

การออกแบบและการประเมินสมรรถนะของระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูง Design and performance evaluation of high-efficiency rubber-smoked sheet (RSS) Drying system

ฐานิตย์ เมธียนนท์^{1*}, ประสาน สติย์เรืองศักดิ์² และสรวิชาติ สังวรกาญจน์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530

*ติดต่อ: E-mail:Thanid_m@yahoo.com โทร 02-988-3655 ต่อ 3107

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแนวคิดการออกแบบระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูงซึ่งประกอบด้วยเตาผลิตความร้อนพิกัด 235 kW_{th} และระบบกระจายและหมุนเวียนลมร้อนในห้องอบ-รมควันพิกัดบรรจุยางพาราแห้งได้ประมาณ 10 ตัน (ขนาด 11×5.2×7m³) ลักษณะเด่นของเตาผลิตความร้อนที่ออกแบบใหม่คือประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงและมีการติดตั้งชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไว้ภายในเพื่อผลิตลมร้อนที่สามารถนำไปใช้อบแผ่นยางได้ 2 รูปแบบคือ 1) ยางแผ่นรมควัน และ 2) ยางแผ่นแห้งแบบไม่รมควัน นอกจากนี้การหมุนเวียนลมร้อนที่ผ่านการอบแผ่นยางแล้วกลับมาใช้ใหม่ซึ่งช่วยให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิงนั้นยังเป็นคุณลักษณะเด่นของระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูงอีกด้วย ผลการทดสอบระบบที่ออกแบบไว้พบว่าแผ่นยางพาราสดซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33% มาตรฐานเปียก(w.b.) ถูกอบ-รมควันจนเหลือความชื้นสุดท้ายที่ต่ำกว่า 1.5% w.b. ได้ภายในระยะเวลา 65 ชั่วโมงโดยใช้ลมร้อนที่จ่ายเข้าห้องอบซึ่งมีอุณหภูมิ 100-130°C ลักษณะแผ่นยางที่ผ่านการอบ-รมควันเป็นอยู่ในเกณฑ์ดีและมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งห้องสมรรถนะของระบบอบ-รมควันในแง่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าในช่วง 54-76% ซึ่งมีค่าสูงสุดในช่วงที่มีการเวียนลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ ในขณะที่ต้นทุนในการอบ-รมควันมีค่า 0.6 บาท/kg_{ยางแห้ง} ซึ่งลดลงถึง 40% เมื่อเทียบกับระบบเดิม

คำหลัก: แผ่นยางพารา/ ประสิทธิภาพสูง/ อากาศเวียนกลับ/ อบ-รมควัน

Abstract

This paper presents a conceptual design of the high-efficiency rubber-smoked sheet (RSS) drying system, consisting of a 235-kW_{th} combustor and a hot-air distribution/circulation system for 10 tons RSS-containing smoking room (11×5.2×7m³). The features of novel combustor are high thermal efficiency, and installation of heat exchanger allocated inside the combustor for generating hot air, capable for producing dried-rubber sheets in 2 ways: 1) rubber-smoked sheet (RSS), and 2) air-dried sheet (ADS). Moreover, the waste-heat recirculation, playing a crucial role in fuel saving, is also another feature of this system. The results showed that fresh rubber sheets with a moisture content of 33% wet basis (w.b.) were dried-smoked to final moisture content of <1.5% w.b. within 65 hours by using the hot air having temperatures of 100-130°C. The physical properties of dried-smoked rubber sheets in the room were satisfied and entirely uniform. The performance in terms of thermal efficiency was in the range 54-76%, being peak when waste heat was circulated. An operation cost of the system was about 0.6 baht/kg_{dried sheet}, being reduced by 40% when compared with the old systems.

Keywords: drying-smoking/ high efficiency/ recirculation air/ rubber sheet.

1. บทนำ

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สร้างรายได้เข้าสู่ประเทศไทยเป็นอันดับต้นๆ โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกผลิตยางพาราเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ส่งออกหลักคือยางแผ่นรมควันซึ่งมีปีละ 826,000 ตัน [1] ทั้งนี้กระบวนการผลิตยางพาราแผ่นรมควันมีขั้นตอนสำคัญหนึ่งซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและต้นทุนในการผลิตคือ กระบวนการอบ-รมควันแผ่นยางพารา โดยระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราที่ใช้งานในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นรูปแบบดั้งเดิมที่มีการใช้งานมากกว่า 20 ปี ซึ่งเป็นลักษณะที่มีเตาเผาเชื้อเพลิงและท่อส่งลมร้อนอยู่ใต้พื้นห้องอบ-รมควัน การเคลื่อนตัวของลมร้อนในห้องอบ-รมควันอาศัยเพียงการลอยตัวของความร้อนตามธรรมชาติจากพื้นห้องออกทะลุผ่านฝ้าเพดานเท่านั้น โดยลักษณะของระบบเดิมนี้นี้จุดด้อยคือ 1) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำเพียง 25-30% [2] ซึ่งความร้อนส่วนใหญ่จะสูญเสียให้กับพื้นดินใต้ห้องอบ-รมควันและแก๊สเสียที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ 2) ใช้ระยะเวลาในการอบ-รมควันนาน 3) แผ่นยางพาราที่ผ่านการอบ-รมควันมีลักษณะไม่สม่ำเสมอและ 4) มีความเสี่ยงต่อการเกิดไฟไหม้เนื่องจากสะเก็ดไฟไหลเข้าสู่ห้องอบ-รมควันค่อนข้างสูง [3] โดยที่ผ่านมามีความพยายามที่จะลดการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการอบ-รมควันของระบบแบบดั้งเดิม (แบบอุโมงค์) ด้วยการนำพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมด้วยซึ่งมีทั้งการใช้แผงรับรังสีความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าห้องอบ-รมควัน [4] และมีการใช้หลังคาโปร่งแสงเพื่อให้แสงอาทิตย์สามารถทะลุผ่านเข้าสู่ห้องอบ-รมควันได้โดยตรง [5] ซึ่งพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงในการให้ความร้อนได้มากกว่า 50% [5] แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะการไหลเวียนของลมร้อนภายในห้องอบ-รมควันแบบธรรมชาติ (Natural circulation) จึงทำให้การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลไม่ดีเท่าที่ควรซึ่งส่งผลให้ยังคงต้องใช้ระยะเวลาการอบ-รมควายนานถึง 5 วันเพื่อให้ความชื้นลดลงถึง 0.5% มาตรฐานเปียก [5] ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวคิดการออกแบบระบบอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงพร้อมทั้งทดสอบระบบเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบที่ออกแบบไว้

