

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทที่ 2 นี้เป็นการรวบรวมทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ทฤษฎียางพารา ทฤษฎี ชนิดและรูปแบบของปั๊มความร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง เครื่องยนต์สันดาปภายใน และทฤษฎีการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่างๆ

### 2.1 ทฤษฎียางพารา

ยางพาราหรือยางธรรมชาติ (Para Rubber) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ มีคุณสมบัติคือมีความยืดหยุ่นสูงเมื่อกรีดออกมาจากต้นจะมีลักษณะเป็นน้ำยางสีขาวเหมือนน้ำมัน ในทางเคมีจัดเป็นสารแขวนลอย ในน้ำยางธรรมชาติจะมีปริมาณยางอยู่ประมาณ 25-40% โดยในน้ำยางจะมีสารประกอบโปรตีนและอื่นๆ ทำหน้าที่รักษาสภาพน้ำยางให้อยู่ในสภาพของเหลวอยู่ตลอด ดังนั้นถ้าจะแปรรูปน้ำยางสดให้เป็นแผ่นยาง จึงต้องทำลายสารที่รักษาสภาพน้ำยางพวกนี้เสียก่อน สารที่ใช้ทำลายสารรักษาสภาพน้ำยางเป็นสารจำพวกกรดได้แก่กรดฟอร์มิก หรือกรดอะซิติก เกษตรกรเรียกกันว่า น้ำส้ม [1]

#### 2.1.1 การผลิตยางแผ่นดิบ

การผลิตยางแผ่นดิบจะเริ่มต้นที่การรีดน้ำยางสดจากต้นยางพารา น้ำยางสดที่ได้นำไปกรองแยกสิ่งสกปรกต่างๆ จากนั้นเติมกรดลงไปเพิ่มให้ยางจับตัวกันเป็นก้อน เมื่อยางจับตัวกันเป็นก้อนจึงนำไปเข้าเครื่องรีด รีดออกมาเป็นแผ่นหนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ยางแผ่นที่เพิ่งรีดต้องตากให้แห้งประมาณ 10-12 ชม. หลังจากนั้นนำไปเข้ากระบวนการอบแห้งด้วยวิธีต่างๆ [1]

#### 2.1.2 คุณภาพและมาตรฐานของแผ่นยางพารา

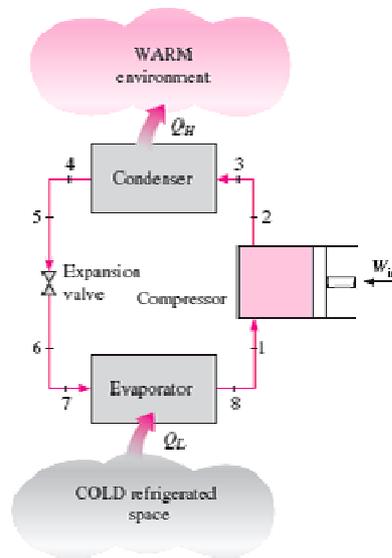
ตามมาตรฐานยางแผ่นรมควันแบ่งได้เป็น 3 ชั้น โดยชั้นที่ 1 เป็นยางแผ่นที่มีคุณภาพสูงที่สุด ชั้น 2 และชั้น 3 คุณภาพลดลงไปตามลำดับ ในแต่ละชั้นก็มีระดับคุณภาพของแผ่นยางต่างกันไป โดยยางแผ่นที่ที่คุณภาพดีที่สุดย่อมมีราคาขายต่อกิโลกรัมสูงที่สุดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดคุณภาพของยางแผ่นรมควันตาม มอก. 980 – 2533 [4]

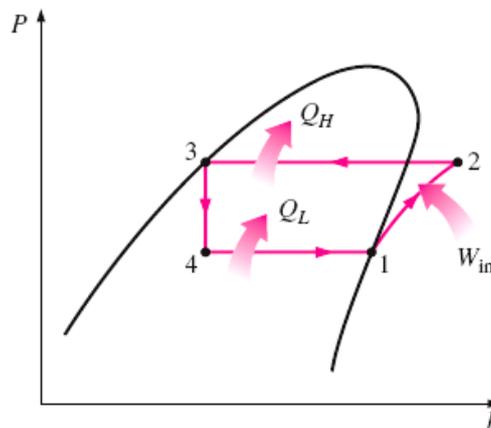
สมบัติ	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3
การขึ้นรา	ต้องไม่มีราหรือมีราแห้งเล็กน้อย เฉพาะผิวของแผ่นยางที่ใช้ห่อ	มีราสนิมได้เล็กน้อยหรือมีราแห้ง ที่แผ่นยางที่ใช้ห่อแต่ไม่เกิน 5% ของตัวอย่างที่ตรวจ	มีราสนิมได้เล็กน้อยหรือมีราแห้ง ที่แผ่นยางที่ใช้ห่อแต่ไม่เกิน 10% ของตัวอย่างที่ตรวจ
สมบัติของยางแผ่น	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติ ดังนี้คือ <ul style="list-style-type: none"> <li>- แห้ง</li> <li>- เนื้อแข็ง</li> <li>- ไม่มีจุดพอง</li> <li>- ไม่มีกรวดทราย</li> <li>- ไม่มีสิ่งปนเปื้อน</li> <li>- ไม่มีตำหนิใด ๆ</li> <li>- สะอาด</li> <li>- ไม่มีราสนิม</li> </ul>	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติ ดังนี้คือ <ul style="list-style-type: none"> <li>- แห้ง</li> <li>- เนื้อแข็ง</li> <li>- ไม่มีจุดพอง</li> <li>- ไม่มีกรวดทราย</li> <li>- ไม่มีสิ่งปนเปื้อน</li> <li>- ไม่มีตำหนิใด ๆ</li> <li>- สะอาด</li> </ul>	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติ ดังนี้คือ <ul style="list-style-type: none"> <li>- แห้ง</li> <li>- เนื้อแข็ง</li> <li>- ไม่มีจุดพอง</li> <li>- ไม่มีกรวดทราย</li> <li>- ไม่มีสิ่งปนเปื้อน</li> </ul>
ตำหนิที่ยอมรับได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีฟองอากาศขนาดหัวเข็มหมุด กระจายอยู่ทั่วแผ่น</li> <li>- มีจุดดำๆของเปลือกไม้ เล็ก น้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีฟองอากาศขนาดเล็ก</li> <li>- มีจุดดำๆของเปลือกไม้ เล็กน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีฟองอากาศขนาดเล็ก</li> <li>- มีจุดดำๆของเปลือกไม้ เล็กน้อย</li> </ul>
ตำหนิที่ยอมรับไม่ได้	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยางเหนียวเยิ้ม</li> <li>- ยางเนื้ออ่อน</li> <li>- ยางแก่ไฟ</li> <li>- ยางไหม้</li> <li>- ยางอ่อนรมควัน</li> <li>- ยางแก่รมควัน</li> <li>- ยางทึบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยางเหนียวเยิ้ม</li> <li>- ยางเนื้ออ่อน</li> <li>- ยางแก่ไฟ</li> <li>- ยางไหม้</li> <li>- ยางอ่อนรมควัน</li> <li>- ยางแก่รมควัน</li> <li>- ยางทึบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ยางเหนียวเยิ้ม</li> <li>- ยางเนื้ออ่อน</li> <li>- ยางแก่ไฟ</li> <li>- ยางไหม้</li> <li>- ยางอ่อนรมควัน</li> <li>- ยางแก่รมควัน</li> <li>- ยางทึบ</li> </ul>

