

บทที่ 3

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

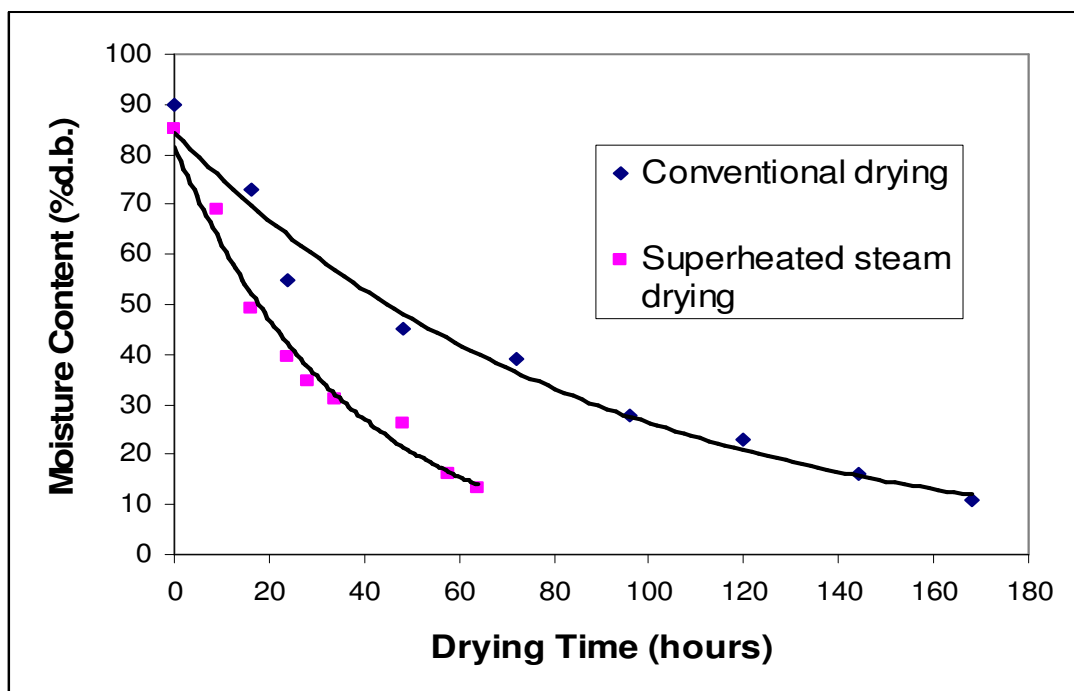
การผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง มีเนื้อหาที่จะกล่าวถึงดังนี้ การเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้ง, ข้อมูลของอุณหภูมิ, การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล, ข้อมูลการใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งและความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

3.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นไม้ยางต่อเวลาอบแห้ง

3.1.1 การเปรียบเทียบระหว่างการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้งของการอบแห้งแบบทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมกับการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อน

กราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม้ยางต่อเวลาอบแห้งระหว่างการอบแห้งแบบทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม (conventional drying) กับการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนดังภาพประกอบที่ 3-1 พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนสามารถลดเวลาการอบแห้งจาก 168 ชั่วโมง เหลือเพียง 64 ชั่วโมง ที่ระดับความชื้น 15% มาตรฐานแห้ง

จากภาพประกอบที่ 3-1 ส่วนของกราฟการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้งไม้ยางเมื่ออบด้วยไอน้ำยิ่งยวดและลมร้อน สามารถช่วงเวลาของกราฟแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ: (1) ช่วงเริ่มแรกการให้ความร้อน (the initial heating period) จะทำให้อุณหภูมิของไม้เกิดการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิต่ำสุดถึงจุดเดือดของน้ำจากกราฟช่วงเริ่มแรกในการให้ความร้อนนี้ในกราฟไม่ชัดเจนเนื่องจากระยะเวลาสั้นๆมาก, (2) ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (the constant drying period) ช่วงนี้ใช้เวลา 16 ชั่วโมง มีอัตราการอบแห้งสูงเนื่องจากน้ำอิสระ (free water) ที่มีอยู่จะระเหยออกมาจากไม้ก่อนน้ำส่วนอื่นๆ และ (3) ช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง (the falling rate period) จะเริ่มต้นที่ความชื้นไม้ประมาณ 35% มาตรฐานแห้ง พบว่าน้ำส่วนที่เกิดพันธะเคมีในเนื้อไม้ (bound water) จะเริ่มระเหยออกมาแต่อัตราการระเหยออกมาจะน้อยกว่าอัตราการอบแห้งคงที่ เพราะว่าต้องใช้พลังงานสูงในการระเหยน้ำที่เกิดพันธะทางเคมี (bound water) ออกจากเนื้อไม้ ดังนั้นอัตราการอบแห้งจึงลดลง ช่วงนี้ใช้เวลา 48 ชั่วโมง



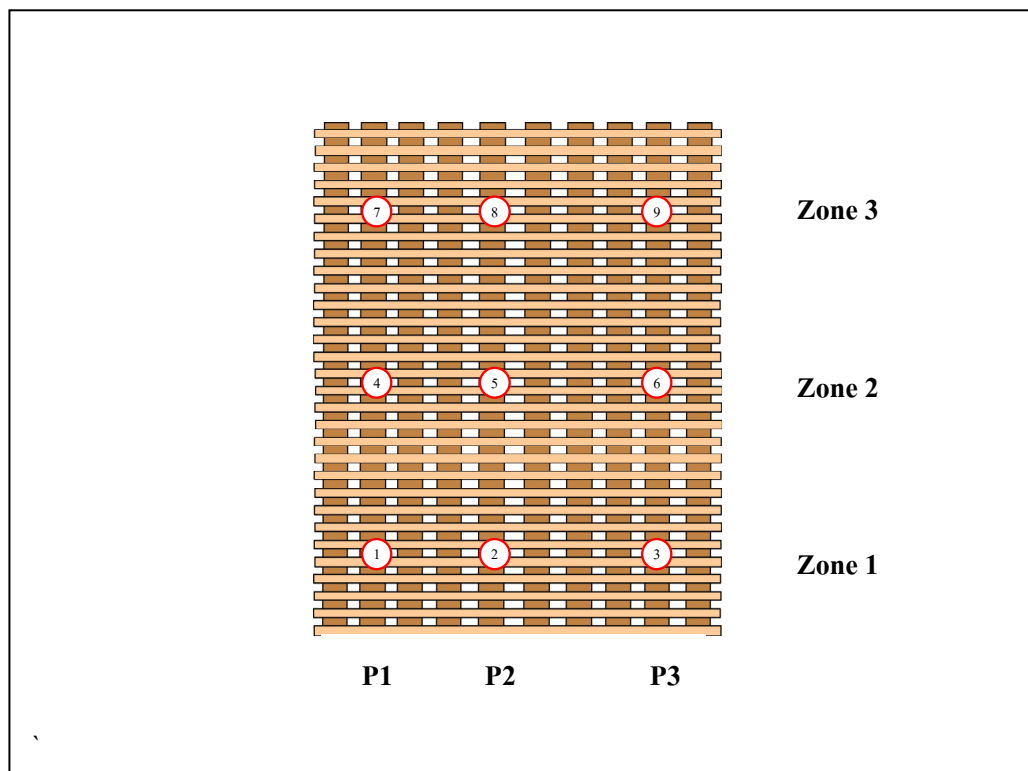
ภาพประกอบที่ 3-1 กราฟของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้งของการอบแห้งด้วยไอน้ำ
ยิ่งยวดกับลมร้อนเปรียบเทียบกับการอบแบบทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