2. แนวคิดในการออกแบบระบบอบ-รมควัน

แนวคิดการออกแบบระบบอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1) เตากำเนิด

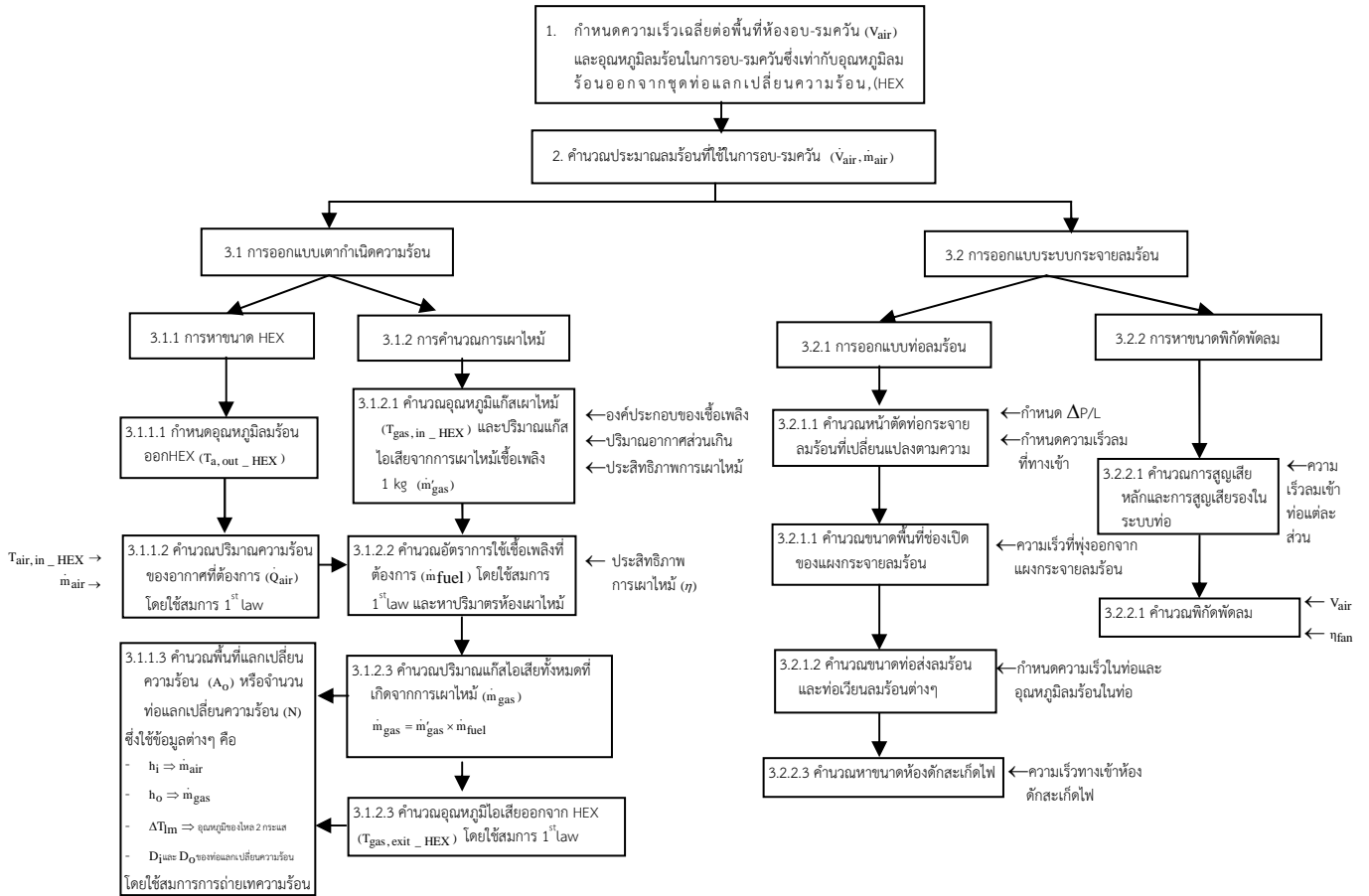
ความร้อน และ 2) ระบบกระจายลมร้อนและหมุนเวียนลมร้อน ในส่วนของเตากำเนิดความร้อนถูกออกแบบโดยอาศัยข้อมูลทางเทคนิคที่จำเป็นต่างๆ คือ ปริมาณลมร้อนและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการอบ-รมควัน ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับ อัตราการใช้เชื้อเพลิง ขนาดห้องเผาไหม้ของเตากำเนิดความร้อนและพื้นที่ผิวของชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนของระบบกระจายลมร้อนและหมุนเวียนลมร้อนนั้นมีแนวคิดการออกแบบคือ ท่อส่งลมร้อนที่วางตลอดความยาวห้องถูกออกแบบเป็นลักษณะท่อลดขนาดพื้นที่หน้าตัดเพื่อให้ความดันลดต่อหน่วยความยาว ($\Delta P/L$) คงที่ซึ่งจะส่งผลให้มีการกระจายลมร้อนได้ดีตลอดความยาวของห้องอบ-รมควัน ในขณะที่การหมุนเวียนลมร้อนทำโดยใช้พัดลมดูดลมร้อนที่ผ่านการอบแล้วกลับมารับความร้อนซ้ำในเตาซึ่งช่วยให้เป็นการประหยัดเชื้อเพลิง นอกจากนี้เพื่อเป็นการป้องกันหลุดลอยของสะเก็ดไฟออกจากเตากำเนิดความร้อนไปพร้อมกับลมร้อนเข้าสู่ห้องอบ-รมควันอันจะนำไปสู่การเกิดไฟไหม้แผ่นยางพาราภายในห้องอบ-รมควันจึงได้ออกแบบให้มีห้องดักสะเก็ดไฟซึ่งถูกติดตั้งไว้ก่อนที่พัดลมจะจ่ายลมร้อนเข้าห้องอบ-รมควัน ทั้งนี้ แนวคิดของการออกแบบระบบอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงแสดงในรูปของแผนผังได้ดังรูปที่ 1 ส่วนลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์ในระบบที่ออกแบบไว้สามารถดูได้ดังรูปที่ 2

3. ระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูง

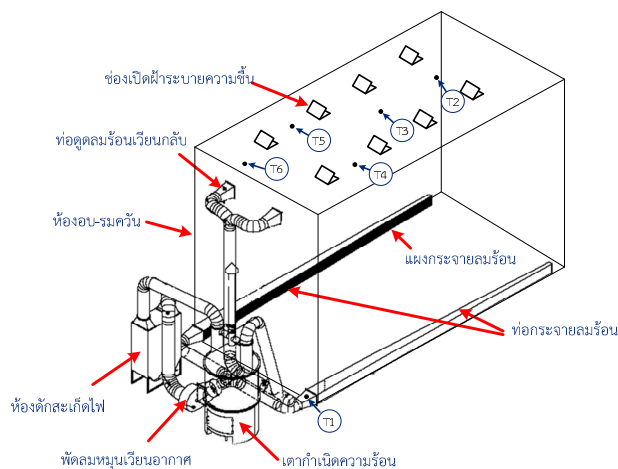
ระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบในงานวิจัยนี้ถูกใช้สำหรับห้องอบ-รมควันขนาด $11 \times 5.2 \times 7 \text{ m}^3$ ซึ่งมีพิกัดบรรจุแผ่นยางพาราแห้งได้ประมาณ 10 ตัน โดยระบบอบ-รมควันประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ 1) เตากำเนิดความร้อน และ 2) ระบบการจ่ายลมร้อนภายในห้องอบและระบบการเวียนลมร้อนกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2(ก-ข) โดยเตากำเนิดความร้อนนี้มีพิกัดประมาณ 235 kW_{th} มีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 160 cm สูง 240 cm ซึ่งใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงภายในเตากำเนิดความร้อนมีชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนติดตั้งอยู่ภายในซึ่งจะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศแวดล้อม (ในวันแรกของการอบ) หรือลมร้อนเวียนกลับ (ในวันที่สองเป็นต้นไป) กับแก๊สเผาไหม้ที่ลอยจากห้องเผาไหม้ขึ้นสู่ปล่องไอเสีย โดยลมร้อนที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วนั้นจะสามารถเลือกที่จะนำคืนจากการเผาไหม้เข้าผสมกับลมร้อนหรือไม่ก็ได้ โดยทำการ

เปิดวาล์วผสมควันทันซึ่งเชื่อมต่อระหว่างปล่องไอเสียกับท่อลมร้อนออกจากเตากำเนิดความร้อน ซึ่งหากไม่นำควันทันจากการเผาไหม้มาผสมก็จะได้เพียงลมร้อนที่จะนำไปใช้ อย่างไรก็ตามและจะได้เป็นยางแผ่นแห้งไม่รมควัน (Air-dried

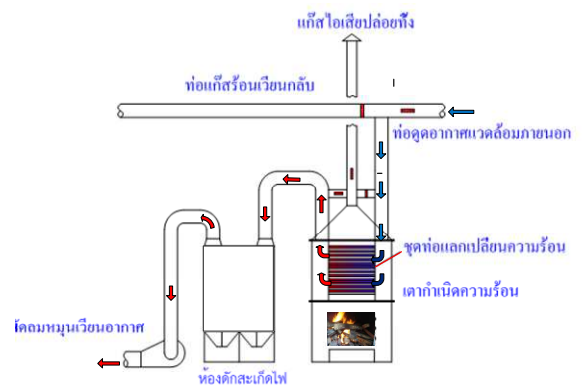
sheet; ADS) สำหรับระบบการจ่ายและเวียนกลับมาใช้ใหม่ประกอบด้วย พัดลม ห้องดักสะเก็ด ฝาระบาย ความชื้น ท่อจ่ายและเวียนกลับลมร้อน



รูปที่ 1 แผนผังการออกแบบคำนวณระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูง



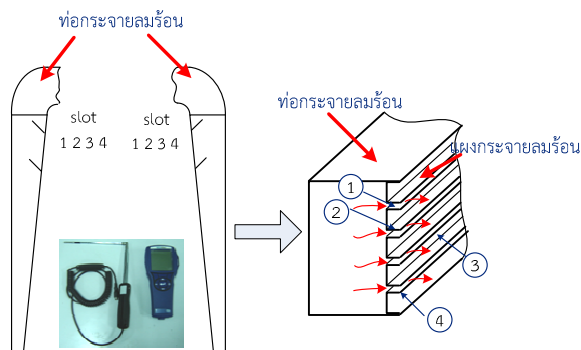
(ก) ระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูงและตำแหน่งวัดอุณหภูมิ



(ข) การทำงานของระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูง

รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์และลักษณะการทำงานของระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูง

การติดตั้งระบบกระจายลมร้อนภายในห้องอบ-รมควันมีลักษณะคือใช้พัดลมดูดลมร้อนที่ออกจากชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตากำเนิดความร้อนผ่านห้องดักสะเก็ดแล้วแบ่งจ่ายเข้าท่อกระจายลมร้อนซึ่งถูกติดตั้งอยู่ชิดกับผนังของห้องอบ-รมควันทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 2 (ก) โดยจะจัดวางให้ทิศทางของลมร้อนที่พ่นออกจากแผงกระจายลมร้อนพุ่งเข้าสู่กึ่งกลางห้องอบ-รมควันเพื่อให้เกิดความสมมาตรของการไหลของลมร้อน ท่อกระจายลมร้อนมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งจะถูกลดขนาดหน้าตัดตลอดช่วงความยาวเพื่อให้มีความดันลดต่อหน่วยความยาวคงที่ ส่วนลมร้อนจะถูกจ่ายออกจากแผงกระจายลมร้อนซึ่งมีช่องเปิดจำนวน 4 แนวตลอดทั้งความยาวท่อ (ดังรูปที่ 3) โดยเมื่อลมร้อนถูกฉีดออกจากแผงกระจายมายังกลางห้องแล้วจะไหลขึ้นและสัมผัสกับแผ่นยางพาราแล้วลอยตัวสู่ด้านบนห้องอบ-รมควัน ซึ่งในช่วงวันแรกๆ ของการอบ-รมควันจะปล่อยลมร้อนที่ไหลผ่านแผ่นยางนี้ออกทางช่องฝาระบายความชื้นเนื่องจากมีสัดส่วนความชื้น (Humidity ratio) ค่อนข้างสูง หลังจากผ่านการอบไปแล้วประมาณ 24-30 ชั่วโมง จะสามารถเวียนลมร้อนส่วนนี้ซึ่งยังคงมีอุณหภูมิสูงแต่มีความชื้นที่ไม่สูงมากนักกลับมา



รูปที่ 3 ตำแหน่งการวัดการกระจายอากาศของท่อจ่ายลมร้อน

4.2 การทดสอบสมรรถนะระบบอบ-รมควัน

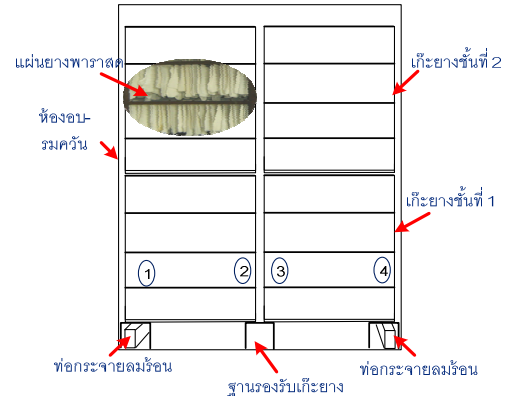
ในการทดสอบการอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูง ได้ทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นยางตามระยะเวลาการอบ-รมควัน ในการศึกษาได้ใช้แผ่นยางพาราจำนวน 7200 แผ่นโดยเทียบเท่าแผ่นยางแห้งประมาณ 7200 kg (บรรจุไม่เต็มพิกัดห้องที่ 10 ตัน) ซึ่งถูกแขวนอยู่บนเกะแขวนยางจำนวน 12 ตัวโดยวางซ้อนกัน 6 ตัวต่อชั้น โดยการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งแผ่นยางทำโดยตัดตัวอย่างแผ่น

ให้ความร้อนซ้ำในเตากำเนิดความร้อนผ่านทางระบบเวียนลมร้อนที่ติดตั้งอยู่ที่ผนังด้านหลังห้องอบ-รมควันซึ่งในช่วงนี้จะปิดฝาระบายความชื้นลง โดยหลักการดังกล่าวจะทำให้เกิดการประหยัดเชื้อเพลิงในกระบวนการอบ-รมควันลงได้

4. การทดสอบระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูง

4.1 การทดสอบกระจายลมร้อนภายในห้องอบ-รมควัน

ก่อนเริ่มการใช้งานระบบอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงนั้นจำเป็นต้องทำการปรับการกระจายลมร้อนที่พ่นออกจากท่อกระจายลมร้อนให้มีความสม่ำเสมอตลอดช่วงความยาว เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลของ ความชื้นที่สม่ำเสมอของแผ่นยางในขณะทำการอบ-รมควัน โดยได้ทำการวัดความเร็วลมเย็นขณะที่ยังไม่มี การจุดไฟในเตากำเนิดความร้อนซึ่งถูกพ่นออกมาจากแผงกระจายลมร้อนทั้ง 4 ช่องในทุกๆ ระยะ 1 m ไปตลอดความยาวท่อกระจายลมร้อน 10 m ด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบ Hot-wire รุ่น TSI 9555-P ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 4 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างแผ่นยางเพื่อหาความชื้น

ยางขนาดประมาณ $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ในช่วงเวลาต่างๆ และตำแหน่งต่างๆ 4 จุดดังรูปที่ 4 ไปอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นดังสมการที่ 1 ทั้งนี้ ยังได้พิจารณาถึงผลกระทบของระยะห่างการแขวนยางคือ 1) การแขวนยางห่าง (ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ดังรูปที่ 4 และ 6) ซึ่งแขวนแผ่นยางจำนวน 300 แผ่นต่อเกะ และ 2) การแขวนยางแบบชิด (ตำแหน่งที่ 3 และ 4 ดังรูปที่ 4 และ 6) ซึ่งบรรจุยางได้ 600 แผ่น นอกจากนี้ในการศึกษายังได้ทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ คือตำแหน่ง

ทางเข้าห้องอบ (T1) และใต้ฝ้าเพดานห้องอบด้านจำนวน 5 จุด (T2-T6) ดังรูปที่ 2(ก) ด้วยเซ็นเซอร์แบบ PT100 รวมไปถึงการวัดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลา การอบ-รมควัน ในการทดสอบได้ควบคุมเงื่อนไขการทำงานของระบบอบ-รมควันแผ่นยางพาราประสิทธิภาพสูง คืออุณหภูมิลมร้อนที่จ่ายเข้าห้อง (T1) และการเปิด-ปิดฝ้าระบายความชื้นและระบบเวียนลมร้อนกลับดังตารางที่ 1 โดยการควบคุมอุณหภูมิลมร้อนที่จ่ายเข้าห้องอบ-รมควัน (T1) นั้นทำโดยการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิง ทั้งนี้ การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิลมร้อนและเก็บตัวอย่างแผ่นยางพาราเพื่อหาความชื้นนั้นจะทำในแต่ละช่วงเวลาประมาณ 12 ชั่วโมงเท่านั้น เนื่องจากความไม่สะดวกในการทำงานกลางคืน แต่กระบวนการอบ-รมควันยังคงทำงานอย่างต่อเนื่อง โดยมีเจ้าหน้าที่ของโรงงานที่ไปทำการทดลองเป็นผู้ควบคุมการทำงานของระบบ