## 2.2 ทฤษฎี ชนิด และรูปแบบของปั๊มความร้อน

ปั๊มความร้อน (Heat Pump) เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนชนิดหนึ่ง หน้าที่คือย้ายความร้อนจากแหล่งอุณหภูมิต่ำไปยังอีกแหล่งอุณหภูมิหนึ่ง โดยมีของไหลเป็นสารทำงานในการพาความร้อน อุปกรณ์พื้นฐานของปั๊มความร้อนจะเหมือนกับระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) ต่างกันเพียงแค่ว่าระบบปรับอากาศจะเป็นการย้ายความร้อนจากบริเวณที่ต้องการปรับอากาศไปทิ้งยังแหล่งอื่น แต่ปั๊มความร้อนเป็นการทำงานที่สลับด้านของเครื่องปรับอากาศคือ ย้ายความร้อนจากแหล่งความร้อนเข้ามาใช้ประโยชน์แทนที่จะทิ้งไป แผนภาพแสดงระบบปรับอากาศและปั๊มความร้อนแสดงในรูปที่ 2.1 และแผนภูมิ P-h รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ระบบปรับอากาศและปั๊มความร้อน [5]



รูปที่ 2.2 แผนภูมิ P-h ของระบบปรับอากาศในอุดมคติ [5]

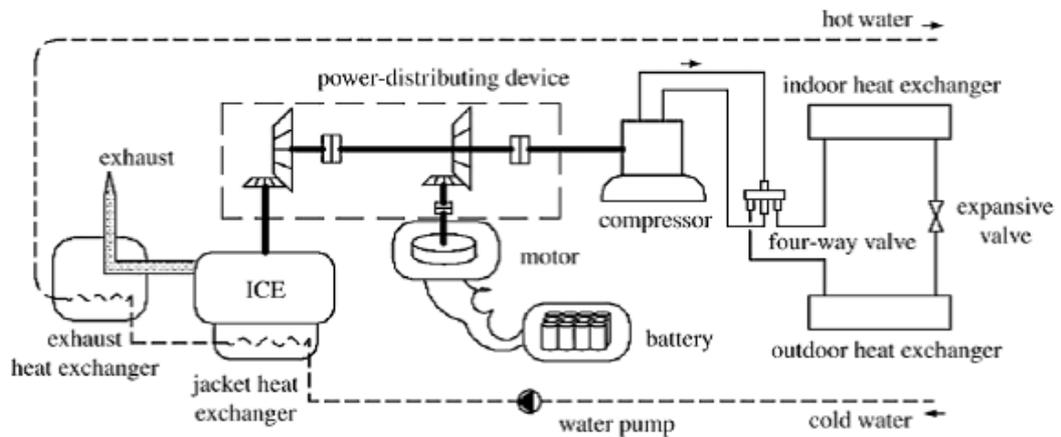
การทำงานของปั๊มความร้อนในรูปที่ 1 สารทำความเย็นในสถานะไออิ่มตัวไหลจากจุดที่ 1 เข้าสู่เครื่องอัดไอ (Compressor) เครื่องอัดไอเพิ่มความดันและอุณหภูมิของสารทำงานและไหลออกจากเครื่องอัดไอไปยังจุดที่ 2 สารทำงานอยู่ในสถานะไอร้อนความดันสูง หลังจากนั้นสารทำงานถูกระบายความร้อนและควบแน่นเป็นของเหลวอิ่มตัวที่เครื่องควบแน่น (Condenser) สารทำงานหลังจากรบายความร้อนในเครื่องควบแน่นจะอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัวในจุดที่ 4 หลังจากนั้นสารทำงานไหลผ่านวาล์วลดความดัน (Expansion Valve) ทำให้มีความดันและอุณหภูมิลดต่ำลงมากเป็นของเหลวความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำที่จุดที่ 6 เพื่อเข้าไปถึงความร้อนในเครื่องระเหย (Evaporator) เมื่อสารทำความเย็นระเหยกลายเป็นไออิ่มตัวหมดและออกจากเครื่องระเหยไปยังจุดที่ 8 เพื่อเริ่มวัฏจักรใหม่ต่อไป [5]