3.1.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบของการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้งด้วยไอน้ำ ยิ่งยวดกับลมร้อนของไม้ยางแต่ละชั้นในกองไม้

การอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลา
อบแห้งในแต่ละชั้นของกองไม้จะไม่เท่ากันเนื่องจากปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแห้งคือ อุณหภูมิ
และความเร็วลม โดยตัวแทนไม้ทั้งกองที่อบแห้งแบ่งเป็น 3 ระดับคือบริเวณด้านล่างกองไม้ (ชั้นที่
5), บริเวณตรงกลางกองไม้ (ชั้นที่ 15) และบริเวณด้านบนกองไม้ (ชั้นที่ 25)

จากภาพประกอบที่ 3-2 แสดงตำแหน่งภายในกองไม้ที่มีการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิ
ที่อบแห้ง เพื่อให้ทราบแนวโน้มของการแห้งของไม้ในแต่ละส่วนว่าบริเวณไหนจะแห้งเร็วที่สุด
หรือช้าที่สุด ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วลมในกองไม้

จากภาพประกอบที่ 3-3 แสดงการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความชื้นต่อเวลาอบแห้ง
ในกองไม้ชั้นที่ 5, 15 และ 25 พบว่า ไม้ยางในชั้นที่ 5 ความชื้นภายในไม้ที่ลดลงต่อเวลาอบแห้งมีค่า
สูงที่สุด ส่วนไม้ชั้นที่ 25 มีการลดลงความชื้นต่อเวลาอบแห้งที่ต่ำที่สุด ซึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการ
เปลี่ยนแปลงความชื้น ไม้ยางในขณะอบแห้งคือ อุณหภูมิและความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านในกองไม้ที่
อบแห้ง



ภาพประกอบที่ 3-2 แสดงตำแหน่งภายในกองไม้ที่มีการวัดความเร็วลมเลออุณหภูมิมอบแห้ง

หมายเหตุ: Zone 1 = ไม้ชั้นที่ 5 ของกองไม้

Zone 2 = ไม้ชั้นที่ 15 ของกองไม้

Zone 3 = ไม้ชั้นที่ 25 ของกองไม้

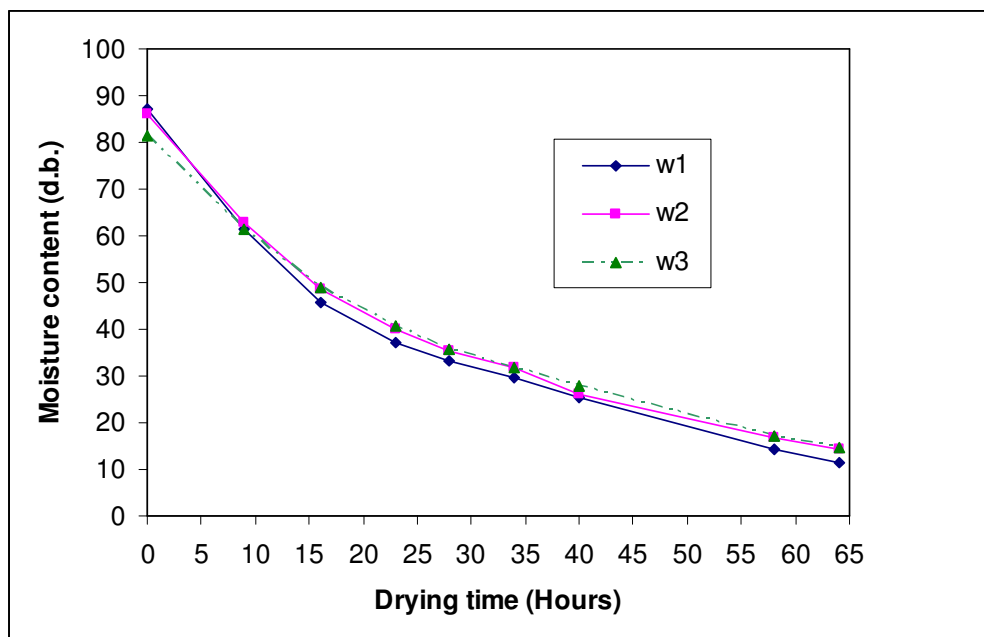
P1 = ไม้ตำแหน่งทางซ้ายของกองไม้

P2 = ไม้ตำแหน่งตรงกลางของกองไม้

P3 = ไม้ตำแหน่งทางขวาของกองไม้

จากภาพประกอบที่ 3-4 แสดงค่าความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านในกองไม้ขณะอบแห้งทำการวัดความเร็วลมบริเวณต่างๆ 3 บริเวณคือ ด้านล่างกองไม้ (ชั้นที่ 5), กลางกองไม้ (ชั้นที่ 15) และด้านบนกองไม้ (ชั้นที่ 25) พบว่าความเร็วลมด้านล่างกองไม้ที่วัดได้มีค่าสูงกว่าบริเวณอื่นๆ คือมีค่า 1.4-1.45 เมตร/วินาที ส่วนความเร็วลมบริเวณกลางกองไม้วัดค่าได้ 0.93-1.16 เมตร/วินาที และบริเวณด้านบนพบว่าความเร็วลมต่ำสุดวัดค่าได้ 0.59-0.61 เมตร/วินาที อิทธิพลเนื่องจากความเร็วลมความเร็วลมที่เคลื่อนที่ผ่านกองไม้มีผลต่อการแห้งของไม้ยาง เมื่อลมเคลื่อนที่ผ่านเร็วขึ้นสามารถระเหยน้ำที่ผิวไม้ออกไปได้เร็วมีผลให้น้ำภายในเนื้อไม้เคลื่อนตัวมายังที่ผิวเร็วขึ้น

ความชื้นภายในไม้จึงลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ไม้ยางแห้งเร็วขึ้น บริเวณด้านล่างของกองไม้มีค่าความเร็วของลมที่เคลื่อนที่ผ่านสูงที่สุดทำให้ไม้ยางบริเวณนี้แห้งเร็วที่สุด



