



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตากแห้งยางแผ่นดิบที่เหมาะสมต่อการรมควัน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา”

เสนอต่อ

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

โดย

รศ.ดร.พีระพงศ์ ฑีมสกุล และคณะ

ตุลาคม 2550



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การตากแห้งยางแผ่นดิบที่เหมาะสมต่อการรมควัน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

ชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา”

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร.พีระพงศ์ ทิมสกุล
2. ดร.ฐานันดรศักดิ์ เทพญา
3. วัชรพงษ์ อินนพัฒน์

สังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปผู้บริหาร

โครงการวิจัย การตากแห้งยางแผ่นดิบที่เหมาะสมต่อการรมควัน โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นโครงการหนึ่งในชุดโครงการ “การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา” เนื่องจากการส่งเสริมให้อุตสาหกรรมขนาดย่อมที่มีการจัดการในรูปแบบสหกรณ์สวนยางพารา ได้มีการนำเทคโนโลยีมาช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตยางแผ่นดิบรมควัน เป็นการลดต้นทุนในการผลิต สหกรณ์สวนยางพาราที่เข้าร่วมโครงการวิจัยนี้ คือ สหกรณ์สวนยางทุ่งโพธิ์ ต.ทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา ทั้งนี้กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน ในขั้นตอนการรมควัน ต้องใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงจำนวนมาก ปัจจุบันปริมาณไม้ฟืนที่ใช้ในการรมควันยางแผ่นของสหกรณ์สวนยางพาราโดยทั่วไปเท่ากับ 1.2-1.5 กิโลกรัมต่อกิโลกรัมยางแผ่นรมควัน ประกอบกับปัจจุบันไม้ยางพาราที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงมีราคาสูงขึ้น ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตยางแผ่นรมควัน การลดความชื้นยางแผ่นดิบก่อนการรมควัน สามารถช่วยลดการใช้ไม้ฟืนลงได้ เนื่องจากการลดปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำในเนื้อยางแผ่นดิบออกไป หากสามารถลดความชื้นในยางแผ่นดิบก่อนรมควันออกได้มากเท่าใด ก็ยิ่งประหยัดการใช้ไม้ฟืน ดังนั้นการลดความชื้นยางแผ่นดิบก่อนรมควันจึงมีความจำเป็น พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มีความเหมาะสมที่จะใช้ในการลดความชื้นยางแผ่นดิบ เนื่องจากไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงในการสร้างความร้อน แต่ก็มีข้อจำกัดในความไม่แน่นอนของแสงอาทิตย์ในแต่ละวัน ซึ่งเปลี่ยนไปตามฤดูกาลและแต่ละพื้นที่ อย่างไรก็ตามหากมีการศึกษาวิจัย และทดลองการนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมกับลักษณะงานและพื้นที่ จะทำให้ได้วิธีการและอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์มาช่วยในการลดความชื้นยางแผ่นดิบ โดยศึกษาสภาวะเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตากแห้งยางแผ่นดิบ ออกแบบสร้างโรงตากยางแผ่นดิบขนาดปริมาณความจุยางแผ่นเท่ากับ 1 ห้องรมควัน และทดลองตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตากยางที่สร้างขึ้น ผลที่ได้ทำให้ทราบเงื่อนไขการทำงานกับโรงตากยางแผ่นดิบอย่างเหมาะสม

ขั้นตอนวิจัยเริ่มจากการศึกษา ทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการ เพื่อจำลองสภาพบรรยากาศที่จะเกิดขึ้นในโรงตากยาง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วลม ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งหรือใช้ในการตากยางแผ่นดิบ โดยตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ ถูกจำลองด้วยสภาวะความชื้นสูง (มากกว่า 60%) ด้วยการสเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ และความชื้นปกติ (50-60%) ซึ่งไม่สเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ ระยะห่างระหว่างแผ่นยางที่แขวนบนกระบะตากยางที่ใช้ในสหกรณ์สวนยางพารา ก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สนใจ การวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ ทำโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งสามารถใช้ในการมองภาพการเปลี่ยนแปลงของ

ผลตอบแทนที่สนใจคือ ความชื้นยางแผ่นดิบหลังการอบและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเงื่อนไขหรือตัวแปรอิสระคือ อุณหภูมิและความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไป ได้ชัดเจน และสามารถใช้ในการทำนายผลตอบแทนในเงื่อนไขที่ไม่ได้ทำการทดลองได้

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองและกราฟ contour ของตัวแปรอิสระ พบว่าแม้อุณหภูมิในตู้อบแห้งไม่สูงมาก ประมาณ $33-35^{\circ}\text{C}$ ทั้งในกรณีที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงและต่ำ ก็สามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งยางแผ่นดิบให้เหลือความชื้น 15% ลงได้โดยการเพิ่มอัตราการระบายอากาศหรือความเร็วลมให้สูงขึ้น แม้ว่าจะเป็นตรรกะที่เป็นที่ทราบกันดี แต่เนื่องจากการออกแบบโรงตากแห้งยางแผ่นดิบโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ควรใช้พลังงานจากแหล่งอื่นในการช่วยการทำงานของโรงตากให้น้อยที่สุด แต่เพียงพอที่จะทำให้โรงตากยังสามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นลักษณะของโรงตากที่มีการระบายอากาศที่ดี จำเป็นต้องมีการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์ระบายอากาศช่วย เพื่อให้สามารถระบายอากาศขึ้นออกจากโรงตากให้ได้มากที่สุดโดยใช้พลังงานให้น้อยที่สุด แต่ในขณะเดียวกันจำเป็นต้องระมัดระวังความชื้นจากภายนอกที่อาจจะเข้ามาทำให้อัตราการแห้งตัวของยางแผ่นช้าลง ผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบที่อุณหภูมิการอบแห้งสูง ($42-47^{\circ}\text{C}$) ต้องการอัตราการระบายอากาศเพียง 800-900 ลบ.ม./ชม. เพียงพอสำหรับทำให้ยางแผ่นดิบแห้งตัวลงเหลือความชื้น 15% ในระยะเวลาที่ใกล้เคียงกันกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าแต่อัตราการระบายอากาศต้องเป็น 1200-1500 ลบ.ม./ชม. ส่วนการเว้นระยะห่างระหว่างยางแผ่นดิบในการอบแห้งจะให้อัตราการแห้งที่สูงกว่าการไม่เว้นระยะ และใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่า แต่ทั้งนี้การเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นยาง ต้องคำนึงถึงปริมาณยางแผ่นดิบที่มี หรือที่สหกรณ์สวนยางผลิตได้ในแต่ละวัน

จากผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการ ได้นำมาออกแบบโรงตากยางแผ่นดิบ โดยโรงตากยางแผ่นดิบที่สร้างขึ้นเพื่อวิจัย มีลักษณะเป็นโรงเรือนหลังคาจั่ว กว้าง 3 เมตร ยาว 7.2 เมตร สูง 3.4 เมตร เมื่อบรรจุกระบะแขวนยางแผ่นเต็ม 3 กระบะ จะมีพื้นที่ว่างด้านข้างด้านละ 0.5 เมตร ผนังด้านในโรงตากยางและพื้นคอนกรีตทาสีดำ หลังคาโรงเรือนปูด้วยกระเบื้องลอนคู่โปร่งใสเอียงทำมุม 20 องศา มีพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว จำนวน 3 ตัว ติดตั้งอยู่ด้านบน โดยอาศัยการระบายอากาศโดยธรรมชาติ ส่วนประตูโรงเรือนทำด้วยแผ่นสังกะสีด้านในทาสีดำ ระหว่างกลางบุด้วยฉนวนโฟมเช่นเดียวกับผนังโรงเรือนด้านข้าง มีติดพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 นิ้ว จำนวน 6 ตัว ติดอยู่บริเวณประตู ใช้ไฟฟ้า 220 VAC ใช้กำลังไฟฟ้ารวมทั้งสิ้น 300 วัตต์ เมื่อเปิดพัดลมพร้อมกันทั้ง 6 ตัว จะทำให้อากาศไหลผ่านภายในโรงตากยางแผ่นด้วยความเร็วประมาณ 0.25-0.5 m/s บริเวณผนังด้านตรงข้ามประตูมุงด้วยตะแกรงลวดแล้วปิดด้วยแผ่นพลาสติกใสเปิดช่องบางส่วนให้อากาศไหลผ่านเข้ามาได้ และเพื่อให้แสงอาทิตย์ในทางทิศตะวันตกส่องผ่านเข้ามาได้

ในช่วงบ่าย ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิอากาศภายนอกเฉลี่ย 32°C อุณหภูมิในโรงตากขณะไม่มียางและไม่ได้เปิดพัดลมระบายอากาศมีค่าประมาณ 45°C

ผลการทดลองตากยางแผ่นดิบในโรงตาก พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดในโรงตากยางแห้งแผ่นดิบที่สร้างขึ้นเพื่อวิจัยมีค่าประมาณ 32°C ซึ่งค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเมื่อบรรจุยางแผ่นดิบในโรงตากเต็มความจุ คือ 1300 แผ่น ภายในโรงตากยางค่อนข้างมีความชื้นสูงและมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอกโรงตากยาง แต่เนื่องจาก มีการระบายอากาศขึ้นออกจากโรงตากยางโดยธรรมชาติทางหลังคาโรงตากยาง และใช้พัดลมดูดอากาศที่ติดตั้งบริเวณประตูด้านหน้า รวมถึงมีผนังโรงตากยางที่บุฉนวนป้องกันความร้อนสูญเสีย ช่วยส่งผลให้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในโรงตากมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 30-49% ทำให้สามารถลดความชื้นยางแผ่นดิบลงได้ถึง 20% เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้

ยางแผ่นดิบที่ผ่านการตากแห้งในโรงตาก เมื่อนำไปรมควัน พบว่า ประหยัดการใช้ไม้ฟืนลงได้ 0.3-0.4 กิโลกรัม ไม้ฟืนต่อกิโลกรัมยางแผ่นรมควัน หรือใช้ไม้ฟืนลดลง 31-39% คิดเป็นต้นทุนที่ลดลง 24 - 32 สตางค์/แผ่น หรือประหยัดได้ 312-416 บาท ต่อการรมควันยางแผ่น 1 ห้องรม จะใช้เวลาต้นทุนสำหรับโรงตากยางแผ่นประมาณ 2 ปี 8 เดือน ถึง 3 ปี 8 เดือน โดยปกติการรมควันยางแผ่นของสหกรณ์ที่ร่วมโครงการจะใช้เวลาประมาณ 4 วันต่อครั้ง เนื่องจากไม่มีการตากแห้งยางแผ่นดิบเพื่อลดความชื้น เมื่อมีการใช้โรงตากยางแผ่นดิบเพื่อลดความชื้น ระยะเวลาในการรมควันยางแผ่นลดลงเหลือ 2.5-3 วัน คุณภาพยางแผ่นรมควันที่ได้อยู่ในระดับชั้นคุณภาพ 1-3 ไม่มียางที่เกิดราหรือตำหนิจากยางพอง

EXECUTIVE SUMMARY

The main objective of this project is to enhance capability of the village-scale rubber smoking cooperatives using technology to improve fuel consumption efficiency in producing ribbed smoked sheet (RSS) rubber. This in turn will reduce the production cost. In rubber smoking process, fuel wood, usually fresh rubberwood, is used as a heat source. In general, fuel consumption rate for cooperatives ranges from 1.2 to 1.5 kg per kg of RSS. The steady increase of the fuel wood price directly affects the RSS production cost. An alternative in the reduction of fuel wood consumption is by proper moisture removal from the rubber sheets prior to the smoking process. Solar energy is one of the renewable energy source that has been widely used in drying of various agricultural products and it is possible to use for rubber sheet pre-drying because there is no energy cost to worry. However, variation of solar intensity is a constraint that causes difficulty in control of product drying. Nonetheless it is worth considering if appropriate method and device are implemented.

In this project, solar energy has been used to reduce moisture from the raw rubber sheets before they are dried in a smoking process. Optimal conditions in this pre-drying are studied. A prototype solar pre-dryer that its capacity can contain rubber sheets equal to one smoking-room is constructed. Experiments are then conducted to investigate the optimal conditions.

Initially, drying characteristics of raw rubber sheets simulating solar pre-drying conditions are investigated in a laboratory dryer. Parameters studied include air temperature, velocity, drying time, relative humidity, and spacing between rubber sheets. The relative humidity in this experiment is divided to low and high levels, in which water is sprayed into the system under high-level RH and no water is sprayed otherwise. Result analysis is attained by the Response Surface Method (RSM) that enables the visualization of the change of the response (final moisture content of the rubber sheets and drying time) when the conditions or

independent variables (temperature and velocity) are clearly changed. This method can be used to predict the response to the conditions beyond the experiment.

Results from analysis of response surfaces and contours of independent variables show that drying time to reduce the moisture content to 15% can be achieved by increasing air velocity under low temperature of 33-35°C no matter how high the relative humidity is. In designing a pre-dryer using solar energy, it is preferred to minimize use of other energy sources to obtain proper ventilation of moisture. In the mean time, introduction of moisture from outside to the dryer should be avoid as this can retard the drying rate of the rubber sheets. Results from drying at high temperature (42-47°C) show that ventilation rate of 800-900 m³/hr is sufficient to dry the rubber sheets to 15% MC using approximately the same time as low temperature drying with ventilation rate of 1,200-1,500 m³/hr. Increase of the spacing between the rubber sheets results in higher drying rate and shorter drying time. In practice, the spacing also depends on the number of rubber sheets available in each production.

The designed pre-dryer has a gable-shaped roof with the dimension of W x L x H = 3 m x 7.2 m x 3.4 m. When fully loaded with three carts, there is a space of 0.5 m from the side walls. Inside surface of the doors, side walls and concrete floor are painted black. The roof is made of clear curled tiles. It is tilted 20 degree to each side. Three natural-flow turbine ventilators (24-inch-diameter) are installed on top of the roof. The doors and side walls are made of zinc plates sandwiching the Styrofoam used as insulator. Six electrical suction fans (7-inch-diameter, 220 VAC, total of 300 W) are installed on both doors. When all fans are turned on, it can pull the air to the dryer with velocity from 0.25-0.5 m/sec. The wall opposite to the doors is made of rough steel mesh lined with a clear plastic sheet so that solar radiation can penetrate to the dryer from the West direction. Several holes are made on the plastic sheet to allow air from outside to flow into the dryer. When the ambient temperature is 32°C, the dryer is empty and the fans are turned off, maximum temperature achievable in the dryer reaches 45°C.

Results from drying the rubber sheets in the pre-dryer constructed show that average maximum temperature achievable is 32°C which is quite low. This is because when the pre-dryer is fully loaded with 1,300 sheets of the raw rubber, the air inside is extremely moist and the temperature is lower than the ambient temperature. Ventilation of the moisture by the turbine ventilators and suction fans as well as insulation to reduce heat loss helps reducing the relative humidity in the pre-dryer to about 30-49%. The moisture content of the rubber sheets is reduced by about 20% as planned.

Pre-drying the rubber sheets results in energy saving of 0.3-0.4 kg of fuel wood per kg of RSS, or 31-39%. This is equivalent to 0.24-0.32 Bahts per sheet of RSS or 312-416 Bahts for the entire smoking room of RSS. Payback period for a single cooperative is 2 years 8 months to 3 years 8 months. In general, the cooperative takes 4 days for each batch of RSS smoking under no pre-drying process condition. When pre-drying is applied, the smoking time is reduced to 2.5-3 days. Quality of the produced RSS falls in grades 1-3, and no mould and air bubbles are developed on the rubber sheets.

สารบัญ

	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	i
EXECUTIVE SUMMARY	iv
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 การดำเนินการวิจัย	3
1.5 สิ่งคาดว่าจะได้	4
บทที่ 2 สำรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน	5
2.2 การผลิตยางแผ่นคุณภาพดีและมาตรฐานยางแผ่นดิบ	6
2.3 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการลดความชื้นยางแผ่นดิบ	9
2.4 กลไกการแห้งทางทฤษฎี	10
2.5 สำรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการตากแห้ง	13
2.6 โครงสร้างของยางและผลต่อการแห้ง	17
2.7 การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)	18
บทที่ 3 การทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการและผลการทดลอง	22
3.1 การออกแบบตู้ทดสอบสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบ	22
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ	24
3.3 การสร้างตู้อบแห้งยางแผ่นดิบพร้อมตู้ควบคุมการทำงาน	26
3.4 การทดสอบการทำงานตู้อบยางแผ่นดิบเบื้องต้นและปรับปรุงการทำงานของตู้อบ	31
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบ	39
3.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)	44
3.7 ผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบ	47
บทที่ 4 การทดลองตากยางแผ่นดิบในโรงตากยาง	66
4.1 ลักษณะโรงตากยางแผ่นดิบเดิมของสหกรณ์ที่เข้าร่วมโครงการ	67
4.2 ลักษณะโรงตากยางแผ่นดิบที่สร้างขึ้นเพื่อวิจัย	68

สารบัญ

	หน้า
4.3 การทำงานของสหกรณ์สวนยางพาราที่เข้าร่วมโครงการ	72
4.4 ผลการทดลองตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตาก	73
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	96
5.1 สรุปผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการ	94
5.2 สรุปผลการทดลองตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตากที่สร้างขึ้นเพื่อวิจัย	95
5.3 ข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก	101
ผ.1 แบบโครงสร้างโรงตากยางแผ่นดิบ	100
ผ.2 ค่าความร้อนของไม้ยางพารา	107

รายการรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โรงตากยางของสหกรณ์สวนยางในปัจจุบัน	2
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควันของสหกรณ์	5
รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการแห้งของผลิตภัณฑ์	12
รูปที่ 2.3 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ	15
รูปที่ 2.4 โซโพลีเมอร์ของยางธรรมชาติ	17
รูปที่ 3.1 ตู้ทดสอบสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบ	23
รูปที่ 3.2 ตู้ทดสอบสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบที่ได้ออกแบบขึ้น	23
รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการไหลของอากาศเข้าตู้อบยางแผ่น	24
รูปที่ 3.4 ตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ (ด้านประตูตู้)	26
รูปที่ 3.5 ตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ (ด้านตู้ควบคุม)	27
รูปที่ 3.6 ฮีทเตอร์ครีบบนสเปร์ยเหลี่ยมขนาดชุดละ 600 W	27
รูปที่ 3.7 ราวแขวนยางแผ่นดิบในตู้อบที่สามารถปรับระยะห่างของยางแผ่นได้	28
รูปที่ 3.8 พัดลมระบายอากาศบริเวณปล่องด้านบน (ภาพจากภายในตู้)	28
รูปที่ 3.9 ตู้ควบคุมการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ	29
รูปที่ 3.10 Wiring Diagram ควบคุมการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ	30
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ	31
รูปที่ 3.12 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในตู้อบตามรูปที่ 11 เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเป็น 32 35 40 และ 45°C	32
รูปที่ 3.13 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 45°C และไม่สเปรย์น้ำ	32
รูปที่ 3.14 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 45°C และสเปรย์น้ำ	33
รูปที่ 3.15 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40°C และไม่สเปรย์น้ำ	33
รูปที่ 3.16 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40°C และสเปรย์น้ำ	34
รูปที่ 3.17 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 35°C และไม่สเปรย์น้ำ	34
รูปที่ 3.18 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 35°C และสเปรย์น้ำ	35
รูปที่ 3.19 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบที่ตรวจวัดเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิในตู้อบไว้ที่ 45°C ในกรณีที่ไม่มีสเปรย์น้ำและในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำ	36
รูปที่ 3.20 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ของ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ระหว่างปี พ.ศ.2539-2546	37

