พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งยางธรรมชาติ

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล[1] สุเทียน สะนัย[2] ชญานุช แสงวิเชียร[3]
และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล[4]

Abstract

Tirawanichakul, S.[1], Sanai, S.[1], Sangwichien, C.[1] and Tirawanicahkul, Y.[2]

Parameters for the analysis of natural rubber drying

Songklanakarin J. Sci. Technol., May 2007, Suppl 2 : 335-346

The purpose of this research was to study and develop a mathematical model of essential parameters affecting drying process in terms of equilibrium moisture content (EMC), apparent density, percentage of void fraction, specific heat capacity and effective diffusion coefficient (D) for three kinds of natural rubber. Three raw natural rubber samples in this work used crumb rubber, rubber stick and rubber sheet with an initial moisture content ranging between 30 and 45% wet-basis that were normally used for producing the standardized Thai rubber (STR) block rubber and air dried rubber sheet (ADS). The results show that the apparent density and specific heat of all natural rubber samples were linearly dependent on the moisture content whilst the percentage of void fraction of natural rubber was inversely related to moisture content. The isotherm EMC equations formulated by the Herderson model for the crumb rubber and rubber stick were the best fitting with the experimental values, and for the rubber sheet. The isotherm EMC equation using the Halsey model was the most appropriable to the experimental results. In addition, the effective diffusion coefficients of all natural rubber materials, which were the function of drying temperature and

[1]Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, [2]Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand.

[1]ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ [2]นักศึกษาปริญญาโทหลักสูตร วศ.ม. สาขาวิศวกรรมเคมี [3]Ph.D. (Chemical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ [4]ปร.ด. (เทคโนโลยีพลังงาน) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

Corresponding e-mail : supawan.t@psu.ac.th

รับต้นฉบับ 21 เมษายน 2549 รับลงพิมพ์ 27 กันยายน 2549

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล และคณะ. "พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งยางธรรมชาติ" *วารสารสงขลานครินทร์ ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 29 ฉบับพิเศษ 2 (พ.ค. 2550) 335-346

drying time, were in range of 10^{-6}-10^{-7} m^2/hr. However, prediction of the evolution of moisture content of thin-layer drying under the condition of drying temperatures of 40-70°C (rubber stick and rubber sheet) and 100-130°C (crumb rubber) could be explained by the empirical model, which was the function of drying temperature and drying time.

Key words : effective diffusion coefficient, equilibrium moisture content, mathematical model, natural rubber

บทคัดย่อ

สุภวรรณ ฏิระวณิชย์กุล สุเทียน สะนัย ชญานุช แสงวิเชียร และ ยุทธนา ฏิระวณิชย์กุล

พารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์การอบแห้งยางธรรมชาติ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. พฤษภาคม 2550 ฉบับพิเศษ 2 : 335-346

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อกระบวนการอบแห้ง ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของยางธรรมชาติ วัตถุดิบยางธรรมชาติ 3 ชนิดที่เตรียมในการทดลองนี้ คือ เศษยางก้อน ยางเส้นและยางแผ่นที่มีความชื้นเริ่มต้นในช่วงระหว่าง 30 ถึง 45% มาตรฐานเปียก ซึ่งปกติจะใช้เพื่อผลิตยางแท่งเอสทีอาร์เกรดต่าง ๆ จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นปรากฏและความร้อนจำเพาะของยางทั้ง 3 แบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้นในลักษณะเชิงเส้น ร้อยละช่องว่างของอากาศแปรผกผันกับค่าความชื้นของยาง และสมการความชื้นสมดุลไอโซเทอมสำหรับเศษยางก้อนและยางเส้น ในรูปแบบสมการของ Henderson และยางแผ่น คือ สมการของ Halsey สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด นอกจากนี้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลของยางทั้ง 3 ชนิด มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-6}-10^{-7} m^2/hr โดยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง และการเปลี่ยนแปลงความชื้นของการอบแห้งชั้นบางของยางทั้ง 3 ชนิด ในช่วงอุณหภูมิ 40-130°C (ยางเส้นและยางแผ่น) และช่วงอุณหภูมิ 100-130°C (เศษยางก้อน) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัลซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

ยางพาราธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ ยางพาราจัดเป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่สำคัญอันดับหนึ่งของประเทศไทย โดยประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกยางพารารายใหญ่ที่สุดในปี 2546 มีพื้นที่ปลูกยาง 12.5 ล้านไร่ มีผลผลิตยางประมาณ 2.90 ล้านตัน (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องมีการพัฒนาศักยภาพด้านการผลิตและงานวิจัยพื้นฐานด้านยางพาราอย่างต่อเนื่องโดยมีเป้าหมายหลัก คือ การเพิ่มผลผลิตยางพาราและควบคุมคุณภาพยางของประเทศให้สอดคล้องกับอุปสงค์ของผู้บริโภคทั่วโลก และสามารถแข่งขันในตลาดต่างประเทศได้ ผลิตภัณฑ์ยางพาราที่มีการส่งออก ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน ยางแท่งมาตรฐานเอสทีอาร์ (Standardized Thai Rubber, STR) และน้ำยางข้น เป็นต้น

ยางธรรมชาติสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในรูปของน้ำยาง ยางแผ่น ยางเส้น และยางถ้วย เป็นต้น ซึ่งการนำไปใช้จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทำผลิตภัณฑ์แปรรูปจากยางธรรมชาติว่าเป็นแบบหรือชนิดใด เช่น น้ำยางข้นนำไปใช้เพื่อผลิตถุงมือยางในทางการแพทย์ ยางแท่งนำไปเป็นส่วนผสมของล้อรถยนต์ ยางแผ่นดิบนำไปใช้ทำฐานตอหม้อของตึกเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว เป็นต้น อนึ่งยางธรรมชาติที่ส่งออกที่ผ่านขั้นตอนการผลิตเป็นยางแท่งและยางแผ่นจะมีความชื้นสุดท้ายต่ำมาก (น้อยกว่า 1% มาตรฐานแห้ง) ดังนั้นหากยางแท่งและยางแผ่นมีความชื้นสูงจะทำให้เกิดเชื้อราและการเสื่อมสภาพได้ง่าย ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม จึงต้องทำการอบแห้งเพื่อลดความชื้นให้ได้ความชื้นสุดท้ายตามมาตรฐานส่งออกของประเทศ กระบวนการอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นกระบวนการอบแห้งด้วยลมร้อน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูล

พื้นฐานด้านกายภาพของวัตถุดิบที่เป็นยางธรรมชาติในแต่ละชนิด ซึ่งในปัจจุบันพบว่าข้อมูลงานวิจัยด้านนี้ยังมีน้อย จึงเป็นหนึ่งในวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ สำหรับการลดความชื้นยางธรรมชาติเพื่อให้ได้ค่าความชื้นที่ต้องการนั้น ส่วนใหญ่จะใช้การอบแห้งด้วยลมร้อนซึ่งเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เช่น การอบแห้งเศษยางเพื่อผลิตเป็นยางแท่ง เป็นต้น การอบแห้งดังกล่าวนี้เป็นการอบแห้งแบบชั้นหนา ซึ่งโดยปกติการอบแห้งชั้นหนามีลักษณะการแห้งของเนื้อวัสดุเป็นชั้นบาง ๆ ค่อย ๆ แห้งทีละชั้น ไล่ไปเรื่อย ๆ จนวัสดุแห้งทั้งหมด ดังนั้นหากมีสมการคำนวณการอบแห้งชั้นบางที่เหมาะสม จะสามารถอธิบายจลนศาสตร์ของการอบแห้งของวัตถุดิบได้อย่างถูกต้อง อย่างไรก็ดีเพื่อทำความเข้าใจเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการอบแห้งชั้นบาง มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอบแห้งชั้นบาง ดังเช่น งานวิจัยของ อรุณี และคณะ (2533) ได้ศึกษาการอบแห้งชั้นบางและสมบัติทางกายภาพของเมล็ดข้าวโพด ผลการทดลองสรุปได้ว่า ความชื้นสมดุลของเมล็ดข้าวโพดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรอบ ๆ โดยสมการของ Henderson (1952) และ Chung และ Pfost (1967) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดีที่สุด และในการวิเคราะห์ข้อมูลจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางและสร้างสมการเอมพิริคัลขึ้นมาหลายสมการ และพบว่าสมการเอมพิริคัลของ Page (1949) สามารถอธิบายการจลนศาสตร์ของการอบแห้งชั้นบางได้ดี ในทำนองเดียวกัน สุภวรรณ และคณะ (2537) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาและสร้างอุปกรณ์อบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง อุณหภูมิของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งอยู่ในช่วง 35-75°C ที่อัตราการไหลของอากาศในช่วง 1.0-2.0 เมตร/วินาที พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ทางกายภาพของการอบแห้งเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล ผลการทดลองพบว่าค่าความชื้นสมดุลสอดคล้องกับแบบจำลองของ Henderson (1952) และพบว่ารูปแบบการอบแห้งชั้นบางแบบเอมพิริคัลที่เหมาะสมเป็นรูปแบบสมการของ Page (1949) ซึ่งมีค่าคงตัวของสมการเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง

Cousin และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งเศษยางธรรมชาติ (Natural Crumb Rubber) พบว่าช่วงการอบแห้งมี 3 ช่วง ช่วงแรกชั้นยางจะอิ่มตัวด้วยน้ำ อุณหภูมิของอากาศและเม็ดยางจะเท่ากับอุณหภูมิของกระเปาะเปียก ในช่วงที่ 2 เกิดการอบแห้งแบบอัตราคงที่ (constant rate) อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและปริมาณน้ำในยางลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 จะเป็นช่วงอัตราอบแห้งลดลง (Falling rate)

Naon และคณะ (1993) ทำการทดลองอบแห้งยางธรรมชาติและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาด 3x1x2 ลบ.เมตร ความเร็วลม 0-5 เมตร/วินาที อุณหภูมิอากาศ 20-150°C ความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% จากผลการทดลอง พบว่า อัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาการอบแห้ง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (h) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิของอากาศเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการอบแห้งชั้นบาง และนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นไปทำนายอัตราการอบแห้งชั้นหนาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าผลจากแบบจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยกำหนดความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งเท่ากับ 0.8% และจากการนำแบบจำลองไปใช้เปรียบเทียบเครื่องอบแห้ง Trolley แบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันทั้งด้านความชื้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

ธนิต และคณะ (2542) ได้ศึกษาและหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมของเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์แบบถาดหมุน โดยสร้างเครื่องอบแห้งเมล็ดในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์แบบถาดหมุนและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการเปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายการอบแห้งได้ดี โดยที่อัตราการอบแห้งจะใกล้เคียงกับการทดลอง และในการอบแห้งควรคำนึงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เวลาที่ใช้ในการอบแห้งและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

Wetchacama และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาหาแบบจำลองพารามิเตอร์อบแห้งของมะม่วงแช่อิ่ม พบว่าความชื้นสมดุลลดลงตามอุณหภูมิ สมการของ BET (1938) อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ผลการทดลองอบแห้งมะม่วงแช่อิ่มแสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของการอบแห้ง ความหนาแน่นลดลงตามความชื้นเริ่มต้น

และความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นเริ่มต้นด้วย

Tabatabaee และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษาการอบแห้งชั้นบางและลักษณะเฉพาะของการ rewetting เมล็ดข้าวสาลี พบว่า สมการของ Page (1949) สามารถอธิบายการอบแห้งชั้นบางและการ rewetting ข้าวได้ดีที่สุด