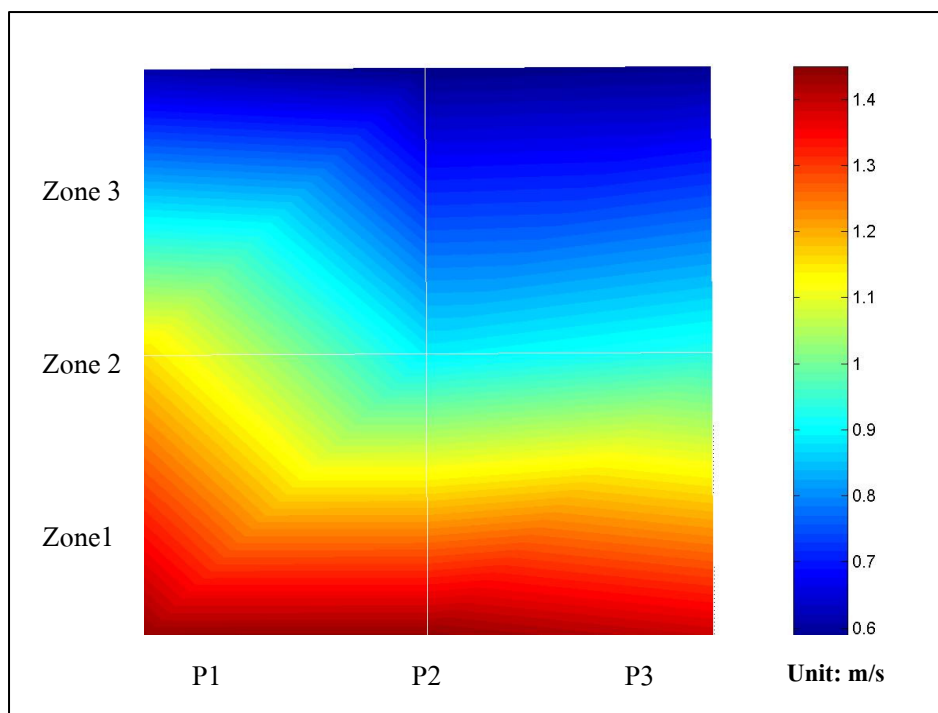
ภาพประกอบที่ 3-3 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งของไม้ในแต่ละชั้นในกองไม้

หมายเหตุ: W 1 = ไม้ยางในชั้นที่ 5

W 2 = ไม้ยางในชั้นที่ 15

W 3 = ไม้ยางในชั้นที่ 25

จากภาพประกอบที่ 3-5 แสดงอุณหภูมิภายในกองไม้ขณะอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดพบว่า ไม้ชั้นล่าง (ชั้นที่ 5) วัดอุณหภูมิที่อบแห้งสูงสุดประมาณ 105-106.5 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณ กลางกองไม้ (ชั้นที่ 15) มีอุณหภูมิ 103.5-105 องศาเซลเซียส และไม้ชั้นบริเวณด้านบนของกองไม้ (ชั้น 25) วัดอุณหภูมิได้ 102-104 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของไม้ยางแต่ละส่วนในกองไม้ไม่แตกต่างกันมากนัก อยู่ระหว่าง 102-106.5 องศาเซลเซียส จึงมีผลต่อการแห้งของไม้ไม่มากนัก



ภาพประกอบที่ 3-4 แสดงความเร็วลมภายในของกองไม้ขณะอบแห้ง

หมายเหตุ: Zone 1 = ไม้ยางชั้นที่ 5 ของกองไม้

Zone 2 = ไม้ยางชั้นที่ 15 ของกองไม้

Zone 3 = ไม้ยางชั้นที่ 25 ของกองไม้

P1 = ไม้ตำแหน่งด้านซ้ายของกองไม้

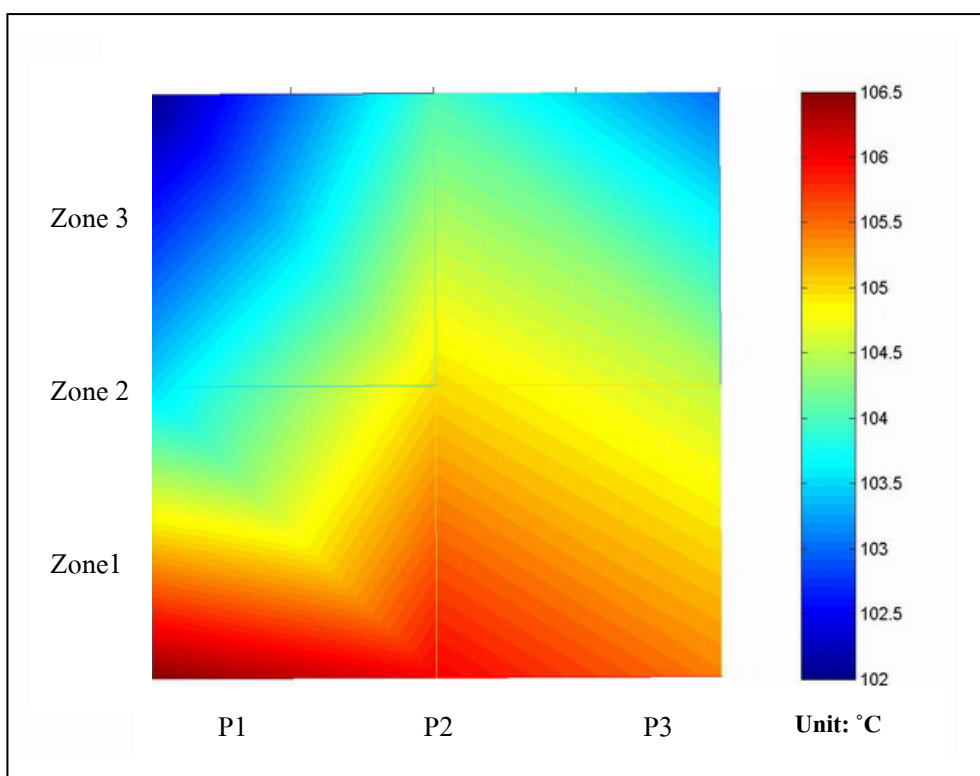
P2 = ไม้ตำแหน่งตรงกลางของกองไม้

P3 = ไม้ตำแหน่งด้านขวาของกองไม้

3.2 ข้อมูลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศในกระบวนการอบแห้ง

จากภาพประกอบที่ 3-6 พบว่าอุณหภูมิภายในของห้องอบไม้ยางจะใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิในการอบแห้งให้ถึง 100 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 1.5 ชั่วโมง (สภาวะการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวด) ในขณะที่อุณหภูมิการอบแห้งที่ผิวไม้ยางและที่ตรงกลางเนื้อไม้จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้องอบไม้ยางเล็กน้อยเพราะว่าสารละลายที่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่อยู่ภายในเนื้อไม้ เช่น เซลลูโลส, ลิกนิน, เถ้าและเพนโตซาน

จากภาพประกอบที่ 3-7 แสดงข้อมูลอุณหภูมิภายในของห้องอบไม้ยางตลอดกระบวนการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น 100 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา



ภาพประกอบที่ 3-5 แสดงอุณหภูมิภายในของกอกไม้ขณะอบแห้ง

หมายเหตุ: Zone 1 = ไม้ยางชั้นที่ 5 ของกอกไม้

Zone 2 = ไม้ยางชั้นที่ 15 ของกอกไม้

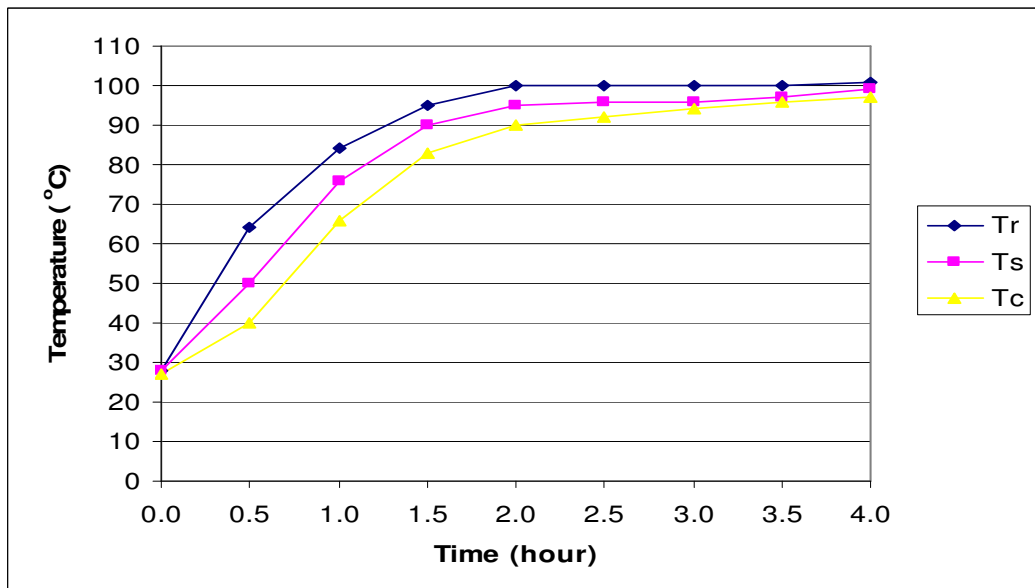
Zone 3 = ไม้ยางชั้นที่ 25 ของกอกไม้

P1 = ไม้ตำแหน่งด้านซ้ายของกอกไม้

P2 = ไม้ตำแหน่งตรงกลางของกอกไม้

P3 = ไม้ตำแหน่งด้านขวาของกอกไม้

1.5 ชั่วโมง การอบแห้งใน 4 ชั่วโมงแรกนี้จะใช้อุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิไม่สูงมากนักเพื่อปรับให้อุณหภูมิในเนื้อไม้ค่อยๆเพิ่มป้องกันไม้แตกหักและโค้งงอ หลังจากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิเป็น 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงอบแห้งสลับด้วยลมร้อน 1 ชั่วโมง เพื่อลดอุณหภูมิให้ไม้คลายตัว ทั้งหมดคือการอบ 1 ช่วงของการอบแห้ง ทำการอบแบบสลับระหว่างไอน้ำยิ่งยวดกับ ลมร้อนอีก 5 ช่วง โดยในช่วงการอบสลับที่ 5 จะเริ่มมีการใช้ลมร้อนอบแห้งเท่ากับไอน้ำยิ่งยวด (3 ชั่วโมง :3 ชั่วโมง) เนื่องจากความชื้นในไม้มีค่าประมาณ 35 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง หลังจากนั้นในช่วงการอบที่ 6 จะมีการใช้ลมร้อนมากขึ้นเป็น 5 ชั่วโมง ไอน้ำยิ่งยวด 1 ชั่วโมง ส่วนการอบในในคาบที่ 7 นั้นจะใช้ลมร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส ในกระบวนการอบแห้งเพียงอย่าง

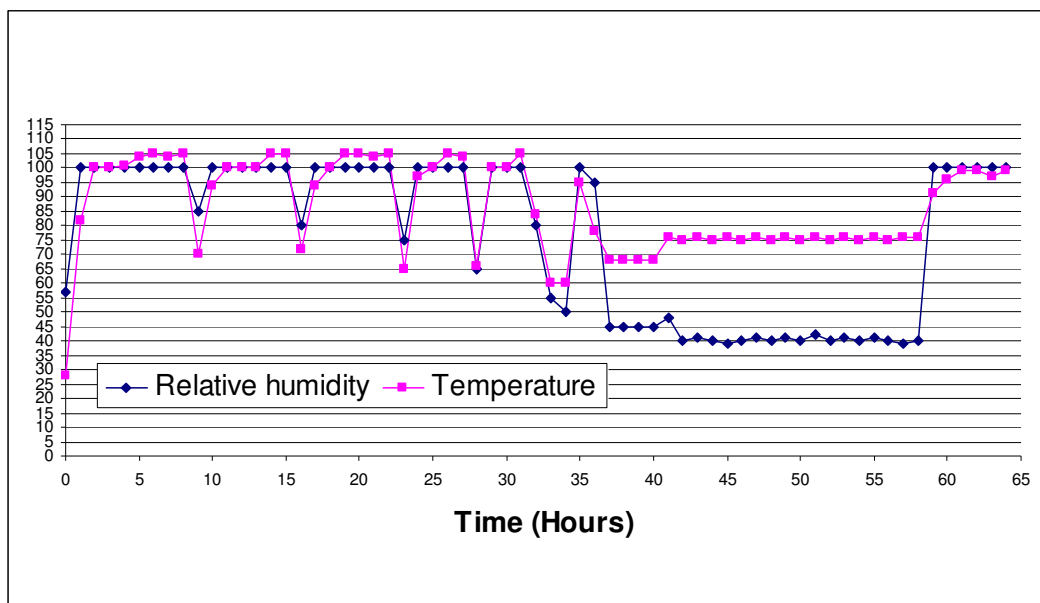


ภาพประกอบที่ 3-6 แสดงอุณหภูมิช่วงเริ่มต้นกระบวนการอบแห้งของอุณหภูมิห้องอบ, อุณหภูมิที่ผิวไม้ยางและอุณหภูมิบริเวณกลางเนื้อไม้ยาง

หมายเหตุ: Tr = อุณหภูมิของห้องอบ

Ts = อุณหภูมิที่ผิวไม้ยาง

Tc = อุณหภูมิบริเวณกลางเนื้อไม้ยาง



ภาพประกอบที่ 3-7 แสดงข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์บรรยากาศตลอดกระบวนการอบแห้งไม้ยาง

เดียวเป็นเวลา 18 ชั่วโมงโดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในห้องอบไม้อยู่ที่ 40% เพื่อต้องการกำจัดน้ำในส่วนที่เกิดพันธะกับเนื้อไม้ (bound water) ให้ออกมาและในคาบที่ 8 ซึ่งเป็นคาบสุดท้ายจะมีการใช้น้ำอิมมersion ในการอบแห้งเพื่อเพิ่มความชื้นให้แก่ผิวไม้ทำให้ความเค้นในเนื้อไม้ลดลง

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยาง

3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (Physical Properties)

การนำไม้ที่แปรรูปมาทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องตกแต่งภายใน ผนังและพื้น หากไม่มีตำหนิแล้วบริเวณตำหนิต้องเป็นที่ยอมรับได้ โดยตำหนิไม้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอบแห้ง เช่น ตำหนิที่ผิว, ที่ปลายไม้, บริเวณภายในและการเกิดรา มักถูกให้ความสำคัญกว่าการบิดงอของไม้ เนื่องจากการบิดงอไม้ได้ถูกพิจารณาเป็นตำหนิหลักตามข้อบังคับขององค์การไม้เนื้อแข็งนานาชาติ (National Hardwood Lumber Association, NHLA) ส่วนค่าความชื้นเบี่ยงเบนที่ยอมรับกันต้องไม่เกิน 2-3 เปอร์เซ็นต์