### 2.2.1 ปั๊มความร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้ง (Heat Pump Dryer)

หลักการของปั๊มความร้อนที่ใช้สำหรับการอบแห้งคือ เมื่อส่งอากาศจากบรรยากาศผ่านเครื่องระเหยของปั๊มความร้อน (Evaporator) อากาศจะเย็นลง ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) จะลดลงจนถึงจุดน้ำค้าง ความชื้นในอากาศจะกลั่นตัวออกมาเป็นหยดน้ำ เมื่ออากาศกลั่นตัวออกมาได้มากที่สุดแล้ว อากาศเย็นนี้จะถูกนำไปผ่านเครื่องควบแน่นของปั๊มความร้อน (Condenser) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมา แต่ความชื้นจะลดต่ำลงมาก สามารถนำไปอบแห้งได้ [6] ในบางกรณีจะมีการให้ความร้อนเสริมแก่สารทำงานที่ไปอบแห้งด้วยแหล่งความร้อนต่างๆ เช่นรังสีอาทิตย์ เครื่องให้ความร้อนเสริม หรือเป็นความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่างๆ เช่นไอเสียหรือไอน้ำร้อน เพื่อให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.2.2 ปั๊มความร้อนที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ปั๊มความร้อนโดยทั่วไปขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า แต่สำหรับการใช้งานบางประเภทที่ต้องการลมร้อนที่มีอุณหภูมิสูงไปใช้งานด้วย ปั๊มความร้อนที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในจะมีข้อดีคือมีไอเสียจากการสันดาปที่มีความร้อนสูง สามารถนำความร้อนส่วนนี้ไปแลกเปลี่ยนกับอากาศร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้อากาศร้อนได้ นอกจากนี้เครื่องยนต์สันดาปภายในยังสามารถติดตั้งเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งด้วย [7] ปั๊มความร้อนที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ป้อนความร้อนร่วมการผลิตไฟฟ้าร่วม ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน [7]

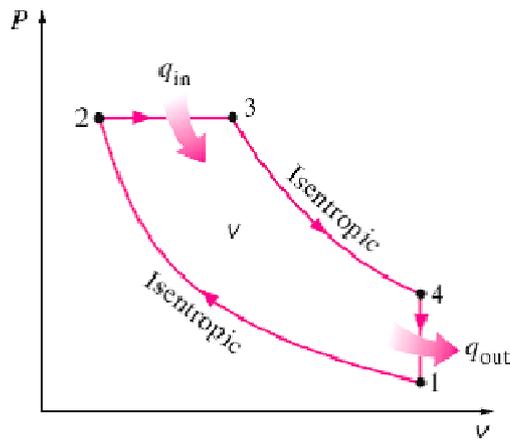
## 2.3 เครื่องยนต์สันดาปภายใน

เครื่องยนต์สันดาปภายในคือเครื่องยนต์ความร้อนที่เปลี่ยนรูปพลังงานเคมีจากเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล โดยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเครื่องยนต์เป็นระบบปิด และใช้การขยายตัวของก๊าซในการขับเคลื่อนเพลาส่งผ่านกำลังไปใช้ประโยชน์ [8] เครื่องยนต์สันดาปภายในแบ่งได้หลายชนิด เช่น เครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine Engine) เครื่องยนต์ลูกสูบ (Reciprocating Engine) เป็นต้น เครื่องยนต์สันดาปภายในในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยนต์ดีเซล ที่ทำงานภายใต้วัฏจักรดีเซล ที่จะกล่าวต่อไป

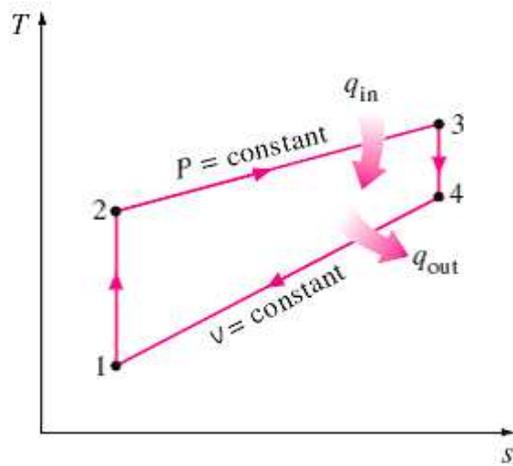
### 2.3.1 วัฏจักรดีเซลและเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Cycle and Diesel Engine)

ในปีคริสต์ศักราช 1892 วิศวกรชาวเยอรมันชื่อ รูดอล์ฟ ดีเซล (Rudolf Diesel) ได้เสนอแนวคิดเครื่องยนต์ที่จุดระเบิดด้วยความร้อนเนื่องจากความดันที่สูงภายในกระบอกสูบและวัฏจักรการทำงานภายหลังเรียกเครื่องยนต์ชนิดนี้ว่า เครื่องยนต์ดีเซล [8] ที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง เครื่องยนต์ดีเซลทำงานแบบ 4 จังหวะ คือ 1. อากาศไหลเข้ากระบอกสูบ 2. ลูกสูบอัดตัว อากาศภายในกระบอกสูบมีอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นมาก 3. เครื่องยนต์ฉีดเชื้อเพลิงเข้ากระบอกสูบ อุณหภูมิที่สูงจะทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ 4. ลูกสูบดันตัวลงจากการขยายตัวภายในกระบอกสูบ และปล่อยไอเสียออกไปเพื่อรับอากาศใหม่เข้ามา [5]

สำหรับวัฏจักรดีเซลแบบอุดมคติ แสดงกราฟ P-v และ T-S ได้ตามรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 กราฟ P-v ของวัฏจักรดีเซลแบบอุดมคติ [5]



รูปที่ 2.5 กราฟ T-S ของวัฏจักรดีเซลแบบอุดมคติ [5]

จากรูปที่ 2.4 และ 2.5 วัฏจักรเริ่มทำงานจากจุดที่ 1-2 เป็นการอัดตัวแบบไอเซนโทรปิก จากจุดที่ 2-3 เป็นการให้ความร้อนแบบความดันคงที่ (ฉีดเชื้อเพลิง) จากจุดที่ 3-4 เป็นการขยายตัวแบบไอเซนโทรปิก และจุดที่ 4-1 เป็นการระบายความร้อนทิ้ง เพื่อเริ่มวัฏจักรใหม่ [5]

### 2.4 ทฤษฎีการอบแห้ง

การอบแห้งคือการลดความชื้นของวัสดุที่ต้องการ โดยการใช้ความร้อนถ่ายเทไปยังวัสดุเพื่อให้ความชื้นมีการระเหยออกจากวัสดุ วัสดุที่ใช้อบแห้งส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเช่น เมล็ดพืช ผลไม้สด หรือจะเป็นวัสดุที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น เศษไม้ต่างๆ เศษวัสดุทางการเกษตร หรือมูลสัตว์ จุดประสงค์ของการอบแห้งคือการรักษาสภาพผลิตภัณฑ์ ทำให้ง่ายต่อการเก็บรักษาหรือแปรรูปในกรณีที่อบแห้งเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อทำให้เชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้น ประสิทธิภาพการเผาไหม้มากขึ้น [9]

การอบแห้งวัสดุแบ่งเป็น 3 ช่วงคือ

1. ช่วงการอุ่นวัสดุ คือ ช่วงเวลาที่เริ่มจากอุณหภูมิเริ่มต้น จนถึงจุดที่อุณหภูมิสมดุลในระบบ ซึ่งจะ เป็นไปตามเงื่อนไขการอบแห้ง (การพาความร้อนอย่างเดียวหรือมีการแผ่รังสีร่วมด้วย)
2. ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ คือ ช่วงที่ผิวของวัสดุมีความชื้นอยู่มาก หรือความชื้นภายใน วัสดุมีค่ามากกว่าความชื้นวิกฤต เมื่อได้รับความร้อนจากอากาศที่พัดผ่าน จะเกิดการถ่ายเทมวลหรือการระเหยของความชื้นขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุโดยอุณหภูมิและอัตราการอบแห้งคงที่
3. ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง คือ ช่วงที่ความชื้นภายในวัสดุมีค่าน้อยกว่าความชื้นวิกฤต ความชื้นจะเคลื่อนที่จากภายในวัสดุมายังผิวของวัสดุ แล้วจึงระเหยออกไป อัตราการอบแห้งจะลดลงเมื่อความชื้นในเนื้อวัสดุน้อยลง (อัตราการอบแห้งแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นคงเหลือ) [10]

#### 2.4.1 ความชื้นของวัสดุ

ความชื้นคือปริมาณของน้ำในเนื้อวัสดุเทียบกับมวลวัสดุแห้งหรือวัสดุชื้น สามารถแสดงค่าได้ 2 แบบ ได้แก่

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก คือ การแสดงค่าความชื้นเทียบกับมวลของวัสดุมาตรฐาน ตามสมการ

$$M_w = \frac{m-d}{m} \times 100 \quad (1)$$

โดย

$M_w$  = ความชื้นมาตรฐานเปียก, %

$m$  = มวลของวัสดุ, kg

$d$  = มวลของวัสดุแห้ง, kg

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง คือ การแสดงค่าความชื้นเทียบกับมวลของวัสดุแห้ง ตามสมการ

$$M_d = \frac{m-d}{d} \times 100 \quad (2)$$

โดย

$M_d$  = ความชื้นมาตรฐานแห้ง, %

โดยปกติแล้ว ความชื้นมาตรฐานเปียกนิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ แต่ความชื้นมาตรฐานแห้งนิยมใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี [9]

## 2.4.2 อัตราการอบแห้งคงที่

อัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างวัสดุกับอากาศอบแห้งจะเหมือนกับ การถ่ายเทความร้อนและความชื้นที่กระเปาะเปียกทางเทอร์โมมิเตอร์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมอบแห้ง โดยสมการแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุอบแห้ง แสดงได้ดังนี้

$$m_w = h_d \rho_a (W_{ab} - W) \quad (3)$$

$$m_w = h_c A (T - T_{wb}) / h_{fg} \quad (4)$$

สำหรับไอน้ำและอากาศ

$$h_c / h_d = \rho_a G_a \quad (5)$$

โดย

$T$  = อุณหภูมิแวดล้อม, °C

$T_{wb}$  = อุณหภูมิกระเปาะเปียก, °C

$m_w$  = อัตราการถ่ายเทความชื้น, kg/h

$h_d$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสาร, kg/m<sup>2</sup>-h

$h_c$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, kJ/m<sup>2</sup>°C-h

$A$  = พื้นที่ของวัสดุ, m<sup>2</sup>

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

$\rho_a$  = ความหนาแน่นของอากาศอบแห้ง, kg/m<sup>3</sup>

$G_a$  = ความเร็วเชิงมวลของอากาศ, kg/h-m<sup>2</sup>

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นอยู่กับสภาพการสัมผัสระหว่างวัสดุและความร้อนในแต่ละกรณี ได้แก่

1. กรณีลมร้อนไหลขนานกับแผ่นวัสดุ

$$h_c = c(G_a)^{0.8} \quad (6)$$

โดย

$c$  = ค่าคงที่มีค่าระหว่าง 0.0748 - 0.101

## 2. กรณีลมร้อนไหลตั้งฉากกับวัสดุ

$$h_c = 4.206(G_a)^{0.307} \quad (7)$$

## 3. กรณีลมร้อนไหลผ่านวัสดุกลมเดี่ยว

$$Nu = 2 + 0.65 Re^{0.5} Pr^{0.333} \quad (8)$$

### 2.4.3 อัตราการอบแห้งลดลง

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ค่าความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าปริมาณความชื้นวิกฤติ การระเหยความชื้นจะเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของน้ำที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลวผ่านพื้นผิวของวัสดุออกมายังผิวของวัสดุแล้วจึงระเหยออกไป ซึ่งจะช้ากว่าการระเหยจากผิววัสดุโดยตรง ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงลดลง ความเร็วของการถ่ายเทความชื้นในเนื้อวัสดุขึ้นอยู่กับความต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำของวัสดุ ทำให้เกิดผลต่างระหว่างความชื้นและอุณหภูมิในเนื้อวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ อัตราการถ่ายเทความชื้นต่อหน่วยพื้นที่ของวัสดุแสดงดังสมการ

$$\partial M / \partial t = D \left[ \partial^2 M / \partial r^2 + (c/r) \partial M / \partial r \right] \quad (9)$$

