |
| 6. | คอล์ยร้อน |
| 7. | หม้อต้มน้ำ |
| 8. | ท่อน้ำร้อน |




**รูปที่ 1.5** รูปแสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำปั๊มความร้อนมาใช้ในการบ่มใบยาสูบแทนระบบหม้อน้ำร้อนแบบรวมศูนย์ โดยพิจารณาทั้งในแง่ของการใช้พลังงานในทางเศรษฐศาสตร์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการทำงานของปั๊มความร้อน เพื่อนำไปใช้กับการบ่มใบยาสูบแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์โดยอาศัยข้อมูลการทำงานที่ได้จากการตรวจวัดจริง ซึ่งเป็นกระบวนการสภาวะไม่คงตัว (Unsteady State)
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางพลังงานของการบ่มใบยาสูบระหว่างแบบใช้ปั๊มความร้อนกับแบบใช้ความร้อนรวมศูนย์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้ในการจำลองการทำงานของปั๊มความร้อน เพื่อใช้ในการบ่มใบยาสูบ
3. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อศึกษาและทำนายการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบแบบใช้ปั๊มความร้อน
4. วิเคราะห์และประเมินความเหมาะสมในการบ่มใบยาสูบแบบใช้ปั๊มความร้อน โดยพิจารณาที่การใช้พลังงานจำเพาะ และตรวจสอบจากกฎข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์
5. ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบแบบใช้ปั๊มความร้อนที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบแบบความร้อนรวมศูนย์ซึ่งได้มาจากการเก็บข้อมูลการทำงานจริง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถช่วยลดปัญหาด้านการปล่อยสารมลพิษจากการใช้ลิกไนต์สู่ชุมชน
2. เพื่อเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้ประกอบการบ่มใบยาสูบในการลงทุน
3. ได้สมรรถนะของโรงบ่มใบยาสูบแบบใช้ปั๊มความร้อน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่ผ่านมา สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 เรื่องหลักด้วยกัน ก็คือ เรื่องการบ่มใบยาสูบ และเรื่องการใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้ง โดยงานวิจัยเกี่ยวกับการบ่มใบยาสูบที่ผ่านมานั้น มีการศึกษาถึงค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการบ่มใบยาสูบ และมีการศึกษาถึงประสิทธิภาพทางความร้อนของโรงบ่มแบบรวมศูนย์และโรงบ่มแบบดั้งเดิม ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้งนั้น ก็มีการศึกษาถึงสมรรถนะการทำงานของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบต่างๆ และพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการอบแห้ง โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 2.1.1 การบ่มใบยาสูบ

A. Hiran (1986) ได้ทำการศึกษา วิธีการในการประหยัดพลังงานสำหรับการบ่มใบยาสูบแบบ Forced-draught bulk curing ซึ่งเป็นรูปแบบการบ่มฯ ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศที่มีใบยาสูบเป็นพืชเศรษฐกิจ จากการศึกษา พบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบแบบ Forced-draught bulk curing นี้ก็คือ อัตราการระบายอากาศออกจากห้องบ่มใบยาสูบซึ่งได้แสดงอยู่ในรูป Air change/hr (อัตราการระบายอากาศออกจากห้องบ่มใบยาสูบต่อชั่วโมงเมื่อเทียบกับปริมาตรห้องบ่มใบยาสูบ) จากนั้นได้มีการทำการทดลองโดยใช้ SKY bulk curing barn ที่สถานีบ่มใบยาสูบนอร์ไทย อ.แม่โจ้ จ.เชียงใหม่ และจากการจำลองแบบจะได้ว่าอัตราการระบายอากาศออกที่เหมาะสมสำหรับช่วงการเปลี่ยนสีหรือการทำสี (Yellowing Stage) ช่วงการตรึงสี(Color Fixing Stage) ช่วงการทำแห้งใบยา (Leaf Drying Stage) และช่วงการไล่น้ำที่ก้าน(Stem Drying Stage) มีค่าเป็น 15, 21, 30, 5 Air change/hr ตามลำดับ โดยใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ 29.3 MJ/kg ใบยาแห้ง

Bridges, Walton และ Ross (1981) ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) อุณหภูมิของอากาศ และปริมาณความชื้นของใบยาสูบภายในห้องบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม ซึ่งใช้ใบยาสูบพันธุ์เบอร์เลย์ในการศึกษา โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายการวิเคราะห์การอบแห้งแบบ deep layer เพื่อทำนายสภาวะแวดล้อมภายในห้องบ่มใบยาสูบ และปริมาณความชื้นในใบยาสูบระหว่างที่ทำการบ่ม โดยกำหนดให้การระเหยของน้ำในโรงบ่มใบยาสูบระเหยแบบ adiabatic cooling และการระเหยนี้เกิดขึ้นแบบเป็นชั้นๆ ตามความสูงของห้องบ่มใบยาสูบ ซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับการระเหยน้ำที่เกิดขึ้นในการอบ

แห้งเมล็ดพันธุ์พืช และได้มีการทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย เนื่องจากการบ่มใบยาสูบจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการบ่มเพื่อให้ได้ใบยาสูบแห้งที่มีคุณภาพดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงลักษณะของห้องบ่มเป็นบางส่วน เพื่อง่ายแก่การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้เป็นไปตามความเหมาะสม และเมื่อนำผลที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือสนับสนุนให้เห็นว่ารูปทรงของห้องบ่มใบยาสูบมีผลต่อการเปลี่ยนความเร็วของอากาศขณะที่ผ่านไปตามห้องบ่มใบยาสูบ และการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่มใบยาสูบให้ได้คุณภาพดี

Chin และ William (1984) ได้ศึกษาถึงการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นโรงบ่มใบยาสูบ โดยนำการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้เพื่อคำนวณการสูญเสียความร้อนนี้ภายใต้สภาวะต่างๆ โดยพิจารณาการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นของโรงบ่มเป็นแบบ 2 มิติ จากนั้นก็ได้มีการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 1 มิติของ Chang et al. (1978) ปรากฏว่าผลลัพธ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงได้ทำการคำนวณหาการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นแบบต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า 1) การติดตั้งฉนวนที่ด้านข้างหรือด้านล่างเพียงอย่างเดียวสำหรับโรงบ่มใบยาสูบแบบห้องเดียวสามาถลดการสูญเสียความร้อนลงได้ประมาณ 16% 2) การออกแบบโรงบ่มใบยาสูบให้มีหลายห้องอยู่ติดกันโดยไม่มีการติดตั้งฉนวนสามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบลงเหลือประมาณ 86%

Cundiff J.S. (1983) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดจากพลังงานความร้อนที่สะสมจากแสงอาทิตย์ โดยได้ทำการทดลองบ่มใบยาสูบในห้องบ่มขนาดหนึ่งในห้าของขนาดห้องบ่มจริง (30 racks) จำนวน 3 ห้อง โดยเริ่มทำการบ่มทุกวันจันทร์, พุธ และศุกร์ของแต่ละสัปดาห์ เป็นเวลา 4 สัปดาห์ติดต่อกัน แผ่นสะสมความร้อนชนิดแผ่นราบแบบเคลือบหน้าเดียว (Single-glazed flat plate collector) และระบบเก็บความร้อนที่ใช้หินเป็นตัวเก็บความร้อน (Rock storage system) ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศแวดล้อมก่อนที่จะเข้าไปยังห้องบ่มโดยเฉลี่ย 25$^{\circ}$C และ 20.2$^{\circ}$C สำหรับเวลากลางวัน และกลางคืนตามลำดับ ซึ่งสามารถเทียบได้เป็นพลังงานถึง 37% ของพลังงานทั้งหมดที่ต้องการใช้ในการบ่มใบยาสูบ ซึ่งค่าความต้องการพลังงานความร้อนโดยเฉลี่ยในการบ่มใบยาสูบมีค่าเท่ากับ 12.7 MJ/kgใบยาแห้ง จากนั้นก็ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสมดุลพลังงานในการบ่มใบยาสูบ และได้ทำการทำนายการบ่มใบยาสูบทุกๆ ชั่วโมงตลอดการบ่มฯ พบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทำนายมีค่าเฉลี่ยประมาณ –3% จากที่ทำการบ่มทั้งหมด 12 ครั้ง จากนั้นเขาก็นำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาใช้เป็นเครื่องมือในการเปรียบเทียบความคิดของเขาที่ว่า ควรจะทำการเพิ่มอัตราการไหลของ

อากาศที่ใช้ในการบ่มในขณะกลางวันให้มากขึ้นเพื่อจะได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด กับการบ่มใบยาสูบที่ใช้อัตราการไหลของอากาศในการบ่มคงที่ในแต่ละวันตลอดการบ่มฯ ผลที่ได้จากการทำนายแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศในช่วงเวลากลางวันสามารถเพิ่มพลังงานได้โดยเฉลี่ย 5% จากการบ่มใบยาสูบ ทั้งหมด 12 ครั้ง ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบจริงสำหรับอัตราการไหลของอากาศที่มีการแนะนำไว้ที่ 20, 35, 50, 70, 40 และ 20 $m^3$/hr สำหรับการบ่มฯ ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 6 ตามลำดับ มีค่ามากกว่าพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประมาณ 21-39%

Kiranoudis, Maroulis และ Marinos-Kousis (1990) ได้ทำการศึกษาการระเหยของความชื้นในใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย ตลอดระยะเวลาที่ทำการบ่มใบยาสูบ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 4 แบบจำลอง เพื่ออธิบายถึงการถ่ายเทความชื้นระหว่างการบ่มใบยาสูบภายใต้การแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิอากาศและความชื้น โดยใช้ผลการทดลองที่ได้จากผู้ประกอบการบ่มใบยาสูบมาตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองฯ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายนี้ขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ว่าความต้านทานหลักในการถ่ายเทความชื้นก็คือชั้นของอากาศระหว่างใบยาสูบกับอากาศ และสิ่งที่กระตุ้นให้เกิดการถ่ายเทความชื้นก็คือ water activity difference ซึ่งได้มีการตรวจสอบแล้วว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายนี้มีความถูกต้องสูงมาก โดยได้มีการเสนอ และทำการทดสอบสมการหลักที่ใช้ในการทำนายปริมาณความชื้นสมดุล(Equilibrium Moisture Content) ของใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและ water activity ของอากาศโดยรอบ กับผลการทดลองอีกด้วย

ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ (2542) ได้ศึกษาถึงกระบวนการบ่มใบยาสูบเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการบ่มใบยาสูบเพื่อนำมาใช้ทำนายการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัดแน่น โดยมีการนำผลที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง ปรากฏว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้ทำนายการใช้พลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบได้อย่างถูกต้อง โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกินโดยเฉลี่ยไม่เกิน 10% และจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบประกอบไปด้วย อุณหภูมิและความชื้นในอากาศที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ และอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านชั้นของใบยาสูบ โดยอัตราการไหลของอากาศผ่านชั้นใบยาสูบที่เหมาะสมนั้นควรจะมีค่าประมาณ 15, 21, 30 และ 5 m3/hr สำหรับช่วงการเปลี่ยนสีหรือทำสี(Yellowing), ช่วงการตรึงสี(Color fixing), ช่วงการไล่น้ำที่ใบหรือการทำแห้งใบยาสูบ(Leaf drying) และการไล่น้ำที่ก้าน(Stem drying) ตามลำดับ และจากการพิจารณาสมดุลพลังงานของการบ่มใบยาสูบ พบว่าพลังงานความร้อนขาออกจากห้องบ่มใบยาสูบประกอบไปด้วย พลังงานความร้อนที่ไหลออกจากห้องบ่มใบยาสูบไปพร้อมกับลมร้อน พลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบ และพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านผนังห้องบ่มใบยาสูบ โดยมีค่าประมาณ 80%, 14% และ 6% ตาม

ลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบการใช้พลังงานสำหรับการบ่มใบยาสูบรูปแบบต่างๆ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น พบว่ารูปแบบการบ่มใบยาสูบของ A. Hiran จะใช้พลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า น้อยกว่ารูปแบบการบ่มใบยาสูบที่โรงบ่มใบยาสูบในปัจจุบันใช้อยู่

### 2.1.2 การใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้ง

Aceves-Saborio S. (1993) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานระหว่างการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน กับการอบแห้งโดยใช้ขดลวดความร้อน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกำหนดให้ระบบทั้งสองทำงานที่สภาวะเดียวกัน วัตถุประสงค์ของการทำวิจัยครั้งนี้ก็เพื่อพิจารณาว่าการอบแห้งแบบใดเป็นทางเลือกที่ดีกว่าเมื่อทำงานในสภาวะเดียวกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ของการ อบแห้งทั้งสองแบบนั้นถูกแสดงอยู่ในรูป มวลของน้ำที่ถูกระเหยต่อหน่วยของพลังงานที่ใช้ (Specific Moisture Extraction หรือ SMER) และผลของการวิเคราะห์ได้ชี้ให้เห็นว่า การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนใช้พลังงานน้อยกว่าการอบแห้งแบบใช้ขดลวดความร้อน ยกเว้นในขณะที่ความชื้นเหลืออยู่ในปริมาณน้อยมาก และการที่มีอากาศจากภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศที่หมุนเวียนอยู่ ส่งผล อย่างมากต่อสมรรถนะในการอบแห้ง และจะยิ่งส่งผลให้สมรรถนะของการอบแห้งลดลงเป็นอย่างมากเมื่ออัตราส่วนความชื้นภายในห้องอบแห้งแตกต่างกับสิ่งแวดล้อมมาก

Chou และคณะ (1994) ได้ศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาแนวทางการเลือกส่วนประกอบของระบบที่เหมาะสม ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนคือ 1)ค่าคอนแทคแฟคเตอร์ (สัดส่วนของความแตกต่างความชื้นของอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้งต่อความแตกต่างความชื้นของอากาศที่เข้าและออกจากห้องอบแห้งในสภาวะอิ่มตัว) 2)สภาวะอากาศที่เข้าห้องอบแห้ง 3) อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นของอากาศ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Jia, Jolly และ Clement (1990a และ 1990b) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มความร้อนสำหรับการอบแห้งแบบต่อเนื่อง และได้มีการศึกษาถึงผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น โดยในการวิเคราะห์จะแบ่งรูปแบบในการอบแห้งแบบต่อเนื่องออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) เครื่องอบแห้งที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง (Dehumidifier Heat Pump Dryer) โดยมีการนำอากาศหลังอบแห้งบางส่วนที่ไม่ได้ถูกปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ โดยที่ส่วนหนึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องทำระเหยเพื่อลดความชื้น และส่วนที่เหลือก็จะถูกส่งไปผสมกับอากาศแห้งก่อนที่จะเข้าไปยังเครื่องควบแน่น ซึ่งอัตราส่วนของอากาศที่ไม่ได้ไหลผ่านเครื่องระเหยต่ออากาศทั้งหมดนี้ เรียกว่า อัตราส่วนไหลข้ามเครื่องทำระเหย(Evaporation by-pass air ratio) 2) เครื่องอบแห้งแบบเปิด(Open Air Cycle Heat Pump Dryer) ถึงแม้ว่าระบบนี้จะถูกเรียกว่าเป็นระบบเปิด แต่ก็ไม่ได้มีการนำอากาศแวดล้อมภายนอกทั้งหมดมาใช้เพื่ออบแห้ง ระบบนี้ก็ยังคงมีการนำอากาศหลังอบแห้งบางส่วนกลับมาหมุนเวียน

ใช้ใหม่ โดยอากาศหลังอบแห้งนี้จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ซึ่งอากาศหลังอบแห้งส่วนแรกจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องทำระเหย เพื่อเก็บคืนความร้อน(heat recovery) ก่อนที่จะถูกปล่อยออกไปสู่บรรยากาศ และอากาศหลังอบแห้งส่วนที่สองจะไม่ถูกส่งผ่านเครื่องทำระเหย(Evaporator by-pass air) แต่จะถูกนำไปผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอก ก่อนที่จะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น ดังนั้นเครื่องอบแห้งในแบบที่สองนี้จะไม่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง จากผลการทำนายของแบบจำลองฯ จะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ได้แก่ ปริมาณอากาศที่หมุนเวียนทั้งหมด สัดส่วนอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ และสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหย สำหรับสัดส่วนอากาศไหลข้ามเครื่องทำระเหยนั้น ไม่มีผลมากนักต่อค่า SMER โดยการเพิ่มของสัดส่วนอากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหย อาจทำให้ค่า SMER มีค่าสูงขึ้นเพียง 20% เท่านั้น แต่จะส่งผลให้ค่า COP ลดลง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำยาที่เครื่องทำระเหยและเครื่องควบแน่น สำหรับเครื่องอบแห้งแบบแรกที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้ง การลดปริมาณของอากาศที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ หรือการเพิ่มสัดส่วนอากาศที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ จะช่วยให้อุณหภูมิอากาศก่อนอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ SMER และปริมาณผลผลิตต่อชั่วโมง(MP) มีค่าสูงขึ้น โดยพบว่า ถ้าสามารถลดปริมาณอากาศที่ทิ้งสู่บรรยากาศลงได้ 10% ก็จะสามารถเพิ่มค่า SMER และ MP ได้ 15 และ 15% ตามลำดับ แต่การเพิ่มขึ้นของสัดส่วนอากาศที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่นั้นถูกจำกัดด้วยอุณหภูมิน้ำยาที่เครื่องทำระเหย ซึ่งจะต้องมีค่าไม่สูงเกินกว่าขีดจำกัดสูงสุดของอุณหภูมิน้ำยา นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ยังพบว่า เครื่องอบแห้งในระบบเปิด(เครื่องอบแห้งแบบที่สอง)มีการตอบสนองที่ไวต่ออากาศแวดล้อมภายนอกมากกว่าเครื่องอบแห้งแบบแรก ดังนั้นเครื่องอบแห้งในระบบเปิดนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในฤดูร้อน ส่วนเครื่องอบแห้งที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนอบแห้งมีความเหมาะสมที่จะใช้ในฤดูหนาว และยังพบว่าค่า SMER และ COP ของระบบมีค่าดีกว่ามาก เมื่ออากาศที่ไหลข้ามเครื่องทำระเหยถูกส่งไปยังที่ทางเข้าของเครื่องควบแน่นแทนที่จะส่งไปยังทางออกของเครื่องควบแน่น และในการศึกษานี้ยังพบว่าการใช้ Recuperator (เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่ออุ่นอากาศก่อนเข้าเครื่องควบแน่น) ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแต่อย่างใด

Jose' A.R.P. (1986) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มความร้อนเพื่อที่จะทำนายสมรรถนะโดยรวมของระบบหนึ่งๆ โดยใช้สมการพื้นฐานของแต่ละอุปกรณ์ในวัฏจักรปั๊มความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องควบแน่น (Condenser) และเครื่องทำระเหย (Evaporator) ซึ่งสภาวะการทำงานของปั๊มความร้อน เช่น ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ อุณหภูมิของแหล่งรับความร้อนและแหล่งจ่ายความร้อน อัตราการไหลของของไหลที่มารับความร้อนและให้ความร้อน ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็น โดยพารามิเตอร์หลักบางตัวที่มีหน้าที่กำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ชนิดต่างๆในวัฏจักรก็จำเป็นต้องมีการกำหนดขึ้นมาก่อน เช่น ดัชนีโปลีโทรปิกของคอมเพรสเซอร์ และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ก็จำเป็นต้องใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเช่นกัน เมื่อนำแบบจำลอง

ทางคณิตศาสตร์มาทำนายสมรรถนะของปั๊มความร้อนชนิด high-temperature water-to-water โดยใช้น้ำยา R-11 โดยผลที่ได้จากการทำนายเมื่อนำมาเทียบกับผลการทดลองแล้วปรากฏว่า มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยรวมเกิดขึ้นไม่ถึง 10% โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ มาจากการที่ไม่ได้นำเอาการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม และการสูญเสียจากความดันของสารทำความเย็น มาคำนวณรวมอยู่ด้วย

Manuel และคณะ (1990) ได้อธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Jose' A.R.P. (1986) เพื่อที่จะทำนายสมรรถนะของระบบอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนแบบอัดไอ โดยกำหนดลักษณะและสภาวะการทำงานของระบบเฉพาะขึ้นมาระบบหนึ่ง จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้เป็น 2 หัวข้อคือ 1)เมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานในการอบแห้งก็จะน้อยลง 2)ปั๊มความร้อนมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมไม่ว่าที่สภาวะการทำงานใดๆ ก็ตาม

Meyer และ Greyvenstein (1992) ได้ศึกษาถึงด้านเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งเมล็ดพืชด้วยปั๊มความร้อน โดยเปรียบเทียบกับระบบอบแห้งแบบเดิมที่ใช้ขดลวดความร้อน และใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง พบว่าในช่วงระยะเวลาต่ำกว่า 3 เดือน การอบแห้งโดยใช้ขดลวดความร้อนและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ให้ผลตอบแทนคุ้มค่ากว่าใช้ปั๊มความร้อน ทั้งนี้เพราะการลงทุนขั้นต้นของปั๊มความร้อนมีค่าสูงกว่า แต่การใช้ปั๊มความร้อนนั้นจะสามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายได้ดีกว่าระบบใช้ขดลวดความร้อนและน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เมื่อใช้อบแห้งในระยะเวลา 1 ปี และทำงานมากกว่า 1 อย่าง เช่น ทำการอบแห้งควบคู่กับการทำน้ำอุ่นเป็นต้น

Prasertsan และคณะ (1996a, 1996b และ 1997) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอบแห้ง โดยใช้ปั๊มความร้อน เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของสภาวะอากาศแวดล้อมต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้งชนิดกะ (Batch Dryer) ในแต่ละรูปแบบของวงจรอากาศ ซึ่งได้แก่ ระบบเปิด(Open System) และระบบปิดบางส่วน(Partially Closed System) โดยในระบบเปิด อากาศแวดล้อมภายนอกจะถูกดึงเข้ามาผ่านเครื่องควบแน่น ห้องอบแห้ง และเครื่องทำระเหย ตามลำดับ ก่อนที่จะถูกปล่อยออกไปสู่บรรยากาศ และในระบบปิดบางส่วน(หรืออาจเรียกว่าระบบเปิดบางส่วน(Partially Opened System) ก็ได้) จะแตกต่างจากระบบแรกตรงที่ จะมีอากาศหลังอบแห้งบางส่วนที่ถูกปล่อยทิ้งไปสู่บรรยากาศ และอากาศหลังอบแห้งส่วนที่เหลือก็จะถูกนำไปผ่านเครื่องทำระเหยเพื่อลดความชื้น จากนั้นก็จะถูกนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ โดยจะไปผสมกับอากาศแวดล้อมภายนอกก่อนที่จะถูกส่งไปเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น จากผลการทำนายของแบบจำลองฯ สามารถสรุปได้ว่า เครื่องอบแห้งระบบปั๊มความร้อนควรทำงานในรูปแบบของระบบเปิด สำหรับช่วงที่มีอัตราการอบแห้งสูง เช่น ช่วงต้นของการอบแห้ง และควรทำงานในรูปแบบของระบบปิดบางส่วนสำหรับช่วงที่มีอัตราการอบแห้งต่ำ ได้แก่ ช่วงท้ายของการอบแห้ง และยังได้มีการเน้นว่า สภาวะที่เครื่องอบแห้งสามารถทำค่า MER(Moisture Extraction Rate) ได้สูงที่สุดไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นสภาวะเดียวกับที่ค่า SMER(Specific

Moisture Extraction Rate) มีค่าสูงสุด และหลังจากที่ได้ทำการทำนายผลจากแบบจำลองฯแล้ว 1 ปี ก็ได้มีการทำการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองฯ ซึ่งพบว่า แบบจำลองฯที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้สามารถทำนายคุณสมบัติต่างๆในการทำงานของปั๊มความร้อนได้ในระดับที่น่าพึงพอใจ ถึงแม้ว่าในบางกรณี มีความผิดพลาดเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ความผิดพลาดเหล่านี้ก็สามารถอธิบายได้ ซึ่งความผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองฯนี้ ส่วนใหญ่แล้วมาจากความร้อนที่ถูกระบายออกมาจากเครื่องอัดไอ ในขณะที่กระบวนการอัดไอในแบบจำลองนี้ถูกสมมติให้เป็นแบบ adiabatic โดยที่การเกิดความดันลดอันเนื่องมาจากการไหลแบบ two-phase flow และความดันลดจากการถ่ายเทความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศนั้นก็ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นในวงจรของสารทำความเย็นและในวงจรของอากาศ ตามลำดับ เช่นกัน อย่างไรก็ตาม จากการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมานั้นสามารถนำมาใช้ได้

ประทาน รักปรางค์ (2539) ได้ศึกษาสมรรถนะการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนแบบอัดไอ ซึ่งใช้สารทำความเย็น R-22 ในการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มด้วยปั๊มความร้อนแบบระบบปิด โดยทำการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ 0.45 กิโลกรัม/วินาที สัดส่วน by pass air 63% โดยทำการอบแห้งเริ่มต้นที่ความชื้นมะละกอเท่ากับ 74 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และสิ้นสุดที่ 23 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง พบว่ามีความสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 9.93 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าระหว่าง 3.71-3.85 โดยมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มทั้งหมดเท่ากับ 12.8 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2541) ได้ออกแบบ สร้างเครื่องอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน เพื่อประเมินสมรรถนะ และใช้เป็นเครื่องต้นแบบในระดับอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองอบแห้งมะละกอแช่อิ่มในระบบปิด อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 55°C โดยอบแห้งที่ความชื้นเริ่มต้น 83-86 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้าย 12-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาอบแห้งประมาณ 32 ชม. พบว่าความแตกต่างของค่าความชื้นสุดท้ายเฉลี่ยตามแนวขวางและแนวยาวของตู้อบแห้งมีค่าไม่มากนัก และยังพบว่าอัตราการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับเวลาอบแห้ง ในขณะที่พลังงานทั้งหมดที่ใช้ค่อนข้างจะคงที่ตลอดช่วงเวลาการอบแห้ง โดยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าระหว่าง 3.0 - 3.8 และพบว่ามีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการอบแห้งมะละกอแช่อิ่มทั้งหมดเท่ากับ 6.43 บาทต่อกิโลกรัมน้ำระเหย

## 2.2 สรุปผลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัยที่ผ่านมาสำหรับการบ่มใบยาสูบนั้น จะเห็นได้ว่าการบ่มใบยาสูบแบบพาความร้อนแบบบังคับ(Forced-Convection Curing or Bulk Curing) นี้ เป็นรูปแบบการบ่มใบยาสูบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และได้มีการศึกษาถึงวิธีการที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบที่สามารถ

ประหยัดพลังงานได้สูงสุด โดยยังคงรักษาคุณภาพของยาสูบไว้ รวมถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อการบ่มใบยาสูบอีกด้วย จะเห็นได้ว่า รูปแบบหรือวิธีการบ่มที่สามารถประหยัดพลังงานได้สูงสุดก็คือรูปแบบการบ่มใบยาสูบของ A. Hiran (1986) ซึ่งพบว่าปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบแบบ Forced-draught bulk curing นี้ก็คือ อัตราการระบายอากาศออกจากห้องบ่มใบยาสูบ และอัตราการระบายอากาศออกที่เหมาะสมสำหรับช่วงการเปลี่ยนสีหรือการทำสี(Yellowing Stage) ช่วงการตรึงสี(Color Fixing Stage) ช่วงการทำแห้งใบยา (Leaf Drying Stage) และช่วงการไล่น้ำที่ก้าน(Stem Drying Stage) มีค่าเป็น 15, 21, 30, 5 Air change/hr ตามลำดับ โดยใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ 29.3 MJ/kg ใบยาแห้ง และจากการศึกษายังพบว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนจาก ลมร้อน เป็นการสูญเสียถึง 80% ของพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปทั้งหมด และอีก 20% เป็นการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นห้องและผนังของห้องบ่มใบยาสูบตามลำดับ

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับปั๊มความร้อน ได้แสดงให้เห็นว่า การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน(Heat pump dryer, HPD) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหาร ทั้งนี้เพราะปั๊มความร้อนมีจุดเด่นที่สามารถนำเอาพลังงานมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีการเก็บคืนความร้อน (Heat Recovery) จากอากาศหลังการอบแห้ง ซึ่งจะแตกต่างจากการอบแห้งโดยทั่วไปที่ใช้ขดลวดไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซเชื้อเพลิง หรือถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งอากาศหลังการอบแห้งจะถูกปล่อยทิ้งออกสู่บรรยากาศโดยตรง ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนไปอย่างเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก ซึ่งพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งไปนั้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของความร้อนแฝงที่ใช้ไปในการระเหยน้ำจากวัสดุอบแห้ง ซึ่ง การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบใหญ่ๆ ด้วยกัน ได้แก่

1) ระบบที่มีการดึงความชื้นออกจากอากาศก่อนการอบแห้ง (Dehumidifying HPD) โดยทำงานในระบบปิดอย่างสมบูรณ์ (Closed system) หรือระบบเปิดเป็นบางส่วน (Partially open system) มีลักษณะการทำงานคือ อากาศหลังอบแห้งจะถูกนำไปผ่านเครื่องทำระเหย เพื่อเก็บคืนความร้อน และเพื่อลดความชื้นในขณะเดียวกัน จากนั้นอากาศส่วนนี้ก็จะถูกนำกลับเข้ามาใช้หมุนเวียนในระบบใหม่

2) ระบบที่มีการเก็บคืนความร้อนเพียงอย่างเดียว (Heat recovery HPD) โดยทำงานในระบบเปิด (open system) มีลักษณะการทำงานคือ อากาศแวดล้อมจะถูกนำเข้าสู่ระบบและเพิ่มอุณหภูมิที่เครื่องควบแน่น โดยไม่มีการลดความชื้น และอากาศหลังอบแห้งจะถูกผ่านไปยังเครื่องทำระเหยเพื่อเก็บคืนความร้อนก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การทำงานของปั๊มความร้อนในระบบปิดอย่างสมบูรณ์มีการสูญเสียความร้อนจำเพาะต่ำที่สุด ในขณะที่การทำงานในระบบเปิดบางส่วน เมื่อมีการนำอากาศหลังอบแห้งมาใช้ใหม่ในอัตราส่วนประมาณ 60-70% จะสามารถช่วยประหยัดพลังงานที่ใช้ใน

การเพิ่มอุณหภูมิอากาศในการอบแห้งได้มาก และสำหรับระบบเปิด เนื่องจากมีการนำอากาศแวดล้อมจากภายนอกเข้ามาใช้ในการอบแห้ง ดังนั้นสภาวะอากาศแวดล้อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง ซึ่งแตกต่างกับการอบแห้งในระบบเปิดบางส่วนซึ่งจะถูกผลกระทบจากอากาศแวดล้อมน้อย และจะไม่มีผลกระทบจากอากาศแวดล้อมเลยสำหรับการอบแห้งในระบบปิด

และจากการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่าการใช้ปั๊มความร้อนเพื่อการอบแห้งนั้นมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนขั้นต้นสูงกว่าการใช้ลวดไฟฟ้า น้ำมัน ก๊าซเชื้อเพลิง หรือถ่านหิน แต่ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานของปั๊มความร้อนจะต่ำกว่า ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนจะให้ผลคุ้มค่าในระยะยาว และจะให้ความคุ้มทุนในระยะเวลาอันสั้นได้ก็ต่อเมื่อ ทำการอบแห้งเป็นจำนวนมากตลอดทั้งปี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

## 3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการบ่มใบยาสูบ

กระบวนการบ่มใบยาสูบ เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงใบยาสูบสดให้กลายเป็นใบยาสูบแห้ง โดยควบคุมการระเหยน้ำออกจากใบยาสูบให้เป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนด เพื่อให้ได้ใบยาสูบที่มีคุณภาพดี การควบคุมการระเหยน้ำให้เป็นไปตามขั้นตอนที่กำหนดสามารถกระทำได้โดยควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบนั่นเอง

สำหรับการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียจะใช้อากาศร้อนในการบ่มใบยาสูบ โดยขั้นตอนหลักของการบ่มใบยาสูบจะประกอบไปด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ

1. *การบ่มเพื่อเปลี่ยนสีใบยาสูบให้ได้สีตามต้องการ* โดยในขั้นตอนนี้ ใบยาสูบจะเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในทำให้เกิดการสร้างพลังงานขึ้นในใบยาสูบเองจำนวนหนึ่ง ดังนั้นพลังงานความร้อนในการบ่มใบยาสูบระหว่างขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย พลังงานความร้อนจากอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นใบยาสูบ และพลังงานความร้อนที่สร้างโดยใบยาสูบเอง

2. *การบ่มเพื่อให้ใบและก้านของใบยาสูบแห้ง* ในขั้นตอนนี้จะไม่มีการสร้างพลังงานโดยใบยาสูบเหมือนในขั้นตอนแรก เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นอีกแล้ว และในขั้นตอนนี้ความร้อนในอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นใบยาสูบ และความร้อนสัมผัส (sensible heat) จะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนแฝง(latent heat) ส่งผลให้มีปริมาณไอน้ำในอากาศมากขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถพิจารณาได้เป็น adiabatic process และในช่วงที่เกิดกระบวนการ adiabatic process อยู่นั้น อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(Dry Bulb Temperature) จะลดลง แต่ค่าอัตราส่วนความชื้น(Humidity Ratio), ค่าความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าเอนทาลปี(enthalpy) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก(Wet bulb Temperature) จะมีค่าคงที่

สำหรับการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียในเขตร้อนจำเป็นต้องมีการควบคุมค่าอุณหภูมิและความชื้นตามขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. *การเปลี่ยนสีหรือการทำสี (Yellowing Stage)* เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสีของใบยาสูบจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำตาล ในช่วงเวลานี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีในใบยาสูบขึ้น โดยน้ำตาลจะถูกสันดาปไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้มีความร้อนเกิดขึ้นและยังมีการไล่น้ำออกจากใบยาสูบเล็กน้อยระหว่างกระบวนการนี้ด้วย ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจากอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30□C) จนถึง 42□C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มลงจาก 85% เหลือ 65% โดยใช้เวลาประมาณ 35 ชั่วโมง และน้ำ

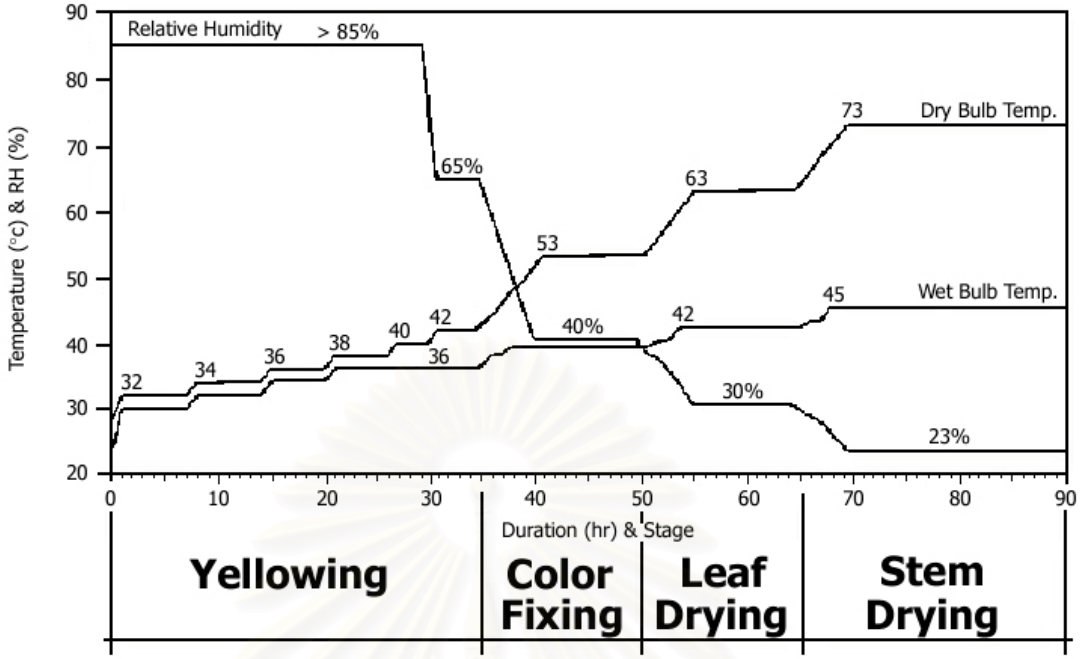
หนักของใบยาสูบจะลดลงประมาณ 20-40%ของน้ำหนักใบยาสูบเริ่มต้น โดยในกระบวนการนี้จะมีสสารของแข็งในใบยาสูบหายไปประมาณ 10-30%ของน้ำหนักสสารของแข็งเริ่มต้นของใบยาสูบ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นนั่นเอง ในระหว่างกระบวนการนี้จะมีการเปิดช่องระบายอากาศเป็นเพียงบางส่วน

2. *การตรึงสี(Color fixing stage)* ระหว่างกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และระดับการลดลงของความชื้นให้เป็นไปตามกำหนดเวลา โดยควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 42°C จนถึง 53°C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในโรงบ่มลงจาก 65% จนเหลือ 40% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ตลอดช่วงเวลาระหว่างกระบวนการนี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบขึ้น และน้ำหนักของใบยาสูบจะลดลงเหลือประมาณ 50% ของน้ำหนักใบยาสูบเริ่มต้น

3. *การไล่น้ำที่ใบหรือการทำแห้งใบยา(Leaf Drying Stage)* เป็นกระบวนการไล่น้ำออกจากส่วนใบยู่ให้แห้ง โดยการควบคุมอุณหภูมิ และระดับการลดลงของความชื้นให้เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่กำหนด ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 53□C จนถึง 63□C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มให้ลดลงจาก 40% จนเหลือ 30% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบเกิดขึ้น และน้ำหนักของใบยาสูบจะลดลงไปประมาณ 77% ของน้ำหนักใบยาสดเริ่มต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการนี้มีความต้องการพลังงานในปริมาณสูง เนื่องจากอุณหภูมิในห้องบ่มและอัตราการระบายความชื้นมีค่าอยู่ในระดับที่สูง

4. *การไล่น้ำที่ก้าน (Stem Drying or Killing the Stem Stage)* เป็นกระบวนการไล่น้ำออกจากส่วนก้านและในใบที่ยังหลงเหลืออยู่ให้แห้ง โดยควบคุมอุณหภูมิให้เปลี่ยนแปลงไปตามกำหนดอย่างถูกต้อง ซึ่งกระบวนการนี้จะควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 63□C ไปเป็น 73□C และลดความชื้นสัมพัทธ์ในห้องบ่มลงจาก 30% จนเหลือ 23% โดยใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ในระหว่างช่วงเวลานี้ช่องระบายอากาศถูกเปิดแง้มไว้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น (เกือบปิด) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประหยัดพลังงานความร้อน และเมื่อจบกระบวนการนี้น้ำหนักใบยาสูบจะลดลงประมาณ 89% ของน้ำหนักใบยาสดเริ่มต้น

หลังจากผ่านกระบวนการบ่มทั้ง 4 ขั้นตอนแล้ว ก็จะปล่อยให้ใบยาสูบเย็นตัวลงในห้องบ่ม เพื่อช่วยให้การเก็บรักษาใบยาสูบแห้งได้คุณภาพดี ในช่วงเวลานี้ใบยาสูบไม่มีความต้องการพลังงานความร้อนอีกแล้ว โดยจะมีการควบคุมสภาวะในห้องบ่มให้มีอุณหภูมิลดลงจาก 73°C จนถึงอุณหภูมิของบรรยากาศ (ประมาณ 30°C) และในช่วงเวลานี้ใบยาสูบจะมีการดูดน้ำกลับเข้าไปในเซลล์ ดังนั้นน้ำหนักใบยาสูบสุดท้ายหลังจากที่ปล่อยให้เย็นตัวแล้วจะมีค่าประมาณ 86% ของน้ำหนักใบยาเริ่มต้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของใบยาสูบ ตลอดช่วงระยะเวลาในการบ่มใบยาสูบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1




**รูปที่ 3.1** กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้ง กระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงเวลาในการบ่มใบยาสูบ

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเกี่ยวกับการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีต่างๆ ดังต่อไปนี้

### 3.1.1 ความชื้นมาตรฐาน

ความชื้นมาตรฐานเป็นค่าที่สามารถใช้บ่งชี้ถึงปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุชื้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้ 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

3.1.1.1 <u>ความชื้นมาตรฐานเปียก</u>

$$M_W = \frac{M - D}{M} \qquad (3.1)$$

เมื่อ $M_w$ คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วนมาตรฐานเปียก

M คือ มวลของวัสดุ, kg

D คือ มวลวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นมาตรฐานชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากในวงการค้า โดยทั่วๆไป มักจะอ้างอิงถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ (100 x $M_W$, %)

3.1.1.2 ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_D = \frac{M - D}{D} \qquad (3.2)$$

เมื่อ $M_D$ คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M คือ มวลของวัสดุ, kg

D คือ มวลวัสดุแห้ง (ไม่มีความชื้น), kg

ความชื้นมาตรฐานแห้งนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะจะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ทั้งนี้เพราะมวลของวัสดุแห้ง(D) จะมีค่าคงที่ตลอดระหว่างการอบแห้ง

**3.1.2 คุณสมบัติของอากาศชื้น**

3.1.2.1 คำจำกัดความของศัพท์ไซโครเมตริก(Psychometric term)

- ความดันไอ(Vapor Pressure)

ความดันไอ($P_v$) คือ ส่วนของความดันย่อย(partial pressure)ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำ จะเรียกความดันไอของอากาศอิ่มตัวนี้ว่า ความดันไออิ่มตัว(Saturated Vapor Pressure, $P_{vs}$) ซึ่งค่าความดันไออิ่มตัวนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

- ความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์($\phi$) คือ อัตราส่วนของเศษส่วนโมล(mole fraction) ของไอน้ำในอากาศชื้น ต่อเศษส่วนโมลของไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน โดยที่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

- อัตราส่วนความชื้น(Humidity Ratio)

อัตราส่วนความชื้น(W) คือ อัตราส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้ง

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(Dry-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(T) คืออุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดา

- อุณหภูมิกระเปาะเปียกไซโครเมตริก (Psychrometric Wet-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียกไซโครเมตริก($T_{wb}$) คือ อุณหภูมิที่น้ำระเหยเข้าไปในอากาศชื้นที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งกระเปาะถูกหุ้มไว้ด้วยผ้าสำลีปียก ปกติจะเรียกอุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกไซโครเมตริกนี้ว่า ไซโครมิเตอร์

- อุณหภูมิกระเปาะเปียกเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Wet-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียกเทอร์โมไดนามิกส์($T_{wb}$) หรืออาจเรียกสั้นๆ ว่า อุณหภูมิกระเปาะเปียก คือ อุณหภูมิที่น้ำระเหยเข้าไปในอากาศชื้นที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งหนึ่ง และทำให้อากาศชื้นนั้นอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยที่ความดันมีค่าคงที่

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง(Dew-point Temperature)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง($T_{dp}$) คือ อุณหภูมิที่ไอน้ำในอากาศกลั่นตัว เมื่อทำให้อากาศเย็นลงที่อัตราส่วนความชื้น และความดันคงที่ ดังนั้นไอน้ำในอากาศที่อุณหภูมิจุดน้ำค้างคือไอน้ำอิ่มตัว

- เอนทาลปี(Enthalpy)

เอนทาลปี(h) ของอากาศชื้น คือ ค่าปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหน่วยมวลอากาศแห้งเหนือระดับอุณหภูมิอ้างอิง และกำหนดให้เอนทาลปีของอากาศแห้งมีค่าเท่ากับศูนย์ที่อุณหภูมิ –17.78°C(0°F) ซึ่งอุณหภูมิอ้างอิงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในทางปฏิบัติมีค่าเท่ากับ 0°C ในระบบเมตริกและระบบสากล

- ปริมาตรจำเพาะ(Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะ(v) ของอากาศ คือ ปริมาตรอากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง

3.1.2.2 <u>ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคุณสมบัติของอากาศชื้น</u>

- กฎของก๊าซสมบูรณ์(Perfect Gas Law)

ที่ความดันบรรยากาศสามารถพิจารณาได้ว่าส่วนผสมของก๊าซต่างๆและไอน้ำในอากาศชื้นเป็นส่วนผสมของก๊าซอุดมคติ จะได้ว่า

$$P = P_a + P_W \quad (3.3)$$

เมื่อ $P$ คือ ความดันรวมของอากาศชื้น

$P_a$ คือ ความดันอากาศแห้ง

$P_W$ คือ ความดันของไอน้ำ

- ความดันไอน้ำอิ่มตัว($P_{WS}$)

ความดันไอน้ำอิ่มตัว($P_{WS}$) สามารถหาได้จากสมการของ Hyland และ Wexler(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. [ASHRAE], 1997) โดยค่าความดันไออิ่มตัวของอากาศชื้นสำหรับช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 200°C สามารถหาได้จาก

$$\ln(P_{WS}) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13}\ln(T) \quad (3.4)$$

เมื่อ $C_8$ = -5.8002206 E+03

$C_9$ = 1.3914993 E+00

$C_{10}$ = -4.8640239 E-02

$C_{11}$ = 4.1764768 E-05

$C_{12}$ = -1.4452093 E-08

$C_{13}$ = 6.5459673 E+00

$T$ = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, K

- ความชื้นสัมพัทธ์($\phi$)

จากคำจำกัดความของความชื้นสัมพัทธ์ สามารถเขียนสมการความชื้นสัมพัทธ์ได้ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\phi = \frac{P_W}{P_{WS}} \quad (3.5)$$

เมื่อ $\phi$ = ความชื้นสัมพัทธ์, %

$P_W$ = ความดันไอน้ำ, kPa

$P_{WS}$ = ความดันไอน้ำอิ่มตัว, kPa

- อัตราส่วนความชื้น(W)

จากกฎของก๊าซสมบูรณ์ จะได้ว่าอัตราส่วนความชื้น(W) ว่า

$$W = \frac{m_w}{m_a} = \frac{\frac{P_w V_w M_w}{RT}}{\frac{P_a V_a M_a}{RT}}$$

$$= \left(\frac{18.01}{28.96}\right)\frac{P_w}{(P - P_v)}$$

$$W = 0.62189\frac{P_w}{(P - P_w)} \quad (3.6)$$

หรือ $$W = 0.62189 \cdot \phi \cdot \frac{P_{ws}}{\left[P - (\phi \cdot P_{ws})\right]} \quad (3.7)$$

- เอนทาลปีของอากาศชื้น(h)

เอนทาลปีของอากาศชื้น(h) มีค่าเท่ากับผลบวกของเอนทาลปีของอากาศแห้ง($h_a$) และ เอนทาลปีของไอน้ำในอากาศ($h_w$)

$$h = h_a + Wh_w \quad (3.8)$$

ถ้าให้อุณหภูมิอ่างอิงเท่ากับ 0°C จะสามารถเขียนสมการของ $h_a$ และ $h_V$ ได้ดังต่อไปนี้

$$h_a = C_a T \quad (3.9)$$

และ

$$h_w = C_v\left(T - T_{dp}\right) + h_{fg,T_{dp}} + C_w T_{dp} \quad (3.10)$$

หรือ $$h_w = h_{fg,0°C} + C_v T \quad (3.11)$$

แทนสมการ(3.9) และ(3.11) ลงในสมการ(3.8) จะได้

$$h = 1.006T + W(2501 + 1.775T) \quad (3.12)$$

สมการ(3.12) นี้(Luther, 1976) สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C ถึง 110°C

เมื่อ $T$ = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, °C

$T_{dp}$ = อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, °C

$W$ = อัตราส่วนของมวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้ง, kg vapor/kg dry air

$C_a$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง = 1.006 kJ/kg·°C

$C_v$ = ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ = 1.775 kJ/kg·°C

$C_w$ = ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ = 4.186 kJ/kg·°C

$h_{fg}$ = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, kJ/kg

$h_{fg,0°C}$ = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่ 0°C

= 2501 kJ/kg

### 3.1.3 กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์

กฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวไว้ว่า ถ้ามีงานและ(หรือ) ความร้อนข้ามขอบเขตของระบบจะทำให้สภาวะของระบบนั้นเปลี่ยนแปลง(การเปลี่ยนแปลงของพลังงานในระบบหนึ่งโดยสุทธิ มีค่าเท่ากับพลังงานสุทธิซึ่งข้ามขอบเขตของระบบนั้น) จะสามารถเขียนได้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$Q - W = \Delta U_c + \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \quad (3.13)$$

เมื่อ $\Delta U_c$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม, kW

$\Delta H$ คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของกระแสการไหลของของไหล, kW

$\Delta KE$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์, kW

$\Delta PE$ คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์, kW

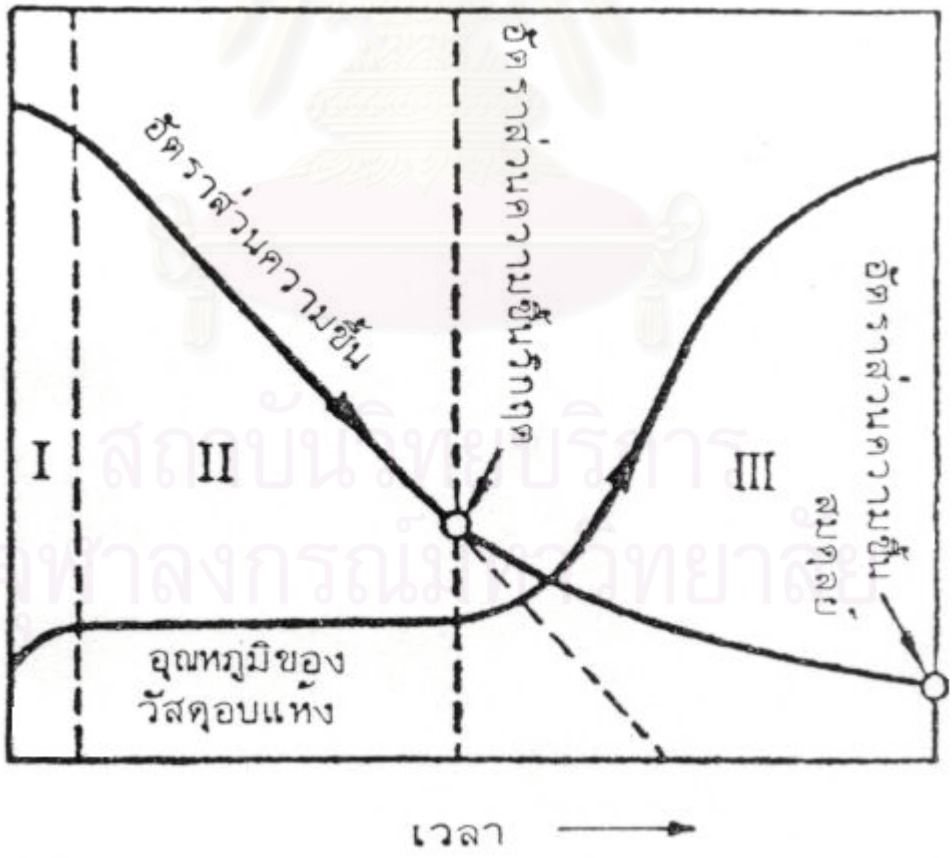
$Q$ คือ ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมผ่านผนังของปริมาตรควบคุม, kW

$W$ คือ งานเพลาที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมรวมกับงานจากการหดหรือขยายตัวของปริมาตรควบคุม, kW

### 3.1.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง(Drying Fundamentals)

เนื่องจากกระบวนการบ่มใบยาสูบเป็นกระบวนการไล่ความชื้นออกจากใบยาสูบ ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งของการบ่มใบยาสูบ เช่นเดียวกันกับการอบแห้งที่มีกระบวนการอบแห้งเป็นวัตถุประสงค์หลัก เพียงแต่การบ่มใบยาสูบนั้นเป็นการอบแห้งที่มีการกำหนดอัตราการอบแห้งให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดขึ้นโดยยึดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้งเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาทฤษฎีการบ่มใบยาสูบ

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทความร้อนและมวลเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยทั่วไปเป็นการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนไปยังผิวด้านนอกของวัสดุ เพื่อทำให้ความชื้นหรือไอน้ำระเหยออกจากผิววัสดุ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นแบบการพาความร้อน โดยมีอากาศร้อนเป็นตัวกลางพาความร้อนไปยังวัสดุชื้น ในขณะที่วัสดุมีความชื้นสูงพบว่า อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวค่อนข้างคงที่ ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2




**รูปที่ 3.2** การเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงหลัก ดังต่อไปนี้

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
2. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่(Constant-rate drying period)
3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง(Falling-rate drying period)

เนื่องจากความชื้นที่บริเวณผิวของวัสดุเปียกชื้นอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุเปียกชื้นนี้ไปอบแห้งภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งคงที่ อุณหภูมิของวัสดุเปียกชื้นจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อน ซึ่งช่วงเวลาที่วัสดุเปียกชื้นใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของกระแสลมร้อนนี้คือ “ช่วงให้ความร้อนเบื้องต้น”

ในช่วงต่อไปเป็น “ช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วคงที่” ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของวัสดุเปียกชื้นจะมีค่าคงที่ตราบเท่าทียังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปของน้ำที่บริเวณผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่วัสดุเปียกชื้นได้รับในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นออกเท่านั้น โดยที่ปริมาณความชื้นของวัสดุเปียกชื้นจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงนี้

ในช่วงสุดท้ายของการอบแห้งนี้ คือ “ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง” ความชื้นในรูปของน้ำที่บริเวณผิวของวัสดุจะถูกระเหยไปจนหมด เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันกับการระเหยของน้ำจากผิววัดุ ดังนั้นผิวของวัสดุจะอยู่สภาพที่แห้ง อุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มมีค่าสูงขึ้น และความเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆลดลง ทั้งนี้เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะนำไปใช้ในการระเหยความชื้นในวัสดุแล้ว ยังต้องนำไปใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุอีกด้วย ดังนั้นการอบแห้งจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อค่าความชื้นของวัสดุลดลงจนถึงค่าความชื้นสมดุลย์(Equilibrium moisture content) ซึ่งค่าความชื้น ณ.ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่เปลี่ยนไปเป็นช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงนั้นเรียกว่า “ค่าความชื้นวิกฤตของวัสดุ(Critical moisture content)”

โดยทั่วไปแล้ว ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมักจะพิจารณาถึง”ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง(Falling-rate drying period)” เท่านั้น เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่นั้นสั้นมาก และมีปริมาณความชื้นน้อยมากที่ระเหยออกจากเม็ดพืช ก่อนที่จะถึงช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง(Falling-rate drying period)

การคำนวณหาอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง จะมีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าการคำนวณหาอัตราการอบแห้งในช่วงความเร็วคงที่มาก ทั้งนี้เพราะไม่เพียงแต่จะต้องพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการถ่ายเทมวล(Convective heat and mass transfer) เท่านั้น ยังต้องพิจารณาถึงการแพร่กระจายของมวล(Mass diffusion) อีกด้วย มีทฤษฎีหลายทฤษฎีที่ถูกเสนอขึ้นมา

เพื่อใช้หาอัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่อยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง ซึ่งมีเพียงแต่สมการกึ่งทฤษฎีและสมการจากการทดลอง(Semitheoretical and empirical equation) เท่านั้นที่ผู้ออกแบบเครื่องอบแห้งนิยมใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง เพราะสามารถใช้ได้ง่ายและมีความถูกต้อง

### 3.1.5 ค่าความชื้นสมดุล(Equilibrium moisture content)

ค่าความชื้นสมดุลเป็นค่าเฉพาะอย่างหนึ่งของวัสดุ ซึ่งค่าความชื้นสมดุลจะถูกนำไปใช้ในการพิจารณาว่าวัสดุนั้นจะรับความชื้นเข้าหรือระเหยความชื้นออกอย่างไรภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่โดยรอบวัสดุนั้น ความชื้นของวัสดุจะอยู่ในสภาวะสมดุลกับบรรยากาศโดยรอบ ก็ต่อเมื่ออัตราการระเหยความชื้นออกจากวัสดุสู่บรรยากาศเท่ากับอัตราการเพิ่มความชื้นของวัสดุจากบรรยากาศ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว ค่าความชื้นสมดุลจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนิยมหาจากการทดลอง สำหรับใบยาสูบได้มีผู้วิจัยหาค่าความชื้นสมดุลไว้บ้างแล้วดังต่อไปนี้

Kirahoudis, Maroulis และMarinos-kouris(1990) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุลสำหรับใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียไว้ดังนี้

$$MC_e = \frac{2.62}{t(1-\phi)^{0.637}} - \left(3.05 \times 10^{-4}\right) \times T \times \phi \qquad (3.14)$$

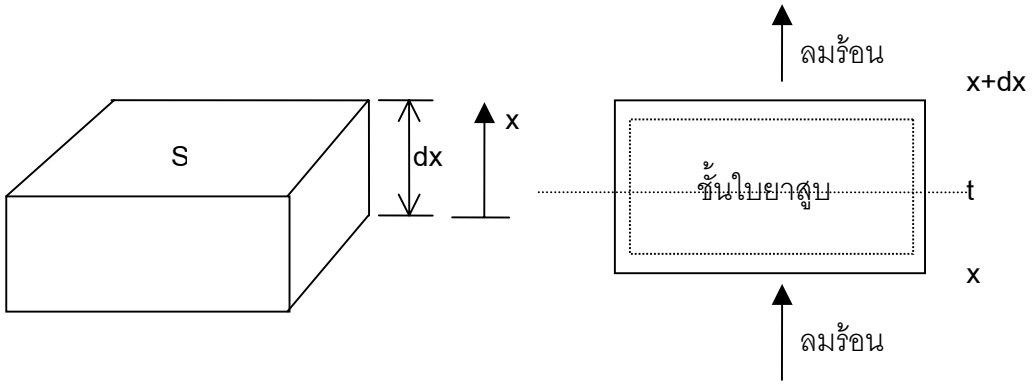
เมื่อ $MC_e$ = ความชื้นสมดุลย์ของใบยาสูบมาตรฐานแห้ง

$T$ = อุณหภูมิอากาศกระเปาะแห้ง, $^{\circ}C$

$\phi$ = ความชื้นสัมพัทธ์, %

### 3.1.6 การไล่ความชื้นในใบยาสูบแบบเป็นชั้น ๆ

เนื่องจากใบยาสูบสดจะถูกจัดเรียงอย่างอัดแน่นเป็นชั้นๆ จำนวนสามชั้น ภายในห้องบ่ม ดังนั้นในการพิจารณาการไล่ความชื้นในใบยาสูบนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาการไล่ความชื้นเป็นแบบชั้นย่อยๆ แล้วนำมาประกอบกันเป็นชั้นหนา ดังแสดงในรูปที่ 3.3




**รูปที่ 3.3** รูปแสดงชั้นใบยาสูบอัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ

สมมุติฐานที่ใช้ในการพิจารณาการไล่ความชื้นในใบยาสูบแบบเป็นชั้นๆ มีดังต่อไปนี้

1. ไม่มีการหดตัวของใบยาสูบขณะที่ทำการไล่ความชื้น
2. ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นใบยาสูบ
3. ไม่เกิดการนำความร้อนขึ้นในชั้นใบยาสูบ
4. ความร้อนจำเพาะของอากาศชื้นและของใบยาสูบมีค่าคงที่ตลอดช่วงการบ่มฯ
5. อุณหภูมิอากาศมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของใบยาสูบตลอดเวลาในขณะที่ทำการบ่มฯ
6. $\frac{\partial T}{\partial t}$ และ $\frac{\partial W}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ และ $\frac{\partial W}{\partial x}$ ตามลำดับ

ในการพิจารณาการไล่ความชื้นในใบยาสูบแบบเป็นชั้นๆ สามารถแยกออกได้เป็น 3 หัวข้อ ดังต่อไปนี้

3.1.6.1 <u>สมดุลมวลไอน้ำของชั้นใบยาสูบ</u>

ปริมาณความชื้นของใบยาสูบที่สูญเสียไป มีค่าเท่ากับปริมาณไอน้ำที่ถูกอากาศนำออกไปจากปริมาตรควบคุม(Sdx) ลบด้วยปริมาณไอน้ำที่อากาศนำเข้ามาในปริมาตรควบคุม บวกด้วยปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นใบยาสูบ โดยที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของใบยาสูบในปริมาตรควบคุม(Sdx) ภายในเวลา dt สามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์

การเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น = ปริมาณไอน้ำที่ไหลผ่านระนาบ x

- ปริมาณไอน้ำที่ไหลผ่านระนาบ x + dx
- การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนความชื้น

(3.15)

ซึ่งสามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ข้างต้นด้วยสมการสมดุลมวลไอน้ำได้ว่า

$$D_s\ Sdx\ \frac{\partial MC}{\partial t}dt = G_a\ SWdt - G_a\ S\left(W + \frac{\partial W}{\partial x}dx\right)dt$$

$$- \in \cdot \rho_a \cdot S\ dx\ \frac{\partial W}{\partial t}dt \qquad (3.16)$$

จากสมมุติฐาน $\frac{\partial W}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial W}{\partial x}$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ(3.16) ใหม่ได้ว่า

$$D_s\ \frac{\partial MC}{\partial t} = - G_a \frac{\partial W}{\partial x} \qquad (3.17)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{D_s}{G_a}\frac{\partial MC}{\partial t} \qquad (3.18)$$

3.1.6.2 <u>ความชื้นในใบยาสูบ</u>

การพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความชื้นในใบยาสูบและอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการบ่มฯ กับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ จะเห็นได้ว่าค่าของความชื้นในใบยาสูบและอุณหภูมิอากาศที่ใช้ในการบ่มฯ มีการเปลี่ยนแปลงไปตลอดระยะเวลาที่ทำการบ่มฯ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ได้มีผู้ทำการศึกษาทดลองไว้แล้วดังต่อไปนี้

ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์(2542) ได้ทำการทดลองบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียทางภาคเหนือของประเทศไทย ที่โรงบ่มใบยาสูบ บริษัท สหใบยาสูบไทย จำกัด จ.ลำพูน และได้เสนอ สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นกับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย ซึ่งอยู่ในรูปของ $\frac{MC - MC_e}{MC_0 - MC_e} = e^{-kt}$ ตามรูปแบบสมการของ Bridges(1981) ไว้ดังนี้

$$e^{-(AG+B)\cdot t} = \frac{MC - MC_e}{MC_0 - MC_e} \qquad (3.19)$$

เมื่อ A = 0.23 และ B = 0.0016

3.1.6.3 <u>สมดุลความร้อนของใบยาสูบ</u>

สมดุลความร้อนของใบยาสูบในปริมาตรควบคุม จะเกิดขึ้นเมื่อ เอนทาลปีของอากาศชื้นที่ออกจากปริมาตรควบคุมลบเอนทาลปีของอากาศชื้นที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม มีค่าเท่ากับ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในใบยาสูบลบกับเอนทาลปีของใบยาสูบที่เปลี่ยนแปลงไปในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

เอนทาลปีของอากาศที่ไหลผ่านระนาบ (x + dx) - เอนทาลปีของอากาศที่ไหลผ่านระนาบ x = พลังงานที่ใบยาสูบสร้างขึ้นในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี($Q_r$) - การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศภายในช่องว่างระหว่างใบยาสูบ - การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของใบยาสูบ

(3.20)

จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถนำมาแสดงสมการสมดุลความร้อนได้ดังต่อไปนี้

$$G_a S\left\{C_a\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)+\left(W+\frac{\partial W}{\partial x}dx\right)\left[2501+C_w\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)\right]\right\}dt$$

$$-G_a S\left[C_a T+W\left(2501+C_w T\right)\right]dt$$

$$= \left(Sdx\cdot\psi_T\cdot dt\right)-\in\rho_a Sdx\left\{C_a\left(T+\frac{\partial T}{\partial t}dt\right)\right.$$

$$\left.+\left(W+\frac{\partial W}{\partial t}dt\right)\left[2501+C_w\left(T+\frac{\partial T}{\partial t}dt\right)\right]-C_a T-W\left(2501+C_w T\right)\right\}$$

$$-Sdx\left\{\left[D_s C_t+D_s C_w\left(MC+\frac{\partial MC}{\partial t}dt\right)\right]\left(T+\frac{\partial T}{\partial t}dt\right)-T\left(D_s C_t+D_s C_w MC\right)\right\}$$

(3.21)

จากสมมุติฐาน $\frac{\partial T}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ สมการ(3.21) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\frac{\psi_T - T\left(D_s C_w \frac{\partial MC}{\partial t} dt\right)}{G_a \cdot dt} - 2501\frac{\partial W}{\partial x} - C_w T\frac{\partial W}{\partial x}}{C_a + WC_w + C_w \frac{\partial W}{\partial x} dx} \qquad (3.22)$$

สำหรับ T< 45°C และ

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\frac{-T\left(D_s C_w \frac{\partial MC}{\partial t} dt\right)}{G_a \cdot dt} - 2501\frac{\partial W}{\partial x} - C_w T\frac{\partial W}{\partial x}}{C_a + WC_w + C_w \frac{\partial W}{\partial x} dx} \qquad (3.23)$$

สำหรับ T> 45°C

### 3.1.7 พลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มใบยาสูบ

3.1.7.1 <u>พลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีของใบยาสูบ</u>

พลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีของใบยาสูบ($Q_r$) เป็นพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในใบยาสูบ ซึ่งพลังงานชนิดนี้เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำสี และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของใบยาสูบมีค่าไม่เกิน 45°C โดยสมการของพลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีของใบยาสูบ($Q_r$) ถูกเสนอโดย Johnson และ Hassler(1963)

$$Q_r = 0.476 \times M_{\text{dry matter}} \times \left[2.251T - 29.81 + \left(1607.7 - 85.1T + 1.126T^2\right)^{0.5}\right] \qquad (3.24)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ, °C

< 45°C

3.1.7.2 <u>พลังงานของอากาศระบาย</u>

พลังงานของอากาศระบาย($\dot{Q}_x$) เป็นพลังงานของอากาศที่ไหลผ่านห้องบ่มใบยาสูบ ซึ่งเป็นรูปสมการที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไซโครเมตริกของอากาศที่เข้าและออกจากห้องบ่มใบยาสูบ

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_a \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (3.25)$$

$$h_{out} = C_a T_{out} + W_{out}(h_{fg,0} + C_w T_{out}) \quad (3.26)$$

$$h_{in} = C_a T_{in} + W_{in}(h_{fg,0} + C_w T_{in}) \quad (3.27)$$

เมื่อ $\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศแห้งออกจากห้องบ่มใบยาสูบ, $kg_a/s$

$C_a$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg_a \cdot °C$

= 1.006 $kJ/kg_a \cdot °C$

$C_w$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, $kJ/kg_a \cdot °C$

= 4.186 $kJ/kg_a \cdot °C$

$T_{in}$ = อุณหภูมิของอากาศตำแหน่งทางเข้าห้องบ่มใบยาสูบ, °C

$T_{out}$ = อุณหภูมิของอากาศตำแหน่งทางออกห้องบ่มใบยาสูบ, °C

$W_{in}$ = อัตราส่วนความชื้นของอากาศทางเข้าห้องบ่มใบยาสูบ, $\frac{kg_w}{kg_a}$

$W_{out}$ = อัตราส่วนความชื้นของอากาศทางออกห้องบ่มใบยาสูบ, $\frac{kg_w}{kg_a}$

3.1.7.3 <u>พลังงานที่สูญเสียให้กับโครงสร้างห้องบ่มใบยาสูบ และสูญเสียผ่านห้องบ่มใบยาสูบ</u>

พลังงานที่สูญเสียให้กับโครงสร้างห้องบ่มใบยาสูบและสูญเสียผ่านห้องบ่มใบยาสูบ เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิของโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบ รวมถึงพลังงานซึ่งสูญเสียผ่านโครงสร้างและพื้น สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_s = Q_{sl} + Q_{ss} \quad (3.28)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ $Q_{sl}$ = พลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้าง, kJ