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.21 อุณหภูมิเฉลี่ย ของ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ระหว่างปี พ.ศ.2539-2546	38
รูปที่ 3.22 อุณหภูมิเฉลี่ย ของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ.2494-2546	39
รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการดำเนินงานสำหรับการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบ	40
รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการแขวนยางแห้งแผ่นดิบบนราวตากในตู้ทดสอบ	42
รูปที่ 3.25 ค่าปรับตั้งบนตู้ควบคุมอบแห้งยางแผ่นดิบ	43
รูปที่ 3.26 ลักษณะ 2 factors central-composite design	46
รูปที่ 3.27 แสดงผลการใช้สมการที่ 3.5 ทำนายค่า $1/resp_1$ เทียบกับค่าจริง	50
รูปที่ 3.28 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของ $1/resp_1$ หรือ $1/MC$ ต่อตัวแปรอิสระ T (coded) และ v (coded)	51
รูปที่ 3.29 กราฟแสดง contour ของ $1/MC$ ต่อตัวแปรอิสระ T (coded) และ v (coded)	51
รูปที่ 3.30 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของความชื้นในยางแผ่นดิบหลังอบ (MC) ต่อเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ $T(^{\circ}C)$ และความเร็วลม v (m/s)	52
รูปที่ 3.31 กราฟแสดง contour ของความชื้นในยางแผ่นดิบหลังอบ (MC) ต่อเงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิ $T(^{\circ}C)$ และความเร็วลม v (m/s)	52
รูปที่ 3.32 แสดงผลการใช้สมการที่ 3.6 ทำนายค่า $resp_1$ เทียบกับค่าจริง	58
รูปที่ 3.33 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของ $resp_1$ หรือ t (h) ต่อตัวแปรอิสระ T (coded) และ v (coded)	58
รูปที่ 3.34 กราฟแสดง contour ของ t (h) ต่อตัวแปรอิสระ T (coded) และ v (coded)	59
รูปที่ 3.35 กราฟแสดงพื้นผิวตอบสนองของเวลา t (h) ที่ใช้ในการลดความชื้นยางแผ่นดิบจาก 0.350 kgkg^{-1} ไปเป็น 0.150 kgkg^{-1} ต่อตัวแปรอิสระ $T (^{\circ}C)$ และ v (m/s)	60
รูปที่ 3.36 กราฟแสดง contour ของ t (h) ต่อตัวแปรอิสระ $T (^{\circ}C)$ และ v (m/s)	60
รูปที่ 3.37 การผึ่งยางในร่มโดยแขวนกับราวไม้ไผ่บนกระเบยโครงเหล็กภายในโรงเรือนรีดยางแผ่นของสหกรณ์สวนยางพารา	61
รูปที่ 3.38 กราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแผ่นดิบ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 55-60% ความเร็วลม 0.234 m/s (ไม่สเปร์ยน้)	62
รูปที่ 3.39 กราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแผ่นดิบ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ $40^{\circ}C$ ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 65-75% ความเร็วลม 0.234 m/s (สเปร์ยน้)	62

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.40 เปรียบเทียบผลการอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 เซลเซียส ความเร็วลม 0.234 m/s (ระหว่างสเปรย์น้ำกับไม่สเปรย์)	63
รูปที่ 3.41 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นในยางแผ่น ที่อบแห้งอุณหภูมิ 40°C แต่ระยะห่างระหว่างแผ่นต่างกัน (ไม่มีการสเปรย์น้ำ)	64
รูปที่ 3.42 กราฟแสดงสัดส่วนความชื้นที่เหลือในยางแผ่นทดลองอบที่อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลม 0.19 m/s ที่ระยะห่างระหว่างแผ่น 7.5 cm (ไม่มีการสเปรย์น้ำ)	64
รูปที่ 3.43 กราฟ drying rate ของยางแผ่นทดลองอบที่อุณหภูมิ 40°C ความเร็วลม 0.19 m/s ที่ระยะห่างระหว่างแผ่น 7.5 cm (ไม่มีการสเปรย์น้ำ)	65
รูปที่ 4.1 บริเวณโดยรอบและลักษณะของโรงตากยางเดิม	67
รูปที่ 4.2 แสดงผังบริเวณของสหกรณ์สวนยางพาราทุ่งโพธิ์ อ.นาหม่อม จ.สงขลา	67
รูปที่ 4.3 ภาพสเก็ตโครงสร้างโรงตากยางแผ่นดิบที่ออกแบบ	69
รูปที่ 4.4 ภาพด้านหน้า ภายใน ด้านหลัง และขณะตากยางของโรงตากยางแผ่นดิบ	70
รูปที่ 4.5 โรงตากยางและลักษณะยางแผ่นดิบขณะแขวนบนราวตากในโรงตากยาง	71
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง PM-H-D1-01	73
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง PM-H-D1-01	74
รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง PM-H-D1-01	74
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง PM-H-D1-01	75
รูปที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง PM-H-D2-02	76
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง PM-H-D2-02	76
รูปที่ 4.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง PM-H-D2-02	77
รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง PM-H-D2-02	77

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง PM-H-D2-03	78
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง PM-H-D2-03	78
รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง PM-H-D2-03	79
รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง PM-H-D2-03	79
รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง AM-F-D1-04	80
รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง AM-F-D1-04	80
รูปที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง AM-F-D1-04	81
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง AM-F-D1-04	81
รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง AM-F-D1-05	82
รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง AM-F-D1-05	82
รูปที่ 4.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง AM-F-D1-05	83
รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง AM-F-D1-05	83
รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง AM-F-D1-06	84
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง AM-F-D1-06	84
รูปที่ 4.28 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง AM-F-D1-06	85

รายการรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง AM-F-D1-06	85
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง AM-F-D1-07	86
รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง AM-F-D1-07	86
รูปที่ 4.32 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง AM-F-D1-07	87
รูปที่ 4.33 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง AM-F-D1-07	87
รูปที่ 4.34 การเปลี่ยนแปลงความชื้นยางแผ่นดิบในโรงตากของการทดลอง AM-F-D1-08	88
รูปที่ 4.35 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มแสงอาทิตย์ของการทดลอง AM-F-D1-08	88
รูปที่ 4.36 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามเวลา ของการทดลอง AM-F-D1-08	89
รูปที่ 4.37 การเปลี่ยนแปลงอัตราการแห้งของยางแผ่นดิบตามสัดส่วนความชื้นของยางแผ่นดิบของการทดลอง AM-F-D1-08	89
รูปที่ 4.38 ลักษณะการเกิดราขึ้นบนแผ่นยางหลังจากการตาก	91

รายการตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	รายการสำหรับการจำแนกยางแผ่นดิบคุณภาพต่างๆ	7
ตารางที่ 2.2	ตารางคุณสมบัติของยางแผ่นรมควันชั้น 1-3	8
ตารางที่ 3.1	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ	38
ตารางที่ 3.2	แบบการทดลอง central-composite design ที่มี 2 factors	46
ตารางที่ 3.3	ค่าของตัวแปร T และ v ที่อ่านจาก Code	47
ตารางที่ 3.4	แสดงผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบโดยไม่สเปรย์น้ำ	48
ตารางที่ 3.5	แสดงค่า R ² และค่าทางสถิติจากการทำ regression (ไม่สเปรย์น้ำ)	49
ตารางที่ 3.6	ผลการวิเคราะห์ variance (ไม่สเปรย์น้ำ)	49
ตารางที่ 3.7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (3.5)	49
ตารางที่ 3.8	ผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบโดยสเปรย์น้ำ	54
ตารางที่ 3.9	ผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบโดยสเปรย์น้ำ พิจารณาช่วงความชื้นยางแผ่นดิบบลดลงจาก 0.350 ไปเป็น 0.150 kgkg ⁻¹	55
ตารางที่ 3.10	แสดงค่า R ² และค่าทางสถิติจากการทำ regression (สเปรย์น้ำ)	56
ตารางที่ 3.11	ผลการวิเคราะห์ variance (สเปรย์น้ำ)	56
ตารางที่ 3.12	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ (3.6)	57
ตารางที่ 4.1	ขนาดและวัสดุที่ใช้สร้างโรงตากยางแผ่นดิบเพื่อวิจัย	69
ตารางที่ 4.2	สรุปผลการทดลองตากแห้งยางแผ่นดิบและปริมาณการใช้ไม้ฟืนในการรมควันยางแผ่นที่ผ่านการตากแห้งในโรงตาก	90

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

อุตสาหกรรมยางธรรมชาตินับเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำที่สำคัญอันหนึ่งของประเทศ ซึ่งกระบวนการผลิตยางธรรมชาติสามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือการผลิตยางแผ่นรมควันซึ่งประเทศไทยสามารถผลิตได้อยู่ในระดับแนวหน้าของโลก โดยสามารถผลิตได้ประมาณ 1.0 ล้านตันต่อปี และยางแผ่นรมควันยังเป็นยางที่สามารถส่งออกได้มากถึง 886,600 ตันต่อปี เพราะเป็นที่ต้องการของผู้ผลิตยางล้อรถ ฐานการผลิตยางแผ่นรมควันของประเทศอยู่ที่สหกรณ์สวนยางซึ่งมีทั้งสิ้นทั่วประเทศกว่า 700 โรง จัดตั้งขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2537 - 2538 ตามโครงการจัดตั้งสหกรณ์ในกลุ่มผู้ผลิตยางพาราและโครงการพัฒนาการผลิตยางแผ่นผึ่งรมควัน โดยกรมส่งเสริมสหกรณ์ การดำเนินงานจะรับน้ำยางดิบจากสมาชิกแล้วแปรรูปเป็นยางแผ่น โรงรมยางของสหกรณ์เหล่านี้ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้จะใช้พื้นที่ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง โรงรมของสหกรณ์สวนยางถูกออกแบบให้สามารถผลิตได้ทั้งยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet หรือ RSS) และยางแผ่นผึ่งแห้ง (air dried sheet หรือ ADS) แต่ไม่สามารถผลิตพร้อมกันได้ทั้ง 2 อย่างในเวลาเดียวกัน โดยส่วนใหญ่แล้วสหกรณ์จะผลิตยางแผ่นรมควันแทบทั้งสิ้น

ขั้นตอนการผลิตยางแผ่นรมควันในปัจจุบันคือ หลังจากได้ยางแผ่นดิบที่ผ่านกระบวนการรีดมาแล้ว จะนำยางแผ่นดิบไปผึ่งไว้บนราวไม้ไผ่ภายในโรงงานเพียงเพื่อให้ยางสะเด็ดน้ำออกประมาณ 2-3 ชั่วโมงหรือ 1 คืน หลังจากนั้นยางสะเด็ดน้ำแล้วจะนำไปเข้าโรงรมเพื่อผลิตเป็นยางแผ่นรมควัน โดยใช้ความร้อนจากการเผาไม้ฟืนไปกระจายในห้องรม ให้แก่สัร่อนไหลไปสัมผัสและคายความร้อนให้แก่ยางแผ่นที่แขวนบนราวไม้ไผ่ ในการรมควันยางแผ่นโดยทั่วไปนั้น ใช้เวลาประมาณ 72-96 ชั่วโมงต่อครั้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการรมมีค่าอยู่ระหว่าง 49-63°C โดยในวันแรกจะรมที่อุณหภูมิประมาณ 49-52°C และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าเร่งอุณหภูมิในวันแรกสูงเกินไปก็จะเกิดยางฟองขึ้น เช่นเดียวกันในวันต่อมาหากใช้อุณหภูมิสูงกว่าที่กำหนดก็จะเกิดยางฟองได้ ในทางปฏิบัติเมื่ออุณหภูมิในห้องรมให้ได้อุณหภูมิประมาณ 49°C แล้วนำยางแผ่นดิบที่ผ่านการรีดน้ำและตากแห้งประมาณ 2-3 ชั่วโมงเข้าห้องรมจะทำให้อุณหภูมิในห้องรมลดต่ำลงเกือบ 10°C และใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิจนเข้าสู่ภาวะเกือบคงที่ประมาณ 15 ชั่วโมง ทำให้มีการใช้พลังงานความร้อนในช่วงนี้สูงมาก

นอกจากการผึ่งยางในโรงรมแล้ว บางสหกรณ์ได้จัดสร้างโรงตากยางมีลักษณะเป็นอาคารโปร่งหลังคาใสหรือกิ่งไผ่ดังแสดงในรูปที่ 1.1 การตากยางในโรงตากยางนี้ไม่มีการควบคุมตัวแปรใด ๆ ส่งผลให้ไม่สามารถใช้โรง

ตากยางได้เต็มที่ จากการสังเกตพบว่าสหกรณ์ใช้โรงตากยางสำหรับตากยางเพื่อขายเป็นยางแผ่นดิบ ไม่ได้นำไปรมควันต่อทำให้ขายได้ราคาต่ำกว่ายางแผ่นรมควันประมาณ 3-4 บาทต่อกิโลกรัม สาเหตุหนึ่งก็คือยางที่ตากจะมีราคาตามผิวยากต่อการล้างทำความสะอาด



รูปที่ 1.1 โรงตากยางของสหกรณ์สวนยางในปัจจุบัน

จากการศึกษาอัตราการใช้ไม้พินในโรงรมสหกรณ์ สกย.รุ่นปี 2537 ในปัจจุบันมีการใช้ไม้พินอยู่ที่ 1,000 - 2,000 กิโลกรัม ต่อยางแห้ง 1 ตัน ซึ่งเป็นอัตราที่สูงมาก สาเหตุเนื่องจาก ยางแผ่นดิบที่ผ่านการรีดจากสหกรณ์นั้นเป็นยางแผ่นที่มีความชื้นสูงอยู่ที่ประมาณ 60% การลดความชื้นของยางในช่วงนี้ทำได้โดยการผึ่งยางให้สะเด็ดน้ำออกดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ก็ยังไม่สามารถลดความชื้นของยางได้มากนัก ยางยังคงมีความชื้นเหลืออยู่ที่ประมาณ 40% สาเหตุหนึ่งสืบเนื่องมาจากลักษณะการตากยางของสหกรณ์สวนยางนั้นยังไม่ได้เท่าที่ควร กล่าวคือเป็นวิธีการตากยางเพียงเพื่อให้ยางสะเด็ดน้ำออกโดยไม่มีการควบคุมปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแห้งของยาง ดังที่กล่าวมาแล้วซึ่งส่งผลต่อคุณภาพ เช่น การเกิดราบนแผ่นยางและอัตราการแห้งของยาง ด้วยสาเหตุดังที่กล่าวมาข้างต้นทำให้การตากยางของเกษตรกรชาวสวนยางในปัจจุบัน ไม่สามารถช่วยลดปริมาณความชื้นของยางก่อนนำเข้าโรงรมได้มากนัก ยังส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณไม้พินที่ค่อนข้างสูงในการทำยางแผ่นรมควัน ดังนั้นการศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัวเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตากยางในโรงตากยางพลังงานแสงอาทิตย์ มีความจำเป็นในการช่วยลดปริมาณการใช้ไม้พินในการรมควันได้ อีกทั้งยังสามารถกำจัดหรือลดปริมาณยางแผ่นที่เกิดเชื้อราในขณะตากได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัวของยางแผ่นดิบในช่วงอุณหภูมิสำหรับการตากแห้ง โดยทดลองอบแห้งในตู้อบ

1.2.2 เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการตากแห้งยางแผ่นดิบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในโรงตากยางของสหกรณ์สวนยาง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 สร้างตู้อบแห้งที่ควบคุมอุณหภูมิและความเร็วลมของบรรยากาศภายในได้ มีลักษณะเป็นห้องลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.2 เมตร และ สูง 1.2 เมตร

1.3.2 ทำการทดลองโดยใช้ยางแผ่นดิบที่ผลิตได้จากสหกรณ์ยาง สำหรับการทดลองของงานวิจัยนี้

1.3.3 ในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะปัจจัยภายนอกที่มีอิทธิพลต่อการแห้งของยางทั้งหมด 5 ตัวแปร คือ

- ก. อุณหภูมิ
- ข. ความชื้นสัมพัทธ์
- ค. ความเร็วของอากาศ
- ง. ระยะห่างระหว่างแผ่นยาง
- จ. ระยะเวลาการตาก

ตัวแปร 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์นั้น จะกำหนดจากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงทั้งภายนอกและภายในโรงตากยางที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.3.4 ตัวแปรที่พิจารณาคืออัตราการแห้ง ค่าความชื้นสุดท้ายของแผ่นยางและปริมาณยางที่เกิดรา

1.3.5 ใช้วิธี Central-Composite Design ในการออกแบบวิธีการทดลองและจำนวนการทดลองตากยางแผ่น

1.3.6 สร้างโรงตากยางจริงของสหกรณ์ขนาดความจุเท่ากับ 1 ห้องรมควันยางแผ่น

1.3.7 ทดลองการตากยางจริงในโรงตากยางที่สหกรณ์สวนยางพาราที่เข้าร่วมโครงการ

1.4 การดำเนินการวิจัย

ประเด็นวิจัยในโครงการนี้คือ การหาคุณลักษณะการแห้งตัวของยางแผ่นดิบของสหกรณ์สวนยาง ซึ่งผ่านการรีดด้วยจักรรีดแล้ว ที่สภาวะต่าง ๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงหรือออกแบบโรงตากยางพลังงานแสงอาทิตย์ แนวทางการดำเนินการวิจัยประกอบไปด้วย

1.4.1 ออกแบบและสร้างห้องทดสอบการอบยางแผ่น โดยใช้ฮีทเตอร์เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งสามารถปรับความชื้นสัมพัทธ์จากการสเปรย์น้ำ ปรับอุณหภูมิ ปรับความเร็วของอากาศอบแห้ง และระยะห่างระหว่างแผ่นยางให้เท่ากับหรือมากกว่าที่ปฏิบัติในโรงรมยางของสหกรณ์สวนยางพาราได้

1.4.2 ศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัวของยางแผ่นดิบ ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิ ความเร็วลม ที่เสนอไขความชื้นสัมพัทธ์สูงและต่ำ โดยกรณีความชื้นสัมพัทธ์สูงทำได้โดยการสเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ (มากกว่า 60%) กรณีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ (น้อยกว่า 60%) ไม่สเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ ทั้งนี้เพื่อจำลองสภาพอากาศในวันที่มีความชื้นแสงอาทิตย์มากและวันที่มีความชื้นน้อย

1.4.3 สร้างโรงตากยางแผ่นดิบขนาดความจุเท่ากับปริมาณยาง 1 ห้องรม โดยใช้ผลจากการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องทดสอบมาออกแบบ โดยให้มีอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสม และปรับการทำงานของโรงตากยางให้เข้ากับสภาพการทำงานจริงของสหกรณ์สวนยาง

1.4.4 ทดสอบการตากแห้งในโรงตากยางตามสภาพอากาศจริงในแต่ละวัน ตรวจสอบคุณภาพของยางแผ่นดิบ เช่น ความชื้นในยางแผ่นหลังการตากและการเกิดรา

1.4.5 สรุปผลการทดสอบและสรุปแนวทางการทำงานกับโรงตากยางจริง และเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ในโรงรมยางสำหรับยางแผ่นดิบที่ผ่านการตากในโรงตากและไม่ผ่านการตาก

1.5 สิ่งที่ได้คาดว่าจะได้

1.5.1 ได้คุณลักษณะการแห้งตัวของยางแผ่นดิบ ที่อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่าง ๆ