Tirawanichakul และ Tirawanichakul (2004) ได้ศึกษาปริมาณความชื้นสมดุลของเศษยางซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตยางแท่งเอสทีอาร์ ภายใต้สภาวะคงที่ที่อุณหภูมิ 35-60°C ความชื้นสัมพัทธ์ 10-90% จากผลการทดลองได้นำสมการหาค่าความชื้นสมดุล 4 สมการ ทำการเปรียบเทียบโดยพิจารณาค่าความแปรปรวน 2 ตัว คือ SSE (sum of squares error) และ SD (Standard deviation) พบว่า สมการของ Halsey (1948) เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของยาง ซึ่งพบว่าการคายความชื้นของยางสัมพันธ์กับอุณหภูมิแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิอบแห้ง

จากผลงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่จำเป็น ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น เป็นต้น เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การอบแห้ง เพื่อใช้ศึกษาหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมทั้งในด้านพลังงาน คุณภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมีสำหรับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ได้ดี อย่างไรก็ตามการศึกษาหาพารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับการอบแห้งยาง เช่น เศษยางก้อน ยางแผ่นดิบ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ เช่น ยางถ้วย ยางเส้น เหล่านี้ยังไม่มีรายงานไว้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับวิเคราะห์การอบแห้งยางธรรมชาติ ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการอบแห้งชั้นบางสำหรับยางแต่ละชนิด เพื่อใช้หาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมภายใต้สภาวะของอากาศแวดล้อมหนึ่งๆ ต่อไป

วิธีการวิจัย

แบ่งออกเป็นขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมความชื้นที่ใช้ในการทดลอง

ยางธรรมชาติที่นำมาทดลอง ได้แก่ เศษยางก้อน ยางแผ่น ยางเส้น ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ให้มีขนาดใกล้เคียงกับโรงงาน นำมาเตรียมความชื้นของยางโดยการพ่นละอองน้ำ เก็บไว้ในภาชนะปิด แช่ค้างคืนไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ได้ความชื้นประมาณ 20-65% มาตรฐานแห้ง แล้วจึงนำออกมาทดลอง

ก่อนทำการทดลองนำมาหาความชื้นตามมาตรฐานของ AOAC (1995)

2. การทดลองหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น

นำเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น ประมาณ 30-50 กรัม ไปบรรจุในตะแกรงรูปทรงกระบอก แล้วนำไปแขวนไว้ในขวด บรรจุสารละลายเกลืออิ่มตัวต่างๆ คือ LiCl, NaCl, KNO_3, $MgCl_2.6H_2O$, $Mg(NO_3)_2.6H_2O$, $(NH_4)_2.SO_4$ ปิดฝาขวดให้แน่น ทำอย่างละ 2 ขวด โดยต้องระวังไม่ให้สารละลายเกลืออิ่มผสกับตะแกรง ปิดฝาขวดให้แน่นสนิท นำไปใส่ในตู้อบซึ่งควบคุมอุณหภูมิได้ โดยใช้อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 10-30 วัน เพื่อรอให้ระบบเข้าสู่สมดุลทางความชื้นระหว่างยางกับสารละลายเกลืออิ่มตัว แล้วจึงนำไปหาค่าความชื้นสมดุล หลังจากนั้นทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 35, 40, 45, 50, 55 และ 60°C ตามลำดับ

3. การหาความหนาแน่นปรากฏ

ทดลองโดยนำตัวอย่างที่เตรียมได้จากหัวข้อ 1 ที่ค่าความชื้นต่างๆ มาใส่ในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีปริมาตร 250 ลบ.ซม. โดยค่อยๆ ใส่จนเต็มภาชนะ แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาความหนาแน่นปรากฏเฉลี่ยของแต่ละค่าความชื้นของตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำที่แต่ละความชื้น 3 ครั้ง

คำนวณค่าความหนาแน่นปรากฏตามสมการ (1)

$$\rho = \frac{m}{V_b} \qquad (1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏของข้าวเปลือก, กก./ลบ.เมตร

m คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก, % มาตรฐานแห้ง

V_b คือ ปริมาตรภาชนะ, ลบ.เมตร

4. การหาร้อยละช่องว่างของอากาศ

นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากหัวข้อ 1 ที่ค่าความชื้นต่าง ๆ มาใส่ในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีปริมาตร 250 ลบ.ซม. โดยค่อย ๆ ใส่จนเต็มภาชนะและเติมน้ำลงในภาชนะจนเต็ม บันทึกปริมาตรน้ำที่ใช้ไป และทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับตัวอย่างเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น ทุก ๆ ค่าความชื้นที่เตรียมไว้ในข้อ 1 แล้วนำผลที่ได้คำนวณหาร้อยละช่องว่างของอากาศ และทำการทดลองซ้ำที่แต่ละความชื้น 3 ครั้ง

คำนวณค่าร้อยละช่องว่างของอากาศตามสมการ (2)

$$\varepsilon = \frac{V_{Oil}}{V_b} \times 100 \qquad (2)$$

เมื่อ

ε คือ ค่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศ, %
V_{oil} คือ ปริมาตรน้ำมัน, ลบ.เมตร
V_b คือ ปริมาตรภาชนะ, ลบ.เมตร

5. การทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะ

นำเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น จากข้อ 1 นำมาหาน้ำหนักแห้ง และใส่ตัวอย่างลงในแคลอรีมิเตอร์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และใช้น้ำกลั่นอุณหภูมิเริ่มต้น 65°C น้ำหนัก 40 กรัม ใส่ลงไปในแคลอรีมิเตอร์ ปิดฝา กวนให้เข้ากันให้ดี สังเกตค่าอุณหภูมิที่จุดสมดุล บันทึกผล และทำการทดลองซ้ำที่แต่ละความชื้น 3 ครั้ง

ทำการคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะด้วยสมการที่ (3)

$$c_p = -\frac{[m_c c_c (T_{eq} - T_{ci}) + m_w c_w (T_{eq} - T_{wi})]}{m_p (T_{eq} - T_{pi})} \qquad (3)$$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะของข้าวเปลือก, kJ/kg°C
c_c คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของแคลอรีมิเตอร์, kJ/kg°C
c_w คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, kJ/kg°C
m_c คือ มวลของแคลอรีมิเตอร์, กก.
m_p คือ มวลของวัสดุ, กก.
m_w คือ มวลของน้ำ, กก.
T_{eq} คือ อุณหภูมิที่สภาวะสมดุล, °C
T_{ci} คือ อุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์ที่สภาวะเริ่มต้น, °C
T_{wi} คือ อุณหภูมิของน้ำที่สภาวะเริ่มต้น, °C
T_{pi} คือ อุณหภูมิของวัสดุที่สภาวะเริ่มต้น, °C

6. การทดลองอบแห้งชั้นบาง

ทำการทดลองอบแห้งตัวอย่างที่เตรียมความชื้นไว้ในข้อ 1 มาทดลองอบแห้งด้วยอุปกรณ์อบแห้งที่พัฒนาโดย สุภวรรณ และคณะ (2537) ความชื้นเริ่มต้นของตัวอย่างอยู่ในช่วง 30-65% มาตรฐานแห้ง สำหรับเศษยางก้อน ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100-130°C ความเร็วลม 1.5-2.5 เมตร/วินาที และสำหรับยางแผ่น ยางเส้น ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 40-70°C ความเร็วลม 1.5-2 เมตร/วินาที ข้อมูลที่ต้องบันทึก คือ น้ำหนักของตัวอย่างพร้อมตะแกรงอบแห้ง อุณหภูมิอากาศร้อน อุณหภูมิอากาศแวดล้อมกระเปาะเปียก และกระเปาะแห้ง บันทึกผลการทดลองทุก ๆ 5 นาที ในชั่วโมงแรก ทุก 10 นาที ในครึ่งชั่วโมงถัดไป และทุกครึ่งชั่วโมงในชั่วโมงต่อ ๆ ไป จนกระทั่งได้ค่าความชื้นสุดท้ายประมาณ 4% มาตรฐานแห้ง จึงหยุดการทดลอง

ทฤษฎี

ความชื้นสมดุล คือ เมื่อนำเอาวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุน เช่น นำเมล็ดพืชไปวางไว้ในอากาศ วัสดุนั้นอาจจะคาย (desorption) ความชื้นให้กับอากาศ หรือดูดซับ (adsorption) ความชื้นจากอากาศ และเมื่อวางไว้เป็นเวลานาน ๆ วัสดุนี้จะมีความชื้นคงที่ค่าหนึ่งเรียกว่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, EMC) รูปแบบสมการความชื้นสมดุลที่เลือกใช้เพื่ออธิบายความชื้นสมดุลของวัสดุ ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับในงานวิจัยนี้มีดังนี้

สมการของ Chung and Pfost (1967)

$$\ln RH = \left(\frac{A}{RT_{abs}}\right)\exp(-BM_{eq}) \qquad (4)$$

สมการของ Henderson (1952)

$$1 - RH = \exp(-AT_{abs}M_{eq}{}^{B}) \qquad (5)$$

สมการของ Halsey (1948)

$$RH = \exp(\frac{-A}{RT_{abs}} M_{eq})^{B} \quad (6)$$

เมื่อ A, B, C, D คือ ค่าคงตัวในสมการ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของวัสดุ

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วน หรือ % มาตรฐานแห้ง

R คือ ค่าคงตัวของก๊าซ เท่ากับ 8.314 kJ/kmol-K

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, เศษส่วน

T_{abs} คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

สมการอบแห้ง คือ สมการที่อาจเขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เพื่อนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้งตลอดจนถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้นๆ สมการอบแห้งที่นิยมใช้กัน ได้แก่ สมการอบแห้งทางทฤษฎี (Theoretical drying equation) สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการอบแห้งแบบเอมพิริคัล

สมการอบแห้งทางทฤษฎี จะพิจารณาสองรูปทรงคือ พิจารณาเป็นรูปทรงกลมและแผ่นแบนกว้าง โดยจะใช้เพียงสามเทอมแรกของสมการการอบแห้ง ดังนี้

รูปทรงกลม

$$MR = \frac{6}{\pi^2}\left[\exp\left(\frac{-\pi^2 Dt}{r_0^2}\right)+\left(\frac{1}{4}\right)\exp\left(\frac{-4\pi^2 Dt}{r_0^2}\right)+\left(\frac{1}{9}\right)\exp\left(\frac{-9\pi^2 Dt}{r_0^2}\right)\right] \quad (7)$$

รูปทรงแผ่นแบนกว้าง

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\left[\exp\left(\frac{-\pi^2 Dt}{l^2}\right)+\left(\frac{1}{9}\right)\exp\left(\frac{-9\pi^2 Dt}{l^2}\right)+\left(\frac{1}{25}\right)\exp\left(\frac{-25\pi^2 Dt}{l^2}\right)\right] \quad (8)$$

เมื่อ r_0 คือ รัศมีของยางทดลอง = 0.0025 เมตร

l คือ ความหนาครึ่งหนึ่งของยางทดลอง = 0.00325 เมตร

D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล, ตร.เมตร/ชม.