$Q_{ss}$ = พลังงานที่สะสมอยู่ในโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบ, kJ

3.1.7.3.1 <u>พลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้างห้องบ่มใบยาสูบ</u>

พลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

$$Q_{sl} = Q_{wl} + Q_{fl} \quad (3.29)$$

(ก) พลังงานสูญเสียผ่านผนังห้องบ่มใบยาสูบ($Q_{wl}$)

$$Q_{wl} = U_w \times A \times (T_{inroom} - T_{outroom}) \times \Delta t \quad (3.30)$$

โดย $U_w$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งประกอบด้วยการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนและ การพาความร้อน, $\frac{kW}{m^2 \cdot K}$

$A$ = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน, $m^2$

$T_{inroom}$ = อุณหภูมิภายในห้องบ่ม, K

$T_{outroom}$ = อุณหภูมิภายนอกห้องบ่ม, K

(ข) พลังงานสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบ( $Q_{fl}$ )

ในการพิจารณาพลังงานสูญเสียผ่านพื้นได้มีผู้ทำการศึกษาทดลองไว้บ้างแล้วดังต่อไปนี้

DELSANTE(1990) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีการทดลองหาพลังงานสูญเสียผ่านพื้นเปรียบเทียบกับสมการที่ได้พัฒนาขึ้น โดยสมการพิจารณาเป็น 3 มิติ ดังต่อไปนี้

$$Q_{fl} = U_f \times A \times (T_{inroom} - T_{outroom}) \times \Delta t \quad (3.31)$$

โดย
$$U_f = \frac{3.3k}{\pi ab}\left[ a \cdot \ln\left(\frac{4a}{\upsilon^*}\right) + b \cdot \ln\left(\frac{4b}{\upsilon^*}\right) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a - b \right]$$
$$- b \cdot \ln\left( \sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + b)}{a}} \right) - a\ln\left( \sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + a}{b}} \right)$$

$$\upsilon^* = \upsilon\left(1 + \frac{1.74}{\upsilon \cdot h}\right)$$

k = Soil Conductivity, W/m.K

2a = ความยาวของด้านยาวของพื้น, m

2b = ความยาวของด้านกว้างของพื้น, m

$\upsilon$ = ความหนาของพื้น, m

h = $\frac{H}{k}$

H = Surface air film conductance

Yang และ Johnson(1984) ได้นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการศึกษาพลังงานสูญเสียผ่านพื้นของห้องบ่มใบยาสูบ แล้วทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของผู้วิจัยคนอื่นๆ ปรากฏว่าผลการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และผลการทดลองของผู้วิจัยคนอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

**ตารางที่ 3.1 แสดงพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการคำนวณโดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FE) โดย Yang และ Johnson(1984)**

| อุณหภูมิอากาศในห้องบ่ม | 40°C | 50°C | 70°C |
|---|---|---|---|
| พลังงานสูญเสียผ่านพื้น คำนวณโดย FE ($MJ/m^2$-hr) | 0.23 | 0.36 | 0.50 |

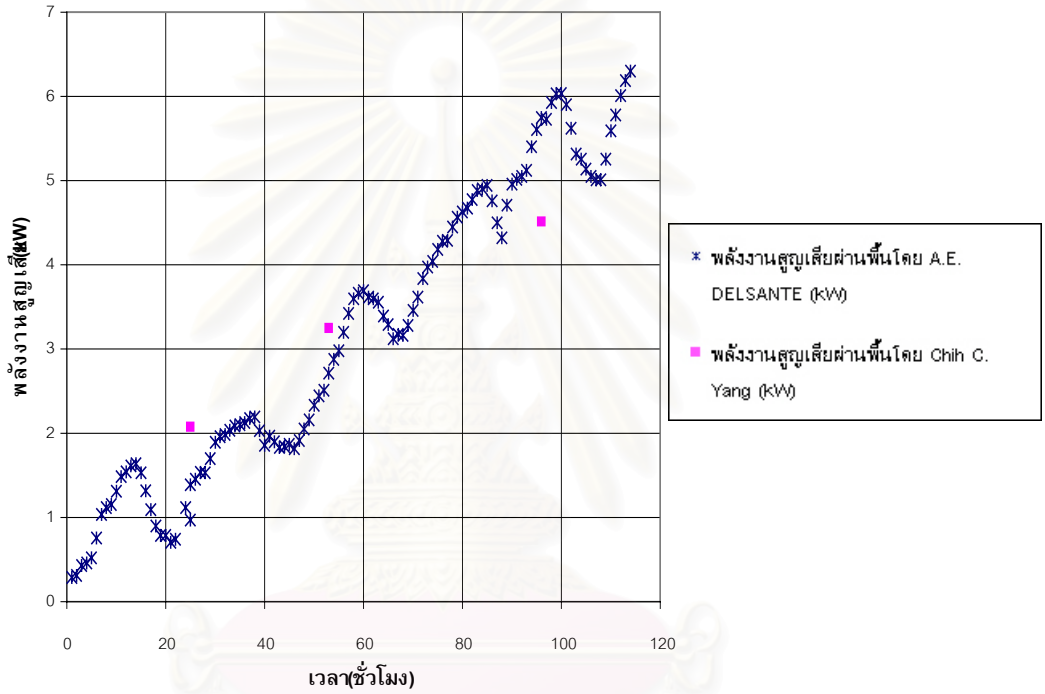
**ตารางที่ 3.2 แสดงพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการทดลองโดย Chang et. Al(1978)**

| อุณหภูมิอากาศในห้องบ่ม | 40°C | 50°C | 70°C |
|---|---|---|---|
| พลังงานสูญเสียผ่านพื้น จากการทดลอง ($MJ/m^2$-hr) | 0.25 | 0.35 | 0.50 |

จากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 เห็นได้ว่าพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบ จากการคำนวณโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย

Yang(1984) และจากการทดลองของ Chang et.al(1978) มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ช่วงอุณหภูมิของการบ่ม

ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์(2542) ได้ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาของ DELSANTE(1990) และ Yang(1984) โดยใช้ข้อมูลผลการทดลองบ่มใบยาสูบที่ บ. สหใบยาสูบ จำกัด จ.ลำพูน ซึ่งผลของการคำนวณพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นของ DELSANTE(1990) เทียบกับผลการศึกษาของ Yang (1984) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4




**รูปที่3.4** กราฟแสดงข้อมูลและผลการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ A.E. DELSANTE(1990) และผลการทดลองของ Yang(1984)

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าผลการศึกษาของทั้ง 2 คนมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในการคำนวณจึง ใช้สมการการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบที่พัฒนาขึ้นโดย DELSANTE (1990)

3.1.7.3.2 <u>พลังงานที่สะสมอยู่ในโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบ</u>

พลังงานที่สะสมในโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบ $Q_{ss}$ ซึ่งโครงสร้างของห้องบ่มใบยาสูบประกอบไปด้วยพื้นคอนกรีต โครงสร้างเหล็ก และอุปกรณ์ที่ใช้แขวนใบยาสูบ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$Q_{ss} = \left[M_c C_c + M_s C_s + M_r C_s\right]\left[T_i - T_{i-1}\right] \quad (3.32)$$

โดย $M_c$ = มวลของคอนกรีตในห้องบ่ม, kg

$M_s$ = มวลของโครงสร้างของห้องบ่ม, kg

$M_r$ = มวลของอุปกรณ์แขวนใบยาสูบ, kg

$C_c$ = ความจุความร้อนจำเพาะของคอนกรีต, kJ/kg·K

$C_s$ = ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก, kJ/kg·K

$T_{i-1}$ = อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา t - $\Delta$t, K

$T_i$ = อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา t, K

3.1.7.4 <u>พลังงานที่สะสมอยู่ในใบยาสูบเนื่องจากการบ่มใบยาสูบ</u>

พลังงานที่สะสมอยู่ในใบยาสูบ($Q_m$) เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มและรักษาอุณหภูมิของใบยาสูบ ตลอดระยะเวลาที่ทำการบ่มใบยาสูบ สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$Q_m = \left[(C_w m_i + C_t m_t)T_i\right] - \left[(C_w m_{i-1} + C_t m_t)T_{i-1}\right] \quad (3.33)$$

โดย $M_i$ = น้ำหนักน้ำในใบยาสูบที่เวลา t, kg

$M_{i-1}$ = น้ำหนักน้ำในใบยาสูบที่เวลา t-$\Delta$t, kg

$C_w$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg·K

$C_t$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของใบยาสูบ, kJ/kg·K

= kJ/kg·K

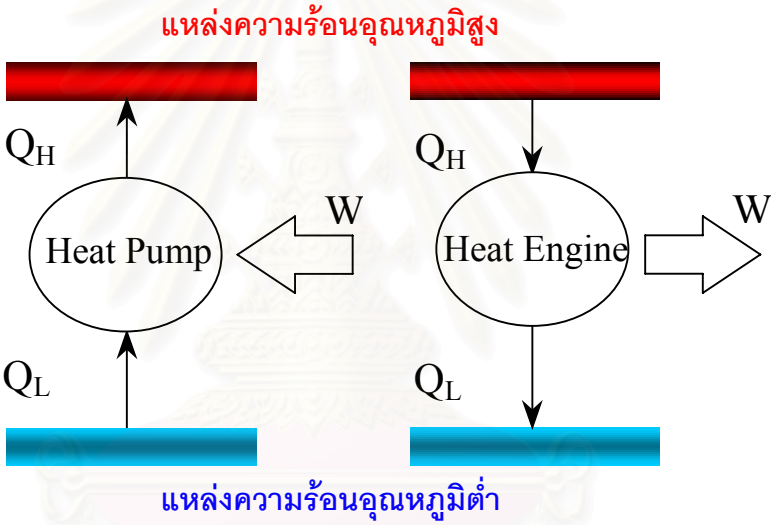
$T_i$ = อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา t, K

$T_{i-1}$ = อุณหภูมิของอากาศในห้องบ่มที่เวลา t-$\Delta$t, K

## 3.2 ทฤษฎีปั๊มความร้อน

### 3.2.1 ระบบปั๊มความร้อน (Heat pump system)

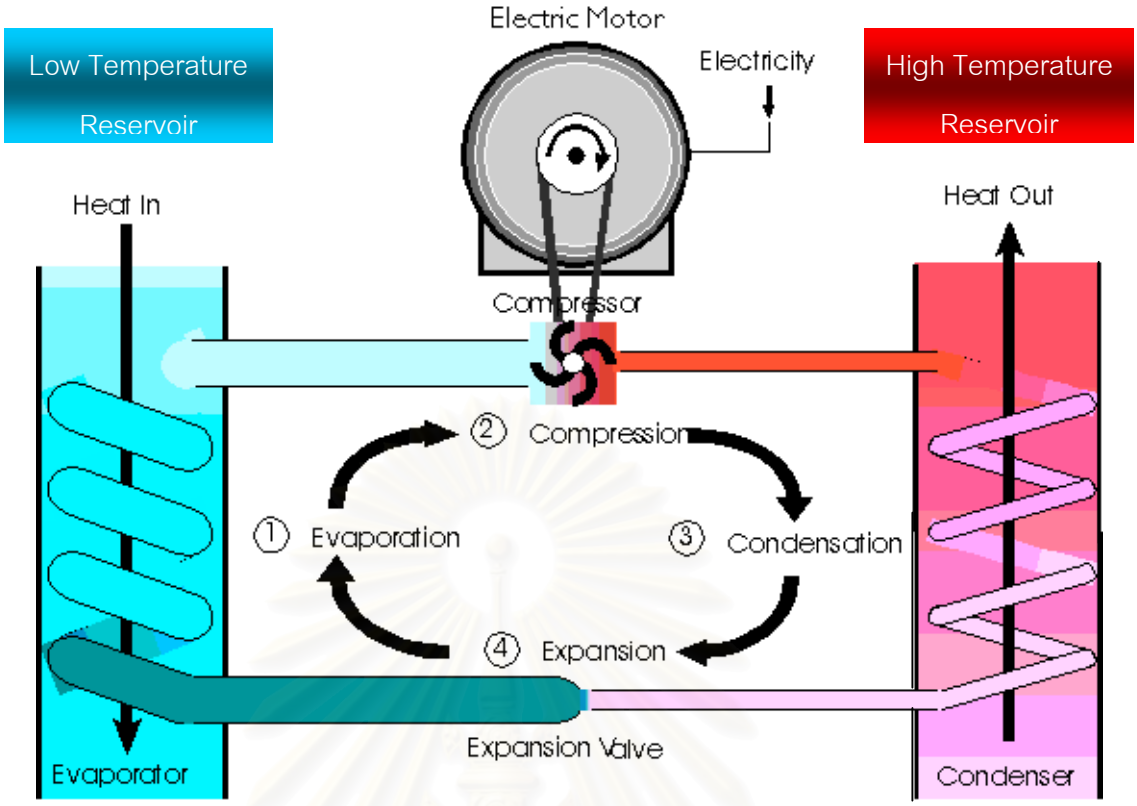
ระบบปั๊มความร้อนมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกันกับระบบทำความเย็น ปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่รับความร้อนจากแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำ ออกไปถ่ายเทให้กับแหล่งความร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานที่ตรงข้ามกับกลจักรความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ทั้งนี้ระบบปั๊มความร้อนจำเป็นที่จะต้องมีงานจากภายนอกป้อนให้กับวัฏจักรของระบบ ตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยที่วัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก คือ เครื่องทำระเหย เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น และวาล์วลดความดัน ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6



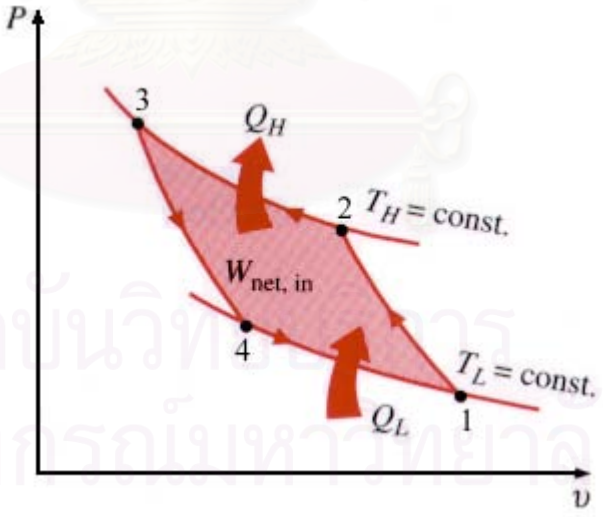

**รูปที่ 3.5** รูปแสดงหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปั๊มความร้อนและกลจักรความร้อน

### 3.2.2 วัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์ (The Reversed Carnot Cycle)

วัฏจักรคาร์โนต์ หมายถึง ระบบใดๆ ที่ทำงานอยู่ระหว่างแหล่งความร้อน 2 แหล่ง และมีประสิทธิภาพของระบบมากกว่าวัฏจักรใดๆ ที่ทำงานระหว่างแหล่งความร้อนคู่เดียงกันนี้ ถึงแม้ว่าในความเป็นจริงแล้ว วัฏจักรคาร์โนต์ไม่มีโอกาสเกิดขึ้นจริงก็ตาม แต่ในการศึกษาระบบปั๊มความร้อน ก็ควรที่จะทำการศึกษาถึงวัฏจักรคาร์โนต์ ทั้งนี้เนื่องด้วยเหตุผล 2 ประการ ดังนี้




**รูปที่ 3.6** ภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของปั๊มความร้อนและองค์ประกอบหลักของปั๊มความร้อน




**รูปที่ 3.7** แผนภูมิ P-v แสดงการทำงานของวัฏจักรย้อนกลับของคาร์โนต์

ก) เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงอุณหภูมิทำงานที่ให้ประสิทธิภาพของระบบที่ดีที่สุด

ข) เพื่อใช้เป็นกรอบมาตรฐานในการเปรียบเทียบเพื่อพัฒนาระบบปั๊มความร้อนให้ดีขึ้น

ทุกๆ กระบวนการในวัฏจักรคาร์โนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นกระบวนการแบบย้อนกลับได้(Reversible process) ดังนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดตัวแบบไอเซ็นโทรปิก

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการคายความร้อนแบบย้อนกลับได้โดยอุณหภูมิคงที่

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการขยายตัวแบบไอเซ็นโทรปิก

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการรับความร้อนแบบย้อนกลับได้ โดยอุณหภูมิคงที่

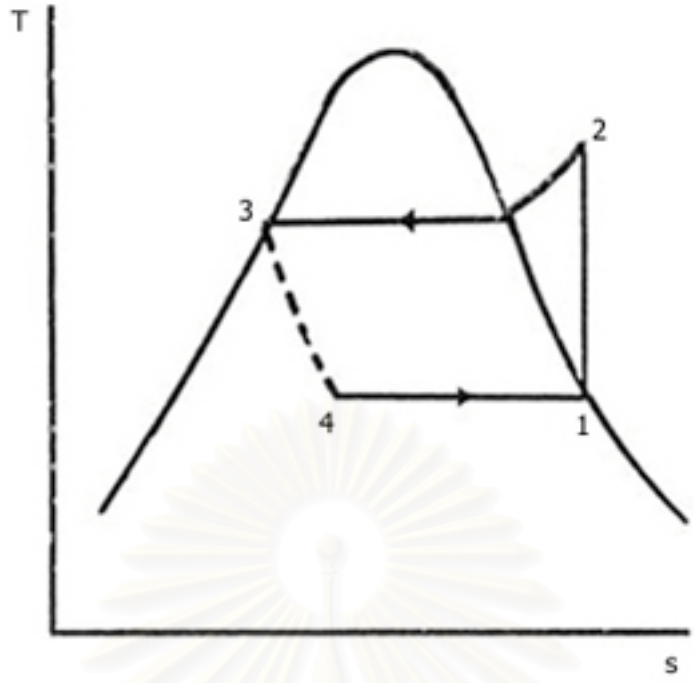
### 3.2.3 วัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (The ideal vapor compression heat pump cycle)

ในการศึกษาวัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอนั้น สามารถอธิบายการทำงานของวัฏจักรได้ด้วยการทำงานของสารทำความเย็น(Refrigerant) ในวัฏจักร โดยใช้แผนภูมิคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น ดังแสดงในรูปที่ 3.8

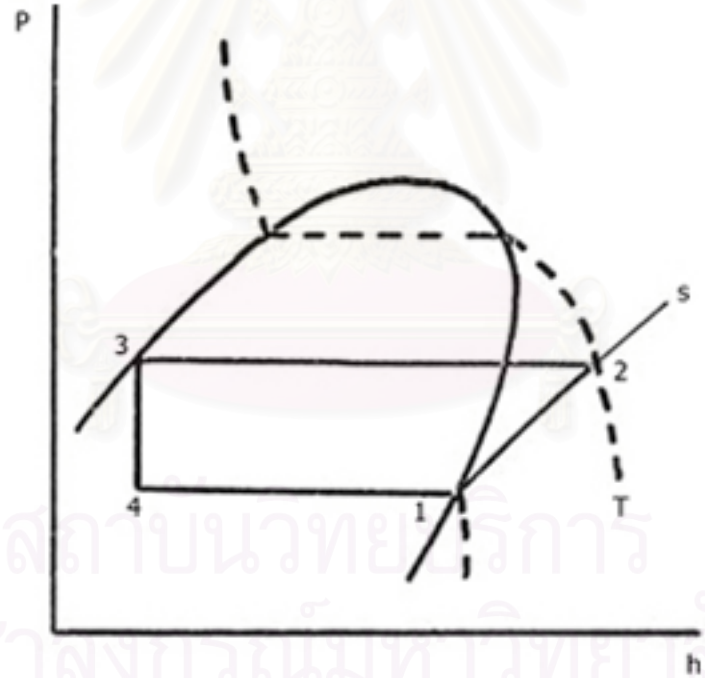
จากรูปที่ 3.8 สามารถอธิบายกระบวนการทำงานทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอได้ดังต่อไปนี้

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดไอ(Compression process) แบบไอเซ็นโทรปิก โดยงานที่ป้อนให้กับเครื่องอัดไอจะทำให้เอนทาลปี, อุณหภูมิ และความดันของสารทำความเย็นมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นคายความร้อนให้กับของไหลที่เข้ามารับความร้อนที่เครื่องควบแน่น และสารทำความเย็นก็จะกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวอิ่มตัว โดยที่กระบวนการ 2-3 นี้เป็นกระบวนการความดันคงที่




**(ก)** แผนภูมิอุณหภูมิและเอนโทรปี (T-s Diagram)




**(ข)** แผนภูมิความดันและเอนทาลปี (P-h Diagram)

**รูปที่ 3.8** แผนภูมิแสดงวัฏจักรการทำงานทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

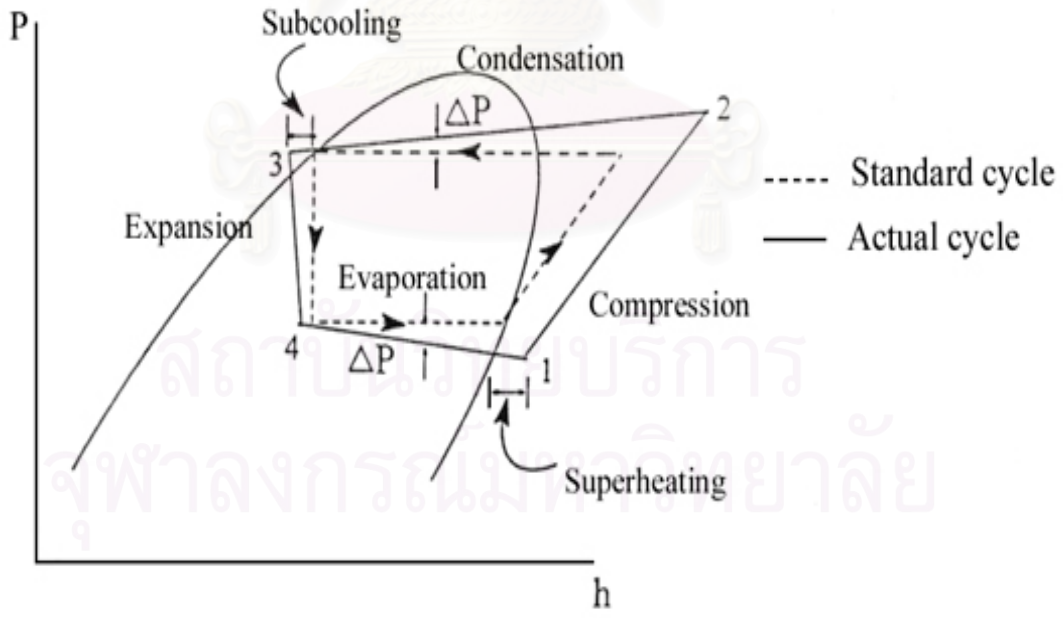
กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวถูกลดความดันลง โดยผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำลง และอยู่ในสถานะของสารผสมระหว่างของเหลวกับไอ โดยที่กระบวนการ 3-4 นี้เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่(Throttling process)

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นดูดกลืนความร้อนจากของไหลที่มาถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย และสารทำความเย็นก็จะเปลี่ยนสถานะจากสารผสมระหว่างของเหลวกับไอ ไปเป็นไออิ่มตัว กระบวนการ 4-1 นี้เป็นกระบวนการความดันคงที่

### 3.2.4 วัฏจักรจริงของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ (The actual vapor compression heat pump cycle)

การทำงานของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอในทางปฏิบัติ นั้น จะแตกต่างไปจากวัฏจักรทางอุดมคติเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.9

จากรูปที่ 3.9 สามารถอธิบายกระบวนการทำงานของปั๊มความร้อนแบบอัดไอในทางปฏิบัติ ได้ดังต่อไปนี้




**รูปที่ 3.9** แผนภูมิแสดงความแตกต่างระหว่างวัฏจักรจริงกับวัฏจักรทางอุดมคติของปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

กระบวนการ 1-2 คือ กระบวนการอัดไอ(Compression process) แบบโปลีโทรปิก และเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้(Irreversible process) ซึ่งมีสาเหตุหลักคือ การสูญเสียจากความเสียดทานของอุปกรณ์ในเครื่องอัดไอ นอกจากนี้สภาวะของสารทำความเย็น ณ. ทางเข้าเครื่องอัดไอจะอยู่ในสถานะไอร้อนยวดยิ่ง(Superheat vapor)เล็กน้อย เพื่อป้องกันไม่ให้มีของเหลวไหลเข้าไปในเครื่องอัดไอ

กระบวนการ 2-3 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นคายความร้อนให้กับของไหลที่เข้ามารับความร้อนที่เครื่องควบแน่น โดยที่อุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็นจะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งเครื่องควบแน่น แต่จะมีค่าลดลงไปตามระยะทางของท่อ และการไหลของสารทำความเย็นภายในท่อจะเป็นการไหลแบบสองเฟส(two-phase flow) สารทำความเย็นหลังออกจากเครื่องควบแน่น จะอยู่ในสถานะของเหลวเย็นเยือก(Subcooled liquid) เล็กน้อย เพื่อให้แน่ใจว่าสารทำความเย็นที่เข้าวาล์วลดความดันอยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมด เนื่องจากความเสียดทานภายในท่อน้ำยา มีโอกาสจะทำให้สารทำความเย็นบางส่วนเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของวาล์วลดความดัน

กระบวนการ 3-4 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นของเหลวถูกลดความดันลง โดยผ่านวาล์วลดความดัน ทำให้สารทำความเย็นมีอุณหภูมิต่ำลง และอยู่ในสถานะของสารผสมระหว่างของเหลวกับไอ โดยที่กระบวนการ 3-4 นี้เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่(Throttling process)

กระบวนการ 4-1 คือ กระบวนการที่สารทำความเย็นดูดกลืนความร้อนจากของไหลที่มาถ่ายเทความร้อนให้กับสารทำความเย็นที่เครื่องระเหย โดยที่อุณหภูมิและความดันของสารทำความเย็นจะมีค่าไม่คงที่ตลอดทั้งเครื่องทำระเหย แต่จะมีค่าลดลงไปตามระยะทางของท่อ และการไหลของสารทำความเย็นภายในท่อจะเป็นการไหลแบบสองเฟส(two-phase flow) เช่นเดียวกันกับการไหลในกระบวนการ 2-3 และสารทำความเย็นก็จะเปลี่ยนสถานะจากสารผสมระหว่างของเหลวกับไอ ไปเป็นไอร้อนยวดยิ่งเล็กน้อยหลังออกจากเครื่องทำระเหย เพื่อให้แน่ใจว่าสารทำความเย็นก่อนเข้าเครื่องอัดไอมีสถานะเป็นไอทั้งหมด เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องอัดไอ เนื่องจากมีของเหลวเข้าไป

### 3.2.5 อุปกรณ์ในระบบปั๊มความร้อน

อุปกรณ์หลักในการทำงานของระบบปั๊มความร้อน ประกอบไปด้วย เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น วาล์วลดความดัน และเครื่องทำระเหย เพื่อนำไปประยุกต์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งสามารถแสดงการวิเคราะห์อุปกรณ์แต่ละตัวได้ดังต่อไปนี้

**3.2.5.1 เครื่องอัดไอ(Compressor)**

เครื่องอัดไอในระบบปั๊มความร้อนทำหน้าที่อัดสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ไปเป็นสารทำความเย็นที่มีสถานะเป็นไอที่ความดันและอุณหภูมิสูง โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. กระบวนการอัดตัวเป็นแบบโปลีโทรปิก
2. ไม่มีการสูญเสียประสิทธิภาพเชิงปริมาตรอันเนื่องมาจากการยืดหดตัวของไอของสารทำงานในบริเวณช่องว่างเหนือลูกสูบ

สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่แสดงความสัมพันธ์ สำหรับเครื่องอัดไอมีดังต่อไปนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตร

$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n \qquad (3.34)$$

$$n = \frac{c_p}{c_v}$$

เมื่อ $P_1$ คือ ความดันไอก่อนการอัดไอ, $N/m^2$

$P_2$ คือ ความดันไอหลังการอัดไอ, $N/m^2$

$v_1$ คือ ปริมาตรจำเพาะของไอก่อนการอัดไอ, $m^3/kg$

$v_2$ คือ ปริมาตรจำเพาะของไอหลังการอัดไอ, $m^3/kg$

- ปริมาตรจำเพาะของไอหลังการอัดไอของเครื่องอัดไอคำนวณได้จากสมการ

$$v_2 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot v_1 \qquad (3.35)$$

- อัตราการไหลของสารทำความเย็น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{m}_r = \eta_v \left(\frac{v_d}{v_1}\right) \qquad (3.36)$$

โดย $\eta_v = \frac{v_a}{v_D}$

เมื่อ $m_r$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น, kg/s

$V_d$ คือ ปริมาตรที่ถูกแทนที่ของกระบอกสูบเครื่องอัด, $m^3/s$

$\eta_v$ คือ ประสิทธิภาพเชิงปริมาตร

$V_a$ คือ ปริมาตรไอสารทำความเย็นที่เข้ามาในกระบอกสูบจริง, $m^3$

$V_D$ คือ ปริมาตรที่ลูกสูบเคลื่อนที่, $m^3$

- ปริมาตรที่ถูกแทนที่ของกระบอกสูบคำนวณจาก

$$V_d = \frac{N \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot l_p}{240} \quad (3.37)$$

เมื่อ $N$ คือ ความเร็วของมอเตอร์เครื่องอัดไอ, rev/min

$d_p$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ, m

$l_p$ คือ ระยะชักของก้านสูบ, m

- งานที่ใช้ในมอเตอร์เครื่องอัดไอคำนวณจาก

$$W_m = \frac{W_a}{\eta_m} \quad (3.38)$$

เมื่อ $W_m$ คือ งานที่ใช้ในมอเตอร์เครื่องอัดไอ, kW

$W_a$ คือ งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางความเป็นจริง, kW

$\eta_m$ คือ ประสิทธิภาพมอเตอร์

- งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางอุดมคติคำนวณจาก

$$W_{isen} = m_r q_w = m_r(h_2 - h_1) \quad (3.39)$$

เมื่อ $W_{isen}$ คือ งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางอุดมคติ, kW

$q_w$ คือ งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุดมคติต่อหน่วย, kJ/kg

$h_1$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าสู่เครื่องอัดไอ, kJ/kg

$h_2$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องอัดไอ, kJ/kg

- งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอจริงคำนวณจาก

$$W_a = \frac{m_r \cdot q_w}{\eta_{isen} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{motor}} \quad (3.40)$$

เมื่อ $\eta_{isen}$ คือ ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิก

$\eta_{mech}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องอัดไอ

**3.2.5.2 เครื่องควบแน่น(Condenser)**

เครื่องควบแน่นในระบบปั๊มความร้อน ทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น โดยสารทำความเย็นจะควบแน่นกลั่นตัวกลายเป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งสมรรถนะของเครื่องควบแน่นหาได้จากสมการพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนดังนี้

- ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น ($Q_{cd}$) เมื่อคำนวณจากสารทำความเย็น

$$Q_{cd} = m_r(h_2 - h_3) \quad (3.41)$$

เมื่อ $h_3$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องควบแน่น, kJ/kg

- ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่น เมื่อคำนวณจากสารตัวกลางระบายความร้อน

$$Q_{cd} = m_c c_c(T_{co} - T_{ci}) \quad (3.42)$$

เมื่อ $m_c$ คือ อัตราไหลเชิงมวลของสารตัวกลางระบายความร้อน, kg/s

$C_c$ คือ ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลางระบายความร้อน, kJ/kg·K

$T_{co}$ คือ อุณหภูมิขาออกของสารตัวกลางระบายความร้อน, $^{\circ}C$

$T_{ci}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าของสารตัวกลางระบายความร้อน, $^{\circ}C$

จากหลักการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับสารตัวกลางระบายความร้อน สามารถหาค่าความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นได้จาก

$$Q_{cd} = A_{cd} \times U_{cd} \times TD \quad (3.43)$$

เมื่อ $A_{cd}$ คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น, $m^2$

$U_{cd}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องควบแน่น, $kW / m^2 \cdot K$

TD คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล๊อกมีนระหว่างสารตัวกลางระบายความร้อนกับสารทำงาน, $^{\circ}C$

โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล็อกมีน (Log Mean Temperature) หาได้จากสมการ

$$TD = \frac{\left[\left(T_c - T_{ci}\right) - \left(T_c - T_{co}\right)\right]}{\ln\left[\frac{\left(T_c - T_{ci}\right)}{\left(T_c - T_{co}\right)}\right]} \quad (3.44)$$

เมื่อ $T_c$ คือ อุณหภูมิของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น, $^{\circ}C$

แทนสมการ (3.42) และ (3.44) ในสมการ (3.43) จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องควบแน่นได้ดังนี้

$$T_{co} = T_{ci} + \left(T_c - T_{ci}\right)\left(1 - \exp\left[\frac{-U_{cd}A_{cd}}{m_c c_c}\right]\right) \quad (3.45)$$

**3.2.5.3 เครื่องทำระเหย(Evaporator)**

เครื่องทำระเหยเป็นอุปกรณ์สำหรับแลกเปลี่ยนความร้อน ระหว่างบริเวณที่ต้องการทำความเย็นกับสารทำความเย็น โดยสารทำความเย็นจะรับความร้อนที่ถ่ายเทจากบริเวณที่ต้องการทำความเย็น และสารทำความเย็นที่รับความร้อนมาแล้วก็จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอที่ความดันต่ำ สามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนของสารทำความเย็นกับสารตัวกลางระบายความร้อนที่เครื่องทำระเหยได้ดังนี้

$$Q_{ev} = m_r(h_1 - h_4) \quad (3.46)$$

เมื่อ $h_4$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าสู่เครื่องทำระเหย, kJ/kg

$h_1$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องทำระเหย, kJ/kg

ความร้อนที่ระบายออกจากเครื่องควบแน่นเมื่อคำนวณจากน้ำที่ใช้ระบายความร้อน

$$Q_{ev} = m_e c_e(T_{ei} - T_{eo}) \quad (3.47)$$

เมื่อ $m_e$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, kg/s

$c_e$ คือ ความร้อนจำเพาะของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, kJ/kg·K

$T_{eo}$ คือ อุณหภูมิขาออกของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, $^{\circ}C$

$T_{ei}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, $^{\circ}C$

จากหลักการถ่ายเทความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับสารตัวกลางให้ความร้อน สามารถหาค่าความร้อนที่เครื่องทำระเหยได้จากสมการ

$$Q_{ev} = A_{ev} \times U_{ev} \times TD \quad (3.48)$$

เมื่อ $Q_{ev}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย, kW

$A_{ev}$ คือ พื้นที่ผิวภายนอก, $m^2$

$U_{ev}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่เครื่องทำระเหย, $kW/m^2 \cdot K$

TD คือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล๊อกมีนระหว่างอุณหภูมิภายนอกกับภายในท่อ, $^{\circ}C$

โดยค่าความแตกต่างของอุณหภูมิแบบล็อกมีน (Log Mean Temperature) หาได้จากสมการ

$$TD = \frac{\left[\left(T_{ei} - T_e\right) - \left(T_{eo} - T_e\right)\right]}{\ln\left[\frac{\left(T_{ei} - T_e\right)}{\left(T_{eo} - T_e\right)}\right]} \quad (3.49)$$

เมื่อ $T_{ei}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, $^{\circ}C$

$T_{eo}$ คือ อุณหภูมิขาออกของสารตัวกลางที่ให้ความร้อน, $^{\circ}C$

$T_e$ คือ อุณหภูมิของสารทำงานในเครื่องทำระเหย, $^{\circ}C$

แทนสมการ (3.47) และ (3.49) ใน (3.48) จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากเครื่องทำระเหยได้จาก

$$T_{eo} = T_{ei} + \left(T_e - T_{ei}\right)\left(1 - \exp\left[\frac{-U_{ev}A_{ev}}{m_e c_{pe}}\right]\right) \quad (3.50)$$

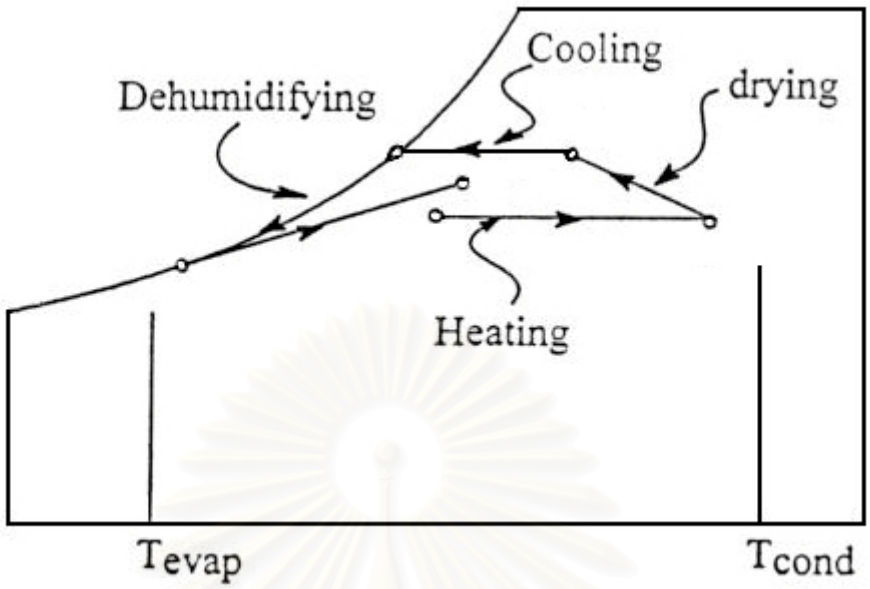
#### 3.2.5.4 วาล์วลดความดัน (Expansion valve)

วาล์วลดความดันมีหน้าที่ ลดความดันของสารทำความเย็นที่สถานะของเหลวความดันสูงและอุณหภูมิสูงให้มีความดันต่ำแต่อุณหภูมิสูง พบว่าการทำงานของวาล์วลดความดันเป็นไปตามขบวนการทรอทลิ่งซึ่งเป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่

$$h_3 = h_4 \quad (3.51)$$

### 3.2.6 การเก็บคืนความร้อนจากการระบายอากาศทิ้ง

เนื่องจากอากาศร้อนชื้นหลังจากผ่านชั้นสุดท้ายของใบยาสูบ โดยปกติแล้วจะถูกปล่อยทิ้งออกไปสู่บรรยากาศโดยไม่มีการเก็บคืนความร้อน ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนไปเป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถคิดได้เป็น 80% ของพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดที่เกิดจากการบ่มใบยาสูบ (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542) ดังนั้นถ้าสามารถนำเอาอากาศร้อนชื้นจำนวนนี้กลับมาเก็บคืนความร้อน ก็จะช่วยให้การใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบมีประสิทธิภาพสูงขึ้น




**รูปที่ 3.10** กระบวนการของอากาศในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ระบบปั๊มความร้อนที่มีการเก็บคืนความร้อนบนแผนภูมิความชื้น

โดยในที่นี้ กำหนดให้อากาศร้อนชื้นที่ผ่านชั้นสุดท้ายของใบยาสูบ ถูกส่งผ่านเครื่องทำระเหยเพื่อเก็บคืนความร้อนบางส่วน ก่อนที่จะถูกระบายทิ้งสู่บรรยากาศ โดยกระบวนการของอากาศในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ระบบปั๊มความร้อนที่มีการเก็บคืนความร้อน สามารถแสดงบนแผนภูมิอากาศชื้นได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.10

### 3.2.7 ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน

ประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อน สามารถแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP, Coefficient of Performance) ซึ่งให้คำจำกัดความได้ดังนี้

$$COP_{hp} = \frac{\text{ความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น}}{\text{กำลังงานที่สารทำความเย็นได้รับโดยเครื่องอัดไอ}} \qquad (3.52)$$

และ

$$COP_{R} = \frac{\text{ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย}}{\text{กำลังงานที่สารทำความเย็นได้รับโดยเครื่องอัดไอ}} \qquad (3.53)$$

โดยค่า $COP_{hp}$ และ $COP_{R}$ มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$COP_{hp} = COP_{R} + 1 \qquad (3.54)$$

แต่จากงานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อน ได้ให้คำจำกัดความของ ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ(ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ $COP'_{hp}$ ) ไว้ดังนี้

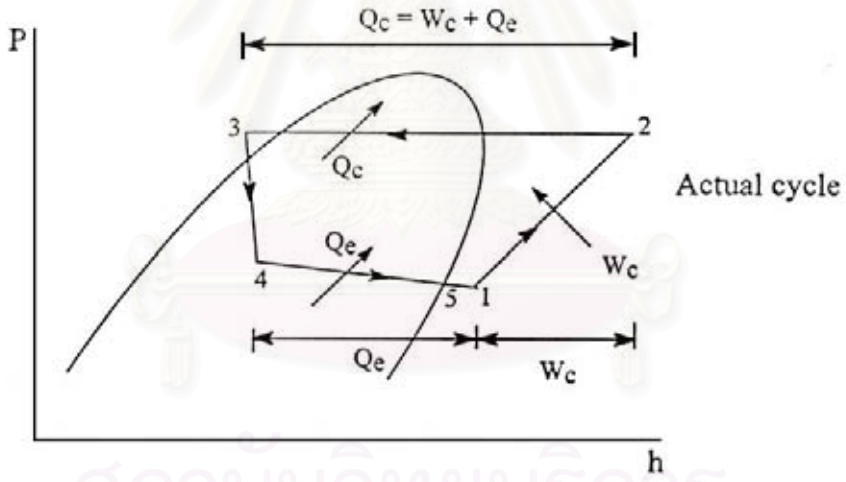
$$COP'_{hp} = \frac{\text{ความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น}}{\text{กำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ}} \qquad (3.55)$$

ในการวิเคราะห์ค่าCOP สามารถคำนวณได้จากข้อมูลทั้งทางด้านวงจรอากาศและวงจรสารทำความเย็น โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. วิเคราะห์ระบบตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์
2. สภาวะต่างๆ ของระบบคงที่

**3.2.7.1 การวิเคราะห์ค่าCOP จากวงจรสารทำความเย็น**

พิจารณาแผนภูมิความดัน-เอนทาลปี(P-h Diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยสามารถวิเคราะห์แต่ละกระบวนการของวัฏจักรปั๊มความร้อนได้ดังต่อไปนี้




**รูปที่ 3.11** แผนภูมิความดันและเอนทาลปีของวัฏจักรปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

กระบวนการ 1-2 เป็นกระบวนการอัดไอ

$$w_c = (h_2 - h_1) \qquad (3.56)$$

กระบวนการ 2-3 เป็นกระบวนการคายความร้อน หรือกระบวนการควบแน่นของสารทำงาน

$$q_c = (h_2 - h_3) \quad (3.57)$$

หรือ

$$Q_c = m_r (h_2 - h_3) \quad (3.58)$$

และ

$$Q_c = W_c + Q_e \quad (3.59)$$

กระบวนการ 3-4 เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่

$$h_3 = h_4 \quad (3.60)$$

กระบวนการ 4-1 เป็นกระบวนการดูดความร้อน หรือกระบวนการกลายเป็นไอของสารทำงาน

$$q_e = h_1 - h_4 \quad (3.61)$$

หรือ

$$Q_e = m_r (h_1 - h_4) \quad (3.62)$$

ในทางปฏิบัติ ตำแหน่งที่สารทำความเย็นออกจากเครื่องทำระเหย(ตำแหน่งที่ 5) ไม่จำเป็นต้องเป็นตำแหน่งเดียวกันกับตำแหน่งที่สารทำงานเข้าสู่เครื่องอัดไอ(ตำแหน่ง 1) เนื่องจากในทางปฏิบัติ จะต้องมีการเดินท่อน้ำยาเป็นระยะหนึ่งระหว่างทางออกจากเครื่องทำระเหย และทางดูดเข้าของเครื่องอัดไอ ดังนั้นในสมการ (3.62) และ (3.63) จึงอาจแทน $h_1$ ด้วย $h_5$

เมื่อ $Q_e$ คือ ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย, kW

$Q_c$ คือ ความสามารถในการระบายความร้อนของเครื่องควบแน่น, kW

$W_c$ คือ กำลังงานที่สารทำงานได้รับโดยเครื่องอัดไอ, kW

$m_r$ คือ อัตราการการไหลเชิงมวลของสารทำงาน, kg/s

$q_e$ คือ ความสามารถในการทำความเย็นจำเพาะของเครื่องทำระเหย, kJ/kg

$q_c$ คือ ความสามารถในการระบายความร้อนจำเพาะของเครื่องควบแน่น, kJ/kg

$w_c$ คือ งานจำเพาะที่สารทำงานได้รับโดยเครื่องอัดไอ, kJ/kg

h คือ เอนทาลปีของสารทำงาน, kJ/kg

จากคำจำกัดความของ COP และ $COP'_{hp}$ จะได้ว่า (ดูหัวข้อ 3.2.7)

$$COP_{hp} = \frac{Q_c}{W_c} \quad (3.63a)$$

$$COP'_{hp} = \frac{Q_c}{W'_c} \quad (3.63b)$$

และ

$$COP_R = \frac{Q_e}{W_c} \quad (3.64)$$

ในกรณีที่เครื่องอัดไอเป็นชนิด hermatic(มอเตอร์อยู่ภายในเปลือกหุ้มของเครื่องอัดไอ) สามารถตั้งสมมุติฐานได้ดังต่อไปนี้

1. การสูญเสียทางกลและทางไฟฟ้าของเครื่องอัดไอได้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนแทน ซึ่งจะถูกรับไปโดยสารทำงานที่ไหลผ่านเครื่องอัดไอ
2. ไม่มีการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมโดยผ่านทางเปลือกหุ้มของเครื่องอัดไอ

และจากสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น สามารถกล่าวได้ว่า

$$W'_c \cong W_{c,her} \quad (3.65a)$$

สำหรับกรณีที่เครื่องอัดไอเป็นชนิดที่มีมอเตอร์อยู่ภายนอก(Open type) จะสามารถคำนวณ $W'_c$ ได้ดังนี้

$$W'_c = W_c \cdot \eta_t \cdot \eta_c \quad (3.65b)$$

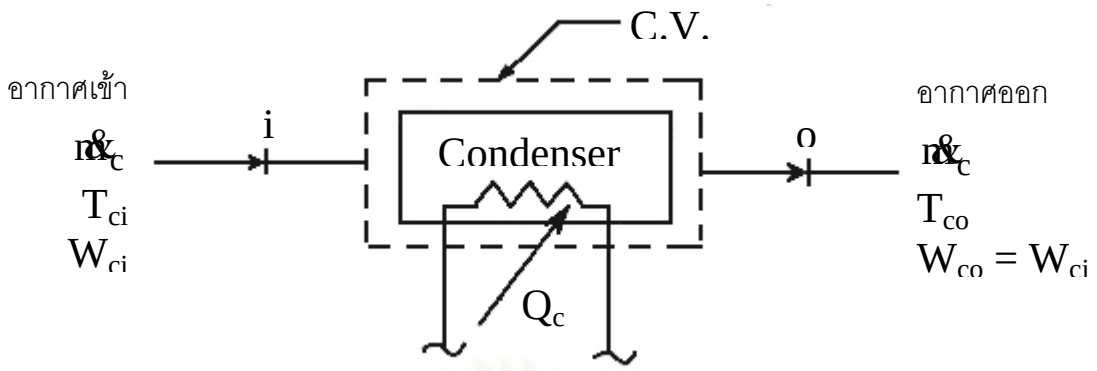
เมื่อ $W'_c$ คือ กำลังงานที่ให้กับเครื่องอัดไอ, kW

$\eta_t$ คือ ประสิทธิภาพของการส่งผ่านกำลัง

$\eta_c$ คือ ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าของเครื่องอัดไอ

**3.2.7.2 การวิเคราะห์ค่าCOP จากวงจรอากาศ**

1. คำนวณความร้อนที่อากาศได้รับจากเครื่องควบแน่น




จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า

$Q_c - W$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศแห้งที่เข้าและออกจากเครื่องควบแน่น + อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของไอน้ำในอากาศที่เข้าและออกจากเครื่องควบแน่น (3.66)

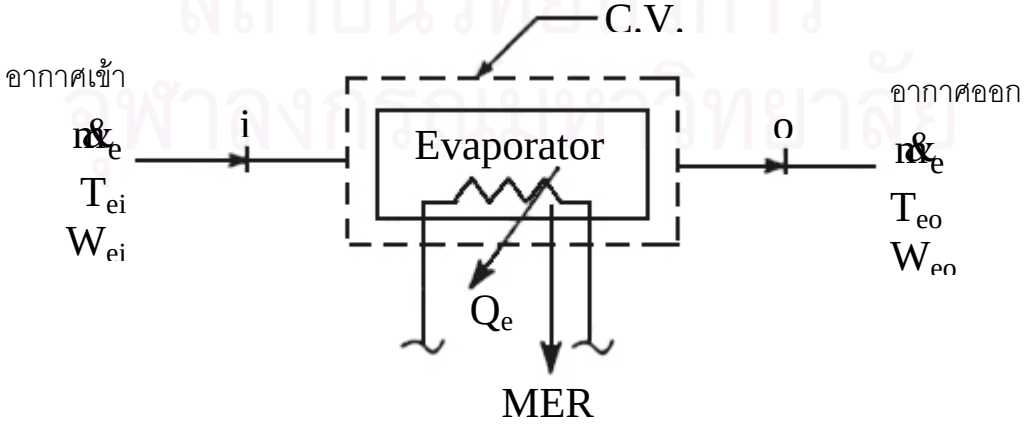
โดยที่ไม่มีงานที่ให้หรือรับจากระบบที่พิจารณา ดังนั้นสมการ (3.66) สามารถเขียนได้ว่า

$$Q_c = \frac{1}{3600}\left[m_c C_a\left(T_{co} - T_{ci}\right) + m_c W_{co}\left(h_{fg,0} + C_v T_{co}\right) - m_c W_{ci}\left(h_{fg,0} + C_v T_{ci}\right)\right] \quad (3.67)$$

เนื่องจาก $W_{ci} = W_{co}$ จะได้ว่า

$$Q_c = \frac{1}{3600}\left[m_c C_a\left(T_{co} - T_{ci}\right) + m_c W_{co} C_v\left(T_{co} - T_{ci}\right)\right] \quad (3.68)$$

2. คำนวณความเย็นที่เครื่องทำระเหยสามารถทำได้



จากสมดุลมวลจะได้ว่า

$$MER = m_e (W_{ei} - W_{eo}) \quad (3.69)$$

จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ จะได้ว่า

$-Q_e - W$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศแห้งที่เข้าและออกจากเครื่องทำระเหย + อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของไอน้ำในอากาศที่เข้าและออกจากเครื่องทำระเหย + อัตราเอนทาลปีของน้ำควบแน่นที่เครื่องทำระเหยที่อุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็น (3.70)

เนื่องจากไม่มีงานที่ให้หรือรับจากระบบที่พิจารณา ดังนั้นสมการ (3.70) สามารถเขียนได้ว่า

$$-Q_e = \frac{1}{3600}\left[m_e C_a \left(T_{eo} - T_{ei}\right) + m_e W_{eo}\left(h_{fg,0} + C_v T_{eo}\right) - m_e W_{ei}\left(h_{fg,0} + C_v T_{ei}\right) + MERC_w \overline{T}_{ev}\right] \quad (3.71)$$

จากสมดุลมวลตามสมการ (3.70) ดังนั้นสมการ (3.71) สามารถเขียนอยู่ในรูปดังนี้

$$Q_e = \frac{1}{3600}\left[m_e C_a \left(T_{ei} - T_{eo}\right) + MER\left(h_{fg,0} - C_w \overline{T}_{ev}\right) + m_e C_v \left(W_{ei} T_{ei} - W_{eo} T_{eo}\right)\right] \quad (3.72)$$

เมื่อ $m_c$ คือ อัตราไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเครื่องควบแน่น, kg/h

$m_e$ คือ อัตราไหลเชิงมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเครื่องทำระเหย, kg/h

MER คือ อัตราการควบแน่นน้ำที่เครื่องทำระเหย, kg water/h

$T_{ei}$ คือ อุณหภูมิขาเข้าเครื่องทำระเหย, $^{\circ}C$

$T_{eo}$ คือ อุณหภูมิขาออกเครื่องทำระเหย, $^{\circ}C$

$\overline{T}_{ev}$ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย, $^{\circ}C$

$W_{ei}$ คือ อัตราความชื้นของอากาศขาเข้าเครื่องทำระเหย, kg water/kg dry air

$W_{eo}$ คือ อัตราความชื้นของอากาศขาออกเครื่องทำระเหย, kg water/kg dry air

$h_{fg,0}$ คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$(=2501 kJ/kg)

$C_v$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ(=1.775 kJ/kg·K)

$C_w$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ(=4.186 kJ/kg·K)

$C_a$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ(=1.006 kJ/kg·K)

### 3.2.8 ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์

ระบบปั๊มความร้อนโดยทั่วไป(ดังที่กล่าวมาแล้วจากหัวข้อข้างต้น) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชนิด คือ เครื่องอัดไอ เครื่องควบแน่น วาล์วลดความดัน และเครื่องทำระเหย ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักรปั๊มความร้อนคืออัตราส่วนของอะเวเลบิลิตี้(Availability)ที่ใช้ประโยชน์ต่ออะเวเลบิลิตี้ที่ป้อนเข้า ดังแสดงได้ในรูปของสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_{cy} = \frac{a_{q_{2-3}}}{w_c} = \frac{a_{f_2} - a_{f_3}}{w_c} \qquad (3.73)$$

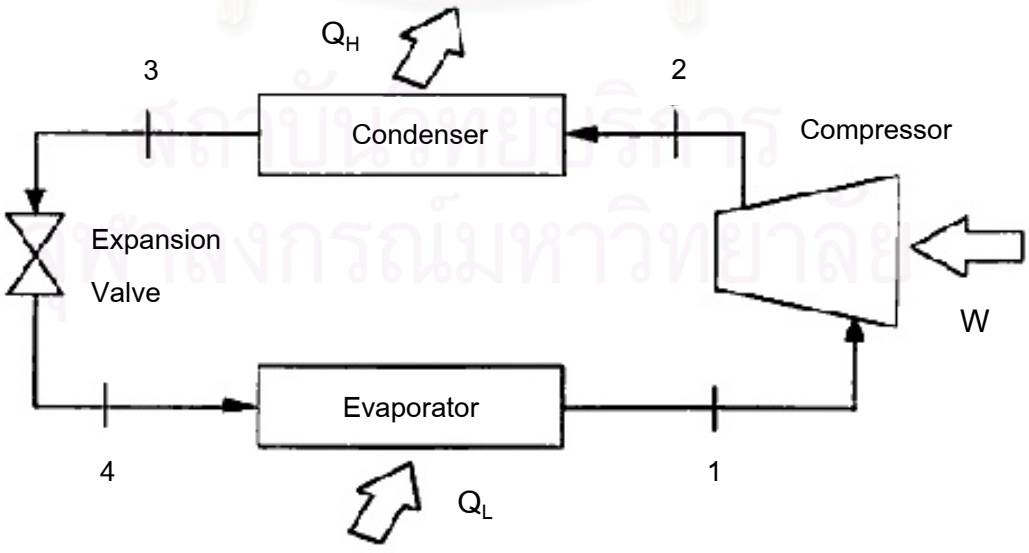
เมื่อ $\varepsilon_{cy}$ คือ ประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ของวัฏจักร

$a_{q_{2-3}}$ คือ อะเวเลบิลิตี้ของการถ่ายเทความร้อน, kJ/kg

$w_c$ คือ งานที่เครื่องอัดไอป้อนให้กับวัฏจักร, kJ/kg

$a_{f_2}$ คือ อะเวเลบิลิตี้ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่ง 2, kJ/kg

$a_{f_3}$ คือ อะเวเลบิลิตี้ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่ง 3, kJ/kg




**รูปที่ 3.12** รูปแสดงระบบปั๊มความร้อนแบบอัดไอ

จากรูปที่ 3.12 สามารถพิจารณาประสิทธิภาพกฎข้อที่สองทางเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลทางความร้อน และอะเวเลบิลิตี้ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์แต่ละตัวของวัฏจักรปั๊มความร้อนได้ดังต่อไปนี้

3.2.8.1 <u>เครื่องอัดไอ(กระบวนการ 1-2)</u>

กำหนดให้กระบวนการ 1-2 นี้เป็นกระบวนการอะเดียแบติก(Adiabatic) ดังนั้น งานที่ได้จากเครื่องอัดไอ สามารถหาได้จากสมการสมดุลพลังงานต่อไปนี้

$$\dot{W}_c = \dot{m}_1(h_1 - h_2) \qquad (3.74)$$

และสามารถหาค่าของการทำลายอะเวเลบิลิตี้(availability destruction) สำหรับกระบวนการอัดไอ ได้ดังนี้

$$\dot{I} = \dot{m}_1(a_{f_1} - a_{f_2}) - \dot{W}_c \qquad (3.75)$$

3.2.8.2 <u>เครื่องควบแน่น(กระบวนการ 2-3)</u>

ขณะที่สารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องควบแน่น สารทำความเย็นจะเกิดการสูญเสียพลังงานไปเป็นจำนวนมาก ซึ่งพลังงานสูญเสียจำนวนนี้สามารถแสดงได้จากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_2(h_3 - h_2) \qquad (3.76)$$

เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ ส่งผลให้อะเวเลบิลิตี้ของกระแสการไหล(flow availability)ของสารทำความเย็นลดลงไปด้วย โดย

$$\dot{m}_2(a_{f_2} - a_{f_3}) = \dot{m}_2[(h_2 - h_3) - T_0(s_2 - s_3)] \qquad (3.77)$$

ซึ่งการลดลงของอะเวเลบิลิตี้ของกระแสการไหลในกระบวนการ 2-3 นี้ มักจะถูกใช้เสมือนเป็น อะเวเลบิลิตี้(Availability) ของระบบปั๊มความร้อนที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์

3.2.8.3 <u>วาล์วลดความดัน(กระบวนการ 3-4)</u>

กระบวนการ 3-4 นี้เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่(Isenthalpic process) และในขณะที่ไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ แต่กลับมีการทำลายอะเวเลบิลิตี้เกิดขึ้นเป็นอันมาก ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการอะเวเลบิลิตี้ดังนี้

$$\dot{I} = \dot{m}_3 T_0(s_4 - s_3) \qquad (3.78)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.8.4 <u>เครื่องทำระเหย(กระบวนการ 4-1)</u>

ขณะที่สารทำความเย็นไหลผ่านเครื่องทำระเหย สารทำความเย็นก็จะรับเอาพลังงานความร้อนมาจากอากาศที่ไหลผ่าน ซึ่งพลังงานความร้อนจำนวนนี้สามารถพิจารณาได้จากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนี้

$$\dot{Q}_{cv} = \dot{m}_4 (h_1 - h_4) \qquad (3.79)$$

และในขณะที่สารทำความเย็นรับพลังงานความร้อนจากสิ่งแวดล้อมอยู่นั้น ตัวสารทำความเย็นเองก็จะเกิดการสูญเสียอะเวเลบิลิตี้ของกระแสการไหลขึ้นด้วย ซึ่งการลดลงของอะเวเลบิลิตี้ของกระแสการไหลสามารถอธิบายได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_4 (a_{f_4} - a_{f_1}) = \dot{m}_4 [(h_4 - h_1) - T_0 (s_4 - s_1)] \qquad (3.80)$$

จากกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมาในหัวข้อนี้ จะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในแง่ของพลังงานแล้ว ปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่รับเอาพลังงานจากเครื่องอัดไอ และจากอากาศภายนอกที่ไหลผ่าน มาปรับใช้ที่เครื่องควบแน่น โดยไม่มีการพิจารณาถึงคุณภาพของพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ซึ่งจากกฎของการอนุรักษ์พลังงาน ได้แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อกลับมาพิจารณาในแง่ของอะเวเลบิลิตี้แล้ว จะมีความแตกต่างกันมาก โดยที่ ค่าอะเวเลบิลิตี้ที่นำมาใช้ประโยชน์ของปั๊มความร้อนจะมีค่าต่ำกว่าค่าอะเวเลบิลิตี้ที่ป้อนเข้ามาก ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ทุกตัวในระบบปั๊มความร้อนไม่ใช่อุปกรณ์ที่สมบูรณ์แบบ และยังมีการสูญเสียอะเวเลบิลิตี้และการทำลายอะเวเลบิลิตี้เกิดขึ้นในหลายๆ กระบวนการอีกด้วย

### 3.2.9 สารทำความเย็น(Refrigerant)

ในการเลือกสารทำความเย็นนั้น ควรจะพิจารณาถึงดังเกณฑ์ดังต่อไปนี้

1. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโลกตามสนธิสัญญาป้องกันการทำลายชั้นโอโซน โดยมีประเทศต่างๆ เข้าร่วมลงนามในพิธีสารมอนทรีออล(Montreal Protocol) ได้แก่ ศักยภาพในการทำลายชั้นโอโซนของบรรยากาศโลก(Ozone Depletion Potential, ODP) และศักยภาพในการทำให้โลกร้อนขึ้น(Global Warming Potential, GWP)
2. ความเหมาะสมที่จะนำมาใช้

ในแง่ของผลกระทบของสารทำความเย็นที่มีต่อสิ่งแวดล้อมโลก สารทำความเย็น R-134a(HFC-134a) ซึ่งเป็นสารทำความเย็นชนิดใหม่ น่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดในปัจจุบัน เพราะ

ไม่มีสารคลอรีน อันเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำลายโอโซน ซึ่งสารทำความเย็น R-134a นี้จะไม่มีค่า ODP แต่ยังคงมีค่า GWP อยู่บ้างเล็กน้อย(GWP=0.30)

สำหรับสารทำความเย็น R-22(HCFC-22) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีค่า ODP อยู่เล็กน้อย(ODP=0.05) และมีค่า GWP=0.34 ซึ่งใกล้เคียงกับสารทำความเย็น R-134a ดังแสดงในตารางที่ 3.3

**ตารางที่ 3.3** คุณสมบัติสารทำความเย็นตามข้อกำหนดพิธีสารมอนทรีออล

| สารทำความเย็น | CFC-12 | HCFC-22 | R-134a |
|---|---|---|---|
| ODP | 1.0 | 0.05 | 0.0 |
| GWP | 2.8 | 0.34 | 0.3 |

เครื่องอัดไอที่ออกแบบมาให้ใช้กับสารทำความเย็น R-134a นั้น มีราคาสูงกว่าเครื่องอัดไอที่ออกแบบมาให้ใช้กับสารทำความเย็น R-22 ประมาณ 3-4 เท่าตัว (ยกเว้นเครื่องอัดไอขนาดเล็กที่ใช้กับตู้เย็น) อีกทั้งสารทำความเย็น R-134a ก็มีราคาสูงกว่าสารทำความเย็น R-22 หลายเท่าตัว ดังนั้นระบบปั๊มความร้อนที่ใช้สารทำความเย็น R-134a จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับอุตสาหกรรมขนาดกลางถึงเล็กที่ต้องพิจารณาเงินทุนเป็นสำคัญ ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ R-22 เป็นสารทำความเย็นในระบบปั๊มความร้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 4

# แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มความร้อน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปั๊มความร้อนสำหรับการบ่มใบยาสูบ ประกอบไปด้วยแบบจำลองการบ่มใบยาสูบและแบบจำลองระบบปั๊มความร้อน โดยใช้หลักการถ่ายเทมวลและความร้อนมาอธิบายกระบวนการทำงานได้ ดังต่อไปนี้

แบบจำลองการบ่มใบยาสูบแบบอัดแน่นนี้ได้ใช้แบบจำลองการบ่มใบยาสูบของ ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์(2542) โดยแบบจำลองการบ่มใบยาสูบ มีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ระหว่างการไล่ความชื้นในใบยาสูบ ไม่มีการหดตัวของใบยาสูบเกิดขึ้น
2. ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละชั้นย่อยๆ ของใบยาสูบหนา dx
3. ไม่มีการนำความร้อนในชั้นใบยาสูบ
4. ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้นและใบยาสูบมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาของการบ่มใบยาสูบ
5. อุณหภูมิของอากาศชื้น มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของใบยาสูบตลอดช่วงเวลาของการบ่มใบยาสูบ
6. $\frac{\partial T}{\partial t}$ และ $\frac{\partial W}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ และ $\frac{\partial W}{\partial x}$ ตามลำดับ

และแบบจำลองระบบปั๊มความร้อน มีสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

1. ระบบทำงานภายใต้สภาวะไม่คงตัว แต่เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในห้องบ่มใบยาสูบเกิดขึ้นช้ามาก จึงทำให้สามารถถือได้ว่าเป็นสภาวะสม่ำเสมอในแต่ละช่วงย่อยของเวลา(ชม.) ได้
2. อุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหยและที่เครื่องควบแน่น เป็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของเครื่องทำระเหย และเครื่องควบแน่น
3. อุณหภูมิของผิวท่อเครื่องควบแน่น มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น เนื่องจากถือว่าผิวท่อบางมาก
4. อุณหภูมิของผิวท่อเครื่องทำระเหย มีค่าเท่ากับอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่เครื่องทำระเหย เนื่องจากถือว่าผิวท่อบางมาก

5. ไม่มีการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิการระเหย และอุณหภูมิการควบแน่นของสารทำความเย็นภายในท่อ

6. กระบวนการขยายตัวที่วาล์วลดความดันถูกพิจารณาเป็นกระบวนการไอเซ็นทาลปิค(Isenthalpic)

7. ความร้อนสูญเสียพลังงานของสารทำความเย็นภายในท่อระหว่างแต่ละอุปกรณ์ของระบบปั๊มความร้อนถือว่ามีค่าน้อยมาก

8. ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำระเหยควรมีค่าอยู่ระหว่าง 2-3 m/s ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับ 2.5 m/s (Hans and Fritz, 1981)

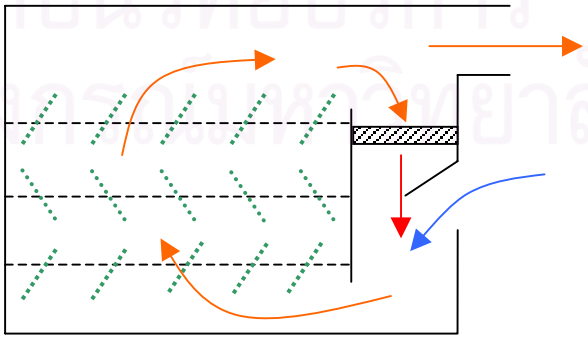
9. ความดันของอากาศที่ไหลเวียนอยู่ภายในระบบมีค่าคงที่

10. กระบวนการผสมกันของอากาศถือว่าเป็นกระบวนการแอเดียแบติก(adiabatic process)

11. อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ไหลเวียนถือว่ามีการกระจายตัวอย่างเป็นเอกรูป(uniform)

**4.1 แบบจำลองสภาวะอากาศหลังผ่านชั้นใบยาสูบ**

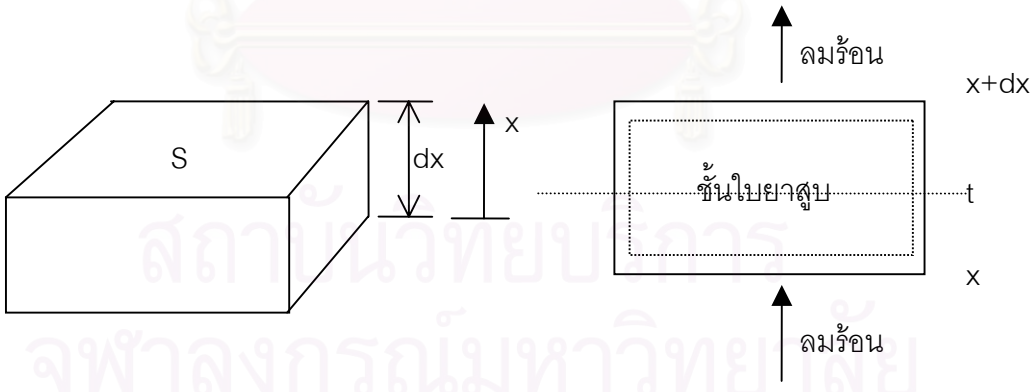
ห้องบ่มใบยาสูบแบบอัดแน่นประกอบด้วยชั้นใบยาสูบจำนวน 3 ชั้น โดยอากาศร้อนจะไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อน และไหลผ่านใบยาสูบจากชั้นล่างสุดก่อนแล้วจึงไหลสู่ชั้นบนสุด และถูกหมุนเวียนนำกลับมาใช้อีกครั้ง แต่ก็มีอากาศร้อนส่วนหนึ่งถูกปล่อยไหลออกจากห้องบ่มไป เพื่อระบายความชื้นออกจากห้องบ่มใบยาสูบ ส่วนอากาศที่หมุนเวียนอยู่ภายในห้องบ่ม ก็จะได้รับความร้อนอีกครั้งจากอุปกรณ์ให้ความร้อน และไปผสมกับอากาศจากสิ่งแวดล้อม ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ชั้นใบยาสูบชั้นล่างสุดอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1