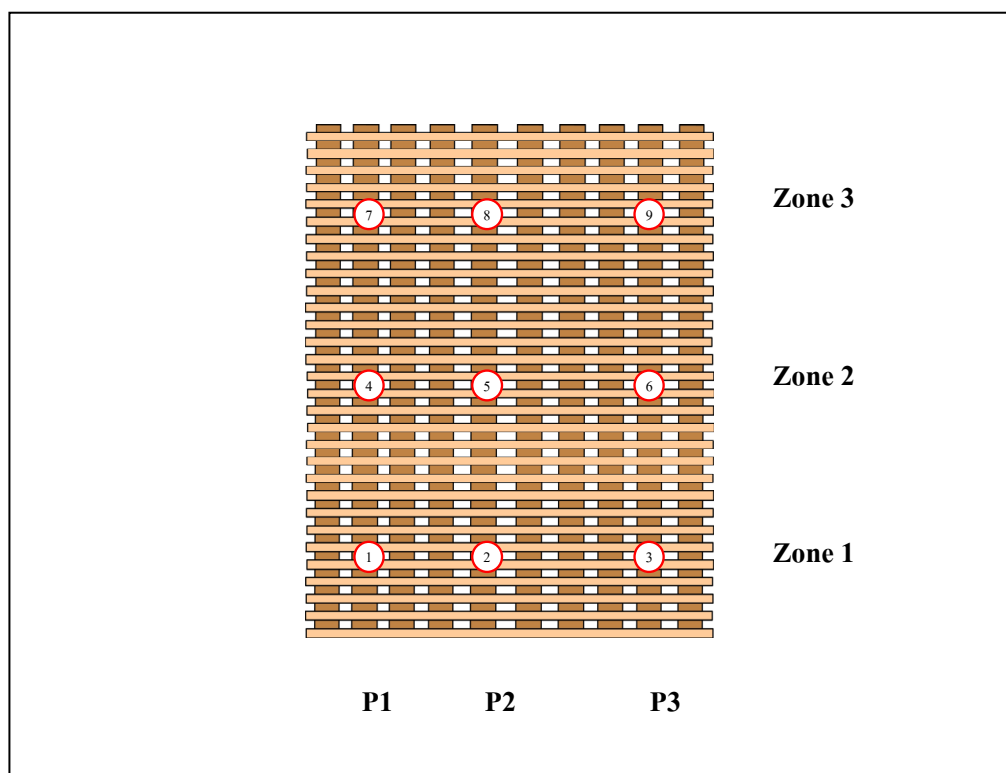
ในกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งชิดกับลมร้อน พบว่าไม้ยางทั้งกองที่อบแห้งแล้วมีตำหนิเกิดขึ้นเกินกว่าจะยอมรับได้อยู่ประมาณ 3-4% โดยลักษณะไม้ยางหลังอบแห้งที่ดีเป็นที่ยอมรับแสดงดังภาพประกอบที่ 3-8



ภาพประกอบที่ 3-8 ลักษณะของไม้ยางที่ดีหลังอบแห้ง

ลักษณะของไม้ยางที่ตีหลังอบแห้ง ได้ดังภาพประกอบที่ 3-8 มีลักษณะตรงไม่งอและแตกหักทั้งในแนวกว้างและความหนาของไม้ยาง รวมทั้งไม้ยางไม่มีการแตกบริเวณปลายทั้ง 2 ด้าน แต่ไม้ยางที่อบแห้งแล้วจะมีสีคล้ำเล็กน้อย

ผิวไม้ที่มีสีคล้ำอันเนื่องมาจากสารเคมีที่แทรกอยู่ในเนื้อไม้เกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรียทำให้เกิดผลผลิตขึ้นมามีผลต่อการเกิดสีคล้ำ แล้วเมื่อไม้ยางผ่านการอบแห้งด้วยความร้อนและภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน มีผลให้ผลผลิตเปลี่ยนเป็นสีคล้ำขึ้นมา (Simpson, et al., 1991)



ภาพประกอบที่ 3-9 การจัดวางกองไม้สำหรับอบแห้งและตำแหน่งที่สุ่มตัวอย่างไม้

จากภาพประกอบที่ 3-9 ตำแหน่งสำหรับสุ่มตัวอย่างสำหรับอบแห้งนั้นทำการสุ่มมาจากกองไม้บริเวณด้านล่าง, ตรงกลาง และด้านบนกองไม้ โดยด้านล่างทำการสุ่มจากชั้นที่ 5 จำนวน 3 ท่อน ดังรูปหมายเลข 1, 2 และ 3 ส่วนบริเวณกลางไม้นั้นสุ่มจากตัวอย่างไม้หมายเลข 4, 5 และ 6 สุดท้ายคือ ด้านบนกองไม้สุ่มมาจากหมายเลข 7, 8 และ 9

หลังจากอบแห้งไม้จนได้ความชื้นไม้สุดท้ายที่ต้องการ (ไม่เกิน 15% มาตรฐานแห้ง) แล้วจึงทำการตรวจสอบค่าความเค้น (stress) ที่มีในไม้โดยการทดสอบทางสายตา (visible test) และทดสอบแบบซี่ส้อม (prong test) ลักษณะของรูปร่างไม้รูปตัวยู (U-shape) จะบ่งบอกลักษณะความเค้นภายในของไม่ว่าเป็น Casehardening, Reverse casehardening หรือ No casehardening เพื่อเป็น

แนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการอบแห้งจนได้ไม้ที่มีคุณภาพ ลักษณะของไม้อบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนที่สภาวะเหมาะสมนำมาทดสอบแบบชีส์้อม ดังภาพประกอบที่ 3-10 และ 3-11



ภาพประกอบที่ 3-10 แสดงไม้ที่อบแห้งแล้วที่ปราศจากความเค้นในเนื้อไม้



รูปประกอบที่ 3-11 แสดงไม้ที่อบแห้งแล้วที่ปราศจากความเค้นในเนื้อไม้ยัง

3.3.2 คุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties)

ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะของไม้ยางหลังอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อน เปรียบเทียบกับไม้ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งแบบทั่วไปในโรงงานทำได้โดยการวัดค่าของคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งค่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางหลังอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนเป็นค่าที่ความชื้นเฉลี่ยไม่เกิน 15% มาตรฐานแห้ง ในขณะที่ค่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางจากโรงงานนั้นเป็นค่าที่ความชื้นเฉลี่ยไม่เกิน 12% มาตรฐานแห้ง

จากภาพประกอบที่ 3-12, 3-13 และ 3-14 แสดงค่าเฉลี่ยของความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน (shear strength parallel to grain), ความเค้นอัดขนานเสี้ยน (compression strength parallel to grain) และความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน (compression strength perpendicular to grain) สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนพบว่ามียังค่า 8.12, 39.9 และ 18.32 เมกะปาสคาล (MPa) ตามลำดับ

ส่วนภาพประกอบที่ 3-15, 3-16 และ 3-17 แสดงค่าเฉลี่ยของโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture), โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และค่าความแข็ง (hardness) สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนพบว่ามียังค่า 84.2, 12,877 เมกะปาสคาล (MPa) และ 5,692 นิวตัน(N) ตามลำดับ

จากกระบวนการอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดและลมร้อน สามารถลดระยะเวลาในการอบจาก 168 ชั่วโมง เหลือเพียง 64 ชั่วโมง ซึ่งเป็นผลดีในแง่ทางเศรษฐศาสตร์ในการลดต้นทุนของการอบแห้งไม้ยาง แต่พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนมีค่าแปรผันเมื่อเทียบกับการอบแบบทั่วไป (conventional drying)

ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของไม้หลังอบแห้งพบว่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง (Ref) พบว่ามีค่าสูงกว่าทุกค่ายกเว้นค่าความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน (shear strength parallel to grain) ในขณะที่เปรียบเทียบกับการอบแบบทั่วไป (conventional drying) พบว่าค่าความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน (shear strength parallel to grain), ความเค้นอัดขนานเสี้ยน (compression strength parallel to grain) และ โมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture) ของการอบด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนมีค่าน้อยกว่าการค่าของการอบแบบทั่วไป ส่วนค่าอีก 3 ค่าได้แก่ ความเค้นอัดตั้งฉากเสี้ยน (compression strength perpendicular to grain), โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และค่าความแข็ง (hardness) มีค่ามากกว่าค่าของการอบแบบทั่วไป

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าเฉลี่ย (Mean), สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COV), ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าสูงสุด (Maximum) ของความชื้น ไม้ยาง

Condition	Properties	Moisture Content (%)			
		Mean	COV (%)	Minimum	Maximum
1. Superheated steam drying	Shear Strength Parallel to grain	13.59	8.24	11.92	15.05
	Compressive strength				
	● Parallel to grain	13.59	8.24	11.92	15.05
	● Perpendicular to grain	13.59	8.24	11.92	15.05
	Static bending	13.59	8.24	11.92	15.05
	Hardness	13.59	8.24	11.92	15.05
2. Coventional drying (from Rattapoom parawood factory)	Shear Strength Parallel to grain	9.38	5.03	8.25	10.16
	Compressive strength				
	● Parallel to grain	9.69	1.68	9.37	10
	● Perpendicular to grain	9.38	2.32	9.06	9.85
	Static bending	9.44	2.4	8.98	9.89
	Hardness	9.15	1.67	8.85	9.49

* ตัวอย่างชื้น ไม้ยางสำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแต่ละค่ามีจำนวน 20 ชิ้น

ตารางที่ 3-2 แสดงค่าเฉลี่ย (Mean), สัมประสิทธิ์ความแปรผัน (COV), ค่าต่ำสุด (Minimum) และค่าสูงสุด (Maximum) ของความโน้มถ่วงจำเพาะ

Condition	Properties	Specific gravity			
		Mean	COV (%)	Minimum	Maximum
1. Superheated steam drying	Shear Strength Parallel to grain	0.63	5.36	0.58	0.71
	Compressive strength				
	• Parallel to grain	0.63	5.36	0.58	0.71
	• Perpendicular to grain	0.63	5.36	0.58	0.71
	Static bending	0.63	5.36	0.58	0.71
	Hardness	0.63	5.36	0.58	0.71
2. Coventional Drying (from Rattapoom parawood factory)	Shear Strength Parallel to grain	0.7	3.5	0.66	0.73
	Compressive strength				
	• Parallel to grain	0.68	2.85	0.65	0.73
	• Perpendicular to grain	0.69	3.05	0.66	0.75
	Static bending	0.68	2.72	0.65	0.73
	Hardness	0.69	3.83	0.64	0.74

* ตัวอย่างชิ้นไม้สำหรับทดสอบคุณสมบัติเชิงกลแต่ละค่ามีจำนวน 20 ชิ้น

ตารางที่ 3-3 สรุปผลคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางพาราที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับกรรมวิธีอบแห้งแบบวิธีทั่ว และค่าอ้างอิง

Properties	Superheated steam	Conventional Drying*	p-value	Reference**
Drying				
1. Shear Strength Parallel to grain (MPa)	16.22 (± 3.16)	15.35 (± 1.23)	0.321	11.00
2. Compressive strength				
2.1 Parallel to grain (MPa)	39.93 (± 6.47)	52.66 (± 4.21)	0.000	32.00
2.2 Perpendicular to grain (MPa)	18.32 (± 2.79)	2.06 (± 0.18)	0.000	5.00
3. Static bending				
3.1 Modulus of rupture (MPa)	84.20 (± 12.57)	107.06 (± 11.42)	0.000	66.00
3.2 Modulus of elasticity (MPa)	12677.90 (± 4319.49)	9721.41 (± 1605.56)	0.005	9240.00
4. Hardness (N)	5692.09 (± 1170.10)	4890.09 (± 481.81)	0.003	4350.00

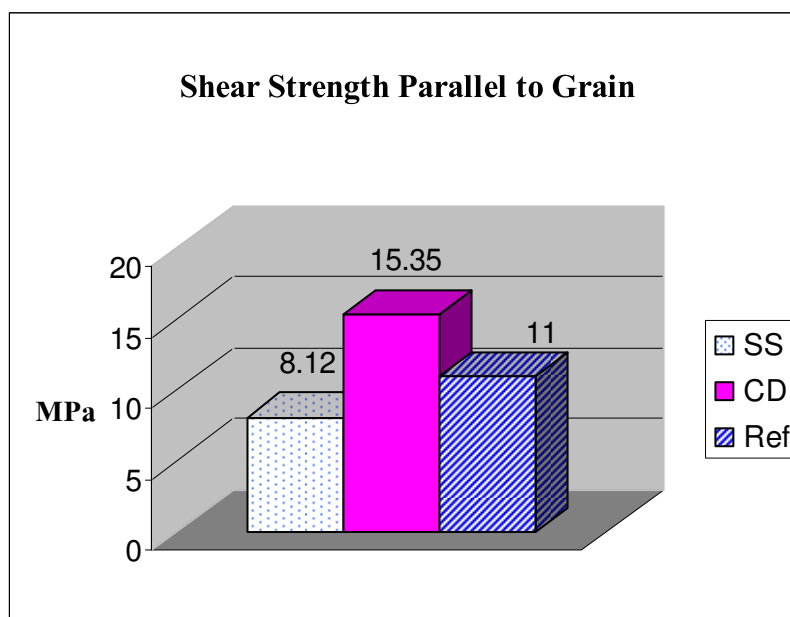
ที่มา: * ไร้งานรัตภูมิพาราอู๊ด

** Killmann, W. and Hong, L.T. (2002)

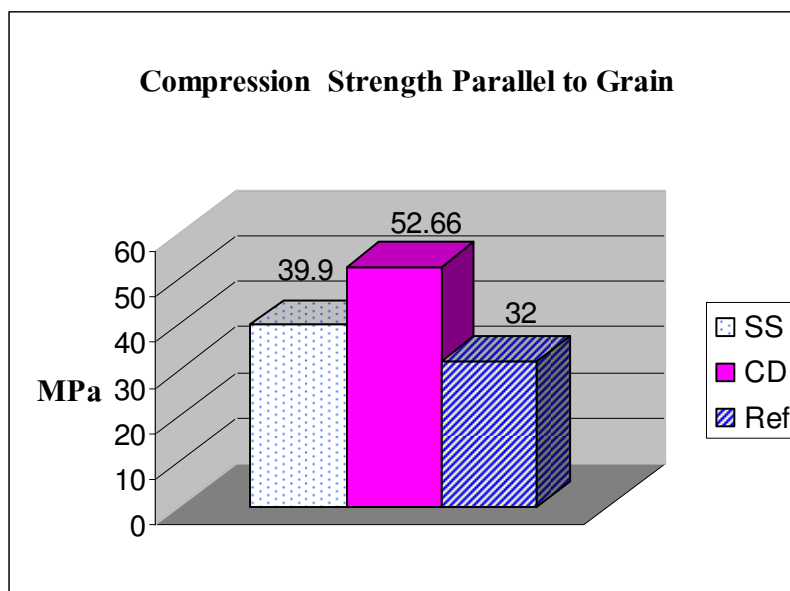
() ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 3-4 แบบแผนการดำเนินการอบแห้งที่สภาวะเหมาะสม (Optimized Drying Schedule)

ช่วงที่	รายละเอียดการปฏิบัติการอบแห้ง
1 (ชั่วโมงที่ 0-9)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วตามด้วยไอน้ำยิ่งยวดที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สุดท้ายอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2 (ชั่วโมงที่ 10-16)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วตามด้วยไอน้ำยิ่งยวดที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สุดท้ายอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 80% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3 (ชั่วโมงที่ 17-23)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตามด้วยไอน้ำยิ่งยวดที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สุดท้ายอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4 (ชั่วโมงที่ 24-28)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 65 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 65% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5 (ชั่วโมงที่ 29-34)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 85% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
6 (ชั่วโมงที่ 35-40)	อบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยลมร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 45% เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
7 (ชั่วโมงที่ 41-58)	อบแห้งด้วยลมร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 40% เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
8 (ชั่วโมงที่ 59-64)	สุดท้ายอบแห้งด้วยไอน้ำอิ่มตัวที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



ภาพประกอบที่ 3-12 กราฟแสดงค่าความเค้นเฉือนขนานเส้น

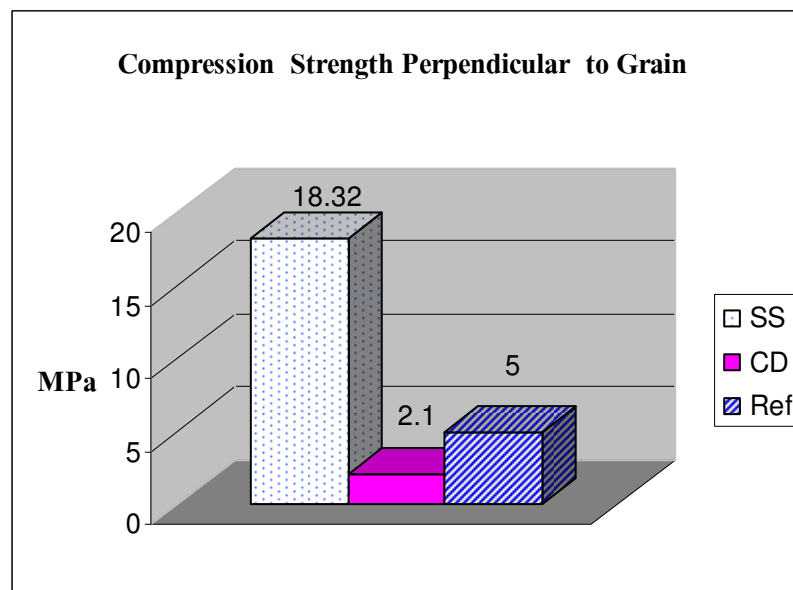


ภาพประกอบที่ 3-13 กราฟแสดงค่าความเค้นอัดขนานเส้น

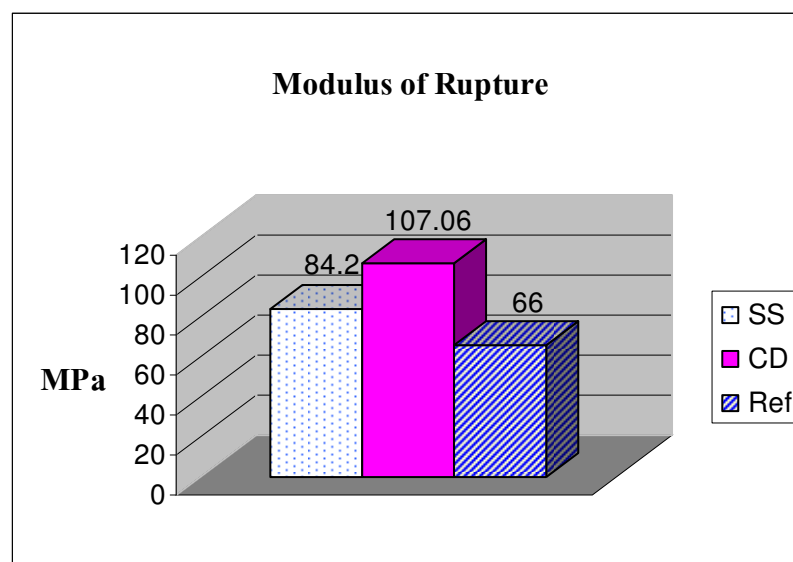
หมายเหตุ: SS = Superheated Steam Drying

CD = Conventional drying (Rattapoom Parawood factory)

Ref = Killmann, W. and Hong, L. T.



ภาพประกอบที่ 3-14 กราฟแสดงค่าความเค้นอัดตั้งฉากเส้น

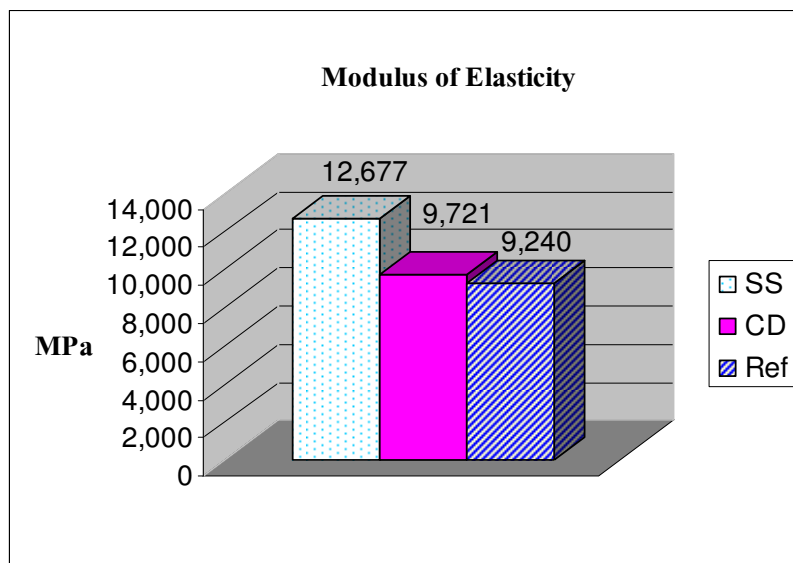


ภาพประกอบที่ 3-15 กราฟแสดงค่าโมดูลัสแตกหัก

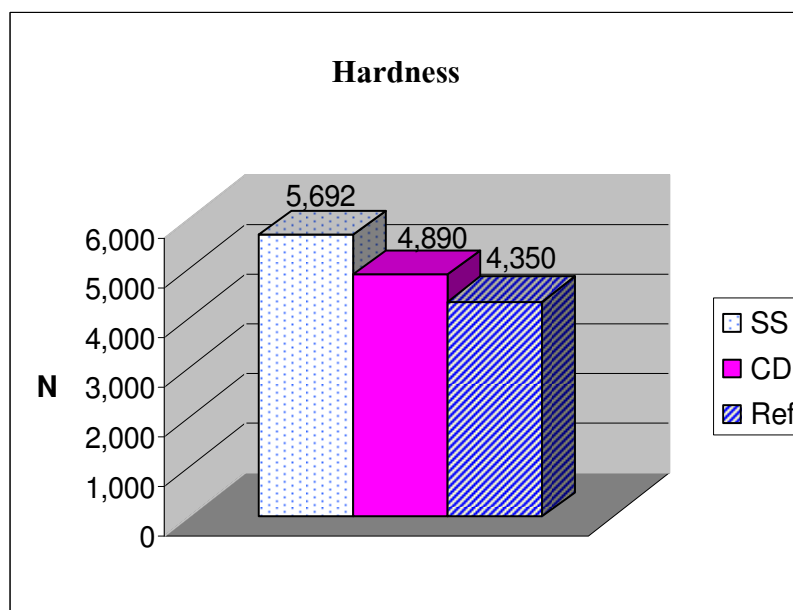
หมายเหตุ: SS = Superheated Steam Drying

CD = Conventional drying (Rattapoom Parawood factory)

Ref = Killmann, W. and Hong, L. T.



ภาพประกอบที่ 3-16 กราฟแสดงค่าโมดูลัสยืดหยุ่น



ภาพประกอบที่ 3-17 กราฟแสดงค่าความแข็ง

หมายเหตุ: SS = Superheated Steam Drying

CD = Conventional drying (Rattapoom Parawood factory)

Ref = Killmann. W. and Hong. L. T.

การวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (SPSS 11) เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงกลกับไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งกับการอบแบบทั่วไปของโรงงานที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ 95% พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทุกค่ายกเว้นค่าความเค้นเฉือนขนานเสี้ยน (shear strength parallel to grain) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อความแข็งแรงของไม้, ความชื้นภายในเนื้อไม้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล ในการวิจัยตัวอย่างไม้ยางที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งกับลมร้อนและไม้ยางที่อบแห้งแบบทั่วไปของโรงงานอุตสาหกรรมจะถูกนำมาทดสอบที่ความชื้นไม้ 13.59 และ 9% มาตรฐานแห้ง ตามลำดับ จากที่ได้มีการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของไม้ยางจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นที่ต่ำกว่าจุดอิ่มตัว (fiber saturation point) แม้ว่าส่วนมากไม้เกือบทุกชนิดจะมีค่าทางคุณสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นไม้ลดลง แต่คุณสมบัติเชิงกลบางค่า พบว่าเมื่อค่าขึ้นถึงค่าสูงสุดแล้วหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อทำการอบแห้งต่อไปเรื่อยๆ

3.4 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งไม้ยาง

ในกระบวนการอบแห้งนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการอบแห้งอยู่ในช่วง 110-115 องศาเซลเซียส และจะลดเวลาการอบแห้งลง 3-5 เท่าของการอบแห้งแบบทั่วไป ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส (Sriarun, 1999)

นอกจากเวลาอบแห้งที่ลดลงแล้วกระบวนการอบแห้งไม้ยาง ปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งก็มีความสำคัญเช่นกัน จึงต้องมีการคำนวณพลังงานของกระบวนการอบแห้ง โดยมีพลังงานที่ใช้ 2 แหล่ง คือพลังงานไฟฟ้าและพลังงานจากไอน้ำร้อน รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3-4

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง 67.8 กิโลวัตต์·ชั่วโมง เมื่อแปลงค่าเป็นพลังงานความร้อนเทียบเท่าจะมีค่าเท่ากับ 244.08 เมกะจูลล์ ส่วนพลังงานความร้อนจากไอน้ำร้อนมีค่า 3,590.28 เมกะจูลล์ ดังนั้นพลังงานความร้อนรวมทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบแห้งเป็น 3,834.36 เมกะจูลล์ ต่อการระเหย 314.29 กิโลกรัม หรือ 12.2 เมกะจูลล์ ต่อการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม ในขณะที่ความต้องการพลังงานความร้อนในกระบวนการอบแห้งไม้เนื้ออ่อนถึงเนื้อแข็งทั่วไปมีค่าระหว่าง 4.7-7 เมกะจูลล์ ต่อการระเหยน้ำ 1 กิโลกรัม (ฐานันดรศักดิ์ เทพญา, 2541) พบว่าพลังงานความร้อนที่ต้องการสำหรับอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยวดยิ่งกับลมร้อนมีค่าสูงกว่าปกติ ทั้งนี้เพราะว่าในกระบวนการอบแห้งไม่มีระบบการหมุนเวียนพลังงานความร้อนจากไอน้ำร้อนที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่เหมือนในระบบโรงงานอุตสาหกรรมอบแห้งไม้ทั่วไป

ตารางที่ 3-5 แสดงแหล่งพลังงานที่ใช้สำหรับอบแห้งไม้ยาง

แหล่งพลังงาน	ปริมาณพลังงานความร้อน (เมกะจูลล์)
1. พลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานที่ให้แก่อุปกรณ์ไฟฟ้าในการทดลอง เช่น เครื่องทำความร้อน, ปัดลม, อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ, เครื่องวัดความชื้นดิจิทัล, เครื่องบันทึกข้อมูล เป็นต้น	244.08
2. พลังงานความร้อน เป็นพลังงานความร้อนของไอน้ำที่ใช้สำหรับอบแห้งไม้ยาง	3,590.28

3.5 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์การสร้างห้องอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนในระดับอุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางแบบทั่วไป (conventional drying) รวม 2 วิธี คือ วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (net present value หรือ NPV) และการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return หรือ IRR)

3.5.1 วิธีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

จากภาคผนวก ซ การหาจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิของการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนมีค่าเท่ากับ 1,270,630 บาทต่อปี ส่วนมูลค่าปัจจุบันสุทธิของการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางแบบทั่วไปในโรงงานมีค่าเท่ากับ 454,614 บาทต่อปี

3.5.2 การคำนวณหาอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)

จากภาคผนวก ซ การหาจุดคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าอัตราผลตอบแทนภายในของโครงการมีระยะเวลา 1 ปี ซึ่งอัตราผลตอบแทนภายในของการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนเท่ากับ 458.54 ส่วนอัตราผลตอบแทนภายในของการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางแบบทั่วไปในโรงงานเท่ากับเท่ากับ 198.39

เมื่อพิจารณาจากอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ที่คำนวณได้ของการสร้างห้องอบแห้งไม้ยาง พบว่าอัตราผลตอบแทนภายในของด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนมีค่ามากกว่าโครงการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางแบบทั่วไปในโรงงาน ดังนั้นการสร้างห้องอบแห้งไม้ยางด้วยไอน้ำยิ่งยวดกับลมร้อนจึงมีความน่าสนใจลงทุนมากกว่า