MR คือ อัตราส่วนความชื้น, ไร้หน่วย เขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นได้ว่า

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$$

เมื่อ M คือ ความชื้นในการทดลอง, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation)

สมการที่นิยมใช้กันมีรูปแบบดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) และค่าคงตัวของการอบแห้ง (k) เป็นค่าคงที่ของสมการแต่ละสมการดังกล่าวจะเป็นสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่งๆ ภายในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อบแห้งนี้มักนิยมใช้สมการอาร์รีเนียสเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล ดังต่อไปนี้

$$MR = \exp(-kt)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงตัวของสมการ, ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์

k คือ ค่าคงตัวของสมการ, s^{-1}

T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้ง, K

สมการอบแห้งเอมพิริคัล (Empirical drying equation)

สมการอบแห้งเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับผลิตภัณฑ์ ในช่วงอุณหภูมิช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ พบว่าสามารถใช้ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการต้องตรงกับสภาวะการทดลอง

สำหรับในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองอบแห้งชั้นบาง สามารถนำข้อมูลการทดลองไปสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี และสมการอบแห้งเอมพิริคัล

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การหาความชื้นสมดุลแบบคายความชื้น

จากผลการทดลองหาความชื้นสมดุลของเศษยางก้อนในช่วงอุณหภูมิ 30-60°C และการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยใช้รูปแบบสมการความชื้นสมดุลของ Henderson (1952) สมการ Halsey (1948) สมการของ Chung และ Pfost (1967) และสมการดัดแปลงของ Kaleemullah (1952) ผลที่ได้นำแสดงไว้ในรายงานนี้ จะเปรียบเทียบรูปแบบสมการความสมดุล 3 รูปแบบสมการที่ใกล้เคียงเท่านั้น

จากการทดลองเมื่อนำข้อมูลมาหาค่าคงที่ในสมการต่างๆ ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Henderson (1952) ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองของเศษยางก้อน และยางเส้นมากที่สุด แสดงดัง Figure 1 และ 2 และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสมดุล ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิดังนี้

เศษยางก้อน

$$1 - RH = \exp(-0.002936\ 74\ T_{abs}\ M_{eq}^{0.775623})$$

R^2 = 0.8663 MRS = 0.0280

ยางเส้น

$$1 - RH = \exp(-0.069350\ T_{abs}\ M_{eq}^{0.736921})$$

R^2 = 0.8907 MRS = 0.0033

สำหรับยางแผ่น สมการแบบจำลองความชื้นสมดุลทางคณิตศาสตร์ของ Halsey (1948) ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับผลการทดลองของมากที่สุด แสดงดัง Figure 3 และได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอุณหภูมิและความชื้นสมดุล ดังนี้

ยางแผ่น

$$RH = \exp(\frac{-11.08492}{RT_{abs}})M_{eq}^{-0.886330})$$

R^2 = 0.8827 MRS = 0.1027

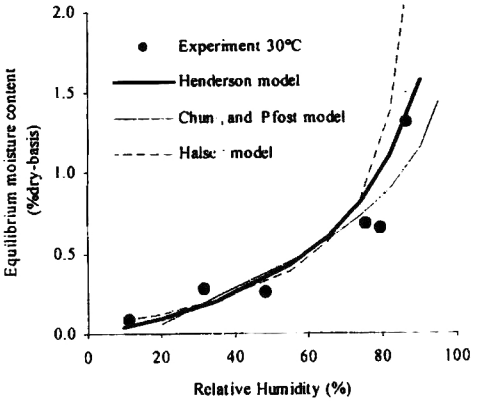

Figure 1. Comparison of equilibrium moisture content at relative humidity 10-95% between experimental data and model of crumb rubber at temperature 30°C

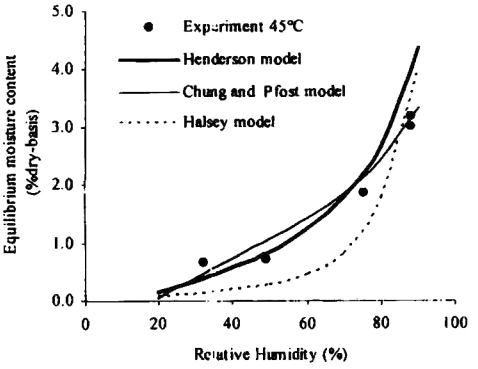

Figure 2. Comparison of equilibrium moisture content at relative humidity 10-95% between experimental data and model of rubber stick at temperature 45°C

เมื่อ T_{abs} คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, K
t คือ ระยะเวลา, ชั่วโมง
k, n คือ ค่าคงตัว
MRS คือ Mean residue square value

$$MRS = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Data_{predicted,i} - Data_{experiment,i})^2}{N}$$

2. ความหนาแน่นปรากฏของยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองความหนาแน่นปรากฏ และ

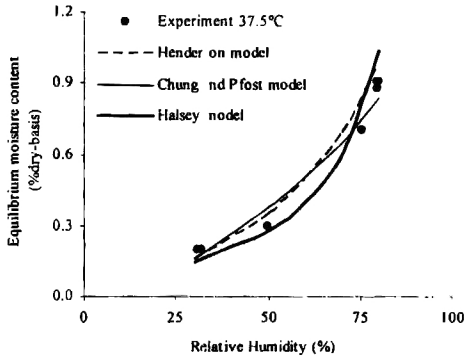

Figure 3. Comparison of equilibrium moisture content between experimental data and expected data of rubber sheet at relative humidity of 10-95% and temperature of 37.5°C

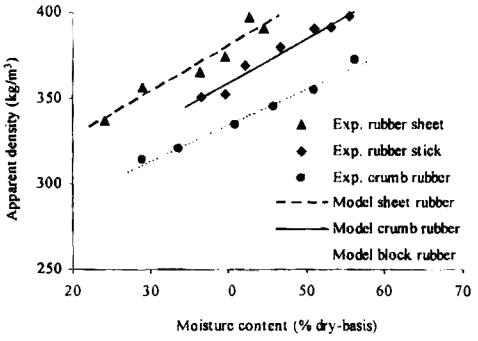

Figure 4. Comparison of apparent density of natural rubber at various moisture contents.