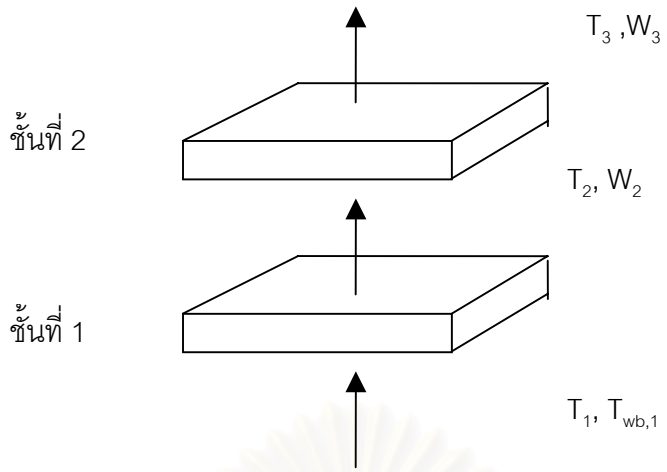
**รูปที่ 4.1** รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบแบบอัดแน่น

ในการพิจารณาถึงสมการทางคณิตศาสตร์ของการไล่ความชื้นเป็นชั้นๆของใบยาสูบ เริ่มจากการพิจารณาใบยาสูบชั้นย่อยๆ ที่ประกอบกันเป็นชั้นหนาซึ่งมีความหนาค่าหนึ่ง โดยจะเริ่มจากชั้นใบยาสูบย่อยชั้นแรกซึ่งเป็นชั้นล่างสุด ซึ่งอากาศร้อนจะผ่านเข้ามีอุณหภูมิและคุณสมบัติของอากาศค่าหนึ่ง และเมื่ออากาศร้อนไหลผ่านชั้นใบยาสูบชั้นแรกไป จะทำให้มีอุณหภูมิและคุณสมบัติของอากาศเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะสอดคล้องกับกระบวนการบ่มใบยาสูบ อุณหภูมิและคุณสมบัติของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นของใบยาสูบชั้นแรกมาแล้วจะเป็นคุณสมบัติของอากาศร้อนที่ไหลเข้าชั้นของใบยาสูบชั้นที่สองต่อไป ซึ่งอากาศร้อนก็จะผ่านชั้นของใบยาสูบชั้นต่างๆ ต่อไปจนถึงชั้นบนสุด และอากาศร้อนที่ผ่านชั้นของใบยาสูบชั้นบนสุดแล้ว อากาศร้อนส่วนมากจะถูกหมุนเวียนนำกลับมาใช้ในการบ่มใหม่ และอากาศร้อนบางส่วนจะถูกระบายทิ้งออกนอกห้องบ่มใบยาสูบ เพื่อลดปริมาณความชื้นที่มีในห้องบ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.1

ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ของการไล่ความชื้นเป็นชั้นๆ ของใบยาสูบ จะสามารถหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าต่างๆ ของอากาศตลอดชั้นใบยาสูบ โดยจะพิจารณาชั้นใบยาสูบชั้นล่างสุดเป็นชั้นแรก ซึ่งตัวแปรต่างๆ ที่เป็นคุณสมบัติของอากาศร้อนที่ออกจากชั้นใบยาสูบชั้นแรกจะถูกใช้เป็นข้อมูลของคุณสมบัติของอากาศร้อนที่จะเข้าสู่ชั้นใบยาสูบที่อยู่ติดกัน โดยจะต้องกำหนดอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ชั้นล่างสุดให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลา dt ซึ่งอุณหภูมิและความชื้นของอากาศร้อนจะเปลี่ยนไปเมื่อเวลาที่ทำการบ่มเพิ่มขึ้นตามรูปแบบการบ่มใบยาสูบ และคุณสมบัติของใบยาสูบ โดยปริมาตรควบคุมของแต่ละชั้นย่อยๆ ของใบยาสูบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2




**รูปที่ 4.2** รูปแสดงชั้นใบยาสูบที่อัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ




**รูปที่ 4.3** รูปแสดงลักษณะการแบ่งชั้นใบยาสูบที่อัดแน่นภายในห้องบ่มใบยาสูบ

ในการพิจารณาแบบจำลอง จะมีขั้นตอนการคำนวณโดยใช้สภาวะของอากาศที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นข้อมูลเพื่อคำนวณสภาวะอากาศที่ตำแหน่งที่ 2 และใช้ผลการคำนวณจากตำแหน่งที่ 2 นี้เป็นข้อมูลเพื่อไปคำนวณหาสภาวะอากาศที่ตำแหน่งที่ 3 และทำนองเดียวกันนี้ต่อไป จนถึงชั้นบนสุดของชั้นใบยาสูบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยการคำนวณจะใช้สมการดังต่อไปนี้

สมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นของใบยาสูบ ณ. ชั่วโมงที่ทำการบ่มใบยาสูบใดๆ (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$e^{-(AG+B)\cdot t} = \frac{MC - MC_e}{MC_0 - MC_e} \qquad (4.1)$$

เมื่อ A = 0.23

B = 0.0016

$MC_e$ = ความชื้นสมดุลของใบยาสูบมาตรฐานแห้งจากสมการของ Kiranoudis(1990)

$$= \frac{2.62}{t(1-\phi)^{0.637}} - \left(3.05 \times 10^{-4}\right) \times T \times \phi$$

MC = ความชื้นของใบยาสูบมาตรฐานแห้งที่เวลาใดๆ

$MC_0$ = ความชื้นของใบยาสูบมาตรฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น

G = ค่าความแตกต่างของความชื้นในอากาศที่มีได้มากที่สุด กับความชื้นในอากาศ ณ.เวลานั้น

t = ชั่วโมงที่ทำการบ่ม, hr

จากสมการสมดุลมวลไอน้ำในใบยาสูบในหัวข้อ 3.1.6.1 จะได้ว่า

$$D_s\ Sdx\frac{\partial MC}{\partial t}dt = G_a\ SWdt - G_a\ S\left(W + \frac{\partial W}{\partial x}dx\right)dt - \in \cdot \rho_a \cdot S\,dx\,\frac{\partial W}{\partial t}dt \quad (4.2)$$

และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้น และความชื้นของใบยาสูบ ดังนี้

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{D_s}{G_a}\frac{\partial MC}{\partial t} \quad (4.3)$$

และจากสมการสมดุลความร้อนของใบยาสูบในหัวข้อ 3.1.6.3 จะสามารถหาค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\dfrac{\psi_T - T\left(D_s C_w \dfrac{\partial MC}{\partial t}dt\right)}{G_a \cdot dt} - 2501\dfrac{\partial W}{\partial x} - C_w T\dfrac{\partial W}{\partial x}}{C_a + WC_w + C_w\dfrac{\partial W}{\partial x}dx} \quad (4.4)$$

สำหรับ T< 45°C

เมื่อ $\psi_T = M_{dry\ matter} \times 0.476 \times \left[2.251T - 29.81 + \left(1607.7 - 85.1\,T + 1.126\,T^2\right)^{1/2}\right]$

และ

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\dfrac{-T\left(D_s C_w \dfrac{\partial MC}{\partial t}dt\right)}{G_a \cdot dt} - 2501\dfrac{\partial W}{\partial x} - C_w T\dfrac{\partial W}{\partial x}}{C_a + WC_w + C_w\dfrac{\partial W}{\partial x}dx} \quad (4.5)$$

สำหรับ T> 45°C

และจากสมการ(4.1), (4.3), (4.4) และ (4.5) ก็จะทำให้ทราบอุณหภูมิและคุณสมบัติของอากาศร้อน ที่ตำแหน่งชั้นบนสุดของชั้นใบยาสูบที่แต่ละชั่วโมงของการบ่มใบยาสูบได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**4.2 แบบจำลองพลังงานต่าง ๆที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มใบยาสูบ**

จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้ห้องบ่มใบยาสูบเป็นปริมาตรควบคุม สามารถพิจารณาสมดุลพลังงานในห้องบ่มใบยาสูบในแต่ละช่วงเวลาใดๆ ได้โดยสมการดังต่อไปนี้

$$Q_w + Q_r - W = Q_x + Q_s + Q_m \qquad (4.6)$$

โดย $Q_w$ = พลังงานจากน้ำร้อนที่ให้แก่ห้องบ่ม

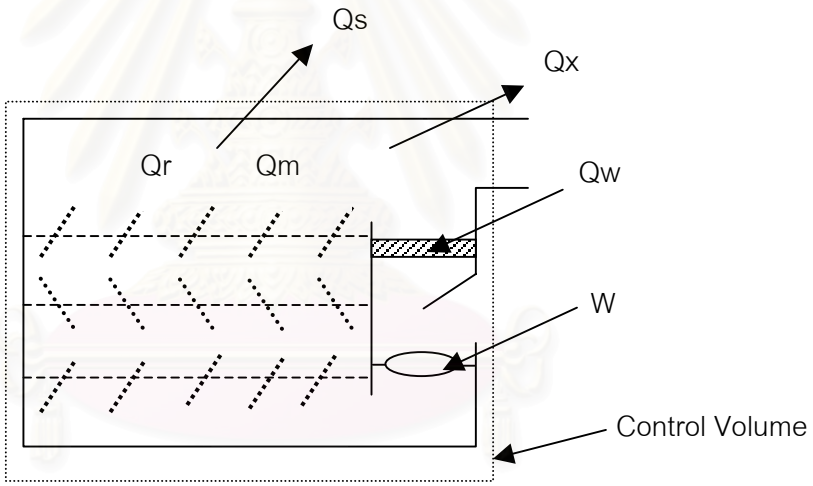
$Q_r$ = พลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

$Q_x$ = พลังงานของการถ่ายเทอากาศ

$Q_m$ = พลังงานที่ต้องการเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิของใบยาสูบ

$Q_s$ = พลังงานที่ต้องการเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิโครงสร้าง รวมถึงพลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้าง

$W$ = พลังงานที่ให้กับพัดลมหมุนเวียนอากาศ




**รูปที่ 4.4** รูปแสดงสมดุลพลังงานภายในห้องบ่มใบยาสูบ

และจากหัวข้อที่ 3.1.7 ค่าพลังงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มใบยาสูบ ได้ถูกเสนอไว้ดังสมการต่อไปนี้

- พลังงานจากปฏิกิริยาทางเคมีของใบยาสูบ

$$Q_r = 0.476 \times M_{dry\ matter} \times \left[2.251T - 29.81 + \left(1607.7 - 85.1T + 1.126T^2\right)^{0.5}\right] \qquad (4.7)$$

เมื่อ $T < 45^{\circ}C$

- พลังงานของอากาศระบาย

$$\dot{Q}_x = \dot{m}_a \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (4.8)$$

เมื่อ $h_{out} = C_a T_{out} + W_{out}(h_{fg,0} + C_w T_{out})$

$h_{in} = C_a T_{in} + W_{in}(h_{fg,0} + C_w T_{in})$

- พลังงานที่สูญเสียให้กับโครงสร้างห้องบ่มใบยาสูบ และสูญเสียผ่านห้องบ่มใบยาสูบ

$$Q_s = Q_{sl} + Q_{ss} \quad (4.9)$$

$$Q_{sl} = Q_{wl} + Q_{fl} \quad (4.10)$$

$$Q_{wl} = U_w \times A \times (T_{inroom} - T_{outroom})\Delta t \quad (4.11)$$

$$Q_{fl} = U_f \times A \times (T_{inroom} - T_{outroom}) \quad (4.12)$$

$$Q_{ss} = \left[M_c C_c + M_s C_s + M_r C_s\right]\left[T_i - T_{i-1}\right] \quad (4.13)$$

โดย $U_f = \frac{3.3k}{\pi ab}\left[a \cdot \ln(\frac{4a}{\upsilon^*}) + b \cdot \ln(\frac{4b}{\upsilon^*}) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a - b\right]$

$$- b \cdot \ln\left(\sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + b)}{a}}\right) - a\ln\left(\sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + a}{b}}\right)$$

$$\upsilon^* = \upsilon\left(1 + \frac{1.74}{\upsilon \cdot h}\right)$$

- พลังงานที่สะสมอยู่ในใบยาสูบเนื่องจากการบ่มใบยาสูบ

$$Q_m = \left[(C_w m_i + C_t m_t)T_i\right] - \left[(C_w m_{i-1} + C_t m_t)T_{i-1}\right] \quad (4.14)$$

**4.3 แบบจำลองคุณสมบัติของอากาศชื้น**

คุณสมบัติของอากาศชื้นสามารถคำนวณได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (4.15)$$

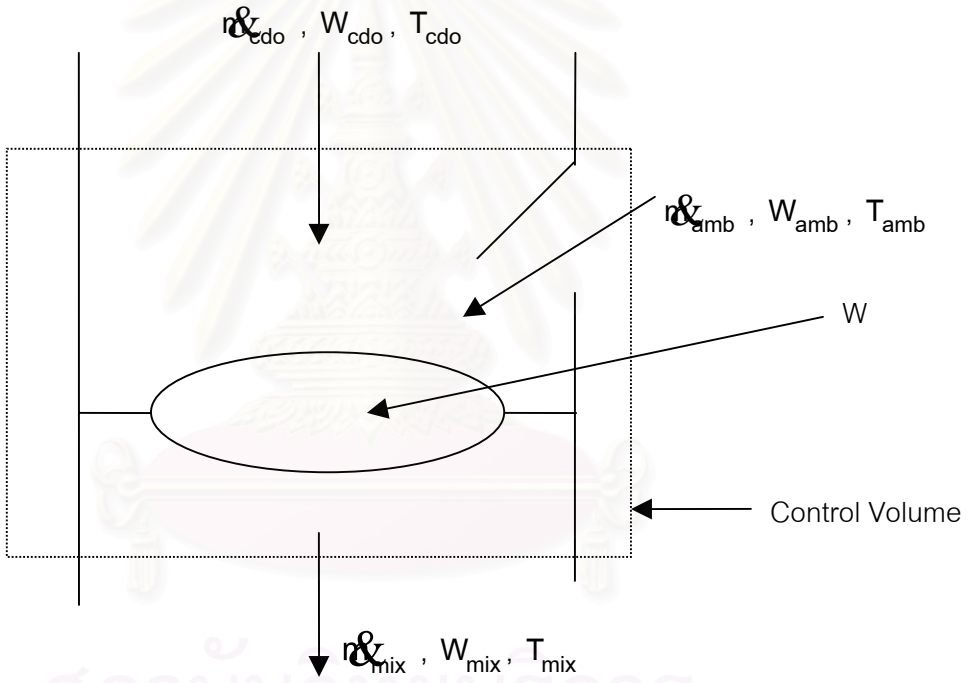
$$P_v = \frac{101.325W}{0.62189 + W} \quad (4.16)$$

$$P_{vs} = \exp\left[\frac{-5800.2206}{T} + 1.3914993 - 0.048640239T + 4.1764768\times10^{-5}T^{2} - 1.4452093\times10^{-8}T^{3} + 6.5459673\ln(T)\right] \quad (4.17)$$

$$W = 0.62189\cdot\phi\cdot\frac{P_{vs}}{\left[P-(\phi\cdot P_{vs})\right]} \quad (4.18)$$

$$h = 1.006T + W\left(2501 + 1.775T\right) \quad (4.19)$$

**4.4 แบบจำลองอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศผสมบริเวณพัดลมหมุนเวียนอากาศ**




**รูปที่ 4.5** รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศผสมบริเวณพัดลมหมุนเวียนอากาศ

พิจารณาปริมาตรควบคุมในรูปที่ 4.5 จากหลักของกฎทรงมวล มวลไอน้ำในอากาศร้อนก่อนเข้าสู่ชั้นใบยาสูบ จะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลไอน้ำในอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่กับมวลของไอน้ำในอากาศจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของไอน้ำ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{tbi}W_{tbi} = \dot{m}_{mix}W_{mix} = \dot{m}_{cdo}W_{cdo} + \dot{m}_{amb}W_{amb} \quad (4.20)$$

และมวลของอากาศแห้งก่อนเข้าสู่ชั้นใบยาสูบมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลอากาศแห้งที่นำกลับมาใช้ใหม่กับมวลของอากาศแห้งจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของอากาศแห้ง ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{tbi} = \dot{m}_{mix} = \dot{m}_{cdo} + \dot{m}_{amb} \qquad (4.21)$$

และจากสมการสมดุลมวลทั้ง 2 สมการข้างต้น สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$W_{cdo} = \frac{\left(\dot{m}_{cdo} + \dot{m}_{amb}\right) \cdot W_{tbi} - \dot{m}_{amb} \cdot W_{amb}}{\dot{m}_{cdo}} \qquad (4.22)$$

เมื่อ $\dot{m}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง, kg/s

$W$ = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $kg_{vapor}/_{kgair}$

สำหรับสัญลักษณ์กำกับล่าง

tbi คือ สภาวะที่ตำแหน่งทางเข้าชั้นใบยาสูบ

mix คือ อากาศผสม

cdo คือ สภาวะที่ตำแหน่งทางออกจากเครื่องควบแน่น

amb คือ อากาศสิ่งแวดล้อม

เมื่อนำหลักการทรงพลังงานมาประยุกต์ใช้ จะได้ว่า เอนทาลปีของอากาศร้อนก่อนเข้าสู่ชั้นใบยาสูบ จะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของเอนทาลปีของอากาศร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่กับเอนทาลปีของอากาศจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของพลังงาน ได้ดังนี้

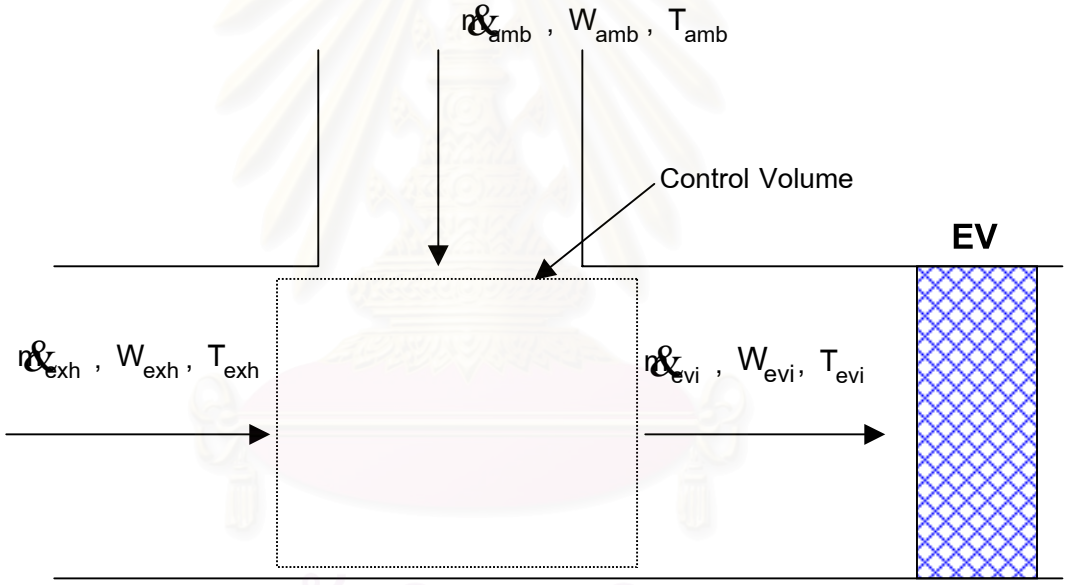
$$\begin{aligned}\dot{m}_{tbi} C_a T_{tbi} + \dot{m}_{tbi} W_{tbi} \left(h_{fg,0} + C_v T_{tbi}\right) &= \dot{m}_{cdo} C_a T_{cdo} + \dot{m}_{cdo} W_{cdo} \left(h_{fg,0} + C_v T_{cdo}\right) + \dot{W}_{fan} \\ &\quad + \dot{m}_{amb} C_a T_{amb} + \dot{m}_{amb} W_{amb} \left(h_{fg,0} + C_v T_{amb}\right) \qquad (4.23)\end{aligned}$$

และ

$$T_{cdo} = \frac{\dot{m}_{tbi} C_a T_{tbi} + \dot{m}_{tbi} W_{tbi} \left( h_{fg,0} + C_v T_{tbi} \right)}{\dot{m}_{cdo} \left( C_a + W_{cdo} C_v \right)} - \frac{\dot{m}_{amb} C_a T_{amb} + \dot{m}_{amb} W_{amb} \left( h_{fg,0} + C_v T_{amb} \right)}{\dot{m}_{cdo} \left( C_a + W_{cdo} C_v \right)} - \frac{\dot{W}_{fan}}{\dot{m}_{cdo} \left( C_a + W_{cdo} C_v \right)} - \frac{W_{cdo} h_{fg,0}}{\left( C_a + W_{cdo} C_v \right)} \quad (4.24)$$

เมื่อ $T_{cdo}$ = อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทางออกของเครื่องควบแน่น, °C

**4.5 แบบจำลองอัตราส่วนความชื้นและอุณหภูมิของอากาศผสมบริเวณทางเข้าเครื่องทำระเหย**




**รูปที่ 4.6** รูปแสดงลักษณะการไหลของอากาศผสมบริเวณทางเข้าเครื่องทำระเหย

พิจารณาปริมาตรควบคุมในรูปที่ 4.6 จากหลักของกฎทรงมวล มวลไอน้ำในอากาศร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องทำระเหย จะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลไอน้ำในอากาศร้อนที่ระบายออกกับมวลของไอน้ำในอากาศจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของไอน้ำ ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{evi} W_{evi} = \dot{m}_{mix} W_{mix} = \dot{m}_{exh} W_{exh} + \dot{m}_{amb} W_{amb} \quad (4.25)$$

และมวลของอากาศแห้งก่อนเข้าสู่เครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับผลรวมของมวลอากาศแห้งที่ระบายออกกับมวลของอากาศแห้งจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของอากาศแห้ง ได้ดังนี้

$$\dot{m}_{evi} = \dot{m}_{mix} = \dot{m}_{exh} + \dot{m}_{amb} \quad (4.26)$$

และจากสมการสมดุลมวลทั้ง 2 สมการข้างต้น สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$W_{evi} = \frac{\dot{m}_{exh} W_{exh} + \dot{m}_{amb} W_{amb}}{\dot{m}_{evi}} \quad (4.27)$$

เมื่อ $\dot{m}$ = อัตราการไหลของมวลอากาศแห้ง, kg/s

$W$ = อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $kg_{vapor}/_{kgair}$

สำหรับสัญลักษณ์กำกับล่าง

evi คือ สภาวะที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องทำระเหย

mix คือ อากาศผสม

exh คือ สภาวะที่ตำแหน่งทางออกจากห้องบ่มใบยาสูบ

amb คือ อากาศสิ่งแวดล้อม

เมื่อนำหลักการทรงพลังงานมาประยุกต์ใช้ จะได้ว่า เอนทาลปีของอากาศร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องทำระเย จะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของเอนทาลปีของอากาศร้อนที่ระบายออกกับเอนทาลปีของอากาศจากสิ่งแวดล้อมที่เข้ามาผสม ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลพลังงาน ได้ดังนี้

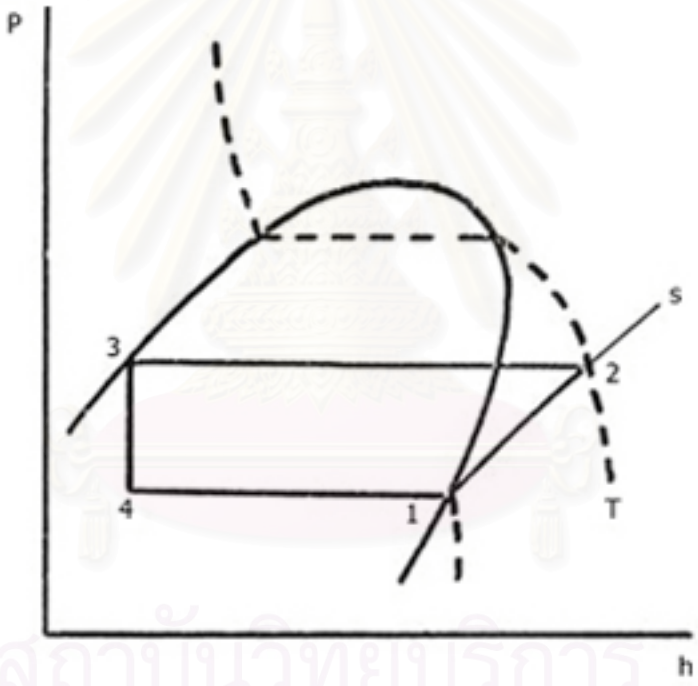
$$\begin{aligned}\dot{m}_{evi} C_a T_{evi} + \dot{m}_{evi} W_{evi} \left(h_{fg,0} + C_v T_{evi}\right) &= \dot{m}_{exh} C_a T_{exh} + \dot{m}_{exh} W_{exh} \left(h_{fg,0} + C_v T_{exh}\right) \\ &\quad + \dot{m}_{amb} C_a T_{amb} + \dot{m}_{amb} W_{amb} \left(h_{fg,0} + C_v T_{amb}\right)\end{aligned} \quad (4.28)$$

และ

$$T_{evi} = \frac{\dot{m}_{exh} C_a T_{exh} + \dot{m}_{exh} W_{exh} \left( h_{fg,0} + C_v T_{exh} \right)}{\dot{m}_{evi} \left( C_a + W_{evi} C_v \right)} + \frac{\dot{m}_{amb} C_a T_{amb} + \dot{m}_{amb} W_{amb} \left( h_{fg,0} + C_v T_{amb} \right)}{\dot{m}_{evi} \left( C_a + W_{evi} C_v \right)} - \frac{W_{evi} h_{fg,0}}{\left( C_a + W_{evi} C_v \right)} \quad (4.29)$$

เมื่อ $T_{evi}$ = อุณหภูมิของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าเครื่องทำระเหย, °C

**4.6 แบบจำลองคุณสมบัติทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบปั๊มความร้อน**



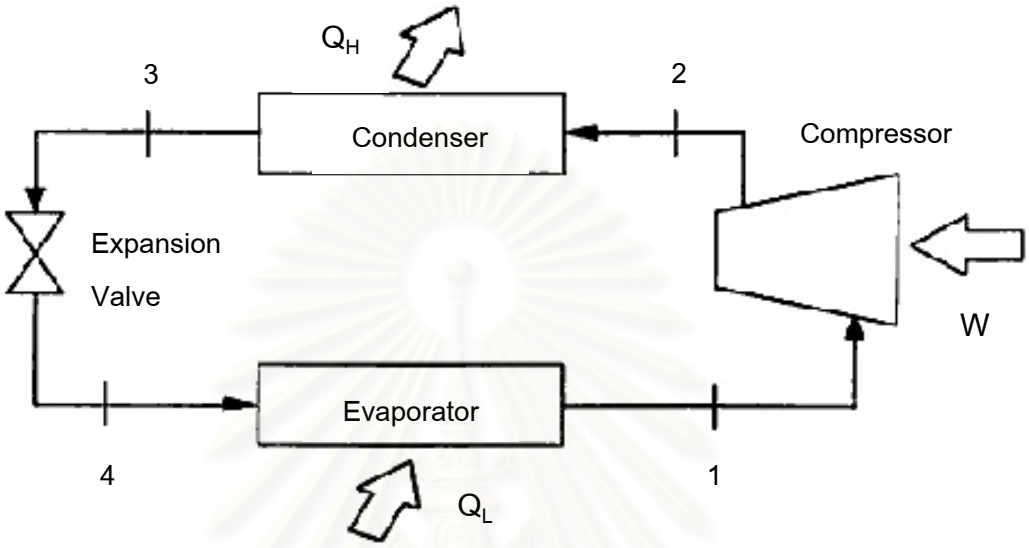

**รูปที่ 4.7** แผนภูมิความดันและเอนทาลปี การทำงานของสารทำความเย็น R-22(HCFC-22) ในระบบปั๊มความร้อน

ในการคำนวณหาพลังงานที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบปั๊มความร้อน มีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์ต่างๆ ของสารทำความเย็น ณ. อุปกรณ์นั้นๆ ภายในระบบปั๊มความร้อน ซึ่งสารทำความเย็นที่เลือกใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ สารทำความเย็น R-22(HCFC-22) ดังเหตุผลที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.2.9

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R-22 (HCFC-22) นี้สามารถคำนวณได้โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดย Kartsounes และ Erth(1971)

โดยมีการดัดแปลงแบบจำลองนี้เป็นบางส่วนสำหรับเปลี่ยนหน่วยจากระบบอังกฤษมาเป็นระบบ SI

## 4.7 แบบจำลองของอุปกรณ์ในระบบปั๊มความร้อน




**รูปที่ 4.8** รูปแสดงตำแหน่งต่างๆ ในระบบปั๊มความร้อน

- งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางอุดมคติคำนวณจาก

$$W_{isen} = m_r q_w = m_r(h_2 - h_1) \quad (4.30)$$

เมื่อ $W_{isen}$ คือ งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอทางอุดมคติ, kW

$q_w$ คือ งานที่ป้อนให้แก่เครื่องอัดไอทางอุดมคติต่อหน่วย, kJ/kg

$h_1$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าสู่เครื่องอัดไอ, kJ/kg

$h_2$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องอัดไอ, kJ/kg

- งานที่ใช้ในเครื่องอัดไอจริงคำนวณจาก

$$W_a = \frac{m_r \cdot q_w}{\eta_{isen} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{motor}} \quad (4.31)$$

เมื่อ $\eta_{isen}$ คือ ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิก

$\eta_{mech}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงกลของเครื่องอัดไอ

$\eta_{motor}$ คือ ประสิทธิภาพเชิงกลของมอเตอร์ไฟฟ้า

- ความสามารถในการทำความร้อนในเครื่องควบแน่น ($Q_{cd}$) คำนวณจาก

$$Q_{cd} = m_r(h'_2 - h_3) \quad (4.32)$$

เมื่อ $h'_2$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะเข้าเครื่องควบแน่น, kJ/kg

$h_3$ คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นขณะออกจากเครื่องควบแน่น, kJ/kg

- ความสามารถในการทำความเย็นของเครื่องทำระเหย ($Q_{ev}$) คำนวณจาก

$$Q_{ev} = Q_{cd} - W_a \quad (4.33)$$

- ความสามารถในการทำความร้อนของขดลวดความร้อน ($Q_{heater}$) คำนวณจาก

$$Q_{heater} = \dot{m}_{cdo} C_a \left(T_{cdo} - T_{exh}\right) + \dot{m}_{cdo} W_{cdo} C_v \left(T_{cdo} - T_{exh}\right) \quad (4.34)$$

## 4.8 การคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาการใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ จึงได้มีการจัดสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ “วิชวลเบสิก(Visual Basic)”

ในการคำนวณหาค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบฯ โปรแกรมแบบจำลองฯ นี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ ซึ่งประกอบไปด้วย

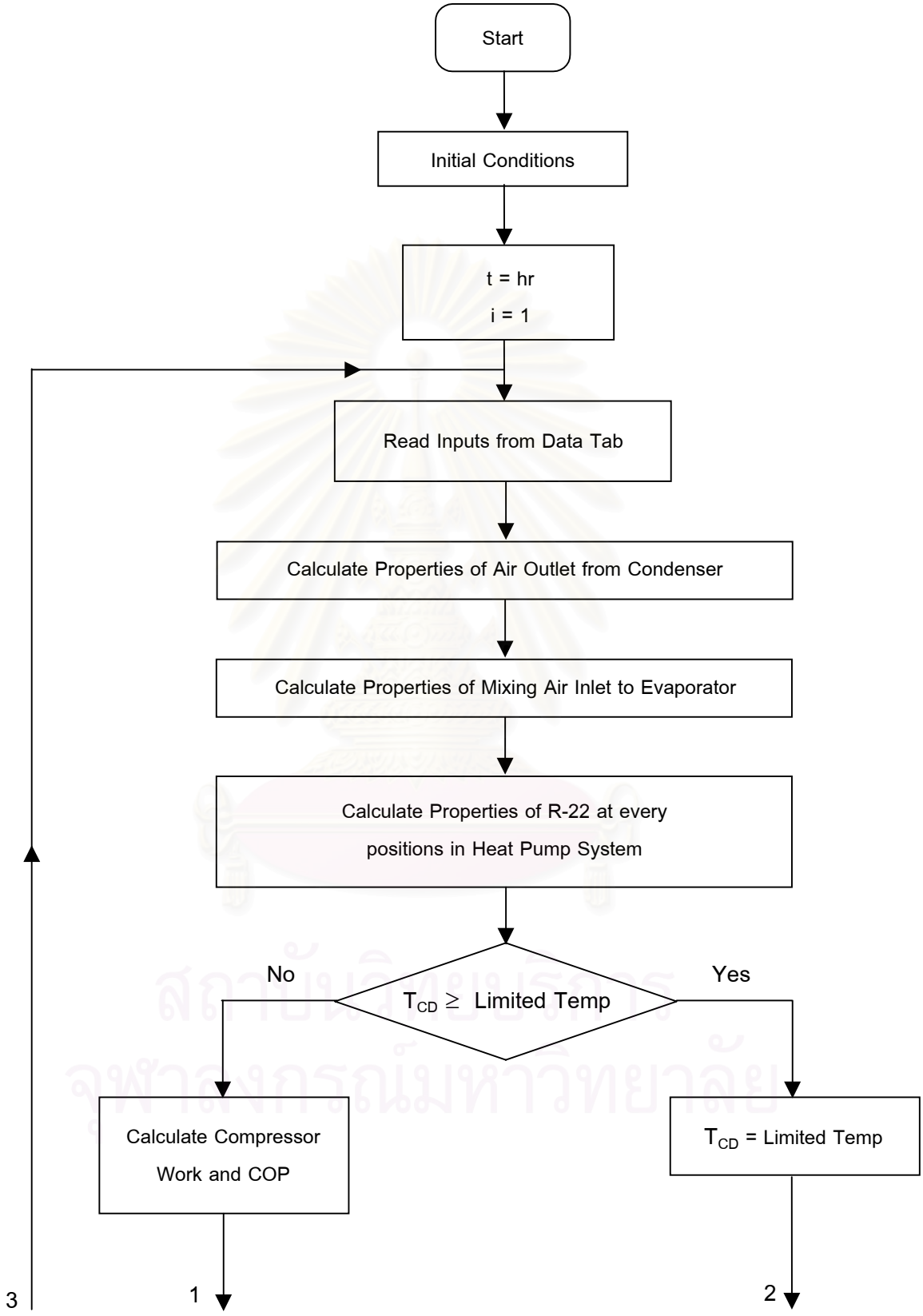
1. นน.ใบยาสูบสด (kg)
2. นน. ใบยาสูบแห้ง (kg)
3. ประสิทธิภาพไอเซ็นโทรปิค (%)
4. ประสิทธิภาพทางกลของคอมเพรสเซอร์ (%)
5. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)
6. ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศที่เครื่องควบแน่น (C)
7. ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศที่เครื่องทำระเหย (C)
8. ผลต่างของอุณหภูมิร้อนยวดยิ่งที่บริเวณทางออกเครื่องทำระเหย (C)
9. ผลต่างของอุณหภูมิเย็นเยือกที่บริเวณทางออกเครื่องควบแน่น (C)
10. อุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นที่เครื่องควบแน่น (C)
11. ความดันสูญเสียภายในเครื่องควบแน่นของสารทำความเย็น (kPa)

12. ความดันสูญเสียภายในเครื่องทำระเหยของสารทำความเย็น (kPa)
13. ราคาอัตราค่าไฟฟ้า (฿/kWh)
14. ค่าใช้จ่ายไฟฟ้าอื่นๆ (฿)
15. จำนวนชม.บ่มใบยาสูบ (hr)

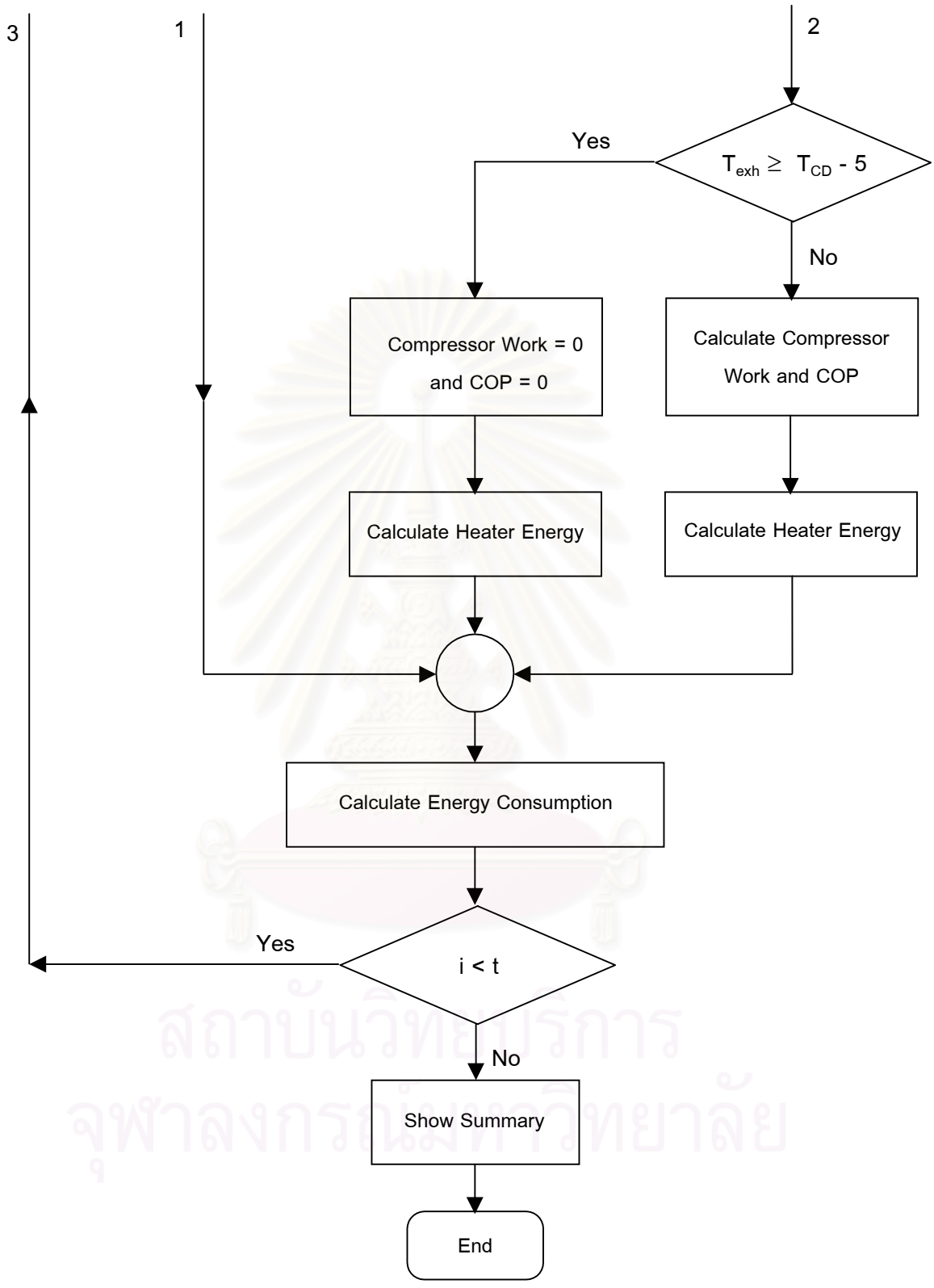
ซึ่งรูปแบบ ลักษณะ และวิธีการใช้โปรแกรมนี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก. แล้ว และขั้นตอนวิธีการทำงานของแบบจำลองฯ นี้สามารถแสดงได้ด้วย Flow Chart ดังในรูปที่ 4.9



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 4.9** รูปแสดง Flow Chart การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน




**รูปที่ 4.9** รูปแสดง Flow Chart การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน(ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 5

# ผลของการศึกษา

ในบทนี้ประกอบไปด้วย ผลที่ได้จากการทดลองจริงและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบฯ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์(ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542) และแสดงผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ปั๊มความร้อน และดำเนินการวิเคราะห์ผล ตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้

## 5.1 ผลการทดลอง และผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์

ในการทดลองการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์ ได้ทำการตรวจวัดข้อมูลที่จำเป็นต่างๆ ตลอดช่วงการบ่ม โดยทำการบันทึกเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง และมีการทดลองทั้งสิ้น 2 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1 ทำการทดลองที่โรงบ่มใบยาสูบของบริษัท สหใบยาสูบไทย จำกัด อำเภอ บ้านโฮ่ง จังหวัด ลำพูน เมื่อวันที่ 6-15 ธันวาคม พ.ศ. 2541

การทดลองที่ 2 ทำการทดลองที่โรงบ่มใบยาสูบของบริษัท เชียงรายวัฒนาพร อำเภอ ขุนตาล จังหวัด เชียงราย เมื่อวันที่ 12-19 มกราคม พ.ศ. 2542

ข้อมูลเบื้องต้นการทดลองบ่มใบยาสูบของบริษัท สหใบยาสูบไทย จำกัด และบริษัท เชียงรายวัฒนาพร จำกัด ประกอบด้วย

**ตารางที่ 5.1 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของการทดลองบ่มใบยาสูบ**

| โรงบ่มใบยาสูบ | ขนาดห้องบ่ม | ชั้นใบยาสูบ | ชั่วโมงบ่ม | นน.ใบยาสด (กก.) | นน.ใบยาแห้ง (กก.) |
|---|---|---|---|---|---|
| สหใบยาสูบไทย | 3.5×3.5×10 | 3 ชั้น | 114 | 6,500 | 654.0 |
| เชียงรายวัฒนาพร | 3.5×3.5×10 | 3 ชั้น | 121 | 5,409 | 760.5 |

ผลการทดลองบ่มใบยาสูบของบริษัท สหใบยาสูบไทย จำกัด และบริษัทเชียงรายวัฒนาพร จำกัด สามารถแสดงได้ในรูปของผลเฉลี่ยรายชั่วโมงตลอดช่วงเวลาการบ่ม ซึ่งข้อมูลที่จำเป็นต่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ปั๊มความร้อน ประกอบด้วย

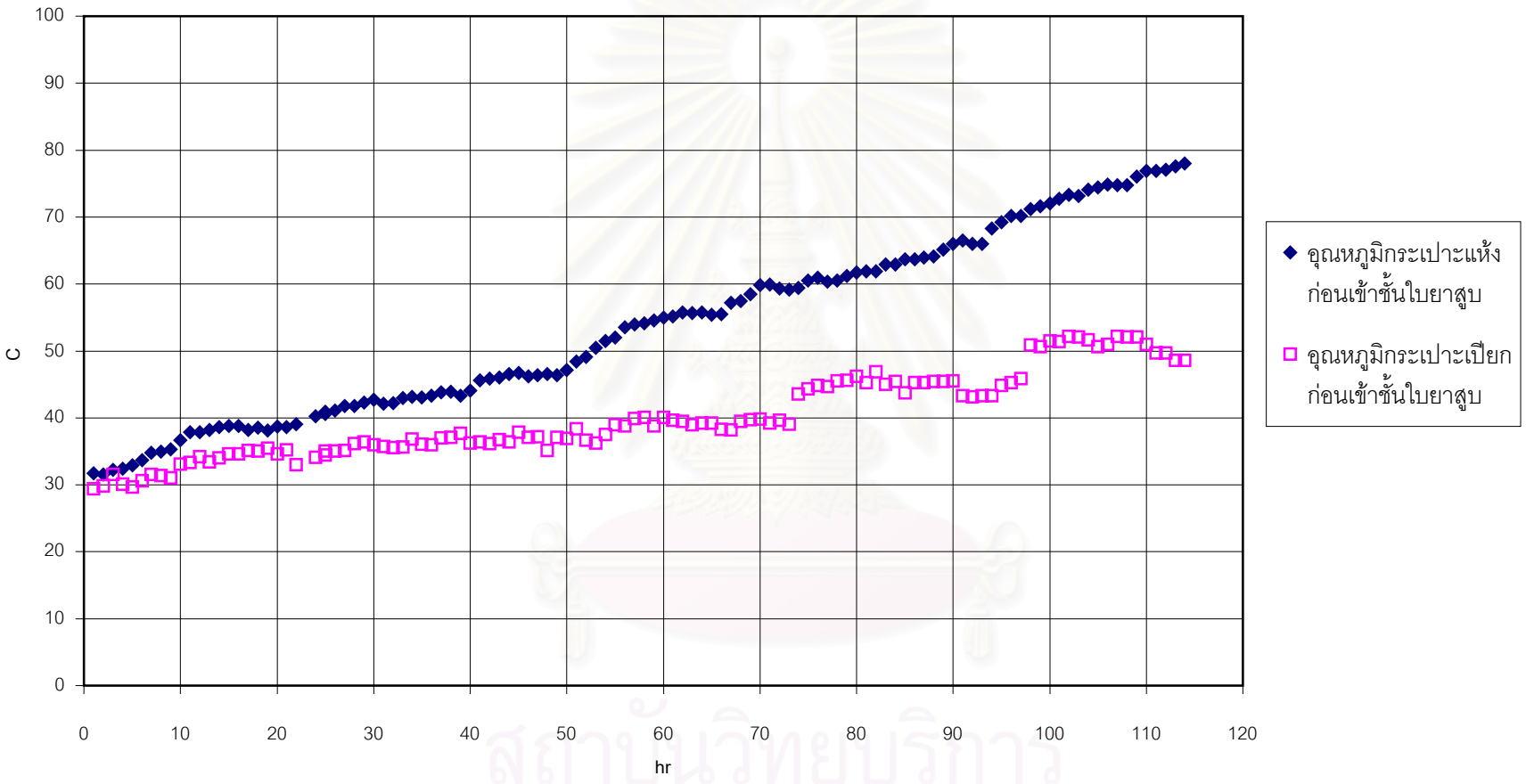
1. ข้อมูลสภาวะอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบ ประกอบด้วยข้อมูล อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, กระเปาะเปียกของอากาศ ณ. ตำแหน่งทางเข้าสู่ชั้นใบยาสูบ และทางออกจากชั้นใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มใบยาสูบดังแสดงในรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2
2. ข้อมูลสภาวะอากาศแวดล้อมห้องบ่มใบยาสูบ ประกอบด้วยข้อมูลอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อมห้องบ่มใบยาสูบ ดังแสดงในรูปที่ 5.3
3. ข้อมูลความเร็วลมของอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องบ่มฯและอากาศที่ระบายออกจากห้องบ่มฯ ดังแสดงในรูปที่ 5.4
4. ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มใบยาสูบ ดังแสดงในรูปที่ 5.5

จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์(ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542) ตลอดช่วงเวลาการบ่มฯ ของบริษัท สหใบยาสูบไทย จำกัด และบริษัท เชียงรายวัฒนาพร จำกัด ทำให้ทราบถึง

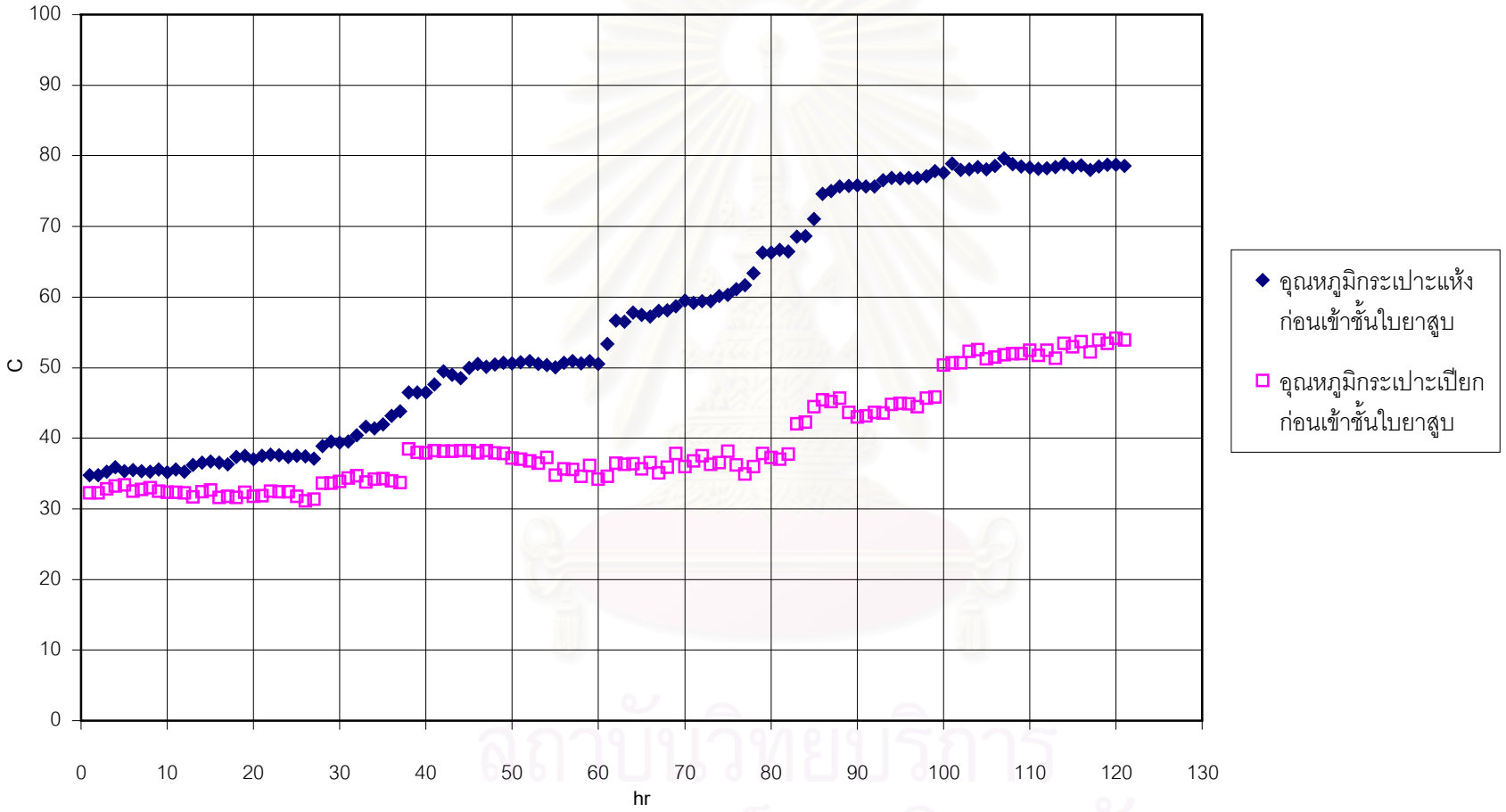
1. ข้อมูลสภาวะอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบ ณ. ตำแหน่งทางออกจากชั้นใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มใบยาสูบ ดังแสดงในรูปที่ 5.6
2. ข้อมูลความต้องการพลังงานความร้อนของการบ่มใบยาสูบในแต่ละชั่วโมงตลอดช่วงเวลาการบ่มฯ ดังแสดงในรูปที่ 5.7

ซึ่งข้อมูลเริ่มต้นที่จำเป็นต้องใช้ และผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์ ได้รวบรวมและแสดงไว้เป็นรายชั่วโมง เพื่อให้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ไว้ในภาคผนวก ข. แล้ว

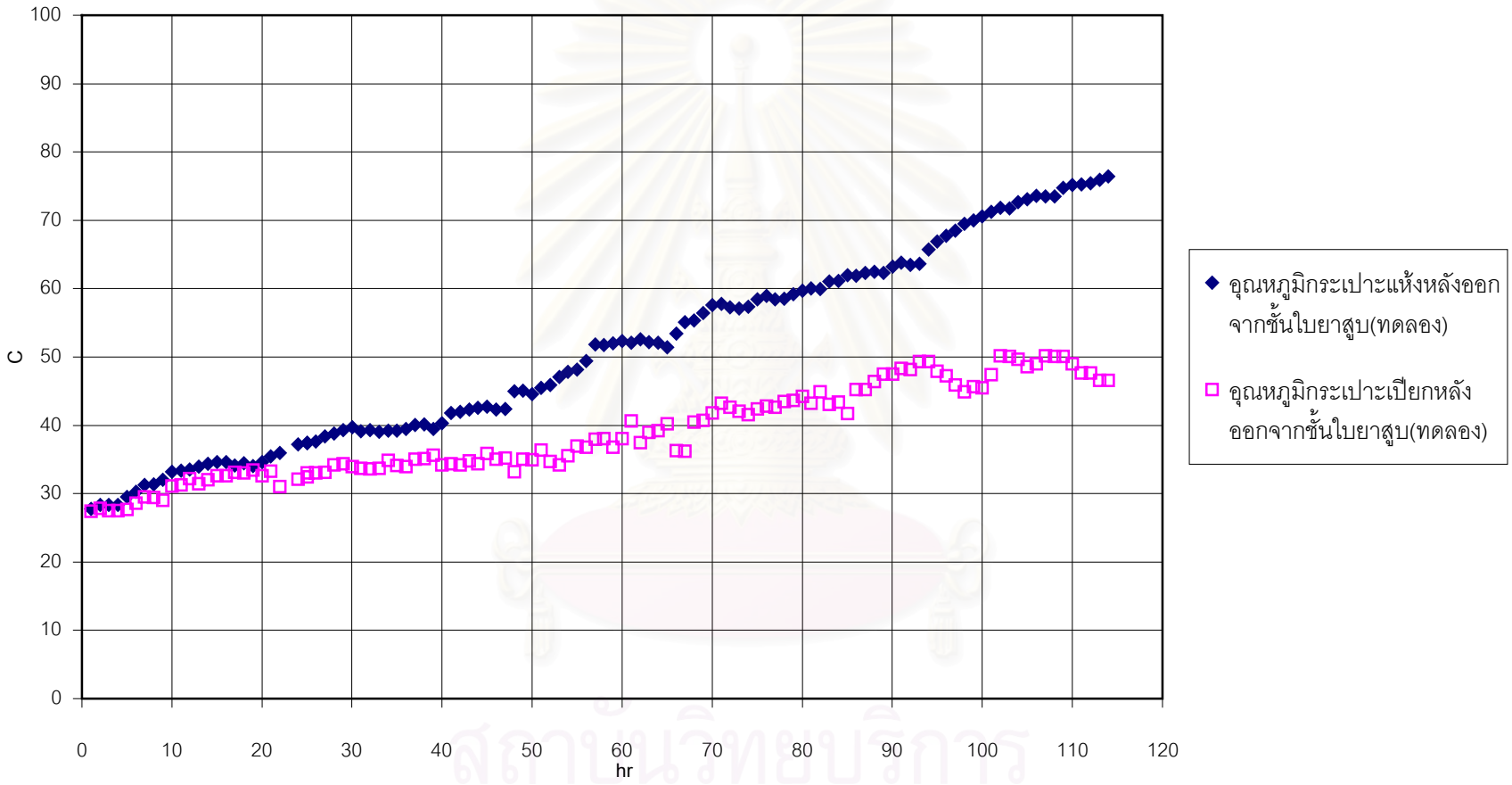
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 5.1(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางเข้าชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.

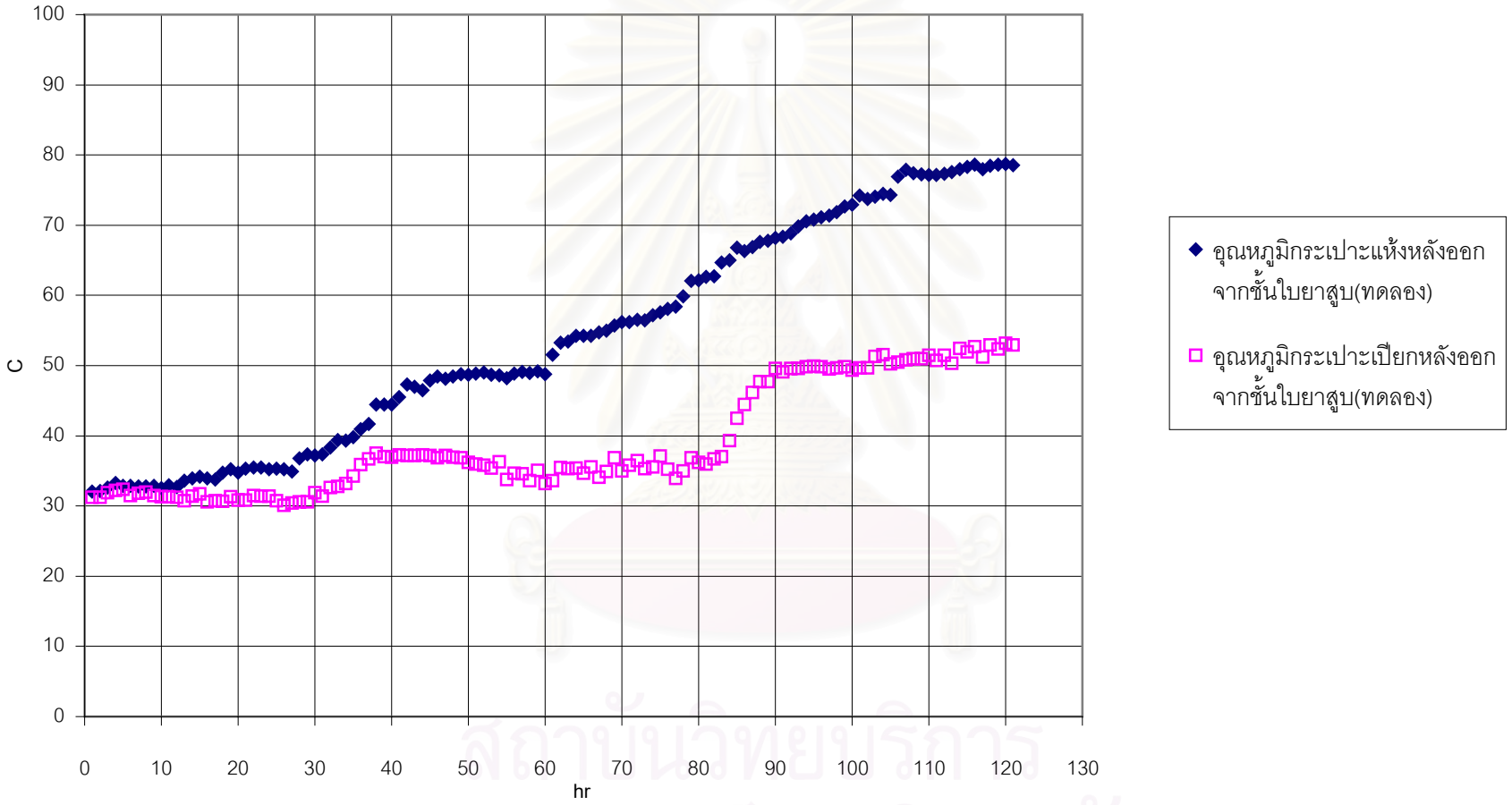



**รูปที่ 5.1(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางเข้าชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



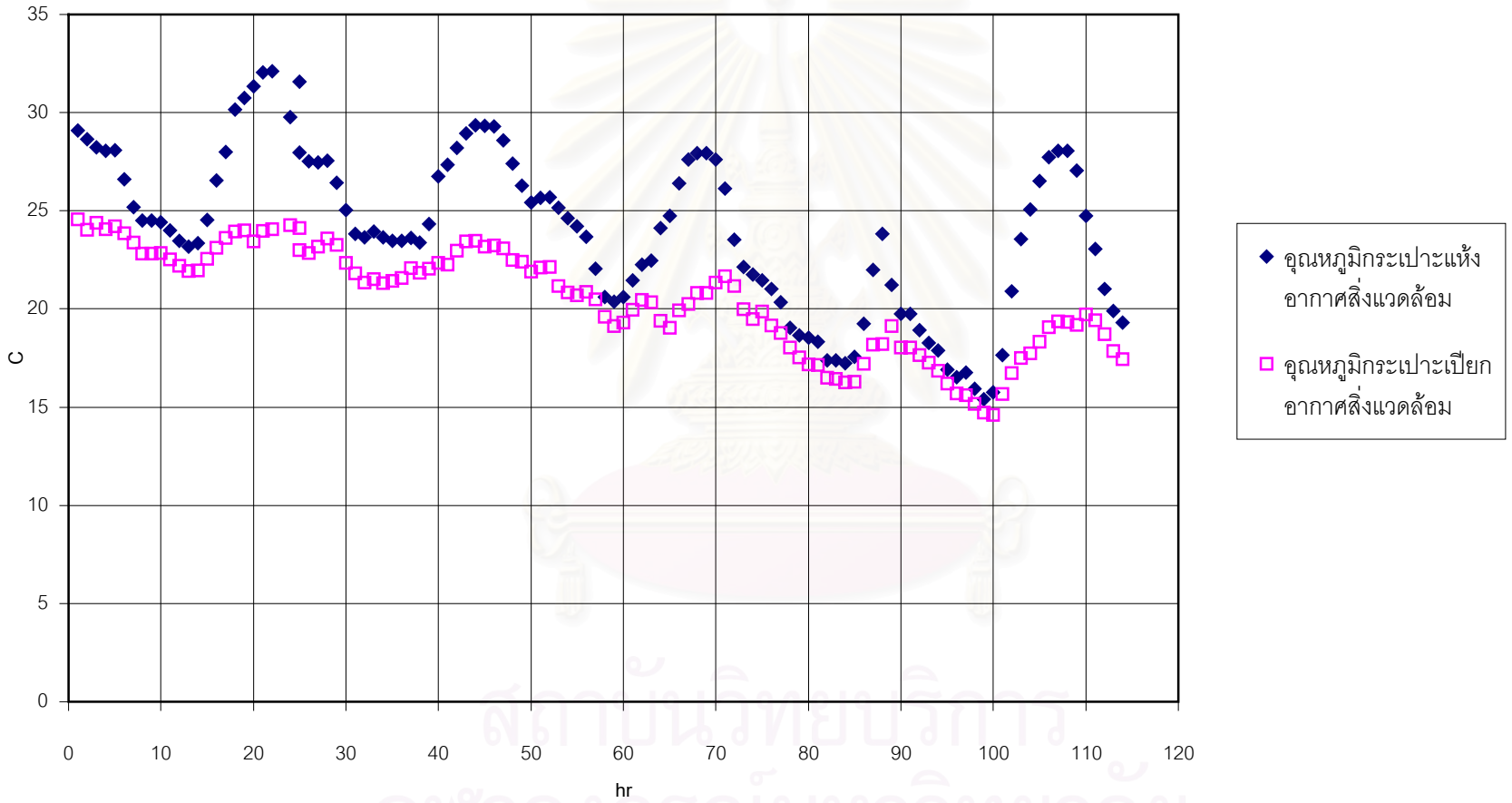

**รูปที่ 5.2(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



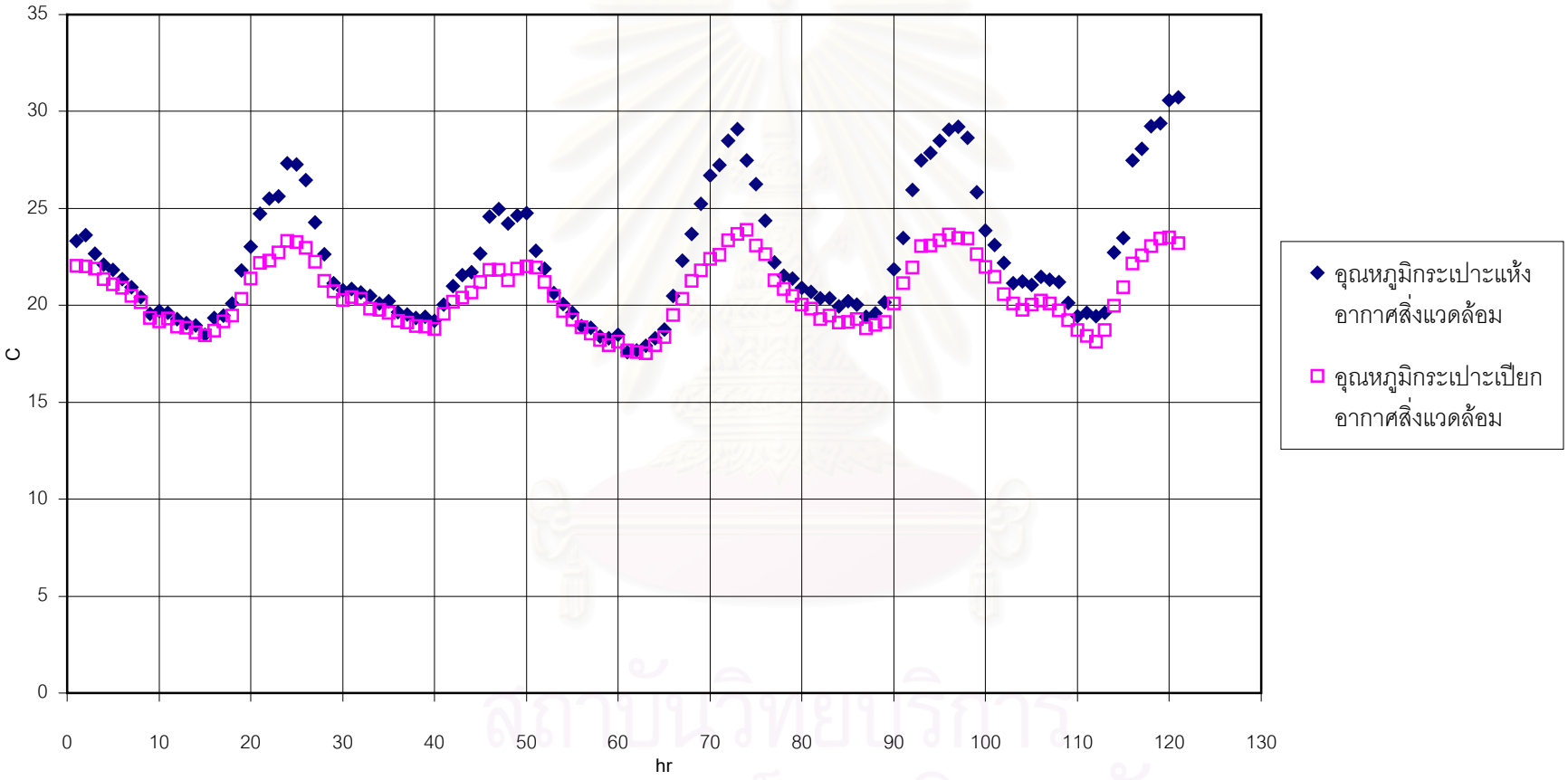

**รูปที่ 5.2(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ.ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

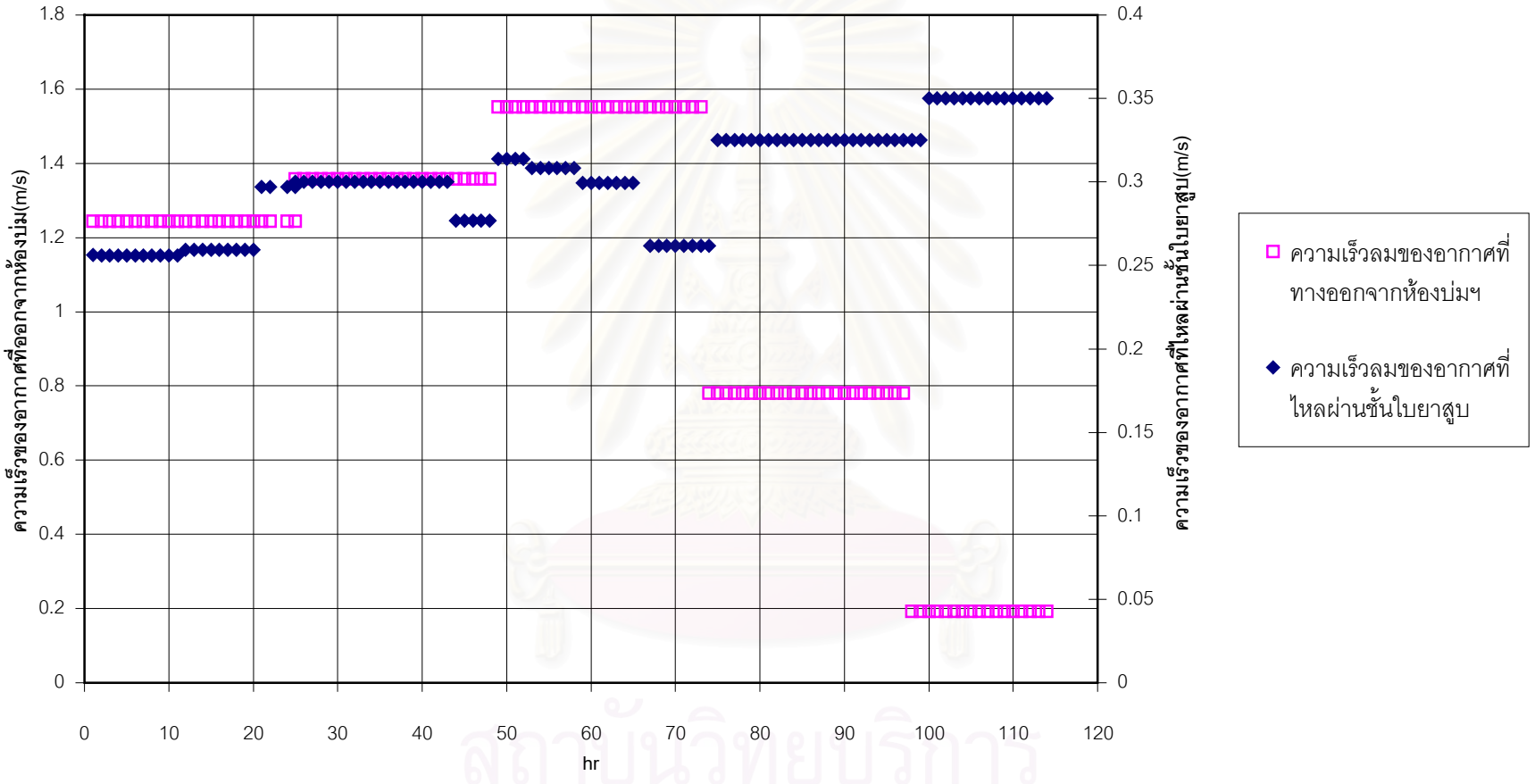



**รูปที่ 5.3(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศสิ่งแวดล้อมรอบห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.