1.5.2 ได้วิธีการตากยางที่เหมาะสมกับสหกรณ์สวนยาง

1.5.3 ได้ต้นแบบโรงตากยางที่เหมาะสมกับการใช้งานในสหกรณ์สวนยาง

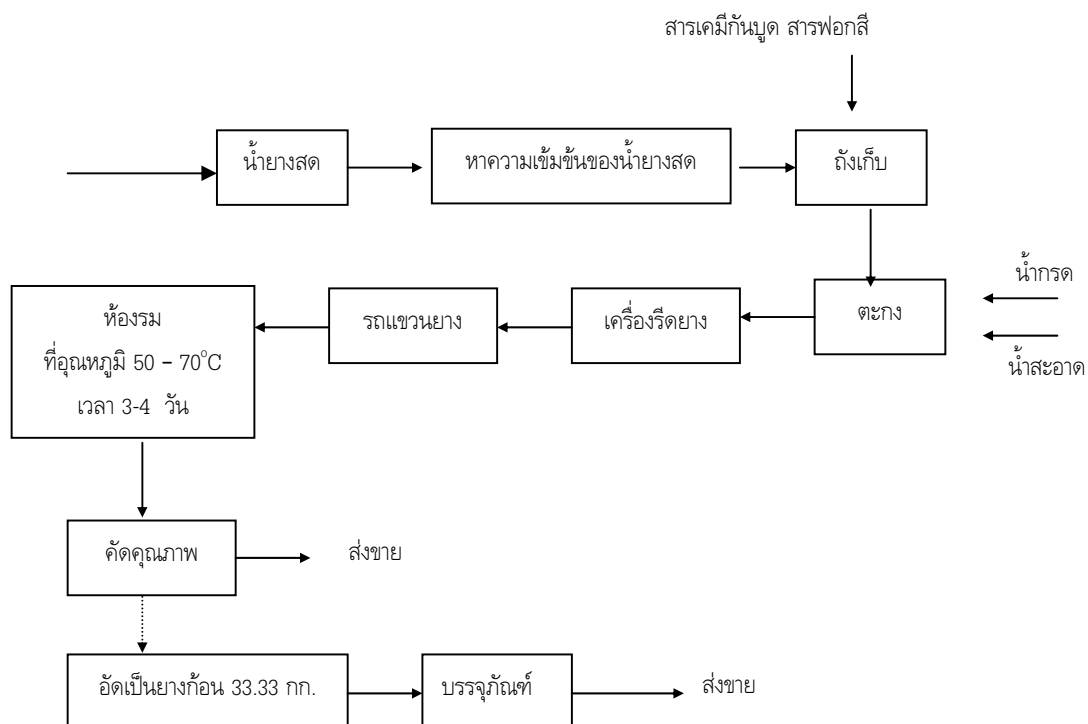
1.5.4 สามารถลดปริมาณการใช้ไม้ฟืนในการรมยางลงอย่างน้อย 30%

บทที่ 2

สำรวจเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควัน

การผลิตยางแผ่นรมควันเริ่มจากน้ำยางสด ชาวสวนที่เป็นสมาชิกจะจัดส่งมาถึงโรงรมทุกเช้า ราคาซื้อขายน้ำยางสดผันแปรตามราคาตลาดและความเข้มข้นของน้ำยางหรือเปอร์เซ็นต์ของเนื้อยาง (ปกติประมาณ 30%) ในการรับซื้อน้ำยางสดต้องมีการตรวจวัดค่าความเข้มข้นน้ำยางทุกครั้ง โดยใช้เมโทรแลคซึ่งวัดจากแรงลอยตัว หรือการอบแห้ง น้ำยางที่รับซื้อนำมารวมในถัง จากนั้นนำมาผสมกับน้ำและน้ำกรดในตะกอน คนจนผสมเข้ากันดี กวาดฟองที่ผิวน้ำยางออก แล้วใส่แผ่นเสียบในร่องเพื่อแยกน้ำยางให้เป็นแผ่นหนา 1 นิ้ว ปล่อยให้ยางแข็งตัวประมาณ 2-4 ชั่วโมง หลังจากยางแข็งตัวดีแล้วลำเลียงเข้าเครื่องรีด เพื่อรีดเป็นแผ่นบางซึ่งหนาประมาณ 3 มม. ลูกรีด 2 ชุดสุดท้ายทำหน้าที่รีดชั้นลายที่ผิวเพื่อเพิ่มพื้นที่การระเหยน้ำ



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควันของสหกรณ์

ยางแผ่นดิบที่รีดแล้วถูกนำขึ้นแขวนบนรถแขวนยางและผึ่งให้สะเด็ดน้ำประมาณ 2-6 ชม. ก่อนนำเข้าห้องรม การรมควันให้ความร้อนและควันแก่ยางแผ่นที่อุณหภูมิ 50 - 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาประมาณ 3- 4 วันยางจึงจะแห้ง ยางแผ่นรมควันที่ได้ถูกนำมาคัดคุณภาพ ตัดเศษสกปรก ส่วนที่เป็นฟองอากาศ และส่วนที่ไม่สุก แล้วส่งไปขายที่ตลาดกลางยางพารา หรือส่งโรงงาน โรงรมบางแห่งอัดเป็นก้อนขนาด 33.33 กก. บรรจุในถุงพลาสติก ก่อนส่งขาย กระบวนการผลิตยางแผ่นรมควันแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.1

2.2 การผลิตยางแผ่นคุณภาพดีและมาตรฐานยางแผ่นดิบ

การผลิตยางแผ่นคุณภาพดี ได้คุณภาพตามความต้องการของตลาดจะ ให้ขายได้ในราคาที่สูงขึ้น และสามารถนำไปขายในระบบตลาดกลางยางพาราได้ แก้ไขปัญหาการเสียเปรียบทางการตลาดให้กับเกษตรกรชาวสวนยางสร้างมูลค่าเพิ่มในการขายยางและในส่วนของผู้ประกอบการหรือพ่อค้ายางสามารถเลือกซื้อยางได้คุณภาพตรงตามความต้องการและซื้อได้ในปริมาณมากในคราวเดียวกัน สามารถลดต้นทุนในการผลิตยางแผ่นรมควัน

2.2.1 ลักษณะสำคัญของยางแผ่นคุณภาพดี

- 1) แผ่นยางสะอาดไม่มีรอยคราบน้ำกรดหรือรอยเหนียวเยิ้ม เมื่อยกแผ่นยางขึ้นส่องดูต้องไม่มีจุดฟองอากาศและสิ่งสกปรกหรือจุดต่างดำเจือปนในแผ่นยาง
- 2) แผ่นยางมีเนื้อยางแห้งตลอดแผ่น ยางแผ่นดิบมีความชื้นไม่เกิน 3% ยางแผ่นรมควันต้องแห้ง 100% มีสีสวยสม่ำเสมอเป็นสีเดียวกันตลอดแผ่น ไม่ต่างดำหรือสลับลายหรือคล้ำดำ
- 3) แผ่นยางมีลายดอกนูนเด่นชัด มีความยืดหยุ่น เมื่อดึงแผ่นยางเนื้อยางจะต้องไม่ขาดง่าย หรือเป็นรูพรุน
- 4) แผ่นยางไม่หนาหรือบางมากเกินไป ความหนาของแผ่นยางเฉลี่ย 2.8-3.2 มิลลิเมตร น้ำหนักเฉลี่ยต่อแผ่น 800-1,200 กรัม
- 5) รูปทรงแผ่นยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้ขนาดมาตรฐานแผ่นยางไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไปเฉลี่ยขนาดความกว้าง 38-46 เซนติเมตร ความยาว 80-90 เซนติเมตร

2.2.2 ลักษณะยางแผ่นดิบที่คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานไม่รับเข้าตลาดกลาง

- 1) มีสิ่งสกปรกและฟองอากาศในแผ่นยางมาก
- 2) เสียความยืดหยุ่น เนื้อยางเปื่อย ขาดง่ายหรือเป็นรูพรุน

- 3) เนื้อยางแห้งไม่สม่ำเสมอ มีความชื้นในแผ่นยางมากเกินไป 3%
- 4) แผ่นยางมีความหนาหรือบางมากเกินไป
- 5) แผ่นยางเหนียวเยิ้ม มีกลิ่นเหม็น มีสีต่างดำหรือสีสลับลาย
- 6) มีราสนิมเหล็ก ราดำ หรือเชื้อราอย่างอื่น ปนเปื้อนในแผ่นยางมากหรือจับหนาแน่นเห็นได้ชัด
- 7) รูปแผ่นไม่ได้ขนาดมาตรฐาน แผ่นยางเล็กหรือใหญ่มากเกินไป หรือเป็นเศษเสี้ยวของแผ่นยาง

2.2.3 มาตรฐานยางแผ่นดิบและยางแผ่นรมควันคุณภาพต่าง ๆ

ยางแผ่นดิบทั้งสามสามารถจำแนกคุณภาพได้ตามตารางที่ 2.1 และเมื่อผ่านการรมควันสามารถจำแนกคุณภาพตามสมบัติทางกายภาพได้ตามตารางที่ 2.2 (ที่มา จากฐานความรู้ด้านพืช กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์)

ตารางที่ 2.1 รายการสำหรับการจำแนกยางแผ่นดิบคุณภาพต่างๆ

รายการ	คุณภาพ			
	1	2	3	4
1. ความสะอาดแผ่น	100%	100%	100%	100%
สิ่งสกปรกในแผ่น	0%	เล็กน้อย	เล็กน้อย	มีบ้าง
ฟองอากาศในแผ่น	0%	เล็กน้อย	เล็กน้อย	มีบ้าง
2. ขนาดความหนาของแผ่น	3	4	4	4
ไม่เกิน(มิลลิเมตร)				
3. ความชื้นในแผ่นยางไม่	1.5	2	3	4.5
เกิน(เปอร์เซ็นต์)				
4. สีของเนื้อยาง	ใส	สม่ำเสมอ	ไม่ใสนัก	ไม่ใส
ความคล้ำ	0	อาจมีบ้าง	คล้ำ	คล้ำ
รอยต่างดำ	0	อาจมีบ้าง	ค่อนข้างทึบ	ทึบ
5. แผ่นยืดหยุ่น	ดี	ดี	ดี	ดี
ลายดอกแผ่นที่ปรากฏ	ชัด	ชัด	ชัด	ชัด
6. น้ำหนักแผ่น (กรัม)	800-1,200	100-1,200	ไม่เกิน 1,500	ไม่เกิน 1,500
7. รูปแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า				
กว้าง (ซ.ม)	38-46	38-46	38-46	38-46
ยาว (ซ.ม)	80-90	80-90	80-90	80-90

ตารางที่ 2.2 ตารางคุณสมบัติของยางแผ่นรมควันชั้น 1-3

สมบัติ	ชั้น 1	ชั้น 2	ชั้น 3
การขึ้นรา	ต้องไม่มีราหรือมีราแห้งเล็กน้อย เฉพาะผิวของแผ่นยางที่ใช้ห่อ	มีราสนิมได้เล็กน้อยหรือมีราแห้ง ที่แผ่นยางที่ใช้ห่อแต่ไม่เกิน 5% ของตัวอย่างที่ตรวจ	มีราสนิมได้เล็กน้อยหรือมีราแห้ง ที่แผ่นยางที่ใช้ห่อแต่ไม่เกิน 10% ของตัวอย่างที่ตรวจ
สมบัติของยางแผ่น	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติดังนี้คือ - แห้ง - เนื้อแข็ง - ไม่มีจุดพอง - ไม่มีกรวดทราย - ไม่มีสิ่งปนเปื้อน - ไม่มีตำหนิใด ๆ - สะอาด - ไม่มีราสนิม	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติดังนี้คือ - แห้ง - เนื้อแข็ง - ไม่มีจุดพอง - ไม่มีกรวดทราย - ไม่มีสิ่งปนเปื้อน - ไม่มีตำหนิใด ๆ - สะอาด	ยางทุกแผ่นจะต้องมีสมบัติ ดังนี้คือ - แห้ง - เนื้อแข็ง - ไม่มีจุดพอง - ไม่มีกรวดทราย - ไม่มีสิ่งปนเปื้อน
ตำหนิที่ยอมรับได้	- มีฟองอากาศขนาดหัวเข็มหมุด กระจายอยู่ทั่วแผ่น - มีจุดดำๆของเปลือกไม้เล็กน้อย	- มีฟองอากาศขนาดเล็ก - มีจุดดำๆของเปลือกไม้เล็กน้อย	- มีฟองอากาศขนาดเล็ก - มีจุดดำๆของเปลือกไม้เล็กน้อย
ตำหนิที่ยอมรับไม่ได้	- ยางเหนียวเยิ้ม - ยางเนื้ออ่อน - ยางแฉ่ไฟ - ยางไหม้ - ยางอ่อนรมควัน - ยางแถมรมควัน - ยางที่บ	- ยางเหนียวเยิ้ม - ยางเนื้ออ่อน - ยางแฉ่ไฟ - ยางไหม้ - ยางอ่อนรมควัน - ยางแถมรมควัน - ยางที่บ	- ยางเหนียวเยิ้ม - ยางเนื้ออ่อน - ยางแฉ่ไฟ - ยางไหม้ - ยางอ่อนรมควัน - ยางแถมรมควัน - ยางที่บ

2.3 การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการลดความชื้นยางแผ่นดิบ

การลดความชื้นของแผ่นยางสามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง 2 วิธีคือ

2.3.1 การอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยอ้อม ซึ่งใช้แผงรับรังสีแสงอาทิตย์

วิธีนี้ได้มีงานวิจัยหลายชิ้น (Breyamer, *et al.*, 1993; Pratoto, *et al.*, 1997; Pratoto, *et al.*, 1998) ในการพยายามที่จะคำนวณหาขนาดแผงรับรังสีที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรหลาย ๆ ค่า สำหรับโรงงานรมควันยางแผ่นของเกษตรกรในประเทศอินโดนีเซีย หลักการทำงานคือใช้แผงรับรังสีแสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนแสงอาทิตย์ซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ให้เป็นพลังงานความร้อน จากนั้นควบคุมให้อากาศไหลผ่านด้วยอัตราการไหลที่เหมาะสมเพื่อรับความร้อนจากแผงรับรังสี อากาศร้อนซึ่งมีอุณหภูมิ 45–60°C จะไหลเข้าสู่ห้องอบเพื่อถ่ายเทความร้อนให้แผ่นยางและทำให้แผ่นยางแห้ง Breyamer, *et al.* (1993) ได้เสนอให้รวมห้องอบและห้องรมควันเข้าด้วยกัน การอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์เป็นเวลา 5 วันจะลดความชื้นในแผ่นยางเหลือเพียง 0.5% สำหรับแผ่นยางจำนวน 320 กิโลกรัม จากนั้นทำการรมควันต่อจะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนจาก 1,000 – 1,500 กิโลกรัมต่อตันยางสุก (จากการรมควันโดยวิธีปกติ) เหลือเพียง 300 กิโลกรัมต่อตันยางเท่านั้น นอกจากนี้ห้องอบสามารถใช้ผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง (ADS) โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเป็นเวลา 6-7 วัน

2.3.2 การตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์

วิธีนี้จะใช้การตากแห้งในโรงตากซึ่งรับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรง โดยลักษณะของโรงตากมีหลังคาใสซึ่งปูด้วยกระเบื้องใสหรือแผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีน (PE) ซึ่งทนรังสีอัลตราไวโอเล็ต แผ่นยางจะรับรังสีแสงอาทิตย์โดยตรงและความชื้นจะถูกพาออกจากแผ่นยางโดยอากาศที่ไหลผ่าน ในปัจจุบันบาง สหกรณ์ได้สร้างโรงตากแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แต่ไม่ได้ใช้อย่างเต็มที่ ทั้งนี้เนื่องจากขาดความสะดวกในการใช้งาน ส่วนใหญ่โรงตากยางที่สร้างจะทำรางชนิดถาวรสำหรับวางราวแขวนยาง ไม่สามารถเข็นรถแขวนยางเข้าไปทั้งคันได้ นอกจากนี้โรงตากยางเหล่านี้ไม่ได้มีการควบคุมทิศทางการไหล หรือความเร็วของอากาศ ซึ่งมีผลต่อการแห้งตัวของแผ่นยางเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นหากมีการออกแบบโรงตากยางให้สามารถควบคุมทิศทางการไหลและความเร็วของอากาศแล้ว จะทำให้สามารถควบคุมการตากยางได้แน่นอนมากขึ้น นอกจากนี้แล้วจะต้องมีการศึกษาตัวแปรที่สำคัญเช่นระยะห่างระหว่างแผ่นยางที่เหมาะสม และระยะเวลาในการตากยาง โดยที่ผลลัพธ์ที่ต้องการคือแผ่นยางดิบมีความชื้นต่ำและไม่เกิดรา และสามารถประหยัดเชื้อเพลิงไม้ฟืนในการรมยาง

สำหรับการตากแห้งยางแผ่นกลางแจ้งให้รับแสงอาทิตย์โดยตรง ตามที่ชาวสวนยางได้ปฏิบัติกันมานั้นพบว่า แผ่นยางจะมีคุณสมบัติทางไดนามิกส์ที่ต่ำลง และยางแผ่นส่วนใหญ่ที่ตากก็แห้งไม่ดี (Pratoto, *et al.*, 1997) George, *et al.* (2002) ได้ศึกษาผลของการตากแห้งยางแผ่นด้วยแสงอาทิตย์โดยตรง พบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ส่งผลให้คุณสมบัติ plasticity, viscosity และ gel content สูงขึ้น แต่ค่า plastic retention index (PRI) จะลดลง รวมถึงคุณสมบัติ ageing จะลดลงเช่นกัน

หากเลือกแนวทางที่ 2.3.1 นั้นจะต้องทำการก่อสร้างใหม่ทั้งหมด มีต้นทุนในการก่อสร้างสูงและแผงรับรังสีมีขนาดใหญ่ตามความจุของห้อง อีกทั้งยังต้องบำรุงรักษาแผงรับรังสีให้สะอาดตลอดเวลา โครงการนี้จะเลือกแนวทางที่ 2.3.2 แต่จะออกแบบให้มีขนาดเล็กกว่าโรงตากยางเดิมของสหกรณ์โดยมีความจุเพียงพอสำหรับยางแผ่นปริมาณเท่ากับ 1 ห้องรมควัน และใช้ผนังภายในโรงตากยางเป็นพื้นที่รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นวิธีที่ประหยัด ง่ายต่อการใช้งานและบำรุงรักษา โดยในขั้นตอนแรกจะทำการศึกษาคูณลักษณะการแห้งตัวของยางแผ่นดิบ ในสภาวะต่าง ๆ ที่กำหนดในตู้อบโดยควบคุมสภาวะให้ใกล้เคียงกับโรงตากยาง โดยจะสังเกตการเกิดร้าวจากนั้นจะนำผลที่ได้ไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงโรงตากยางของสหกรณ์สวนยาง เพื่อเป็นต้นแบบ ซึ่งในที่นี้ได้ทำการติดต่อไว้แล้วคือ สหกรณ์กองทุนสวนยางบ้านทุ่งโพธิ์ ต.ทุ่งขมิ้น อ.นาหม่อม จ.สงขลา ซึ่งสหกรณ์แห่งนี้ เป็นสหกรณ์ที่อยู่ใกล้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์มากที่สุดที่มีโรงตากยางอยู่แล้ว

2.4 กลไกการแห้งทางทฤษฎี

การแห้ง (drying) เป็นที่เข้าใจโดยทั่วไปว่าเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในเนื้อของวัตถุมาสู่บริเวณผิว และการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากผิวของวัตถุเพื่อให้ได้วัตถุแห้งที่มีความชื้นแน่นอนปริมาณหนึ่ง อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัตถุขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุ กระบวนการพื้นฐานเกี่ยวกับการแห้ง ประกอบไปด้วย

- การส่งผ่านความร้อนเพื่อไประเหยของเหลว
- การส่งผ่านของมวลในลักษณะของของเหลวและไอน้ำภายในวัตถุและในลักษณะของไอน้ำจากผิว สอง

กระบวนการนี้เกิดขึ้นพร้อมกัน และองค์ประกอบซึ่งควบคุมอัตราของแต่ละกระบวนการจะเป็นตัวกำหนดอัตราการแห้ง ระยะเวลาของการแห้งแบ่งเป็น 3 ช่วงดังนี้

ก. ระยะเริ่มต้น (initial period) ในระยะนี้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิระเหยเปียกที่ผิวแห้ง (wet bulb temperature) น้ำที่ระเหยในระยะนี้เป็นน้ำอิสระ คือไม่จับกับโมเลกุลของสารอื่น อัตราการทำแห้งของระยะนี้จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยปกติแล้วในระยะนี้จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างยากเนื่องจากเกิดขึ้นเร็วมาก