วิเคราะห์สมการถดถอยโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้นได้ดังนี้

ความชื้นอยู่ในช่วง 20-65% มาตรฐานแห้ง

$\rho_{\text{เศษยางก้อน}}$ = 250.79+2.0892 M R^2 = 0.9839 MRS = 0.0012

$\rho_{\text{ยางแผ่น}}$ = 274.20+2.6535 M R^2 = 0.9262 MRS = 0.007

$\rho_{\text{ยางเส้น}}$ = 256.48+2.5710 M R^2 = 0.9637 MRS = 0.017

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นปรากฏของ, กก./ลบ.เมตร

M คือ ความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติ, % มาตรฐานแห้ง

พบว่า ความหนาแน่นปรากฏกับความชื้นของยางธรรมชาติจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งมีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับรูปแบบสมการของงานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้ว (Wetchacama *et al.*, 2000; สุภวรรณ และคณะ, 2537; อรุณี และคณะ, 2533)

3. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของยางธรรมชาติ

ตามที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อ 2 เป็นการพิจารณาปริมาตรรวมทั้งของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น และปริมาตรของอากาศที่แทรกตัวอยู่ ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศก็จะแปรผันกับความชื้นของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น เช่นกัน จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศกับความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติ ได้ผลดังนี้คือ

ความชื้นอยู่ในช่วง 20-65% มาตรฐานแห้ง

$\varepsilon_{\text{เศษยางก้อน}}$ = 100.40-0.3168 M R^2 = 0.9819 MRS = 0.005

$\varepsilon_{\text{ยางแผ่น}}$ = 103.55-0.7097 M R^2 = 0.9518 MRS = 0.007

$\varepsilon_{\text{ยางเส้น}}$ = 93.953-0.3555 M R^2 = 0.9197 MRS = 0.004

เมื่อ ε คือ ความหนาแน่นปรากฏของยาง, กก./ลบ.เมตร

M คือ ความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติ, % มาตรฐานแห้ง

จากการศึกษา พบว่า เมื่อความชื้นของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศจะมีค่าลดลงในลักษณะเชิงเส้น แสดงดัง Figure 5 ตามลำดับ ซึ่งมีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับรูปแบบสมการของงานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้ว (สุภวรรณ และคณะ, 2537; อรุณี และคณะ, 2533)

4. ค่าความร้อนจำเพาะของยางธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่า เมื่อความชื้นของเศษยางก้อน ยางแผ่น ยางเส้น และยางถ้วย เพิ่มขึ้น ความร้อนจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น แสดงดัง Figure 6 จากการ

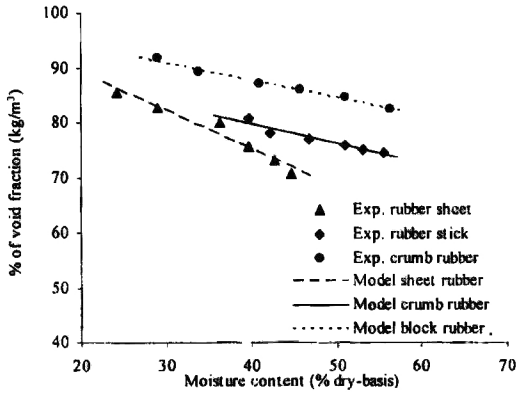

Figure 5. Comparison of percentage of void fraction in the bed of natural rubber at various moisture contents.

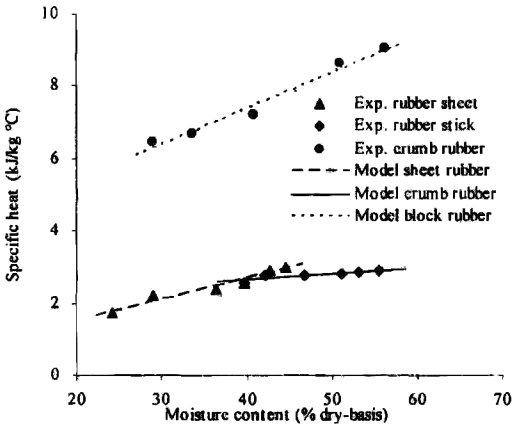

Figure 6. Comparison of specific heat of natural rubber at various moisture contents

วิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะกับความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติ ได้ผลดังนี้ คือ

ความชื้นอยู่ในช่วง 20-65% มาตรฐานแห้ง

$c_{p\text{เศษยางก้อน}} = 3.3808+0.0993M \quad R^2 = 0.9633 \quad MRS = 0.009$

$c_{p\text{ยางแผ่น}} = 0.3905+0.0570M \quad R^2 = 0.9585 \quad MRS = 0.015$

$c_{p\text{ยางเส้น}} = 1.9500+0.0171M \quad R^2 = 0.8153 \quad MRS = 0.004$

เมื่อ c_p คือ ความร้อนจำเพาะของยาง, kJ/kg°C

M คือ ความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติ, % มาตรฐานแห้ง

ซึ่งสมการค่าความร้อนจำเพาะนี้ จะช่วยให้ทราบถึงความสามารถในการจุความร้อนของยางธรรมชาติที่ค่าความชื้นต่าง ๆ และมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ถึงกระบวนการถ่ายโอนความร้อนให้ยางธรรมชาติ ซึ่งมีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับรูปแบบสมการของงานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้ว (Wetchacama *et al.*, 2000; สุภวรรณ และคณะ, 2537; อรุณี และคณะ, 2533)

5. สมการอบแห้ง

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น ในช่วงความชื้นเริ่มต้น 30-65% มาตรฐานแห้ง สำหรับเศษยางก้อน ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100-130°C ความเร็วลม 1.5-2.5 เมตร/วินาที และสำหรับยางแผ่น ยางเส้น ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 40-70°C ความเร็วลม 1.5-2 เมตร/วินาที พบว่า ความชื้นลดลงเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นกับเวลา พบว่ารูปแบบสมการเอมพิริคัล สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