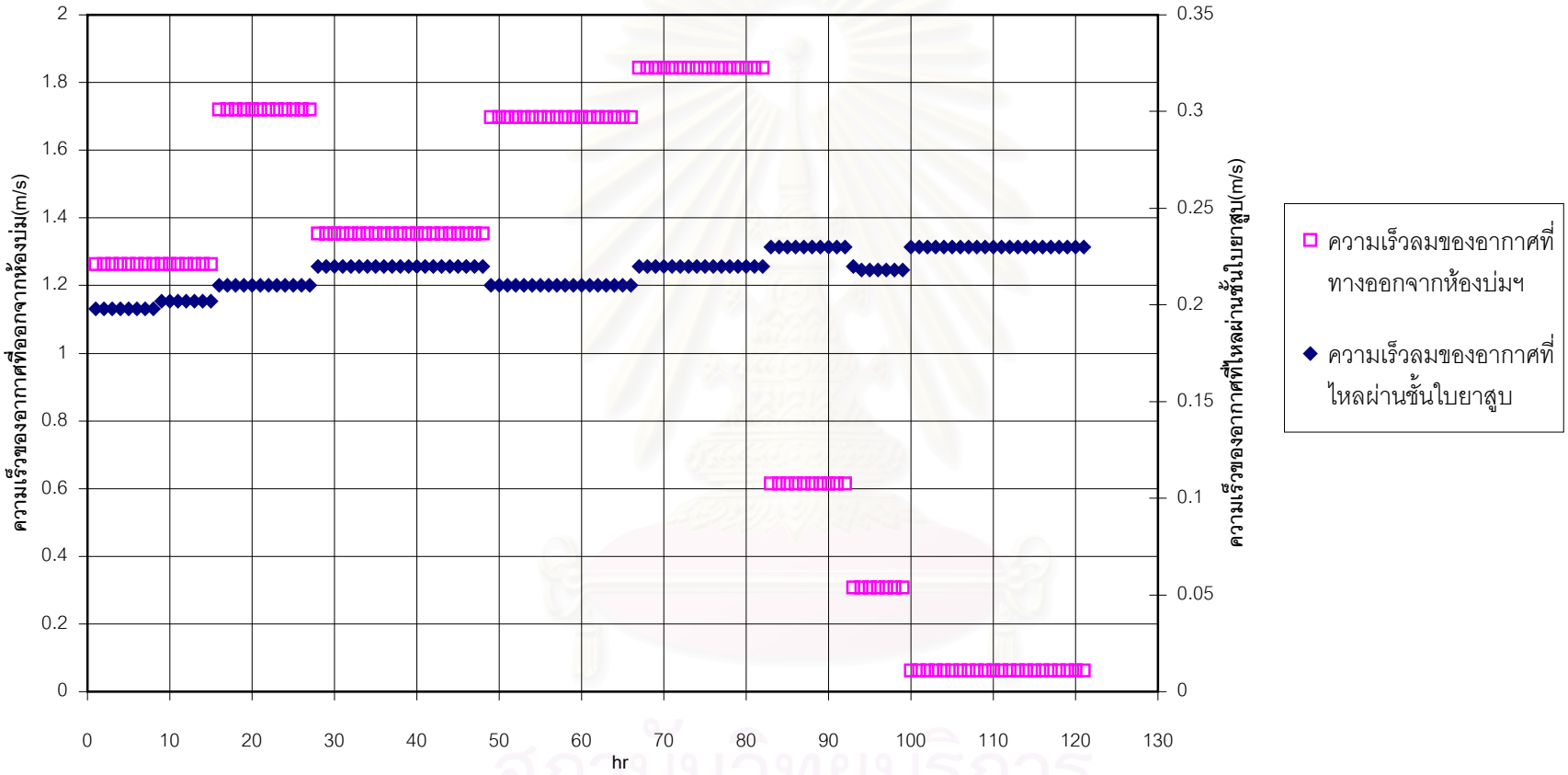
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



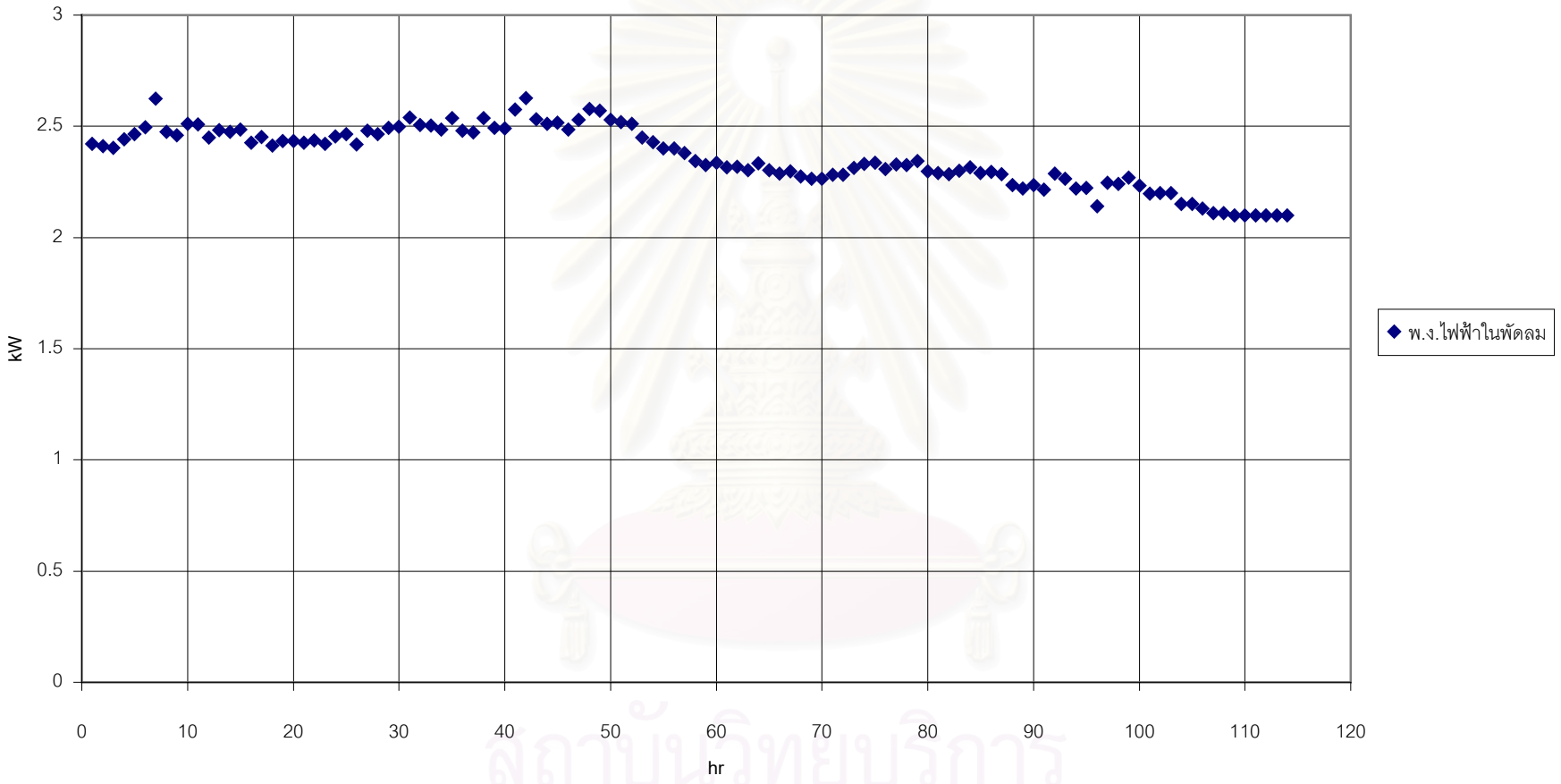

**รูปที่ 5.3(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศสิ่งแวดล้อมรอบห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.




**รูปที่ 5.4(ก)** รูปแสดงความเร็วลมของอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องบ่มฯและอากาศที่ระบายออกจากห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.

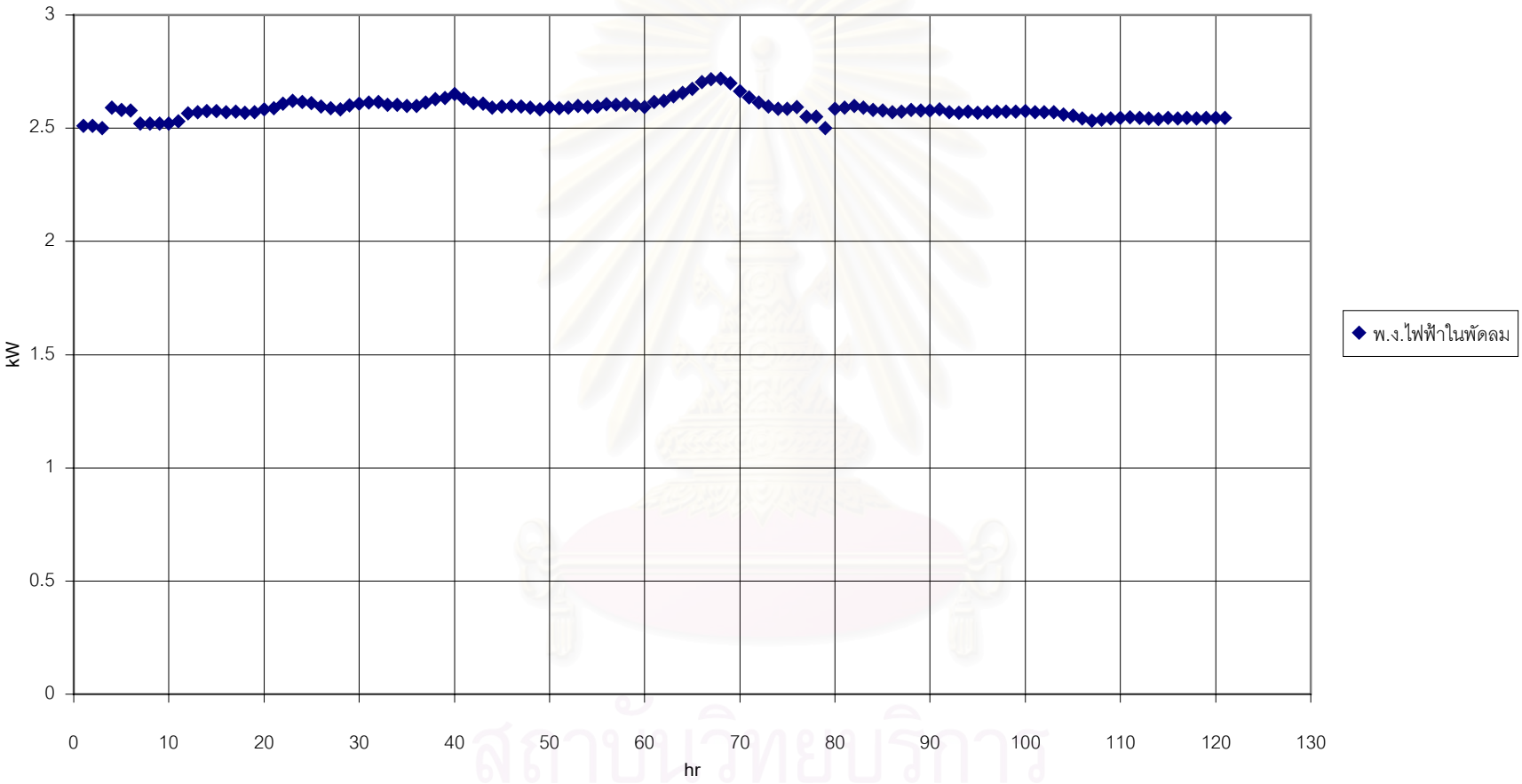



**รูปที่ 5.4 (ข)** รูปแสดงความเร็วลมของอากาศที่หมุนเวียนภายในห้องบ่มฯและอากาศที่ระบายออกจากห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.

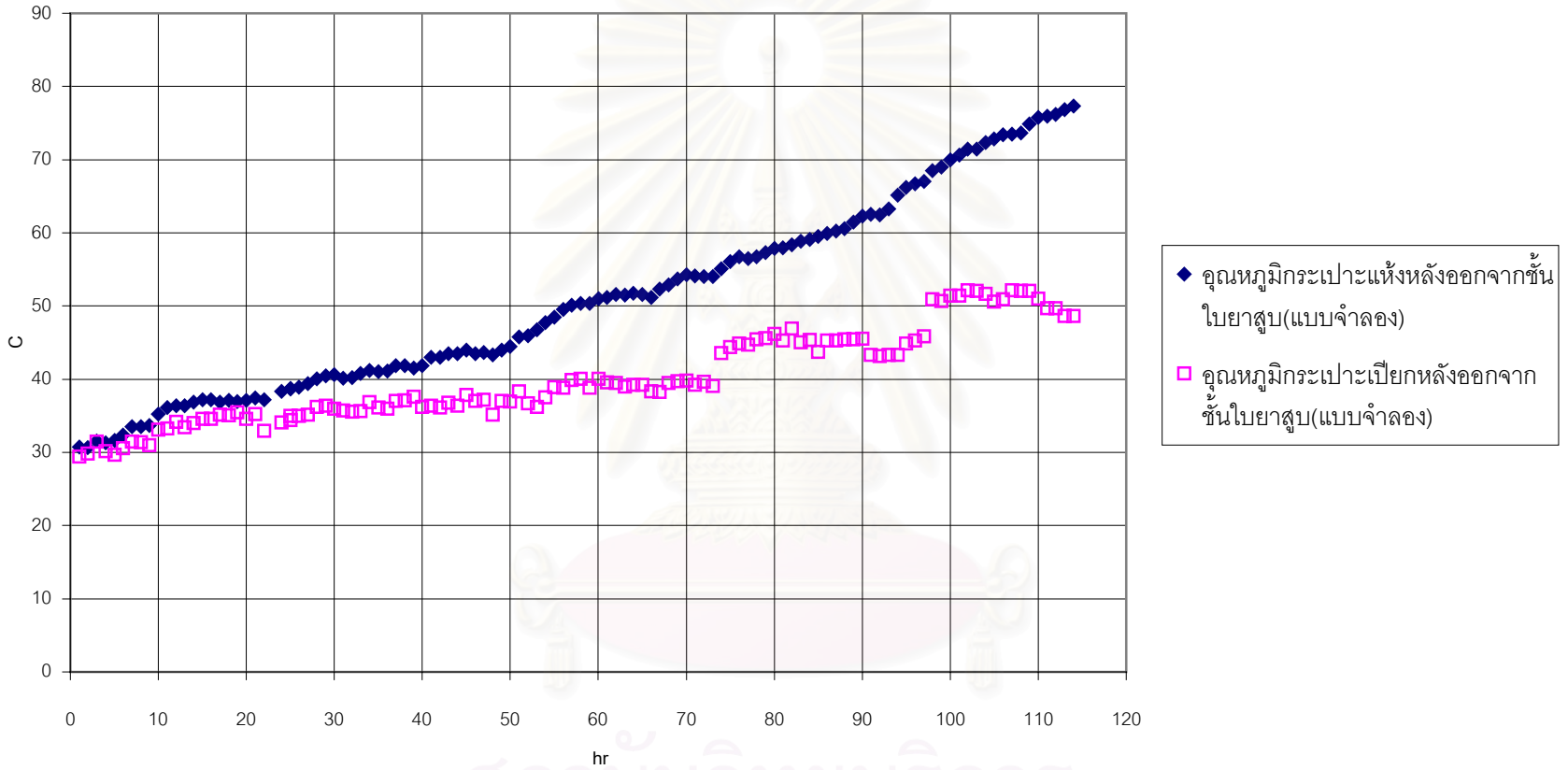



**รูปที่ 5.5(ก)** รูปแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.

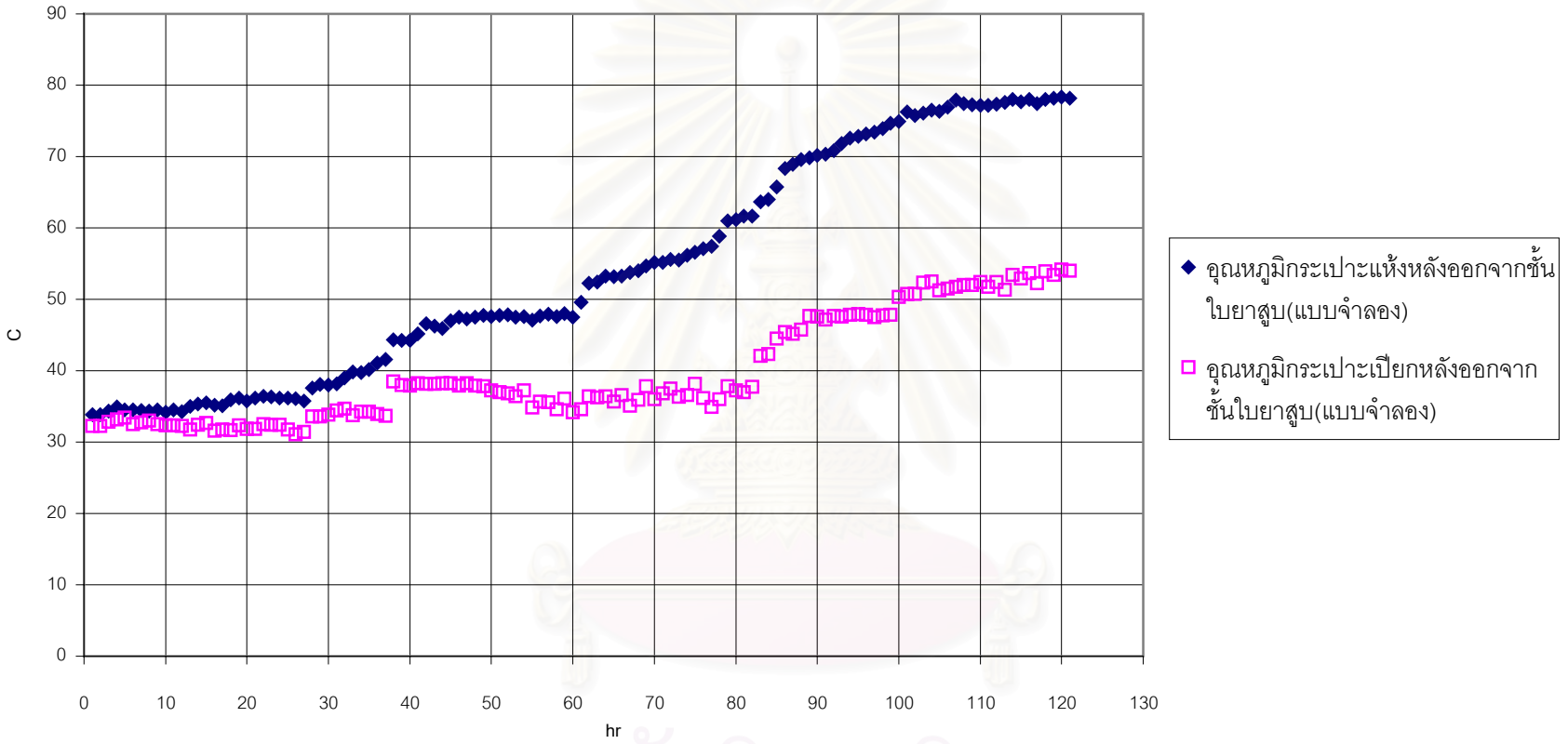
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



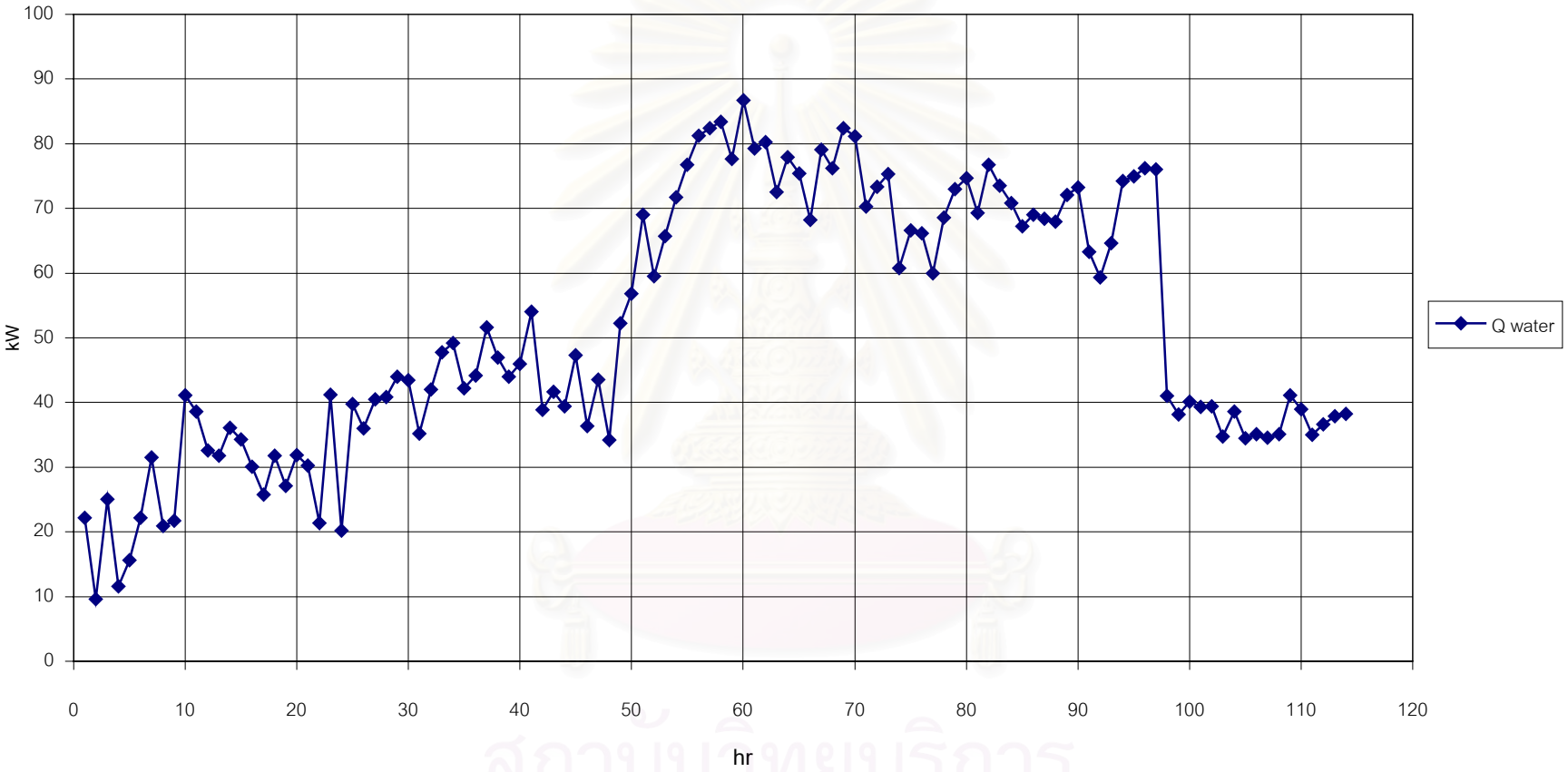

**รูปที่ 5.5 (ข)** รูปแสดงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับมอเตอร์พัดลมหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.




**รูปที่ 5.6(ก)** รูปแสดงผลการจำลองแบบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ. ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)

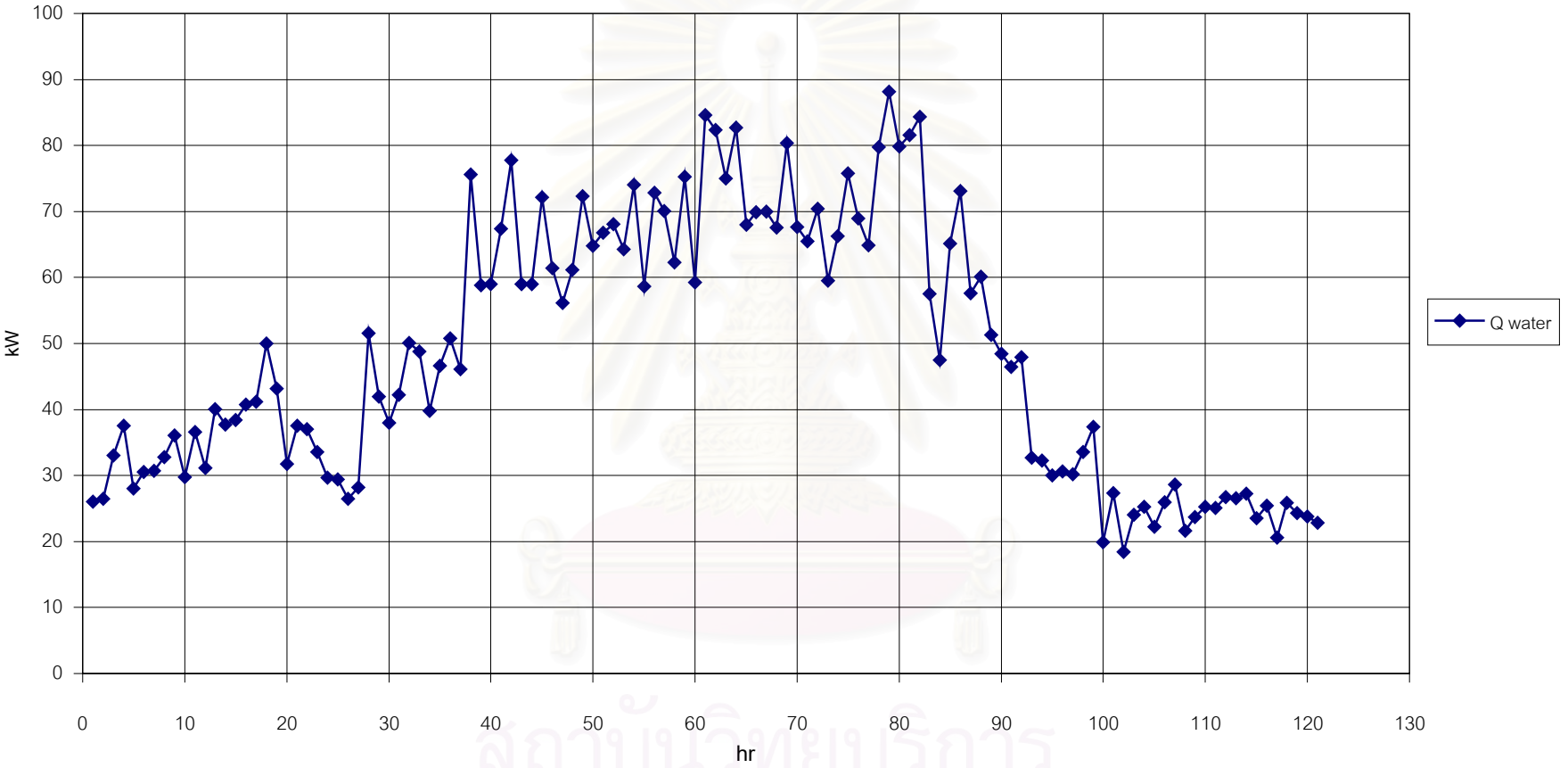



**รูปที่ 5.6(ข)** รูปแสดงผลการจำลองแบบอุณหภูมิกระเปาะแห้ง และกระเปาะเปียกของอากาศ ณ. ตำแหน่งทางออกชั้นใบยาสูบ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)




**รูปที่ 5.7(ก)** รูปแสดงผลการจำลองแบบพลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มฯ ของ บ. สหใบยาสูบ จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย




**รูปที่ 5.7(ข)** รูปแสดงผลการจำลองแบบพลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ ตลอดช่วงการบ่มฯ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 ผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อน

ผลการคำนวณหาค่าพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อนนี้ จะถูกนำเสนอในรูปแบบรายชั่วโมงเพื่อให้สอดคล้องกับผลการทดลอง และผลการจำลองแบบการบ่มใบยาสูบด้วยระบบความร้อนรวมศูนย์ ซึ่งผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อน ประกอบไปด้วย

1. สภาวะอากาศหลังผ่านเครื่องควบแน่น

การคำนวณสามารถทำได้โดยใช้หลักการสมดุลมวล และสมดุลความร้อน และมีข้อมูล สภาวะอากาศก่อนเข้าชั้นใบยาสูบ, สภาวะอากาศแวดล้อมห้องบ่มใบยาสูบ และพลังงานไฟฟ้าที่พัดลมหมุนเวียน เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ

2. สภาวะอากาศผสมก่อนเข้าเครื่องทำระเหย

การคำนวณสามารถทำได้โดยใช้หลักการสมดุลมวล และสมดุลความร้อน และมีข้อมูลสภาวะอากาศหลังออกจากชั้นใบยาสูบ, สภาวะอากาศแวดล้อมห้องบ่มใบยาสูบ เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการคำนวณ โดยกำหนดให้ความเร็วลมผ่านเครื่องทำระเหยมีค่าเท่ากับ 2.5 m/s (Hans and Fritz, 1981)

3. คุณสมบัติทางกายภาพ และทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบปั๊มความร้อน

การคำนวณสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็น R-22 (HCFC-22) ที่พัฒนาขึ้นโดย Kartsounes และ Erth(1971) โดยมีข้อมูล สภาวะอากาศหลังผ่านเครื่องควบแน่น, สภาวะอากาศแวดล้อมห้องบ่มใบยาสูบ หรือสภาวะอากาศผสมก่อนเข้าเครื่องทำระเหย เป็นข้อมูลเริ่มต้น

4. การใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบ และค่าสัมประสิทธิ์แสดงสมรรถนะของระบบปั๊มความร้อน

การคำนวณสามารถทำได้โดยใช้สมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบปั๊มความร้อน โดยมีข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเทอร์โมไดนามิกส์ของสารทำความเย็นที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบปั๊มความร้อน เป็นข้อมูลเริ่มต้น

ในการวิจัยนี้ โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบโดยใช้ปั๊มความร้อน ได้ถูกกำหนดให้ปั๊มความร้อนทำงานเป็น 4 รูปแบบหลัก คือ

(1) ปั๊มความร้อนทำงานแบบอุดมคติโดยไม่มีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(Ideal mode without maximum condenser temperature control)

(2) ปั๊มความร้อนทำงานจริงโดยไม่มีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(Actual mode without maximum condenser temperature control)

(3) ปั๊มความร้อนทำงานแบบอุดมคติโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(Ideal mode with maximum condenser temperature control)

(4) ปั๊มความร้อนทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(Actual mode with maximum condenser temperature control)

ซึ่งในแต่ละรูปแบบการทำงานหลักของระบบปั๊มความร้อน ก็สามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 รูปแบบย่อย คือ

(1) ไม่มีการเก็บคืนความร้อนมาใช้ที่เครื่องทำระเหย (ใช้อากาศแวดล้อมเป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย)

(2) มีการเก็บคืนความร้อนมาใช้ที่เครื่องทำระเหย (ใช้อากาศผสมระหว่างอากาศระบายออกจากห้องบ่มใบยาสูบและอากาศแวดล้อม เป็นสารตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนที่เครื่องทำระเหย)

ผลจากการคำนวณการใช้พลังงาน และสภาวะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบปั๊มความร้อนถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5.8 – 5.11 และภาคผนวก ค. ซึ่งสามารถสรุปการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

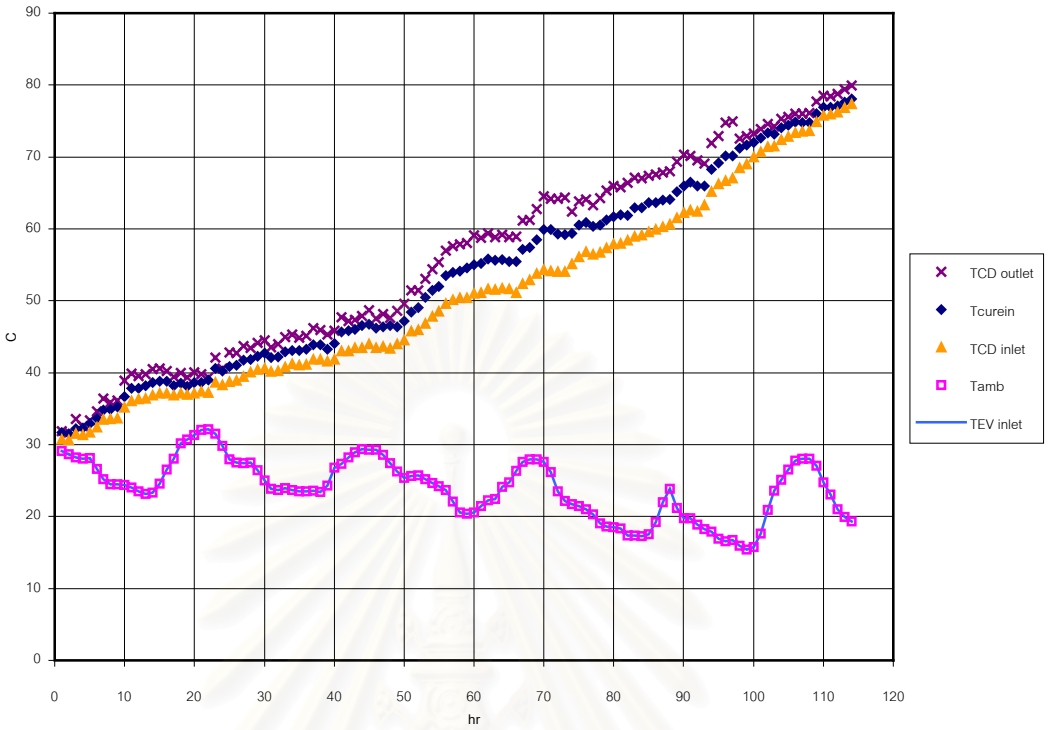
**ตารางที่ 5.2(ก) แสดงสรุปผลการจำลองแบบการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน เมื่อทำงานในรูปแบบต่าง ๆ ของ บ. สหใบยาสูบไทย จก.**

| รายการ | บ.สหใบยาสูบ ไทย จก. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ideal mode | | | | Actual Mode | | | |
| Heat Recovery | - | √ | - | √ | - | √ | - | √ |
| Efficiency | - | - | - | - | √ | √ | √ | √ |
| Max. CD Temp. Control | - | - | 78 °C | 78 °C | - | - | 78 °C | 78 °C |
| Tobacco (kg) | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 | 6500 |
| Dry Tobacco (kg) | 654 | 654 | 654 | 654 | 654 | 654 | 654 | 654 |
| EE. Rate (฿/kWh) | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 | 2.69 |
| $Q_{CD}$ (kW) | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 | 5832.08 |
| Comp. Work (kW) | 1285.93 | 994.04 | 944.65 | 696.45 | 2242.46 | 1770.46 | 1666.95 | 1260.26 |
| EE. Heater (kW) | 0.00 | 0.00 | 1107.35 | 1107.35 | 0.00 | 0.00 | 1107.35 | 1107.35 |
| EE Usage (kWh/kg Tob.) | 2.47 | 2.02 | 3.64 | 3.26 | 3.93 | 3.21 | 4.74 | 4.12 |
| Sim. Cost (฿/kg Tob.) | 6.63 | 5.43 | 9.78 | 8.76 | 10.57 | 8.63 | 12.75 | 11.08 |
| Actual Cost (฿/kg Tob.) | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.82 | 3.82 |

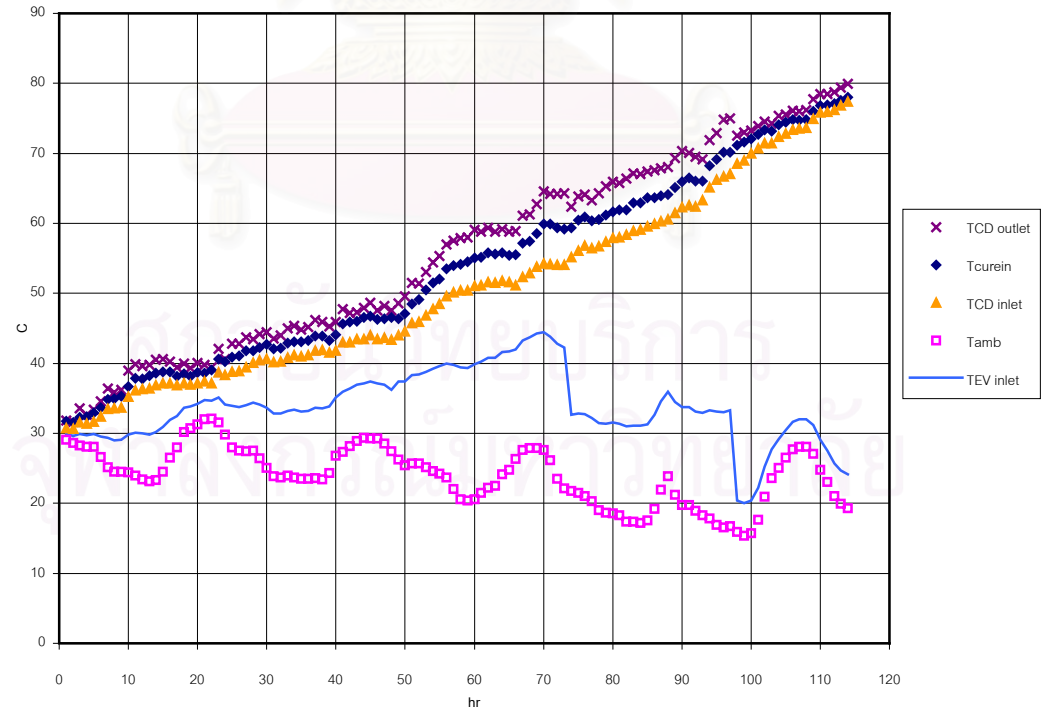
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ 5.2(ข)** แสดงสรุปผลการจำลองแบบการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยปั๊มความร้อน เมื่อทำงานในรูปแบบต่าง ๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.

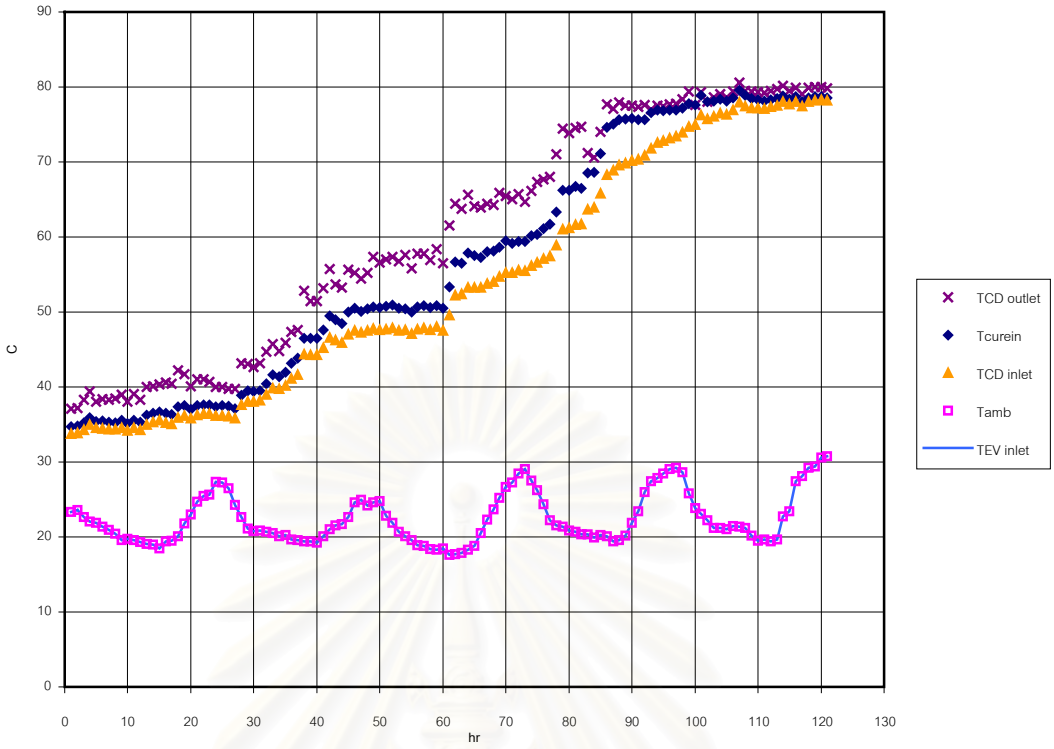
| รายการ | บ.เชียงรายวัฒนาพร จก. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ideal mode | | | | Actual Mode | | | |
| Heat Recovery | - | √ | - | √ | - | √ | - | √ |
| Efficiency | - | - | - | - | √ | √ | √ | √ |
| Max. CD Temp. Control | - | - | 78 °C | 78 °C | - | - | 78 °C | 78 °C |
| Tobacco (kg) | 5409 | 5409 | 5409 | 5409 | 5409 | 5409 | 5409 | 5409 |
| Dry Tobacco (kg) | 760.5 | 760.5 | 760.5 | 760.5 | 760.5 | 760.5 | 760.5 | 760.5 |
| EE. Rate (฿/kWh) | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 |
| $Q_{CD}$ (kW) | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 | 5844.72 |
| Comp. Work (kW) | 1383.91 | 1012.84 | 827.83 | 556.37 | 2399.00 | 1799.82 | 1463.27 | 1016.20 |
| EE. Heater (kW) | 0.00 | 0.00 | 1729.85 | 1729.85 | 0.00 | 0.00 | 1729.85 | 1729.85 |
| EE Usage (kWh/kg Tob.) | 2.22 | 1.73 | 3.76 | 3.41 | 3.55 | 2.77 | 4.60 | 4.01 |
| Sim. Cost (฿/kg Tob.) | 5.17 | 4.04 | 8.77 | 7.94 | 8.28 | 6.45 | 10.72 | 9.35 |
| Actual Cost (฿/kg Tob.) | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.67 | 2.67 |



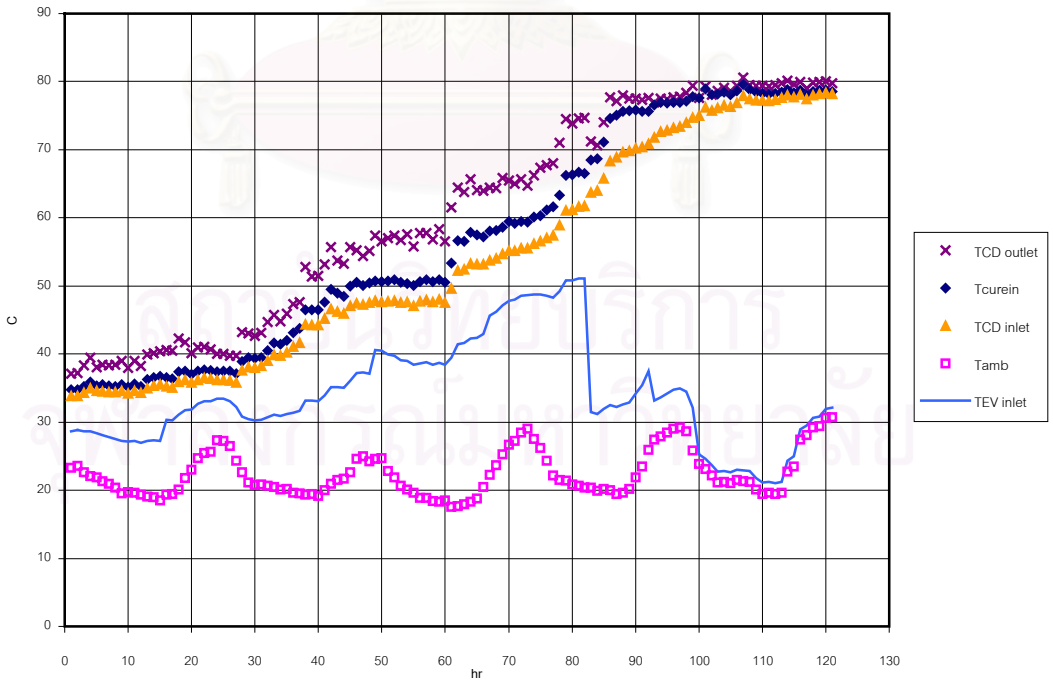

**รูปที่ 5.8.1(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



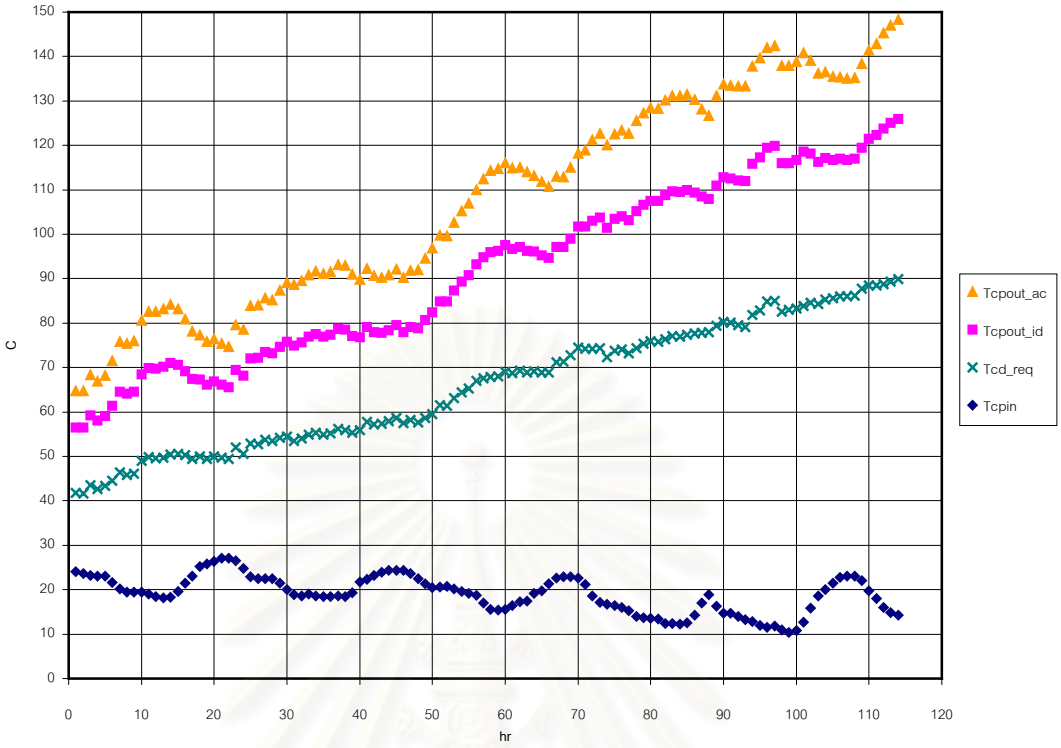

**รูปที่ 5.8.2(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



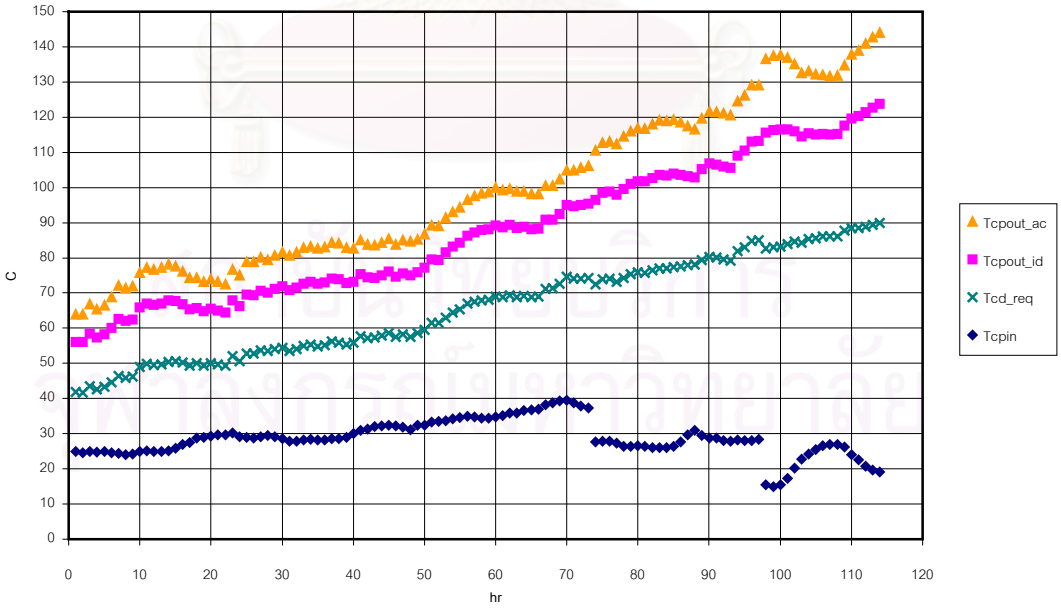

**รูปที่ 5.8.1(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



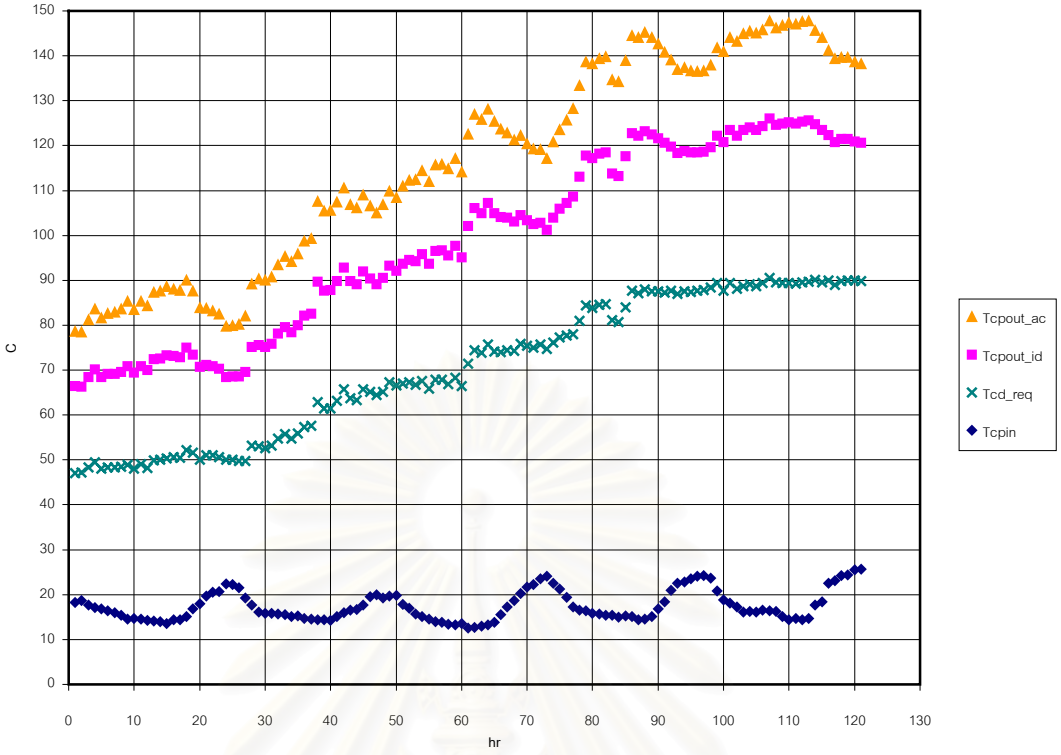

**รูปที่ 5.8.2(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิของอากาศ ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