โดย

$C = 0$  สำหรับการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นแบนซึ่งมีความกว้างและยาวมาก

$C = 1$  สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาวมาก

$C = 2$  สำหรับการแพร่ความชื้นในแนวรัศมีของวัสดุทรงกลม

และ

$M$  = ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

$t$  = เวลา, h

$r$  = ระยะการแพร่ความชื้นสำหรับวัสดุแผ่นกว้างมากหรือระยะรัศมีการแพร่ความชื้นสำหรับทรงกระบอกหรือทรงกลม, m

$D$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น,  $m^2/h$

สำหรับวัสดุที่เป็นแผ่นกว้างมาก กำหนดภาวะขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$M(x, t) = M_{in}, t = 0, 0 < x < 1 \quad (10)$$

$$M(x, t) = M_{eq}, x = 0, t > 0 \quad (11)$$

$$M(x, t) = M_{eq}, x = 1, t > 0 \quad (12)$$

กำหนดให้

$$MR(x, t) = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}} \quad (13)$$

โดย

$MR$  = อัตราส่วนความชื้น

$M_{in}$  = ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

$M_{eq}$  = ความชื้นสมดุลของวัสดุ, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

สามารถหาคำตอบของสมการ (9) ได้ดังนี้คือ

$$MR(t) = \left(8/\pi^2\right) \sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{1}{(2m+1)^2} \right] \exp[-(2m^2+1)^2 \pi^2 Dt/l^2] \quad (14)$$

โดย

$l$  = ความหนาของวัสดุแผ่นกว้างมาก หรือความยาวของด้านทรงลูกบาศก์, m

สำหรับวัสดุทรงกระบอกยาวมาก กำหนดภาวะขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นคือ

$$M(r, t) = M_{in}, t = 0, 0 < r < r_0 \quad (15)$$

$$M(r, t) = M_{eq}, r = r_0, t > 0 \quad (16)$$

สามารถหาคำตอบของสมการ (9) ได้ดังนี้คือ

$$MR(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{4}{(\lambda_n r_0)^2} \right] \exp[-(\lambda_n r_0)^2 (Dt/r_0)^2] \quad (17)$$

โดย

$r_0$  = รัศมีของวัสดุทรงกระบอกยาว, m

$\lambda_n r_0$  = รากของฟังก์ชันเบสเซลอันดับศูนย์

สำหรับวัสดุทรงกระบอกสั้น สามารถหาคำตอบจากผลคูณของวัสดุทรงกระบอกและวัสดุทรงแผ่น กว้างมาก ที่มีความยาวเท่ากับความยาวของทรงกระบอก ดังนี้

$$MR(t) = \left(\frac{32}{\pi^2}\right) \sum_{m=0}^{\alpha} \sum_{n=1}^{\alpha} \left[ \frac{1}{(2m+1)^2} \right] \left[ \frac{1}{(\lambda_n r_0)^2} \right] \exp \left[ \left[ -(2m+1)^2 \pi^2 Dt / l^2 \right] - \left[ (\lambda_n r_0)^2 \left( Dt / r_0^2 \right) \right] \right] \quad (18)$$

สำหรับวัสดุทรงลูกบาศก์ สามารถหาคำตอบของสมการ (9) ได้คือ

$$MR(t) = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \exp(-3\pi^2 Dt / l^2) \quad (19)$$

สำหรับวัสดุทรงกลม สามารถหาคำตอบของสมการ (9) ได้คือ

$$MR(t) = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \sum_{n=1}^{\alpha} \left(\frac{1}{n^2}\right) \exp(-n^2 \pi^2 x^2 / 9) \quad (20)$$

โดย

$n, m$  = จำนวนเต็ม

$$x = \frac{A}{V(Dt)^{0.5}}$$

$V$  = ปริมาตรของวัสดุ,  $m^3$

#### 2.4.4 ความชื้นสมดุล

เมื่อทำการอบแห้งวัสดุด้วยอากาศที่มีสภาวะคงที่ ความชื้นของวัสดุจะลดลงต่ำจนถึงจุดที่มีค่าคงที่ เรียกว่า ค่าปริมาณความชื้นสมดุล นั่นคือความชื้นในวัสดุจะมีความดันไอน้ำเท่ากับความดันของอากาศที่อยู่รอบๆ ค่าปริมาณความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง

## 2.4.5 การอบแห้งยางพารา

การอบแห้งยางพาราในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีหลัก ซึ่งแต่ละวิธีก็มีค่าใช้จ่ายในด้านการลงทุน คุณภาพของแผ่นยางที่ได้ และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งต่างกันไป วิธีการอบแห้งยางพาราได้แก่

1. การตากแห้งโดยธรรมชาติ วิธีนี้จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งประมาณ 7-21 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในช่วงนั้น วิธีนี้ลงทุนต่ำที่สุด แต่ใช้ระยะเวลานานที่สุด และคุณภาพของแผ่นยางพาราที่ได้ก็จะต่ำที่สุดเนื่องจากเนื้อยางพาราจะมีเชื้อราเกาะติดอยู่ในปริมาณมาก
2. การรมควันด้วยโรงรมควันยางพารา วิธีนี้จะใช้เวลาค่อนข้างสั้น คือประมาณ 3-5 วัน ขึ้นอยู่กับการควบคุมอุณหภูมิและการป้อนเชื้อเพลิง มีการลงทุนในด้านการสร้างโรงรมควันและเชื้อเพลิง วิธีนี้ทำโดยการเผาเชื้อเพลิงบริเวณด้านล่างของโรงรมควัน เพื่อให้ควันร้อนลอยขึ้นไปอบแห้งแผ่นยางที่แขวนไว้ยังห้องอบแห้ง วิธีนี้ให้แผ่นยางที่มีคุณภาพสูง ปริมาณเชื้อราต่ำ