สำหรับเศษยางก้อน สมการดัดแปลงของ Henderson and Pabis (1961) แสดงดัง Figure 7 สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี ดังสมการ

$$MR = a\exp(-kt)$$

เมื่อ k = 0.0021T2 - 0.4504T + 25.489
$R^2 = 0.9606$
a = -0.0001T2 + 0.0204T + 0.0197
$R^2 = 0.9583$
MRS = 1.22

สำหรับยางแผ่น และยางเส้น สมการของ Page (1949) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีแสดงดัง Figure 8 และ 9 และดังสมการ

$$MR = \exp(-kt^n)$$

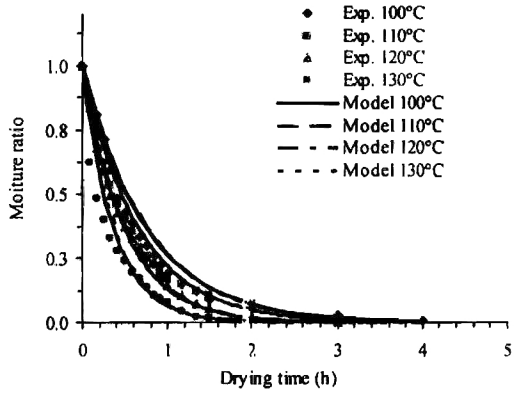

Figure 7. Relationship between moisture ratio and drying time of crumb rubber at initial moisture content of 30-65% dry-basis for drying temperatures of 100-130°C.

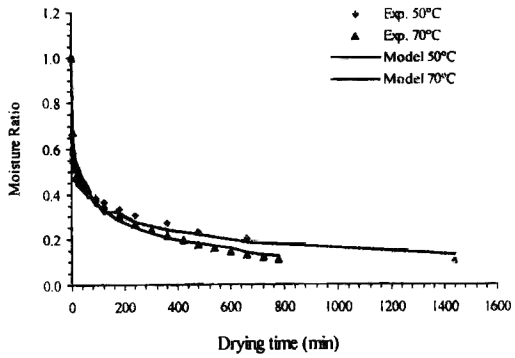

Figure 8. Relationship between moisture ratio and drying time of rubber sheet at initial moisture content of 30-65% dry-basis for drying temperatures of 50 and 70°C.

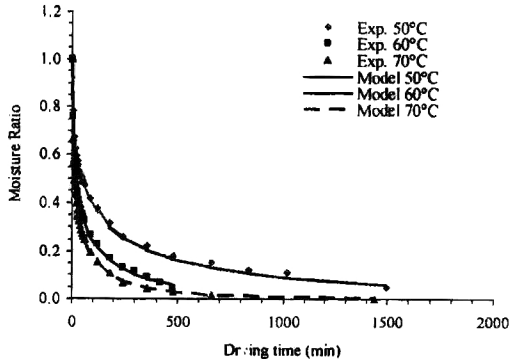

Figure 9. Relationship between moisture ratio and drying time of rubber stick at initial moisture content of 30-65% dry-basis for drying temperatures of 50-70°C.

สำหรับยางแผ่น

$k = -0.00563T + 2.17806 \quad R^2 = 0.9997$

$n = 0.00384T - 1.00227 \quad R^2 = 0.9971$

$MRS = 0.877$

สำหรับยางเส้น

$k = -4.499 \times 10^{-5} T2 + 0.0345T - 6.3161 \quad R^2 = 0.9967$

$n = -8.848 \times 10^{-5} T2 + 0.0606T - 9.9479 \quad R^2 = 0.9986$

$MRS = 0.737$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิอากาศอบแห้ง, °C

t คือ ระยะเวลา, ชั่วโมง

k,n คือ ค่าคงตัว

6. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

จากการทดลองอบแห้งชั้นบางของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น ในช่วงความชื้นเริ่มต้น 30-65% มาตรฐานแห้ง สำหรับเศษยางก้อน ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 100-130°C ความเร็วลม 1.5-2.5 เมตร/วินาที และสำหรับยางแผ่น ยางเส้น ใช้อุณหภูมิอบแห้ง 40-70°C ความเร็วลม 1.5-2 เมตร/วินาที โดยการใช้รูปแบบสมการอาร์เรเนียส ได้ผลดังนี้

เศษยางก้อน

$$D = 41.3857\exp\left(\frac{-6158.473}{T+273.15}\right)$$

R^2 = 0.971 MRS = 0.037

ยางแผ่น

$$D = 4\times10^{-5}\exp\left(\frac{-1192.368}{T+273.15}\right)$$

R^2 = 0.923 MRS = 0.044

ยางเส้น

$$D = 52.96805\exp\left(\frac{-6078.694}{T+273.15}\right)$$

R^2 = 0.913 MRS = 0.015

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผล (D) ของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล

สรุปผลการทดลอง

1. ความชื้นสมดุลของเศษยางก้อน ยางแผ่น และยางเส้น จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 35-60°C เมื่อนำมาวิเคราะห์หารูปแบบสมการที่เหมาะสม พบว่า สมการของ Henderson (1952) อธิบายผลการทดลองของเศษยางก้อนและยางเส้น ได้ดีที่สุด ส่วนยางแผ่นสมการของ Halsey (1948) สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด

2. ความหนาแน่นปรากฏของยางตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้น ในช่วงความชื้น 20-65% มาตรฐานแห้ง สมการความสัมพันธ์กับความชื้นเป็นลักษณะเชิงเส้น

3. เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศของยางตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าลดลงตามปริมาณความชื้นเริ่มต้น ในช่วงความชื้น 20-65% มาตรฐานแห้ง สมการความสัมพันธ์กับความชื้นเป็นลักษณะเชิงเส้น