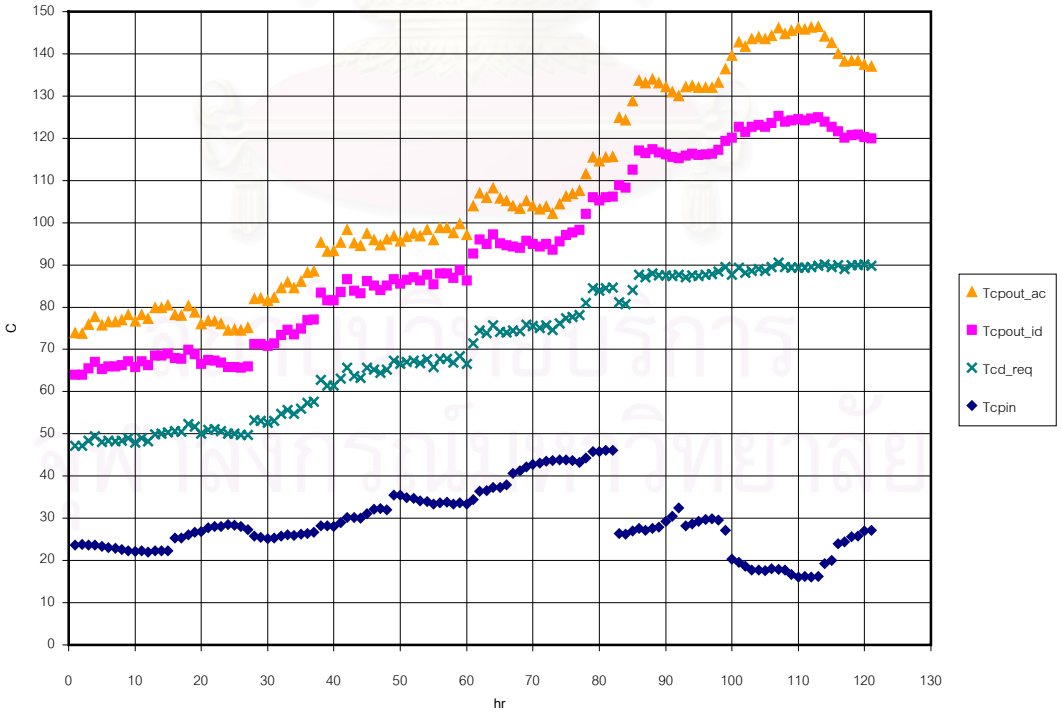

**รูปที่ 5.9.1(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



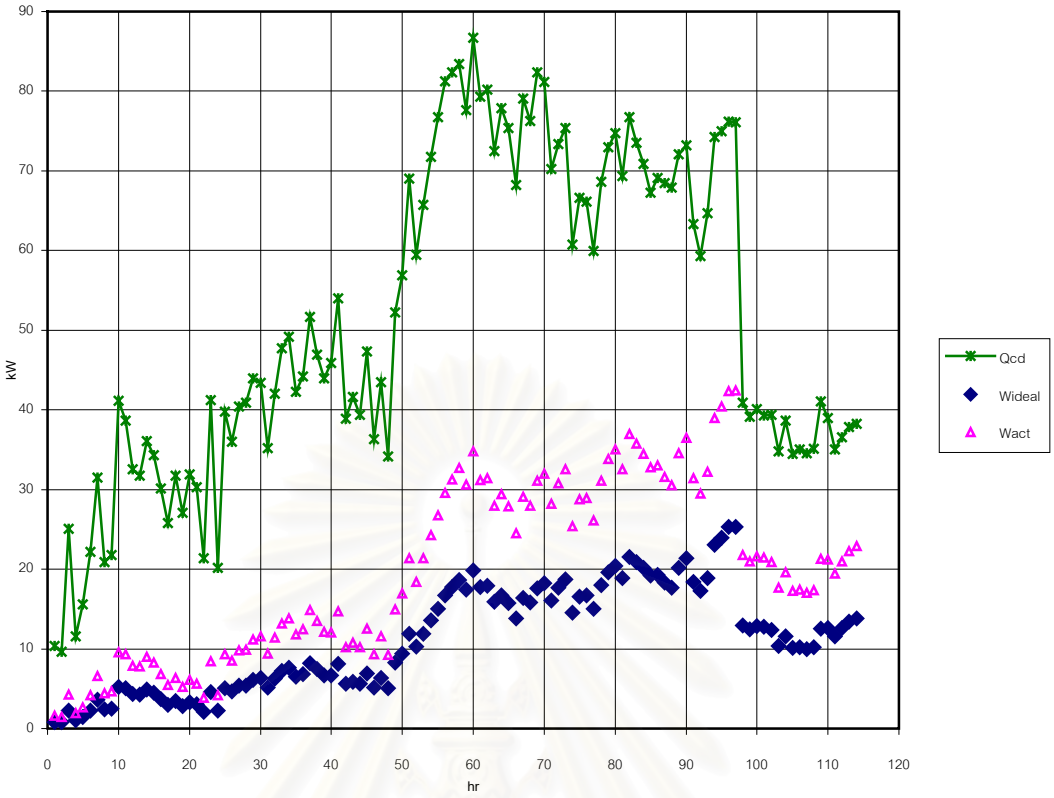

**รูปที่ 5.9.2(ก)** รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



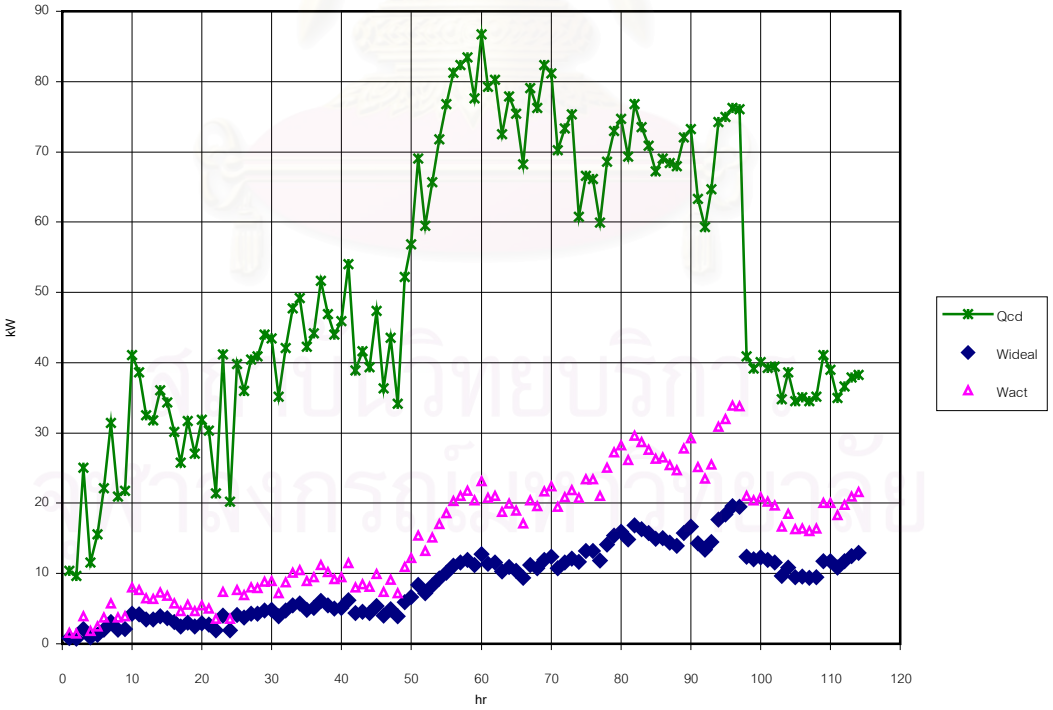

**รูปที่ 5.9.1(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



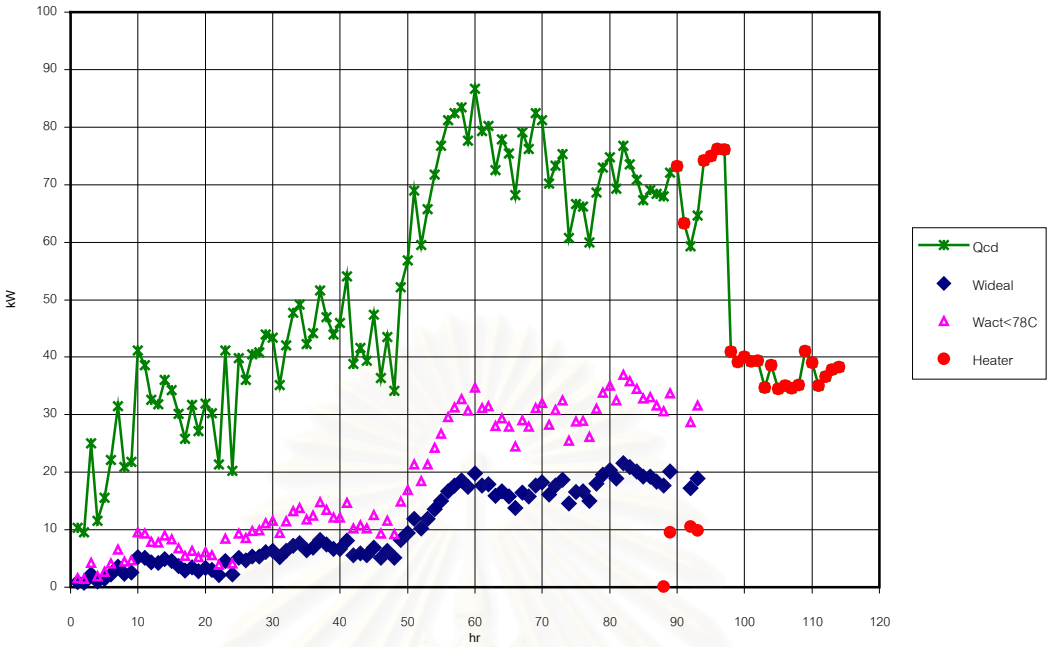

**รูปที่ 5.9.2(ข)** รูปแสดงอุณหภูมิของสารทำความเย็น ณ.ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



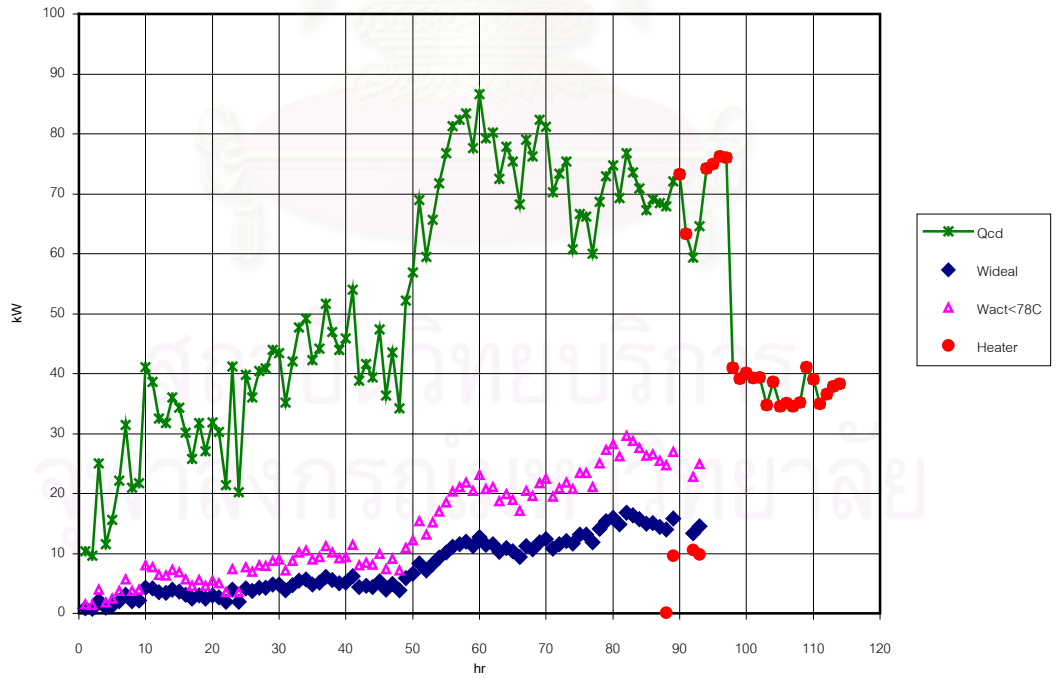

**รูปที่ 5.10.1(ก)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



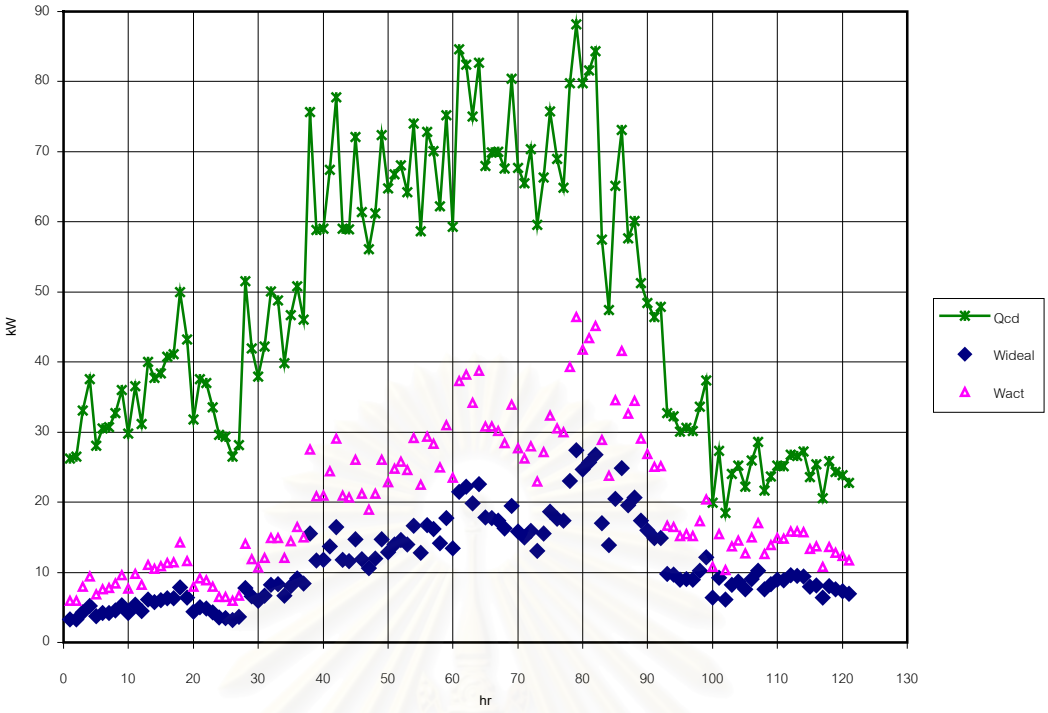

**รูปที่ 5.10.2(ก)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



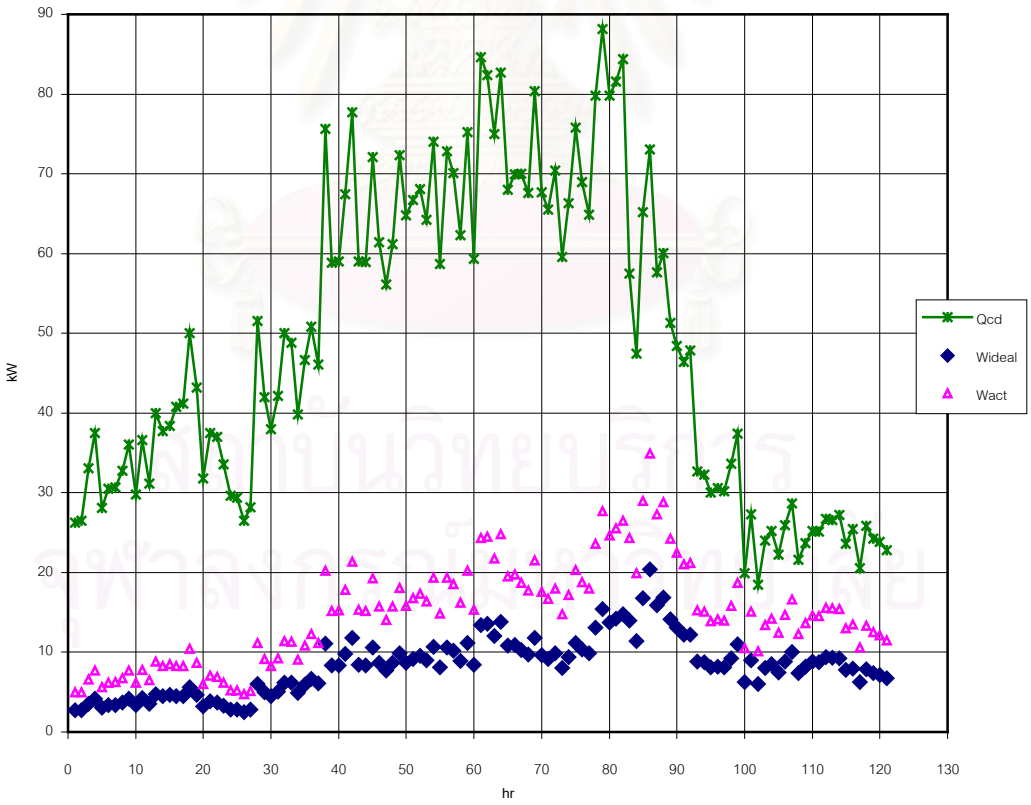

**รูปที่ 5.10.3(ก)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



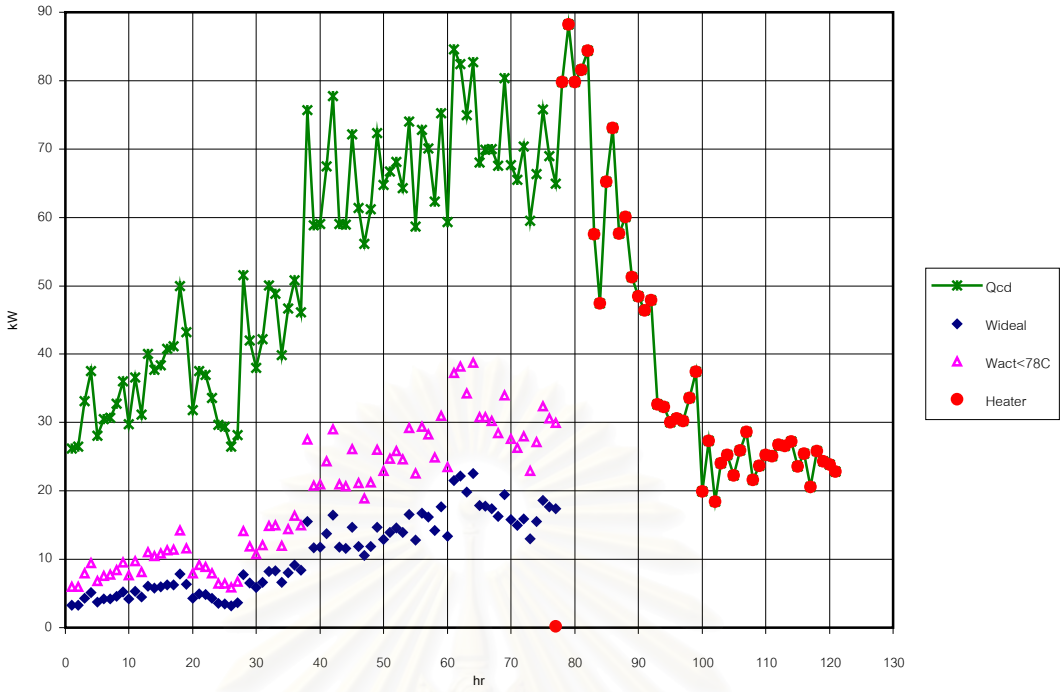

**รูปที่ 5.10.4 (ก)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



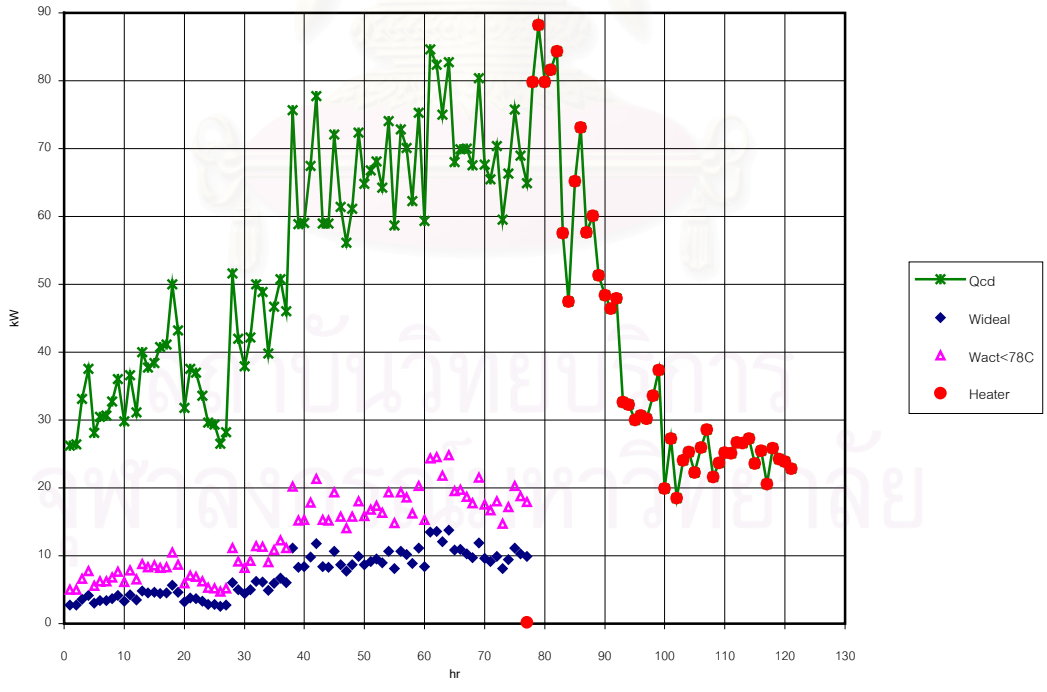

**รูปที่ 5.10.1(ข)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



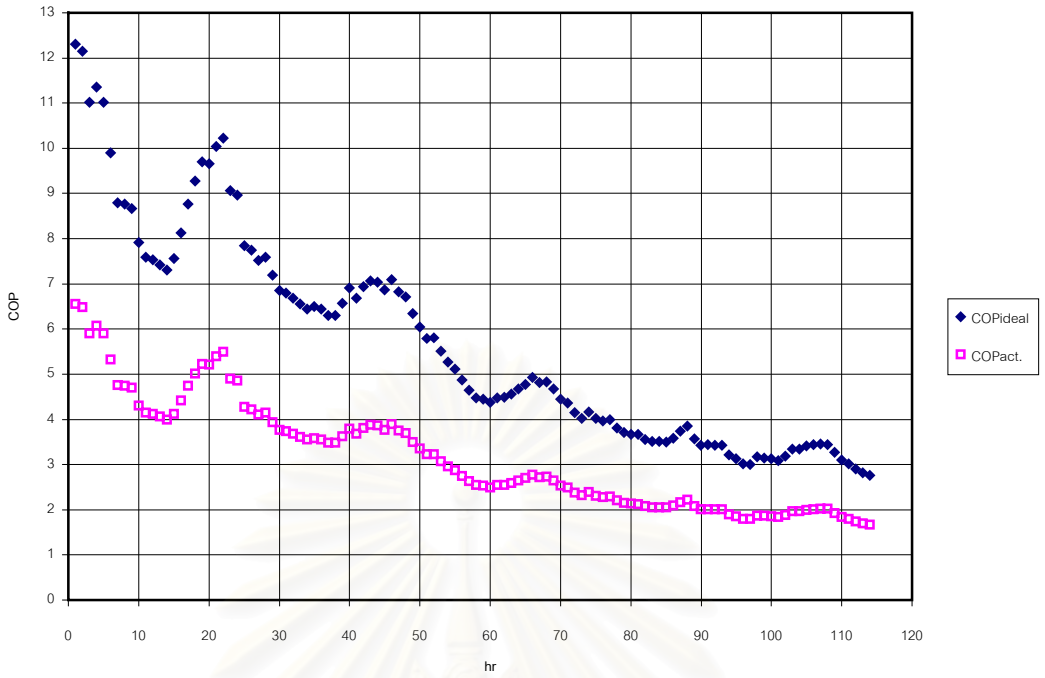

**รูปที่ 5.10.2(ข)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



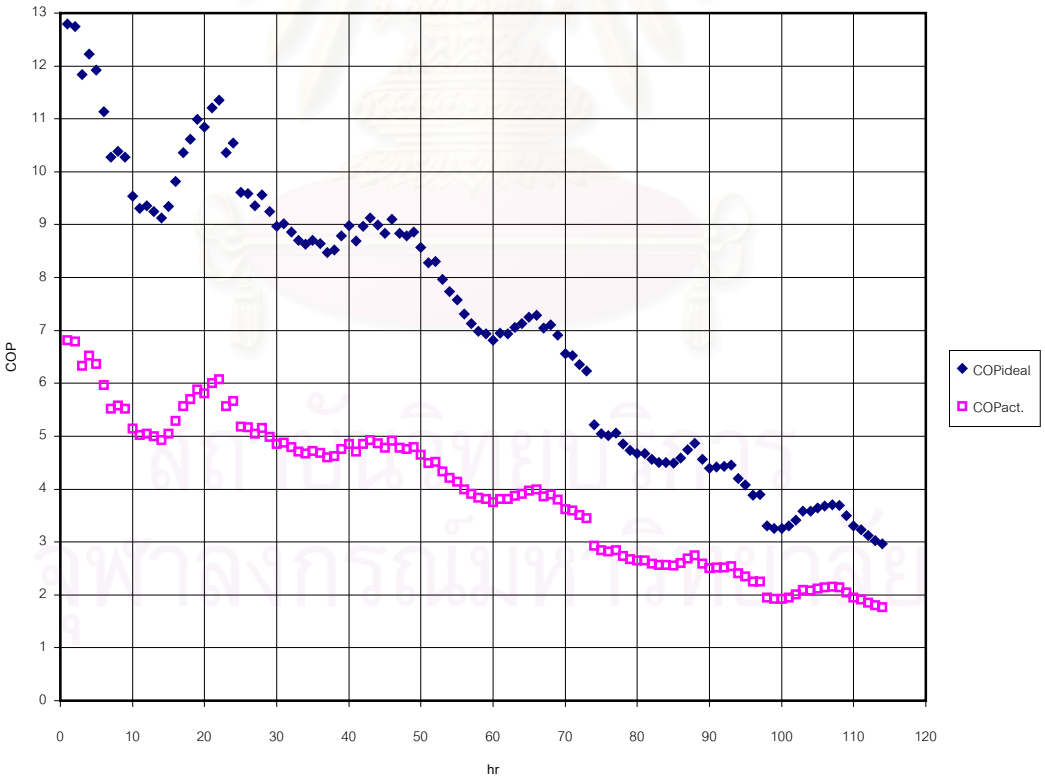

**รูปที่ 5.10.3(ข)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



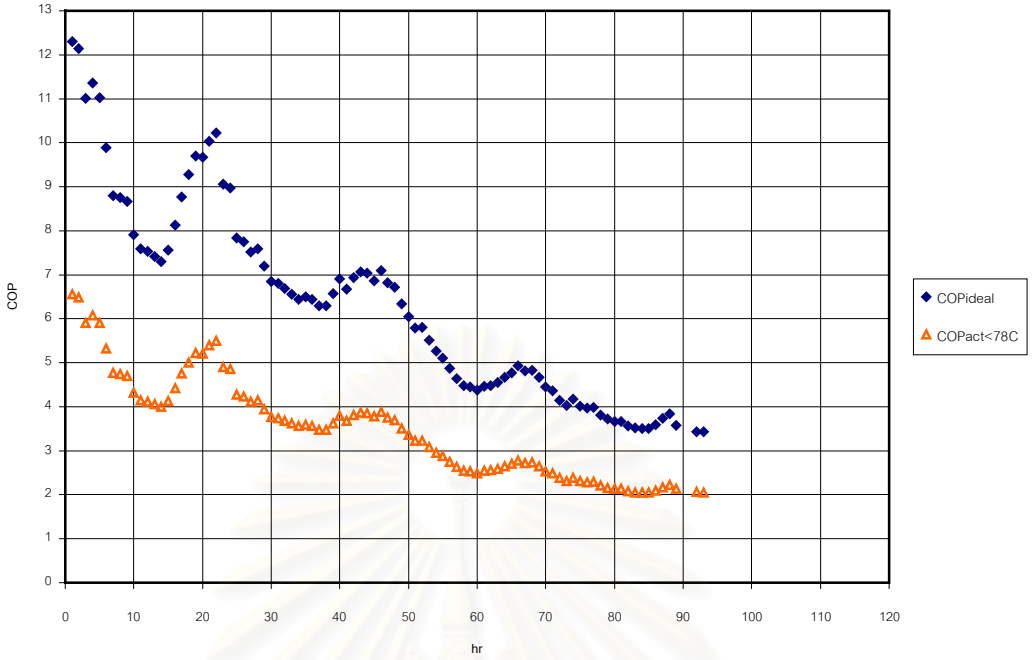

**รูปที่ 5.10.4(ข)** รูปแสดงการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.



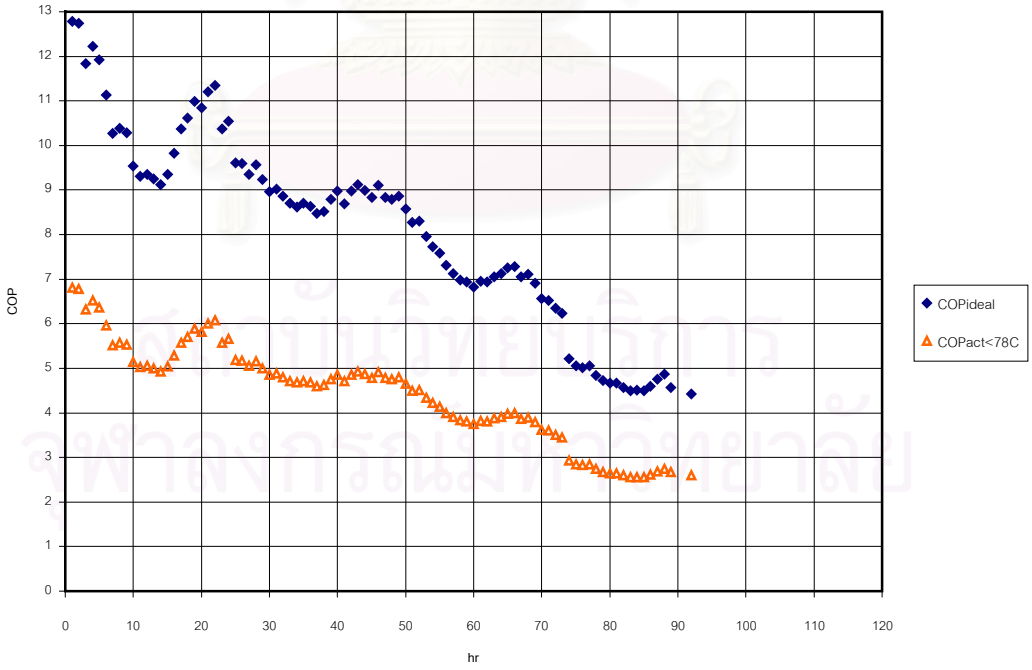

**รูปที่ 5.11.1(ก)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



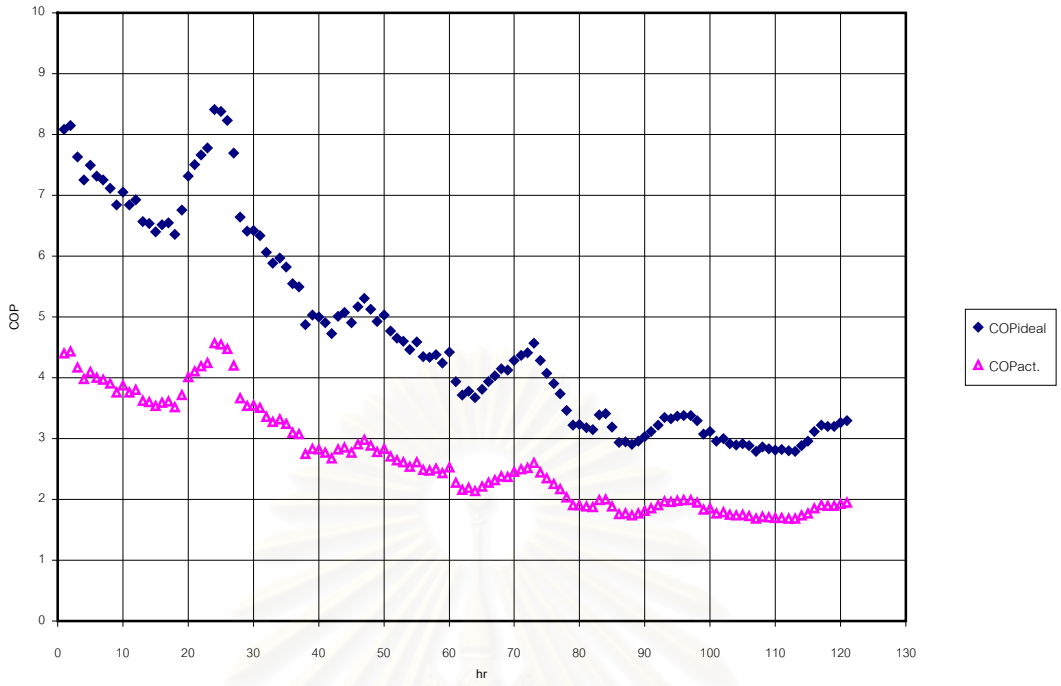

**รูปที่ 5.11.2(ก)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



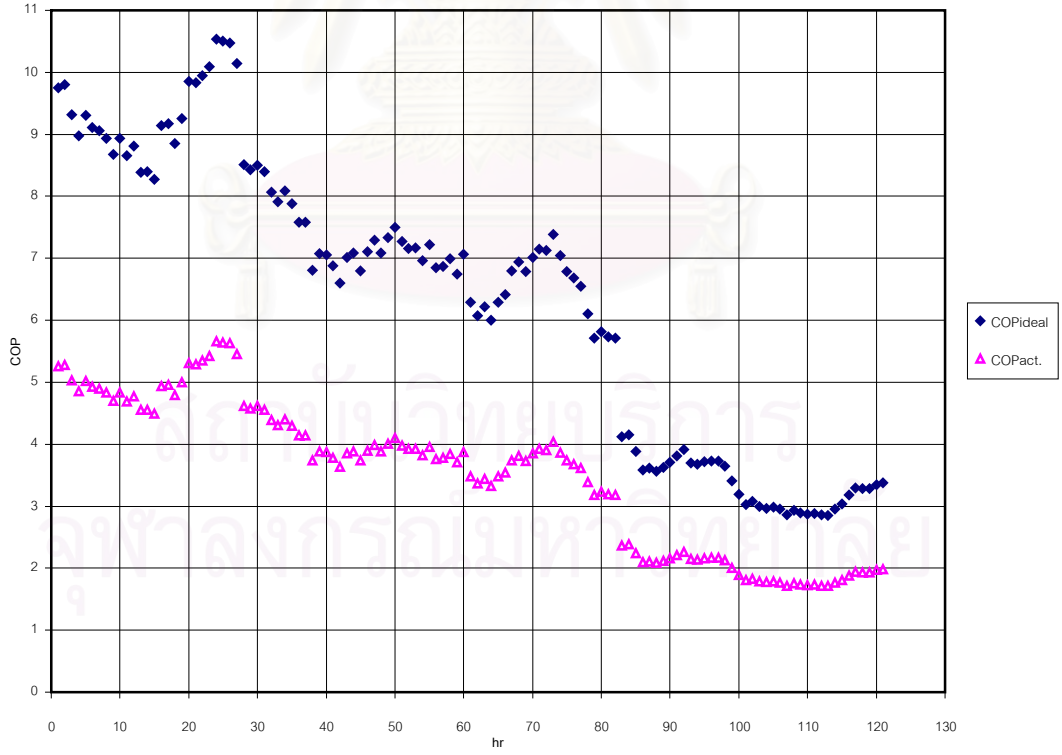

**รูปที่ 5.11.3(ก)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



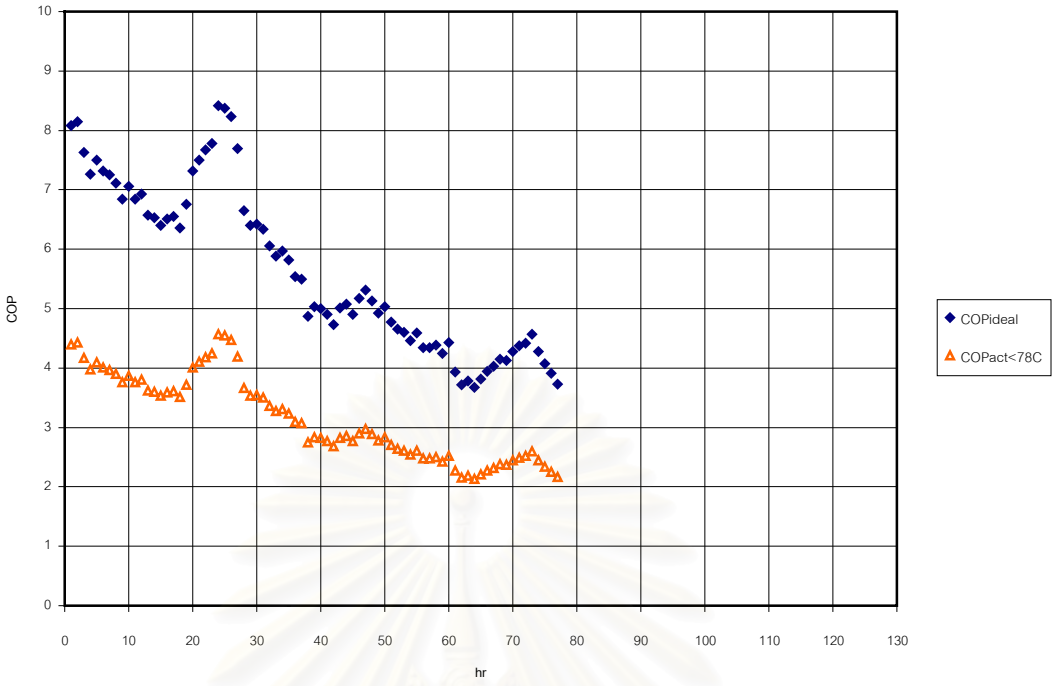

**รูปที่ 5.11.4(ก)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. สหใบยาสูบ จก.



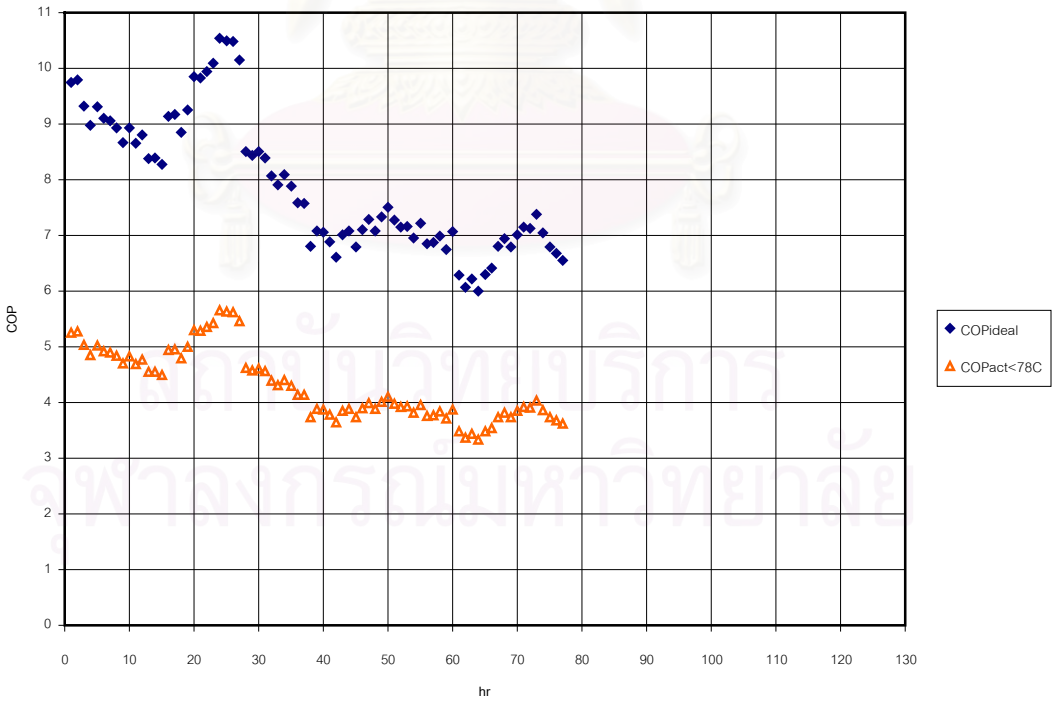

**รูปที่ 5.11.1(ข)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.




**รูปที่ 5.11.2(ข)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.




**รูปที่ 5.11.3(ข)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.




**รูปที่ 5.11.4(ข)** รูปแสดงสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น และมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบาย ของ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก.

**5.3 การวิเคราะห์**

1. <u>ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของปั๊มความร้อน</u>

ในการบ่มใบยาสูบ เพื่อให้ได้ใบยาสูบแห้งที่มีคุณภาพดี มีปัจจัยหลักที่ต้องควบคุม คือ อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศในห้องบ่มฯ โดยต้องควบคุมให้เปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนทั้ง 4 ของการบ่มใบยาสูบ การควบคุมอุณหภูมิของอากาศภายในห้องบ่มนั้น ทำได้โดยการควบคุมการให้ความร้อนผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (เครื่องควบแน่น และขดลวดความร้อน) ส่วนการควบคุมความชื้นนั้นสามารถทำได้โดยการควบคุมอากาศระบายออกของอากาศภายในห้องบ่มใบยาสูบ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมตามระยะเวลาแต่ละช่วงจะสามารถทำให้ได้คุณภาพใบยาสูบที่ดี มีการใช้เวลา และพลังงานในการบ่มใบยาสูบที่ประหยัดและเหมาะสม (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542)

เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้เหมาะสมนี้เอง จะเห็นได้ว่า ในช่วงเวลา "อบก้านแห้ง" นั้นมีความต้องการใช้อุณหภูมิสูง 70-78 $^{\circ}$C ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับเพิ่มอุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่นให้สูงตามไปด้วย ทำให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิด้านเครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าต่ำมาก ก็ทำให้เกิดความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้ความดันของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหยเกิดความแตกต่างมากตามไปด้วย ทำให้เครื่องอัดไอต้องทำงานอย่างหนักตลอดเวลา เพื่อรองรับอุณหภูมิและความดันที่เพิ่มขึ้น อีกทั้งอากาศระบายทิ้งออกจากห้องบ่มใบยาสูบในช่วงเวลา "อบก้านแห้ง" นี้ก็มีอยู่ในปริมาณน้อย ทำให้มีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายทิ้งเพื่อใช้ที่เครื่องทำระเหยได้น้อย ส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลืองการใช้พลังงานในช่วงเวลานี้เป็นอย่างมาก และยังส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน(COP) ในช่วงนี้มีค่าต่ำ อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนภายในห้องบ่มใบยาสูบ มีค่าสูงใกล้เคียงกับอุณหภูมิขีดจำกัดของเครื่องควบแน่น(ประมาณ 75-78 $^{\circ}$ C) ทำให้ปั๊มความร้อนไม่สามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศร้อนได้อีก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ขดลวดความร้อนมาให้ความร้อนแทนปั๊มความร้อน ซึ่งทำให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้น

ดังที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานในปั๊มความร้อนในโรงบ่มใบยาสูบ คือ

1. ความแตกต่างของอุณหภูมิสารทำความเย็นระหว่างเครื่องควบแน่น และเครื่องทำระเหย
2. ข้อจำกัดทางคุณสมบัติของสารทำความเย็น

2. <u>การเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายทิ้ง</u>

จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานในห้องบ่มใบยาสูบ (ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์, 2542) พบว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกไปกับอากาศระบายทิ้งจากห้องบ่มใบยาสูบ คิดเป็นสัดส่วนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับความร้อนสูญเสียอื่นๆ ในห้องบ่ม โดยคิดเป็น 81.82 % และ 77.29 % สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ตามลำดับ ดังนั้นถ้ามีหนทางที่สามารถนำความร้อนที่ระบายทิ้งออกนี้กลับมาใช้ใหม่ได้ ก็ไม่ควรที่จะละเลยไป

ในการใช้ปั๊มความร้อน สามารถนำความร้อนที่ระบายทิ้งนี้กลับคืนมาใช้ได้ที่เครื่องทำระเหย แต่เนื่องจากปริมาณอากาศระบายทิ้งนี้มีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาที่ทำการบ่มใบยาสูบ อีกทั้งยังมีปริมาณน้อยในช่วงท้ายของการบ่มใบยาสูบ ดังนั้นจึงมีการปรับอัตราการไหลของอากาศระบายทิ้งนี้เสียใหม่ โดยการนำอากาศระบายทิ้งมาผสมกับอากาศแวดล้อม ให้ได้ความเร็วที่เหมาะสมซึ่งมีค่าประมาณ 2.5 m/s (Hans and Fritz, 1981) แล้วจึงนำมาใช้ที่เครื่องทำระเหย

จากการศึกษาพบว่า เมื่อมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายทิ้งมาใช้ที่เครื่องทำระเหย จะสามารถประหยัดพลังงานได้เฉลี่ยเท่ากับ 0.67 kWh/กก.ใบยาสูบ และ 0.685 kWh/กก.ใบยาสูบ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ประมาณ 16 % และ 17 % สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ตามลำดับ ดังนั้นจึงไม่ควรละเลยที่จะนำความร้อนจากอากาศระบายทิ้งจากห้องบ่มใบยาสูบกลับมาใช้ที่เครื่องทำระเหย

3. <u>ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อน</u>

จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์การใช้ปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ พบว่า ในช่วงต้น(ช่วงทำสี และตรึงสีใบยาสูบ) ของการบ่มใบยาสูบนั้น ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าอยู่ในระดับสูงเฉลี่ยประมาณ 4.8 – 6.3 ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนภายในห้องบ่มใบยาสูบ และอากาศแวดล้อม มีค่าใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งใบยาสูบก็เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในตัวเอง และคายความร้อนออกมา ทำให้มีความต้องการพลังงานในปริมาณน้อย

ในช่วงกลาง(การอบใบแห้ง) ของการบ่มใบยาสูบ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าอยู่ในระดับปานกลางเฉลี่ยประมาณ 2.5 – 4.3 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนภายในห้องบ่มใบยาสูบ กับอุณหภูมิอากาศแวดล้อมมีค่าสูงขึ้น และจะยิ่งมีความแตกต่างมากขึ้นในเวลากลางคืน ส่งผลให้เครื่องอัดไอต้องทำงานมากขึ้น ทำให้มีการใช้พลังงานมากขึ้น แต่ก็มีหนทางที่จะช่วยลดการใช้พลังงานในช่วงเวลานี้ลงได้ โดยการเก็บคืนความร้อนที่ระบายออกจากห้องบ่มใบยาสูบที่บริเวณเครื่องทำระเหย แทนที่จะปล่อยทิ้งไป

ในช่วงสุดท้ายของการบ่มใบยาสูบ (การทำก้านแห้ง) พบว่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าอยู่ในระดับปานกลางถึงต่ำเฉลี่ยประมาณ 1.9 – 2.2 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิของอากาศหมุนเวียนภายในห้องมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น(มีความแตกต่างไม่เกิน 5 $^{\circ}$C) เครื่องควบแน่นก็แทบจะเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศหมุนเวียนตามความต้องการไม่ได้อีกแล้ว ทำให้เครื่องอัดไอต้องทำงานอย่างหนักตลอดเวลา ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอันมาก ถึงแม้ว่าจะมีการเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายทิ้งมาใช้ที่เครื่องทำระเหยก็ตาม แต่ในช่วงการทำก้านแห้งนี้ มีการระบายอากาศทิ้งออกจากห้องบ่มใบยาสูบ ในปริมาณที่น้อยมาก ทำให้ความร้อนที่ได้จากการเก็บคืนมีค่าน้อยมากเช่นกัน อีกทั้งยังต้องเผชิญกับข้อจำกัดในด้านอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่น ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะของปั๊มความร้อนมีค่าอยู่ในระดับต่ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

4. <u>การเปรียบเทียบความต้องการพลังงานและค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบระหว่างระบบปั๊มความร้อน และระบบความร้อนรวมศูนย์</u>

จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ฯ ของนายณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์ (2542) พบว่าในการบ่มใบยาสูบ แบบใช้ความร้อนรวมศูนย์ มีความต้องการพลังงานจำเพาะเท่ากับ 35.26 MJ / kgใบยาแห้ง และ 34.2 MJ / kgใบยาแห้ง สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ตามลำดับ แต่จากผลการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ฯ สำหรับการบ่มใบยาสูบ แบบใช้ปั๊มความร้อน พบว่ามีความต้องการพลังงานจำเพาะเฉลี่ยเพียง 15.95 MJ/kg ใบยาแห้ง และ 15.50 MJ/kgใบยาแห้ง สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบ่มใบยาสูบด้วยระบบปั๊มความร้อนสามารถประหยัดการใช้พลังงานลงได้มาก ดังแสดงในตารางที่ 5.3

**ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบด้วยระบบต่าง ๆ**

| รูปแบบการบ่มใบยาสูบ | บ. สหใบยาสูบไทย จก. (MJ / kgใบยาแห้ง) | บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (MJ / kgใบยาแห้ง) |
|---|---|---|
| 1. แบบดั้งเดิม | 186.66 | 153.72 |
| 2. แบบความร้อนรวมศูนย์ | 35.26 | 34.2 |
| 3. แบบปั๊มความร้อน * | | |
| 3.1 ไม่มีการเก็บคืนความร้อน | 17.06 | 16.56 |
| 3.2 มีการเก็บคืนความร้อน | 14.83 | 14.44 |

หมายเหตุ : * ปั๊มความร้อนทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของเครื่องควบแน่น

จากการประเมินราคาค่าเชื้อเพลิง(ลิกไนต์) สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ในปัจจุบัน พบว่า มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0 บาท/kg หรือคิดได้เป็น 0.14 บาท/3600 kJ และ 0.15 บาท/3600 kJ และจากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการที่ปรึกษา “การประเมินผลโครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ” โดย สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2542) พบว่าราคาค่าไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 2.69 บาท/kWh และ 2.33 บาท/kWh สำหรับ บ. สหใบยาสูบไทย จก. และ บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าราคาของพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันถึงประมาณ 15 - 19 เท่า ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบ โดยใช้ปั๊มความร้อน มีค่าสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.4

**ตารางที่ 5.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบด้วยระบบต่าง ๆ**

| รูปแบบการบ่มใบยาสูบ | บ. สหใบยาสูบไทย จก. (฿ / kgใบยาแห้ง) | บ. เชียงรายวัฒนาพร จก. (฿ / kgใบยาแห้ง) |
|---|---|---|
| 1. แบบดั้งเดิม | 9.15 | 6.42 |
| 2. แบบความร้อนรวมศูนย์ | 3.82 | 2.67 |
| 3. แบบปั๊มความร้อน * | | |
| 3.1 ไม่มีการเก็บคืนความร้อน | 12.75 | 10.72 |
| 3.2 มีการเก็บคืนความร้อน | 11.08 | 9.35 |

หมายเหตุ : * ปั๊มความร้อนทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของเครื่องควบแน่น

5. <u>ข้อเปรียบเทียบอื่นๆ ระหว่างการบ่มใบยาสูบ ด้วยระบบปั๊มความร้อน และด้วยระบบความร้อนรวมศูนย์</u>

การบ่มใบยาสูบด้วยระบบความร้อนรวมศูนย์ เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบ่มใบยาสูบ จากวิธีการบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม เมื่อพิจารณาในแง่ของการใช้พลังงานแล้ว ถือว่ามีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงกว่าวิธีการบ่มใบยาสูบแบบดั้งเดิม (รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการที่ปรึกษา “การประเมินผลโครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ” โดย สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระบบปั๊มความร้อนแล้ว จะเห็นได้ว่า ระบบปั๊มความร้อนให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่สูงกว่า แต่น่าเสียดายที่ระบบปั๊มความร้อนกลับมีค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์มาก ส่งผลให้ไม่น่าดึงดูดใจในการใช้ระบบปั๊มความร้อน ดังที่ได้วิเคราะห์ไว้ก่อนหน้านี้แล้ว

ในการบ่มใบยาสูบ แบบใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์ ระหว่างฤดูเก็บเกี่ยวใบยาสูบนั้น บางครั้งผู้ดำเนินกิจการต้องประสบกับปัญหา การจัดใบยาสูบเข้าห้องบ่มไม่ทัน เนื่องจากมีปริมาณใบยาสูบสดมากเกินกว่าความสามารถในการทำความร้อนของหม้อน้ำร้อนที่จะสามารถรองรับได้ ดังจะเห็นได้จากการวิเคราะห์และเสนอแนะการจัดการใบยาสูบเข้าห้องบ่มให้เหมาะสมกับขนาดของหม้อน้ำร้อนของนายณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์(2542) การบ่มใบยาสูบ แบบใช้ระบบความร้อนรวมศูนย์ ต้องทำการบ่มใบยาสูบเหลื่อมล้ำเวลากัน 1 วัน ถึงแม้จะทำให้สามารถใช้พลังงานจากหม้อน้ำร้อนได้เต็มที่ แต่ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องปริมาณใบยาสดมากเกินได้ทั้งหมด แต่ในระบบปั๊มความร้อนซึ่งเป็นระบบที่แยกอิสระต่อกัน ไม่จำเป็นต้องอาศัยความร้อนจากหม้อน้ำร้อนรวมศูนย์ ทำให้สามารถจัดใบยาสูบเข้าสู่ห้องบ่มที่ว่างอยู่ได้ทันที โดยไม่ต้องคำนึงถึงความสามารถในการให้ความร้อนเหมือนกับระบบความร้อนรวมศูนย์ ส่งผลให้มีความคล่องตัวในการจัดการมากขึ้น และสามารถลดความเสียหายจากใบยาสูบเกิดการเน่าเสีย เพราะเข้าบ่มไม่ทันได้อีกด้วย

เมื่อพิจารณาในแง่ของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีสำคัญเนื่องจากปัจจุบัน การค้าโลกได้มีการคำนึงถึงเรื่องสิ่งแวดล้อม และนำเอาประเด็นนี้มาเป็นเครื่องกีดกันทางการค้า ทำให้การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในอนาคต จากรายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการที่ปรึกษา “การประเมินผลโครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ” โดย สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2542) พบว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ลิกไนต์) ในหม้อน้ำร้อนสำหรับการบ่มใบยาสูบด้วยระบบความร้อนรวมศูนย์นั้น มีเขม่า ควัน และฝุ่นละออง อีกทั้งมีปริมาณก๊าซ CO ในก๊าซเสียเกิดขึ้นสูงเกินค่าพิกัดควบคุมเป็นครั้งคราว ถึงแม้จะมีการติดตั้งเครื่องกำจัดฝุ่นแล้วก็ตาม ส่งผลให้รบกวนชาวบ้านผู้อยู่อาศัยโดยรอบโรงบ่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในฤดูหนาว ทำให้มีการร้องเรียนจากชาวบ้านโดยรอบเป็นครั้งคราว แต่อย่างไรก็ตาม จากการตรวจวัดไม่พบว่า $SO_2$ และ $NO_x$ มีค่าสูงเกินกว่าพิกัด ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มว่าปัญหาสิ่งแวดล้อมกับชุมชนโดยรอบโรงบ่ม จะทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะเป็นข้อจำกัดที่สำคัญต่อการทำงานของโรงบ่มใบยาสูบแบบเดิม

ในระบบปั๊มความร้อนที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน จะไม่มีมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ส่งผลรบกวนชาวบ้านผู้อยู่อาศัยโดยรอบโรงบ่ม ดังนั้นโรงบ่มใบยาสูบจึงสามารถดำเนินกิจการท่ามกลางชุมชนได้โดยไม่เกิดข้อขัดแย้งขึ้น

6. <u>การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น</u>

จากภาคผนวก ง. สามารถสรุปค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้นของระบบปั๊มความร้อน และระบบความร้อนรวมศูนย์ได้ ดังต่อไปนี้

- ค่าใช้จ่ายในการสร้างโครงสร้างโรงบ่ม ขนาด 6 ห้องบ่ม = 2,689,360 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบปั๊มความร้อน สำหรับ 6 ห้องบ่ม = 8,064,000 บาท
- ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบความร้อนรวมศูนย์ ขนาด 6 ห้องบ่ม = 2,434,000 บาท
- ค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์เสริมสำหรับกำจัดมลพิษของระบบความร้อนรวมศูนย์ = 295,000 บาท

จากค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่ได้แสดงไว้ด้านบน เห็นได้ว่า ระบบปั๊มความร้อนมีราคาลงทุนเริ่มต้นที่สูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์มาก(3เท่า) ทั้งนี้เนื่องจากราคาของเครื่องอัดไอสำหรับการทำงานที่อุณหภูมิสูง มีราคาแพงมาก ส่งผลให้ระบบปั๊มความร้อนต้องใช้เงินลงทุนเริ่มต้นสูง อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่ค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบปั๊มความร้อนข้างต้นนี้ เป็นเพียงราคาประมาณการเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งอาจลดลงได้เมื่อมีการตกลงสร้างจริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## 6.1 สรุปผลการวิจัย

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของระบบปั๊มความร้อนในการบ่มใบยาสูบ ได้แก่ ความแตกต่างของอุณหภูมิของสารทำความเย็นในเครื่องควบแน่นและเครื่องทำระเหย ถ้ามีความแตกต่างกันมากก็จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบปั๊มความร้อนลดลง

2. จากการพิจารณาสมดุลพลังงานในห้องบ่มใบยาสูบ พบว่าการสูญเสียพลังงานความร้อนเนื่องจากอากาศระบายออกจากห้องบ่มใบยาสูบมีสัดส่วนสูงที่สุด ดังนั้นจึงไม่ควรละเลยที่จะเก็บคืนความร้อนจากอากาศระบายนี้กลับเข้าสู่ระบบปั๊มความร้อนผ่านทางเครื่องทำระเหย ซึ่งส่งผลให้สามารถช่วยลดการใช้พลังงานของปั๊มความร้อนได้

3. ในช่วงท้ายของการบ่มใบยาสูบ คือการอบก้านให้แห้ง มีความต้องการอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมากประมาณ 75-80 $^{\circ}$C ทำให้การทำงานของระบบปั๊มความร้อนเพียงลำพังไม่สามารถให้ความร้อนแก่อากาศได้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องมีการใช้ขดลวดไฟฟ้าเข้ามาช่วย ส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบสูงขึ้น

4. การบ่มใบยาสูบด้วยระบบปั๊มความร้อนสามารถกำจัดการกระจายมลพิษ อันได้แก่ เขม่าควัน, ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และที่สำคัญที่สุดคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทำให้การบ่มใบยาสูบแบบอัดแน่นด้วยระบบปั๊มความร้อนไม่ส่งผลรบกวนชาวบ้านผู้อยู่อาศัยโดยรอบโรงบ่ม ทำให้โรงบ่มใบยาสูบสามารถดำเนินกิจการท่ามกลางชุมชนได้โดยไม่เกิดข้อขัดแย้งขึ้น

5. การบ่มใบยาสูบด้วยระบบปั๊มความร้อนมีความเป็นอิสระ และมีความคล่องตัวในการจัดการนำใบยาสูบสดเข้าบ่มมากกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ ส่งผลให้สามารถลดความเสียหายจากการเน่าเสียของใบยาสูบที่นำเข้าบ่มไม่ทันได้

6. ระบบปั๊มความร้อนควบคุมด้วยอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน และละเอียดอ่อนกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ อีกทั้งบำรุงรักษาได้ยากกว่า แต่มีความสะดวกในการทำงานมากกว่า จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในการควบคุมมากกว่าในปัจจุบัน ส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และการบำรุงรักษาสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์

7. จากการศึกษา การใช้พลังงานไฟฟ้าของระบบปั๊มความร้อนเทียบกับการใช้พลังงานรวม(ความร้อน+ไฟฟ้า)ของระบบความร้อนรวมศูนย์ พบว่า ระบบปั๊มความร้อนมีการใช้พลังงานความร้อนเทียบเท่า น้อยกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์มาก แต่เนื่องจากพลังงานไฟฟ้ามี

ราคาสูงกว่าราคาลิกไนต์ต่อหนึ่งหน่วยพลังงานที่เท่ากันถึง 15 – 19 เท่า ส่งผลให้การบ่มใบยาสูบด้วยระบบปั๊มความร้อนต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์โดยเฉลี่ย 3 - 4 เท่า อีกทั้งเมื่อพิจารณาในด้านค่าใช้จ่ายในการลงทุนเริ่มต้น เห็นได้ว่า ระบบปั๊มความร้อน ต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าระบบความร้อนรวมศูนย์ถึง 3 เท่า สำหรับขนาดของจำนวนห้องบ่มที่เท่ากัน

ดังนั้น เมื่อพิจารณาในด้านของค่าใช้จ่ายในการบ่มใบยาสูบ และการลงทุนเริ่มต้นระหว่างระบบความร้อนรวมศูนย์กับระบบปั๊มความร้อนแล้ว เห็นได้ว่า ระบบปั๊มความร้อนน่าสนใจในการลงทุน

**6.2 ข้อเสนอแนะ**

1. อุณหภูมิที่เครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อนสามารถทำได้มีค่าไม่สูงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22 ที่มีความดันสูง เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูง และข้อจำกัดของเครื่องอัดไอสำหรับอัดไอที่ความดัน และอุณหภูมิสูง ซึ่งมีราคาสูงกว่าปกติหลายเท่าตัว ในอนาคต ถ้ามีการพัฒนาสารทำความเย็นชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม และสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูง โดยมีความดันต่ำได้ และมีการพัฒนาเครื่องอัดไอที่สามารถทำงานได้เหมาะสมกับสารทำความเย็นนี้ โดยมีราคาไม่สูงจนเกินไป ก็ควรที่จะมีการทำวิจัยอีกครั้งหนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# รายการอ้างอิง


ภาษาไทย

กิตติ ภักดีวัฒนะกุล และ จำลอง ครูอุตสาหะ. 2542. Visual Basic 6 ฉบับโปรแกรมเมอร์. กรุงเทพมหานคร: บ. เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์ จก.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, สถาบันวิจัยพลังงาน. 2542. รายงานฉบับสมบูรณ์ การประเมินผลโครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ เสนอต่อ กองทุนเพื่อการอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัชวาล ตัณฑกิตติ. 2541. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ เสนอต่อ กองทุนส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ. เชียงใหม่: หน่วยประหยัดพลังงานในการบ่มใบยาสูบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ฐานิตย์ เมธิยานนท์. 2541. การอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนในระดับอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณัฐเดช เฟื่องวรวงศ์. 2542. การพัฒนาแบบจำลองของการใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัดแน่น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประทาน รักปรางค์. 2539. การอบแห้งผลไม้โดยใช้ปั๊มความร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ภาษาอังกฤษ

Aceves-Saborio, S. 1993. Analysis of energy consumption in heat pump and conventional driers. J. Heat Recovery Systems & CHP 13(5): 419-428.

ASHRAE Handbook 1997 Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329.

Berghmans, J. 1983. Heat pump fundamentals. Hague: Martinus Nijhoff Publisher.

Bridges, L.R., Walton, and Ross, I.J., 1981. A Deep-Layer Drying Model for Burley Tobacco Curing. Transactions of the ASAE : 1608-1612.

Cengel, Y.A., and Boles, M.A. 1998. Thermodynamics: An engineering approach. 3rd ed. Singapore: WCB/McGraw-Hill.

Chou, S.K., Hawlader, M.N.A., Ho, J.C., Wijeysundera, N.E., and Rajasedar, S. 1994. Performance of a heat-pump assisted dryer. Int. J. Energy Research 18: 605-622

Clements, S., Jia, X., and Jolly, P. 1993. Experimental verification of heat pump assisted continuous dryer simulation model. Int. J. Energy Research 17: 19-28

Cundiff, J.S. 1980. Effect of exchange air rate on energy efficiency in tobacco curing. ASAE Paper No. 80-3548. ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Cundiff, J.S. 1981. Energy model for forced air tobacco curing. Transactions of the ASAE 24(1): 211-215.

Cundiff, J.S. 1983. Exchanged air control for maximum solar energy utilization in tobacco curing. Transactions of the ASAE 26(1): 260-264.

Davies, M.G. 1993. Heat loss from a solid ground floor. Building and Environment 28(3): 347-359.

Delsante, A.E. 1988. Theoretical calculation of the steady-state heat loss through a slap-on-ground floor. Building and Environment: 11-17

Hans L.C. and Fritz S. 1981. Heat Pump Technology. New York: Butterworth

Hiran, A. and Promwungkwa, A. 1986. Optimum control of forced-draught bulk curing tobacco barn. Paper presented at workshop on energy conservation in tobacco curing.

Holland, F.A., Watson, F.A., and Devotta, S. 1982. Thermodynamic design data for heat pump systems. New York: Pergamon Press Ltd.

Incropera, F.P., and DeWitt, D.P. 1996. Introduction to heat transfer. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.

Jolly, P., Jia, X., and Clements, S. 1990. Heat pump assisted continuous drying — Part 1: Simulation model. Int. J. Energy Research 14: 757-770

Kartsounes, G.T., and Erth, R.A. 1971. Computer calculation of the thermodynamic properties of refrigerants 12,22 and 502. ASHRAE Transactions 77(part2): 88-103.

Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B., and Marinos-Kouris, D. 1990. Mass transfer modeling for virginia tobacco curing. Drying Technology 8(2): 351-366.

Luther, R.W. 1976. Numerical Calculation of Psychrometric Properties in SI Units. Transaction of ASAE 19(2): 318-321

Meyer, P.J., and Gideon, P.G. 1992. The drying of grain with heat pumps in South Africa : A techno-economic analysis. Int. J. Energy Research 16: 13-20

MacArthur, J.W. 1984. Theoretical analysis of the dynamic interactions of vapor compression heat pumps. Energy Convers. Mgmt 24(1): 49-66.

Moser, F., and Schnitzer, H. 1985. Heat pumps in industry. Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V.

Parise, Jose' A.R. 1986. Simulation of vapour-compression heat pumps. Simulation 46 (2): 71-76.

Prasertsan, S., Saen-saby, P., Ngamsritrakul, P., and Prateepchaikul, G. 1996. Heat pump dryer—Part 1: Simulation of the models. Int. J. Energy Research 20: 1067-1079.

Prasertsan, S., Saen-saby, P., Ngamsritrakul, P., and Prateepchaikul, G. 1996. Heat pump dryer—Part 2: Results of the simulation. Int. J. Energy Research 21: 1-20.

Prasertsan, S., Saen-saby, P., Ngamsritrakul, P., and Prateepchaikul, G. 1996. Heat pump dryer—Part 3: Experimental verification of the simulation. Int. J. Energy Research 21: 707-722.

Prasertsan, S., and Saen-saby, P. 1998. Heat pump dryers: Research and development needs and opportunities. Drying technology 16(1&2): 251-270.

Prasertsan, S., and Saen-saby, P. 1998. Heat pump drying of agricultural materials. Drying technology 16(1&2): 235-250.

Sauer, H.J. Jr., and Howell, R.H. 1983. Heat pump systems. New York: John Wiley & Sons.

Suggs, C.W. 1980. Air flow characteristics through curing containers. ASAE Paper No. 80-3067. ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Yang, C.C., and Johnson, W.H. 1984. Finite element analysis of floor heat loss for tobacco curing systems. ASAE Paper No. 84-3562. ASAE, St. Joseph, MI 49085.

# ภาคผนวก

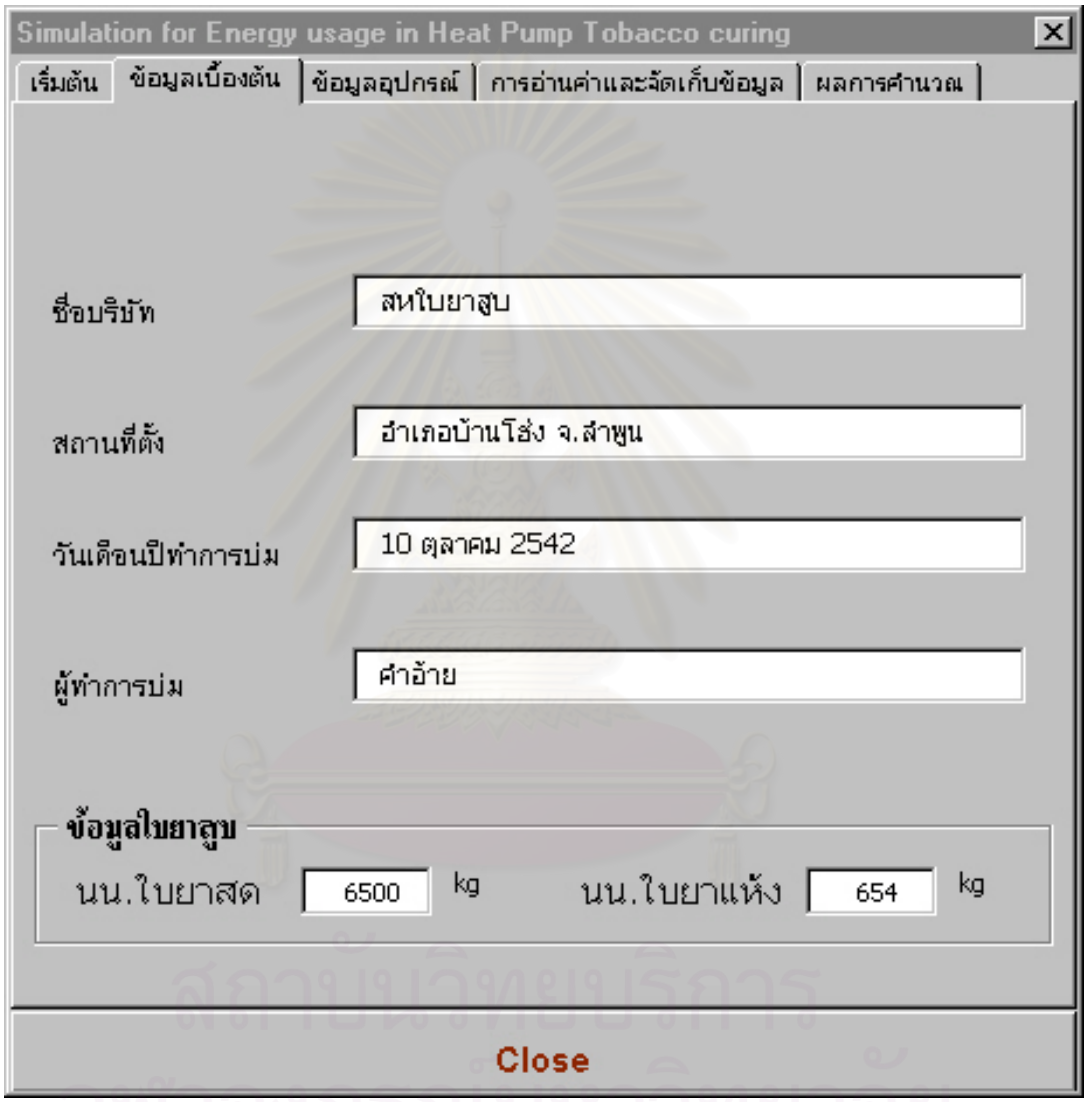
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ก.