ข. ระยะอัตราการแห้งคงที่ (constant rate period) เป็นระยะที่ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงแบบเส้นตรง เทียบกับเวลา น้ำที่ระเหยในช่วงนี้เป็นน้ำอิสระเช่นเดียวกับในระยะเริ่มต้น ในระยะนี้ น้ำจะเคลื่อนตัวจากภายในผลิตภัณฑ์สู่ผิวเพื่อทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวสู่อากาศภายนอกพอดี ตลอดเวลาผิวของผลิตภัณฑ์จึงชุ่มด้วยน้ำอยู่เสมอระยะนี้อัตราเร็วการแห้งจะมีค่าคงที่และสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวแปรควบคุมอัตราการแห้งที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ทิศทางการไหลของอากาศ และอัตราการไหลของอากาศ อัตราการแห้งในช่วงนี้เขียนเป็นสมการ (Treybal, 1981) ได้ ดังนี้

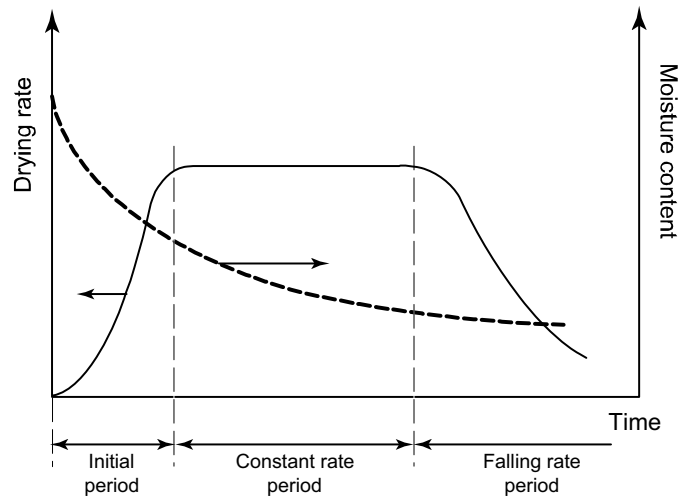
$$N_c = \frac{h_r A (T_g - T_s)}{\lambda} = K_g A (p_s - p_g) \quad (2.1)$$

ส่วนเวลาในการแห้งตัวอธิบายได้จาก

$$\theta = \frac{L_s (X_1 - X_c)}{AN_c} \quad (2.2)$$

โดยที่	N_c	คือ อัตราการแห้งสูงสุด, g/hr
	h_r	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนทั้งหมด, J/(hr)(m ²)(°C)
	A	คือ พื้นที่ที่มีการส่งผ่านความร้อนและการระเหย, m ²
	λ	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ T_s , J/g
	K_g	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวล, g/(hr)(m ²)(atm)
	T_g	คือ อุณหภูมิอากาศ(กระเปาะแห้ง), °C
	T_s	คือ อุณหภูมิของผิวที่มีการระเหย, °C
	p_s	คือ ความดันของน้ำที่อุณหภูมิผิว T_s , atm
	p_g	คือ ความดันย่อยของไอน้ำในแก๊ส, atm
	L_s	คือ น้ำหนักวัตถุแห้ง, g
	X	คือ ความชื้นของวัตถุ ณ จุดต่าง ๆ
	θ	คือ เวลา, hr

ดังนั้นจากสมการของอัตราการแห้งข้างต้น จะเห็นว่าขนาดของอัตราการแห้งคงที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนหรือมวล พื้นที่ที่สัมผัสกับตัวกลางที่ทำให้แห้ง และความต่างของอุณหภูมิ หรือความชื้นระหว่างแก๊สร้อนและผิวเปียกของของแห้ง



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งการแห้งของผลิตภัณฑ์

ค. ระยะอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) เมื่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ถึงจุดหนึ่งซึ่งเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) การเคลื่อนตัวของน้ำจากภายในออกมาสู่ผิว เป็นไปได้ยากขึ้นจึงไม่สามารถทดแทนน้ำที่ระเหยจากผิวได้ ดังนั้นในระยะนี้อัตราเร็วของการทำแห้งจึงลดลงดังแสดงในรูปที่ 2-2 ตัวแปรที่ควบคุมอัตราเร็วในการทำแห้งไม่ใช่ลักษณะของอากาศภายนอกอีกต่อไป แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์เอง เช่น โครงสร้างภายใน หรือค่าความสามารถการกระจายภายในตัวผลิตภัณฑ์เป็นต้น ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารอินทรีย์โดยทั่วไปแล้วพบว่าการทำแห้งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในระยะนี้อัตราการแห้งในช่วงนี้เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$N = \frac{N_c (X - X^*)}{(X_c - X^*)} \quad (2.3)$$

$$\theta = \frac{L_s (X_c - X^*)}{AN_c} \ln \frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*} \quad (2.4)$$

โดยที่ N คือ อัตราการแห้ง , g/hr
 X_c คือ ความชื้นวิกฤต
 X^* คือ ความชื้นสมดุลของวัตถุ

จากกลไกการแห้งทางทฤษฎีนั้นสรุปได้ว่า กระบวนการการแห้งไม่ใช่กระบวนการที่ราบเรียบติดต่อกันที่ปัจจัยเพียงอย่างเดียวสามารถควบคุมได้ และระยะเวลาของการแห้งสามารถแบ่งออกได้ 3 ระยะดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การแห้งของวัตถุมักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นในของวัตถุ มี 2 แบบคือฐานเปียก (wet basis) และ ฐานแห้ง (dry basis)

ค่าความชื้นฐานเปียกหาได้โดยเอาน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบหารด้วยน้ำหนักทั้งหมดของวัตถุดิบในขณะนั้น หรือ

$$\%MC_{wb} = \left(\frac{W_w}{W_w + W_d} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (2.5)$$

โดยที่ W_w คือ น้ำหนักของน้ำ และ W_d คือ น้ำหนักของวัตถุแห้ง

ค่าความชื้นฐานแห้งหาได้โดยเอาน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบหารด้วยน้ำหนักแห้งของวัตถุดิบหรือ

$$\%MC_{db} = \left(\frac{W_w}{W_d} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (2.6)$$

ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\%MC_{wb}$ และ $\%MC_{db}$ คือ

$$\%MC_{db} = \left(\frac{\%MC_{wb}}{100 - \%MC_{wb}} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (2.7)$$

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าความชื้นฐานแห้งในการคำนวณหาปริมาณความชื้นของยาง เพราะตัวหารของสมการมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในของแข็ง ดังนั้นการบอกเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการคำนวณหาปริมาณความชื้นของยาง

2.5 สำรจเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการตากแห้ง

เนื่องจากการตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแนวทางที่จะใช้ในการตากแห้งแผ่นยางดิบ ดังนั้นในที่นี้จะทบทวนการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร รวมทั้งความพยายามในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการอบแห้งแผ่นยาง

ประโยชน์อย่างหนึ่งของพลังงานแสงอาทิตย์ คือ การเปลี่ยนพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนโดยตรงเพื่อใช้ในการอบแห้งโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร วิธีปกติที่ใช้กันแพร่หลายมักใช้การตากในแสงอาทิตย์โดยตรง ซึ่งให้ผลช้าและยังไม่ถูกสุขลักษณะ เพราะผลผลิตที่ตากไม่ได้มีอะไรปิดไว้จึงเปื้อนด้วยฝุ่นละออง อีกทั้งยังถูกรบกวนด้วยแมลงสัตว์ต่าง ๆ ความเข้มแสงอาทิตย์ซึ่งอาจสูงถึงประมาณ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร สำหรับแสงแดดในเวลาเที่ยงวัน น่าจะใช้ในการตากแห้งได้ดี ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์ในการเปลี่ยนรังสีแสงอาทิตย์ให้เป็นความร้อนสำหรับการอบแห้ง อุปกรณ์หรือเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์นี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะการให้ความร้อนและวิธีการนำความร้อนไปใช้ (Ekechukwu and Norton, 1999) คือ

- ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดแอคทีฟ (Active solar-energy drying systems) ซึ่งใช้ลักษณะการพาความร้อนแบบบังคับ โดยมีพัดลมดูดหรือผลักอากาศเข้าสู่เครื่องอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อากาศที่ไหลเข้าเครื่องอบจะได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์ผ่านชุดรับความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ซึ่งอยู่ด้านบนและแผ่นซึ่งทาสีดำวางด้านล่าง และมีอากาศไหลผ่านแผ่นทั้ง 2 นี้ อากาศได้รับความร้อนจะถูกบังคับให้ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ อากาศที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์แล้วจะถูกระบายออกจากห้องอบ ข้อดีของระบบนี้ คืออากาศจะมีอุณหภูมิสูงช่วยให้การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นมีค่าสูง แต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มสำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหมุนพัดลม

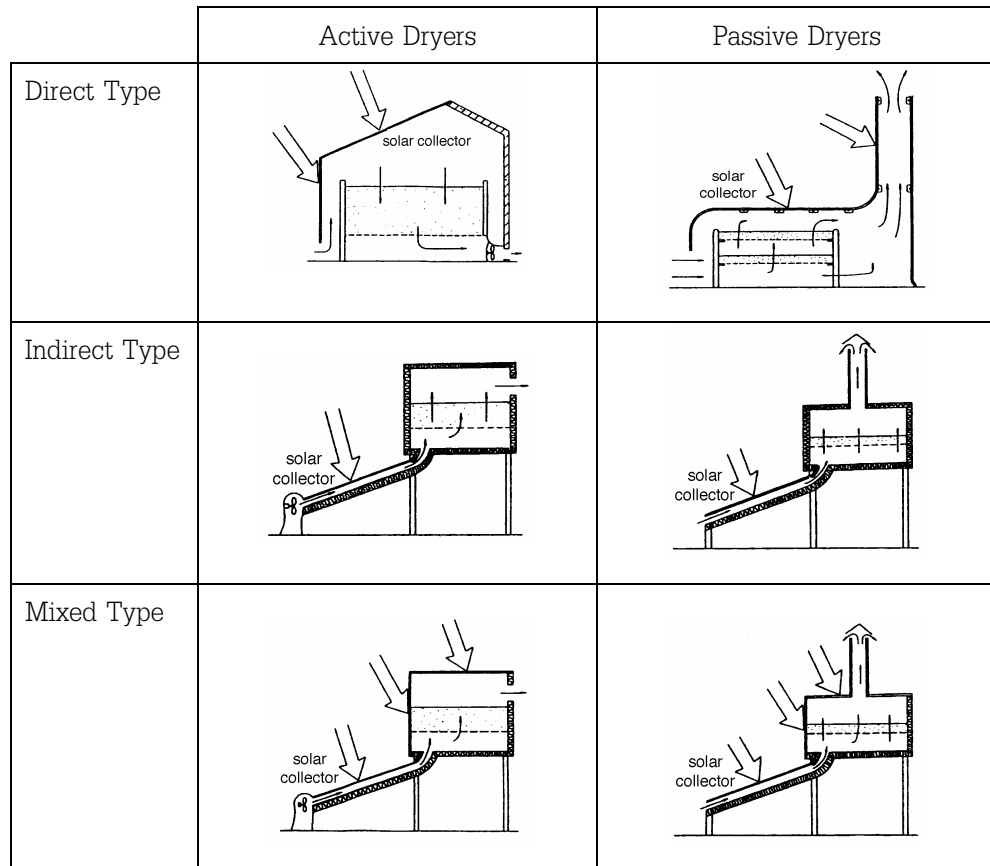
- ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดพาสซีฟ (Passive solar energy drying systems) ในกรณีนี้จะคล้ายกับแบบแรกเพียงแต่การพาความร้อนจะเป็นแบบอิสระโดยไม่มีพัดลมช่วย แต่จะมีปล่องระบายช่วยให้การพาความร้อนดียิ่งขึ้น (ดูรูปที่ 2.3) ข้อดีของระบบนี้ คือไม่สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้า แต่การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทความชื้นจะต่ำกว่าชนิดแอคทีฟ

สำหรับระบบอบแห้งแต่ละชนิดยังสามารถแยกย่อยได้อีก 3 แบบตามลักษณะการออกแบบของระบบ ดังนี้

- แบบรับความร้อนโดยตรง (Direct type) ความร้อนจากแสงอาทิตย์จะตกกระทบโดยตรงบนผลิตภัณฑ์ ซึ่งวางอยู่ในเครื่องอบ

- แบบรับความร้อนโดยอ้อม (Indirect type) ความร้อนจะไม่ตกกระทบลงบนผลิตภัณฑ์ แต่จะตกกระทบลงบนชุดรับความร้อนจากนั้นอากาศร้อนจะไหลผ่านผลิตภัณฑ์ในตู้อบ

- แบบผสม (Mixed type) เป็นการผสมกันของแบบความร้อนโดยตรงและโดยอ้อม



รูปที่ 2.3 ระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ประเภทต่าง ๆ

ชิต ทศนกุล (2545) ได้สร้างโรงอบยางพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดรูปทรงสามเหลี่ยมหน้าจั่วขนาด 3x3 เมตร เพื่อผลิตยางอบแห้งของสถาบันวิจัยยางจังหวัดภูเก็ต โดยได้สร้างโรงอบยางพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดการพาความร้อนอิสระ (direct passive dryer) อุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดภายในโรงอบในการทำยางแผ่นผึ่งแห้ง แต่ละวันทั้งปีเฉลี่ยอยู่ที่ 23.9°C และ 40.4°C ตามลำดับ น้ำหนักเฉลี่ยของแผ่นยางที่อบแห้งแล้วอยู่ที่ 0.4-0.7 กก. ขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของการทำยางแผ่นดิบในแต่ละแบบและเวลาที่ใช้อบเฉลี่ยอยู่ที่ 6.2 วัน

จารุวรรณ พรหมวิเศษ (2537) ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วลมและอุณหภูมิต่อการแห้งของยางแผ่น พบว่าความเร็วลมและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการแห้งของยางแผ่นเฉพาะช่วงระยะเวลา 0-6 ชั่วโมงแรกของการอบยางแผ่น และเมื่อผ่านช่วงนี้ไปแล้วความเร็วลมและอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อการแห้งของยางแผ่นน้อยลง

Breymayer, *et al.* (1993) ได้ดัดแปลงห้องรมยางให้สามารถนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ได้ โดยนำเอาแผงรับรังสีแสงอาทิตย์มาต่อกับห้องรมยาง ให้สามารถนำเอาอากาศร้อนเข้ามาช่วยเสริมให้ห้องร้อนขึ้นตามหลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดการอบแห้งโดยอ้อม แบบการพาความร้อนอิสระโดยการอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์เป็นเวลา 5 วัน จะลดความชื้นในแผ่นยางเหลือเพียง 0.5% สำหรับแผ่นยางจำนวน 320 กิโลกรัม จากนั้นทำการรมควันต่อ จะช่วยลดการใช้เชื้อเพลิงไม้ฟืนจาก 1,000 - 1,500 กิโลกรัมต่อตันยางสุก (จากการรมควันโดยวิธีปรกติ) เหลือเพียง 300 กก เท่านั้น นอกจากนี้ห้องอบสามารถใช้ผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง (ADS) โดยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวเป็นเวลา 6-7 วัน

Pratoto, *et al.* (1997) ใช้วิธีทางคณิตศาสตร์ ศึกษาความสัมพันธ์ของค่า solar fraction กับ design parameter เพื่อประมาณขนาดของแผงรับรังสีแสงอาทิตย์ (solar collector area) ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดการอบแห้งโดยอ้อมแบบควบคุมการพาความร้อน (indirect active dryer) เพื่อใช้ในการอบแห้งยางแผ่น โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบ ระยะเวลาในการอบและอัตราการไหลของอากาศในการอบเท่ากับค่าที่ใช้ในการอบแห้งยางโดยทั่วไปมาเป็นตัวกำหนด

Jayasuriya, *et al.* (2000) ได้ทำการทดลองตากยางโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ในสภาวะและเวลาของการตากแบบต่าง ๆ เป็นเวลา 2 วัน แล้วนำมารมควันต่ออีก 2 วัน ผลการทดลองพบว่ายางที่ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติทางกายภาพไม่แตกต่างกับยางที่รมควันอย่างเดียว นอกจากนี้พบว่ายางที่ตากแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวภายในระยะเวลา 2-4 วันโดยไม่ได้รมควัน ไม่ได้ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของยางด้อยลงเช่นเดียวกัน

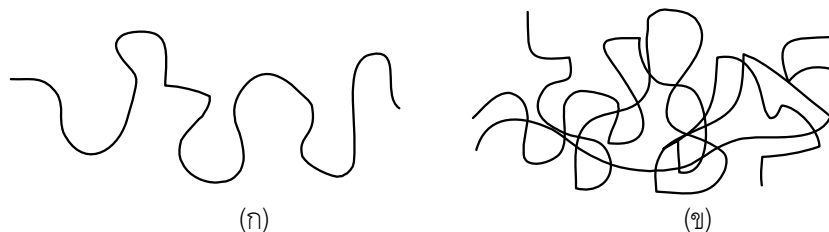
ในส่วนของปัจจัยที่มีผลต่อการแห้งตัวของแผ่นยางนั้น Prasertsan and Kirirat (1993) ได้ศึกษาถึงตัวแปรที่มีอิทธิพลในการรมแผ่นยางรมควัน โดยสร้างชุดทดลองที่สามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเข้า อัตราการไหลของอากาศไหลเข้า รวมถึงปริมาณยางที่ทำการรมซึ่งทดลองรมยางที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส แล้วเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไหลเข้า 4 ค่า คือ 20, 40, 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ควบคุมอัตราการไหลอากาศไหลเข้าให้คงที่อยู่ที่ 0.30 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไหลเข้าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการรมยางจะนานขึ้น โดยเวลาที่ใช้คือ 2040, 2520, 3240 และ 4230 นาที ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศไหลเข้า 5 ค่า คือ 0.18, 0.30, 0.60, 1.20 และ 2.01 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศไหลเข้าสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการรมยางจะลดลง แต่มีผลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไหลเข้า สุดท้ายศึกษาถึงปริมาณการใช้ไม้ฟืนในการรมยางที่มี

ค่าความชื้นที่แตกต่างกัน 2 ค่า คือ 42 และ 19 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณไม้พินที่ใช้ใกล้เคียงกันเมื่อเทียบเป็นไม้พินแห้ง

ซึ่งจากการสำรวจเอกสารการวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า มีความพยายามที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาช่วยในการแห้งตัวของยางแผ่น เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงไม้พินในการรมควันโดยการตากแห้งไม้ได้ทำให้คุณภาพของยางด้อยลง โดยส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาการอบยางให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 60°C แต่ยังไม่มีการศึกษาคุณลักษณะการแห้งตัวของแผ่นยางดิบที่อุณหภูมิ ประมาณ $30-45^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถทำได้ในโรงตากยางพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งมีอยู่หลายแห่งในสหกรณ์สวนยางโดยเฉพาะภาคใต้ รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแห้งตัวของแผ่นยางเพื่อให้สามารถใช้โรงตากยางให้มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

2.6 โครงสร้างของยางและผลต่อการแห้ง

ยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ชนิดโพลิไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) มีลักษณะเป็นโซ่ยาวดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) เมื่อโมเลกุลของยางอยู่รวมกันจะเกิดการพันกันของโซ่ทำให้เกิดความซับซ้อนดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติเป็นทั้งของเหลวหนืด (viscous liquid) และของแข็งยืดหยุ่น (elastomer) โดยสมบัติเช่นนี้เรียกว่าวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) (สมบัติ พุทธจักร, 2545)



รูปที่ 2.4 โซโพลิเมอร์ของยางธรรมชาติ (ก) โซ่เดี่ยว (ข) การพันกันของโซ่หลายโซ่

การไล่ความชื้นในเนื้อยางออกมายังผิวนั้น เป็นผลจากการการขยายตัวของโมเลกุลโซ่ยางเหล่านี้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้จะมีผลชัดเจนเมื่อยางแผ่นดิบอยู่ในช่วงระหว่างการเปลี่ยนคุณสมบัติของเนื้อยางจากยางดิบไปเป็นยางกึ่งดิบกึ่งสุกที่อุณหภูมิประมาณ 60°C แต่ในการตากแห้งยางด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิในห้องตากยางจะอยู่ระหว่าง $30-45^{\circ}\text{C}$ การไล่ความชื้นออกจากยางในช่วงความชื้นเนื้อยางสูงซึ่งเป็นช่วงที่ยางแผ่นดิบมีความชื้นสูงกว่าจุดหมาดให้ออกมาที่ผิวหน้ายาง จะอาศัยแรงคาปิลลารี (capillary force) ของน้ำที่แทรกอยู่ภายในช่องว่างของเนื้อยาง และความแตกต่างของความดันไอของอากาศ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) รอบ ๆ แผ่นยางกับความดันไอภายในช่องว่างของเนื้อยาง กลไกดังกล่าวนี้ในโรง

ตากยางจะถูกพิจารณาในช่วงที่สูงกว่าจุดหมัดของยางแผ่นดิบเท่านั้น ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้จึงไม่นำผลของสมบัติ วิสโคอีลาสติก ของเนื้อยางมาพิจารณา

2.7 การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology)

วิธี Response Surface เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถใช้หาเงื่อนไขหรือจุดเหมาะสมในการผลิต การทดสอบ การวิเคราะห์ กระบวนการต่างๆทางอุตสาหกรรม และวิศวกรรม Response Surface เป็นวิธีการทางสถิติโดยใช้ข้อมูลที่อยู่ในรูปของปริมาณจากการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมในการแก้ปัญหา และหาจุดเหมาะสมของผลลัพธ์ที่ต้องการจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวแปร Madamba (2002) ได้ใช้วิธี RSM โดยออกแบบการทดลองในลักษณะ fraction factorial แล้วใช้สมการโพลีโนเมียลลำดับสอง หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการอบแห้ง กระเทียมและแครอท จากการสร้างกราฟ contour ของ response surface โมเดลที่ได้ Guerrero และคณะ (1996) ใช้วิธีเดียวกันในการหาค่าที่เหมาะสมในการเก็บรักษากล้วยให้มีสภาพสีที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดจากเงื่อนไขตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 3 ตัวแปร RSM ยังถูกใช้ในการหาจุดเหมาะสมหรือจุดปลอดภัยในการชนหรือปะทะของรถยนต์ (Redhe และคณะ, 2002) ของโครงสร้างอากาศยาน (Wang และคณะ, 2000) และระบบขนส่งมวลชนความเร็วสูง (Golovidov, 1997) ในการทดลองส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัยที่จะนำไปสู่การทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับผลตอบสนอง (response) ของกระบวนการที่สนใจในทดลอง ในการทดลองมักมีจุดประสงค์เพื่อหากระบวนการ การควบคุมที่เหมาะสม วิธี Response Surface มักจะถูกใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรในกระบวนการทางเคมีเช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีตัวแปรอิสระหลายตัวแปรมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ หรือต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Myer and Montgomery, 2002)

2.7.1 แบบจำลอง Response Surface และนัยสำคัญของ Regression

โดยทั่วไปทั้งสมการเชิงเส้นและสมการโพลีโนเมียลลำดับสองก็เพียงพอสำหรับการหาแบบจำลองการตอบสนองของตัวแปรตามที่น่าสนใจโดยวิธี Response Surface ในบางกรณีจุดเปลี่ยนโค้งมากกว่าหนึ่งจุดใน response surface โมเดลก็มีความจำเป็นสำหรับใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของตัวแปรตอบสนอง และจำเป็นต้องมีเทอมลำดับที่สามในสมการโพลีโนเมียล

ถ้ามีตัวแปรในกระบวนการ k ตัวแปร Response Surface ก็คือ จำนวน k พื้นผิว ในมิติ $k+1$ โดยทั่วไปสมการโพลีโนเมียลลำดับสองจะรวมเอา 2 ตัวแปรที่มี interaction กันไว้ด้วยดังในสมการที่ (2.8)

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + e \quad (2-8)$$

สมการพหุนามเมื่อยล่ำดับสองสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นสมการเชิงเส้นได้ และโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด หรือ least-squares สามารถเขียนสมการอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$y = X\beta + e \quad (2.9)$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1i} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & x_{3i} \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{ni} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ผลเฉลยของปัญหา least-squares ได้จากการแปลงเมทริกซ์ โดยเงื่อนไขของ least-squares คือค่า SSE (sum square of error) = 0 ทำให้ได้

$$X^T X \beta = X^T y \quad (2.11)$$

ดังนั้น เวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ β จะคำนวณได้จาก

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y, \quad (2.12)$$

โดยที่ X^T คือ transpose ของเมทริกซ์ X และ X^{-1} คือ inverse เมทริกซ์ของ X โดยการใช้
สัญลักษณ์เมทริกซ์ เวกเตอร์ของผลตอบสนองการกระบวนกร (responses), $\hat{y}$, สามารถคำนวณได้จาก

$$\hat{y} = X(X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.13)$$

เมทริกซ์ $X(X^T X)^{-1} X^T$ มีมิติ $n \times n$ และเรียกว่า hat matrix ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่มีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ Regression โดยเฉพาะสำหรับการพิจารณาความถูกต้องของโมเดลที่สามารถนำไปใช้งานได้ เพื่อทดสอบนัยสำคัญของโมเดล นักสถิติได้ตั้งสมมุติฐานดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad (2.14)$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad (2.15)$$

สมการ (2.14) เป็น null hypothesis ในขณะที่ H_1 ในสมการ (2-15) เป็นการปฏิเสธ null hypothesis และถ้า H_0 ถูกปฏิเสธ สัมประสิทธิ์ (β) จะมีนัยสำคัญกับโมเดล ถ้า H_0 ไม่ถูกปฏิเสธ ตัวแปรอิสระ (X_i) สามารถกำจัดออกจากโมเดลสมการได้ การทดสอบ null hypothesis สำหรับโมเดล regression (สมการ 2.14) ทำได้โดยการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงเนื่องจาก regression โมเดลกับ error ทั้งหมด การเปรียบเทียบนี้เรียกว่า *Total Sum of Squares* (S_{yy}), *Regression Sum of Squares* (SSR) และ *Sum of Squared Errors* หรือ *Error Sum of Squares* (SSE).

2.7.2 การใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ในการหาเงื่อนไขการตากยางแผ่นที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการ

สำหรับในกระบวนการอบแห้ง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ขนาดของวัตถุที่ต้องการอบ ความชื้นเริ่มต้นในวัตถุ และความเร็วม เป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับสี่ตัวแปรหลักได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วมและปริมาณความชื้นเริ่มต้นในผลิตภัณฑ์ สามตัวแปรแรกเป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการอบแห้ง ในการศึกษาการตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตากนั้นจะประยุกต์ใช้วิธี Response Surface ในการหากระบวนการหรือเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมโดยวิเคราะห์จากผลการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองทำแห้งยางแผ่นในห้องทดสอบ เป็นการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการแห้งตัวที่ทำให้ได้ยางแผ่นที่มีความชื้นสุดท้าย (MC_f) ก่อนนำไปเข้าห้องรมยางลดลงมากที่สุด โดยมีสัดส่วนปริมาณยางที่เกิดร่น้อยที่สุด และหาเงื่อนไขที่ทำให้อัตราการแห้งของยางแผ่น (N_C) สูงสุด เมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อผลตอบสนองข้างต้น ได้นำตัวแปรอิสระที่เป็นความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านยางแผ่น (u) และอุณหภูมิ (T) มาพิจารณา ส่วนตัวแปรที่เป็นระยะห่างระหว่างแผ่นยางที่ตาก (d) ระยะเวลาในการตาก (θ) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (RH) จะกำหนดเป็นตัวแปรเบื้องต้น ไม่นำมาใช้เป็นตัวแปรอิสระที่ส่งผลต่อผลตอบสนอง โดยจะใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับสภาวะการตากยางจริง ซึ่งค่าเหล่านี้ได้จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาและจากการวัดจริง ส่วนระยะห่างระหว่างแผ่นยาง ถูกกำหนดไว้ 2 กรณี คือ เว้นระยะ 1 ราวตาก กับไม่เว้นระยะ ดังนั้นความสัมพันธ์ของผลตอบสนอง (ค่าทำนาย) กับตัวแปรอิสระ สามารถเขียนได้ดังสมการข้างล่าง

$$\hat{y} = f(u, T) \quad \text{for fixed } d \text{ and } RH \quad (2.8)$$

โดยที่ $\hat{y}$ เป็นค่าทำนายผลตอบสนอง MC_f

วิธีการทดลองและจำนวนการทดลองตากยางแผ่นได้จากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Central-Composite Design (Madamba, 2002) เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำการทดลองจำนวนน้อยครั้ง และสามารถแปรค่าตัวแปรอิสระได้ครอบคลุมช่วงของตัวแปรที่สนใจศึกษาได้ ในขณะที่ให้ผลใกล้เคียงกันกับวิธีออกแบบการทดลองด้วย Full Factorial Design ผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำไปสร้างสมการพื้นผิวตอบสนอง (response surface model) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ Quadratic ด้วยวิธี Multiple Regression ได้ สมการนี้จะใช้สำหรับทำนายผลตอบสนองที่เงื่อนไขการตากแห้งต่าง ๆ ในช่วงขอบเขตของตัวแปรอิสระที่ได้มีการทดลอง ทั้งนี้สมการดังกล่าวจะต้องมีการตรวจสอบความมีนัยสำคัญของตัวแปรและเป็นที่ยอมรับตามหลักทางสถิติ

สำหรับการนำสมการที่ได้ไปใช้ในการหาเงื่อนไขการตากยางแผ่นที่เหมาะสม ทำได้โดยวิธีการพลอตกราฟที่เงื่อนไขของตัวแปรอิสระตัวแปรหนึ่งคงที่ แล้วพิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากตัวแปรอิสระที่เหลือในลักษณะสามมิติเพื่อให้เห็นพื้นผิวผลตอบสนองที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระทั้งสองตัวแปรได้อย่างชัดเจน

บทที่ 3

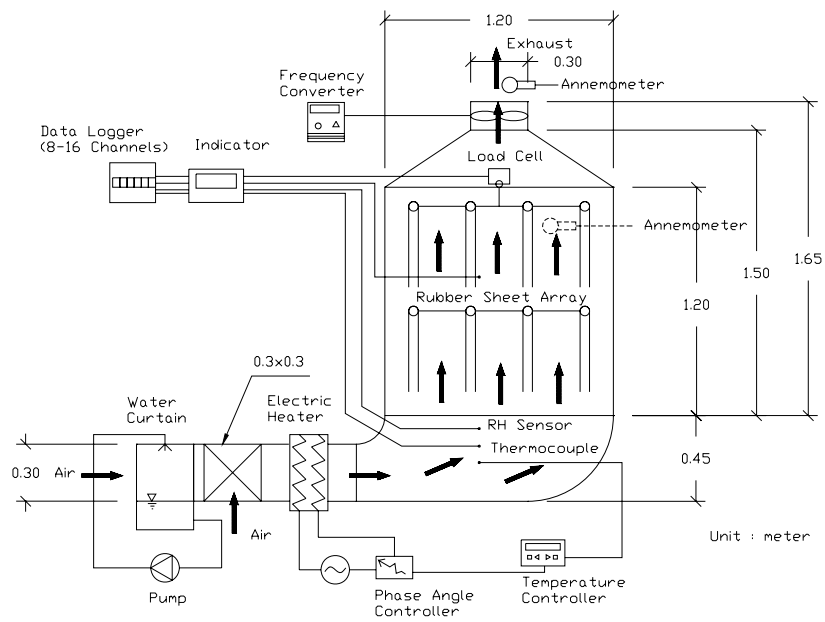
การทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในห้องปฏิบัติการและผลการทดลอง

การทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบจะทำในตู้อบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น โดยมีรางสำหรับแขวนยาง 2 ชั้น รางตากยางทำด้วยท่อลูมิเนียมกลวง มีความยาว 1.2 เมตร สำหรับตากยางจำนวน 2 แผ่นต่อราง มีราวตากยางจำนวน 4 รางต่อชั้น รวมตากได้ 16 แผ่น ระยะห่างระหว่างราวหรือแผ่นยางปรับได้สูงสุด 30 ซม หรือหากต้องการปรับให้ห่างขึ้นก็สามารถทำได้ด้วยการลดจำนวนราวตากลง อนึ่งขนาดของแผ่นยางดิบของสหกรณ์สวนยางที่ผ่านการรีดแล้วมีขนาดประมาณ 50 ซม x 90 ซม ค่าความชื้นของแผ่นยางหาได้จากการชั่งน้ำหนักแผ่นยางทั้งหมดในตู้อบโดยใช้ load cell รายละเอียดต่างๆของตู้อบอธิบายในหัวข้อถัดไป

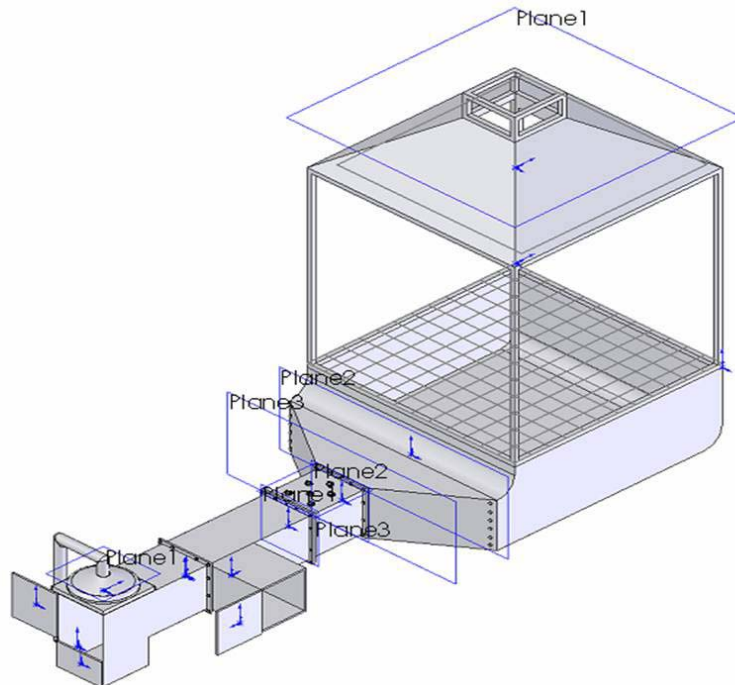
หลักการทำงานของตู้อบแห้ง คือ อากาศจากภายนอกจะไหลผ่านม่านน้ำซึ่งถูกทำให้เป็นฝอย กลายเป็นอากาศชื้นอิ่มตัว อากาศส่วนนี้จะไหลเข้าผสมกับอากาศที่แห้งกว่า ได้เป็นอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ ด้วยการควบคุมปริมาณอากาศแห้งที่เข้ามาผสม จากนั้นอากาศชื้นจะไหลผ่านชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) เพื่อปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการ การควบคุมอุณหภูมิจะใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติและเทอร์โมคัปเปิล จากนั้นอากาศที่ควบคุมสถานะแล้วจะไหลเข้าสู่ห้องทดสอบผ่านทางด้านล่างของพื้นห้องซึ่งปูด้วยตะแกรงเหล็ก ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแผ่นยางวัดโดยใช้หัววัดความเร็วลม (anemometer) และสามารถปรับความเร็วลมได้ โดยใช้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนรอบการหมุนของพัดลมดูดอากาศซึ่งติดตั้งที่ทางออกด้านบนของตู้อบ

3.1 การออกแบบตู้อบแห้งสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบ

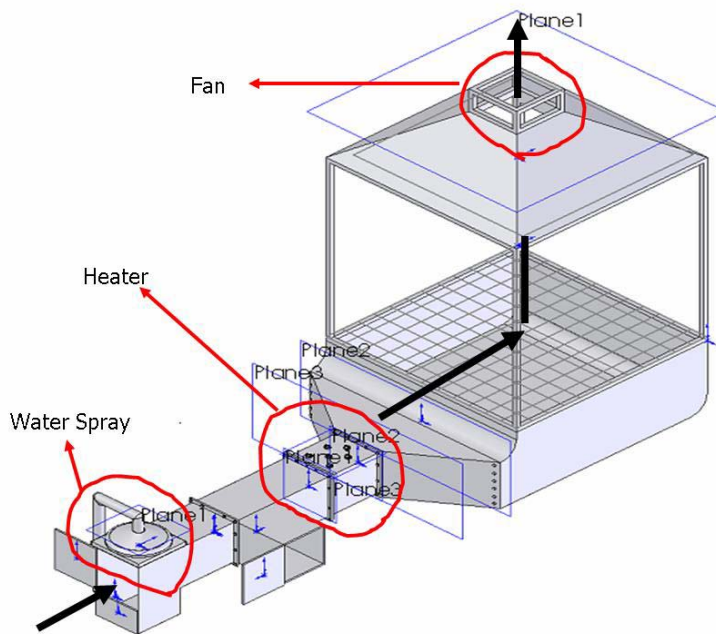
ตู้อบแห้งที่สร้างเป็นห้องที่ควบคุมบรรยากาศภายในได้ มีลักษณะเป็นห้องลูกบาศก์ ขนาด กว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.2 เมตร และ สูง 1.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 โครงสร้างตู้ทำด้วยเหล็กฉาก ผึงทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางบุด้วยฉนวนใยแก้ว ตัวแปรที่ควบคุมประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วของอากาศ และระยะห่างระหว่างแผ่นยาง ส่วนทิศทางการไหลของอากาศจะบังคับให้ไหลขนานกับแผ่นยางเพื่อให้เกิดการแห้งตัวที่เร็วที่สุด



รูปที่ 3.1 ตู้ทดสอบสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบ



รูปที่ 3.2 ตู้ทดสอบสำหรับอบแห้งยางแผ่นดิบที่ได้ออกแบบขึ้น



รูปที่ 3.3 แสดงทิศทางการไหลของอากาศเข้าสู่ตู้อย่างแผ่น

หลักการทำงานของตู้อย่างแผ่นคือ อากาศแห้งจะไหลผ่านม่านน้ำซึ่งถูกทำให้เป็นฝอย กลายเป็นอากาศชื้นอมตัว อากาศส่วนนี้จะไหลเข้าผสมกับอากาศแห้งได้เป็นอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ตามที่ ต้องการด้วยการควบคุมปริมาณอากาศแห้งที่เข้ามาผสม จากนั้นอากาศชื้นจะไหลผ่านชุดทำความร้อนด้วยไฟฟ้า (electric heater) เพื่อปรับอุณหภูมิตามที่ต้องการ การควบคุมอุณหภูมิจะใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติและ เทอร์โมคัปเปิล จากนั้นอากาศที่ควบคุมสถานะแล้วจะไหลเข้าสู่ห้องทดสอบผ่านทางด้านล่างของพื้นห้องซึ่งปูด้วย แผ่นเหล็กพูนเพื่อให้อากาศไหลออกมีความเร็วที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ในการวัดความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านแผ่น ยาง ใช้หัววัดความเร็ว (anemometer) และสามารถปรับโดยใช้อินเวอร์เตอร์เปลี่ยนรอบการหมุนของพัดลมดูด อากาศซึ่งติดตั้งที่ด้านบนของตู้อย่าง

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดสำหรับตู้อย่างแผ่น

อุปกรณ์เครื่องมือวัดและบันทึกข้อมูลที่ใช้กับตู้อย่างแผ่น ได้แก่

- Digital Indicator จำนวน 3 ชุด PRIMUS รุ่น PM0433100 ที่สามารถรับสัญญาณเป็น DC Volt และ DC Current จาก Sensor Transmitter สำหรับวัดความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และ Load Cell ได้

- Relative Humidity/Temperature Sensors and Transmitter ยี่ห้อ RENSE รุ่น HT-740-T-03 เป็นหัววัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิในตัวเดียวกันและมีชุดแปลงสัญญาณในตัว จำนวน 1 ชุด โดยให้ Output เป็น DC Volt ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบ

- Temperature Controller จำนวน 1 ชุด ยี่ห้อ TOHO รุ่น TTM 004 เป็นอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบให้ได้ตามค่าที่ตั้งไว้ โดยสามารถรับสัญญาณจาก Thermocouple Type K ได้ และสามารถส่งสัญญาณควบคุมในลักษณะการควบคุมแบบ PID เป็น DC Volt (0-32 VDC) สำหรับควบคุมการตัดต่อของ Solid-State Relay ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับ Heater ได้

- Heater ไฟฟ้าแบบครีบลีเหล็ย ยาว 30 เซนติเมตร ขนาด 600 W จำนวน 6 ชุด สามารถเลือกเปิดแต่ละตัวได้อย่างอิสระ หรือเปิดการทำงานแยกตามจำนวนที่เหมาะสมกับภาระ (โดยการออกแบบวงจรควบคุม)

- Solid-State Relay ขนาด 25 A 220 VAC พร้อม Heat Sink ระบายความร้อน มี input เป็น 0-32 VDC จำนวน 1 ชุด ใช้สำหรับตัดต่อการทำงานของ Heater ครีบลี

- Frequency Converter หรือ Inverter ยี่ห้อ Primus สำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์พัดลมดูดอากาศ ขนาด 0.75 kW มี input เป็น 220 VAC (1 ϕ) และมี output เป็น 220 VAC (3 ϕ) จำนวน 1 ชุด สามารถปรับความเร็วได้ตั้งแต่ 0-50 Hz

- มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 0.25 แรงม้า 220 VAC จำนวน 1 ชุด (ใช้ขับพัดลมดูดอากาศ)

- Load Cell พร้อมสายนำสัญญาณ ชนิด 4 สาย ยี่ห้อ GEFTRAN "S" Type Compression/Traction Load Cells IP 66(DIN40050) ขนาดพิกัด 50 kg จำนวน 1 ชุด ใช้สำหรับตรวจสอบน้ำหนักยางแผ่นดิบขณะอบ

- Load Cell Transmitter 220 VAC supply มี Output เป็น 4-20 mA DC ใช้รับสัญญาณและขยายสัญญาณจาก Load Cell เป็นสัญญาณมาตรฐาน

- เครื่องบันทึกข้อมูล DAQPro 8 ช่องสัญญาณ รุ่น DT - 605 จำนวน 1 ชุด สามารถบันทึกสัญญาณจากเครื่องมือวัด เช่น Thermocouple สัญญาณ 0-20 mA หรือ 0-10 VDC ได้

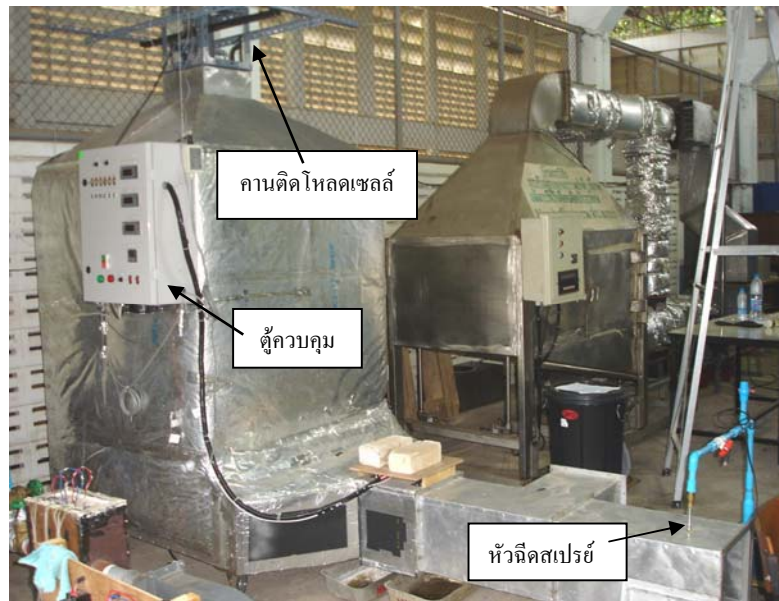
- อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในการสร้างตู้อบยางแผ่นดิบ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้าอื่น ๆ ได้แก่ เหล็กฉาก แป้นอลูมิเนียม หัวฉีดสเปรย์น้ำ ท่อทางต่างๆ เซอร์กิตเบรกเกอร์ รีเลย์ สวิตช์ ฟิวส์ กล่องปลั๊ก คอนเนคเตอร์เทอร์มินอล ไฟสัญญาณต่างๆ สายไฟ ตู้ควบคุม พัดลมระบายอากาศตู้ควบคุม เป็นต้น

3.3 การสร้างตู้อบแห้งยางแผ่นดิบพร้อมตู้ควบคุมการทำงาน

ตู้อบแห้งยางแผ่นดิบสร้างขึ้นด้วยโครงเหล็กฉากขนาด 1 นิ้ว ผนังทำด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางบุด้วยฉนวนใยแก้วและฉนวนยางหนา 1 นิ้ว มีช่องทางออกของอากาศอยู่ด้านบนของตัวตู้ อากาศไหลผ่านทางท่อสี่เหลี่ยมแนวนอนด้านล่างผ่านชุดทำความชื้นโดยใช้ปั๊มน้ำสเปรย์น้ำผ่านหัวฉีดก่อนจะผ่านชุดความร้อนด้วยฮีทเตอร์ครีบลีเหลี่ยม ตู้อบแห้งยางแผ่นที่สร้างขึ้นมีลักษณะและรายละเอียดตามรูปที่ 3.4 ถึง รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.4 ตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ (ด้านประตูตู้อบ)



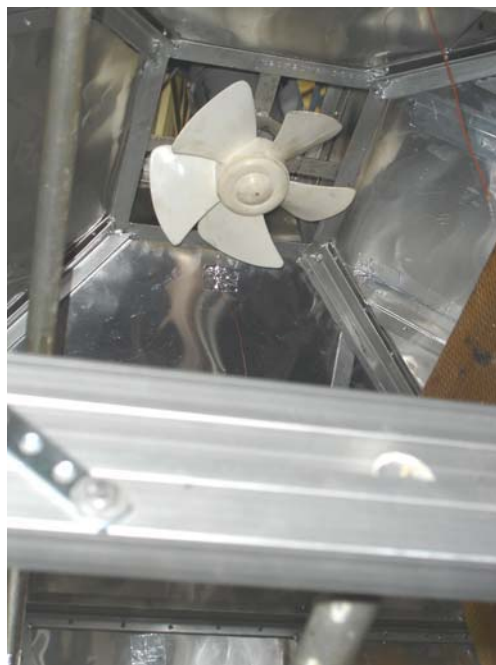
รูปที่ 3.5 ตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ (ด้านตู้ควบคุม)



รูปที่ 3.6 ฮีตเตอร์ครีบบางสี่เหลี่ยมขนาดชุดละ 600 W



รูปที่ 3.7 ราวแขวนยางแผ่นดิบในตู้อบที่สามารถปรับระยะห่างของยางแผ่นได้

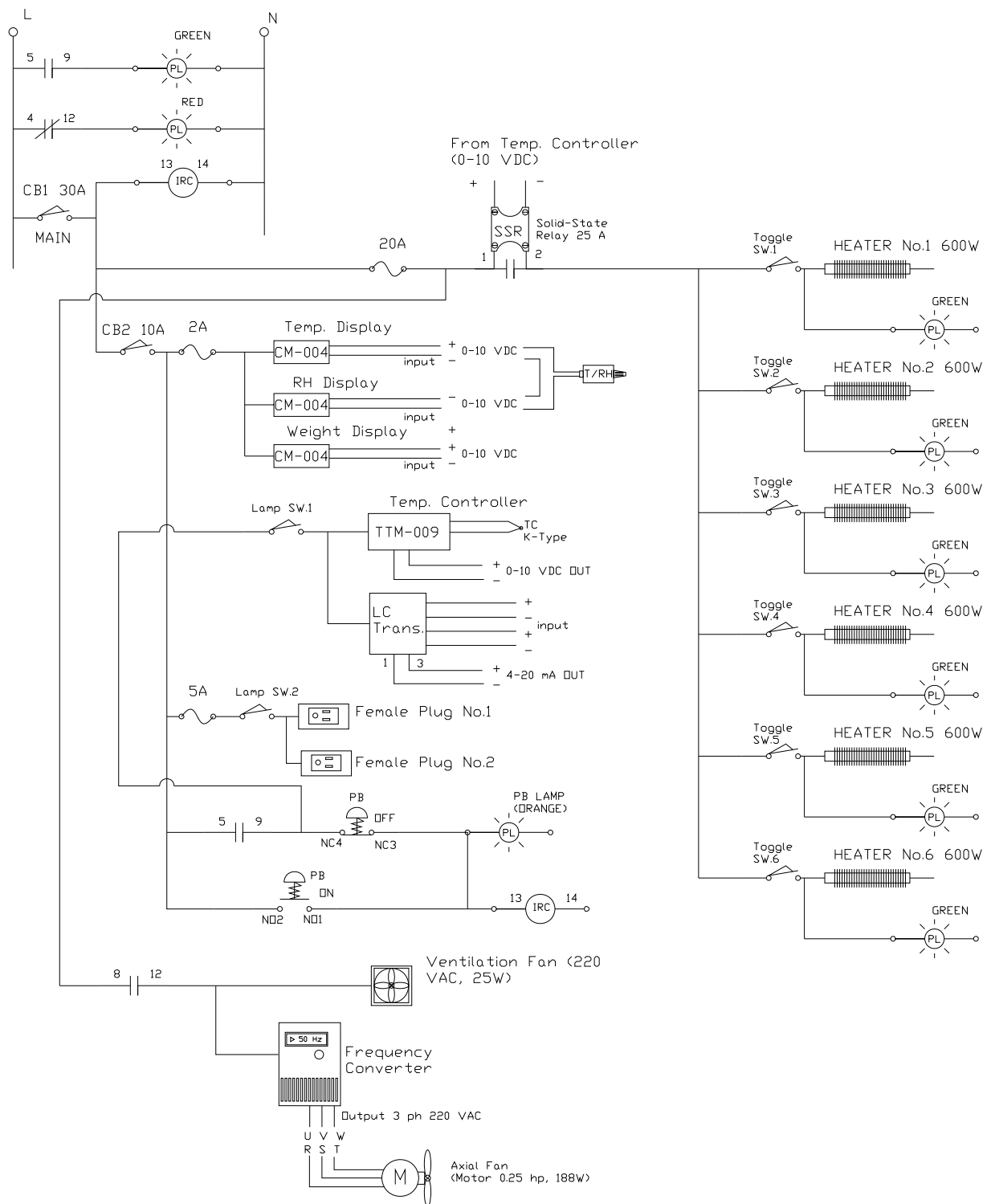


รูปที่ 3.8 พัดลมระบายอากาศบริเวณปล่องด้านบน (ภาพจากภายในตู้อบ)



รูปที่ 3.9 ตู้ควบคุมการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ

จากรูปที่ 3.10 วงจรการเดินสายไฟควบคุมการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบที่ได้สร้างขึ้นจะใช้วิธีการควบคุมอย่างง่ายโดยการเปิด-ปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ตัวหลักและตัวย่อย (30A และ 10A) โดยมีฟิวส์ป้องกันขนาด 20A 5A และ 2A สำหรับฮีตเตอร์ ปลั๊กเสียบอุปกรณ์ไฟฟ้า และสำหรับอุปกรณ์แสดงค่าสัญญาณ การควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์จะอาศัย Temperature controller ที่รับสัญญาณตรวจวัดอุณหภูมิของอากาศภายในตู้อบ โดย Type K Thermocouple และให้สัญญาณ Output เป็นสัญญาณควบคุมขนาด 0-10 VDC แบบ PID ON-OFF ส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ Solid-State Relay ขนาด 25A ให้จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์รีเบบสี่เหลี่ยม ขนาด 600 W จำนวน 6 ชุด ต่อไป ซึ่งสามารถเลือกเปิดการทำงานของฮีตเตอร์ที่ละชุดหรือทั้งหมดได้โดยมีไฟสัญญาณแสดงสถานะการทำงานของฮีตเตอร์ ส่วนการระบายอากาศในตู้อบทำได้โดยการใช้พัดลมอากาศไหลในแนวแกนขับด้วยมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1/4 แรงม้า ควบคุมความเร็วรอบหรืออัตราการไหลของอากาศโดยการใช้ frequency converter ปรับรอบการหมุนของมอเตอร์ได้ตั้งแต่ 0-1450 rpm ทั้งนี้ได้ออกแบบให้ฮีตเตอร์หยุดการทำงานทันทีเมื่อมอเตอร์ขับพัดลมดูดอากาศไม่ได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นการป้องกันการไหม้ของฮีตเตอร์เนื่องจากกรณีที่มีไฟฟ้ากระพริบหรือไฟฟ้ามดับ หากไม่มีการ OFF เซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อไฟฟ้าติดจะทำให้ฮีตเตอร์มีทำงาน แต่ในกรณีนี้ได้ออกแบบให้ฮีตเตอร์ทำงานก็ต่อเมื่อได้กด Start มอเตอร์พัดลมแล้วเท่านั้น

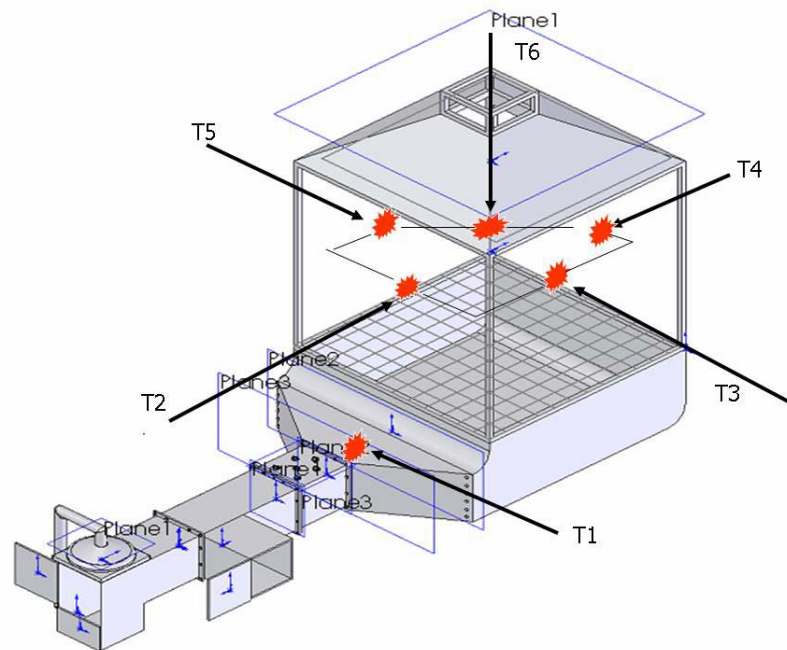


PB หมายถึง สวิตช์ปุ่มกด PL หมายถึง Pilot Lamp IRC หมายถึง Relay coil CB หมายถึง Circuit Breaker

รูปที่ 3.10 Wiring Diagram ควบคุมการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ

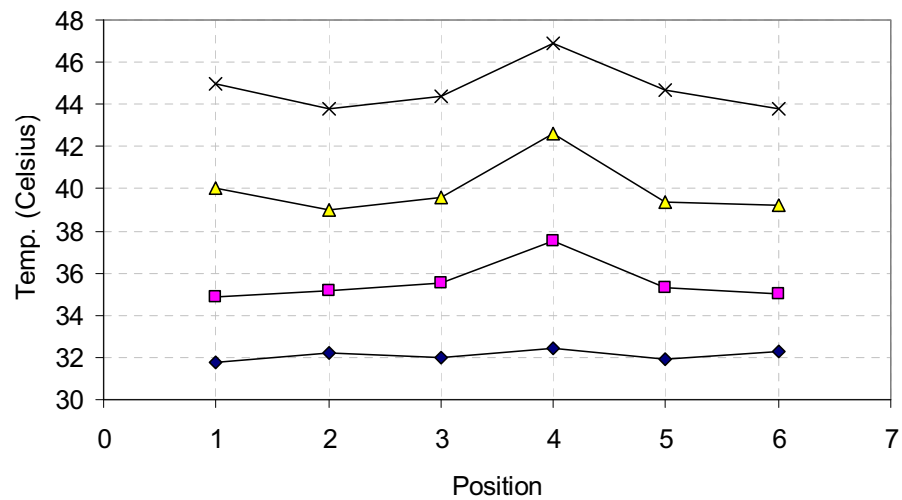
3.4 การทดสอบการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบเบื้องต้นและปรับปรุงการทำงานของตู้อบ

การทดสอบการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบเป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อดูความสม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิภายในตู้อบบริเวณตรงกลางของตู้อบดังแสดงในรูปที่ 3.11



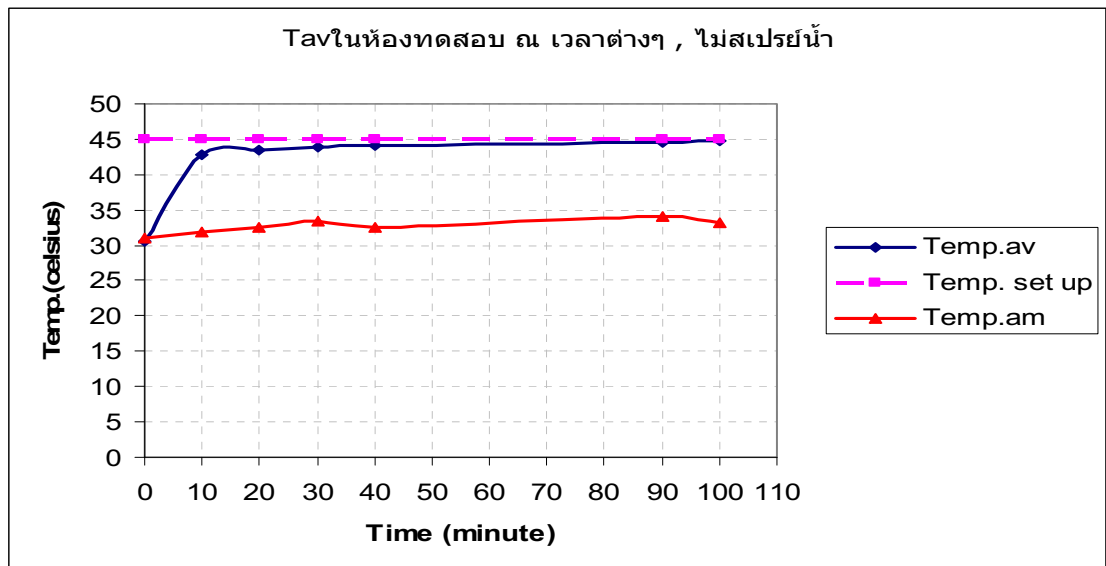
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งวัดอุณหภูมิภายในตู้อบแห้งยางแผ่นดิบ

การทดสอบการทำงานของตู้อบแห้งยางแผ่นดิบรวมถึงการตรวจสอบอุณหภูมิในตู้อบว่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้ปรับตั้งหรือค่าที่ควบคุมไว้หรือไม่ เนื่องจากในการตากแห้งยางแผ่นดิบก่อนรมควันในห้องตากยางของ สกย. จะมีอุณหภูมิประมาณ $35 - 45^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณรอบๆยางแผ่นดิบบนราวตากมีค่ามากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายนอกโรงตากประมาณ 10-15% ดังนั้นในการทดสอบตู้อบแห้งเบื้องต้นนี้จะปรับตั้งอุณหภูมิภายในตู้อบไว้ที่ 45°C 40°C และ 35°C ตามลำดับ

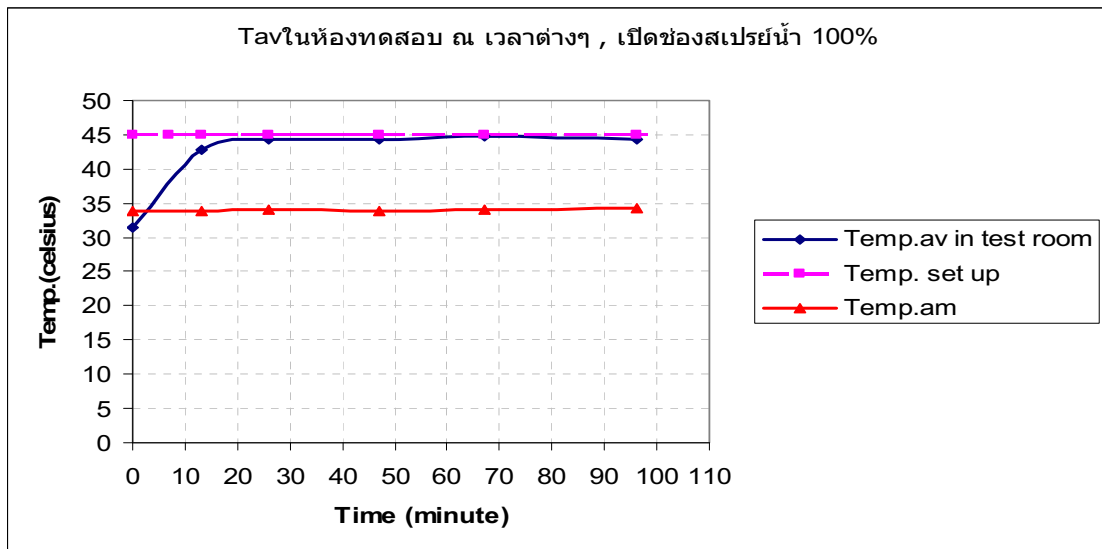


รูปที่ 3.12 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในตู้อบตามรูปที่ 11 เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิเป็น 32 35 40 และ 45°C

จากรูปที่ 3.12 จะเห็นว่าที่ตำแหน่ง 4 บริเวณด้านผนังด้านหลังภายในตู้อบจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่นๆประมาณ 1-2°C ทั้งนี้เนื่องจากผลของแผ่นบังคับการไหลลักษณะแผ่นโค้งบริเวณด้านล่างภายในตู้อบทำให้การไหลของอากาศบริเวณดังกล่าวมีความเร็วสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ ทำให้วัดค่าอุณหภูมิได้สูงกว่าเล็กน้อย

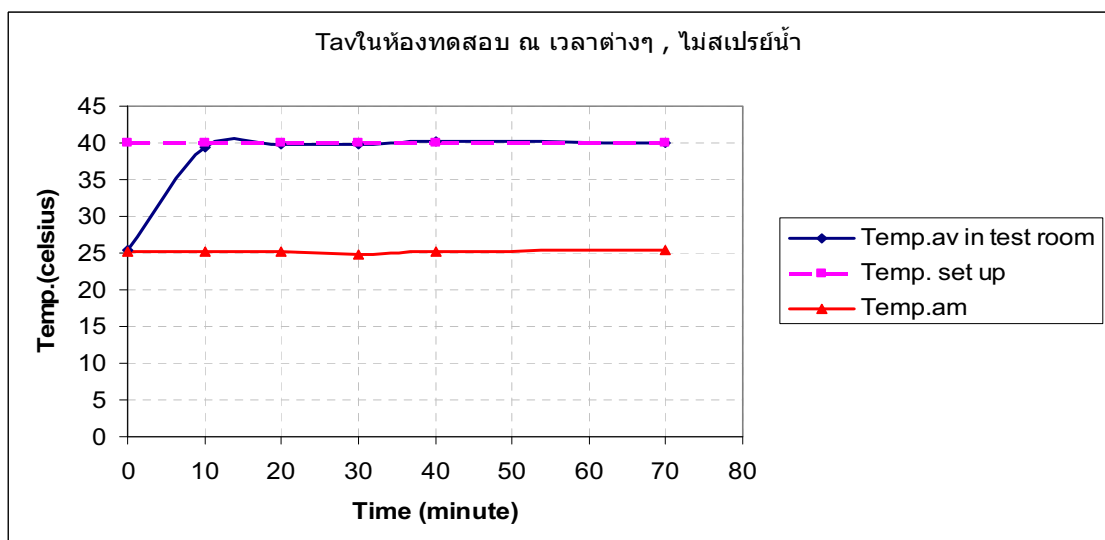


รูปที่ 3.13 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 45°C และไม่สเปรย์น้ำ

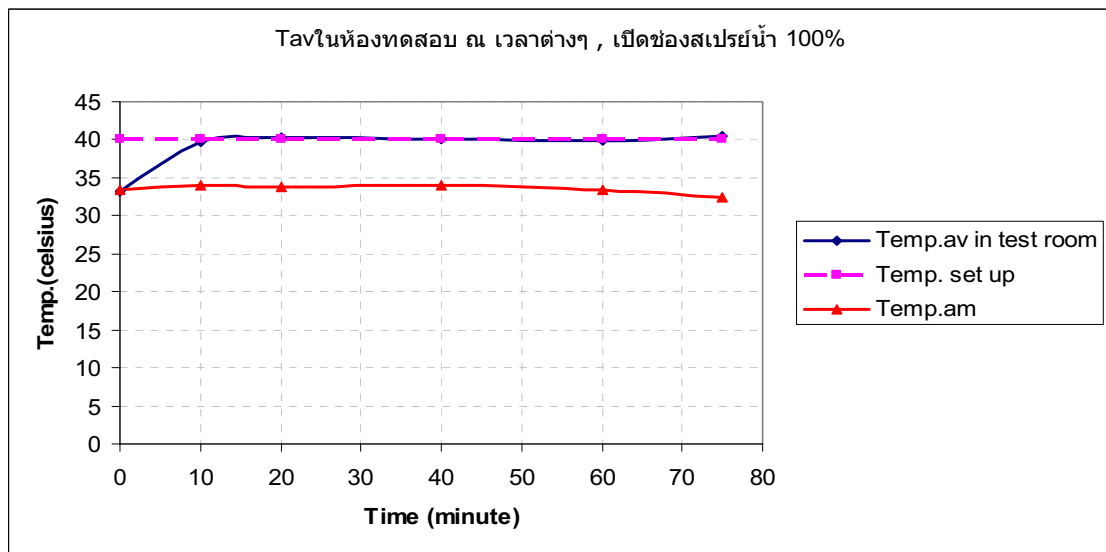


รูปที่ 3.14 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 45°C และสเปรย์น้ำ

จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 เป็นการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบทั้งในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำและไม่สเปรย์น้ำ ผลการทดสอบพบว่าตู้อบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 45°C ได้ทั้งในสองกรณี

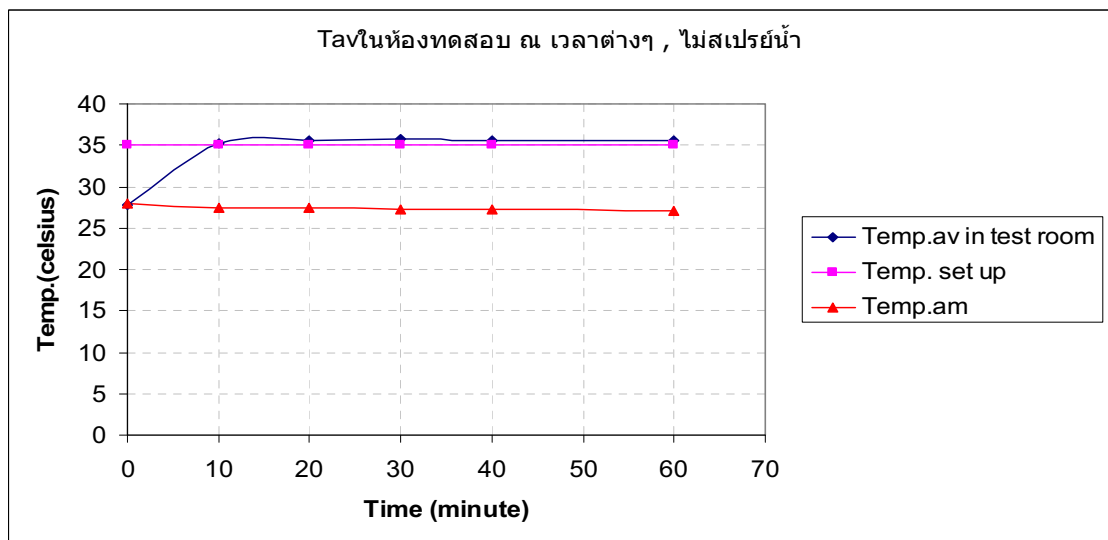


รูปที่ 3.15 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40°C และไม่สเปรย์น้ำ

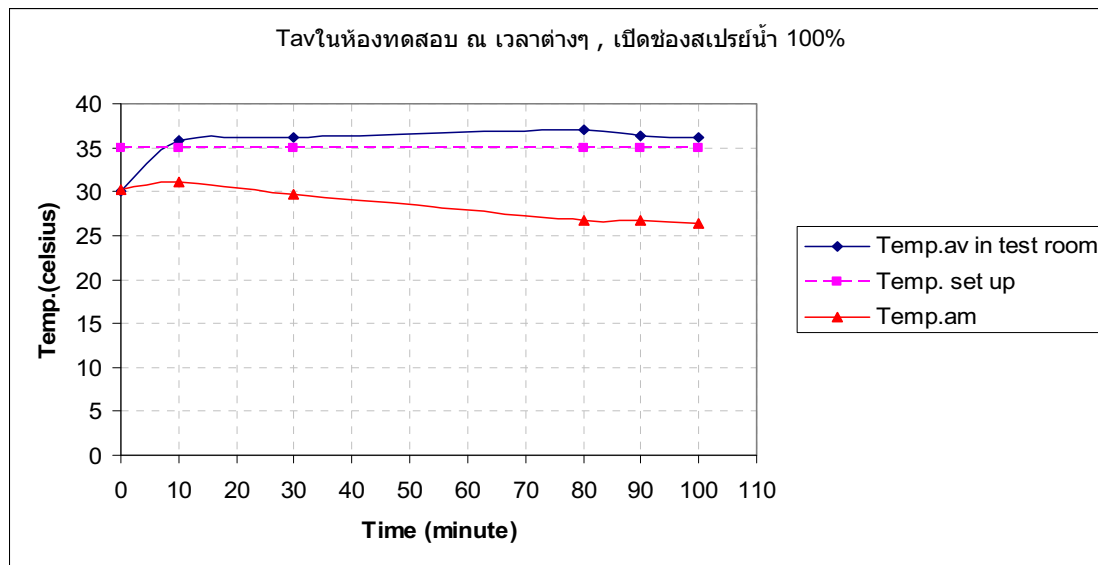


รูปที่ 3.16 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 40°C และสเปรย์น้ำ

จากรูปที่ 3.15 และ 3.16 เป็นการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบทั้งในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำและไม่สเปรย์น้ำ ผลการทดสอบพบว่าตู้อบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 40°C ได้ทั้งในสองกรณี



รูปที่ 3.17 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 35°C และไม่สเปรย์น้ำ

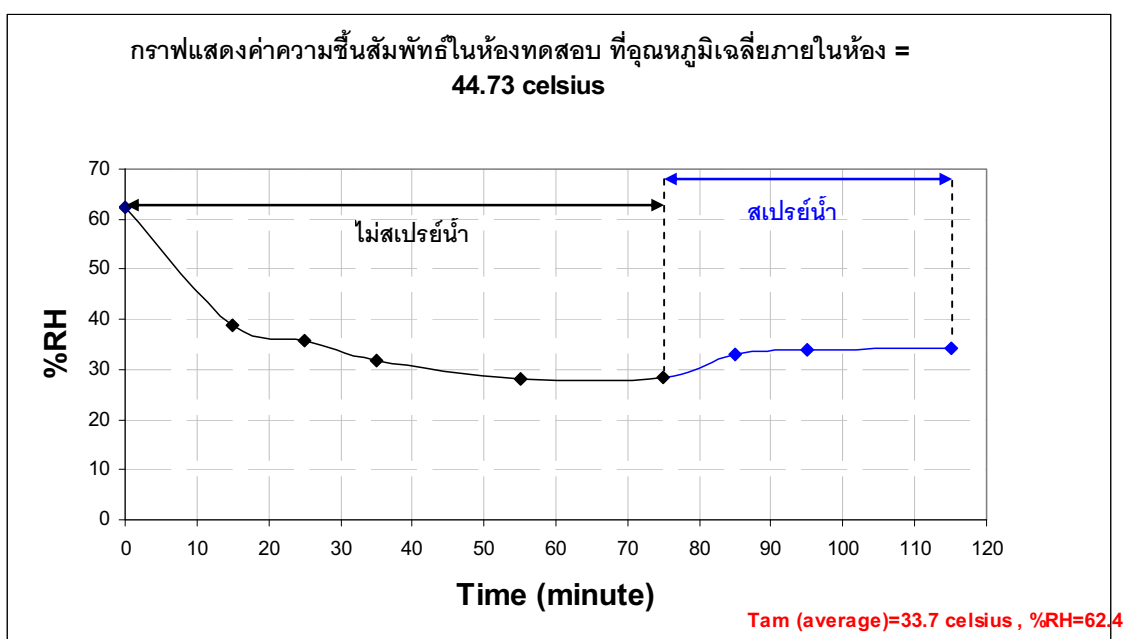


รูปที่ 3.18 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้อบที่วัดได้เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 35°C และสเปรย์น้ำ

จากรูปที่ 3.17 และ 3.18 เป็นการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบทั้งในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำและไม่สเปรย์น้ำ ผลการทดสอบพบว่าตู้อบที่สร้างขึ้นสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 35°C ได้ในกรณีที่ไม่สเปรย์น้ำ ส่วนกรณีสเปรย์น้ำ อุณหภูมิภายในตู้อบจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ประมาณ 2°C ทั้งนี้เนื่องจากขณะทดสอบอุณหภูมิของบรรยากาศต่ำกว่า 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ค่อนข้างสูง (ฝนตก) ทำให้ชุดควบคุมอุณหภูมิทำงานส่งสัญญาณควบคุมไปยังชุดทำความร้อนตลอดเวลาและตอบสนองสัญญาณตรวจวัดอุณหภูมิจริงที่ปรากฏเพื่อตัดการทำงานของชุดทำความร้อนได้ช้ากว่าปรกติ ดังนั้นในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจำเป็นต้องมีการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับควบคุมในชุดควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการตอบสนองกับสัญญาณอุณหภูมิตรวจวัดจริงที่ได้

ทั้งนี้ในการทดสอบเบื้องต้นเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในตู้อบทั้ง 3 อุณหภูมิ เป็นการทดสอบโดยใช้ตู้เปล่า ไม่มียางแผ่นดิบ และทดสอบที่ความเร็วรอบของพัดลมระบายอากาศทำงานที่ 1450 rpm โดยไม่ได้มีการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบแต่อย่างใด ดังนั้นในกรณีที่มีการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบของพัดลมระบายอากาศเพื่อปรับเปลี่ยนความเร็วลมของอากาศที่ไหลผ่านยางแผ่นดิบในการทดลอง จำเป็นต้องทดสอบและปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในชุดควบคุมอุณหภูมิใหม่อีกครั้งให้เหมาะสมเพื่อให้ตู้อบสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตั้งไว้

รูปที่ 3.19 แสดงผลการตรวจวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบเมื่อปรับตั้งอุณหภูมิภายในตู้อบไว้ที่ 45°C ในกรณีที่ไม่มี การสเปรย์น้ำและในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำ โดยที่อุณหภูมิบรรยากาศภายนอกตู้เท่ากับ 33.7°C ความชื้นสัมพัทธ์ 62.4% ผลการทดสอบพบว่าที่อุณหภูมิ 45°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่จะใช้ในการทดสอบการตากแห้งยางแผ่นดิบ ตู้อบจะมีความชื้นสัมพัทธ์ภายในประมาณ 28% (ที่เวลา 60-70 นาที โดยไม่สเปรย์น้ำ) และเมื่อสเปรย์น้ำ จะสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบได้ประมาณ 8% โดยยังคงรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 45°C ได้



รูปที่ 3.19 การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบที่ตรวจวัดเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิในตู้อบไว้ที่ 45°C ในกรณีที่ไม่มี การสเปรย์น้ำและในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำ

ในทำนองเดียวกันเมื่อทดสอบโดยการปรับตั้งอุณหภูมิภายในตู้อบไว้ที่ 40 และ 35°C ได้ผลดังนี้ (ไม่ได้แสดงด้วยกราฟ)

ที่ 40°C การสเปรย์น้ำสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ขึ้นไปได้ประมาณ 8% จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ที่ยังไม่ได้สเปรย์น้ำเท่ากับ 45.7% (Tambient (average) = 30.7 Celsius , %RH = 51.93)

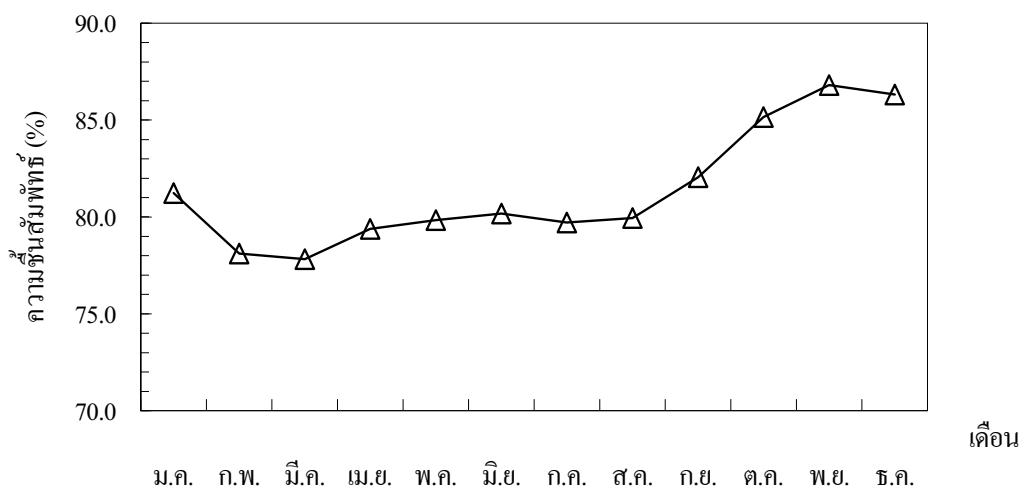
ที่ 35°C การสเปรย์น้ำสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ขึ้นไปได้ประมาณ 10% จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ที่ยังไม่ได้สเปรย์น้ำเท่ากับ 81% (Tambient (average) = 28.8 Celsius , %RH = 88)

ที่ 31.7°C (อุณหภูมิในตู้เท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศและไม่มี การเปิดชุดฮีตเตอร์ทำความร้อน) การสเปรย์น้ำสามารถเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ขึ้นไปได้ประมาณ 12% จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้ที่ยังไม่ได้สเปรย์น้ำเท่ากับ 57%

การทดสอบนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในตู้อบให้เพิ่มขึ้นได้ 8-12% ในขณะที่ยังคงรักษาอุณหภูมิภายในตู้อบไว้คงที่ได้ (ยกเว้นกรณีที่ไม้เปิดชุดฮีทเตอร์ทำความร้อน) ซึ่งในกรณีการทดสอบการอบแห้งยางแผ่นดิบจริงที่อุณหภูมิดังกล่าวที่ทดสอบ ในระยะเริ่มต้นของการอบ ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะสูงกว่าค่าที่ตรวจวัดเนื่องจากจะมีความชื้นจากผิวยางแผ่นดิบออกมาด้วย อย่างไรก็ตามในการทดลองจริงจะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองทั้งอุณหภูมิ ความเร็วลมของการระบายอากาศและระยะห่างระหว่างยางแผ่นดิบหลายๆค่าโดยใช้การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ครอบคลุมช่วงของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแห้งตัวของยางแผ่นดิบตามสถานะที่เป็นจริงในโรงตากแห้งยางแผ่นดิบต่อไป

สำหรับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของ อ.หาดใหญ่ ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่ตั้งของสหกรณ์สวนยางที่เข้าร่วมโครงการนี้ มีค่าอยู่ระหว่าง 77-86% ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ส่วนความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 62-84% ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ทั้งนี้การทราบข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่โครงการ ทำให้สามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบได้ครอบคลุมสภาพอากาศในพื้นที่นั้นๆ

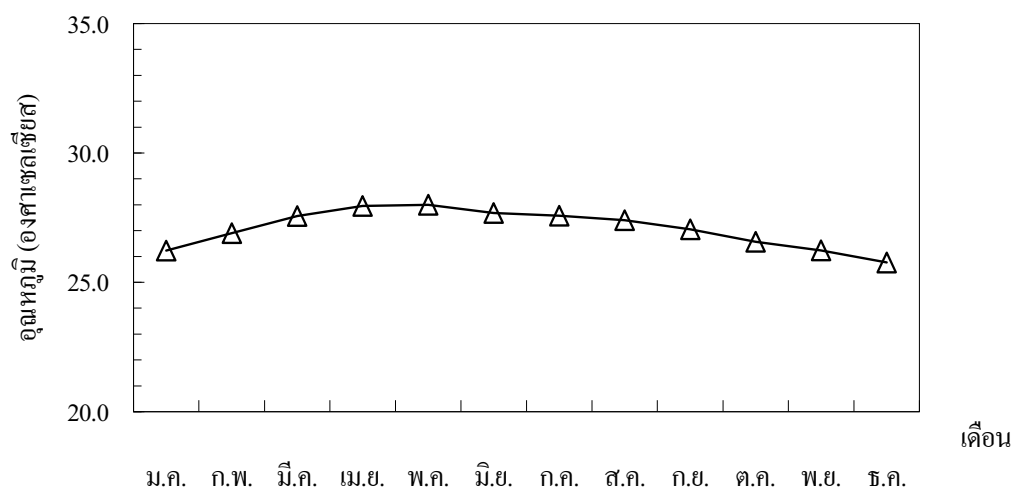


รูปที่ 3.20 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ระหว่างปี พ.ศ.2539-2546
(ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา, <http://www.tmd.go.th>)

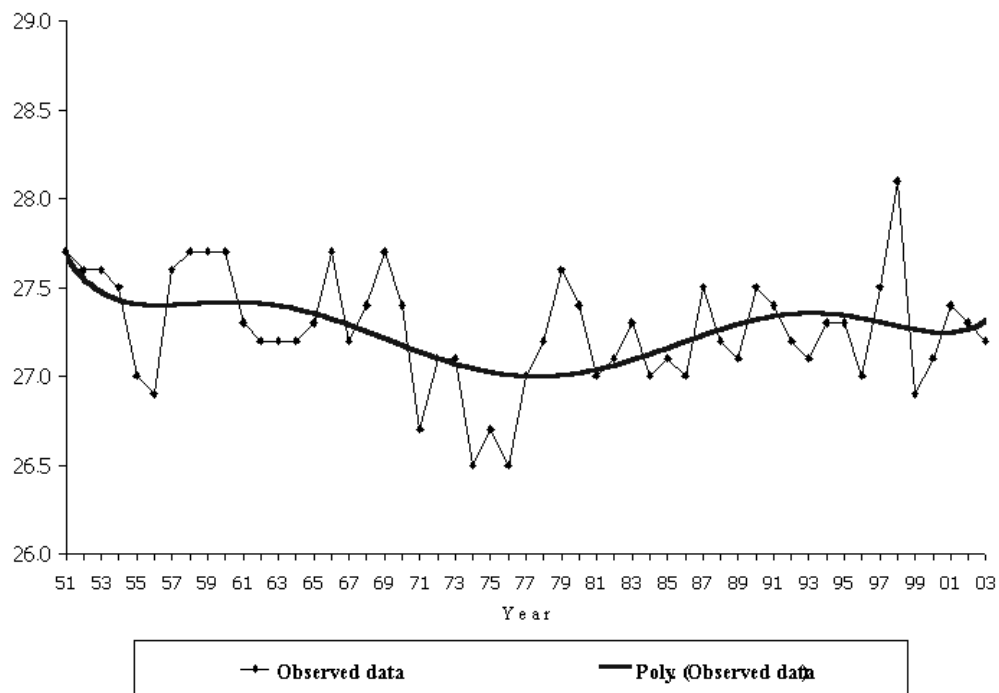
ตารางที่ 3.1 ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ
(ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา, <http://www.tmd.go.th>)

ภาค	หนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ตลอดปี
เหนือ	73	62	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	65	80	72
กลาง	71	69	79	73
ตะวันออก	71	74	81	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	81	77	78	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	77	76	84	80

อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของ อ.หาดใหญ่ มีค่าอยู่ระหว่าง 26-28°C ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ซึ่งจะใกล้เคียงกับ
อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 อุณหภูมิเฉลี่ย ของ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา ระหว่างปี พ.ศ.2539-2546
(ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา, <http://www.tmd.go.th>)



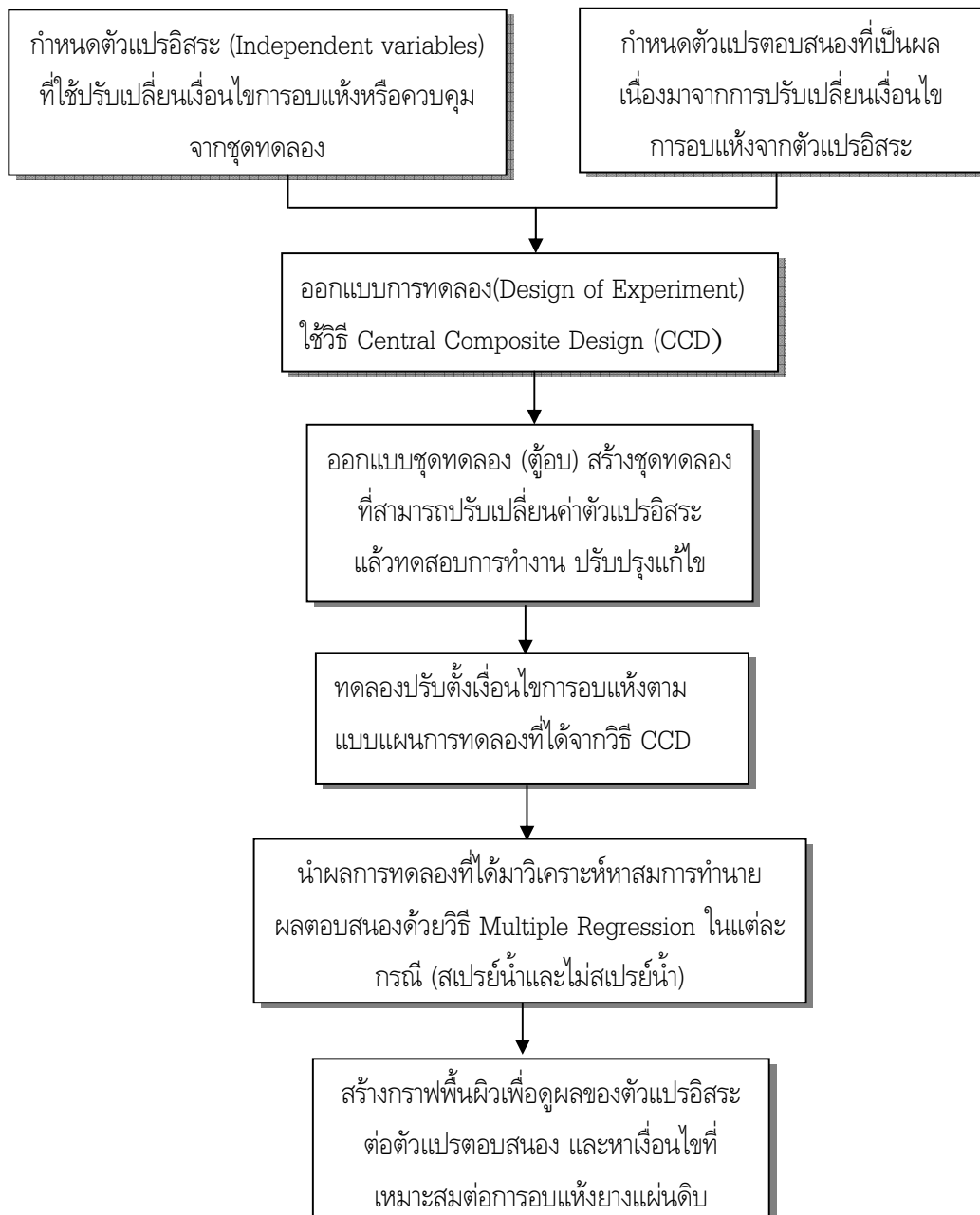
รูปที่ 3.22 อุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ.2494-2546
(ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา, <http://www.tmd.go.th>)

ในการทดลองนี้จะเลือกอุณหภูมิในช่วง $30-45^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่สามารถเป็นไปได้ในโรงตากแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ส่วนความชื้นสัมพัทธ์นั้น เนื่องจากอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของ อ.หาดใหญ่ มีค่าอยู่ระหว่าง $26-28^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าระหว่าง 77-86% เมื่ออากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง 77-86% ถูกทำให้ร้อนจาก $26-28^{\circ}\text{C}$ เป็น $30-45^{\circ}\text{C}$ จากการใช้แผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) โดยคิดอัตราส่วนความชื้นคงที่พบว่าอากาศจะมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 35-85% ดังนั้นในการทดลองจะใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในช่วงนี้

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบ

การศึกษาการตากแห้งยางแผ่นดิบที่เหมาะสมก่อนการรมควันด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เริ่มจากการศึกษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการแห้งของยางแผ่นดิบ โดยพิจารณาเสมือนว่ายางแผ่นดิบได้รับการผึ่งแห้งในโรงตากมีหลังคาโปร่งแสงเพื่อป้องกันความชื้นและฝนที่จะทำให้ยางแผ่นดิบยังคงมีความชื้นสูง ในการศึกษา

สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมจะศึกษาในชุดทดลองซึ่งเป็นตัวแปรอิสระต่ำ เป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตาก มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบดังแสดงตามผังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการดำเนินการสำหรับการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบ

ตัวแปรอิสระที่ถูกพิจารณาในการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในตู้อบคือ อุณหภูมิอบแห้งและความเร็วลม แม้ว่าอุณหภูมิการตากแห้งยางแผ่นดิบในโรงตากจะเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้เนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละท้องถิ่นในแต่ละวัน แต่การทราบว่าอุณหภูมิในแต่ละวันที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการแห้งของยางแผ่นดิบอย่างไร จะทำให้ทราบว่าควรจะตากยางแผ่นดิบไว้นานเท่าใดและความชื้นในยางแผ่นดิบควรจะลดลงเหลือเท่าใดในสภาพอุณหภูมินั้นๆ ส่วนความเร็วลมก็เป็นตัวแปรอิสระอีกตัวหนึ่งที่ส่งผลต่อการแห้งตัวของยางแผ่นดิบเนื่องจากทำให้เกิดกระบวนการพาความร้อนแบบธรรมชาติและทำให้เกิดการถ่ายเทมวลความชื้นจากแผ่นยางไปยังอากาศโดยรอบแผ่นยาง

แม้จะเป็นที่ทราบกันดีว่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะตากแห้งยางจะมีผลต่อการแห้งตัวของอีกปัจจัยหนึ่ง แต่เนื่องจากการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบให้คงที่ตลอดเงื่อนไขการอบแห้งในแต่ละการทดลอง ทำได้ยากและต้องใช้งบลงทุนสูงสำหรับอุปกรณ์ควบคุม อีกทั้งสภาพบรรยากาศในการตากแห้งยางจริงจะมีความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นในการทดลองนี้จะไม่ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในตู้อบไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่ง แต่จะปรับสภาพบรรยากาศการอบแห้งใน 2 กรณี คือ กรณีที่สเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ ซึ่งเปรียบเสมือนสภาพอากาศในวันที่มีความชื้นมาก มีความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์น้อยหรือมีฝนตก และกรณีที่ไม่มี การสเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ ซึ่งเปรียบเสมือนสภาพบรรยากาศปกติที่ไม่มีฝนตกในช่วงฤดูกาลที่ดำเนินการทดลอง

ตัวแปรตอบสนองที่ถูกพิจารณาในการทดลองอบแห้งยางแผ่นดิบในตู้อบคือ ความชื้นของยางแผ่นดิบ และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยางแผ่นดิบในสภาพเงื่อนไขที่ได้มีการปรับตั้งตัวแปรอิสระไว้ทั้งในกรณีที่มีการสเปรย์น้ำและไม่ได้มีการสเปรย์น้ำให้กับอากาศก่อนเข้าตู้อบ ความชื้นของยางแผ่นดิบหลังอบแห้งถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากความชื้นยางก่อนเข้าโรงรมจะส่งผลต่อการใช้พลังงานความร้อนในการรมยาง ส่วนเวลาในการอบแห้งยางจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าในสภาพบรรยากาศที่อบแห้งนั้นๆ ระยะเวลาที่ใช้ในการลดความชื้นยางแผ่นดิบเป็นเท่าใด

การทำเงื่อนไขหรือช่วงของตัวแปรอิสระที่ทำให้ได้เวลาในการอบแห้งยางแผ่นดิบที่น้อยและลดความชื้นในยางลงได้มาก จะช่วยให้ทราบว่ายางแผ่นดิบที่ตากภายในโรงตากมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างไรเมื่อดตากอยู่ในสภาพบรรยากาศปกติในแต่ละวัน

การศึกษาตากแห้งยางแผ่นดิบที่เหมาะสมก่อนการรมควันด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาอบแห้งยางแผ่นดิบในตู้อบทดสอบที่ออกแบบสร้างขึ้น เพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแผ่นดิบระหว่างการอบ ด้วยเงื่อนไขของอุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้อบแห้งต่างกัน เนื่องจากในการตากแห้งยางแผ่นดิบก่อน

รมควนในโรงตากทั่วไปในช่วงเวลากลางวันจะมีอุณหภูมิภายในโรงตากประมาณ 30- 45°C และความชื้นสัมพัทธ์บริเวณรอบๆยางแผ่นดิบบนราวตากมีค่ามากกว่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศภายนอกโรงตากประมาณ 5-15% ส่วนในช่วงที่มีสภาพอากาศมีความชื้นสูง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงตากกับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการทดสอบอบแห้งยางแผ่นดิบนี้จะปรับตั้งอุณหภูมิภายในตู้อบไว้ในช่วงอุณหภูมิ 33-47°C เหตุผลในการเลือกใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 33 °C เนื่องจากต้องการให้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าทำงานและสามารถควบคุมอุณหภูมิในตู้อบได้ การทดสอบอบแห้งยางแผ่นดิบจะทดสอบทั้งกรณีการฉีดน้ำให้กับอากาศก่อนอบแห้งและไม่ฉีดน้ำเพื่อเปรียบเทียบผลของความชื้นอากาศต่อระยะเวลาที่ใช้อบแห้ง รวมถึงความชื้นในยางแผ่นดิบหลังการอบแห้ง ผลของระยะห่างระหว่างยางแผ่นดิบต่อการแห้งของยางแผ่นดิบได้จากการทดสอบอบแห้งยางแผ่นดิบ สำหรับการเปรียบเทียบระยะห่างที่ใช้ในการจัดเรียงแผ่นยาง จะเปรียบเทียบโดยใช้ระยะห่างแบบเดียวกับที่มีการจัดเรียงในโรงรมควนของสหกรณ์โรงรมยางที่ปฏิบัติกันกับระยะห่างที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการแขวนยางแห้งแผ่นดิบบนราวตากในตู้อบทดสอบ

การจัดเรียงยางแผ่นดิบในตู้อบทดสอบจะจัดเรียงยางแผ่นดิบแขวนพาดกับราวอะลูมิเนียมขนาด $\phi 1"$ x 1.10 m จำนวน 5 ท่อน 2 แถว (รวม 10 ท่อน) ตากยางแผ่นดิบขนาด 50 x 90 cm จำนวน 20 แผ่น มีระยะห่างระหว่างราวแขวนยางแต่ละท่อนประมาณ 1" รูปยางแผ่นดิบที่แขวนบนราวตากให้ตู้อบทดสอบอบแห้งแสดงดังรูปที่ 3.24 ยางแต่ละแผ่นจะมีความหนาใกล้เคียงกันโดยประมาณ 4-5 มม. ยางแผ่นดิบที่ใช้ทดสอบอบแห้งจะเพิ่งรีดออกมาจากเครื่องรีดยางซึ่งจะมีสีขาวทั้งแผ่น ราคาจำหน่ายต่อกิโลกรัมอยู่ที่ 68-72 บาท (พ.ย.48-เม.ย.49) และ

ถูกไล่เลียงจากสทกรณีโรงรมยางมายังพื้นที่ทำการทดลองโดยการแช่น้ำระหว่างการขนส่งเพื่อป้องกันการเกาะติดกันของแผ่นยางแต่ละแผ่น จากนั้นจึงนำยางแผ่นดิบมาพาดไว้กับราวให้พอสะเด็ดน้ำ โดยไม่รอให้แห้ง (ผิวยางยังคงเปียก) จึงนำเข้าตู้อบแห้ง ยางแผ่นดิบแต่ละชุดที่นำมาใช้ในการทดลองจะถูกชักตัวอย่างจำนวน 1 แผ่น เพื่อนำไปหาความชื้นเริ่มต้นและมวลแห้ง ระหว่างการทดลองอบแห้งได้บันทึกค่าน้ำหนักยางแผ่นดิบที่ตรวจวัดได้จาก Load cell ตามเวลาเพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงความชื้นของยางแผ่นดิบในแต่ละช่วงเวลา

การทดสอบอบแห้งยางแผ่นดิบในเงื่อนไขที่แตกต่างกันใช้วิธีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและปรับตั้งค่าความถี่ของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบพัดลมดูดอากาศบริเวณปล่องด้านบนของตู้ทดสอบที่ตู้ควบคุมดังในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ค่าปรับตั้งบนตู้ควบคุมอบแห้งยางแผ่นดิบ

3.6 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนการทดลองว่าควรจะปรับเปลี่ยนตัวแปรอิสระไปเป็นค่าใดในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง และควรจะทำการทดลองทั้งหมดกี่การทดลองเพื่อให้ครอบคลุมช่วงของตัวแปรอิสระที่สนใจ การออกแบบการทดลองที่ดีจะทำให้ได้ข้อมูลที่ครบถ้วนเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เพื่อหาผลตอบสนองที่ต้องการในช่วงที่ปรับเปลี่ยนตัวแปรอิสระ และสามารถนำไปใช้ทำนายผลตอบสนองในกรณีที่ไม่มีผลการทดลองแต่เงื่อนไขตัวแปรอิสระอยู่ในช่วงที่กำหนดได้อย่างใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการทำนายดังกล่าวเกิดจากการใช้ข้อมูลการทดลองมาสร้างสมการการทำนายโดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นและยอมรับในค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ไม่ต่ำจนเกินไป

การเลือกแบบจำลองสำหรับทำนายผลตอบสนองของตัวแปรอิสระจากการทดลองที่นิยมใช้กันทั้งในทางวิศวกรรมตามหลักทางสถิติ คือ second-order response surface model เนื่องจากผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองมักจะไม่เป็นเชิงเส้น และแบบแผนการทดลองแบบ first-order designs เช่น factorial design ไม่สามารถนำไปใช้ในการสร้าง model ที่ใช้ทำนายผลตอบสนองได้อย่างถูกต้อง สำหรับการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมกับการนำไปสร้าง second-order response surface model คือ การใช้วิธี central-composite design

รูปแบบของ Second-Order Model ที่ใช้ คือ

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j>1}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3.1)$$

เขียนสมการ (1) ในรูปแบบของ Taylor

$$\eta = \beta_0 + \beta^T X + \frac{1}{2} X^T B X \quad (3.2)$$

$$\beta^T = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) \quad (3.3)$$

เขียนเมตริกซ์ B เป็น