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการควบคุมการทำงานของระบบอบ-รมควัน

ช่วงเวลา (ชม.)	เงื่อนไขการปรับระบบอบ-รมควัน	อุณหภูมิทางเข้าห้องอบ-รมควัน (°C)
0-42	เปิดฝ้าระบายความชื้นใช้อากาศภายนอก	130-140
42-68	ปิดฝ้าระบายความชื้นใช้อากาศเวียนกลับ	110-120
68-93	ปิดฝ้าระบายความชื้นใช้อากาศเวียนกลับ	90-100

นอกจากนี้ สมรรถนะของระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูงยังสามารถบ่งชี้ได้จากดัชนีชี้วัดคือ

1) ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency) ซึ่งพิจารณาได้ทั้งในส่วนเฉพาะเตาเผาไหม้ดังสมการที่ (2) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของทั้งระบบดังสมการที่ (3)

2) อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption) อัตราการใช้ไฟฟ้าจำเพาะ (Specific electrical operation) และต้นทุนการดำเนินการต่อหน่วย (Specific operating cost) โดยคำนวณจากข้อมูลการบันทึกอัตราการใช้เชื้อเพลิงและกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์พัดลม

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น(w.b.)} = \frac{\text{น้ำหนักยกก่อนอบ} - \text{น้ำหนักยกหลังอบ}}{\text{น้ำหนักยกก่อนอบ}} \times 100 \quad (1)$$

$$\eta_{th,comb} = \frac{Q_{air,Hex} + Q_{gas,mix} + Q_{gas,exit}}{Q_{fuel}} \times 100 \quad (2)$$

$$\eta_{th,sys} = \frac{Q_{air,Hex} + Q_{gas,mix}}{Q_{fuel}} \times 100 \quad (3)$$

$\eta_{th,comb}$ = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการเผาไหม้

$\eta_{th,sys}$ = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ

$Q_{air,Hex}$ = อัตราความร้อนที่ออกจากชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

$Q_{gas,mix}$ = อัตราความร้อนของไอเสียที่ผสมกับอากาศร้อนที่ออกจากชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

$Q_{gas,exit}$ = อัตราความร้อนของไอเสียที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ

สำหรับการหาค่าดัชนีต่างๆข้างต้นจะต้องใช้ข้อมูลต่างๆประกอบ เช่น ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง อัตราการไหลของอากาศอบแห้ง (ขณะใช้งานจริง) อัตราการไหลของอากาศที่เข้าห้องเผาไหม้ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศตำแหน่งต่างๆ ซึ่งได้มาจากการบันทึกขณะที่ทำการทดลอง

5. ผลการทดสอบระบบอบ-รมควันประสิทธิภาพสูง

5.1 ผลการวัดการกระจายลมร้อนภายในห้องอบ-รมควัน

ถึงแม้ว่าในการออกแบบท่อกระจายลมร้อนได้พยายามจัดวางท่อให้มีความสมมาตรเพื่อให้มีความดันลดที่ใกล้เคียงกันเป็นอย่างดีตามหลักกลศาสตร์ของไหลแล้วก็ตาม แต่ในทางปฏิบัตินั้นพบว่าความเร็วอากาศที่ออกจากท่อกระจายลมร้อนก็ยังคงไม่สม่ำเสมอ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยได้ทำการปรับการกระจายลมโดยใช้ใบแบ่งลมปรับแต่งเล็กน้อยก่อนทำการวัดความเร็วลมเย็นที่พ้นออกจากช่องแผงกระจายลมทั้ง 4 ช่องในทุกช่วงความยาว 1 m ตลอดความยาวของท่อจ่ายลมร้อนดังรูปที่ 3 ซึ่งสามารถแสดงผลได้ในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าความเร็วอากาศที่ออกจากแผงกระจายลมทั้ง 4 ช่องที่ระยะความยาวท่อต่างๆ มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยความเร็วลมส่วนใหญ่มีค่าสูงที่ต้นทางของท่อจ่ายลมร้อนทั้งสองด้านเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการติดตั้งใบปรับลม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาตามความยาวของท่อจ่ายลมร้อนพบว่าความเร็วลมเริ่มมีความสม่ำเสมอหลังจากระยะการไหลผ่านไป

ประมาณ 3 m หากเปรียบเทียบความเร็วลมที่พ่นออก จากท่อลมร้อนแต่ละด้านที่ระยะเดียวกันพบว่ามีความใกล้เคียงกันโดยมีความเร็วเฉลี่ยที่ 3.35 m/s

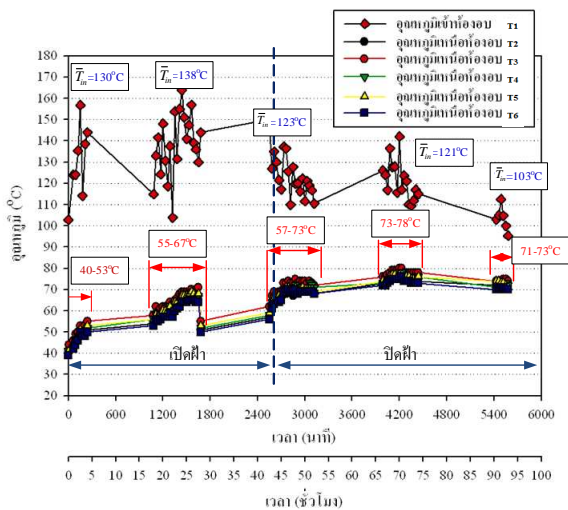
ตารางที่ 2 การกระจายความเร็วลมตามความยาวท่อกระจายลมร้อน