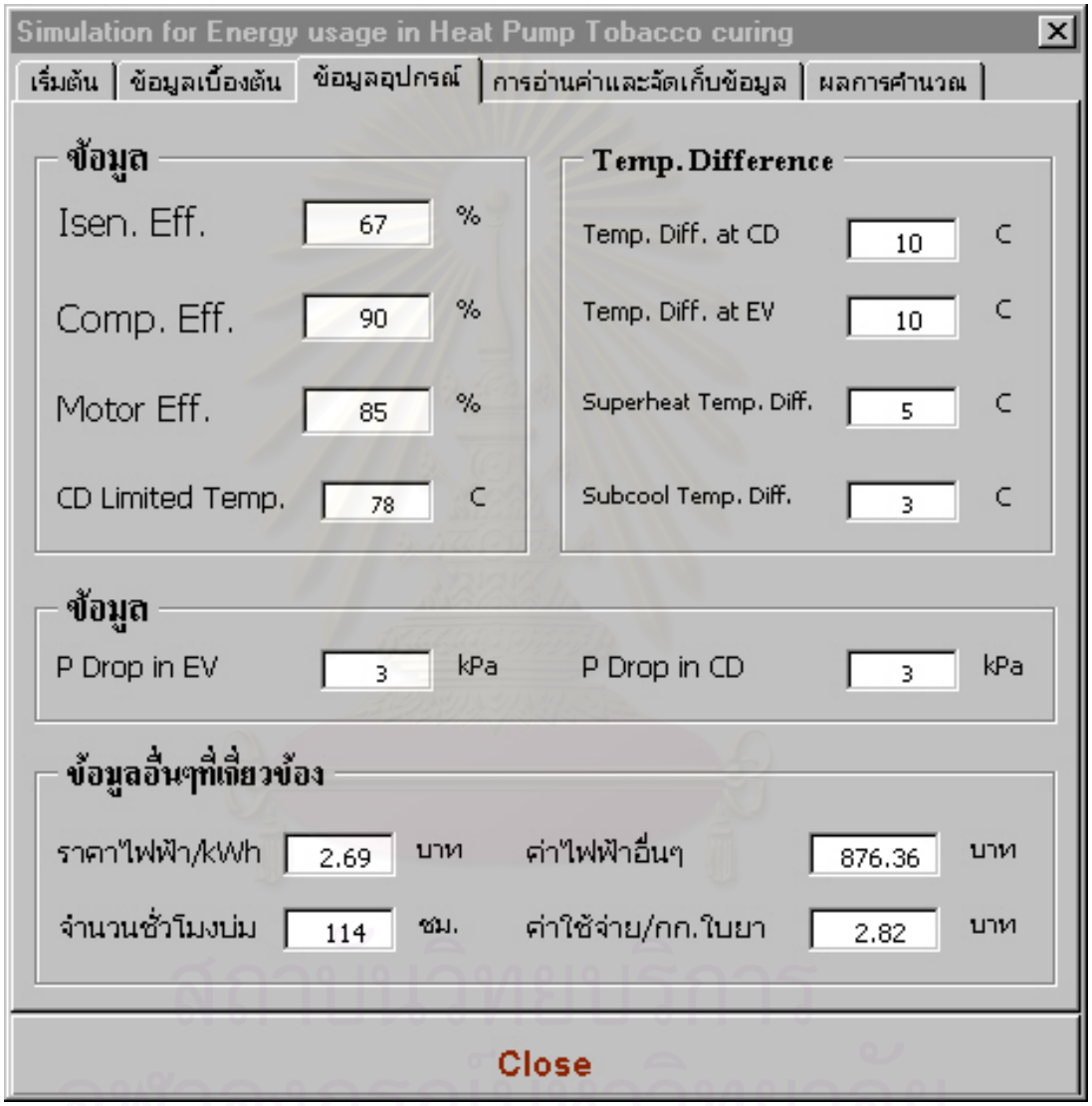
## รูปแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์

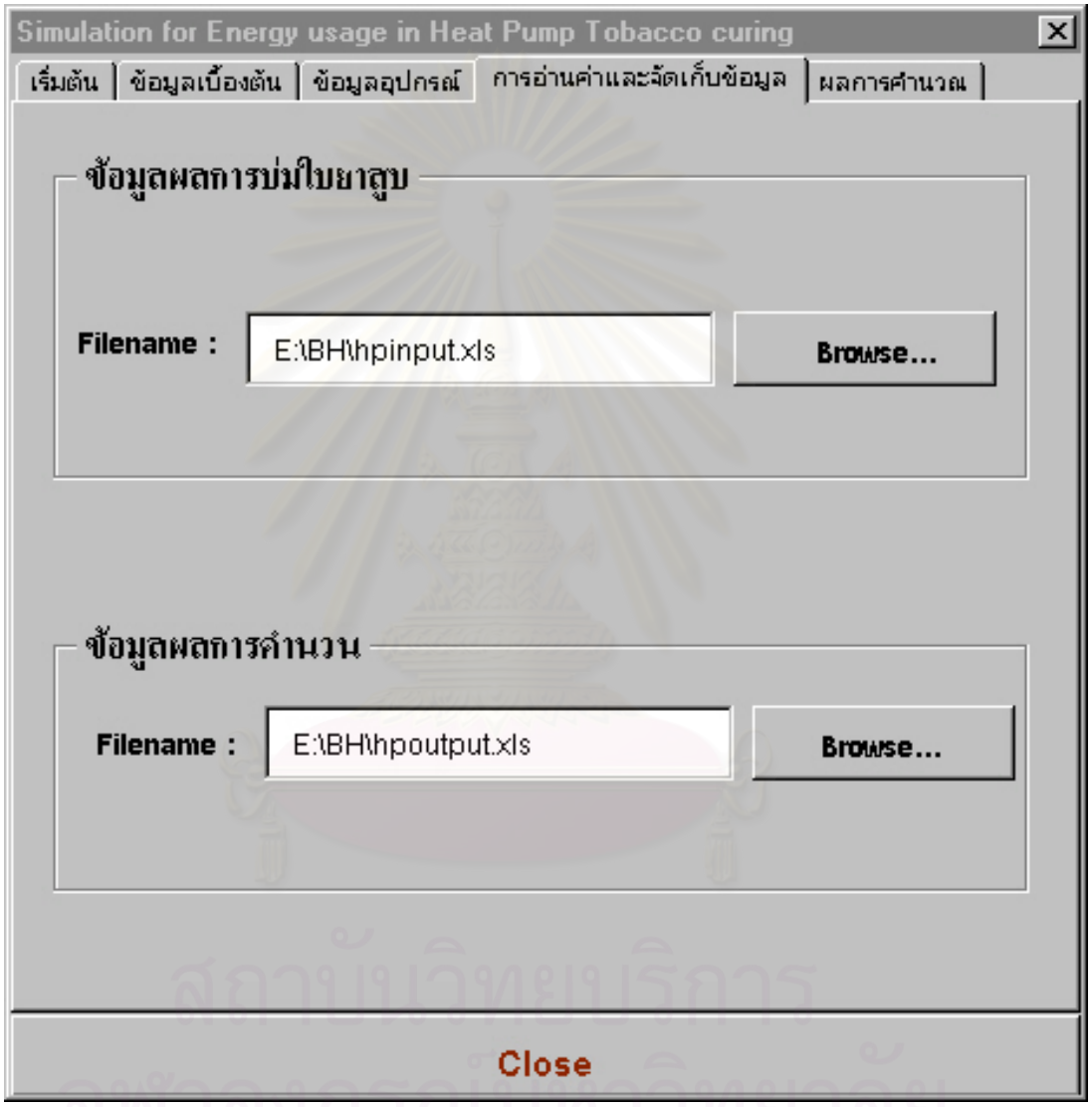
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

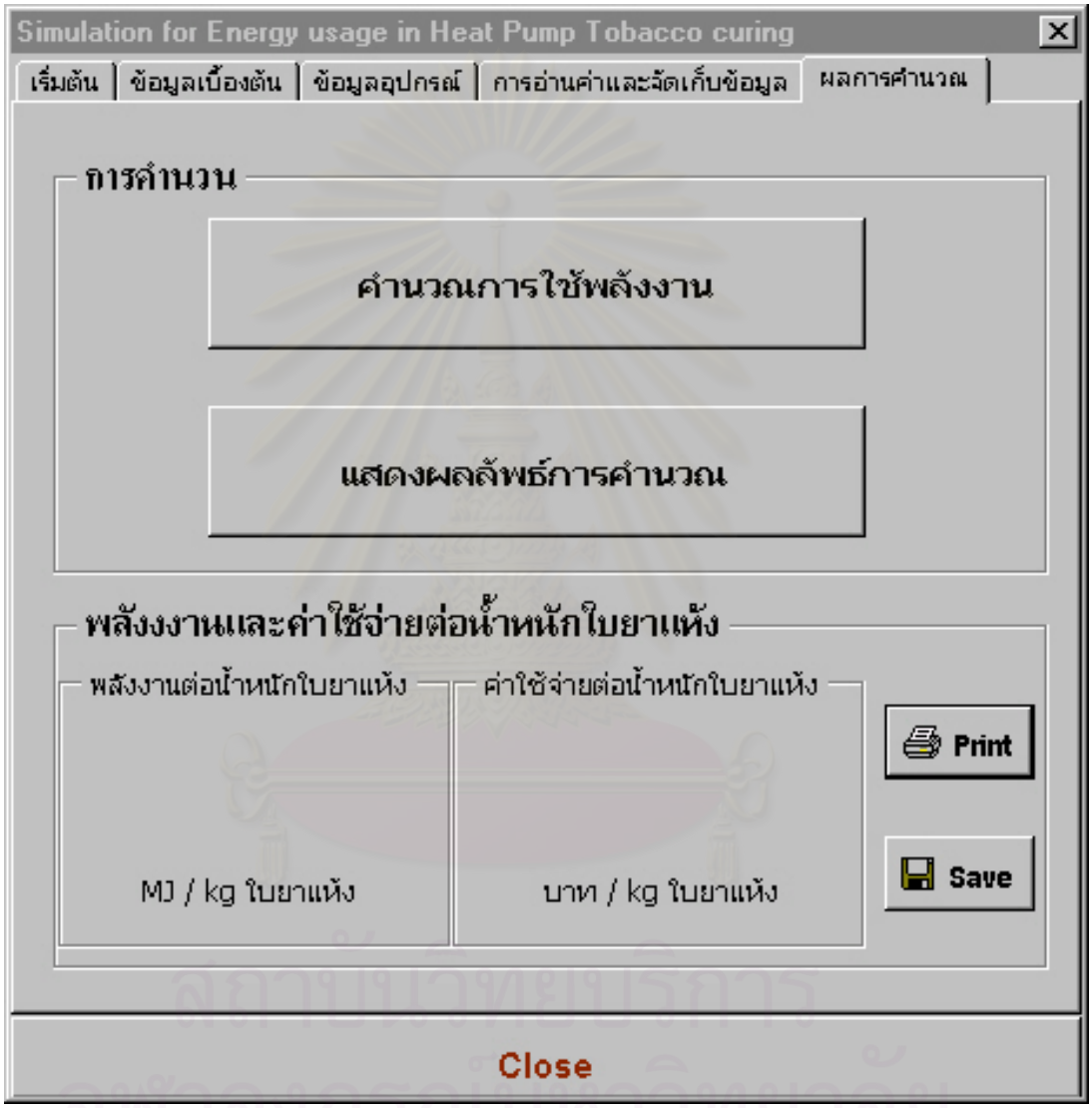



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


Simulation for Energy usage in Heat Pump Tobacco curing
เริ่มต้น
ข้อมูลเบื้องต้น
ข้อมูลอุปกรณ์
การอ่านค่าและจัดเก็บข้อมูล
ผลการคำนวณ
ข้อมูล
Isen. Eff.
67
%
Comp. Eff.
90
%
Motor Eff.
85
%
CD Limited Temp.
78
C
Temp. Difference
Temp. Diff. at CD
10
C
Temp. Diff. at EV
10
C
Superheat Temp. Diff.
5
C
Subcool Temp. Diff.
3
C
ข้อมูล
P Drop in EV
3
kPa
P Drop in CD
3
kPa
ข้อมูลอื่นๆที่เกี่ยวข้อง
ราคาไฟฟ้า/kWh
2.69
บาท
ค่าไฟฟ้าอื่นๆ
876.36
บาท
จำนวนชั่วโมงบ่ม
114
ชม.
ค่าใช้จ่าย/กก.ใบยา
2.82
บาท
Close




สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


Simulation for Energy usage in Heat Pump Tobacco curing
เริ่มต้น
ข้อมูลเบื้องต้น
ข้อมูลอุปกรณ์
การอ่านค่าและจัดเก็บข้อมูล
ผลการคำนวณ
การคำนวน
คำนวณการใช้พลังงาน
แสดงผลลัพธ์การคำนวณ
พลังงานและค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักใบยาแห้ง
พลังงานต่อน้ำหนักใบยาแห้ง
ค่าใช้จ่ายต่อน้ำหนักใบยาแห้ง
MJ / kg ใบยาแห้ง
บาท / kg ใบยาแห้ง
Print
Save
Close

**<u>วิธีการใช้โปรแกรม Simulation for Energy Usage in Heat Pump Tobacco Curing.</u>**

1. สร้างไฟล์ hpinput.xls และใส่ข้อมูลต่างๆ ตลอดช่วงการบ่มใบยา ที่จำเป็นต่อการคำนวณ เช่น ชั่วโมง, อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, อุณหภูมิกระเปาะเปียก, อัตราการไหลของอากาศ, อัตราความร้อนที่ต้องการ และกำลังไฟฟ้าที่พัดลมใช้ เป็นต้น ดังแสดงไว้ในรูป ก.1

2. สร้างไฟล์ hpoutput.xls

3. เปิดโปรแกรม โดยการเปิดไฟล์ Heatpump.xls หรือเปิดจาก macro ใน Visual Basic

4. เติมข้อมูลเพิ่มเติมต่างๆ ลงใน แถบ (2)ข้อมูลเบื้องต้น, (3)ข้อมูลอุปกรณ์

5. เริ่มคำนวณการใช้พลังงาน โดยการคลิ๊กปุ่ม “คำนวณการใช้พลังงาน” ในแถบ (5)ผลการคำนวณ และแสดงผลลัพธ์การคำนวณ พร้อมทั้งสามารถพิมพ์ข้อมูล และบันทึกข้อมูลได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | hr | Tcurein db | Tcurein wb | AIRcurein(kg/s) | Tamb db | Tamb wb | AIRamb(kg/s) | Texh db | Texh wb | AIRexh(kg/s) | Blower(kW) | Qcd(kW) |
| 2 | 1 | 31.73 | 29.43 | 7.76 | 29.08 | 24.58 | 0.57 | 30.70 | 29.43 | 0.57 | 2.42 | 10.35 |
| 3 | 2 | 31.52 | 29.82 | 7.75 | 28.63 | 24.03 | 0.57 | 30.65 | 29.82 | 0.57 | 2.41 | 9.62 |
| 4 | 3 | 32.25 | 31.51 | 7.75 | 28.23 | 24.39 | 0.57 | 31.54 | 31.51 | 0.57 | 2.40 | 25.04 |
| 5 | 4 | 32.35 | 30.13 | 7.75 | 28.05 | 24.06 | 0.57 | 31.34 | 30.13 | 0.57 | 2.44 | 11.6 |
| 6 | 5 | 32.94 | 29.69 | 7.75 | 28.09 | 24.20 | 0.57 | 31.67 | 29.69 | 0.57 | 2.47 | 15.62 |
| 7 | 6 | 33.63 | 30.57 | 7.75 | 26.60 | 23.86 | 0.57 | 32.39 | 30.57 | 0.57 | 2.50 | 22.16 |
| 110 | 109 | 76.02 | 52.09 | 8.37 | 27.04 | 19.18 | 0.09 | 74.90 | 52.09 | 0.09 | 2.10 | 41.08 |
| 111 | 110 | 76.87 | 50.98 | 8.37 | 24.75 | 19.71 | 0.09 | 75.78 | 50.98 | 0.09 | 2.10 | 38.99 |
| 112 | 111 | 76.93 | 49.70 | 8.37 | 23.05 | 19.42 | 0.09 | 75.96 | 49.70 | 0.09 | 2.10 | 35 |
| 113 | 112 | 77.07 | 49.70 | 8.37 | 21.01 | 18.71 | 0.09 | 76.22 | 49.70 | 0.09 | 2.10 | 36.59 |
| 114 | 113 | 77.59 | 48.60 | 8.37 | 19.91 | 17.85 | 0.09 | 76.81 | 48.60 | 0.09 | 2.10 | 37.85 |
| 115 | 114 | 78.05 | 48.60 | 8.37 | 19.29 | 17.43 | 0.09 | 77.36 | 48.60 | 0.09 | 2.10 | 38.24 |

**รูปที่ ก.1** รูปแสดงลักษณะของการป้อนข้อมูลในไฟล์ hpinput.xls

# ภาคผนวก ข.

## ข้อมูลเบื้องต้นและสมดุลพลังงานความร้อนภายในห้องบ่มใบยาสูบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 1 | 31.73 | 29.43 | 0.26 | 1.24 | 29.08 | 24.58 | 6500.00 | 3.80 | 8.04 | 1.05 | 0.11 | 0.22 | 4.74 | 10.35 |
| 2 | 31.52 | 29.82 | 0.26 | 1.24 | 28.63 | 24.03 | 6467.00 | 3.92 | 14.75 | -1.59 | 0.30 | 0.61 | -0.52 | 9.62 |
| 3 | 32.25 | 31.51 | 0.26 | 1.24 | 28.23 | 24.39 | 6437.40 | 3.91 | 19.11 | 5.48 | 0.33 | 0.67 | 3.37 | 25.04 |
| 4 | 32.35 | 30.13 | 0.26 | 1.24 | 28.05 | 24.06 | 6412.44 | 3.99 | 15.57 | -1.00 | 0.44 | 0.91 | -0.34 | 11.60 |
| 5 | 32.94 | 29.69 | 0.26 | 1.24 | 28.09 | 24.20 | 6380.28 | 3.98 | 13.94 | 2.55 | 0.43 | 0.88 | 1.80 | 15.62 |
| 6 | 33.63 | 30.57 | 0.26 | 1.24 | 26.60 | 23.86 | 6343.73 | 4.03 | 17.25 | 4.14 | 0.65 | 1.34 | 2.80 | 22.16 |
| 7 | 34.82 | 31.51 | 0.26 | 1.24 | 25.18 | 23.38 | 6307.64 | 4.10 | 21.14 | 7.17 | 0.90 | 1.84 | 4.52 | 31.47 |
| 8 | 34.91 | 31.4 | 0.26 | 1.24 | 24.49 | 22.81 | 6269.81 | 4.21 | 21.99 | -0.49 | 1.10 | 2.28 | 0.25 | 20.92 |
| 9 | 35.28 | 30.99 | 0.26 | 1.24 | 24.52 | 22.82 | 6230.85 | 4.22 | 20.71 | 0.85 | 1.11 | 2.29 | 1.03 | 21.76 |
| 10 | 36.64 | 33.09 | 0.26 | 1.24 | 24.43 | 22.86 | 6188.57 | 4.24 | 27.32 | 8.83 | 1.15 | 2.37 | 5.69 | 41.11 |
| 11 | 37.83 | 33.3 | 0.26 | 1.24 | 24.01 | 22.53 | 6148.77 | 4.38 | 28.67 | 6.08 | 1.36 | 2.81 | 4.10 | 38.64 |
| 12 | 37.82 | 34.15 | 0.26 | 1.24 | 23.46 | 22.21 | 6103.41 | 4.49 | 32.27 | -0.44 | 1.53 | 3.18 | 0.50 | 32.56 |
| 13 | 38.20 | 33.4 | 0.26 | 1.24 | 23.17 | 21.95 | 6061.84 | 4.50 | 30.20 | 0.34 | 1.58 | 3.28 | 0.86 | 31.76 |
| 14 | 38.62 | 34.02 | 0.26 | 1.24 | 23.34 | 21.97 | 6015.05 | 4.52 | 32.29 | 1.64 | 1.59 | 3.29 | 1.76 | 36.05 |
| 15 | 38.80 | 34.6 | 0.26 | 1.24 | 24.54 | 22.56 | 5969.02 | 4.56 | 33.14 | 0.20 | 1.50 | 3.11 | 0.92 | 34.31 |
| 16 | 38.80 | 34.6 | 0.26 | 1.24 | 26.54 | 23.13 | 5924.84 | 4.61 | 31.97 | -1.26 | 1.30 | 2.69 | 0.02 | 30.11 |
| 17 | 38.17 | 35.13 | 0.26 | 1.24 | 28.00 | 23.62 | 5880.77 | 4.61 | 32.89 | -4.24 | 1.13 | 2.35 | -1.75 | 25.77 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 18 | 38.52 | 35.03 | 0.26 | 1.24 | 30.16 | 23.96 | 5842.70 | 4.54 | 31.80 | 0.82 | 0.84 | 1.73 | 1.09 | 31.74 |
| 19 | 38.10 | 35.46 | 0.26 | 1.24 | 30.76 | 23.99 | 5802.82 | 4.57 | 33.36 | -3.01 | 0.80 | 1.66 | -1.13 | 27.10 |
| 20 | 38.67 | 34.58 | 0.26 | 1.24 | 31.33 | 23.43 | 5767.25 | 4.54 | 31.36 | 1.48 | 0.70 | 1.46 | 1.43 | 31.89 |
| 21 | 38.63 | 35.24 | 0.30 | 1.24 | 32.05 | 23.98 | 5724.95 | 4.59 | 32.56 | -0.28 | 0.65 | 1.37 | 0.58 | 30.29 |
| 22 | 39.02 | 32.98 | 0.30 | 1.24 | 32.11 | 24.07 | 5685.42 | 4.63 | 24.38 | -0.69 | 0.66 | 1.39 | 0.26 | 21.37 |
| 25 | 40.61 | 34.44 | 0.30 | 1.24 | 31.56 | 24.13 | 5634.03 | 4.65 | 29.23 | 8.29 | 0.73 | 1.54 | 6.07 | 41.20 |
| 24 | 40.21 | 34.08 | 0.30 | 1.24 | 29.78 | 24.27 | 5580.65 | 5.07 | 27.61 | -4.27 | 1.09 | 2.32 | -1.49 | 20.19 |
| 25 | 40.90 | 35 | 0.30 | 1.36 | 27.96 | 23.00 | 5526.98 | 4.96 | 36.72 | 1.85 | 1.28 | 2.66 | 2.24 | 39.79 |
| 26 | 41.07 | 35 | 0.30 | 1.36 | 27.52 | 22.86 | 5475.18 | 5.12 | 37.02 | -0.79 | 1.40 | 2.90 | 0.59 | 35.99 |
| 27 | 41.77 | 35.15 | 0.30 | 1.36 | 27.46 | 23.18 | 5422.40 | 5.16 | 36.85 | 2.02 | 1.42 | 2.95 | 2.38 | 40.45 |
| 28 | 41.80 | 36.175 | 0.30 | 1.36 | 27.55 | 23.58 | 5366.86 | 5.32 | 40.12 | 0.20 | 1.44 | 3.07 | 1.36 | 40.87 |
| 29 | 42.29 | 36.36 | 0.30 | 1.36 | 26.43 | 23.26 | 5314.39 | 5.42 | 41.64 | 0.99 | 1.60 | 3.41 | 1.77 | 43.99 |
| 30 | 42.69 | 35.98 | 0.30 | 1.36 | 25.04 | 22.33 | 5260.15 | 5.54 | 42.13 | -0.02 | 1.80 | 3.85 | 1.21 | 43.43 |
| 31 | 42.09 | 35.71 | 0.30 | 1.36 | 23.83 | 21.81 | 5202.08 | 5.62 | 42.18 | -5.41 | 1.97 | 4.20 | -2.13 | 35.19 |
| 32 | 42.18 | 35.58 | 0.30 | 1.36 | 23.66 | 21.35 | 5146.51 | 5.48 | 42.66 | -1.50 | 1.93 | 4.12 | 0.30 | 42.04 |
| 33 | 42.94 | 35.67 | 0.30 | 1.36 | 23.96 | 21.52 | 5090.86 | 5.50 | 42.64 | 1.99 | 1.91 | 4.06 | 2.62 | 47.72 |
| 34 | 43.10 | 36.83 | 0.30 | 1.36 | 23.66 | 21.32 | 5031.95 | 5.68 | 47.98 | -0.53 | 2.01 | 4.29 | 1.12 | 49.19 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 35 | 43.06 | 36.1 | 0.30 | 1.36 | 23.48 | 21.43 | 4977.06 | 5.75 | 44.62 | -2.66 | 2.06 | 4.40 | -0.44 | 42.23 |
| 36 | 43.29 | 35.98 | 0.30 | 1.36 | 23.46 | 21.59 | 4919.64 | 5.72 | 43.75 | -1.02 | 2.05 | 4.38 | 0.75 | 44.19 |
| 37 | 43.86 | 37.03 | 0.30 | 1.36 | 23.61 | 22.09 | 4861.19 | 5.78 | 47.12 | 1.39 | 2.06 | 4.39 | 2.45 | 51.63 |
| 38 | 43.87 | 37.11 | 0.30 | 1.36 | 23.40 | 21.85 | 4804.37 | 5.94 | 48.01 | -1.99 | 2.15 | 4.58 | 0.12 | 46.93 |
| 39 | 43.27 | 37.64 | 0.30 | 1.36 | 24.34 | 22.05 | 4747.89 | 5.95 | 49.98 | -4.70 | 2.05 | 4.37 | -1.77 | 43.97 |
| 40 | 44.06 | 36.21 | 0.30 | 1.36 | 26.76 | 22.34 | 4697.41 | 5.83 | 43.07 | 1.18 | 1.73 | 3.69 | 2.08 | 45.92 |
| 41 | 45.64 | 36.36 | 0.30 | 1.36 | 27.35 | 22.25 | 4637.81 | 5.97 | 43.86 | 5.33 | 1.72 | 3.68 | 5.42 | 54.02 |
| 42 | 45.89 | 36.16 | 0.30 | 1.36 | 28.19 | 22.98 | 4570.51 | 6.35 | 41.33 | -2.19 | 1.79 | 3.80 | 0.49 | 38.87 |
| 43 | 46.00 | 36.75 | 0.30 | 1.36 | 28.94 | 23.46 | 4501.43 | 6.38 | 42.75 | -1.28 | 1.70 | 3.65 | 1.20 | 41.64 |
| 44 | 46.55 | 36.37 | 0.28 | 1.36 | 29.36 | 23.47 | 4433.96 | 6.47 | 41.07 | -1.56 | 1.72 | 3.62 | 0.98 | 39.37 |
| 45 | 46.72 | 37.85 | 0.28 | 1.36 | 29.31 | 23.16 | 4364.03 | 6.53 | 48.33 | -1.25 | 1.75 | 3.69 | 1.34 | 47.34 |
| 46 | 46.24 | 37.05 | 0.28 | 1.36 | 29.29 | 23.24 | 4299.33 | 6.63 | 44.58 | -5.31 | 1.79 | 3.78 | -1.88 | 36.33 |
| 47 | 46.41 | 37.18 | 0.28 | 1.36 | 28.58 | 23.09 | 4234.85 | 6.50 | 45.48 | -1.83 | 1.82 | 3.84 | 0.70 | 43.51 |
| 48 | 46.54 | 35.16 | 0.28 | 1.36 | 27.41 | 22.51 | 4171.15 | 6.54 | 38.27 | -3.27 | 1.97 | 4.15 | -0.38 | 34.19 |
| 49 | 46.40 | 37.05 | 0.31 | 1.55 | 26.27 | 22.40 | 4100.85 | 6.52 | 53.14 | -1.87 | 2.05 | 4.40 | 1.02 | 52.22 |
| 50 | 47.14 | 36.91 | 0.31 | 1.55 | 25.41 | 21.89 | 4037.67 | 6.59 | 53.69 | 0.41 | 2.17 | 4.66 | 2.52 | 56.86 |
| 51 | 48.45 | 38.34 | 0.31 | 1.55 | 25.66 | 22.12 | 3970.94 | 6.76 | 60.45 | 3.30 | 2.21 | 4.75 | 5.07 | 69.02 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 52 | 49.09 | 36.68 | 0.31 | 1.55 | 25.70 | 22.13 | 3902.78 | | 51.84 | -1.30 | 2.35 | 5.05 | 1.56 | 59.50 |
| 53 | 50.47 | 36.22 | 0.31 | 1.55 | 25.16 | 21.17 | 3844.14 | | 51.95 | 1.60 | 2.45 | 5.27 | 4.43 | 65.70 |
| 54 | 51.46 | 37.53 | 0.31 | 1.55 | 24.64 | 20.83 | 3777.64 | | 59.28 | 0.26 | 2.63 | 5.66 | 3.91 | 71.74 |
| 55 | 52.02 | 38.92 | 0.31 | 1.55 | 24.22 | 20.69 | 3710.74 | | 66.98 | -1.54 | 2.79 | 5.99 | 2.56 | 76.78 |
| 56 | 53.53 | 38.79 | 0.31 | 1.55 | 23.68 | 20.88 | 3646.18 | | 65.71 | 1.34 | 2.92 | 6.27 | 5.02 | 81.24 |
| 57 | 53.95 | 39.92 | 0.31 | 1.55 | 22.04 | 20.47 | 3573.60 | | 73.00 | -2.83 | 3.23 | 6.95 | 2.03 | 82.38 |
| 58 | 54.15 | 40.03 | 0.31 | 1.55 | 20.59 | 19.59 | 3503.44 | | 75.69 | -4.03 | 3.45 | 7.42 | 0.87 | 83.40 |
| 59 | 54.53 | 38.83 | 0.30 | 1.55 | 20.37 | 19.11 | 3433.80 | | 70.01 | -4.16 | 3.51 | 7.52 | 0.76 | 77.64 |
| 60 | 55.03 | 40.03 | 0.30 | 1.55 | 20.60 | 19.32 | 3360.04 | | 76.28 | -2.89 | 3.50 | 7.51 | 2.27 | 86.68 |
| 61 | 55.20 | 39.6 | 0.30 | 1.55 | 21.45 | 19.96 | 3288.51 | | 72.33 | -4.56 | 3.47 | 7.44 | 0.60 | 79.28 |
| 62 | 55.79 | 39.49 | 0.30 | 1.55 | 22.26 | 20.45 | 3216.24 | | 70.52 | -3.12 | 3.40 | 7.29 | 2.13 | 80.22 |
| 63 | 55.64 | 39 | 0.30 | 1.55 | 22.48 | 20.33 | 3141.82 | | 68.07 | -5.90 | 3.43 | 7.37 | -0.45 | 72.52 |
| 64 | 55.75 | 39.25 | 0.30 | 1.55 | 24.11 | 19.38 | 3068.67 | | 71.73 | -4.71 | 3.24 | 6.95 | 0.68 | 77.90 |
| 65 | 55.42 | 39.2 | 0.30 | 1.55 | 24.75 | 19.05 | 2997.27 | | 72.26 | -6.05 | 3.19 | 6.84 | -0.87 | 75.38 |
| 66 | 55.48 | 38.31 | | 1.55 | 26.38 | 19.92 | 2929.17 | | 65.43 | -5.79 | 3.05 | 6.40 | -0.89 | 68.20 |
| 67 | 57.18 | 38.23 | 0.26 | 1.55 | 27.60 | 20.25 | 2861.76 | | 64.15 | 0.17 | 2.88 | 6.06 | 5.78 | 79.04 |
| 68 | 57.42 | 39.49 | 0.26 | 1.55 | 27.92 | 20.81 | 2787.08 | | 69.69 | -4.30 | 3.01 | 6.33 | 1.51 | 76.24 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 69 | 58.52 | 39.74 | 0.26 | 1.55 | 27.93 | 20.81 | 2715.97 | | 71.06 | -2.10 | 3.05 | 6.42 | 3.94 | 82.37 |
| 70 | 59.88 | 39.84 | 0.26 | 1.55 | 27.61 | 21.33 | 2641.59 | | 70.25 | -2.76 | 3.25 | 6.73 | 3.67 | 81.15 |
| 71 | 59.89 | 39.21 | 0.26 | 1.55 | 26.15 | 21.65 | 2564.16 | | 65.84 | -6.22 | 3.55 | 7.30 | -0.23 | 70.24 |
| 72 | 59.32 | 39.67 | 0.26 | 1.55 | 23.53 | 21.16 | 2488.40 | | 69.65 | -6.83 | 3.85 | 7.90 | -1.23 | 73.33 |
| 73 | 59.17 | 39.08 | 0.26 | 1.55 | 22.13 | 19.98 | 2418.55 | | 69.16 | -5.63 | 3.97 | 8.16 | -0.30 | 75.36 |
| 74 | 59.40 | 43.54 | 0.26 | 0.78 | 21.74 | 19.49 | 2350.28 | | 49.23 | -3.40 | 4.01 | 8.23 | 2.68 | 60.75 |
| 75 | 60.49 | 44.36 | 0.33 | 0.78 | 21.47 | 19.87 | 2291.99 | | 51.64 | -1.75 | 4.11 | 8.45 | 4.13 | 66.60 |
| 76 | 60.92 | 44.84 | 0.33 | 0.78 | 21.02 | 19.15 | 2231.93 | | 54.23 | -3.33 | 4.25 | 8.81 | 2.21 | 66.17 |
| 77 | 60.34 | 44.68 | 0.33 | 0.78 | 20.34 | 18.78 | 2172.06 | | 54.08 | -5.91 | 4.39 | 9.10 | -1.70 | 59.96 |
| 78 | 60.51 | 45.49 | 0.33 | 0.78 | 19.04 | 18.04 | 2116.31 | | 57.92 | -3.95 | 4.53 | 9.30 | 0.82 | 68.62 |
| 79 | 61.22 | 45.61 | 0.33 | 0.78 | 18.64 | 17.53 | 2063.54 | | 58.92 | -2.64 | 4.60 | 9.45 | 2.63 | 72.95 |
| 80 | 61.68 | 46.21 | 0.33 | 0.78 | 18.54 | 17.16 | 2009.36 | | 61.63 | -3.22 | 4.68 | 9.63 | 2.00 | 74.72 |
| 81 | 61.93 | 45.25 | 0.33 | 0.78 | 18.34 | 17.15 | 1956.00 | | 57.92 | -3.93 | 4.76 | 9.80 | 0.76 | 69.31 |
| 82 | 61.88 | 46.93 | 0.33 | 0.78 | 17.37 | 16.50 | 1901.26 | | 65.22 | -4.11 | 4.90 | 10.07 | 0.69 | 76.77 |
| 83 | 62.92 | 45.03 | 0.33 | 0.78 | 17.39 | 16.43 | 1851.79 | | 57.82 | -2.41 | 4.91 | 10.11 | 3.12 | 73.54 |
| 84 | 62.94 | 45.4 | 0.33 | 0.78 | 17.23 | 16.26 | 1795.87 | | 59.38 | -4.39 | 5.02 | 10.33 | 0.53 | 70.86 |
| 85 | 63.64 | 43.7 | 0.33 | 0.78 | 17.56 | 16.28 | 1742.49 | | 53.15 | -3.37 | 5.00 | 10.28 | 2.20 | 67.26 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 86 | 63.64 | 45.26 | 0.33 | 0.78 | 19.25 | 17.21 | 1685.44 | | 57.85 | -4.44 | 4.87 | 10.01 | 0.78 | 69.07 |
| 87 | 63.96 | 45.26 | 0.33 | 0.78 | 21.99 | 18.18 | 1633.07 | | 56.81 | -3.78 | 4.57 | 9.42 | 1.42 | 68.44 |
| 88 | 64.13 | 45.44 | 0.33 | 0.78 | 23.84 | 18.20 | 1581.51 | | 57.49 | -3.97 | 4.40 | 9.06 | 0.95 | 67.94 |
| 89 | 65.14 | 45.48 | 0.33 | 0.78 | 21.21 | 19.13 | 1531.66 | | 56.53 | -2.67 | 4.73 | 9.74 | 3.76 | 72.09 |
| 90 | 65.97 | 45.51 | 0.33 | 0.78 | 19.74 | 18.03 | 1480.17 | | 57.85 | -3.17 | 5.01 | 10.31 | 3.22 | 73.22 |
| 91 | 66.48 | 43.34 | 0.33 | 0.78 | 19.74 | 18.03 | 1427.90 | | 49.98 | -3.94 | 5.10 | 10.50 | 1.69 | 63.33 |
| 92 | 66.00 | 43.15 | 0.33 | 0.78 | 18.91 | 17.64 | 1373.66 | | 49.76 | -5.25 | 5.24 | 10.80 | -1.24 | 59.31 |
| 93 | 66.00 | 43.35 | 0.33 | 0.78 | 18.25 | 17.27 | 1323.79 | | 50.84 | -3.81 | 5.10 | 10.88 | 1.65 | 64.65 |
| 94 | 68.25 | 43.35 | 0.33 | 0.78 | 17.87 | 16.86 | 1275.48 | | 51.20 | -1.53 | 5.21 | 11.07 | 8.26 | 74.21 |
| 95 | 69.19 | 44.88 | 0.33 | 0.78 | 16.91 | 16.19 | 1222.13 | | 57.31 | -3.63 | 5.54 | 11.79 | 3.95 | 74.96 |
| 96 | 70.14 | 45.28 | 0.33 | 0.78 | 16.54 | 15.69 | 1170.37 | | 59.29 | -3.94 | 5.85 | 12.11 | 2.90 | 76.21 |
| 97 | 70.18 | 45.88 | 0.33 | 0.78 | 16.75 | 15.62 | 1120.24 | | 61.65 | -4.49 | 5.90 | 12.24 | 0.76 | 76.06 |
| 98 | 71.18 | 50.91 | 0.33 | 0.19 | 15.92 | 15.15 | 1074.02 | | 20.81 | -3.09 | 6.02 | 12.47 | 4.77 | 40.98 |
| 99 | 71.62 | 50.67 | 0.33 | 0.19 | 15.40 | 14.72 | 1032.48 | | 20.61 | -3.49 | 6.22 | 12.88 | 1.93 | 38.14 |
| 100 | 72.05 | 51.45 | 0.35 | 0.19 | 15.76 | 14.61 | 992.24 | | 21.61 | -3.23 | 6.06 | 12.91 | 2.74 | 40.10 |
| 101 | 72.68 | 51.39 | 0.35 | 0.19 | 17.65 | 15.68 | 953.73 | | 21.27 | -3.17 | 5.93 | 12.63 | 2.62 | 39.29 |
| 102 | 73.33 | 52.17 | 0.35 | 0.19 | 20.90 | 16.74 | 916.34 | | 22.02 | -3.09 | 5.64 | 12.02 | 2.80 | 39.40 |

**ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.สหใบยาสูบไทย จำกัด (ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 103 | 73.16 | 52.06 | 0.35 | 0.19 | 23.57 | 17.51 | 880.87 | | 21.68 | -3.58 | 5.42 | 11.55 | -0.32 | 34.76 |
| 104 | 74.06 | 51.67 | 0.35 | 0.19 | 25.08 | 17.75 | 848.94 | | 21.10 | -2.50 | 5.25 | 11.18 | 3.60 | 38.63 |
| 105 | 74.42 | 50.6 | 0.35 | 0.19 | 26.52 | 18.32 | 817.33 | | 19.60 | -2.90 | 5.18 | 11.05 | 1.57 | 34.51 |
| 106 | 74.85 | 50.96 | 0.35 | 0.19 | 27.73 | 19.06 | 787.34 | | 19.84 | -2.70 | 5.09 | 10.86 | 1.97 | 35.06 |
| 107 | 74.76 | 52.16 | 0.35 | 0.19 | 28.04 | 19.35 | 759.68 | | 21.31 | -2.80 | 5.11 | 10.90 | 0.04 | 34.56 |
| 108 | 74.78 | 52.07 | 0.35 | 0.19 | 28.05 | 19.34 | 735.79 | | 21.19 | -2.38 | 5.11 | 10.90 | 0.31 | 35.14 |
| 109 | 76.02 | 52.09 | 0.35 | 0.19 | 27.04 | 19.18 | 714.38 | | 21.25 | -1.49 | 5.23 | 11.16 | 4.92 | 41.08 |
| 110 | 76.87 | 50.98 | 0.35 | 0.19 | 24.75 | 19.71 | 693.16 | | 19.65 | -1.74 | 5.62 | 12.00 | 3.45 | 38.99 |
| 111 | 76.93 | 49.7 | 0.35 | 0.19 | 23.05 | 19.42 | 672.71 | | 18.19 | -2.08 | 5.91 | 12.60 | 0.43 | 35.05 |
| 112 | 77.07 | 49.7 | 0.35 | 0.19 | 21.01 | 18.71 | 654.56 | | 18.38 | -1.81 | 6.15 | 13.11 | 0.76 | 36.59 |
| 113 | 77.59 | 48.6 | 0.35 | 0.19 | 19.91 | 17.85 | 638.74 | | 17.36 | -1.41 | 6.29 | 13.42 | 2.19 | 37.85 |
| 114 | 78.05 | 48.6 | 0.35 | 0.19 | 19.29 | 17.43 | 624.32 | | 17.47 | -1.31 | 6.42 | 13.69 | 1.97 | 38.24 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 1 | 34.73 | 32.25 | 0.20 | 1.26 | 23.32 | 22.03 | 5407.00 | 3.63 | 26.74 | 0.60 | 0.80 | 1.58 | 0.15 | 26.24 |
| 2 | 34.78 | 32.25 | 0.20 | 1.26 | 23.62 | 22.00 | 5377.14 | 4.03 | 26.79 | -0.25 | 1.27 | 2.51 | 0.17 | 26.46 |
| 3 | 35.22 | 32.86 | 0.20 | 1.26 | 22.67 | 21.89 | 5346.76 | 4.04 | 29.02 | 2.15 | 1.39 | 2.75 | 1.81 | 33.08 |
| 4 | 35.91 | 33.19 | 0.20 | 1.26 | 22.09 | 21.36 | 5316.77 | 4.08 | 31.21 | 3.29 | 1.51 | 2.99 | 2.59 | 37.51 |
| 5 | 35.36 | 33.41 | 0.20 | 1.26 | 21.84 | 21.08 | 5285.70 | 4.14 | 32.55 | -3.29 | 1.61 | 3.20 | -1.87 | 28.07 |
| 6 | 35.50 | 32.50 | 0.20 | 1.26 | 21.34 | 20.90 | 5256.43 | 4.10 | 29.82 | -0.22 | 1.62 | 3.21 | 0.17 | 30.51 |
| 7 | 35.34 | 32.78 | 0.20 | 1.26 | 20.94 | 20.50 | 5224.99 | 4.10 | 31.55 | -1.26 | 1.67 | 3.32 | -0.47 | 30.70 |
| 8 | 35.23 | 33.01 | 0.20 | 1.26 | 20.42 | 20.16 | 5194.70 | 4.09 | 32.97 | -0.96 | 1.72 | 3.41 | -0.30 | 32.74 |
| 9 | 35.54 | 32.50 | 0.20 | 1.26 | 19.56 | 19.34 | 5165.36 | 4.08 | 32.82 | 0.93 | 1.81 | 3.60 | 0.98 | 36.05 |
| 10 | 35.15 | 32.32 | 0.20 | 1.26 | 19.71 | 19.18 | 5134.23 | 4.10 | 32.56 | -2.67 | 1.82 | 3.62 | -1.45 | 29.77 |
| 11 | 35.56 | 32.32 | 0.20 | 1.26 | 19.61 | 19.32 | 5103.70 | 4.07 | 32.25 | 1.59 | 1.79 | 3.56 | 1.48 | 36.59 |
| 12 | 35.27 | 32.25 | 0.20 | 1.26 | 19.31 | 18.90 | 5072.44 | 4.10 | 32.81 | -2.11 | 1.87 | 3.72 | -1.06 | 31.12 |
| 13 | 36.23 | 31.71 | 0.20 | 1.26 | 19.08 | 18.86 | 5041.71 | 4.08 | 31.11 | 4.14 | 1.86 | 3.71 | 3.28 | 40.02 |
| 14 | 36.50 | 32.39 | 0.20 | 1.26 | 18.97 | 18.60 | 5007.77 | 4.16 | 33.77 | 0.99 | 1.97 | 3.93 | 1.20 | 37.70 |
| 15 | 36.70 | 32.70 | 0.20 | 1.26 | 18.47 | 18.44 | 4974.42 | 4.19 | 35.09 | 0.49 | 2.07 | 4.12 | 0.83 | 38.40 |
| 16 | 36.50 | 31.60 | 0.21 | 1.72 | 19.36 | 18.68 | 4941.27 | 4.21 | 42.29 | -2.19 | 1.98 | 3.95 | -1.06 | 40.77 |
| 17 | 36.32 | 31.75 | 0.21 | 1.72 | 19.46 | 19.18 | 4906.43 | 4.18 | 41.70 | -1.58 | 1.94 | 3.87 | -0.59 | 41.16 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 18 | 37.37 | 31.63 | 0.21 | 1.72 | 20.09 | 19.48 | 4872.61 | 4.17 | 40.37 | 4.53 | 1.85 | 3.68 | 3.73 | 50.00 |
| 19 | 37.50 | 32.34 | 0.21 | 1.72 | 21.81 | 20.34 | 4836.26 | 4.25 | 41.29 | 0.16 | 1.75 | 3.50 | 0.73 | 43.18 |
| 20 | 37.00 | 31.80 | 0.21 | 1.72 | 23.01 | 21.38 | 4800.81 | 4.27 | 36.11 | -3.21 | 1.61 | 3.26 | -1.72 | 31.77 |
| 21 | 37.50 | 31.84 | 0.21 | 1.72 | 24.73 | 22.18 | 4765.48 | 4.23 | 34.06 | 1.74 | 1.36 | 2.75 | 1.83 | 37.52 |
| 22 | 37.64 | 32.47 | 0.21 | 1.72 | 25.50 | 22.32 | 4729.38 | 4.27 | 36.47 | 0.11 | 1.32 | 2.68 | 0.70 | 37.00 |
| 25 | 37.59 | 32.42 | 0.21 | 1.72 | 25.62 | 22.72 | 4694.22 | 4.29 | 35.09 | -1.07 | 1.33 | 2.69 | -0.18 | 33.56 |
| 24 | 37.36 | 32.40 | 0.21 | 1.72 | 27.33 | 23.31 | 4659.21 | 4.29 | 33.29 | -1.94 | 1.12 | 2.28 | -0.83 | 29.64 |
| 25 | 37.49 | 31.75 | 0.21 | 1.72 | 27.26 | 23.27 | 4624.93 | 4.27 | 30.51 | -0.46 | 1.11 | 2.24 | 0.23 | 29.37 |
| 26 | 37.44 | 31.12 | 0.21 | 1.72 | 26.47 | 22.96 | 4589.41 | 4.27 | 28.73 | -1.30 | 1.21 | 2.45 | -0.33 | 26.49 |
| 27 | 37.07 | 31.39 | 0.21 | 1.72 | 24.29 | 22.25 | 4553.04 | 4.26 | 31.90 | -2.60 | 1.46 | 2.94 | -1.26 | 28.17 |
| 28 | 38.89 | 33.60 | 0.22 | 1.35 | 22.64 | 21.27 | 4518.27 | 4.23 | 35.03 | 8.77 | 1.62 | 3.25 | 7.11 | 51.56 |
| 29 | 39.50 | 33.59 | 0.22 | 1.35 | 21.15 | 20.72 | 4483.77 | 4.47 | 36.14 | 2.08 | 2.01 | 4.03 | 2.19 | 41.98 |
| 30 | 39.36 | 33.87 | 0.22 | 1.35 | 20.79 | 20.29 | 4447.01 | 4.62 | 38.10 | -1.47 | 2.11 | 4.25 | -0.40 | 37.96 |
| 31 | 39.50 | 34.39 | 0.22 | 1.35 | 20.84 | 20.42 | 4410.79 | 4.59 | 39.78 | 0.01 | 2.09 | 4.21 | 0.68 | 42.19 |
| 32 | 40.45 | 34.67 | 0.22 | 1.35 | 20.66 | 20.33 | 4375.58 | 4.64 | 41.03 | 3.75 | 2.14 | 4.29 | 3.48 | 50.05 |
| 33 | 41.64 | 33.78 | 0.22 | 1.35 | 20.49 | 19.82 | 4338.62 | 4.87 | 38.64 | 4.28 | 2.26 | 4.54 | 3.98 | 48.83 |
| 34 | 41.40 | 34.24 | 0.22 | 1.35 | 20.10 | 19.76 | 4296.25 | 5.13 | 40.50 | -2.15 | 2.42 | 4.87 | -0.70 | 39.81 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 35 | 41.97 | 34.28 | 0.22 | 1.35 | 20.22 | 19.62 | 4254.67 | 5.08 | 40.94 | 1.55 | 2.38 | 4.80 | 2.07 | 46.66 |
| 36 | 43.15 | 33.92 | 0.22 | 1.35 | 19.64 | 19.20 | 4212.20 | 5.22 | 40.35 | 4.03 | 2.51 | 5.06 | 4.06 | 50.79 |
| 37 | 43.82 | 33.71 | 0.22 | 1.35 | 19.54 | 19.12 | 4165.81 | 5.49 | 39.69 | 1.56 | 2.64 | 5.32 | 2.35 | 46.08 |
| 38 | 46.50 | 38.50 | 0.22 | 1.35 | 19.36 | 18.92 | 4116.62 | 5.64 | 60.16 | 12.12 | 2.76 | 5.51 | 10.74 | 85.64 |
| 39 | 46.50 | 37.99 | 0.22 | 1.35 | 19.41 | 18.91 | 4069.24 | 6.35 | 57.82 | -1.70 | 3.06 | 6.14 | -0.10 | 58.86 |
| 40 | 46.50 | 37.92 | 0.22 | 1.35 | 19.21 | 18.79 | 4018.49 | 6.34 | 57.72 | -1.62 | 3.08 | 6.18 | 0.01 | 59.02 |
| 41 | 47.60 | 38.24 | 0.22 | 1.35 | 20.04 | 19.57 | 3968.12 | 6.34 | 57.59 | 3.29 | 2.98 | 5.98 | 3.93 | 67.43 |
| 42 | 49.50 | 38.19 | 0.22 | 1.35 | 21.00 | 20.18 | 3915.64 | | 56.03 | 6.24 | 2.98 | 5.99 | 6.50 | 77.74 |
| 43 | 48.99 | 38.19 | 0.22 | 1.35 | 21.55 | 20.39 | 3881.25 | | 55.63 | -4.31 | 3.11 | 6.25 | -1.67 | 58.99 |
| 44 | 48.50 | 38.27 | 0.22 | 1.35 | 21.70 | 20.68 | 3848.76 | | 55.44 | -4.05 | 3.04 | 6.11 | -1.59 | 58.96 |
| 45 | 50.00 | 38.23 | 0.22 | 1.35 | 22.66 | 21.21 | 3818.20 | | 54.06 | 4.23 | 2.88 | 5.79 | 5.14 | 72.11 |
| 46 | 50.50 | 37.89 | 0.22 | 1.35 | 24.59 | 21.82 | 3783.17 | | 51.16 | -0.06 | 2.78 | 5.64 | 1.89 | 61.42 |
| 47 | 50.10 | 38.23 | 0.22 | 1.35 | 24.97 | 21.82 | 3746.00 | | 52.75 | -3.88 | 2.79 | 5.66 | -1.18 | 56.15 |
| 48 | 50.42 | 37.91 | 0.22 | 1.35 | 24.23 | 21.30 | 3711.09 | | 52.40 | -0.98 | 2.84 | 5.77 | 1.15 | 61.18 |
| 49 | 50.72 | 37.86 | 0.21 | 1.70 | 24.64 | 21.88 | 3674.83 | | 63.87 | -1.18 | 2.82 | 5.74 | 1.08 | 72.33 |
| 50 | 50.59 | 37.22 | 0.21 | 1.70 | 24.75 | 22.01 | 3637.88 | | 59.88 | -3.15 | 2.84 | 5.78 | -0.58 | 64.77 |
| 51 | 50.75 | 37.00 | 0.21 | 1.70 | 22.80 | 21.94 | 3600.58 | | 58.82 | -1.88 | 3.05 | 6.20 | 0.55 | 66.75 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 52 | 50.90 | 36.82 | 0.21 | 1.70 | 21.90 | 21.21 | 3562.79 | | 59.85 | -1.94 | 3.17 | 6.45 | 0.54 | 68.07 |
| 53 | 50.50 | 36.44 | 0.21 | 1.70 | 20.65 | 20.49 | 3524.65 | | 59.69 | -4.14 | 3.33 | 6.78 | -1.41 | 64.25 |
| 54 | 50.40 | 37.29 | 0.21 | 1.70 | 20.07 | 19.70 | 3498.12 | | 66.39 | -2.51 | 3.36 | 6.83 | -0.02 | 74.04 |
| 55 | 50.04 | 34.79 | 0.21 | 1.70 | 19.61 | 19.25 | 3858.96 | | 54.43 | -4.31 | 3.41 | 6.94 | -1.81 | 58.65 |
| 56 | 50.65 | 35.69 | 0.21 | 1.70 | 18.93 | 18.87 | 3414.89 | | 59.86 | 0.11 | 3.43 | 6.99 | 2.44 | 72.83 |
| 57 | 50.89 | 35.59 | 0.21 | 1.70 | 18.84 | 18.55 | 3377.29 | | 60.12 | -1.59 | 3.51 | 7.16 | 0.88 | 70.08 |
| 58 | 50.64 | 34.62 | 0.21 | 1.70 | 18.39 | 18.23 | 3339.26 | | 56.05 | -3.65 | 3.59 | 7.32 | -1.04 | 62.27 |
| 59 | 50.89 | 36.11 | 0.21 | 1.70 | 18.31 | 17.96 | 3301.01 | | 64.25 | -1.19 | 3.57 | 7.27 | 1.34 | 75.24 |
| 60 | 50.52 | 34.20 | 0.21 | 1.70 | 18.48 | 18.12 | 3264.65 | | 54.29 | -4.19 | 3.59 | 7.31 | -1.70 | 59.29 |
| 61 | 53.32 | 34.58 | 0.21 | 1.70 | 17.60 | 17.68 | 3227.06 | | 57.00 | 7.01 | 3.68 | 7.42 | 9.50 | 84.61 |
| 62 | 56.65 | 36.44 | 0.21 | 1.70 | 17.67 | 17.58 | 3182.61 | | 50.00 | 8.60 | 3.94 | 7.97 | 11.88 | 82.39 |
| 63 | 56.51 | 36.28 | 0.21 | 1.70 | 17.90 | 17.54 | 3130.56 | | 65.85 | -3.79 | 4.22 | 8.62 | 0.09 | 74.98 |
| 64 | 57.84 | 36.41 | 0.21 | 1.70 | 18.31 | 17.93 | 3079.21 | | 65.56 | 0.19 | 4.21 | 8.53 | 4.21 | 82.70 |
| 65 | 57.49 | 35.66 | 0.21 | 1.70 | 18.76 | 18.38 | 3024.78 | | 60.58 | -4.79 | 4.25 | 8.67 | -0.71 | 68.00 |
| 66 | 57.24 | 36.57 | 0.21 | 1.70 | 20.48 | 19.52 | 2971.12 | | 62.58 | -4.47 | 4.03 | 8.22 | -0.45 | 69.91 |
| 67 | 58.02 | 35.09 | 0.22 | 1.84 | 22.31 | 20.34 | 2920.43 | | 57.30 | -1.48 | 3.79 | 7.77 | 2.61 | 69.98 |
| 68 | 58.11 | 35.89 | 0.22 | 1.84 | 23.69 | 21.25 | 2866.08 | | 59.12 | -3.55 | 3.71 | 7.60 | 0.69 | 67.57 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 69 | 58.65 | 37.84 | 0.22 | 1.84 | 25.23 | 21.80 | 2813.43 | | 69.01 | -1.92 | 3.55 | 7.27 | 2.46 | 80.37 |
| 70 | 59.50 | 36.00 | 0.22 | 1.84 | 26.69 | 22.41 | 2762.38 | | 56.23 | -1.73 | 3.45 | 7.07 | 2.64 | 67.66 |
| 71 | 59.15 | 36.82 | 0.22 | 1.84 | 27.24 | 22.60 | 2707.22 | | 60.40 | -4.84 | 3.45 | 7.10 | -0.63 | 65.47 |
| 72 | 59.43 | 37.49 | 0.22 | 1.84 | 28.49 | 23.35 | 2655.18 | | 62.06 | -3.03 | 3.29 | 6.77 | 1.29 | 70.38 |
| 73 | 59.38 | 36.31 | 0.22 | 1.84 | 29.07 | 23.68 | 2604.06 | | 54.01 | -4.20 | 3.26 | 6.71 | -0.23 | 59.55 |
| 74 | 60.16 | 36.56 | 0.22 | 1.84 | 27.48 | 23.90 | 2552.84 | | 54.65 | -1.77 | 3.44 | 7.07 | 2.92 | 66.30 |
| 75 | 60.34 | 38.14 | 0.22 | 1.84 | 26.25 | 23.10 | 2500.44 | | 66.76 | -3.31 | 3.66 | 7.53 | 1.14 | 75.79 |
| 76 | 61.15 | 36.20 | 0.22 | 1.84 | 24.37 | 22.63 | 2450.35 | | 56.52 | -2.10 | 3.91 | 8.04 | 2.59 | 68.96 |
| 77 | 61.67 | 34.90 | 0.22 | 1.84 | 22.21 | 21.31 | 2396.68 | | 53.25 | -3.07 | 4.23 | 8.71 | 1.77 | 64.90 |
| 78 | 63.36 | 35.98 | 0.22 | 1.84 | 21.54 | 20.85 | 2341.38 | | 60.45 | -0.19 | 4.36 | 8.97 | 6.19 | 79.79 |
| 79 | 66.26 | 37.85 | 0.22 | 1.84 | 21.39 | 20.49 | 2282.81 | | 72.41 | 1.85 | 4.59 | 9.38 | 9.96 | 98.18 |
| 80 | 66.28 | 37.23 | 0.22 | 1.84 | 20.90 | 20.04 | 2217.50 | | 69.90 | -5.46 | 4.93 | 10.09 | 0.35 | 79.80 |
| 81 | 66.73 | 36.99 | 0.22 | 1.84 | 20.70 | 19.83 | 2153.58 | | 69.03 | -4.41 | 4.96 | 10.16 | 1.83 | 81.56 |
| 82 | 66.48 | 37.74 | 0.22 | 1.84 | 20.35 | 19.29 | 2089.84 | | 75.02 | -5.78 | 5.05 | 10.35 | -0.30 | 84.35 |
| 83 | 68.53 | 42.07 | 0.23 | 0.61 | 20.35 | 19.47 | 2029.69 | | 34.67 | -0.55 | 5.05 | 10.33 | 8.01 | 57.51 |
| 84 | 68.63 | 42.30 | 0.23 | 0.61 | 19.94 | 19.12 | 1967.87 | | 35.58 | -5.14 | 5.32 | 10.90 | 0.79 | 47.47 |
| 85 | 71.08 | 44.48 | 0.23 | 0.61 | 20.22 | 19.16 | 1908.01 | | 41.37 | -0.84 | 5.37 | 10.88 | 8.38 | 65.16 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 86 | 74.61 | 45.41 | 0.23 | 0.61 | 20.04 | 19.31 | 1843.44 | | 43.89 | 0.22 | 5.63 | 11.42 | 11.91 | 73.07 |
| 87 | 75.05 | 45.20 | 0.23 | 0.61 | 19.42 | 18.81 | 1767.11 | | 43.70 | -6.43 | 6.05 | 12.28 | 2.05 | 57.65 |
| 88 | 75.64 | 45.71 | 0.23 | 0.61 | 19.60 | 18.98 | 1692.08 | | 45.06 | -6.11 | 6.09 | 12.36 | 2.69 | 60.08 |
| 89 | 75.76 | 43.68 | 0.23 | 0.61 | 20.17 | 19.14 | 1618.45 | | 39.06 | -6.99 | 6.10 | 12.39 | 0.73 | 51.28 |
| 90 | 75.84 | 43.00 | 0.23 | 0.61 | 21.86 | 20.10 | 1546.49 | | 36.35 | -6.78 | 5.92 | 12.03 | 0.91 | 48.44 |
| 91 | 75.63 | 43.14 | 0.23 | 0.61 | 23.46 | 21.15 | 1477.54 | | 35.74 | -6.85 | 5.76 | 11.71 | 0.09 | 46.44 |
| 92 | 75.63 | 43.63 | 0.23 | 0.61 | 25.96 | 21.95 | 1413.29 | | 36.28 | -6.02 | 5.44 | 11.12 | 1.06 | 47.88 |
| 93 | 76.58 | 43.57 | 0.22 | 0.31 | 27.47 | 23.04 | 1352.54 | | 17.48 | -4.74 | 5.30 | 10.83 | 3.79 | 32.67 |
| 94 | 76.90 | 44.81 | 0.22 | 0.31 | 27.87 | 23.08 | 1291.67 | | 19.20 | -5.45 | 5.33 | 10.96 | 2.20 | 32.25 |
| 95 | 76.82 | 44.91 | 0.22 | 0.31 | 28.49 | 23.34 | 1233.67 | | 19.21 | -5.82 | 5.32 | 10.94 | 0.37 | 30.02 |
| 96 | 76.89 | 44.87 | 0.22 | 0.31 | 29.04 | 23.65 | 1179.73 | | 18.99 | -5.29 | 5.27 | 10.84 | 0.81 | 30.62 |
| 97 | 76.92 | 44.50 | 0.22 | 0.31 | 29.20 | 23.48 | 1129.05 | | 18.55 | -5.05 | 5.27 | 10.85 | 0.57 | 30.19 |
| 98 | 77.14 | 45.71 | 0.22 | 0.31 | 28.63 | 23.44 | 1081.54 | | 20.34 | -4.52 | 5.36 | 11.02 | 1.41 | 33.61 |
| 99 | 77.82 | 45.81 | 0.22 | 0.31 | 25.83 | 22.62 | 1037.14 | | 20.91 | -3.88 | 5.72 | 11.76 | 2.89 | 37.40 |
| 100 | 77.57 | 50.34 | 0.23 | 0.06 | 23.87 | 21.97 | 993.89 | | 5.98 | -4.51 | 6.03 | 12.40 | 0.03 | 19.92 |
| 101 | 78.90 | 50.71 | 0.23 | 0.06 | 23.11 | 21.48 | 956.54 | | 6.17 | -2.76 | 6.11 | 12.58 | 5.20 | 27.30 |
| 102 | 78.05 | 50.71 | 0.23 | 0.06 | 22.19 | 20.58 | 918.30 | | 6.26 | -4.61 | 6.37 | 13.11 | -2.66 | 18.46 |

**ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นและผลการคำนวณการใช้พลังงานความร้อนจากน้ำร้อน โดยใช้ข้อมูล บ.เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| ชั่วโมงที่ | อากาศในห้องบ่มใบยาสูบ | | อัตราการไหลของอากาศในห้องบ่มใบยาสูบ (m/s) | | อากาศสิ่งแวดล้อม | | น้ำหนักใบยาสูบ กิโลกรัม | พลังงานความร้อน (kw) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | หมุนเวียน | ออกจากห้องบ่มใบยาสูบ | อุณหภูมิกระเปาะแห้ง( C) | อุณหภูมิกระเปาะเปียก( C) | | ปฏิกิริยาเคมี | การระบายอากาศ | สะสมในใบยาสูบ | สูญเสียผ่านผนัง | สูญเสียผ่านพื้น | สะสมในโครงสร้าง | จากน้ำร้อน |
| 103 | 78.12 | 52.32 | 0.23 | 0.06 | 21.16 | 20.10 | 885.34 | | 6.99 | -3.32 | 6.41 | 13.19 | 0.75 | 24.02 |
| 104 | 78.41 | 52.54 | 0.23 | 0.06 | 21.24 | 19.76 | 855.38 | | 7.12 | -2.91 | 6.42 | 13.22 | 1.39 | 25.24 |
| 105 | 78.09 | 51.28 | 0.23 | 0.06 | 21.06 | 20.04 | 827.11 | | 6.55 | -3.17 | 6.48 | 13.34 | -0.96 | 22.24 |
| 106 | 78.59 | 51.49 | 0.23 | 0.06 | 21.48 | 20.25 | 801.25 | | 6.62 | -2.38 | 6.41 | 13.19 | 2.11 | 25.94 |
| 107 | 79.60 | 51.79 | 0.23 | 0.06 | 21.33 | 20.11 | 776.53 | | 6.75 | -1.99 | 6.48 | 13.35 | 4.04 | 28.63 |
| 108 | 78.85 | 52.00 | 0.23 | 0.06 | 21.21 | 19.74 | 751.98 | | 6.88 | -3.02 | 6.61 | 13.61 | -2.47 | 21.62 |
| 109 | 78.47 | 51.98 | 0.23 | 0.06 | 20.14 | 19.23 | 731.03 | | 6.92 | -2.42 | 6.67 | 13.72 | -1.22 | 23.67 |
| 110 | 78.30 | 52.45 | 0.23 | 0.06 | 19.45 | 18.73 | 712.47 | | 7.17 | -2.04 | 6.71 | 13.81 | -0.42 | 25.23 |
| 111 | 78.16 | 51.75 | 0.23 | 0.06 | 19.63 | 18.41 | 695.82 | | 6.90 | -1.82 | 6.68 | 13.74 | -0.39 | 25.11 |
| 112 | 78.27 | 52.43 | 0.23 | 0.06 | 19.44 | 18.13 | 680.59 | | 7.22 | -1.54 | 6.69 | 13.77 | 0.60 | 26.73 |
| 113 | 78.45 | 51.36 | 0.23 | 0.06 | 19.62 | 18.72 | 666.63 | | 6.71 | -1.39 | 6.68 | 13.76 | 0.80 | 26.56 |
| 114 | 78.80 | 53.42 | 0.23 | 0.06 | 22.73 | 19.99 | 653.45 | | 7.50 | -1.23 | 6.35 | 13.07 | 1.55 | 27.24 |
| 117 | 78.02 | 52.22 | 0.23 | 0.06 | 28.09 | 22.57 | 620.88 | | 6.70 | -1.32 | 5.77 | 11.89 | -2.49 | 20.55 |
| 118 | 78.53 | 53.90 | 0.23 | 0.06 | 29.23 | 23.05 | 612.19 | | 7.42 | -0.71 | 5.57 | 11.47 | 2.11 | 25.86 |
| 119 | 78.71 | 53.40 | 0.23 | 0.06 | 29.39 | 23.44 | 604.08 | | 7.14 | -0.79 | 5.61 | 11.56 | 0.77 | 24.29 |
| 120 | 78.76 | 54.19 | 0.23 | 0.06 | 30.59 | 23.51 | 596.50 | | 7.51 | -0.79 | 5.50 | 11.32 | 0.29 | 23.83 |
| 121 | 78.58 | 53.96 | 0.23 | 0.06 | 30.73 | 23.19 | 589.65 | | 7.44 | -0.80 | 5.49 | 11.30 | -0.64 | 22.79 |

# ภาคผนวก ค

## ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 10.35 | 2.42 | 29.08 | 31.84 | 41.84 | 19.08 | 0.841 | - | 12.30 | 41.84 | 19.89 | 0.809 | - | 12.79 |
| 2 | 9.62 | 2.41 | 28.63 | 31.67 | 41.67 | 18.63 | 0.792 | - | 12.15 | 41.67 | 19.64 | 0.755 | - | 12.74 |
| 3 | 25.04 | 2.40 | 28.23 | 33.54 | 43.54 | 18.23 | 2.274 | - | 11.01 | 43.54 | 19.89 | 2.115 | - | 11.84 |
| 4 | 11.60 | 2.44 | 28.05 | 32.62 | 42.62 | 18.05 | 1.022 | - | 11.35 | 42.62 | 19.70 | 0.949 | - | 12.23 |
| 5 | 15.62 | 2.47 | 28.09 | 33.37 | 43.37 | 18.09 | 1.417 | - | 11.02 | 43.37 | 19.88 | 1.310 | - | 11.93 |
| 6 | 22.16 | 2.50 | 26.60 | 34.59 | 44.59 | 16.60 | 2.240 | - | 9.89 | 44.59 | 19.51 | 1.990 | - | 11.13 |
| 7 | 31.47 | 2.62 | 25.18 | 36.43 | 46.43 | 15.18 | 3.578 | - | 8.80 | 46.43 | 19.36 | 3.063 | - | 10.28 |
| 8 | 20.92 | 2.47 | 24.49 | 35.84 | 45.84 | 14.49 | 2.388 | - | 8.76 | 45.84 | 19.04 | 2.015 | - | 10.38 |
| 9 | 21.76 | 2.46 | 24.52 | 36.18 | 46.18 | 14.52 | 2.510 | - | 8.67 | 46.18 | 19.13 | 2.116 | - | 10.28 |
| 10 | 41.11 | 2.51 | 24.43 | 38.92 | 48.92 | 14.43 | 5.193 | - | 7.92 | 48.92 | 19.86 | 4.309 | - | 9.54 |
| 11 | 38.64 | 2.51 | 24.01 | 39.86 | 49.86 | 14.01 | 5.090 | - | 7.59 | 49.86 | 20.10 | 4.154 | - | 9.30 |
| 12 | 32.56 | 2.45 | 23.46 | 39.56 | 49.56 | 13.46 | 4.322 | - | 7.53 | 49.56 | 19.97 | 3.480 | - | 9.36 |
| 13 | 31.76 | 2.48 | 23.17 | 39.77 | 49.77 | 13.17 | 4.279 | - | 7.42 | 49.77 | 19.85 | 3.434 | - | 9.25 |
| 14 | 36.05 | 2.47 | 23.34 | 40.49 | 50.49 | 13.34 | 4.935 | - | 7.30 | 50.49 | 20.18 | 3.952 | - | 9.12 |
| 15 | 34.31 | 2.48 | 24.54 | 40.57 | 50.57 | 14.54 | 4.540 | - | 7.56 | 50.57 | 20.92 | 3.671 | - | 9.35 |
| 16 | 30.11 | 2.43 | 26.54 | 40.23 | 50.23 | 16.54 | 3.704 | - | 8.13 | 50.23 | 21.91 | 3.067 | - | 9.82 |
| 17 | 25.77 | 2.45 | 28.00 | 39.41 | 49.41 | 18.00 | 2.938 | - | 8.77 | 49.41 | 22.50 | 2.486 | - | 10.37 |
| 18 | 10.35 | 2.41 | 30.16 | 40.01 | 50.01 | 20.16 | 3.422 | - | 9.28 | 50.01 | 23.68 | 2.990 | - | 10.61 |
| 19 | 9.62 | 2.43 | 30.76 | 39.37 | 49.37 | 20.76 | 2.793 | - | 9.70 | 49.37 | 23.89 | 2.467 | - | 10.99 |

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 20 | 25.04 | 2.43 | 31.33 | 40.06 | 50.06 | 21.33 | 3.300 | - | 9.66 | 50.06 | 24.25 | 2.941 | - | 10.84 |
| 21 | 11.60 | 2.43 | 32.05 | 39.78 | 49.78 | 22.05 | 3.017 | - | 10.04 | 49.78 | 24.76 | 2.702 | - | 11.21 |
| 22 | 15.62 | 2.44 | 32.11 | 39.38 | 49.38 | 22.11 | 2.091 | - | 10.22 | 49.38 | 24.66 | 1.883 | - | 11.35 |
| 23 | 22.16 | 2.42 | 31.56 | 42.09 | 52.09 | 21.56 | 4.547 | - | 9.06 | 52.09 | 25.14 | 3.975 | - | 10.36 |
| 24 | 31.47 | 2.46 | 29.78 | 40.58 | 50.58 | 19.78 | 2.252 | - | 8.97 | 50.58 | 24.08 | 1.915 | - | 10.54 |
| 25 | 20.92 | 2.47 | 27.96 | 42.83 | 52.83 | 17.96 | 5.074 | - | 7.84 | 52.83 | 23.91 | 4.141 | - | 9.61 |
| 26 | 21.76 | 2.42 | 27.52 | 42.76 | 52.76 | 17.52 | 4.643 | - | 7.75 | 52.76 | 23.79 | 3.753 | - | 9.59 |
| 27 | 41.11 | 2.48 | 27.46 | 43.69 | 53.69 | 17.46 | 5.377 | - | 7.52 | 53.69 | 24.04 | 4.322 | - | 9.36 |
| 28 | 38.64 | 2.47 | 27.55 | 43.47 | 53.47 | 17.55 | 5.383 | - | 7.59 | 53.47 | 24.43 | 4.272 | - | 9.57 |
| 29 | 32.56 | 2.49 | 26.43 | 44.14 | 54.14 | 16.43 | 6.112 | - | 7.20 | 54.14 | 24.15 | 4.760 | - | 9.24 |
| 30 | 31.76 | 2.50 | 25.04 | 44.49 | 54.49 | 15.04 | 6.339 | - | 6.85 | 54.49 | 23.64 | 4.842 | - | 8.97 |
| 31 | 36.05 | 2.54 | 23.83 | 43.52 | 53.52 | 13.83 | 5.173 | - | 6.80 | 53.52 | 22.84 | 3.902 | - | 9.02 |
| 32 | 34.31 | 2.50 | 23.66 | 43.98 | 53.98 | 13.66 | 6.288 | - | 6.69 | 53.98 | 22.79 | 4.744 | - | 8.86 |
| 33 | 30.11 | 2.50 | 23.96 | 44.97 | 54.97 | 13.96 | 7.271 | - | 6.56 | 54.97 | 23.24 | 5.485 | - | 8.70 |
| 34 | 25.77 | 2.49 | 23.66 | 45.32 | 55.32 | 13.66 | 7.628 | - | 6.45 | 55.32 | 23.35 | 5.703 | - | 8.63 |
| 35 | 42.23 | 2.54 | 23.48 | 44.85 | 54.85 | 13.48 | 6.498 | - | 6.50 | 54.85 | 23.15 | 4.850 | - | 8.71 |
| 36 | 44.19 | 2.48 | 23.46 | 45.16 | 55.16 | 13.46 | 6.859 | - | 6.44 | 55.16 | 23.22 | 5.116 | - | 8.64 |
| 37 | 51.63 | 2.47 | 23.61 | 46.18 | 56.18 | 13.61 | 8.199 | - | 6.30 | 56.18 | 23.67 | 6.094 | - | 8.47 |
| 38 | 46.93 | 2.54 | 23.40 | 45.96 | 55.96 | 13.40 | 7.450 | - | 6.30 | 55.96 | 23.60 | 5.511 | - | 8.52 |

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 39 | 43.97 | 2.49 | 24.34 | 45.29 | 55.29 | 14.34 | 6.689 | - | 6.57 | 55.29 | 23.87 | 5.001 | - | 8.79 |
| 40 | 45.92 | 2.49 | 26.76 | 45.89 | 55.89 | 16.76 | 6.642 | - | 6.91 | 55.89 | 25.08 | 5.115 | - | 8.98 |
| 41 | 54.02 | 2.58 | 27.35 | 47.73 | 57.73 | 17.35 | 8.089 | - | 6.68 | 57.73 | 25.99 | 6.215 | - | 8.69 |
| 42 | 38.87 | 2.63 | 28.19 | 47.19 | 57.19 | 18.19 | 5.600 | - | 6.94 | 57.19 | 26.37 | 4.332 | - | 8.97 |
| 43 | 41.64 | 2.53 | 28.94 | 47.32 | 57.32 | 18.94 | 5.894 | - | 7.06 | 57.32 | 26.97 | 4.565 | - | 9.12 |
| 44 | 39.37 | 2.51 | 29.36 | 47.89 | 57.89 | 19.36 | 5.597 | - | 7.03 | 57.89 | 27.14 | 4.377 | - | 8.99 |
| 45 | 47.34 | 2.52 | 29.31 | 48.69 | 58.69 | 19.31 | 6.894 | - | 6.87 | 58.69 | 27.42 | 5.361 | - | 8.83 |
| 46 | 36.33 | 2.49 | 29.29 | 47.55 | 57.55 | 19.29 | 5.125 | - | 7.09 | 57.55 | 27.13 | 3.992 | - | 9.10 |
| 47 | 43.51 | 2.53 | 28.58 | 48.18 | 58.18 | 18.58 | 6.376 | - | 6.82 | 58.18 | 26.91 | 4.926 | - | 8.83 |
| 48 | 34.19 | 2.58 | 27.41 | 47.60 | 57.60 | 17.41 | 5.093 | - | 6.71 | 57.60 | 26.19 | 3.890 | - | 8.79 |
| 49 | 52.22 | 2.57 | 26.27 | 48.60 | 58.60 | 16.27 | 8.239 | - | 6.34 | 58.60 | 27.42 | 5.895 | - | 8.86 |
| 50 | 56.86 | 2.53 | 25.41 | 49.55 | 59.55 | 15.41 | 9.403 | - | 6.05 | 59.55 | 27.43 | 6.630 | - | 8.58 |
| 51 | 69.02 | 2.52 | 25.66 | 51.49 | 61.49 | 15.66 | 11.912 | - | 5.79 | 61.49 | 28.34 | 8.341 | - | 8.27 |
| 52 | 59.50 | 2.51 | 25.70 | 51.44 | 61.44 | 15.70 | 10.248 | - | 5.81 | 61.44 | 28.42 | 7.161 | - | 8.31 |
| 53 | 65.70 | 2.45 | 25.16 | 53.07 | 63.07 | 15.16 | 11.929 | - | 5.51 | 63.07 | 28.77 | 8.253 | - | 7.96 |
| 54 | 71.74 | 2.43 | 24.64 | 54.42 | 64.42 | 14.64 | 13.614 | - | 5.27 | 64.42 | 29.22 | 9.281 | - | 7.73 |
| 55 | 76.78 | 2.40 | 24.22 | 55.34 | 65.34 | 14.22 | 15.023 | - | 5.11 | 65.34 | 29.56 | 10.125 | - | 7.58 |
| 56 | 81.24 | 2.40 | 23.68 | 56.95 | 66.95 | 13.68 | 16.681 | - | 4.87 | 66.95 | 30.01 | 11.118 | - | 7.31 |
| 57 | 82.38 | 2.38 | 22.04 | 57.57 | 67.57 | 12.04 | 17.742 | - | 4.64 | 67.57 | 29.81 | 11.560 | - | 7.13 |