4. ความร้อนจำเพาะของยางตัวอย่างทั้ง 3 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นเริ่มต้น ในช่วงความชื้น 20-65% มาตรฐานแห้ง สมการความสัมพันธ์กับความชื้นเป็นลักษณะเชิงเส้น

5. อัตราส่วนความชื้นสำหรับเศษยางก้อน จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาและอุณหภูมิของการอบแห้งเพิ่มขึ้น รูปแบบสมการอบแห้งชั้นบางที่นำมาใช้ในการอธิบายผลการทดลองแสดงในรูปแบบของสมการเอมพิริคัล และสมการกึ่งทฤษฎี

6. ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น สำหรับเศษยางก้อน ยางแผ่น ยางเส้น แสดงในรูปแบบสมการอาร์เรเนียส และเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ยังผลจะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการวิเคราะห์การอบแห้งของยางธรรมชาติ ภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลการทดลองและสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำนายการอบแห้งของยางดิบธรรมชาติ ได้แก่ เศษยางก้อน ยางแผ่นดิบ ยางแผ่นรมควัน เป็นต้น ผลการทดลองได้ทำการทดลองครอบคลุมช่วงความชื้นเริ่มต้นของยางธรรมชาติในช่วงที่มีการใช้งานจริง (ความชื้นเริ่มต้น 20-65% มาตรฐานแห้ง) และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งครอบคลุมทั้งยางแผ่นตากแห้ง (อุณหภูมิต่ำกว่า 70°C) ยางแผ่นรมควัน (อุณหภูมิ 40-60°C) และการอบแห้งยางแท่งมาตรฐานเอสทีอาร์ (อุณหภูมิสูงกว่า 100°C) ซึ่งจัดเป็นสินค้าออกที่สำคัญของประเทศไทยอย่างหนึ่งด้วย พบว่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความชื้นสมดุล ค่าความหนาแน่นปรากฏ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างของอากาศ ค่าความร้อนจำเพาะ สมการอบแห้งชั้นบางสำหรับยางแต่ละชนิด สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและจำลองระบบอบแห้งของยางแต่ละชนิด เพื่อให้ได้แนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมภายใต้สภาวะของอากาศแวดล้อมหนึ่ง ๆ โดยทางคณะผู้วิจัยเองได้มีโครงการวิจัยที่ต่อเนื่องจากงานชุดนี้คือ การศึกษาความเป็นไปได้ของการอบแห้งยางแผ่นด้วยลมร้อนร่วมกับอินฟราเรด (งบประมาณแผ่นดิน ปี พ.ศ. 2549) และโครงการวิจัย การอบแห้งที่เหมาะสมของอุตสาหกรรมผลิตยางแท่งเอสทีอาร์ (สำนักงานกองทุนวิจัยแห่งชาติ (สกว.) ปี พ.ศ. 2548-2549) ซึ่งทั้งสองโครงการวิจัยนี้จำเป็นต้องอาศัยพารามิเตอร์เหล่านี้ในการหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยและวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2548 และทุนจากสำนักงานสนับสนุนกองทุนวิจัย ประจำปี 2548 ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองต่างๆ ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ และบุคลากรท่านต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพโรจน์ คีรีรัตน์ สำนักประสานงานชุดโครงการวิจัย "การพัฒนาอุตสาหกรรมยางพารา" คุณสมพร พงศ์ขจร ท่านผู้จัดการบริษัทอัลลายด์เทคเอ็นจิเนียริง จำกัด เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร และคุณทนงศักดิ์ เสนางคนิกร ท่านผู้จัดการโรงงานยางแท่งบริษัทเซาท์แลนด์รีซอร์ซ จำกัด สาขาถ้ำพรรณราย จังหวัดนครศรีธรรมราช จนทำให้การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2547. สถานการณ์การผลิตและการตลาดยาง. เอกสารวิชาการยางพารา ประจำปี 2547 เล่มที่ 20. กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ธนิต สวัสดิ์เสวี สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ อดิศักดิ์ นาถกรณกุล และเปี่ยมศิลป์ ทองทิพย์. 2542. การอบแห้งเมล็ดในมะม่วงหิมพานต์ด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน. ว.เกษตรศาสตร์ (วิทย.). 33: 159-169.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุภวรรณ ฎิระวณิชย์กุล และยุทธนา ฎิระวณิชย์กุล. 2537. อุปกรณ์อบแห้งเมล็ดพืชชั้นบาง: พารามิเตอร์ของการอบแห้งชั้นบางเนื้อในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์. ว.สงขลานครินทร์. วทท. 16(4): 381-392.

อรุณี ผุดผ่อง สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และวารุณี เตีย. 2533. การศึกษาค่าพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์การอบแห้งเมล็ดข้าวโพด. วิศวกรรมสาร. 4: 95-101.

Cousin, B., Benet, J.C. and Auria, R. 1993. Experimental Study of the Drying of a Thick Layer of Natural Crumb Rubber. Int. J. of Drying Technology, 11(6): 1401-1413.

Silakul, T. and Jindal, V.K. 2002. Equilibrium Moisture Content Isotherms of Mungbean, International Journal of Food Properties. 5(1): 25-35.

Tabatabaee, R., Jayas, D.S. and White, N.D.G. 2004. Thin-Layer Drying and Rewetting Characteristics of Buckwheat. Canadian Biosystems Engineering, 46: 319-324.

Tirawanichakul, S. and Tirawanichakul, Y. 2005. Comparison and Selection of EMC Desorption Isotherms for Crumb Rubber. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE-2005, Novi Sad, Serbia and Montanego, May. 19-21, 2005: Paper No. T12-1.1, 1-4.

Wetchacama, S., Soponronnarit, S., Swasdisevi, T. and Rutsri, S. 2000. Parameters for Mango Glace Drying Simulation. The Kasetsart Journal (Nat. Sci.), 34: 544-549.