ระยะ (m)	ความเร็วในท่อจ่ายลมซ้าย slot (m/s)					ความเร็วในท่อจ่ายลมขวา slot (m/s)				
	1	2	3	4	เฉลี่ย	1	2	3	4	เฉลี่ย
1	5.6	5.6	5.95	5.6	5.68	5.25	5.25	4.9	5.25	5.33
2	5.25	4.9	5.6	3.85	4.9	3.5	4.9	5.6	4.2	4.55
3	4.2	3.5	3.1	3.5	3.57	3.85	3.85	4.2	3.85	3.93
4	2.75	2.54	2.4	2.82	2.62	2.8	3.15	2.1	3.15	2.8
5	2.73	2.1	2.24	1.86	2.23	2.45	3.15	2.1	2.8	2.62
6	2.45	1.89	2.38	1.89	2.15	2.31	3.15	3.15	2.73	2.83
7	2.59	2.66	2.52	2.81	2.65	3.15	3.5	3.99	2.45	3.27
8	2.75	1.75	2.4	1.88	2.19	3.15	2.45	2.24	1.68	2.38
เฉลี่ย					3.24					
เฉลี่ยทั้ง 2 ท่อ					3.35					

5.2 ผลการทดสอบการอบ-รมควันยางพาราแผ่น

5.2.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนในการอบ-รมควัน

ผลการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนที่ ตำแหน่งการวัด (T1-T6) ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) ตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

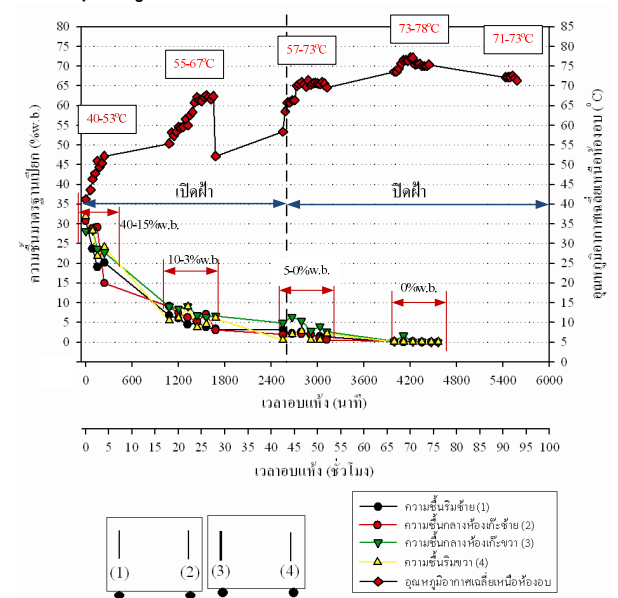


รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลมร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ

จากรูปที่ 5 พบว่าอุณหภูมิลมร้อนที่จ่ายเข้าห้องอบ (T1) ในช่วง 42 ชั่วโมงแรกถูกควบคุมไว้ที่ค่าเฉลี่ยในช่วง 130-138°C ซึ่งการอบ-รมควันในช่วงนี้สามารถใช้ อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงได้เนื่องจากความชื้นของแผ่น

ยางพาราสดค่อนข้างสูง (33 %w.b.) จึงต้องการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในการไล่ความชื้น ทั้งนี้อุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิของลมร้อนที่ถูกจ่ายเข้าสู่ห้องอบ-รมควันซึ่งเมื่อลมร้อนนี้ไหลผ่านแผ่นยางและถ่ายเทความร้อนให้กับแผ่นยางแล้วจะมีอุณหภูมิต่ำลงอย่างมากซึ่งสามารถดูได้จากอุณหภูมิลมร้อนใต้ฝ้าเพดาน (T2-T6) ในช่วงเวลาเดียวกันซึ่งมีค่าในช่วง 40-67°C หลังจากผ่านระยะเวลาการอบที่ 42 ชั่วโมงซึ่งได้ทำการปิดฝาระบายความชื้นแล้วนำลมร้อนที่ไหลผ่านแผ่นยางเวียนกลับมาให้ความร้อนซ้ำในเตากำเนิดความร้อน และลดอุณหภูมิที่จ่ายเข้าห้องอบเฉลี่ยที่ 120°C โดยลดการป้อนเชื้อเพลิงให้น้อยลงซึ่งพบว่าอุณหภูมิลมร้อนใต้ฝ้าเพดานมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (มีค่าเฉลี่ยที่ 70-73°C) ทั้งนี้อุณหภูมิทางเข้าห้องอบ-รมควันต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากความต้องการความร้อนในการระเหยน้ำในแผ่นยางที่น้อยลง (แผ่นยางเริ่มแห้ง ดังรูปที่ 6) ส่วนในช่วงสุดท้ายของการอบ-รมควัน (เวลา 68-93 ชั่วโมง) ซึ่งได้ควบคุมอุณหภูมิที่จ่ายเข้าห้องอบให้เหลือเฉลี่ยที่ 103°C พบว่าอุณหภูมิลมร้อนใต้ฝ้าเพดานมีค่าเฉลี่ยประมาณ 68°C

5.2.2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นยางพาราและอุณหภูมิเฉลี่ยอากาศใต้ฝ้าเพดานห้องอบ



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความชื้นแผ่นยางและอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยใต้ฝ้าเพดาน

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นยางพาราและอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยใต้ฝ้าเพดานห้องอบ-

รมควัน โดยผลการวัดความชื้นในเนื้อยางที่ตำแหน่งต่างๆ 4 จุด (ดังรูปที่ 4) พบว่าการลดลงของความชื้นในแต่ละตำแหน่งของมีค่าใกล้เคียงกันในรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นลักษณะของการอบแห้งวัสดุต่างๆ โดยสังเกตเห็นว่าการลดลงของความชื้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากความชื้นเริ่มต้นที่ 33.0% w.b. ลดลงเหลือ 4.7-9.0% w.b.ภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรกของการอบ-รมควันเนื่องจากการระเหยน้ำที่ผิวของแผ่นยางเป็นส่วนใหญ่ โดยการลดลงของความชื้นอย่างรวดเร็วนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ของอุณหภูมิลมร้อนเฉลี่ยใต้ฝ้าเพดานในช่วงเวลาเดียวกันซึ่งบ่งชี้ถึงการถ่ายความร้อนจากลมร้อนไปสู่แผ่นยางเพื่อไปใช้ในการระเหยน้ำ เมื่อพิจารณาในช่วงเวลา 24-48 ชั่วโมง พบว่าการลดลงของความชื้นเริ่มช้าลงเนื่องจากเป็นช่วงของการระเหยความชื้นในเนื้อแผ่นยางซึ่งการถ่ายเทมวลในช่วงนี้มักถูกควบคุมจากการแพร่ความชื้นของเนื้อวัสดุ โดยมีความชื้นเหลือเฉลี่ยประมาณ 3% เมื่อถึง

เวลาที่ 48 ชั่วโมง ทั้งนี้ การลดลงของความชื้นอย่างช้าๆ นั้นจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิของลมร้อนใต้ฝ้าเพดานที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจาก 55 ไปเป็น 67°C ซึ่งแสดงว่าความร้อนถูกใช้ในการระเหยน้ำน้อยลง ในการทดลองพบว่าแผ่นยางจะถูกอบ-รมควันจนแห้งสนิทภายในเวลาประมาณ 65-70 ชั่วโมง ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิลมร้อนใต้ฝ้าเพดานได้ในช่วง 73-78°C นอกจากนี้ยังพบว่าระยะห่างของการแขวนยางบนเกะยางนั้นไม่ส่งผลต่อการลดลงของความชื้นของแผ่นยาง ซึ่งจากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความชื้นในแผ่นยางทุกตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกันในทุกช่วงเวลาซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของแผ่นยางที่ผ่านการรมควันที่เป็นที่ยอมรับจากภาคอุตสาหกรรมที่สม่ำเสมอจากรูปที่ 7 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าในทางปฏิบัติไม่จำเป็นต้องแขวนยางห่างซึ่งจะทำให้สามารถอบ-รมควันแผ่นยางได้ถึง 9,600 แผ่นโดยใช้เวลาประมาณ 3 วัน



(ก) เกะราวแบบยางห่างจุยง 300 แผ่น



(ข) เกะแบบราววางถี่จุยง 600 แผ่น

รูปที่ 7 ลักษณะของยางแผ่นในห้องอบหลังจากใช้เวลาในการอบ 65 ชม.

5.3 ผลการประเมินสมรรถนะของระบบอบ-รมควัน

ประสิทธิภาพสูง

5.3.1 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบ-รมควัน

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบอบ-รมควันยางแผ่นทั้งในส่วนของประสิทธิภาพเตาเผาไหม้และประสิทธิภาพของระบบสามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ช่วงเวลา (ชม.)	อุณหภูมิลมเฉลี่ย (°C)		อัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ (kg _{หิน} /kg _{ยางแห้ง})	ประสิทธิภาพเตาเผาไหม้ (%)	ประสิทธิภาพระบบ (%)
	เข้าเตา	ออกเตา			
0-42	30	125-130	0.284	76	54
42-68	57-73	115-120	0.178	82	54
68-93	71-78	100-110	0.083	82	57

ผลการประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อนในตารางที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพของเตาเผาไหม้ในช่วง 42 ชั่วโมงแรกมีค่า 76% และเพิ่มขึ้นเป็น 82% ในช่วงเวลา 42-93 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพที่ค่าเพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากปัจจัยสองประการคือ 1) การปรับเงื่อนไขอุณหภูมิลมร้อนที่จ่ายเข้าห้องอบที่ต่ำลงจากโดยเฉลี่ยประมาณ 10°C ดังตารางเงื่อนไขการทดลอง และ 2) การเปิดให้มีการเวียนลมร้อนที่ผ่านแผ่นยางที่ยังคงมีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงลดลง แต่อย่างไรก็ตามในช่วงเวลา 68-93 ชั่วโมงนั้นพบว่าค่าประสิทธิภาพเตาเผาไหม้ไม่เปลี่ยนแปลงทั้งที่ลดอุณหภูมิลมที่ออกจากเตาลงเหลือประมาณ 100°C ซึ่งจะทำให้้ออัตราการใช้เชื้อเพลิงลดลง โดยมีสาเหตุคือการถ่ายเทความร้อนของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ต่ำลงอันเป็นผลมาจากความต่างของอุณหภูมิตั้งแต่แก๊สเผาไหม้และลมร้อนที่ไหล

เข้าสู่ชุดท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยลงซึ่งจะไปชดเชยกับผลการประหยัดเชื้อเพลิง โดยอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะในการอบ-รมควันมีค่าลดลงจาก 0.284 เหลือ 0.083 $\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{kg}_{\text{yang}}\text{แห้ง}$ ในส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบซึ่งแตกต่างจากประสิทธิภาพเตาเผาไหม้ในที่ไม่คิดความร้อนที่ปล่อยทิ้งไปกับแก๊สไอเสียสู่บรรยากาศซึ่งทำให้ค่าประสิทธิภาพในแต่ละช่วงมีค่าเหลือเพียง 54-57% ดังนั้นจึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจว่าหากต้องการให้เกิดการใช้ระบบอบ-รมควันอย่างมีประสิทธิภาพต้องปล่อยแก๊สไอเสียทิ้งสู่บรรยากาศให้น้อยที่สุด

5.3.2 ต้นทุนในการดำเนินการอบ-รมควัน

จากการเก็บข้อมูลการอัตราการใช้เชื้อเพลิงใช้และกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์พัดลมขนาด 5 แรงม้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองนำมาคำนวณหาต้นทุนในด้านเชื้อเพลิง ซึ่งคิดราคาค่าไม้ฟืนที่ราคา 0.80 บาท/kg และต้นทุนไฟฟ้าคิดที่ราคาค่าไฟฟ้า 3.5 บาท/หน่วย โดยเทียบกับพิกัดการอบ-รมควันอย่างสูงสุดที่ 9,600 kg ซึ่งผลคำนวณหาต้นทุนในการดำเนินงานของระบบแสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ต้นทุนเชื้อเพลิงจำเพาะ ต้นทุนไฟฟ้าจำเพาะและต้นทุนในการดำเนินงานต่อหน่วย

ช่วง เวลา (ชม.)	ต้นทุนเชื้อเพลิง จำเพาะ (บาท/ kg_{yang})	ต้นทุนไฟฟ้า จำเพาะ (บาท/ kg_{yang})	ต้นทุนในการ ดำเนินงานต่อ หน่วย (บาท/ kg_{yang})
0-42	0.227	0.052	0.279
42-68	0.142	0.056	0.198
68-93	0.067	0.056	0.123
รวม	0.436	0.164	0.60

จากตารางที่ 4 พบว่าในการทดลองในช่วง 42 ชั่วโมงแรกมีการใช้เชื้อเพลิงค่อนข้างมากเนื่องจากเป็นช่วงที่ไม่มีการใช้อากาศเวียนกลับและใช้อุณหภูมิความร้อนในการอบแห้งค่อนข้างสูง (130°C) ทั้งนี้เมื่อมีการใช้ลมร้อนเวียนกลับในช่วงเวลา 42-93 ชั่วโมงจะสามารถลดอัตราการใช้เชื้อเพลิงได้มากกว่า 35% โดยอัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะนี้จะมีค่าน้อยลงตามช่วงเวลาการอบ-รมควันซึ่งเป็นผลของการลดอุณหภูมิความร้อนที่จ่ายเข้าห้องอบ-รมควัน ในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในช่วงที่มีการใช้อากาศเวียนกลับกับไม้ใช้อากาศเวียนกลับไม่แตกต่างกันมากนัก และเมื่อต้นทุนทั้งสองส่วนมารวมกันพบว่า

ต้นทุนในการดำเนินงานของระบบอบ-รมควันในงานวิจัยนี้มีค่าเพียง 0.60 บาท/ $\text{kg}_{\text{yang}}\text{แห้ง}$ ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการดำเนินได้กว่า 40% เมื่อเทียบกับระบบอบ-รมควันแบบดั้งเดิม [3]

6. สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบระบบอบ-รมควันอย่างพาราประสิทธิภาพสูงซึ่งประกอบด้วยเตากำเนิดความร้อนพิกัด 235 kW_{th} และระบบกระจายและหมุนเวียนลมร้อนสำหรับห้องอบ-รมควันแผ่นยางพาราพิกัดบรรจุยาง 10 ตันยางแห้ง ซึ่งการออกแบบนั้นพิจารณาถึงเป็นระบบที่ใช้เตากำเนิดความร้อนประสิทธิภาพสูงและระบบกระจายลมร้อนที่คำนึงถึงการแก้ปัญหาต่างๆของการอบ-รมควันแบบดั้งเดิม และได้ทำการทดสอบสมรรถนะของระบบที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การกระจายความเร็วของลมที่ออกจากแผงกระจายลมร้อนภายในห้องอบ-รมควันพบว่าความเร็วลมบริเวณต้นทางในช่วงระยะ 2 m แรกมีค่าค่อนข้างสูงในขณะที่ระยะความท้อที่เหลือนี้อาจใกล้เคียงกัน โดยความเร็วลมเฉลี่ยในท่อจ่ายลมร้อนทั้งสองด้านที่ใกล้เคียงกันที่ 3.35 m/s

2. การอบ-รมควันแผ่นยางพาราสดปริมาณ 7,600 แผ่นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33%w.b. โดยใช้อุณหภูมิความร้อนเข้าห้องอบ-รมควันในช่วง $100-130^{\circ}\text{C}$ ใช้เวลาประมาณ 3 วันในการอบ-รมควันจนแห้งสนิท (0%w.b.) โดยได้แผ่นยางรม-ควันที่มีลักษณะทางกายภาพดีตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

3. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้มีค่าในช่วง 76-82% โดยมีค่าสูงในช่วงที่มีการใช้ลมร้อนเวียนกลับ ส่วนประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้งระบบมีค่าในช่วง 54-57% โดยการปล่อยความร้อนทิ้งในรูปของแก๊สไอเสียไปสู่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบต่ำลง

4. ต้นทุนในการดำเนินการอบ-รมควันแผ่นยางพาราจำเพาะสามารถแจกแจงได้เป็นการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ 0.436 บาท/ $\text{kg}_{\text{yang}}\text{แห้ง}$ และต้นทุนการใช้ไฟฟ้าจำเพาะ 0.164 บาท/ $\text{kg}_{\text{yang}}\text{แห้ง}$ รวมแล้วต้นทุนที่ใช้ในการดำเนินงานอบ-รมควันเท่ากับ 0.6 บาท/ $\text{kg}_{\text{yang}}\text{แห้ง}$

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเครือข่ายโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (iTAP) มหาวิทยาลัย

วลัยลักษณ์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนวิจัย และบริษัท พีพีแอนด์บี อุตสาหกรรมยาง กำจัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์และพื้นที่สำหรับการทดลอง ตลอดจนกลุ่มอุตสาหกรรมจังหวัดภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย กระทรวงอุตสาหกรรมที่สนับสนุนให้มีการส่งเสริมเทคโนโลยีเตาอบ-รมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] สถิติยางประเทศไทย, ปริมาณการส่งออกยางของประเทศไทย แยกตามประเภท, จาก [Http://www.rubbercenter.org/index.php/yhairubberindustry/statistic-th](http://www.rubbercenter.org/index.php/yhairubberindustry/statistic-th)], สืบค้นเมื่อ 15 มีนาคม 2555
- [2] ฐานิตย์ เมธิยานนท์และคณะ, รายงานสรุปโครงการจัดทำแบบเตาอบรมควันยางพาราประสิทธิภาพสูงและระบบอบแห้งยางแผ่นรมควัน, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553
- [3] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, เทคโนโลยีการอบรมควันยางพาราแบบประหยัดพลังงาน, Technology Promotion, Vol.39, June-July 2012.
- [4] M. Breymayer, T. Pass, W. Muh;bauer, E.J. Amir, S. Mulato (1993). Solar-assisted smokehouse for the drying of natural rubber on small-scale Indonesian farms, Renewable Energy, Vol. 3(8), pp. 831-839.
- [5] Suttewnok Kaewnok and Sirichai Thepa (2007). A Modeling of the Solar-Assisted for Rubber Smoked Sheets (RSS) System, Engineering Journal of Siam University, vol. 8 (2), pp. 51 – 55.