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 58 | 83.40 | 2.34 | 20.59 | 57.90 | 67.90 | 10.59 | 18.620 | - | 4.48 | 67.90 | 29.43 | 11.949 | - | 6.98 |
| 59 | 77.64 | 2.33 | 20.37 | 58.02 | 68.02 | 10.37 | 17.455 | - | 4.45 | 68.02 | 29.32 | 11.200 | - | 6.93 |
| 60 | 86.68 | 2.34 | 20.60 | 59.07 | 69.07 | 10.60 | 19.832 | - | 4.37 | 69.07 | 29.85 | 12.712 | - | 6.82 |
| 61 | 79.28 | 2.32 | 21.45 | 58.79 | 68.79 | 11.45 | 17.737 | - | 4.47 | 68.79 | 30.22 | 11.413 | - | 6.95 |
| 62 | 80.22 | 2.32 | 22.26 | 59.38 | 69.38 | 12.26 | 17.887 | - | 4.48 | 69.38 | 30.81 | 11.561 | - | 6.94 |
| 63 | 72.52 | 2.30 | 22.48 | 58.83 | 68.83 | 12.48 | 15.911 | - | 4.56 | 68.83 | 30.82 | 10.274 | - | 7.06 |
| 64 | 77.90 | 2.33 | 24.11 | 59.22 | 69.22 | 14.11 | 16.676 | - | 4.67 | 69.22 | 31.59 | 10.924 | - | 7.13 |
| 65 | 75.38 | 2.30 | 24.75 | 58.81 | 68.81 | 14.75 | 15.781 | - | 4.78 | 68.81 | 31.74 | 10.389 | - | 7.26 |
| 66 | 68.20 | 2.29 | 26.38 | 58.93 | 68.93 | 16.38 | 13.830 | - | 4.93 | 68.93 | 32.01 | 9.361 | - | 7.29 |
| 67 | 79.04 | 2.30 | 27.60 | 61.13 | 71.13 | 17.60 | 16.429 | - | 4.81 | 71.13 | 33.23 | 11.217 | - | 7.05 |
| 68 | 76.24 | 2.27 | 27.92 | 61.28 | 71.28 | 17.92 | 15.794 | - | 4.83 | 71.28 | 33.69 | 10.725 | - | 7.11 |
| 69 | 82.37 | 2.26 | 27.93 | 62.72 | 72.72 | 17.93 | 17.634 | - | 4.67 | 72.72 | 34.26 | 11.922 | - | 6.91 |
| 70 | 81.15 | 2.26 | 27.61 | 64.56 | 74.56 | 17.61 | 18.238 | - | 4.45 | 74.56 | 34.47 | 12.360 | - | 6.57 |
| 71 | 70.24 | 2.28 | 26.15 | 64.16 | 74.16 | 16.15 | 16.102 | - | 4.36 | 74.16 | 33.82 | 10.761 | - | 6.53 |
| 72 | 73.33 | 2.28 | 23.53 | 64.17 | 74.17 | 13.53 | 17.677 | - | 4.15 | 74.17 | 32.81 | 11.546 | - | 6.35 |
| 73 | 75.36 | 2.31 | 22.13 | 64.32 | 74.32 | 12.13 | 18.705 | - | 4.03 | 74.32 | 32.26 | 12.092 | - | 6.23 |
| 74 | 60.75 | 2.33 | 21.74 | 62.38 | 72.38 | 11.74 | 14.582 | - | 4.17 | 72.38 | 22.67 | 11.642 | - | 5.22 |
| 75 | 66.60 | 2.34 | 21.47 | 63.85 | 73.85 | 11.47 | 16.564 | - | 4.02 | 73.85 | 22.83 | 13.184 | - | 5.05 |
| 76 | 66.17 | 2.31 | 21.02 | 64.11 | 74.11 | 11.02 | 16.684 | - | 3.97 | 74.11 | 22.78 | 13.200 | - | 5.01 |

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 77 | 59.96 | 2.33 | 20.34 | 63.26 | 73.26 | 10.34 | 15.037 | - | 3.99 | 73.26 | 22.22 | 11.861 | - | 5.06 |
| 78 | 68.62 | 2.33 | 19.04 | 64.32 | 74.32 | 9.04 | 17.983 | - | 3.82 | 74.32 | 21.47 | 14.155 | - | 4.85 |
| 79 | 72.95 | 2.34 | 18.64 | 65.30 | 75.30 | 8.64 | 19.630 | - | 3.72 | 75.30 | 21.42 | 15.426 | - | 4.73 |
| 80 | 74.72 | 2.30 | 18.54 | 65.92 | 75.92 | 8.54 | 20.389 | - | 3.66 | 75.92 | 21.56 | 15.984 | - | 4.67 |
| 81 | 69.31 | 2.29 | 18.34 | 65.78 | 75.78 | 8.34 | 18.924 | - | 3.66 | 75.78 | 21.41 | 14.825 | - | 4.68 |
| 82 | 76.77 | 2.28 | 17.37 | 66.43 | 76.43 | 7.37 | 21.564 | - | 3.56 | 76.43 | 21.00 | 16.817 | - | 4.57 |
| 83 | 73.54 | 2.30 | 17.39 | 67.09 | 77.09 | 7.39 | 20.920 | - | 3.52 | 77.09 | 21.06 | 16.341 | - | 4.50 |
| 84 | 70.86 | 2.32 | 17.23 | 67.02 | 77.02 | 7.23 | 20.179 | - | 3.51 | 77.02 | 21.06 | 15.721 | - | 4.51 |
| 85 | 67.26 | 2.29 | 17.56 | 67.39 | 77.39 | 7.56 | 19.192 | - | 3.50 | 77.39 | 21.31 | 14.977 | - | 4.49 |
| 86 | 69.07 | 2.30 | 19.25 | 67.61 | 77.61 | 9.25 | 19.268 | - | 3.58 | 77.61 | 22.65 | 15.038 | - | 4.59 |
| 87 | 68.44 | 2.29 | 21.99 | 67.86 | 77.86 | 11.99 | 18.333 | - | 3.73 | 77.86 | 24.61 | 14.409 | - | 4.75 |
| 88 | 67.94 | 2.24 | 23.84 | 68.01 | 78.01 | 13.84 | 17.670 | - | 3.85 | 78.01 | 25.97 | 13.961 | - | 4.87 |
| 89 | 72.09 | 2.22 | 21.21 | 69.35 | 79.35 | 11.21 | 20.183 | - | 3.57 | 79.35 | 24.46 | 15.792 | - | 4.56 |
| 90 | 73.22 | 2.24 | 19.74 | 70.29 | 80.29 | 9.74 | 21.399 | - | 3.42 | 80.29 | 23.74 | 16.648 | - | 4.40 |
| 91 | 63.33 | 2.22 | 19.74 | 70.10 | 80.10 | 9.74 | 18.438 | - | 3.43 | 80.10 | 23.71 | 14.342 | - | 4.42 |
| 92 | 59.31 | 2.29 | 18.91 | 69.51 | 79.51 | 8.91 | 17.281 | - | 3.43 | 79.51 | 23.10 | 13.397 | - | 4.43 |
| 93 | 64.65 | 2.26 | 18.25 | 69.10 | 79.10 | 8.25 | 18.876 | - | 3.42 | 79.10 | 22.94 | 14.506 | - | 4.46 |
| 94 | 74.21 | 2.22 | 17.87 | 71.89 | 81.89 | 7.87 | 23.041 | - | 3.22 | 81.89 | 23.29 | 17.691 | - | 4.19 |
| 95 | 74.96 | 2.22 | 16.91 | 72.92 | 82.92 | 6.91 | 23.971 | - | 3.13 | 82.92 | 23.09 | 18.389 | - | 4.08 |

**ตารางที่ ค.1(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 96 | 76.21 | 2.14 | 16.54 | 74.82 | 84.82 | 6.54 | 25.286 | - | 3.01 | 84.82 | 23.03 | 19.599 | - | 3.89 |
| 97 | 76.06 | 2.25 | 16.75 | 74.96 | 84.96 | 6.75 | 25.336 | - | 3.00 | 84.96 | 23.33 | 19.527 | - | 3.90 |
| 98 | 40.92 | 2.24 | 15.92 | 72.57 | 82.57 | 5.92 | 12.927 | - | 3.17 | 82.57 | 10.43 | 12.403 | - | 3.30 |
| 99 | 39.14 | 2.27 | 15.40 | 72.95 | 82.95 | 5.40 | 12.427 | - | 3.15 | 82.95 | 9.99 | 12.037 | - | 3.25 |
| 100 | 40.10 | 2.23 | 15.76 | 73.25 | 83.25 | 5.76 | 12.835 | - | 3.12 | 83.25 | 10.43 | 12.330 | - | 3.25 |
| 101 | 39.29 | 2.20 | 17.65 | 73.87 | 83.87 | 7.65 | 12.737 | - | 3.08 | 83.87 | 12.21 | 11.903 | - | 3.30 |
| 102 | 39.40 | 2.20 | 20.90 | 74.56 | 84.56 | 10.90 | 12.371 | - | 3.18 | 84.56 | 15.27 | 11.524 | - | 3.42 |
| 103 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 13.57 | 10.379 | - | 3.35 | 84.23 | 17.71 | 9.696 | - | 3.58 |
| 104 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 15.08 | 11.536 | - | 3.35 | 85.35 | 19.15 | 10.795 | - | 3.58 |
| 105 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 16.52 | 10.117 | - | 3.41 | 85.54 | 20.47 | 9.465 | - | 3.65 |
| 106 | 35.06 | 2.13 | 27.73 | 76.07 | 86.07 | 17.73 | 10.203 | - | 3.44 | 86.07 | 21.64 | 9.536 | - | 3.68 |
| 107 | 34.56 | 2.11 | 28.04 | 76.04 | 86.04 | 18.04 | 10.001 | - | 3.46 | 86.04 | 21.97 | 9.338 | - | 3.70 |
| 108 | 35.14 | 2.11 | 28.05 | 76.15 | 86.15 | 18.05 | 10.196 | - | 3.45 | 86.15 | 21.98 | 9.519 | - | 3.69 |
| 109 | 41.08 | 2.10 | 27.04 | 77.72 | 87.72 | 17.04 | 12.572 | - | 3.27 | 87.72 | 21.16 | 11.739 | - | 3.50 |
| 110 | 38.99 | 2.10 | 24.75 | 78.52 | 88.52 | 14.75 | 12.593 | - | 3.10 | 88.52 | 19.09 | 11.780 | - | 3.31 |
| 111 | 35.00 | 2.10 | 23.05 | 78.45 | 88.45 | 13.05 | 11.594 | - | 3.02 | 88.45 | 17.51 | 10.826 | - | 3.23 |
| 112 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 11.01 | 12.591 | - | 2.91 | 84.23 | 15.66 | 11.722 | - | 3.12 |
| 113 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 9.91 | 13.415 | - | 2.82 | 85.35 | 14.66 | 12.503 | - | 3.03 |
| 114 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 9.29 | 13.828 | - | 2.77 | 85.54 | 14.15 | 12.902 | - | 2.96 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 26.24 | 2.51 | 23.32 | 37.11 | 47.11 | 23.32 | 3.25 | - | 8.08 | 47.11 | 28.68 | 2.69 | - | 9.75 |
| 2 | 26.46 | 2.51 | 23.62 | 37.16 | 47.16 | 23.62 | 3.25 | - | 8.15 | 47.16 | 28.85 | 2.70 | - | 9.80 |
| 3 | 33.08 | 2.50 | 22.67 | 38.31 | 48.31 | 22.67 | 4.33 | - | 7.63 | 48.31 | 28.63 | 3.55 | - | 9.32 |
| 4 | 37.51 | 2.59 | 22.09 | 39.44 | 49.44 | 22.09 | 5.17 | - | 7.26 | 49.44 | 28.67 | 4.18 | - | 8.97 |
| 5 | 28.07 | 2.58 | 21.84 | 38.06 | 48.06 | 21.84 | 3.74 | - | 7.50 | 48.06 | 28.35 | 3.02 | - | 9.31 |
| 6 | 30.51 | 2.58 | 21.34 | 38.38 | 48.38 | 21.34 | 4.17 | - | 7.32 | 48.38 | 28.07 | 3.35 | - | 9.11 |
| 7 | 30.70 | 2.52 | 20.94 | 38.30 | 48.30 | 20.94 | 4.24 | - | 7.25 | 48.30 | 27.84 | 3.39 | - | 9.06 |
| 8 | 32.74 | 2.52 | 20.42 | 38.43 | 48.43 | 20.42 | 4.60 | - | 7.12 | 48.43 | 27.57 | 3.67 | - | 8.93 |
| 9 | 36.05 | 2.52 | 19.56 | 38.97 | 48.97 | 19.56 | 5.27 | - | 6.84 | 48.97 | 27.24 | 4.16 | - | 8.67 |
| 10 | 29.77 | 2.52 | 19.71 | 38.00 | 48.00 | 19.71 | 4.22 | - | 7.06 | 48.00 | 27.14 | 3.33 | - | 8.93 |
| 11 | 36.59 | 2.53 | 19.61 | 39.02 | 49.02 | 19.61 | 5.35 | - | 6.84 | 49.02 | 27.26 | 4.23 | - | 8.66 |
| 12 | 31.12 | 2.57 | 19.31 | 38.25 | 48.25 | 19.31 | 4.49 | - | 6.93 | 48.25 | 26.99 | 3.53 | - | 8.81 |
| 13 | 40.02 | 2.57 | 19.08 | 39.97 | 49.97 | 19.08 | 6.09 | - | 6.57 | 49.97 | 27.22 | 4.77 | - | 8.38 |
| 14 | 37.70 | 2.58 | 18.97 | 40.07 | 50.07 | 18.97 | 5.77 | - | 6.53 | 50.07 | 27.35 | 4.49 | - | 8.39 |
| 15 | 38.40 | 2.58 | 18.47 | 40.38 | 50.38 | 18.47 | 6.00 | - | 6.40 | 50.38 | 27.23 | 4.64 | - | 8.28 |
| 16 | 40.77 | 2.57 | 19.36 | 40.60 | 50.60 | 19.36 | 6.26 | - | 6.51 | 50.60 | 30.35 | 4.46 | - | 9.14 |
| 17 | 41.16 | 2.57 | 19.46 | 40.47 | 50.47 | 19.46 | 6.28 | - | 6.55 | 50.47 | 30.30 | 4.49 | - | 9.17 |
| 18 | 50.00 | 2.57 | 20.09 | 42.26 | 52.26 | 20.09 | 7.86 | - | 6.36 | 52.26 | 31.07 | 5.65 | - | 8.85 |
| 19 | 43.18 | 2.57 | 21.81 | 41.69 | 51.69 | 21.81 | 6.39 | - | 6.76 | 51.69 | 31.76 | 4.66 | - | 9.26 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 20 | 31.77 | 2.58 | 23.01 | 40.09 | 50.09 | 23.01 | 4.34 | - | 7.32 | 50.09 | 31.86 | 3.22 | - | 9.85 |
| 21 | 37.52 | 2.59 | 24.73 | 40.99 | 50.99 | 24.73 | 5.00 | - | 7.51 | 50.99 | 32.68 | 3.82 | - | 9.83 |
| 22 | 37.00 | 2.61 | 25.50 | 41.06 | 51.06 | 25.50 | 4.83 | - | 7.67 | 51.06 | 33.07 | 3.72 | - | 9.95 |
| 23 | 33.56 | 2.62 | 25.62 | 40.69 | 50.69 | 25.62 | 4.31 | - | 7.78 | 50.69 | 33.07 | 3.33 | - | 10.09 |
| 24 | 29.64 | 2.62 | 27.33 | 39.98 | 49.98 | 27.33 | 3.52 | - | 8.41 | 49.98 | 33.47 | 2.81 | - | 10.54 |
| 25 | 29.37 | 2.61 | 27.26 | 40.04 | 50.04 | 27.26 | 3.51 | - | 8.38 | 50.04 | 33.44 | 2.80 | - | 10.50 |
| 26 | 26.49 | 2.59 | 26.47 | 39.75 | 49.75 | 26.47 | 3.22 | - | 8.23 | 49.75 | 33.10 | 2.53 | - | 10.48 |
| 27 | 28.17 | 2.59 | 24.29 | 39.72 | 49.72 | 24.29 | 3.66 | - | 7.69 | 49.72 | 32.25 | 2.78 | - | 10.14 |
| 28 | 51.56 | 2.58 | 22.64 | 43.18 | 53.18 | 22.64 | 7.76 | - | 6.64 | 53.18 | 30.82 | 6.06 | - | 8.51 |
| 29 | 41.98 | 2.60 | 21.15 | 43.05 | 53.05 | 21.15 | 6.55 | - | 6.41 | 53.05 | 30.42 | 4.98 | - | 8.43 |
| 30 | 37.96 | 2.61 | 20.79 | 42.61 | 52.61 | 20.79 | 5.91 | - | 6.42 | 52.61 | 30.23 | 4.47 | - | 8.50 |
| 31 | 42.19 | 2.61 | 20.84 | 43.13 | 53.13 | 20.84 | 6.65 | - | 6.34 | 53.13 | 30.37 | 5.03 | - | 8.40 |
| 32 | 50.05 | 2.62 | 20.66 | 44.72 | 54.72 | 20.66 | 8.26 | - | 6.06 | 54.72 | 30.74 | 6.20 | - | 8.07 |
| 33 | 48.83 | 2.60 | 20.49 | 45.73 | 55.73 | 20.49 | 8.29 | - | 5.89 | 55.73 | 31.10 | 6.17 | - | 7.91 |
| 34 | 39.81 | 2.60 | 20.10 | 44.79 | 54.79 | 20.10 | 6.67 | - | 5.97 | 54.79 | 30.87 | 4.92 | - | 8.09 |
| 35 | 46.66 | 2.60 | 20.22 | 45.91 | 55.91 | 20.22 | 8.02 | - | 5.82 | 55.91 | 31.18 | 5.92 | - | 7.88 |
| 36 | 50.79 | 2.60 | 19.64 | 47.39 | 57.39 | 19.64 | 9.16 | - | 5.54 | 57.39 | 31.40 | 6.70 | - | 7.58 |
| 37 | 46.08 | 2.61 | 19.54 | 47.64 | 57.64 | 19.54 | 8.38 | - | 5.50 | 57.64 | 31.63 | 6.08 | - | 7.58 |
| 38 | 75.64 | 2.63 | 19.36 | 52.83 | 62.83 | 19.36 | 15.53 | - | 4.87 | 62.83 | 33.18 | 11.12 | - | 6.80 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 39 | 58.86 | 2.63 | 19.41 | 51.44 | 61.44 | 19.41 | 11.71 | - | 5.03 | 61.44 | 33.16 | 8.32 | - | 7.08 |
| 40 | 59.02 | 2.65 | 19.21 | 51.46 | 61.46 | 19.21 | 11.79 | - | 5.00 | 61.46 | 33.07 | 8.37 | - | 7.05 |
| 41 | 67.43 | 2.63 | 20.04 | 53.16 | 63.16 | 20.04 | 13.75 | - | 4.91 | 63.16 | 33.93 | 9.80 | - | 6.88 |
| 42 | 77.74 | 2.61 | 21.00 | 55.72 | 65.72 | 21.00 | 16.43 | - | 4.73 | 65.72 | 35.12 | 11.77 | - | 6.60 |
| 43 | 58.99 | 2.61 | 21.55 | 53.70 | 63.70 | 21.55 | 11.78 | - | 5.01 | 63.70 | 35.18 | 8.41 | - | 7.01 |
| 44 | 58.96 | 2.59 | 21.70 | 53.25 | 63.25 | 21.70 | 11.62 | - | 5.07 | 63.25 | 35.07 | 8.32 | - | 7.09 |
| 45 | 72.11 | 2.60 | 22.66 | 55.68 | 65.68 | 22.66 | 14.70 | - | 4.90 | 65.68 | 36.11 | 10.61 | - | 6.79 |
| 46 | 61.42 | 2.60 | 24.59 | 55.21 | 65.21 | 24.59 | 11.88 | - | 5.17 | 65.21 | 37.20 | 8.65 | - | 7.10 |
| 47 | 56.15 | 2.60 | 24.97 | 54.42 | 64.42 | 24.97 | 10.57 | - | 5.31 | 64.42 | 37.27 | 7.70 | - | 7.29 |
| 48 | 61.18 | 2.59 | 24.23 | 55.19 | 65.19 | 24.23 | 11.93 | - | 5.13 | 65.19 | 37.08 | 8.64 | - | 7.08 |
| 49 | 72.33 | 2.58 | 24.64 | 57.36 | 67.36 | 24.64 | 14.69 | - | 4.92 | 67.36 | 40.55 | 9.87 | - | 7.33 |
| 50 | 64.77 | 2.59 | 24.75 | 56.55 | 66.55 | 24.75 | 12.88 | - | 5.03 | 66.55 | 40.46 | 8.64 | - | 7.50 |
| 51 | 66.75 | 2.59 | 22.80 | 57.03 | 67.03 | 22.80 | 13.98 | - | 4.77 | 67.03 | 39.92 | 9.18 | - | 7.27 |
| 52 | 68.07 | 2.59 | 21.90 | 57.36 | 67.36 | 21.90 | 14.63 | - | 4.65 | 67.36 | 39.72 | 9.51 | - | 7.15 |
| 53 | 64.25 | 2.60 | 20.65 | 56.73 | 66.73 | 20.65 | 13.98 | - | 4.60 | 66.73 | 39.10 | 8.97 | - | 7.16 |
| 54 | 74.04 | 2.59 | 20.07 | 57.60 | 67.60 | 20.07 | 16.59 | - | 4.46 | 67.60 | 39.01 | 10.64 | - | 6.96 |
| 55 | 58.65 | 2.60 | 19.61 | 55.84 | 65.84 | 19.61 | 12.78 | - | 4.59 | 65.84 | 38.42 | 8.13 | - | 7.22 |
| 56 | 72.83 | 2.61 | 18.93 | 57.81 | 67.81 | 18.93 | 16.76 | - | 4.35 | 67.81 | 38.66 | 10.63 | - | 6.85 |
| 57 | 70.08 | 2.60 | 18.84 | 57.81 | 67.81 | 18.84 | 16.15 | - | 4.34 | 67.81 | 38.77 | 10.20 | - | 6.87 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 58 | 62.27 | 2.61 | 18.39 | 56.88 | 66.88 | 18.39 | 14.20 | - | 4.38 | 66.88 | 38.41 | 8.91 | - | 6.99 |
| 59 | 75.24 | 2.60 | 18.31 | 58.36 | 68.36 | 18.31 | 17.72 | - | 4.25 | 68.36 | 38.72 | 11.15 | - | 6.75 |
| 60 | 59.29 | 2.59 | 18.48 | 56.51 | 66.51 | 18.48 | 13.40 | - | 4.42 | 66.51 | 38.39 | 8.39 | - | 7.06 |
| 61 | 84.61 | 2.62 | 17.60 | 61.50 | 71.50 | 17.60 | 21.49 | - | 3.94 | 71.50 | 39.50 | 13.45 | - | 6.29 |
| 62 | 82.39 | 2.62 | 17.67 | 64.48 | 74.48 | 17.67 | 22.17 | - | 3.72 | 74.48 | 41.42 | 13.57 | - | 6.07 |
| 63 | 74.98 | 2.64 | 17.90 | 63.80 | 73.80 | 17.90 | 19.83 | - | 3.78 | 73.80 | 41.60 | 12.06 | - | 6.22 |
| 64 | 82.70 | 2.66 | 18.31 | 65.64 | 75.64 | 18.31 | 22.53 | - | 3.67 | 75.64 | 42.29 | 13.78 | - | 6.00 |
| 65 | 68.00 | 2.67 | 18.76 | 64.09 | 74.09 | 18.76 | 17.83 | - | 3.81 | 74.09 | 42.37 | 10.81 | - | 6.29 |
| 66 | 69.91 | 2.71 | 20.48 | 63.96 | 73.96 | 20.48 | 17.74 | - | 3.94 | 73.96 | 42.94 | 10.90 | - | 6.41 |
| 67 | 69.98 | 2.72 | 22.31 | 64.48 | 74.48 | 22.31 | 17.37 | - | 4.03 | 74.48 | 45.64 | 10.29 | - | 6.80 |
| 68 | 67.57 | 2.72 | 23.69 | 64.31 | 74.31 | 23.69 | 16.29 | - | 4.15 | 74.31 | 46.19 | 9.73 | - | 6.94 |
| 69 | 80.37 | 2.70 | 25.23 | 65.89 | 75.89 | 25.23 | 19.47 | - | 4.13 | 75.89 | 47.15 | 11.84 | - | 6.79 |
| 70 | 67.66 | 2.66 | 26.69 | 65.50 | 75.50 | 26.69 | 15.81 | - | 4.28 | 75.50 | 47.84 | 9.65 | - | 7.01 |
| 71 | 65.47 | 2.64 | 27.24 | 65.04 | 75.04 | 27.24 | 14.98 | - | 4.37 | 75.04 | 48.00 | 9.15 | - | 7.15 |
| 72 | 70.38 | 2.61 | 28.49 | 65.69 | 75.69 | 28.49 | 15.94 | - | 4.41 | 75.69 | 48.60 | 9.88 | - | 7.13 |
| 73 | 59.55 | 2.60 | 29.07 | 64.69 | 74.69 | 29.07 | 13.03 | - | 4.57 | 74.69 | 48.67 | 8.07 | - | 7.38 |
| 74 | 66.30 | 2.58 | 27.48 | 66.19 | 76.19 | 27.48 | 15.49 | - | 4.28 | 76.19 | 48.77 | 9.41 | - | 7.04 |
| 75 | 75.79 | 2.59 | 26.25 | 67.34 | 77.34 | 26.25 | 18.59 | - | 4.08 | 77.34 | 48.78 | 11.16 | - | 6.79 |
| 76 | 68.96 | 2.59 | 24.37 | 67.69 | 77.69 | 24.37 | 17.64 | - | 3.91 | 77.69 | 48.61 | 10.32 | - | 6.68 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 77 | 64.90 | 2.55 | 22.21 | 68.04 | 78.04 | 22.21 | 17.38 | - | 3.73 | 78.04 | 48.30 | 9.91 | - | 6.55 |
| 78 | 79.79 | 2.55 | 21.54 | 71.05 | 81.05 | 21.54 | 23.02 | - | 3.47 | 81.05 | 49.23 | 13.07 | - | 6.11 |
| 79 | 88.18 | 2.50 | 21.39 | 74.47 | 84.47 | 21.39 | 27.42 | - | 3.22 | 84.47 | 50.85 | 15.43 | - | 5.71 |
| 80 | 79.80 | 2.59 | 20.90 | 73.88 | 83.88 | 20.90 | 24.70 | - | 3.23 | 83.88 | 50.81 | 13.72 | - | 5.82 |
| 81 | 81.56 | 2.59 | 20.70 | 74.55 | 84.55 | 20.70 | 25.68 | - | 3.18 | 84.55 | 51.09 | 14.23 | - | 5.73 |
| 82 | 84.35 | 2.60 | 20.35 | 74.67 | 84.67 | 20.35 | 26.76 | - | 3.15 | 84.67 | 51.09 | 14.77 | - | 5.71 |
| 83 | 57.51 | 2.59 | 20.35 | 71.18 | 81.18 | 20.35 | 16.95 | - | 3.39 | 81.18 | 31.43 | 13.97 | - | 4.12 |
| 84 | 47.47 | 2.58 | 19.94 | 70.64 | 80.64 | 19.94 | 13.93 | - | 3.41 | 80.64 | 31.21 | 11.43 | - | 4.15 |
| 85 | 65.16 | 2.58 | 20.22 | 74.04 | 84.04 | 20.22 | 20.44 | - | 3.19 | 84.04 | 31.99 | 16.77 | - | 3.89 |
| 86 | 73.07 | 2.57 | 20.04 | 77.71 | 87.71 | 20.04 | 24.88 | - | 2.94 | 87.71 | 32.55 | 20.36 | - | 3.59 |
| 87 | 57.65 | 2.57 | 19.42 | 77.12 | 87.12 | 19.42 | 19.53 | - | 2.95 | 87.12 | 32.22 | 15.93 | - | 3.62 |
| 88 | 60.08 | 2.58 | 19.60 | 77.95 | 87.95 | 19.60 | 20.68 | - | 2.90 | 87.95 | 32.57 | 16.84 | - | 3.57 |
| 89 | 51.28 | 2.58 | 20.17 | 77.53 | 87.53 | 20.17 | 17.36 | - | 2.95 | 87.53 | 32.92 | 14.14 | - | 3.63 |
| 90 | 48.44 | 2.58 | 21.86 | 77.52 | 87.52 | 21.86 | 15.99 | - | 3.03 | 87.52 | 34.21 | 13.06 | - | 3.71 |
| 91 | 46.44 | 2.58 | 23.46 | 77.33 | 87.33 | 23.46 | 14.89 | - | 3.12 | 87.33 | 35.45 | 12.20 | - | 3.81 |
| 92 | 47.88 | 2.57 | 25.96 | 77.62 | 87.62 | 25.96 | 14.86 | - | 3.22 | 87.62 | 37.46 | 12.23 | - | 3.91 |
| 93 | 32.67 | 2.57 | 27.47 | 76.99 | 86.99 | 27.47 | 9.76 | - | 3.35 | 86.99 | 33.17 | 8.84 | - | 3.69 |
| 94 | 32.25 | 2.57 | 27.87 | 77.50 | 87.50 | 27.87 | 9.69 | - | 3.33 | 87.50 | 33.66 | 8.77 | - | 3.68 |
| 95 | 30.02 | 2.57 | 28.49 | 77.41 | 87.41 | 28.49 | 8.92 | - | 3.37 | 87.41 | 34.23 | 8.07 | - | 3.72 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 96 | 30.62 | 2.57 | 29.04 | 77.65 | 87.65 | 29.04 | 9.06 | - | 3.38 | 87.65 | 34.75 | 8.21 | - | 3.73 |
| 97 | 30.19 | 2.57 | 29.20 | 77.77 | 87.77 | 29.20 | 8.94 | - | 3.38 | 87.77 | 34.91 | 8.10 | - | 3.73 |
| 98 | 33.61 | 2.57 | 28.63 | 78.36 | 88.36 | 28.63 | 10.19 | - | 3.30 | 88.36 | 34.51 | 9.21 | - | 3.65 |
| 99 | 37.40 | 2.57 | 25.83 | 79.41 | 89.41 | 25.83 | 12.15 | - | 3.08 | 89.41 | 32.18 | 10.96 | - | 3.41 |
| 100 | 19.92 | 2.58 | 23.87 | 77.62 | 87.62 | 23.87 | 6.39 | - | 3.12 | 87.62 | 25.29 | 6.25 | - | 3.19 |
| 101 | 27.30 | 2.57 | 23.11 | 79.34 | 89.34 | 23.11 | 9.23 | - | 2.96 | 89.34 | 24.59 | 9.01 | - | 3.03 |
| 102 | 18.46 | 2.57 | 22.19 | 78.08 | 88.08 | 22.19 | 6.14 | - | 3.01 | 88.08 | 23.69 | 6.00 | - | 3.08 |
| 103 | 24.02 | 2.57 | 21.16 | 78.62 | 88.62 | 21.16 | 8.22 | - | 2.92 | 88.62 | 22.72 | 8.03 | - | 2.99 |
| 104 | 25.24 | 2.56 | 21.24 | 79.06 | 89.06 | 21.24 | 8.72 | - | 2.89 | 89.06 | 22.81 | 8.51 | - | 2.96 |
| 105 | 22.24 | 2.55 | 21.06 | 78.63 | 88.63 | 21.06 | 7.63 | - | 2.92 | 88.63 | 22.61 | 7.45 | - | 2.99 |
| 106 | 25.94 | 2.54 | 21.48 | 79.41 | 89.41 | 21.48 | 9.00 | - | 2.88 | 89.41 | 23.04 | 8.79 | - | 2.95 |
| 107 | 28.63 | 2.53 | 21.33 | 80.61 | 90.61 | 21.33 | 10.25 | - | 2.79 | 90.61 | 22.93 | 10.01 | - | 2.86 |
| 108 | 21.62 | 2.54 | 21.21 | 79.52 | 89.52 | 21.21 | 7.55 | - | 2.86 | 89.52 | 22.80 | 7.37 | - | 2.93 |
| 109 | 23.67 | 2.54 | 20.14 | 79.36 | 89.36 | 20.14 | 8.36 | - | 2.83 | 89.36 | 21.75 | 8.17 | - | 2.90 |
| 110 | 25.23 | 2.55 | 19.45 | 79.36 | 89.36 | 19.45 | 8.99 | - | 2.81 | 89.36 | 21.09 | 8.80 | - | 2.87 |
| 111 | 25.11 | 2.55 | 19.63 | 79.26 | 89.26 | 19.63 | 8.90 | - | 2.82 | 89.26 | 21.26 | 8.71 | - | 2.88 |
| 112 | 26.73 | 2.55 | 19.44 | 79.52 | 89.52 | 19.44 | 9.56 | - | 2.80 | 89.52 | 21.09 | 9.36 | - | 2.86 |
| 113 | 26.56 | 2.54 | 19.62 | 79.73 | 89.73 | 19.62 | 9.52 | - | 2.79 | 89.73 | 21.25 | 9.32 | - | 2.85 |
| 114 | 27.24 | 2.54 | 22.73 | 80.13 | 90.13 | 22.73 | 9.44 | - | 2.89 | 90.13 | 24.32 | 9.21 | - | 2.96 |

**ตารางที่ ค.1(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบอุดมคติ บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 115 | 23.57 | 2.55 | 23.46 | 79.53 | 89.53 | 23.46 | 7.96 | - | 2.96 | 89.53 | 25.01 | 7.77 | - | 3.03 |
| 116 | 25.43 | 2.54 | 27.47 | 79.95 | 89.95 | 27.47 | 8.17 | - | 3.11 | 89.95 | 28.92 | 7.99 | - | 3.18 |
| 117 | 20.55 | 2.55 | 28.09 | 79.02 | 89.02 | 28.09 | 6.39 | - | 3.22 | 89.02 | 29.48 | 6.24 | - | 3.29 |
| 118 | 25.86 | 2.54 | 29.23 | 79.88 | 89.88 | 29.23 | 8.07 | - | 3.21 | 89.88 | 30.63 | 7.88 | - | 3.28 |
| 119 | 24.29 | 2.55 | 29.39 | 79.98 | 89.98 | 29.39 | 7.58 | - | 3.21 | 89.98 | 30.78 | 7.40 | - | 3.28 |
| 120 | 23.83 | 2.55 | 30.59 | 80.02 | 90.02 | 30.59 | 7.29 | - | 3.27 | 90.02 | 31.97 | 7.12 | - | 3.35 |
| 121 | 22.79 | 2.55 | 30.73 | 79.79 | 89.79 | 30.73 | 6.92 | - | 3.29 | 89.79 | 32.10 | 6.76 | - | 3.37 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 10.35 | 2.42 | 29.08 | 31.84 | 41.84 | 19.08 | 1.58 | - | 6.56 | 41.84 | 19.89 | 1.52 | - | 6.81 |
| 2 | 9.62 | 2.41 | 28.63 | 31.67 | 41.67 | 18.63 | 1.48 | - | 6.48 | 41.67 | 19.64 | 1.42 | - | 6.79 |
| 3 | 25.04 | 2.40 | 28.23 | 33.54 | 43.54 | 18.23 | 4.24 | - | 5.90 | 43.54 | 19.89 | 3.96 | - | 6.33 |
| 4 | 11.60 | 2.44 | 28.05 | 32.62 | 42.62 | 18.05 | 1.91 | - | 6.07 | 42.62 | 19.70 | 1.78 | - | 6.52 |
| 5 | 15.62 | 2.47 | 28.09 | 33.37 | 43.37 | 18.09 | 2.65 | - | 5.90 | 43.37 | 19.88 | 2.45 | - | 6.37 |
| 6 | 22.16 | 2.50 | 26.60 | 34.59 | 44.59 | 16.60 | 4.16 | - | 5.33 | 44.59 | 19.51 | 3.72 | - | 5.96 |
| 7 | 31.47 | 2.62 | 25.18 | 36.43 | 46.43 | 15.18 | 6.61 | - | 4.76 | 46.43 | 19.36 | 5.70 | - | 5.52 |
| 8 | 20.92 | 2.47 | 24.49 | 35.84 | 45.84 | 14.49 | 4.41 | - | 4.74 | 45.84 | 19.04 | 3.75 | - | 5.58 |
| 9 | 21.76 | 2.46 | 24.52 | 36.18 | 46.18 | 14.52 | 4.63 | - | 4.70 | 46.18 | 19.13 | 3.94 | - | 5.53 |
| 10 | 41.11 | 2.51 | 24.43 | 38.92 | 48.92 | 14.43 | 9.53 | - | 4.31 | 48.92 | 19.86 | 7.99 | - | 5.14 |
| 11 | 38.64 | 2.51 | 24.01 | 39.86 | 49.86 | 14.01 | 9.32 | - | 4.15 | 49.86 | 20.10 | 7.69 | - | 5.02 |
| 12 | 32.56 | 2.45 | 23.46 | 39.56 | 49.56 | 13.46 | 7.91 | - | 4.12 | 49.56 | 19.97 | 6.45 | - | 5.05 |
| 13 | 31.76 | 2.48 | 23.17 | 39.77 | 49.77 | 13.17 | 7.82 | - | 4.06 | 49.77 | 19.85 | 6.36 | - | 5.00 |
| 14 | 36.05 | 2.47 | 23.34 | 40.49 | 50.49 | 13.34 | 9.02 | - | 4.00 | 50.49 | 20.18 | 7.31 | - | 4.93 |
| 15 | 34.31 | 2.48 | 24.54 | 40.57 | 50.57 | 14.54 | 8.31 | - | 4.13 | 50.57 | 20.92 | 6.80 | - | 5.05 |
| 16 | 30.11 | 2.43 | 26.54 | 40.23 | 50.23 | 16.54 | 6.81 | - | 4.42 | 50.23 | 21.91 | 5.69 | - | 5.29 |
| 17 | 25.77 | 2.45 | 28.00 | 39.41 | 49.41 | 18.00 | 5.42 | - | 4.75 | 49.41 | 22.50 | 4.63 | - | 5.57 |
| 18 | 10.35 | 2.41 | 30.16 | 40.01 | 50.01 | 20.16 | 6.34 | - | 5.01 | 50.01 | 23.68 | 5.57 | - | 5.70 |
| 19 | 9.62 | 2.43 | 30.76 | 39.37 | 49.37 | 20.76 | 5.18 | - | 5.23 | 49.37 | 23.89 | 4.60 | - | 5.89 |

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 20 | 25.04 | 2.43 | 31.33 | 40.06 | 50.06 | 21.33 | 6.12 | - | 5.21 | 50.06 | 24.25 | 5.49 | - | 5.81 |
| 21 | 11.60 | 2.43 | 32.05 | 39.78 | 49.78 | 22.05 | 5.61 | - | 5.40 | 49.78 | 24.76 | 5.05 | - | 6.00 |
| 22 | 15.62 | 2.44 | 32.11 | 39.38 | 49.38 | 22.11 | 3.89 | - | 5.49 | 49.38 | 24.66 | 3.52 | - | 6.07 |
| 23 | 22.16 | 2.42 | 31.56 | 42.09 | 52.09 | 21.56 | 8.41 | - | 4.90 | 52.09 | 25.14 | 7.40 | - | 5.57 |
| 24 | 31.47 | 2.46 | 29.78 | 40.58 | 50.58 | 19.78 | 4.16 | - | 4.85 | 50.58 | 24.08 | 3.57 | - | 5.66 |
| 25 | 20.92 | 2.47 | 27.96 | 42.83 | 52.83 | 17.96 | 9.31 | - | 4.27 | 52.83 | 23.91 | 7.68 | - | 5.18 |
| 26 | 21.76 | 2.42 | 27.52 | 42.76 | 52.76 | 17.52 | 8.51 | - | 4.23 | 52.76 | 23.79 | 6.96 | - | 5.17 |
| 27 | 41.11 | 2.48 | 27.46 | 43.69 | 53.69 | 17.46 | 9.84 | - | 4.11 | 53.69 | 24.04 | 8.01 | - | 5.05 |
| 28 | 38.64 | 2.47 | 27.55 | 43.47 | 53.47 | 17.55 | 9.86 | - | 4.15 | 53.47 | 24.43 | 7.92 | - | 5.16 |
| 29 | 32.56 | 2.49 | 26.43 | 44.14 | 54.14 | 16.43 | 11.16 | - | 3.94 | 54.14 | 24.15 | 8.81 | - | 4.99 |
| 30 | 31.76 | 2.50 | 25.04 | 44.49 | 54.49 | 15.04 | 11.53 | - | 3.77 | 54.49 | 23.64 | 8.95 | - | 4.85 |
| 31 | 36.05 | 2.54 | 23.83 | 43.52 | 53.52 | 13.83 | 9.41 | - | 3.74 | 53.52 | 22.84 | 7.21 | - | 4.88 |
| 32 | 34.31 | 2.50 | 23.66 | 43.98 | 53.98 | 13.66 | 11.42 | - | 3.68 | 53.98 | 22.79 | 8.76 | - | 4.80 |
| 33 | 30.11 | 2.50 | 23.96 | 44.97 | 54.97 | 13.96 | 13.19 | - | 3.62 | 54.97 | 23.24 | 10.12 | - | 4.71 |
| 34 | 25.77 | 2.49 | 23.66 | 45.32 | 55.32 | 13.66 | 13.82 | - | 3.56 | 55.32 | 23.35 | 10.52 | - | 4.68 |
| 35 | 42.23 | 2.54 | 23.48 | 44.85 | 54.85 | 13.48 | 11.78 | - | 3.59 | 54.85 | 23.15 | 8.95 | - | 4.72 |
| 36 | 44.19 | 2.48 | 23.46 | 45.16 | 55.16 | 13.46 | 12.43 | - | 3.56 | 55.16 | 23.22 | 9.44 | - | 4.68 |
| 37 | 51.63 | 2.47 | 23.61 | 46.18 | 56.18 | 13.61 | 14.83 | - | 3.48 | 56.18 | 23.67 | 11.23 | - | 4.60 |
| 38 | 46.93 | 2.54 | 23.40 | 45.96 | 55.96 | 13.40 | 13.48 | - | 3.48 | 55.96 | 23.60 | 10.16 | - | 4.62 |

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 39 | 43.97 | 2.49 | 24.34 | 45.29 | 55.29 | 14.34 | 12.13 | - | 3.62 | 55.29 | 23.87 | 9.24 | - | 4.76 |
| 40 | 45.92 | 2.49 | 26.76 | 45.89 | 55.89 | 16.76 | 12.09 | - | 3.80 | 55.89 | 25.08 | 9.46 | - | 4.86 |
| 41 | 54.02 | 2.58 | 27.35 | 47.73 | 57.73 | 17.35 | 14.69 | - | 3.68 | 57.73 | 25.99 | 11.47 | - | 4.71 |
| 42 | 38.87 | 2.63 | 28.19 | 47.19 | 57.19 | 18.19 | 10.20 | - | 3.81 | 57.19 | 26.37 | 8.01 | - | 4.85 |
| 43 | 41.64 | 2.53 | 28.94 | 47.32 | 57.32 | 18.94 | 10.75 | - | 3.88 | 57.32 | 26.97 | 8.45 | - | 4.93 |
| 44 | 39.37 | 2.51 | 29.36 | 47.89 | 57.89 | 19.36 | 10.20 | - | 3.86 | 57.89 | 27.14 | 8.09 | - | 4.86 |
| 45 | 47.34 | 2.52 | 29.31 | 48.69 | 58.69 | 19.31 | 12.54 | - | 3.77 | 58.69 | 27.42 | 9.90 | - | 4.78 |
| 46 | 36.33 | 2.49 | 29.29 | 47.55 | 57.55 | 19.29 | 9.34 | - | 3.89 | 57.55 | 27.13 | 7.38 | - | 4.92 |
| 47 | 43.51 | 2.53 | 28.58 | 48.18 | 58.18 | 18.58 | 11.60 | - | 3.75 | 58.18 | 26.91 | 9.10 | - | 4.78 |
| 48 | 34.19 | 2.58 | 27.41 | 47.60 | 57.60 | 17.41 | 9.25 | - | 3.69 | 57.60 | 26.19 | 7.18 | - | 4.76 |
| 49 | 52.22 | 2.57 | 26.27 | 48.60 | 58.60 | 16.27 | 14.91 | - | 3.50 | 58.60 | 27.42 | 10.89 | - | 4.80 |
| 50 | 56.86 | 2.53 | 25.41 | 49.55 | 59.55 | 15.41 | 16.96 | - | 3.35 | 59.55 | 27.43 | 12.23 | - | 4.65 |
| 51 | 69.02 | 2.52 | 25.66 | 51.49 | 61.49 | 15.66 | 21.41 | - | 3.22 | 61.49 | 28.34 | 15.35 | - | 4.50 |
| 52 | 59.50 | 2.51 | 25.70 | 51.44 | 61.44 | 15.70 | 18.42 | - | 3.23 | 61.44 | 28.42 | 13.18 | - | 4.51 |
| 53 | 65.70 | 2.45 | 25.16 | 53.07 | 63.07 | 15.16 | 21.35 | - | 3.08 | 63.07 | 28.77 | 15.16 | - | 4.34 |
| 54 | 71.74 | 2.43 | 24.64 | 54.42 | 64.42 | 14.64 | 24.28 | - | 2.95 | 64.42 | 29.22 | 17.01 | - | 4.22 |
| 55 | 76.78 | 2.40 | 24.22 | 55.34 | 65.34 | 14.22 | 26.72 | - | 2.87 | 65.34 | 29.56 | 18.54 | - | 4.14 |
| 56 | 81.24 | 2.40 | 23.68 | 56.95 | 66.95 | 13.68 | 29.54 | - | 2.75 | 66.95 | 30.01 | 20.31 | - | 4.00 |
| 57 | 82.38 | 2.38 | 22.04 | 57.57 | 67.57 | 12.04 | 31.28 | - | 2.63 | 67.57 | 29.81 | 21.09 | - | 3.91 |

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 58 | 83.40 | 2.34 | 20.59 | 57.90 | 67.90 | 10.59 | 32.72 | - | 2.55 | 67.90 | 29.43 | 21.77 | - | 3.83 |
| 59 | 77.64 | 2.33 | 20.37 | 58.02 | 68.02 | 10.37 | 30.65 | - | 2.53 | 68.02 | 29.32 | 20.39 | - | 3.81 |
| 60 | 86.68 | 2.34 | 20.60 | 59.07 | 69.07 | 10.60 | 34.76 | - | 2.49 | 69.07 | 29.85 | 23.12 | - | 3.75 |
| 61 | 79.28 | 2.32 | 21.45 | 58.79 | 68.79 | 11.45 | 31.16 | - | 2.54 | 68.79 | 30.22 | 20.78 | - | 3.81 |
| 62 | 80.22 | 2.32 | 22.26 | 59.38 | 69.38 | 12.26 | 31.43 | - | 2.55 | 69.38 | 30.81 | 21.05 | - | 3.81 |
| 63 | 72.52 | 2.30 | 22.48 | 58.83 | 68.83 | 12.48 | 28.00 | - | 2.59 | 68.83 | 30.82 | 18.73 | - | 3.87 |
| 64 | 77.90 | 2.33 | 24.11 | 59.22 | 69.22 | 14.11 | 29.42 | - | 2.65 | 69.22 | 31.59 | 19.93 | - | 3.91 |
| 65 | 75.38 | 2.30 | 24.75 | 58.81 | 68.81 | 14.75 | 27.90 | - | 2.70 | 68.81 | 31.74 | 18.97 | - | 3.97 |
| 66 | 68.20 | 2.29 | 26.38 | 58.93 | 68.93 | 16.38 | 24.52 | - | 2.78 | 68.93 | 32.01 | 17.10 | - | 3.99 |
| 67 | 79.04 | 2.30 | 27.60 | 61.13 | 71.13 | 17.60 | 29.06 | - | 2.72 | 71.13 | 33.23 | 20.45 | - | 3.87 |
| 68 | 76.24 | 2.27 | 27.92 | 61.28 | 71.28 | 17.92 | 27.95 | - | 2.73 | 71.28 | 33.69 | 19.56 | - | 3.90 |
| 69 | 82.37 | 2.26 | 27.93 | 62.72 | 72.72 | 17.93 | 31.11 | - | 2.65 | 72.72 | 34.26 | 21.70 | - | 3.80 |
| 70 | 81.15 | 2.26 | 27.61 | 64.56 | 74.56 | 17.61 | 32.02 | - | 2.53 | 74.56 | 34.47 | 22.42 | - | 3.62 |
| 71 | 70.24 | 2.28 | 26.15 | 64.16 | 74.16 | 16.15 | 28.22 | - | 2.49 | 74.16 | 33.82 | 19.51 | - | 3.60 |
| 72 | 73.33 | 2.28 | 23.53 | 64.17 | 74.17 | 13.53 | 30.81 | - | 2.38 | 74.17 | 32.81 | 20.90 | - | 3.51 |
| 73 | 75.36 | 2.31 | 22.13 | 64.32 | 74.32 | 12.13 | 32.51 | - | 2.32 | 74.32 | 32.26 | 21.85 | - | 3.45 |
| 74 | 60.75 | 2.33 | 21.74 | 62.38 | 72.38 | 11.74 | 25.43 | - | 2.39 | 72.38 | 22.67 | 20.75 | - | 2.93 |
| 75 | 66.60 | 2.34 | 21.47 | 63.85 | 73.85 | 11.47 | 28.78 | - | 2.31 | 73.85 | 22.83 | 23.43 | - | 2.84 |
| 76 | 66.17 | 2.31 | 21.02 | 64.11 | 74.11 | 11.02 | 28.94 | - | 2.29 | 74.11 | 22.78 | 23.44 | - | 2.82 |

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 77 | 59.96 | 2.33 | 20.34 | 63.26 | 73.26 | 10.34 | 26.10 | - | 2.30 | 73.26 | 22.22 | 21.08 | - | 2.84 |
| 78 | 68.62 | 2.33 | 19.04 | 64.32 | 74.32 | 9.04 | 31.06 | - | 2.21 | 74.32 | 21.47 | 25.06 | - | 2.74 |
| 79 | 72.95 | 2.34 | 18.64 | 65.30 | 75.30 | 8.64 | 33.80 | - | 2.16 | 75.30 | 21.42 | 27.25 | - | 2.68 |
| 80 | 74.72 | 2.30 | 18.54 | 65.92 | 75.92 | 8.54 | 35.05 | - | 2.13 | 75.92 | 21.56 | 28.20 | - | 2.65 |
| 81 | 69.31 | 2.29 | 18.34 | 65.78 | 75.78 | 8.34 | 32.53 | - | 2.13 | 75.78 | 21.41 | 26.16 | - | 2.65 |
| 82 | 76.77 | 2.28 | 17.37 | 66.43 | 76.43 | 7.37 | 36.94 | - | 2.08 | 76.43 | 21.00 | 29.60 | - | 2.59 |
| 83 | 73.54 | 2.30 | 17.39 | 67.09 | 77.09 | 7.39 | 35.78 | - | 2.06 | 77.09 | 21.06 | 28.72 | - | 2.56 |
| 84 | 70.86 | 2.32 | 17.23 | 67.02 | 77.02 | 7.23 | 34.51 | - | 2.05 | 77.02 | 21.06 | 27.64 | - | 2.56 |
| 85 | 67.26 | 2.29 | 17.56 | 67.39 | 77.39 | 7.56 | 32.82 | - | 2.05 | 77.39 | 21.31 | 26.32 | - | 2.56 |
| 86 | 69.07 | 2.30 | 19.25 | 67.61 | 77.61 | 9.25 | 33.04 | - | 2.09 | 77.61 | 22.65 | 26.49 | - | 2.61 |
| 87 | 68.44 | 2.29 | 21.99 | 67.86 | 77.86 | 11.99 | 31.58 | - | 2.17 | 77.86 | 24.61 | 25.46 | - | 2.69 |
| 88 | 67.94 | 2.24 | 23.84 | 68.01 | 78.01 | 13.84 | 30.55 | - | 2.22 | 78.01 | 25.97 | 24.72 | - | 2.75 |
| 89 | 72.09 | 2.22 | 21.21 | 69.35 | 79.35 | 11.21 | 34.59 | - | 2.08 | 79.35 | 24.46 | 27.80 | - | 2.59 |
| 90 | 73.22 | 2.24 | 19.74 | 70.29 | 80.29 | 9.74 | 36.48 | - | 2.01 | 80.29 | 23.74 | 29.20 | - | 2.51 |
| 91 | 63.33 | 2.22 | 19.74 | 70.10 | 80.10 | 9.74 | 31.45 | - | 2.01 | 80.10 | 23.71 | 25.16 | - | 2.52 |
| 92 | 59.31 | 2.29 | 18.91 | 69.51 | 79.51 | 8.91 | 29.47 | - | 2.01 | 79.51 | 23.10 | 23.51 | - | 2.52 |
| 93 | 64.65 | 2.26 | 18.25 | 69.10 | 79.10 | 8.25 | 32.18 | - | 2.01 | 79.10 | 22.94 | 25.47 | - | 2.54 |
| 94 | 74.21 | 2.22 | 17.87 | 71.89 | 81.89 | 7.87 | 38.97 | - | 1.90 | 81.89 | 23.29 | 30.87 | - | 2.40 |
| 95 | 74.96 | 2.22 | 16.91 | 72.92 | 82.92 | 6.91 | 40.39 | - | 1.86 | 82.92 | 23.09 | 31.99 | - | 2.34 |

**ตารางที่ ค.2(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริง บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 96 | 76.21 | 2.14 | 16.54 | 74.82 | 84.82 | 6.54 | 42.38 | - | 1.80 | 84.82 | 23.03 | 33.92 | - | 2.25 |
| 97 | 76.06 | 2.25 | 16.75 | 74.96 | 84.96 | 6.75 | 42.45 | - | 1.79 | 84.96 | 23.33 | 33.81 | - | 2.25 |
| 98 | 40.92 | 2.24 | 15.92 | 72.57 | 82.57 | 5.92 | 21.81 | - | 1.88 | 82.57 | 10.43 | 21.05 | - | 1.94 |
| 99 | 39.14 | 2.27 | 15.40 | 72.95 | 82.95 | 5.40 | 20.96 | - | 1.87 | 82.95 | 9.99 | 20.39 | - | 1.92 |
| 100 | 40.10 | 2.23 | 15.76 | 73.25 | 83.25 | 5.76 | 21.62 | - | 1.85 | 83.25 | 10.43 | 20.88 | - | 1.92 |
| 101 | 39.29 | 2.20 | 17.65 | 73.87 | 83.87 | 7.65 | 21.42 | - | 1.83 | 83.87 | 12.21 | 20.20 | - | 1.95 |
| 102 | 39.40 | 2.20 | 20.90 | 74.56 | 84.56 | 10.90 | 20.89 | - | 1.89 | 84.56 | 15.27 | 19.64 | - | 2.01 |
| 103 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 13.57 | 17.65 | - | 1.97 | 84.23 | 17.71 | 16.62 | - | 2.09 |
| 104 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 15.08 | 19.61 | - | 1.97 | 85.35 | 19.15 | 18.50 | - | 2.09 |
| 105 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 16.52 | 17.24 | - | 2.00 | 85.54 | 20.47 | 16.26 | - | 2.12 |
| 106 | 35.06 | 2.13 | 27.73 | 76.07 | 86.07 | 17.73 | 17.40 | - | 2.01 | 86.07 | 21.64 | 16.40 | - | 2.14 |
| 107 | 34.56 | 2.11 | 28.04 | 76.04 | 86.04 | 18.04 | 17.07 | - | 2.02 | 86.04 | 21.97 | 16.07 | - | 2.15 |
| 108 | 35.14 | 2.11 | 28.05 | 76.15 | 86.15 | 18.05 | 17.40 | - | 2.02 | 86.15 | 21.98 | 16.38 | - | 2.15 |
| 109 | 41.08 | 2.10 | 27.04 | 77.72 | 87.72 | 17.04 | 21.30 | - | 1.93 | 87.72 | 21.16 | 20.07 | - | 2.05 |
| 110 | 38.99 | 2.10 | 24.75 | 78.52 | 88.52 | 14.75 | 21.19 | - | 1.84 | 88.52 | 19.09 | 20.00 | - | 1.95 |
| 111 | 35.00 | 2.10 | 23.05 | 78.45 | 88.45 | 13.05 | 19.44 | - | 1.80 | 88.45 | 17.51 | 18.32 | - | 1.91 |
| 112 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 11.01 | 21.00 | - | 1.74 | 84.23 | 15.66 | 19.74 | - | 1.85 |
| 113 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 9.91 | 22.27 | - | 1.70 | 85.35 | 14.66 | 20.97 | - | 1.80 |
| 114 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 9.29 | 22.89 | - | 1.67 | 85.54 | 14.15 | 21.57 | - | 1.77 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 26.24 | 2.51 | 23.32 | 37.11 | 47.11 | 23.32 | 5.97 | - | 4.40 | 47.11 | 28.68 | 4.99 | - | 5.25 |
| 2 | 26.46 | 2.51 | 23.62 | 37.16 | 47.16 | 23.62 | 5.97 | - | 4.43 | 47.16 | 28.85 | 5.01 | - | 5.28 |
| 3 | 33.08 | 2.50 | 22.67 | 38.31 | 48.31 | 22.67 | 7.94 | - | 4.17 | 48.31 | 28.63 | 6.57 | - | 5.03 |
| 4 | 37.51 | 2.59 | 22.09 | 39.44 | 49.44 | 22.09 | 9.44 | - | 3.97 | 49.44 | 28.67 | 7.73 | - | 4.85 |
| 5 | 28.07 | 2.58 | 21.84 | 38.06 | 48.06 | 21.84 | 6.85 | - | 4.10 | 48.06 | 28.35 | 5.59 | - | 5.02 |
| 6 | 30.51 | 2.58 | 21.34 | 38.38 | 48.38 | 21.34 | 7.62 | - | 4.01 | 48.38 | 28.07 | 6.20 | - | 4.92 |
| 7 | 30.70 | 2.52 | 20.94 | 38.30 | 48.30 | 20.94 | 7.73 | - | 3.97 | 48.30 | 27.84 | 6.27 | - | 4.90 |
| 8 | 32.74 | 2.52 | 20.42 | 38.43 | 48.43 | 20.42 | 8.39 | - | 3.90 | 48.43 | 27.57 | 6.77 | - | 4.83 |
| 9 | 36.05 | 2.52 | 19.56 | 38.97 | 48.97 | 19.56 | 9.59 | - | 3.76 | 48.97 | 27.24 | 7.67 | - | 4.70 |
| 10 | 29.77 | 2.52 | 19.71 | 38.00 | 48.00 | 19.71 | 7.69 | - | 3.87 | 48.00 | 27.14 | 6.16 | - | 4.83 |
| 11 | 36.59 | 2.53 | 19.61 | 39.02 | 49.02 | 19.61 | 9.73 | - | 3.76 | 49.02 | 27.26 | 7.80 | - | 4.69 |
| 12 | 31.12 | 2.57 | 19.31 | 38.25 | 48.25 | 19.31 | 8.18 | - | 3.80 | 48.25 | 26.99 | 6.53 | - | 4.77 |
| 13 | 40.02 | 2.57 | 19.08 | 39.97 | 49.97 | 19.08 | 11.05 | - | 3.62 | 49.97 | 27.22 | 8.79 | - | 4.55 |
| 14 | 37.70 | 2.58 | 18.97 | 40.07 | 50.07 | 18.97 | 10.46 | - | 3.60 | 50.07 | 27.35 | 8.27 | - | 4.56 |
| 15 | 38.40 | 2.58 | 18.47 | 40.38 | 50.38 | 18.47 | 10.87 | - | 3.53 | 50.38 | 27.23 | 8.54 | - | 4.50 |
| 16 | 40.77 | 2.57 | 19.36 | 40.60 | 50.60 | 19.36 | 11.35 | - | 3.59 | 50.60 | 30.35 | 8.25 | - | 4.94 |
| 17 | 41.16 | 2.57 | 19.46 | 40.47 | 50.47 | 19.46 | 11.39 | - | 3.61 | 50.47 | 30.30 | 8.31 | - | 4.95 |
| 18 | 50.00 | 2.57 | 20.09 | 42.26 | 52.26 | 20.09 | 14.23 | - | 3.51 | 52.26 | 31.07 | 10.43 | - | 4.79 |
| 19 | 43.18 | 2.57 | 21.81 | 41.69 | 51.69 | 21.81 | 11.61 | - | 3.72 | 51.69 | 31.76 | 8.64 | - | 5.00 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 20 | 31.77 | 2.58 | 23.01 | 40.09 | 50.09 | 23.01 | 7.93 | - | 4.01 | 50.09 | 31.86 | 5.99 | - | 5.30 |
| 21 | 37.52 | 2.59 | 24.73 | 40.99 | 50.99 | 24.73 | 9.15 | - | 4.10 | 50.99 | 32.68 | 7.09 | - | 5.29 |
| 22 | 37.00 | 2.61 | 25.50 | 41.06 | 51.06 | 25.50 | 8.84 | - | 4.18 | 51.06 | 33.07 | 6.91 | - | 5.35 |
| 23 | 33.56 | 2.62 | 25.62 | 40.69 | 50.69 | 25.62 | 7.91 | - | 4.24 | 50.69 | 33.07 | 6.18 | - | 5.43 |
| 24 | 29.64 | 2.62 | 27.33 | 39.98 | 49.98 | 27.33 | 6.49 | - | 4.57 | 49.98 | 33.47 | 5.24 | - | 5.66 |
| 25 | 29.37 | 2.61 | 27.26 | 40.04 | 50.04 | 27.26 | 6.46 | - | 4.55 | 50.04 | 33.44 | 5.21 | - | 5.64 |
| 26 | 26.49 | 2.59 | 26.47 | 39.75 | 49.75 | 26.47 | 5.92 | - | 4.48 | 49.75 | 33.10 | 4.71 | - | 5.63 |
| 27 | 28.17 | 2.59 | 24.29 | 39.72 | 49.72 | 24.29 | 6.71 | - | 4.20 | 49.72 | 32.25 | 5.16 | - | 5.45 |
| 28 | 51.56 | 2.58 | 22.64 | 43.18 | 53.18 | 22.64 | 14.09 | - | 3.66 | 53.18 | 30.82 | 11.17 | - | 4.62 |
| 29 | 41.98 | 2.60 | 21.15 | 43.05 | 53.05 | 21.15 | 11.87 | - | 3.54 | 53.05 | 30.42 | 9.17 | - | 4.58 |
| 30 | 37.96 | 2.61 | 20.79 | 42.61 | 52.61 | 20.79 | 10.71 | - | 3.54 | 52.61 | 30.23 | 8.23 | - | 4.61 |
| 31 | 42.19 | 2.61 | 20.84 | 43.13 | 53.13 | 20.84 | 12.04 | - | 3.50 | 53.13 | 30.37 | 9.26 | - | 4.56 |
| 32 | 50.05 | 2.62 | 20.66 | 44.72 | 54.72 | 20.66 | 14.89 | - | 3.36 | 54.72 | 30.74 | 11.40 | - | 4.39 |
| 33 | 48.83 | 2.60 | 20.49 | 45.73 | 55.73 | 20.49 | 14.93 | - | 3.27 | 55.73 | 31.10 | 11.33 | - | 4.31 |
| 34 | 39.81 | 2.60 | 20.10 | 44.79 | 54.79 | 20.10 | 12.02 | - | 3.31 | 54.79 | 30.87 | 9.05 | - | 4.40 |
| 35 | 46.66 | 2.60 | 20.22 | 45.91 | 55.91 | 20.22 | 14.41 | - | 3.24 | 55.91 | 31.18 | 10.86 | - | 4.30 |
| 36 | 50.79 | 2.60 | 19.64 | 47.39 | 57.39 | 19.64 | 16.41 | - | 3.09 | 57.39 | 31.40 | 12.27 | - | 4.14 |
| 37 | 46.08 | 2.61 | 19.54 | 47.64 | 57.64 | 19.54 | 15.00 | - | 3.07 | 57.64 | 31.63 | 11.13 | - | 4.14 |
| 38 | 75.64 | 2.63 | 19.36 | 52.83 | 62.83 | 19.36 | 27.50 | - | 2.75 | 62.83 | 33.18 | 20.22 | - | 3.74 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 39 | 58.86 | 2.63 | 19.41 | 51.44 | 61.44 | 19.41 | 20.79 | - | 2.83 | 61.44 | 33.16 | 15.16 | - | 3.88 |
| 40 | 59.02 | 2.65 | 19.21 | 51.46 | 61.46 | 19.21 | 20.94 | - | 2.82 | 61.46 | 33.07 | 15.25 | - | 3.87 |
| 41 | 67.43 | 2.63 | 20.04 | 53.16 | 63.16 | 20.04 | 24.36 | - | 2.77 | 63.16 | 33.93 | 17.84 | - | 3.78 |
| 42 | 77.74 | 2.61 | 21.00 | 55.72 | 65.72 | 21.00 | 29.02 | - | 2.68 | 65.72 | 35.12 | 21.36 | - | 3.64 |
| 43 | 58.99 | 2.61 | 21.55 | 53.70 | 63.70 | 21.55 | 20.92 | - | 2.82 | 63.70 | 35.18 | 15.33 | - | 3.85 |
| 44 | 58.96 | 2.59 | 21.70 | 53.25 | 63.25 | 21.70 | 20.66 | - | 2.85 | 63.25 | 35.07 | 15.17 | - | 3.89 |
| 45 | 72.11 | 2.60 | 22.66 | 55.68 | 65.68 | 22.66 | 26.06 | - | 2.77 | 65.68 | 36.11 | 19.30 | - | 3.74 |
| 46 | 61.42 | 2.60 | 24.59 | 55.21 | 65.21 | 24.59 | 21.16 | - | 2.90 | 65.21 | 37.20 | 15.77 | - | 3.90 |
| 47 | 56.15 | 2.60 | 24.97 | 54.42 | 64.42 | 24.97 | 18.87 | - | 2.98 | 64.42 | 37.27 | 14.07 | - | 3.99 |
| 48 | 61.18 | 2.59 | 24.23 | 55.19 | 65.19 | 24.23 | 21.22 | - | 2.88 | 65.19 | 37.08 | 15.75 | - | 3.88 |
| 49 | 72.33 | 2.58 | 24.64 | 57.36 | 67.36 | 24.64 | 26.04 | - | 2.78 | 67.36 | 40.55 | 18.03 | - | 4.01 |
| 50 | 64.77 | 2.59 | 24.75 | 56.55 | 66.55 | 24.75 | 22.88 | - | 2.83 | 66.55 | 40.46 | 15.80 | - | 4.10 |
| 51 | 66.75 | 2.59 | 22.80 | 57.03 | 67.03 | 22.80 | 24.72 | - | 2.70 | 67.03 | 39.92 | 16.77 | - | 3.98 |
| 52 | 68.07 | 2.59 | 21.90 | 57.36 | 67.36 | 21.90 | 25.81 | - | 2.64 | 67.36 | 39.72 | 17.36 | - | 3.92 |
| 53 | 64.25 | 2.60 | 20.65 | 56.73 | 66.73 | 20.65 | 24.62 | - | 2.61 | 66.73 | 39.10 | 16.36 | - | 3.93 |
| 54 | 74.04 | 2.59 | 20.07 | 57.60 | 67.60 | 20.07 | 29.15 | - | 2.54 | 67.60 | 39.01 | 19.38 | - | 3.82 |
| 55 | 58.65 | 2.60 | 19.61 | 55.84 | 65.84 | 19.61 | 22.51 | - | 2.61 | 65.84 | 38.42 | 14.83 | - | 3.95 |
| 56 | 72.83 | 2.61 | 18.93 | 57.81 | 67.81 | 18.93 | 29.35 | - | 2.48 | 67.81 | 38.66 | 19.35 | - | 3.76 |
| 57 | 70.08 | 2.60 | 18.84 | 57.81 | 67.81 | 18.84 | 28.29 | - | 2.48 | 67.81 | 38.77 | 18.56 | - | 3.78 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 58 | 62.27 | 2.61 | 18.39 | 56.88 | 66.88 | 18.39 | 24.90 | - | 2.50 | 66.88 | 38.41 | 16.22 | - | 3.84 |
| 59 | 75.24 | 2.60 | 18.31 | 58.36 | 68.36 | 18.31 | 30.96 | - | 2.43 | 68.36 | 38.72 | 20.26 | - | 3.71 |
| 60 | 59.29 | 2.59 | 18.48 | 56.51 | 66.51 | 18.48 | 23.52 | - | 2.52 | 66.51 | 38.39 | 15.30 | - | 3.88 |
| 61 | 84.61 | 2.62 | 17.60 | 61.50 | 71.50 | 17.60 | 37.25 | - | 2.27 | 71.50 | 39.50 | 24.32 | - | 3.48 |
| 62 | 82.39 | 2.62 | 17.67 | 64.48 | 74.48 | 17.67 | 38.17 | - | 2.16 | 74.48 | 41.42 | 24.48 | - | 3.37 |
| 63 | 74.98 | 2.64 | 17.90 | 63.80 | 73.80 | 17.90 | 34.21 | - | 2.19 | 73.80 | 41.60 | 21.79 | - | 3.44 |
| 64 | 82.70 | 2.66 | 18.31 | 65.64 | 75.64 | 18.31 | 38.73 | - | 2.14 | 75.64 | 42.29 | 24.83 | - | 3.33 |
| 65 | 68.00 | 2.67 | 18.76 | 64.09 | 74.09 | 18.76 | 30.79 | - | 2.21 | 74.09 | 42.37 | 19.54 | - | 3.48 |
| 66 | 69.91 | 2.71 | 20.48 | 63.96 | 73.96 | 20.48 | 30.76 | - | 2.27 | 73.96 | 42.94 | 19.74 | - | 3.54 |
| 67 | 69.98 | 2.72 | 22.31 | 64.48 | 74.48 | 22.31 | 30.18 | - | 2.32 | 74.48 | 45.64 | 18.71 | - | 3.74 |
| 68 | 67.57 | 2.72 | 23.69 | 64.31 | 74.31 | 23.69 | 28.40 | - | 2.38 | 74.31 | 46.19 | 17.72 | - | 3.81 |
| 69 | 80.37 | 2.70 | 25.23 | 65.89 | 75.89 | 25.23 | 33.93 | - | 2.37 | 75.89 | 47.15 | 21.53 | - | 3.73 |
| 70 | 67.66 | 2.66 | 26.69 | 65.50 | 75.50 | 26.69 | 27.64 | - | 2.45 | 75.50 | 47.84 | 17.58 | - | 3.85 |
| 71 | 65.47 | 2.64 | 27.24 | 65.04 | 75.04 | 27.24 | 26.25 | - | 2.49 | 75.04 | 48.00 | 16.70 | - | 3.92 |
| 72 | 70.38 | 2.61 | 28.49 | 65.69 | 75.69 | 28.49 | 27.97 | - | 2.52 | 75.69 | 48.60 | 18.01 | - | 3.91 |
| 73 | 59.55 | 2.60 | 29.07 | 64.69 | 74.69 | 29.07 | 22.94 | - | 2.60 | 74.69 | 48.67 | 14.75 | - | 4.04 |
| 74 | 66.30 | 2.58 | 27.48 | 66.19 | 76.19 | 27.48 | 27.10 | - | 2.45 | 76.19 | 48.77 | 17.16 | - | 3.86 |
| 75 | 75.79 | 2.59 | 26.25 | 67.34 | 77.34 | 26.25 | 32.35 | - | 2.34 | 77.34 | 48.78 | 20.30 | - | 3.73 |
| 76 | 68.96 | 2.59 | 24.37 | 67.69 | 77.69 | 24.37 | 30.55 | - | 2.26 | 77.69 | 48.61 | 18.75 | - | 3.68 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 77 | 64.90 | 2.55 | 22.21 | 68.04 | 78.04 | 22.21 | 29.95 | - | 2.17 | 78.04 | 48.30 | 17.97 | - | 3.61 |
| 78 | 79.79 | 2.55 | 21.54 | 71.05 | 81.05 | 21.54 | 39.30 | - | 2.03 | 81.05 | 49.23 | 23.58 | - | 3.38 |
| 79 | 88.18 | 2.50 | 21.39 | 74.47 | 84.47 | 21.39 | 46.37 | - | 1.90 | 84.47 | 50.85 | 27.71 | - | 3.18 |
| 80 | 79.80 | 2.59 | 20.90 | 73.88 | 83.88 | 20.90 | 41.79 | - | 1.91 | 83.88 | 50.81 | 24.67 | - | 3.24 |
| 81 | 81.56 | 2.59 | 20.70 | 74.55 | 84.55 | 20.70 | 43.36 | - | 1.88 | 84.55 | 51.09 | 25.55 | - | 3.19 |
| 82 | 84.35 | 2.60 | 20.35 | 74.67 | 84.67 | 20.35 | 45.13 | - | 1.87 | 84.67 | 51.09 | 26.51 | - | 3.18 |
| 83 | 57.51 | 2.59 | 20.35 | 71.18 | 81.18 | 20.35 | 28.87 | - | 1.99 | 81.18 | 31.43 | 24.32 | - | 2.36 |
| 84 | 47.47 | 2.58 | 19.94 | 70.64 | 80.64 | 19.94 | 23.73 | - | 2.00 | 80.64 | 31.21 | 19.93 | - | 2.38 |
| 85 | 65.16 | 2.58 | 20.22 | 74.04 | 84.04 | 20.22 | 34.52 | - | 1.89 | 84.04 | 31.99 | 29.02 | - | 2.25 |
| 86 | 73.07 | 2.57 | 20.04 | 77.71 | 87.71 | 20.04 | 41.55 | - | 1.76 | 87.71 | 32.55 | 34.92 | - | 2.09 |
| 87 | 57.65 | 2.57 | 19.42 | 77.12 | 87.12 | 19.42 | 32.64 | - | 1.77 | 87.12 | 32.22 | 27.34 | - | 2.11 |
| 88 | 60.08 | 2.58 | 19.60 | 77.95 | 87.95 | 19.60 | 34.49 | - | 1.74 | 87.95 | 32.57 | 28.85 | - | 2.08 |
| 89 | 51.28 | 2.58 | 20.17 | 77.53 | 87.53 | 20.17 | 29.02 | - | 1.77 | 87.53 | 32.92 | 24.27 | - | 2.11 |
| 90 | 48.44 | 2.58 | 21.86 | 77.52 | 87.52 | 21.86 | 26.83 | - | 1.81 | 87.52 | 34.21 | 22.48 | - | 2.15 |
| 91 | 46.44 | 2.58 | 23.46 | 77.33 | 87.33 | 23.46 | 25.08 | - | 1.85 | 87.33 | 35.45 | 21.06 | - | 2.21 |
| 92 | 47.88 | 2.57 | 25.96 | 77.62 | 87.62 | 25.96 | 25.14 | - | 1.90 | 87.62 | 37.46 | 21.19 | - | 2.26 |
| 93 | 32.67 | 2.57 | 27.47 | 76.99 | 86.99 | 27.47 | 16.59 | - | 1.97 | 86.99 | 33.17 | 15.22 | - | 2.15 |
| 94 | 32.25 | 2.57 | 27.87 | 77.50 | 87.50 | 27.87 | 16.46 | - | 1.96 | 87.50 | 33.66 | 15.09 | - | 2.14 |
| 95 | 30.02 | 2.57 | 28.49 | 77.41 | 87.41 | 28.49 | 15.17 | - | 1.98 | 87.41 | 34.23 | 13.90 | - | 2.16 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 96 | 30.62 | 2.57 | 29.04 | 77.65 | 87.65 | 29.04 | 15.42 | - | 1.99 | 87.65 | 34.75 | 14.14 | - | 2.17 |
| 97 | 30.19 | 2.57 | 29.20 | 77.77 | 87.77 | 29.20 | 15.21 | - | 1.98 | 87.77 | 34.91 | 13.95 | - | 2.17 |
| 98 | 33.61 | 2.57 | 28.63 | 78.36 | 88.36 | 28.63 | 17.29 | - | 1.94 | 88.36 | 34.51 | 15.83 | - | 2.12 |
| 99 | 37.40 | 2.57 | 25.83 | 79.41 | 89.41 | 25.83 | 20.42 | - | 1.83 | 89.41 | 32.18 | 18.68 | - | 2.00 |
| 100 | 19.92 | 2.58 | 23.87 | 77.62 | 87.62 | 23.87 | 10.76 | - | 1.85 | 87.62 | 25.29 | 10.56 | - | 1.89 |
| 101 | 27.30 | 2.57 | 23.11 | 79.34 | 89.34 | 23.11 | 15.42 | - | 1.77 | 89.34 | 24.59 | 15.12 | - | 1.81 |
| 102 | 18.46 | 2.57 | 22.19 | 78.08 | 88.08 | 22.19 | 10.29 | - | 1.79 | 88.08 | 23.69 | 10.09 | - | 1.83 |
| 103 | 24.02 | 2.57 | 21.16 | 78.62 | 88.62 | 21.16 | 13.72 | - | 1.75 | 88.62 | 22.72 | 13.45 | - | 1.79 |
| 104 | 25.24 | 2.56 | 21.24 | 79.06 | 89.06 | 21.24 | 14.53 | - | 1.74 | 89.06 | 22.81 | 14.23 | - | 1.77 |
| 105 | 22.24 | 2.55 | 21.06 | 78.63 | 88.63 | 21.06 | 12.73 | - | 1.75 | 88.63 | 22.61 | 12.47 | - | 1.78 |
| 106 | 25.94 | 2.54 | 21.48 | 79.41 | 89.41 | 21.48 | 14.99 | - | 1.73 | 89.41 | 23.04 | 14.69 | - | 1.77 |
| 107 | 28.63 | 2.53 | 21.33 | 80.61 | 90.61 | 21.33 | 16.99 | - | 1.68 | 90.61 | 22.93 | 16.65 | - | 1.72 |
| 108 | 21.62 | 2.54 | 21.21 | 79.52 | 89.52 | 21.21 | 12.57 | - | 1.72 | 89.52 | 22.80 | 12.31 | - | 1.76 |
| 109 | 23.67 | 2.54 | 20.14 | 79.36 | 89.36 | 20.14 | 13.89 | - | 1.70 | 89.36 | 21.75 | 13.62 | - | 1.74 |
| 110 | 25.23 | 2.55 | 19.45 | 79.36 | 89.36 | 19.45 | 14.91 | - | 1.69 | 89.36 | 21.09 | 14.64 | - | 1.72 |
| 111 | 25.11 | 2.55 | 19.63 | 79.26 | 89.26 | 19.63 | 14.78 | - | 1.70 | 89.26 | 21.26 | 14.51 | - | 1.73 |
| 112 | 26.73 | 2.55 | 19.44 | 79.52 | 89.52 | 19.44 | 15.85 | - | 1.69 | 89.52 | 21.09 | 15.56 | - | 1.72 |
| 113 | 26.56 | 2.54 | 19.62 | 79.73 | 89.73 | 19.62 | 15.78 | - | 1.68 | 89.73 | 21.25 | 15.50 | - | 1.71 |
| 114 | 27.24 | 2.54 | 22.73 | 80.13 | 90.13 | 22.73 | 15.72 | - | 1.73 | 90.13 | 24.32 | 15.40 | - | 1.77 |