ส่วนวิธีที่ใช้ในงานวิจัยเป็นการอบแห้งด้วยบั้งความร้อน วิธีนี้สามารถควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการอบแห้งได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงทำให้ควบคุมระยะเวลาในการอบแห้งได้ด้วย ทำให้ได้แผ่นยางที่มีคุณภาพสูงที่สุด แต่มีค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานและระบบสูงกว่าระบบอื่นมาก ทำให้ไม่นิยมเนื่องจากอุตสาหกรรมยางพาราในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีขนาดเล็ก นิยมส่งออกไปแปรรูปยังต่างประเทศมากกว่า

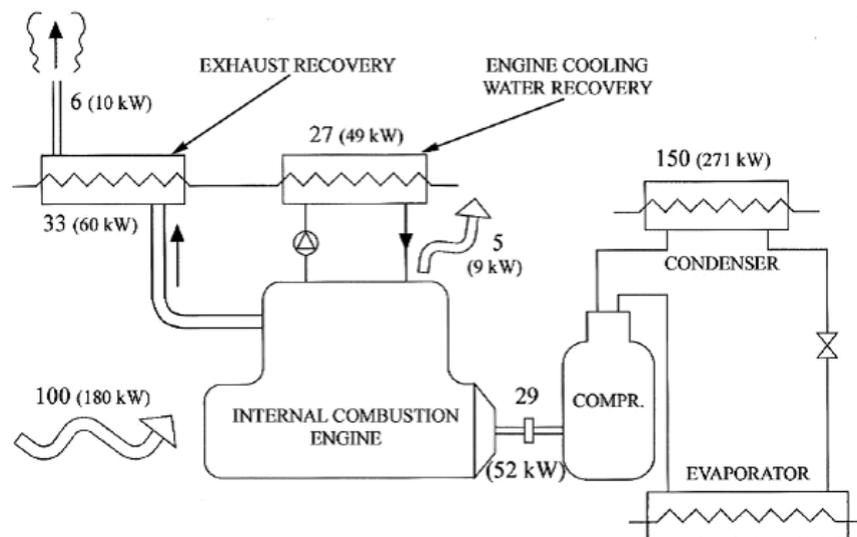
## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การอบแห้งยางพาราในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์หลักในระบบคือ บั้งความร้อน และเครื่องยนต์ดีเซล ปกติแล้วเครื่องยนต์ดีเซลจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ประมาณ 30-35% ดังนั้นการดึงความร้อนทิ้งจากไอเสียมาใช้งานก็สามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้ และปรับปรุงอุปกรณ์ให้สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ก็ยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพได้มากขึ้น

สำหรับการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนบั้งความร้อน Ying-Lin Li และคณะ [7] ศึกษากระบวนการผลิตพลังงานร่วมที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์ก๊าซ โดยแบ่งการเดินเครื่องเป็น 4 แบบ พิจารณาระบบหลักจากรูปที่ 3 ได้แก่ แบบ A เดินเครื่องยนต์ขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์เพียงอย่างเดียว แบบ B เดินระบบด้วยเครื่องยนต์ในภาวะคงตัวในอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำควบคู่ไปกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าร่วมในการเดินระบบด้วย แบบ C เดินระบบ

ด้วยเครื่องยนต์ในภาวะคงตัวในอัตราการใช้พลังงานที่ต่ำ แต่พลังงานที่เหลือจากการเดินเครื่องยนต์นำไปขับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชาร์จไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ และแบบ D เดินเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อขับคอมเพรสเซอร์ที่จ่ายไฟมาจากแบตเตอรี่เพียงอย่างเดียว ได้ผลดังนี้คือ แบบ A มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดที่ 33% แบบ B มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดมากกว่า 37% แบบ C มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยคือ 28% และต่ำสุดที่ 22% และแบบ D มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุด โดยต่ำกว่า 22%

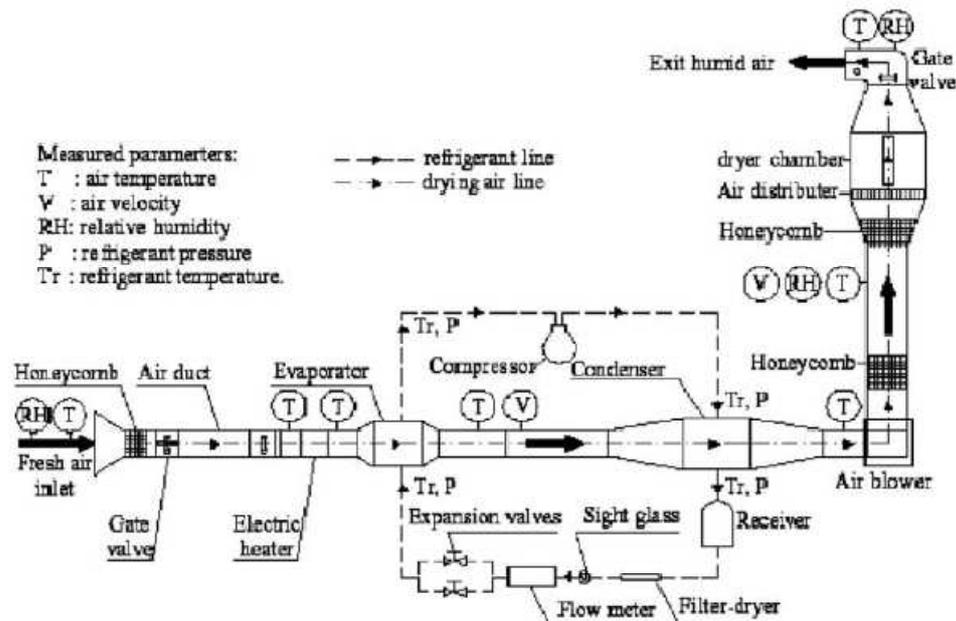
R.Lazzarin และ M.Noro [11] ได้ศึกษาระบบ HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) ของอาคาร S.Nicola ของภาควิชาอุตสาหกรรมและการจัดการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยปาโดวา ประเทศอิตาลี ที่ใช้ปั๊มความร้อนที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นอุปกรณ์หลักในระบบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปั๊มความร้อนที่ใช้ในงานวิจัยของ R.Lazzarin และ M.Noro [11]

ในงานวิจัยพิจารณาในส่วนเศรษฐศาสตร์เป็นหลัก ทำการเก็บค่าต่างๆ ในแต่ละช่วงปีระหว่างปี ค.ศ. 1999 ถึง ค.ศ. 2002 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานเทียบกับระบบที่ขับเคลื่อนด้วยหม้อไอน้ำ ผลการวิจัยพบว่า หลังจากติดตั้งระบบปั๊มความร้อนที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงแทนที่ระบบความร้อนที่ใช้หม้อไอน้ำ 2 ตัวของเดิม ระบบปั๊มความร้อนประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปีได้สูงกว่า 20,000 ยูโรเมื่อเทียบกับการใช้หม้อไอน้ำ และสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 6 ปี

ในเรื่องการใช้ปั๊มความร้อนในการอบแห้ง M.Fatouh และคณะ [12] ทำการอบแห้งสมุนไพรด้วยปั๊มความร้อน โดยพิจารณาข้อดีของปั๊มความร้อนคือสามารถควบคุมความชื้นได้ จึงเลือกปั๊มความร้อนเป็นอุปกรณ์ในการอบแห้งสมุนไพร แสดงรูปแบบของระบบได้ตามรูปที่ 2.7

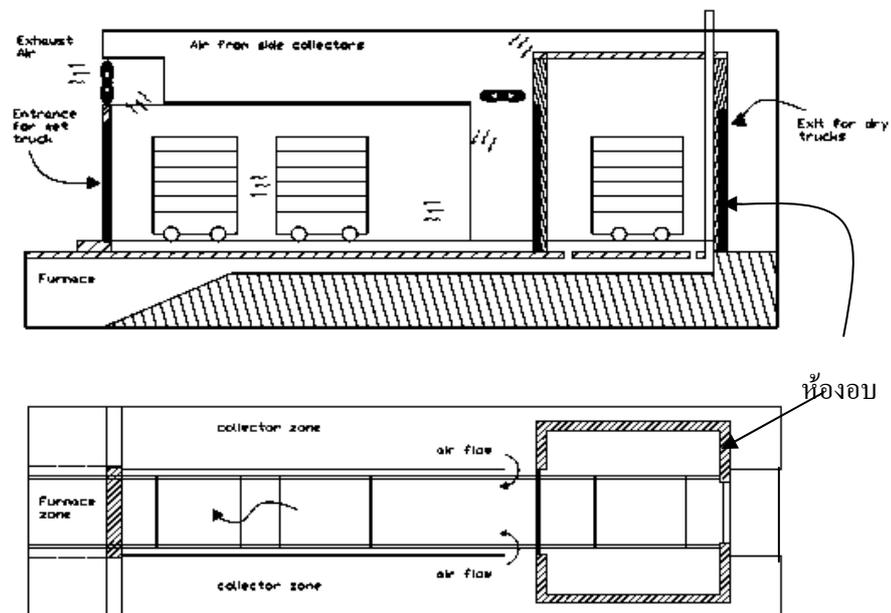


รูปที่ 2.7 ระบบปั๊มความร้อนใช้อบแห้งสมุนไพร [12]

ในงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรในการอบแห้งได้แก่ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่อพื้นที่อบแห้ง (Surface load,  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) อุณหภูมิของการอบแห้ง (Drying air temperature,  $^{\circ}\text{C}$ ) ความเร็วของอากาศ (Air velocity,  $\text{m}/\text{s}$ ) พื้นที่ของใบสมุนไพร (Herb area,  $\text{cm}^2$ ) สภาพของใบสมุนไพร (Herb condition) เช่น มีก้านหรือไม่มีก้าน และชนิดของสมุนไพรที่ทำการอบแห้งได้แก่ ใบยิวแมลโลว์ สเปียร์มินท์ และพาร์สลีย์ โดยอบแห้งใบยิวแมลโลว์เป็นตัวแปรหลัก ทำการทดสอบผลของตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดว่ามีผลมากน้อยต่อการอบแห้งอย่างไร ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่อพื้นที่อบแห้งส่งผลต่ออัตราการอบแห้งและระยะเวลาการอบแห้ง โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ต่อพื้นที่อบแห้งที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ใช้ระยะเวลาให้การอบแห้งมากขึ้นและมีอัตราการอบแห้งที่ต่ำลง อุณหภูมิของการอบแห้งส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ระยะเวลาที่ใช้สั้นลง ความเร็วของอากาศส่งผลต่อระยะเวลาในการอบแห้งแต่ไม่เด่นชัด โดยจะมีจุดเหมาะสมที่ระยะเวลาหนึ่งที่มีความเร็วของอากาศอบแห้งต่างกันแต่ใช้เวลาอบแห้งเท่ากัน พื้นที่ของใบสมุนไพรส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง เมื่ออบแห้งให้เหลือความชื้นเท่ากันใบสมุนไพรที่มีขนาดเล็กกว่าใช้เวลาอบแห้งน้อยกว่ามาก สภาพของใบสมุนไพร ใบสมุนไพรที่มีก้านจากการทดลองพบว่าใช้เวลาในการอบแห้งไม่ต่างจากใบสมุนไพรที่ไม่มี

มีก้าน และชนิดของสมุนไพรทั้ง 3 ชนิด ทั้งระยะเวลาในการอบแห้งและอัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสมุนไพรชนิดนั้น โดยพาร์สลีย์ใช้เวลาอบแห้งน้อยที่สุด ตามมาด้วยสเปียร์มินท์ และ ยิวแมลโลว์ ตามลำดับ

สำหรับการอบแห้งยางพารา สุทธิศักดิ์ แก้วนุก และคณะ [1] ทำการพัฒนากระบวนการอบแห้งด้วยพลังงานจากรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานเสริม โดยทำการพัฒนาระบบอบแห้งยางพาราที่เดิมใช้เป็นโรงรมควัน โดยเสริมความร้อนจากรังสีอาทิตย์เป็นพลังงานร่วมด้วย เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้เผาในการอบแห้งยางพารา แบ่งกรณีศึกษาเป็น 4 กรณี ได้แก่ อบแห้งด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียว การรมควันอย่างเดียว การอบแห้งแบบสลับกันระหว่างกลางวันอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับกลางคืนรมควัน และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับความร้อนร่วมที่ถ่ายเทมาจากระบบรมควัน ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งสั้นลงกว่าเดิมมาก จากการรมควันธรรมชาติใช้เวลาประมาณ 3-4 วัน เมื่อนำรังสีอาทิตย์มาเข้าร่วมด้วยสามารถลดระยะเวลาให้เหลือเพียง 1 วันครึ่ง และเนื่ออย่างที่ได้อีกได้ตามมาตรฐาน ลักษณะห้องอบที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ห้องอบแห้งแผ่นยางที่ใช้ในงานวิจัยในเมื่อมองจากด้านข้างและด้านบน [1]

ประเทือง ฟั่นแก้ว และคณะ [13] ทำการศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบปรับอากาศแบบอัดไอขับเคลื่อนโดยเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องยนต์แก๊สโซลีนของมอเตอร์ไซค์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนของระบบทำความเย็นของรถยนต์ แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง ได้ผลคือเมื่อเร่งเครื่องยนต์ที่ 100% ได้กำลังสูงสุดที่ 1.34 kW ที่ 4000 rpm แรงบิดสูงสุดที่ 3.8 N.m ที่ 3000 rpm และสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉพาะเป็น 1.15 m<sup>3</sup>/kW.h ที่ 3000 rpm ส่วนการทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องปรับอากาศ ได้ผลคือ ได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) สูงสุด 11.2 ที่เครื่องอัดไอหมุนที่ความเร็ว 400 rpm และได้ค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะเท่ากับ 7.25 ที่เครื่องอัดไอหมุนที่ความเร็ว 923 rpm เมื่ออัตราทำความเย็นที่เครื่องระเหยเท่ากับ 3517 W (1 ต้นความเย็น) และผลการทดสอบทั้งระบบ เมื่อนำเครื่องยนต์ที่ใช้ก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงมาขับเคลื่อนระบบทำความเย็น พบว่าระบบมีภาวะเหมาะสมที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ 3500 rpm ความเร็วรอบของเครื่องอัดไอ 923 rpm ที่สิ้นเปลืองเปิด 80% มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของทั้งระบบ 93.3%

สุนิษา พรหมดวง [14] ศึกษาวิจัยการอบแห้งตะไคร้ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C และ 60 °C ที่ความเร็วอากาศอบแห้งที่ 0.73 m/s และ 1.12 m/s เพื่อศึกษาผลจากปัจจัยของอุณหภูมิและความเร็วอากาศอบแห้ง สมรรถนะของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน และคุณภาพของตะไคร้หลังอบแห้ง โดยเปรียบเทียบผลกับการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนและปั๊มความร้อนทางอุตสาหกรรม จากการศึกษาพบว่า ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ในช่วงแรก ความเร็วและอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่ออัตราการอบแห้งที่มากขึ้น แต่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงในช่วงหลัง อัตราการอบแห้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว ความเร็วของอากาศอบแห้งส่งผลไม่มากต่ออัตราการใช้พลังงาน โดยอัตราการใช้พลังงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้มากกว่า คุณภาพของตะไคร้ในเรื่องสีพบว่า ทั้งการอบแห้งแบบปั๊มความร้อน แบบใช้อากาศร้อน และแบบปั๊มความร้อนในอุตสาหกรรม สีของตะไคร้ไม่ต่างกันนักจากตะไคร้สด อัตราการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนใกล้เคียงกับอากาศร้อน แต่การสูญเสียน้ำมันหอมระเหย การอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีการสูญเสียน้ำมันหอมระเหยมากกว่าการใช้ปั๊มความร้อนเล็กน้อย โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C มีการสูญเสียมากกว่าที่อุณหภูมิ 60 °C

จากงานวิจัยของประเทือง ฟั่นแก้ว และคณะ Ying-Lin Li และคณะ และ R.Lazzarin และ M.Noro พบว่าการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในขับเคลื่อนเครื่องอัดไอ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะสูงถึง 7-11.2 และค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อระบบมีการจัดการความร้อนเหลือทิ้งให้ใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำไอเสียไปผลิตอากาศร้อน หรือใช้น้ำไปหล่อเย็นระบบแล้วได้น้ำร้อนไปใช้ โดยระบบปรับอากาศสามารถประยุกต์ใช้เป็นปั๊มความร้อนได้ และเครื่องยนต์สันดาปภายในสามารถ

ปรับเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นแก๊สชีวภาพ แก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมันเชื้อเพลิงก็ได้ จากงานวิจัยของสุทธิศักดิ์ แก้วนุก และคณะ พบว่าการอบแห้งยางพาราด้วยวิธีการรมควันให้ผลดีแต่มีข้อเสียคือมีเขม่าจากไอเสียติดอยู่บนผิวของแผ่นยางพารา ทำให้แผ่นยางพารามีคุณภาพด้อยลงไป และงานวิจัยของ M.Fatouh และคณะ และสุนีย์พร พรหมดวง และคณะ ทำการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นอาหารโดยใช้บั้งความร้อน พบว่าสาเหตุที่ใช้บั้งความร้อนเนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งสั้น และมีความสะอาดสูง

ดังนั้นการประยุกต์ใช้บั้งความร้อนในการอบแห้งยางพารา โดยใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในขับเคลื่อนระบบ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สะอาด สามารถอบแห้งได้รวดเร็วและมีความยืดหยุ่นในด้านพลังงานที่ใช้ด้วย แต่จะยุ่งยากในการติดตั้งระบบมากกว่าการอบแห้งด้วยวิธีการรมควันมาก