**ตารางที่ ค.2(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริง บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 115 | 23.57 | 2.55 | 23.46 | 79.53 | 89.53 | 23.46 | 13.31 | - | 1.77 | 89.53 | 25.01 | 13.04 | - | 1.81 |
| 116 | 25.43 | 2.54 | 27.47 | 79.95 | 89.95 | 27.47 | 13.75 | - | 1.85 | 89.95 | 28.92 | 13.49 | - | 1.88 |
| 117 | 20.55 | 2.55 | 28.09 | 79.02 | 89.02 | 28.09 | 10.80 | - | 1.90 | 89.02 | 29.48 | 10.59 | - | 1.94 |
| 118 | 25.86 | 2.54 | 29.23 | 79.88 | 89.88 | 29.23 | 13.64 | - | 1.90 | 89.88 | 30.63 | 13.36 | - | 1.94 |
| 119 | 24.29 | 2.55 | 29.39 | 79.98 | 89.98 | 29.39 | 12.81 | - | 1.90 | 89.98 | 30.78 | 12.55 | - | 1.94 |
| 120 | 23.83 | 2.55 | 30.59 | 80.02 | 90.02 | 30.59 | 12.36 | - | 1.93 | 90.02 | 31.97 | 12.10 | - | 1.97 |
| 121 | 22.79 | 2.55 | 30.73 | 79.79 | 89.79 | 30.73 | 11.74 | - | 1.94 | 89.79 | 32.10 | 11.50 | - | 1.98 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 10.35 | 2.42 | 29.08 | 31.84 | 41.84 | 19.08 | 1.58 | 0.00 | 6.56 | 41.84 | 19.89 | 1.52 | 0.00 | 6.81 |
| 2 | 9.62 | 2.41 | 28.63 | 31.67 | 41.67 | 18.63 | 1.48 | 0.00 | 6.48 | 41.67 | 19.64 | 1.42 | 0.00 | 6.79 |
| 3 | 25.04 | 2.40 | 28.23 | 33.54 | 43.54 | 18.23 | 4.24 | 0.00 | 5.90 | 43.54 | 19.89 | 3.96 | 0.00 | 6.33 |
| 4 | 11.60 | 2.44 | 28.05 | 32.62 | 42.62 | 18.05 | 1.91 | 0.00 | 6.07 | 42.62 | 19.70 | 1.78 | 0.00 | 6.52 |
| 5 | 15.62 | 2.47 | 28.09 | 33.37 | 43.37 | 18.09 | 2.65 | 0.00 | 5.90 | 43.37 | 19.88 | 2.45 | 0.00 | 6.37 |
| 6 | 22.16 | 2.50 | 26.60 | 34.59 | 44.59 | 16.60 | 4.16 | 0.00 | 5.33 | 44.59 | 19.51 | 3.72 | 0.00 | 5.96 |
| 7 | 31.47 | 2.62 | 25.18 | 36.43 | 46.43 | 15.18 | 6.61 | 0.00 | 4.76 | 46.43 | 19.36 | 5.70 | 0.00 | 5.52 |
| 8 | 20.92 | 2.47 | 24.49 | 35.84 | 45.84 | 14.49 | 4.41 | 0.00 | 4.74 | 45.84 | 19.04 | 3.75 | 0.00 | 5.58 |
| 9 | 21.76 | 2.46 | 24.52 | 36.18 | 46.18 | 14.52 | 4.63 | 0.00 | 4.70 | 46.18 | 19.13 | 3.94 | 0.00 | 5.53 |
| 10 | 41.11 | 2.51 | 24.43 | 38.92 | 48.92 | 14.43 | 9.53 | 0.00 | 4.31 | 48.92 | 19.86 | 7.99 | 0.00 | 5.14 |
| 11 | 38.64 | 2.51 | 24.01 | 39.86 | 49.86 | 14.01 | 9.32 | 0.00 | 4.15 | 49.86 | 20.10 | 7.69 | 0.00 | 5.02 |
| 12 | 32.56 | 2.45 | 23.46 | 39.56 | 49.56 | 13.46 | 7.91 | 0.00 | 4.12 | 49.56 | 19.97 | 6.45 | 0.00 | 5.05 |
| 13 | 31.76 | 2.48 | 23.17 | 39.77 | 49.77 | 13.17 | 7.82 | 0.00 | 4.06 | 49.77 | 19.85 | 6.36 | 0.00 | 5.00 |
| 14 | 36.05 | 2.47 | 23.34 | 40.49 | 50.49 | 13.34 | 9.02 | 0.00 | 4.00 | 50.49 | 20.18 | 7.31 | 0.00 | 4.93 |
| 15 | 34.31 | 2.48 | 24.54 | 40.57 | 50.57 | 14.54 | 8.31 | 0.00 | 4.13 | 50.57 | 20.92 | 6.80 | 0.00 | 5.05 |
| 16 | 30.11 | 2.43 | 26.54 | 40.23 | 50.23 | 16.54 | 6.81 | 0.00 | 4.42 | 50.23 | 21.91 | 5.69 | 0.00 | 5.29 |
| 17 | 25.77 | 2.45 | 28.00 | 39.41 | 49.41 | 18.00 | 5.42 | 0.00 | 4.75 | 49.41 | 22.50 | 4.63 | 0.00 | 5.57 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 18 | 10.35 | 2.41 | 30.16 | 40.01 | 50.01 | 20.16 | 6.34 | 0.00 | 5.01 | 50.01 | 23.68 | 5.57 | 0.00 | 5.70 |
| 19 | 9.62 | 2.43 | 30.76 | 39.37 | 49.37 | 20.76 | 5.18 | 0.00 | 5.23 | 49.37 | 23.89 | 4.60 | 0.00 | 5.89 |
| 20 | 25.04 | 2.43 | 31.33 | 40.06 | 50.06 | 21.33 | 6.12 | 0.00 | 5.21 | 50.06 | 24.25 | 5.49 | 0.00 | 5.81 |
| 21 | 11.60 | 2.43 | 32.05 | 39.78 | 49.78 | 22.05 | 5.61 | 0.00 | 5.40 | 49.78 | 24.76 | 5.05 | 0.00 | 6.00 |
| 22 | 15.62 | 2.44 | 32.11 | 39.38 | 49.38 | 22.11 | 3.89 | 0.00 | 5.49 | 49.38 | 24.66 | 3.52 | 0.00 | 6.07 |
| 23 | 22.16 | 2.42 | 31.56 | 42.09 | 52.09 | 21.56 | 8.41 | 0.00 | 4.90 | 52.09 | 25.14 | 7.40 | 0.00 | 5.57 |
| 24 | 31.47 | 2.46 | 29.78 | 40.58 | 50.58 | 19.78 | 4.16 | 0.00 | 4.85 | 50.58 | 24.08 | 3.57 | 0.00 | 5.66 |
| 25 | 20.92 | 2.47 | 27.96 | 42.83 | 52.83 | 17.96 | 9.31 | 0.00 | 4.27 | 52.83 | 23.91 | 7.68 | 0.00 | 5.18 |
| 26 | 21.76 | 2.42 | 27.52 | 42.76 | 52.76 | 17.52 | 8.51 | 0.00 | 4.23 | 52.76 | 23.79 | 6.96 | 0.00 | 5.17 |
| 27 | 41.11 | 2.48 | 27.46 | 43.69 | 53.69 | 17.46 | 9.84 | 0.00 | 4.11 | 53.69 | 24.04 | 8.01 | 0.00 | 5.05 |
| 28 | 38.64 | 2.47 | 27.55 | 43.47 | 53.47 | 17.55 | 9.86 | 0.00 | 4.15 | 53.47 | 24.43 | 7.92 | 0.00 | 5.16 |
| 29 | 32.56 | 2.49 | 26.43 | 44.14 | 54.14 | 16.43 | 11.16 | 0.00 | 3.94 | 54.14 | 24.15 | 8.81 | 0.00 | 4.99 |
| 30 | 31.76 | 2.50 | 25.04 | 44.49 | 54.49 | 15.04 | 11.53 | 0.00 | 3.77 | 54.49 | 23.64 | 8.95 | 0.00 | 4.85 |
| 31 | 36.05 | 2.54 | 23.83 | 43.52 | 53.52 | 13.83 | 9.41 | 0.00 | 3.74 | 53.52 | 22.84 | 7.21 | 0.00 | 4.88 |
| 32 | 34.31 | 2.50 | 23.66 | 43.98 | 53.98 | 13.66 | 11.42 | 0.00 | 3.68 | 53.98 | 22.79 | 8.76 | 0.00 | 4.80 |
| 33 | 30.11 | 2.50 | 23.96 | 44.97 | 54.97 | 13.96 | 13.19 | 0.00 | 3.62 | 54.97 | 23.24 | 10.12 | 0.00 | 4.71 |
| 34 | 25.77 | 2.49 | 23.66 | 45.32 | 55.32 | 13.66 | 13.82 | 0.00 | 3.56 | 55.32 | 23.35 | 10.52 | 0.00 | 4.68 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 35 | 42.23 | 2.54 | 23.48 | 44.85 | 54.85 | 13.48 | 11.78 | 0.00 | 3.59 | 54.85 | 23.15 | 8.95 | 0.00 | 4.72 |
| 36 | 44.19 | 2.48 | 23.46 | 45.16 | 55.16 | 13.46 | 12.43 | 0.00 | 3.56 | 55.16 | 23.22 | 9.44 | 0.00 | 4.68 |
| 37 | 51.63 | 2.47 | 23.61 | 46.18 | 56.18 | 13.61 | 14.83 | 0.00 | 3.48 | 56.18 | 23.67 | 11.23 | 0.00 | 4.60 |
| 38 | 46.93 | 2.54 | 23.40 | 45.96 | 55.96 | 13.40 | 13.48 | 0.00 | 3.48 | 55.96 | 23.60 | 10.16 | 0.00 | 4.62 |
| 39 | 43.97 | 2.49 | 24.34 | 45.29 | 55.29 | 14.34 | 12.13 | 0.00 | 3.62 | 55.29 | 23.87 | 9.24 | 0.00 | 4.76 |
| 40 | 45.92 | 2.49 | 26.76 | 45.89 | 55.89 | 16.76 | 12.09 | 0.00 | 3.80 | 55.89 | 25.08 | 9.46 | 0.00 | 4.86 |
| 41 | 54.02 | 2.58 | 27.35 | 47.73 | 57.73 | 17.35 | 14.69 | 0.00 | 3.68 | 57.73 | 25.99 | 11.47 | 0.00 | 4.71 |
| 42 | 38.87 | 2.63 | 28.19 | 47.19 | 57.19 | 18.19 | 10.20 | 0.00 | 3.81 | 57.19 | 26.37 | 8.01 | 0.00 | 4.85 |
| 43 | 41.64 | 2.53 | 28.94 | 47.32 | 57.32 | 18.94 | 10.75 | 0.00 | 3.88 | 57.32 | 26.97 | 8.45 | 0.00 | 4.93 |
| 44 | 39.37 | 2.51 | 29.36 | 47.89 | 57.89 | 19.36 | 10.20 | 0.00 | 3.86 | 57.89 | 27.14 | 8.09 | 0.00 | 4.86 |
| 45 | 47.34 | 2.52 | 29.31 | 48.69 | 58.69 | 19.31 | 12.54 | 0.00 | 3.77 | 58.69 | 27.42 | 9.90 | 0.00 | 4.78 |
| 46 | 36.33 | 2.49 | 29.29 | 47.55 | 57.55 | 19.29 | 9.34 | 0.00 | 3.89 | 57.55 | 27.13 | 7.38 | 0.00 | 4.92 |
| 47 | 43.51 | 2.53 | 28.58 | 48.18 | 58.18 | 18.58 | 11.60 | 0.00 | 3.75 | 58.18 | 26.91 | 9.10 | 0.00 | 4.78 |
| 48 | 34.19 | 2.58 | 27.41 | 47.60 | 57.60 | 17.41 | 9.25 | 0.00 | 3.69 | 57.60 | 26.19 | 7.18 | 0.00 | 4.76 |
| 49 | 52.22 | 2.57 | 26.27 | 48.60 | 58.60 | 16.27 | 14.91 | 0.00 | 3.50 | 58.60 | 27.42 | 10.89 | 0.00 | 4.80 |
| 50 | 56.86 | 2.53 | 25.41 | 49.55 | 59.55 | 15.41 | 16.96 | 0.00 | 3.35 | 59.55 | 27.43 | 12.23 | 0.00 | 4.65 |
| 51 | 69.02 | 2.52 | 25.66 | 51.49 | 61.49 | 15.66 | 21.41 | 0.00 | 3.22 | 61.49 | 28.34 | 15.35 | 0.00 | 4.50 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 52 | 59.50 | 2.51 | 25.70 | 51.44 | 61.44 | 15.70 | 18.42 | 0.00 | 3.23 | 61.44 | 28.42 | 13.18 | 0.00 | 4.51 |
| 53 | 65.70 | 2.45 | 25.16 | 53.07 | 63.07 | 15.16 | 21.35 | 0.00 | 3.08 | 63.07 | 28.77 | 15.16 | 0.00 | 4.34 |
| 54 | 71.74 | 2.43 | 24.64 | 54.42 | 64.42 | 14.64 | 24.28 | 0.00 | 2.95 | 64.42 | 29.22 | 17.01 | 0.00 | 4.22 |
| 55 | 76.78 | 2.40 | 24.22 | 55.34 | 65.34 | 14.22 | 26.72 | 0.00 | 2.87 | 65.34 | 29.56 | 18.54 | 0.00 | 4.14 |
| 56 | 81.24 | 2.40 | 23.68 | 56.95 | 66.95 | 13.68 | 29.54 | 0.00 | 2.75 | 66.95 | 30.01 | 20.31 | 0.00 | 4.00 |
| 57 | 82.38 | 2.38 | 22.04 | 57.57 | 67.57 | 12.04 | 31.28 | 0.00 | 2.63 | 67.57 | 29.81 | 21.09 | 0.00 | 3.91 |
| 58 | 83.40 | 2.34 | 20.59 | 57.90 | 67.90 | 10.59 | 32.72 | 0.00 | 2.55 | 67.90 | 29.43 | 21.77 | 0.00 | 3.83 |
| 59 | 77.64 | 2.33 | 20.37 | 58.02 | 68.02 | 10.37 | 30.65 | 0.00 | 2.53 | 68.02 | 29.32 | 20.39 | 0.00 | 3.81 |
| 60 | 86.68 | 2.34 | 20.60 | 59.07 | 69.07 | 10.60 | 34.76 | 0.00 | 2.49 | 69.07 | 29.85 | 23.12 | 0.00 | 3.75 |
| 61 | 79.28 | 2.32 | 21.45 | 58.79 | 68.79 | 11.45 | 31.16 | 0.00 | 2.54 | 68.79 | 30.22 | 20.78 | 0.00 | 3.81 |
| 62 | 80.22 | 2.32 | 22.26 | 59.38 | 69.38 | 12.26 | 31.43 | 0.00 | 2.55 | 69.38 | 30.81 | 21.05 | 0.00 | 3.81 |
| 63 | 72.52 | 2.30 | 22.48 | 58.83 | 68.83 | 12.48 | 28.00 | 0.00 | 2.59 | 68.83 | 30.82 | 18.73 | 0.00 | 3.87 |
| 64 | 77.90 | 2.33 | 24.11 | 59.22 | 69.22 | 14.11 | 29.42 | 0.00 | 2.65 | 69.22 | 31.59 | 19.93 | 0.00 | 3.91 |
| 65 | 75.38 | 2.30 | 24.75 | 58.81 | 68.81 | 14.75 | 27.90 | 0.00 | 2.70 | 68.81 | 31.74 | 18.97 | 0.00 | 3.97 |
| 66 | 68.20 | 2.29 | 26.38 | 58.93 | 68.93 | 16.38 | 24.52 | 0.00 | 2.78 | 68.93 | 32.01 | 17.10 | 0.00 | 3.99 |
| 67 | 79.04 | 2.30 | 27.60 | 61.13 | 71.13 | 17.60 | 29.06 | 0.00 | 2.72 | 71.13 | 33.23 | 20.45 | 0.00 | 3.87 |
| 68 | 76.24 | 2.27 | 27.92 | 61.28 | 71.28 | 17.92 | 27.95 | 0.00 | 2.73 | 71.28 | 33.69 | 19.56 | 0.00 | 3.90 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 69 | 82.37 | 2.26 | 27.93 | 62.72 | 72.72 | 17.93 | 31.11 | 0.00 | 2.65 | 72.72 | 34.26 | 21.70 | 0.00 | 3.80 |
| 70 | 81.15 | 2.26 | 27.61 | 64.56 | 74.56 | 17.61 | 32.02 | 0.00 | 2.53 | 74.56 | 34.47 | 22.42 | 0.00 | 3.62 |
| 71 | 70.24 | 2.28 | 26.15 | 64.16 | 74.16 | 16.15 | 28.22 | 0.00 | 2.49 | 74.16 | 33.82 | 19.51 | 0.00 | 3.60 |
| 72 | 73.33 | 2.28 | 23.53 | 64.17 | 74.17 | 13.53 | 30.81 | 0.00 | 2.38 | 74.17 | 32.81 | 20.90 | 0.00 | 3.51 |
| 73 | 75.36 | 2.31 | 22.13 | 64.32 | 74.32 | 12.13 | 32.51 | 0.00 | 2.32 | 74.32 | 32.26 | 21.85 | 0.00 | 3.45 |
| 74 | 60.75 | 2.33 | 21.74 | 62.38 | 72.38 | 11.74 | 25.43 | 0.00 | 2.39 | 72.38 | 22.67 | 20.75 | 0.00 | 2.93 |
| 75 | 66.60 | 2.34 | 21.47 | 63.85 | 73.85 | 11.47 | 28.78 | 0.00 | 2.31 | 73.85 | 22.83 | 23.43 | 0.00 | 2.84 |
| 76 | 66.17 | 2.31 | 21.02 | 64.11 | 74.11 | 11.02 | 28.94 | 0.00 | 2.29 | 74.11 | 22.78 | 23.44 | 0.00 | 2.82 |
| 77 | 59.96 | 2.33 | 20.34 | 63.26 | 73.26 | 10.34 | 26.10 | 0.00 | 2.30 | 73.26 | 22.22 | 21.08 | 0.00 | 2.84 |
| 78 | 68.62 | 2.33 | 19.04 | 64.32 | 74.32 | 9.04 | 31.06 | 0.00 | 2.21 | 74.32 | 21.47 | 25.06 | 0.00 | 2.74 |
| 79 | 72.95 | 2.34 | 18.64 | 65.30 | 75.30 | 8.64 | 33.80 | 0.00 | 2.16 | 75.30 | 21.42 | 27.25 | 0.00 | 2.68 |
| 80 | 74.72 | 2.30 | 18.54 | 65.92 | 75.92 | 8.54 | 35.05 | 0.00 | 2.13 | 75.92 | 21.56 | 28.20 | 0.00 | 2.65 |
| 81 | 69.31 | 2.29 | 18.34 | 65.78 | 75.78 | 8.34 | 32.53 | 0.00 | 2.13 | 75.78 | 21.41 | 26.16 | 0.00 | 2.65 |
| 82 | 76.77 | 2.28 | 17.37 | 66.43 | 76.43 | 7.37 | 36.94 | 0.00 | 2.08 | 76.43 | 21.00 | 29.60 | 0.00 | 2.59 |
| 83 | 73.54 | 2.30 | 17.39 | 67.09 | 77.09 | 7.39 | 35.78 | 0.00 | 2.06 | 77.09 | 21.06 | 28.72 | 0.00 | 2.56 |
| 84 | 70.86 | 2.32 | 17.23 | 67.02 | 77.02 | 7.23 | 34.51 | 0.00 | 2.05 | 77.02 | 21.06 | 27.64 | 0.00 | 2.56 |
| 85 | 67.26 | 2.29 | 17.56 | 67.39 | 77.39 | 7.56 | 32.82 | 0.00 | 2.05 | 77.39 | 21.31 | 26.32 | 0.00 | 2.56 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 86 | 69.07 | 2.30 | 19.25 | 67.61 | 77.61 | 9.25 | 33.04 | 0.00 | 2.09 | 77.61 | 22.65 | 26.49 | 0.00 | 2.61 |
| 87 | 68.44 | 2.29 | 21.99 | 67.86 | 77.86 | 11.99 | 31.58 | 0.00 | 2.17 | 77.86 | 24.61 | 25.46 | 0.00 | 2.69 |
| 88 | 67.94 | 2.24 | 23.84 | 68.01 | 78.01 | 13.84 | 30.54 | 0.08 | 2.22 | 78.01 | 25.97 | 24.72 | 0.08 | 2.75 |
| 89 | 72.09 | 2.22 | 21.21 | 69.35 | 79.35 | 11.21 | 33.75 | 9.59 | 2.14 | 79.35 | 24.46 | 26.98 | 9.59 | 2.67 |
| 90 | 73.22 | 2.24 | 19.74 | 70.29 | 80.29 | 9.74 | 0.00 | 73.22 | 0.00 | 80.29 | 23.74 | 0.00 | 73.22 | 0.00 |
| 91 | 63.33 | 2.22 | 19.74 | 70.10 | 80.10 | 9.74 | 0.00 | 63.33 | 0.00 | 80.10 | 23.71 | 0.00 | 63.33 | 0.00 |
| 92 | 59.31 | 2.29 | 18.91 | 69.51 | 79.51 | 8.91 | 28.70 | 10.58 | 2.07 | 79.51 | 23.10 | 22.75 | 10.58 | 2.61 |
| 93 | 64.65 | 2.26 | 18.25 | 69.10 | 79.10 | 8.25 | 31.57 | 9.86 | 2.05 | 79.10 | 22.94 | 24.87 | 9.86 | 2.60 |
| 94 | 74.21 | 2.22 | 17.87 | 71.89 | 81.89 | 7.87 | 0.00 | 74.21 | 0.00 | 81.89 | 23.29 | 0.00 | 74.21 | 0.00 |
| 95 | 74.96 | 2.22 | 16.91 | 72.92 | 82.92 | 6.91 | 0.00 | 74.96 | 0.00 | 82.92 | 23.09 | 0.00 | 74.96 | 0.00 |
| 96 | 76.21 | 2.14 | 16.54 | 74.82 | 84.82 | 6.54 | 0.00 | 76.21 | 0.00 | 84.82 | 23.03 | 0.00 | 76.21 | 0.00 |
| 97 | 76.06 | 2.25 | 16.75 | 74.96 | 84.96 | 6.75 | 0.00 | 76.06 | 0.00 | 84.96 | 23.33 | 0.00 | 76.06 | 0.00 |
| 98 | 40.92 | 2.24 | 15.92 | 72.57 | 82.57 | 5.92 | 0.00 | 40.92 | 0.00 | 82.57 | 10.43 | 0.00 | 40.92 | 0.00 |
| 99 | 39.14 | 2.27 | 15.40 | 72.95 | 82.95 | 5.40 | 0.00 | 39.14 | 0.00 | 82.95 | 9.99 | 0.00 | 39.14 | 0.00 |
| 100 | 40.10 | 2.23 | 15.76 | 73.25 | 83.25 | 5.76 | 0.00 | 40.10 | 0.00 | 83.25 | 10.43 | 0.00 | 40.10 | 0.00 |
| 101 | 39.29 | 2.20 | 17.65 | 73.87 | 83.87 | 7.65 | 0.00 | 39.29 | 0.00 | 83.87 | 12.21 | 0.00 | 39.29 | 0.00 |
| 102 | 39.40 | 2.20 | 20.90 | 74.56 | 84.56 | 10.90 | 0.00 | 39.40 | 0.00 | 84.56 | 15.27 | 0.00 | 39.40 | 0.00 |

**ตารางที่ ค.3(ก) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. สหใบยาสูบไทย จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 103 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 13.57 | 0.00 | 34.76 | 0.00 | 84.23 | 17.71 | 0.00 | 34.76 | 0.00 |
| 104 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 15.08 | 0.00 | 38.63 | 0.00 | 85.35 | 19.15 | 0.00 | 38.63 | 0.00 |
| 105 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 16.52 | 0.00 | 34.51 | 0.00 | 85.54 | 20.47 | 0.00 | 34.51 | 0.00 |
| 106 | 35.06 | 2.13 | 27.73 | 76.07 | 86.07 | 17.73 | 0.00 | 35.06 | 0.00 | 86.07 | 21.64 | 0.00 | 35.06 | 0.00 |
| 107 | 34.56 | 2.11 | 28.04 | 76.04 | 86.04 | 18.04 | 0.00 | 34.56 | 0.00 | 86.04 | 21.97 | 0.00 | 34.56 | 0.00 |
| 108 | 35.14 | 2.11 | 28.05 | 76.15 | 86.15 | 18.05 | 0.00 | 35.14 | 0.00 | 86.15 | 21.98 | 0.00 | 35.14 | 0.00 |
| 109 | 41.08 | 2.10 | 27.04 | 77.72 | 87.72 | 17.04 | 0.00 | 41.08 | 0.00 | 87.72 | 21.16 | 0.00 | 41.08 | 0.00 |
| 110 | 38.99 | 2.10 | 24.75 | 78.52 | 88.52 | 14.75 | 0.00 | 38.99 | 0.00 | 88.52 | 19.09 | 0.00 | 38.99 | 0.00 |
| 111 | 35.00 | 2.10 | 23.05 | 78.45 | 88.45 | 13.05 | 0.00 | 35.00 | 0.00 | 88.45 | 17.51 | 0.00 | 35.00 | 0.00 |
| 112 | 34.76 | 2.20 | 23.57 | 74.23 | 84.23 | 11.01 | 0.00 | 36.59 | 0.00 | 84.23 | 15.66 | 0.00 | 36.59 | 0.00 |
| 113 | 38.63 | 2.15 | 25.08 | 75.35 | 85.35 | 9.91 | 0.00 | 37.85 | 0.00 | 85.35 | 14.66 | 0.00 | 37.85 | 0.00 |
| 114 | 34.51 | 2.15 | 26.52 | 75.54 | 85.54 | 9.29 | 0.00 | 38.24 | 0.00 | 85.54 | 14.15 | 0.00 | 38.24 | 0.00 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 1 | 26.24 | 2.51 | 23.32 | 37.11 | 47.11 | 23.32 | 5.97 | 0.00 | 4.40 | 47.11 | 28.68 | 4.99 | 0.00 | 5.25 |
| 2 | 26.46 | 2.51 | 23.62 | 37.16 | 47.16 | 23.62 | 5.97 | 0.00 | 4.43 | 47.16 | 28.85 | 5.01 | 0.00 | 5.28 |
| 3 | 33.08 | 2.50 | 22.67 | 38.31 | 48.31 | 22.67 | 7.94 | 0.00 | 4.17 | 48.31 | 28.63 | 6.57 | 0.00 | 5.03 |
| 4 | 37.51 | 2.59 | 22.09 | 39.44 | 49.44 | 22.09 | 9.44 | 0.00 | 3.97 | 49.44 | 28.67 | 7.73 | 0.00 | 4.85 |
| 5 | 28.07 | 2.58 | 21.84 | 38.06 | 48.06 | 21.84 | 6.85 | 0.00 | 4.10 | 48.06 | 28.35 | 5.59 | 0.00 | 5.02 |
| 6 | 30.51 | 2.58 | 21.34 | 38.38 | 48.38 | 21.34 | 7.62 | 0.00 | 4.01 | 48.38 | 28.07 | 6.20 | 0.00 | 4.92 |
| 7 | 30.70 | 2.52 | 20.94 | 38.30 | 48.30 | 20.94 | 7.73 | 0.00 | 3.97 | 48.30 | 27.84 | 6.27 | 0.00 | 4.90 |
| 8 | 32.74 | 2.52 | 20.42 | 38.43 | 48.43 | 20.42 | 8.39 | 0.00 | 3.90 | 48.43 | 27.57 | 6.77 | 0.00 | 4.83 |
| 9 | 36.05 | 2.52 | 19.56 | 38.97 | 48.97 | 19.56 | 9.59 | 0.00 | 3.76 | 48.97 | 27.24 | 7.67 | 0.00 | 4.70 |
| 10 | 29.77 | 2.52 | 19.71 | 38.00 | 48.00 | 19.71 | 7.69 | 0.00 | 3.87 | 48.00 | 27.14 | 6.16 | 0.00 | 4.83 |
| 11 | 36.59 | 2.53 | 19.61 | 39.02 | 49.02 | 19.61 | 9.73 | 0.00 | 3.76 | 49.02 | 27.26 | 7.80 | 0.00 | 4.69 |
| 12 | 31.12 | 2.57 | 19.31 | 38.25 | 48.25 | 19.31 | 8.18 | 0.00 | 3.80 | 48.25 | 26.99 | 6.53 | 0.00 | 4.77 |
| 13 | 40.02 | 2.57 | 19.08 | 39.97 | 49.97 | 19.08 | 11.05 | 0.00 | 3.62 | 49.97 | 27.22 | 8.79 | 0.00 | 4.55 |
| 14 | 37.70 | 2.58 | 18.97 | 40.07 | 50.07 | 18.97 | 10.46 | 0.00 | 3.60 | 50.07 | 27.35 | 8.27 | 0.00 | 4.56 |
| 15 | 38.40 | 2.58 | 18.47 | 40.38 | 50.38 | 18.47 | 10.87 | 0.00 | 3.53 | 50.38 | 27.23 | 8.54 | 0.00 | 4.50 |
| 16 | 40.77 | 2.57 | 19.36 | 40.60 | 50.60 | 19.36 | 11.35 | 0.00 | 3.59 | 50.60 | 30.35 | 8.25 | 0.00 | 4.94 |
| 17 | 41.16 | 2.57 | 19.46 | 40.47 | 50.47 | 19.46 | 11.39 | 0.00 | 3.61 | 50.47 | 30.30 | 8.31 | 0.00 | 4.95 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 18 | 50.00 | 2.57 | 20.09 | 42.26 | 52.26 | 20.09 | 14.23 | 0.00 | 3.51 | 52.26 | 31.07 | 10.43 | 0.00 | 4.79 |
| 19 | 43.18 | 2.57 | 21.81 | 41.69 | 51.69 | 21.81 | 11.61 | 0.00 | 3.72 | 51.69 | 31.76 | 8.64 | 0.00 | 5.00 |
| 20 | 31.77 | 2.58 | 23.01 | 40.09 | 50.09 | 23.01 | 7.93 | 0.00 | 4.01 | 50.09 | 31.86 | 5.99 | 0.00 | 5.30 |
| 21 | 37.52 | 2.59 | 24.73 | 40.99 | 50.99 | 24.73 | 9.15 | 0.00 | 4.10 | 50.99 | 32.68 | 7.09 | 0.00 | 5.29 |
| 22 | 37.00 | 2.61 | 25.50 | 41.06 | 51.06 | 25.50 | 8.84 | 0.00 | 4.18 | 51.06 | 33.07 | 6.91 | 0.00 | 5.35 |
| 23 | 33.56 | 2.62 | 25.62 | 40.69 | 50.69 | 25.62 | 7.91 | 0.00 | 4.24 | 50.69 | 33.07 | 6.18 | 0.00 | 5.43 |
| 24 | 29.64 | 2.62 | 27.33 | 39.98 | 49.98 | 27.33 | 6.49 | 0.00 | 4.57 | 49.98 | 33.47 | 5.24 | 0.00 | 5.66 |
| 25 | 29.37 | 2.61 | 27.26 | 40.04 | 50.04 | 27.26 | 6.46 | 0.00 | 4.55 | 50.04 | 33.44 | 5.21 | 0.00 | 5.64 |
| 26 | 26.49 | 2.59 | 26.47 | 39.75 | 49.75 | 26.47 | 5.92 | 0.00 | 4.48 | 49.75 | 33.10 | 4.71 | 0.00 | 5.63 |
| 27 | 28.17 | 2.59 | 24.29 | 39.72 | 49.72 | 24.29 | 6.71 | 0.00 | 4.20 | 49.72 | 32.25 | 5.16 | 0.00 | 5.45 |
| 28 | 51.56 | 2.58 | 22.64 | 43.18 | 53.18 | 22.64 | 14.09 | 0.00 | 3.66 | 53.18 | 30.82 | 11.17 | 0.00 | 4.62 |
| 29 | 41.98 | 2.60 | 21.15 | 43.05 | 53.05 | 21.15 | 11.87 | 0.00 | 3.54 | 53.05 | 30.42 | 9.17 | 0.00 | 4.58 |
| 30 | 37.96 | 2.61 | 20.79 | 42.61 | 52.61 | 20.79 | 10.71 | 0.00 | 3.54 | 52.61 | 30.23 | 8.23 | 0.00 | 4.61 |
| 31 | 42.19 | 2.61 | 20.84 | 43.13 | 53.13 | 20.84 | 12.04 | 0.00 | 3.50 | 53.13 | 30.37 | 9.26 | 0.00 | 4.56 |
| 32 | 50.05 | 2.62 | 20.66 | 44.72 | 54.72 | 20.66 | 14.89 | 0.00 | 3.36 | 54.72 | 30.74 | 11.40 | 0.00 | 4.39 |
| 33 | 48.83 | 2.60 | 20.49 | 45.73 | 55.73 | 20.49 | 14.93 | 0.00 | 3.27 | 55.73 | 31.10 | 11.33 | 0.00 | 4.31 |
| 34 | 39.81 | 2.60 | 20.10 | 44.79 | 54.79 | 20.10 | 12.02 | 0.00 | 3.31 | 54.79 | 30.87 | 9.05 | 0.00 | 4.40 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ | $W_{Blower}$ | $T_{amb}$ | $T_{afterCD}$ | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (kW) | (kW) | (C) | (C) | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 35 | 46.66 | 2.60 | 20.22 | 45.91 | 55.91 | 20.22 | 14.41 | 0.00 | 3.24 | 55.91 | 31.18 | 10.86 | 0.00 | 4.30 |
| 36 | 50.79 | 2.60 | 19.64 | 47.39 | 57.39 | 19.64 | 16.41 | 0.00 | 3.09 | 57.39 | 31.40 | 12.27 | 0.00 | 4.14 |
| 37 | 46.08 | 2.61 | 19.54 | 47.64 | 57.64 | 19.54 | 15.00 | 0.00 | 3.07 | 57.64 | 31.63 | 11.13 | 0.00 | 4.14 |
| 38 | 75.64 | 2.63 | 19.36 | 52.83 | 62.83 | 19.36 | 27.50 | 0.00 | 2.75 | 62.83 | 33.18 | 20.22 | 0.00 | 3.74 |
| 39 | 58.86 | 2.63 | 19.41 | 51.44 | 61.44 | 19.41 | 20.79 | 0.00 | 2.83 | 61.44 | 33.16 | 15.16 | 0.00 | 3.88 |
| 40 | 59.02 | 2.65 | 19.21 | 51.46 | 61.46 | 19.21 | 20.94 | 0.00 | 2.82 | 61.46 | 33.07 | 15.25 | 0.00 | 3.87 |
| 41 | 67.43 | 2.63 | 20.04 | 53.16 | 63.16 | 20.04 | 24.36 | 0.00 | 2.77 | 63.16 | 33.93 | 17.84 | 0.00 | 3.78 |
| 42 | 77.74 | 2.61 | 21.00 | 55.72 | 65.72 | 21.00 | 29.02 | 0.00 | 2.68 | 65.72 | 35.12 | 21.36 | 0.00 | 3.64 |
| 43 | 58.99 | 2.61 | 21.55 | 53.70 | 63.70 | 21.55 | 20.92 | 0.00 | 2.82 | 63.70 | 35.18 | 15.33 | 0.00 | 3.85 |
| 44 | 58.96 | 2.59 | 21.70 | 53.25 | 63.25 | 21.70 | 20.66 | 0.00 | 2.85 | 63.25 | 35.07 | 15.17 | 0.00 | 3.89 |
| 45 | 72.11 | 2.60 | 22.66 | 55.68 | 65.68 | 22.66 | 26.06 | 0.00 | 2.77 | 65.68 | 36.11 | 19.30 | 0.00 | 3.74 |
| 46 | 61.42 | 2.60 | 24.59 | 55.21 | 65.21 | 24.59 | 21.16 | 0.00 | 2.90 | 65.21 | 37.20 | 15.77 | 0.00 | 3.90 |
| 47 | 56.15 | 2.60 | 24.97 | 54.42 | 64.42 | 24.97 | 18.87 | 0.00 | 2.98 | 64.42 | 37.27 | 14.07 | 0.00 | 3.99 |
| 48 | 61.18 | 2.59 | 24.23 | 55.19 | 65.19 | 24.23 | 21.22 | 0.00 | 2.88 | 65.19 | 37.08 | 15.75 | 0.00 | 3.88 |
| 49 | 72.33 | 2.58 | 24.64 | 57.36 | 67.36 | 24.64 | 26.04 | 0.00 | 2.78 | 67.36 | 40.55 | 18.03 | 0.00 | 4.01 |
| 50 | 64.77 | 2.59 | 24.75 | 56.55 | 66.55 | 24.75 | 22.88 | 0.00 | 2.83 | 66.55 | 40.46 | 15.80 | 0.00 | 4.10 |
| 51 | 66.75 | 2.59 | 22.80 | 57.03 | 67.03 | 22.80 | 24.72 | 0.00 | 2.70 | 67.03 | 39.92 | 16.77 | 0.00 | 3.98 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 52 | 68.07 | 2.59 | 21.90 | 57.36 | 67.36 | 21.90 | 25.81 | 0.00 | 2.64 | 67.36 | 39.72 | 17.36 | 0.00 | 3.92 |
| 53 | 64.25 | 2.60 | 20.65 | 56.73 | 66.73 | 20.65 | 24.62 | 0.00 | 2.61 | 66.73 | 39.10 | 16.36 | 0.00 | 3.93 |
| 54 | 74.04 | 2.59 | 20.07 | 57.60 | 67.60 | 20.07 | 29.15 | 0.00 | 2.54 | 67.60 | 39.01 | 19.38 | 0.00 | 3.82 |
| 55 | 58.65 | 2.60 | 19.61 | 55.84 | 65.84 | 19.61 | 22.51 | 0.00 | 2.61 | 65.84 | 38.42 | 14.83 | 0.00 | 3.95 |
| 56 | 72.83 | 2.61 | 18.93 | 57.81 | 67.81 | 18.93 | 29.35 | 0.00 | 2.48 | 67.81 | 38.66 | 19.35 | 0.00 | 3.76 |
| 57 | 70.08 | 2.60 | 18.84 | 57.81 | 67.81 | 18.84 | 28.29 | 0.00 | 2.48 | 67.81 | 38.77 | 18.56 | 0.00 | 3.78 |
| 58 | 62.27 | 2.61 | 18.39 | 56.88 | 66.88 | 18.39 | 24.90 | 0.00 | 2.50 | 66.88 | 38.41 | 16.22 | 0.00 | 3.84 |
| 59 | 75.24 | 2.60 | 18.31 | 58.36 | 68.36 | 18.31 | 30.96 | 0.00 | 2.43 | 68.36 | 38.72 | 20.26 | 0.00 | 3.71 |
| 60 | 59.29 | 2.59 | 18.48 | 56.51 | 66.51 | 18.48 | 23.52 | 0.00 | 2.52 | 66.51 | 38.39 | 15.30 | 0.00 | 3.88 |
| 61 | 84.61 | 2.62 | 17.60 | 61.50 | 71.50 | 17.60 | 37.25 | 0.00 | 2.27 | 71.50 | 39.50 | 24.32 | 0.00 | 3.48 |
| 62 | 82.39 | 2.62 | 17.67 | 64.48 | 74.48 | 17.67 | 38.17 | 0.00 | 2.16 | 74.48 | 41.42 | 24.48 | 0.00 | 3.37 |
| 63 | 74.98 | 2.64 | 17.90 | 63.80 | 73.80 | 17.90 | 34.21 | 0.00 | 2.19 | 73.80 | 41.60 | 21.79 | 0.00 | 3.44 |
| 64 | 82.70 | 2.66 | 18.31 | 65.64 | 75.64 | 18.31 | 38.73 | 0.00 | 2.14 | 75.64 | 42.29 | 24.83 | 0.00 | 3.33 |
| 65 | 68.00 | 2.67 | 18.76 | 64.09 | 74.09 | 18.76 | 30.79 | 0.00 | 2.21 | 74.09 | 42.37 | 19.54 | 0.00 | 3.48 |
| 66 | 69.91 | 2.71 | 20.48 | 63.96 | 73.96 | 20.48 | 30.76 | 0.00 | 2.27 | 73.96 | 42.94 | 19.74 | 0.00 | 3.54 |
| 67 | 69.98 | 2.72 | 22.31 | 64.48 | 74.48 | 22.31 | 30.18 | 0.00 | 2.32 | 74.48 | 45.64 | 18.71 | 0.00 | 3.74 |
| 68 | 67.57 | 2.72 | 23.69 | 64.31 | 74.31 | 23.69 | 28.40 | 0.00 | 2.38 | 74.31 | 46.19 | 17.72 | 0.00 | 3.81 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 69 | 80.37 | 2.70 | 25.23 | 65.89 | 75.89 | 25.23 | 33.93 | 0.00 | 2.37 | 75.89 | 47.15 | 21.53 | 0.00 | 3.73 |
| 70 | 67.66 | 2.66 | 26.69 | 65.50 | 75.50 | 26.69 | 27.64 | 0.00 | 2.45 | 75.50 | 47.84 | 17.58 | 0.00 | 3.85 |
| 71 | 65.47 | 2.64 | 27.24 | 65.04 | 75.04 | 27.24 | 26.25 | 0.00 | 2.49 | 75.04 | 48.00 | 16.70 | 0.00 | 3.92 |
| 72 | 70.38 | 2.61 | 28.49 | 65.69 | 75.69 | 28.49 | 27.97 | 0.00 | 2.52 | 75.69 | 48.60 | 18.01 | 0.00 | 3.91 |
| 73 | 59.55 | 2.60 | 29.07 | 64.69 | 74.69 | 29.07 | 22.94 | 0.00 | 2.60 | 74.69 | 48.67 | 14.75 | 0.00 | 4.04 |
| 74 | 66.30 | 2.58 | 27.48 | 66.19 | 76.19 | 27.48 | 27.10 | 0.00 | 2.45 | 76.19 | 48.77 | 17.16 | 0.00 | 3.86 |
| 75 | 75.79 | 2.59 | 26.25 | 67.34 | 77.34 | 26.25 | 32.35 | 0.00 | 2.34 | 77.34 | 48.78 | 20.30 | 0.00 | 3.73 |
| 76 | 68.96 | 2.59 | 24.37 | 67.69 | 77.69 | 24.37 | 30.55 | 0.00 | 2.26 | 77.69 | 48.61 | 18.75 | 0.00 | 3.68 |
| 77 | 64.90 | 2.55 | 22.21 | 68.04 | 78.04 | 22.21 | 29.93 | 0.21 | 2.17 | 78.04 | 48.30 | 17.95 | 0.21 | 3.61 |
| 78 | 79.79 | 2.55 | 21.54 | 71.05 | 81.05 | 21.54 | 0.00 | 79.79 | 0.00 | 81.05 | 49.23 | 0.00 | 79.79 | 0.00 |
| 79 | 88.18 | 2.50 | 21.39 | 74.47 | 84.47 | 21.39 | 0.00 | 88.18 | 0.00 | 84.47 | 50.85 | 0.00 | 88.18 | 0.00 |
| 80 | 79.80 | 2.59 | 20.90 | 73.88 | 83.88 | 20.90 | 0.00 | 79.80 | 0.00 | 83.88 | 50.81 | 0.00 | 79.80 | 0.00 |
| 81 | 81.56 | 2.59 | 20.70 | 74.55 | 84.55 | 20.70 | 0.00 | 81.56 | 0.00 | 84.55 | 51.09 | 0.00 | 81.56 | 0.00 |
| 82 | 84.35 | 2.60 | 20.35 | 74.67 | 84.67 | 20.35 | 0.00 | 84.35 | 0.00 | 84.67 | 51.09 | 0.00 | 84.35 | 0.00 |
| 83 | 57.51 | 2.59 | 20.35 | 71.18 | 81.18 | 20.35 | 0.00 | 57.51 | 0.00 | 81.18 | 31.43 | 0.00 | 57.51 | 0.00 |
| 84 | 47.47 | 2.58 | 19.94 | 70.64 | 80.64 | 19.94 | 0.00 | 47.47 | 0.00 | 80.64 | 31.21 | 0.00 | 47.47 | 0.00 |
| 85 | 65.16 | 2.58 | 20.22 | 74.04 | 84.04 | 20.22 | 0.00 | 65.16 | 0.00 | 84.04 | 31.99 | 0.00 | 65.16 | 0.00 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 86 | 73.07 | 2.57 | 20.04 | 77.71 | 87.71 | 20.04 | 0.00 | 73.07 | 0.00 | 87.71 | 32.55 | 0.00 | 73.07 | 0.00 |
| 87 | 57.65 | 2.57 | 19.42 | 77.12 | 87.12 | 19.42 | 0.00 | 57.65 | 0.00 | 87.12 | 32.22 | 0.00 | 57.65 | 0.00 |
| 88 | 60.08 | 2.58 | 19.60 | 77.95 | 87.95 | 19.60 | 0.00 | 60.08 | 0.00 | 87.95 | 32.57 | 0.00 | 60.08 | 0.00 |
| 89 | 51.28 | 2.58 | 20.17 | 77.53 | 87.53 | 20.17 | 0.00 | 51.28 | 0.00 | 87.53 | 32.92 | 0.00 | 51.28 | 0.00 |
| 90 | 48.44 | 2.58 | 21.86 | 77.52 | 87.52 | 21.86 | 0.00 | 48.44 | 0.00 | 87.52 | 34.21 | 0.00 | 48.44 | 0.00 |
| 91 | 46.44 | 2.58 | 23.46 | 77.33 | 87.33 | 23.46 | 0.00 | 46.44 | 0.00 | 87.33 | 35.45 | 0.00 | 46.44 | 0.00 |
| 92 | 47.88 | 2.57 | 25.96 | 77.62 | 87.62 | 25.96 | 0.00 | 47.88 | 0.00 | 87.62 | 37.46 | 0.00 | 47.88 | 0.00 |
| 93 | 32.67 | 2.57 | 27.47 | 76.99 | 86.99 | 27.47 | 0.00 | 32.67 | 0.00 | 86.99 | 33.17 | 0.00 | 32.67 | 0.00 |
| 94 | 32.25 | 2.57 | 27.87 | 77.50 | 87.50 | 27.87 | 0.00 | 32.25 | 0.00 | 87.50 | 33.66 | 0.00 | 32.25 | 0.00 |
| 95 | 30.02 | 2.57 | 28.49 | 77.41 | 87.41 | 28.49 | 0.00 | 30.02 | 0.00 | 87.41 | 34.23 | 0.00 | 30.02 | 0.00 |
| 96 | 30.62 | 2.57 | 29.04 | 77.65 | 87.65 | 29.04 | 0.00 | 30.62 | 0.00 | 87.65 | 34.75 | 0.00 | 30.62 | 0.00 |
| 97 | 30.19 | 2.57 | 29.20 | 77.77 | 87.77 | 29.20 | 0.00 | 30.19 | 0.00 | 87.77 | 34.91 | 0.00 | 30.19 | 0.00 |
| 98 | 33.61 | 2.57 | 28.63 | 78.36 | 88.36 | 28.63 | 0.00 | 33.61 | 0.00 | 88.36 | 34.51 | 0.00 | 33.61 | 0.00 |
| 99 | 37.40 | 2.57 | 25.83 | 79.41 | 89.41 | 25.83 | 0.00 | 37.40 | 0.00 | 89.41 | 32.18 | 0.00 | 37.40 | 0.00 |
| 100 | 19.92 | 2.58 | 23.87 | 77.62 | 87.62 | 23.87 | 0.00 | 19.92 | 0.00 | 87.62 | 25.29 | 0.00 | 19.92 | 0.00 |
| 101 | 27.30 | 2.57 | 23.11 | 79.34 | 89.34 | 23.11 | 0.00 | 27.30 | 0.00 | 89.34 | 24.59 | 0.00 | 27.30 | 0.00 |
| 102 | 18.46 | 2.57 | 22.19 | 78.08 | 88.08 | 22.19 | 0.00 | 18.46 | 0.00 | 88.08 | 23.69 | 0.00 | 18.46 | 0.00 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 103 | 24.02 | 2.57 | 21.16 | 78.62 | 88.62 | 21.16 | 0.00 | 24.02 | 0.00 | 88.62 | 22.72 | 0.00 | 24.02 | 0.00 |
| 104 | 25.24 | 2.56 | 21.24 | 79.06 | 89.06 | 21.24 | 0.00 | 25.24 | 0.00 | 89.06 | 22.81 | 0.00 | 25.24 | 0.00 |
| 105 | 22.24 | 2.55 | 21.06 | 78.63 | 88.63 | 21.06 | 0.00 | 22.24 | 0.00 | 88.63 | 22.61 | 0.00 | 22.24 | 0.00 |
| 106 | 25.94 | 2.54 | 21.48 | 79.41 | 89.41 | 21.48 | 0.00 | 25.94 | 0.00 | 89.41 | 23.04 | 0.00 | 25.94 | 0.00 |
| 107 | 28.63 | 2.53 | 21.33 | 80.61 | 90.61 | 21.33 | 0.00 | 28.63 | 0.00 | 90.61 | 22.93 | 0.00 | 28.63 | 0.00 |
| 108 | 21.62 | 2.54 | 21.21 | 79.52 | 89.52 | 21.21 | 0.00 | 21.62 | 0.00 | 89.52 | 22.80 | 0.00 | 21.62 | 0.00 |
| 109 | 23.67 | 2.54 | 20.14 | 79.36 | 89.36 | 20.14 | 0.00 | 23.67 | 0.00 | 89.36 | 21.75 | 0.00 | 23.67 | 0.00 |
| 110 | 25.23 | 2.55 | 19.45 | 79.36 | 89.36 | 19.45 | 0.00 | 25.23 | 0.00 | 89.36 | 21.09 | 0.00 | 25.23 | 0.00 |
| 111 | 25.11 | 2.55 | 19.63 | 79.26 | 89.26 | 19.63 | 0.00 | 25.11 | 0.00 | 89.26 | 21.26 | 0.00 | 25.11 | 0.00 |
| 112 | 26.73 | 2.55 | 19.44 | 79.52 | 89.52 | 19.44 | 0.00 | 26.73 | 0.00 | 89.52 | 21.09 | 0.00 | 26.73 | 0.00 |
| 113 | 26.56 | 2.54 | 19.62 | 79.73 | 89.73 | 19.62 | 0.00 | 26.56 | 0.00 | 89.73 | 21.25 | 0.00 | 26.56 | 0.00 |
| 114 | 27.24 | 2.54 | 22.73 | 80.13 | 90.13 | 22.73 | 0.00 | 27.24 | 0.00 | 90.13 | 24.32 | 0.00 | 27.24 | 0.00 |
| 115 | 23.57 | 2.55 | 23.46 | 79.53 | 89.53 | 23.46 | 0.00 | 23.57 | 0.00 | 89.53 | 25.01 | 0.00 | 23.57 | 0.00 |
| 116 | 25.43 | 2.54 | 27.47 | 79.95 | 89.95 | 27.47 | 0.00 | 25.43 | 0.00 | 89.95 | 28.92 | 0.00 | 25.43 | 0.00 |
| 117 | 20.55 | 2.55 | 28.09 | 79.02 | 89.02 | 28.09 | 0.00 | 20.55 | 0.00 | 89.02 | 29.48 | 0.00 | 20.55 | 0.00 |
| 118 | 25.86 | 2.54 | 29.23 | 79.88 | 89.88 | 29.23 | 0.00 | 25.86 | 0.00 | 89.88 | 30.63 | 0.00 | 25.86 | 0.00 |
| 119 | 24.29 | 2.55 | 29.39 | 79.98 | 89.98 | 29.39 | 0.00 | 24.29 | 0.00 | 89.98 | 30.78 | 0.00 | 24.29 | 0.00 |

**ตารางที่ ค.3(ข) ผลการจำลองแบบการใช้พลังงานในระบบปั๊มความร้อนที่ถูกกำหนดให้ทำงานในรูปแบบจริงโดยมีการกำหนดอุณหภูมิขีดจำกัดของสารทำความเย็นภายในเครื่องควบแน่น(78°C) บ. เชียงรายวัฒนาพร จำกัด(ต่อ)**

| Hr. | $Q_{CD}$ (kW) | $W_{Blower}$ (kW) | $T_{amb}$ (C) | $T_{afterCD}$ (C) | Without Heat Recovery | | | | | With Heat Recovery | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP | $T_{CD}$(C) | $T_{EV}$(C) | $W_{CP}$(kW) | Heater(kW) | COP |
| 120 | 23.83 | 2.55 | 30.59 | 80.02 | 90.02 | 30.59 | 0.00 | 23.83 | 0.00 | 90.02 | 31.97 | 0.00 | 23.83 | 0.00 |
| 121 | 22.79 | 2.55 | 30.73 | 79.79 | 89.79 | 30.73 | 0.00 | 22.79 | 0.00 | 89.79 | 32.10 | 0.00 | 22.79 | 0.00 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# ภาคผนวก ง

## ข้อมูลราคาอุปกรณ์ระบบปั๊มความร้อน และระบบความร้อนรวมศูนย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตารางที่ ง.1 ข้อมูลราคาโรงบ่มใบยาสูบระบบความร้อนรวมศูนย์ และระบบปั๊มความร้อนขนาด 6 ห้องบ่ม**

| ลำดับ | รายการ | จำนวน | ราคาต่อหน่วย | จำนวนเงิน |
|---|---|---|---|---|
| | **ก. ระบบปั๊มความร้อน** | | | |
| 1 | ปั๊มความร้อน พร้อมอุปกรณ์ส่วนพ่วง | 6 ชุด | 865,000 | 5,190,000 |
| 2 | ขดลวดความร้อนไฟฟ้าพร้อมอุปกรณ์ส่วนพ่วง | 6 ชุด | 280,000 | 1,680,000 |
| 3 | ระบบทำความชื้น | 1 ชุด | 58,000 | 58,000 |
| 4 | พัดลมพร้อมมอเตอร์ | 12 ชุด | 78,000 | 936,000 |
| 5 | ค่าติดตั้ง ค่าขนย้าย รวมการเดินทาง เพื่อรับประกัน การตรวจเช็ค การซ่อมแซม 1 ปี | 1 งาน | 200,000 | 200,000 |
| | รวมเป็นเงินในหมวด ก. | | | **8,064,000** |
| | **ข. ระบบความร้อนรวมศูนย์** | | | |
| 1 | หม้อน้ำร้อน พร้อมอุปกรณ์ส่วนพ่วง | 1 ตัว | 805,000 | 805,000 |
| 2 | ระบบท่อส่งน้ำร้อน | 1 ชุด | 250,000 | 250,000 |
| 3 | ระบบทำความชื้น | 1 ชุด | 58,000 | 58,000 |
| 4 | พัดลมพร้อมมอเตอร์ | 6 ชุด | 78,000 | 468,000 |
| 5 | ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน | 6 ชุด | 46,500 | 279,000 |
| 6 | ชุดควบคุมความร้อน | 6 ชุด | 54,000 | 324,000 |
| 7 | ค่าติดตั้ง ค่าขนย้าย รวมการเดินทาง เพื่อรับประกัน การตรวจเช็ค การซ่อมแซม 1 ปี | 1 งาน | 250,000 | 250,000 |
| | <u>อุปกรณ์เสริม</u> | | | |
| 8 | ไซโคลนดักฝุ่น พร้อมอุปกรณ์ส่วนพ่วง | 1 ตัว | 45,000 | 45,000 |
| 9 | Wet Scrubber พร้อมอุปกรณ์ส่วนพ่วง | 1 ตัว | 250,000 | 250,000 |
| | รวมเป็นเงินในหมวด ข. | | | |
| | - ไม่รวมอุปกรณ์เสริม | | | **2,434,000** |
| | - รวมอุปกรณ์เสริม | | | **2,729,000** |
| | **ค. รายการโครงสร้างโรงบ่ม** | | | |
| 1 | ผนังของโรงบ่ม | 1 โรง | 1,420,862 | 1,420,860 |
| 2 | โครงสร้างอื่นๆ | 1 โรง | 778,899 | 778,900 |
| 3 | ตะแกรงหนีบใบยาสูบ | 1 ชุด | 489,600 | 489,600 |
| | รวมเป็นเงินในหมวด ค. | | | **2,689,360** |

# ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประพจน์ ชัยวรวิทย์กุล เกิดเมื่อวันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2518 จังหวัด กรุงเทพมหานคร ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2535 และได้รับพระราชทานปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล เมื่อปี พ.ศ.2539 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย