



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (1)

: การศึกษากลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติ”

Research and Development of Natural Rubber Latex and Products- PSU small project group (1)

: Study of Drying Mechanism of Latex Foam.

โดย ดร. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย และคณะ

31 มีนาคม 2547

สัญญาเลขที่ RDG4750002

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (1)
: การศึกษากลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติ”

Research and Development of Natural Rubber Latex and Products- PSU small project group (1)

: Study of Drying Mechanism of Latex Foam.

คณะผู้วิจัย

1. ณัฐพงศ์ นิธิอุทัย
2. กิวิชาติ กระเบื้องงาน (นักศึกษาผู้ทำวิจัย)
3. ชินรัตน์ เขาวนัวนิชย์ (ผู้ช่วยวิจัย)

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย

สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (ส.ก.ว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สก.ว. ไม่จำเป็นต้องเป็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

จากการศึกษาการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ พบว่า กลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราคงที่ (Constant Rate Period) ซึ่งเป็นการระเหยความชื้นบริเวณผิวของฟองยางธรรมชาติ และช่วงอัตราตกอย (Falling Rate Period) ซึ่งเป็นช่วงของการแห้งของความชื้นภายในและเวลาในการอบแห้งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราตกอย ดังนั้นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการแห้งของฟองยางธรรมชาติคือ อัตราการแห้งของความชื้นภายในซึ่งมีปัจจัยต่างๆที่ควบคุมกลไกการอบแห้งซึ่งปัจจัยเหล่านี้ ได้แก่

- ความหนาของฟองยางธรรมชาติ : ระยะทางที่ความชื้นต้องเดินทางจากภายในสู่บริเวณผิว

- ความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติ : ลักษณะโครงสร้างของฟองยางธรรมชาติ

โดยพบว่าความหนาของฟองยางธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกลไกการอบแห้ง โดยฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาเท่ากันการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันนั้นจะมีกลไกการแห้งเหมือนกัน กล่าวคือ อัตราการแห้งสุทธิเท่ากันและค่าความชื้นวิกฤตเท่ากัน แม้ว่าจะมีความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยังคงขึ้นกับปริมาณความชื้นที่ต้องทำให้แห้งอยู่ด้วย ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาสูงอัตราการแห้งสุทธิจะลดลงและค่าความชื้นวิกฤตก็ลดลงเช่นกัน

ความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติมีผลคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของความหนา กล่าวคือ กลไกการแห้งมีการเปลี่ยนแปลง โดยฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นเกิดผลเช่นเดียวกับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาเพิ่มขึ้น คือ อัตราการแห้งสุทธิลดลงและค่าความชื้นวิกฤตลดลง

อุณหภูมิการอบแห้งมีผลเป็นอย่างมากต่ออัตราการแห้งสุทธิ ดังนั้นจึงส่งผลต่อช่วงอัตราตกอยและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งตามลำดับโดยที่ค่าความชื้นวิกฤตไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิไม่ใช่ปัจจัยโดยตรงในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ เนื่องจากเวลาส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราตกอยและยิ่งไปกว่านั้นช่วงของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติจะมีค่าค่อนข้างแคบเนื่องจากการเสื่อมสภาพของฟองยางธรรมชาติ ทำให้ฟองยางธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนสี

การถ่ายเทความร้อนในฟองยางธรรมชาติไม่ได้เกิดจากการนำความร้อน แต่เป็นการแพร่ของอากาศร้อนผ่านสู่ช่องเปิดที่เป็นโครงสร้างของฟองยางธรรมชาติ ดังนั้นข้อจำกัดในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติจึงไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำของฟองยางธรรมชาติ แต่เป็นการถ่ายเทความร้อนจากภายในของฟองยางธรรมชาติที่เป็นไปได้ช้า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการ

เตรียมชิ้นงานโดยการอุ่นไม่มีผลต่อการอบแห้ง แต่การเปลี่ยนระบบการอบแห้ง เช่น การใช้ไมโครเวฟ ซึ่งการเปลี่ยนระบบการถ่ายเทมวลสารจากการแพร่ความชื้นในรูปของของเหลวไปเป็นรูปของก๊าซเปลี่ยนแปลงกลไกการแห้งไปโดยสิ้นเชิง

บทคัดย่อ

การอบแห้งเป็นวิธีการที่มีมาตั้งแต่อดีตจนในปัจจุบันการอบแห้งก็ยังเป็นที่นิยมใช้งานในวัตถุต่าง ๆ เช่น การอบแห้งไม้, การอบอาหาร, การอบแห้งเซรามิก และการอบแห้งที่นอนฟองยางธรรมชาติ เป็นต้น จำเป็นต้องใช้ระยะเวลานานและพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งมีปริมาณมาก ซึ่งกลไกการอบแห้งที่ทราบในปัจจุบันยังเป็นที่เข้าใจกันน้อย โดยกลไกในการอบแห้งที่ทราบกันดีมี 2 กระบวนการ คือ การถ่ายเทมวลสารและการถ่ายเทความร้อนในวัตถุ ซึ่งสองกระบวนการนี้เกิดขึ้นพร้อมกัน โดยการอบแห้งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงอัตราคงที่และช่วงอัตราลดลง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการอบแห้งของวัตถุต่าง ๆ มากขึ้นจึงทำการศึกษากการอบแห้งด้วยการใส่น้ำลงในฟองยางธรรมชาติโดยปริมาณน้ำที่ใช้คำนวณได้จากปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ต้องการ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการอบแห้งต่าง ๆ เช่น เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ใช้ในการอบแห้ง, ขนาดของวัตถุ, ความหนาแน่นของวัตถุและการเปลี่ยนอุณหภูมิของตู้อบ เป็นต้น ซึ่งผลของความหนาและความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกลไกการแห้ง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอบแห้งให้สูงขึ้นพบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเป็นปัจจัยทางอ้อมเนื่องจากเวลาส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วงอัตราลดลง เมื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในฟองยางธรรมชาติพบว่า การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในฟองยางธรรมชาติไม่ได้เกิดจากการนำความร้อนเท่านั้นแต่ยังเกิดจากการแผ่ของอากาศร้อนด้วย การเปลี่ยนแปลงระบบการอบแห้งจากการใช้ตู้อบอากาศร้อนมาเป็นตู้อบไมโครเวฟนั้นให้ผลที่แตกต่างกัน โดยการอบแห้งด้วยตู้อบไมโครเวฟให้ผลการแห้งที่เร็วกว่า, ย่นระยะเวลาได้มากและใช้พลังงานในการอบแห้งที่น้อยกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบอากาศร้อน ซึ่งเชื่อว่าเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทมวลสาร

Abstract

Drying of solids is the oldest, essential operation in wood processing, food, ceramics and latex foam etc. Drying time is usually long and energy intensive. Today mechanism of drying is not well understood. The mechanism of drying consists of two basic processes. Heat transfer and mass transfer which the two processes occur simultaneously. The drying of a wet solid can be divided into two periods, constant rate period and falling rate period. In this study, water is added to dry latex foam at various initial moisture contents. Effect of latex foam thickness, size, density and drying temperature were studied. It was found that thickness and density of latex foam are controlling factor of drying mechanism. Higher drying temperature resulted higher net drying rate in constant rate period and shorten drying time. However, the effect was indirect since latex foam spend most of the drying time in the falling rate period which rate of internal mass transfer is a controlling factor. Heat transfer of latex foam is from a conduction not only through rubber medium but also through air medium. It was also found that dielectric heating such as microwave changed completely the drying mechanism more precisely mass transfer process. Drying time was dramatically reduced with microwave drying.

สารบัญ

Executive Summary	iii
บทคัดย่อ	v
Abstract	vi
สารบัญ	vii
เนื้อหาการวิจัย	1
1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง	1
2. วัตถุประสงค์	4
3. วิธีการทดลอง	4
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	4
3.2 วิธีการทดลอง	5
3.3 ผลการทดลอง	5
3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	29
3.5 สรุปผลการทดลอง	34
สรุปผลการดำเนินงานและผลที่ได้รับ	36
เอกสารอ้างอิง	37

สัญญาเลขที่ RDG4750002

โครงการ “กลุ่มโครงการวิจัยย่อยวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์จากน้ำยางธรรมชาติ-มอ. (1) :

การศึกษากลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติ“

รายงานฉบับสมบูรณ์

เนื้อหาการวิจัย

1. ความเป็นมาและความสำคัญของเรื่อง

ฟองยางธรรมชาติเป็นผลิตภัณฑ์น้ำยางที่สำคัญอีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง นอกจากจะสามารถเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติแล้ว ภาพลักษณ์ และปัญหาต่าง ๆ ที่อาจจะพบในผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติด้านอื่น ๆ นั้นกลับไม่เป็นปัญหาในผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ ฟองยางธรรมชาติถูกมองว่าเป็นสินค้าคุณภาพสูงเมื่อเทียบกับฟองน้ำประเภทอื่น เช่น ฟองน้ำพอลิยูรีเทน และสูงกว่าฟองยางสังเคราะห์ ในการใช้งานฟองยางธรรมชาติมักจะมีผ้าหุ้มอีกอย่างน้อยหนึ่งชั้นเสมอ ปัญหาเพียงธรรมชาติจึงไม่พบในผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติ อีกทั้งกระแสความนิยมในการใช้สินค้าจากธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความต้องการผลิตภัณฑ์ฟองยางจากธรรมชาตินั้นสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการศึกษาวิจัยด้านต่าง ๆ สำหรับผลิตภัณฑ์ฟองยางธรรมชาติจึงมีความสำคัญที่จะพัฒนาศักยภาพของประเทศไทย ไปสู่ผู้ผลิตฟองยางจากธรรมชาติในระดับต้นของโลกได้

ในการผลิตฟองยางธรรมชาติ ขั้นตอนการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติต้องใช้พลังงานสูงและเวลานาน เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะเปลี่ยนไปตามความหนาของฟองยาง ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการอบแห้งตั้งแต่ 6 ชั่วโมงสำหรับฟองยางหนา 1 นิ้ว ไปจนถึง 50 ชั่วโมงสำหรับฟองยางหนา 6 นิ้ว รวมแล้วกว่าร้อยละ 85 ของเวลาที่ใช้ในการผลิตฟองยางธรรมชาติจะอยู่ในขั้นตอนการอบแห้ง เมื่อคิดถึงค่าใช้จ่ายจากพลังงานที่ต้องใช้ในการเตรียมไอน้ำสำหรับเตาอบแห้ง และพลังงานสำหรับพัดลมที่หมุนเวียนอากาศร้อนในเตาอบแห้งแล้ว ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากทั้งพลังงานที่ใช้ และเวลาที่สูญเสียไป

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุดในระบบอุตสาหกรรม วิธีการอบแห้งนั้นมีอยู่หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีการใช้พลังงาน และใช้เวลานานแตกต่างกัน เช่น การอบด้วยตู้อบเตาแก๊ส, การอบด้วยตู้อบไฟฟ้า, การอบด้วยตู้อบลมร้อน และการอบด้วยตู้อบไมโครเวฟ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการที่จะเลือกวิธีที่จะใช้ในการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ หรือวัสดุแต่ละประเภะนั้น ข้อมูลขั้นพื้นฐานนั้นคือกลไกในการแห้งของวัสดุประเภะนั้น ๆ ต้องมีการศึกษาอย่างชัดเจนเสียก่อน เพื่อลดการเสียเวลาในการพัฒนาวิธีในการอบแห้งที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุตั้งแต่ขั้นต้น

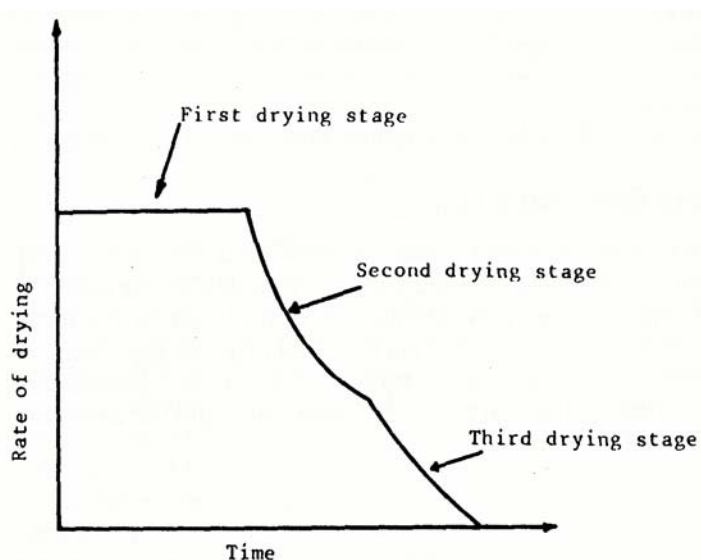
กลไกการอบแห้งมีการเข้าใจกันน้อยและมีความซับซ้อนมาก เพราะสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ยังไม่สมบูรณ์พอที่จะอธิบายถึงปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน, ถ่ายเทมวล

สารและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่องทั้งกระบวนการ ในขณะที่ข้อมูลในหนังสือคู่มือทางวิศวกรรมต่าง ๆ มักให้ภาพที่ผิด ๆ ว่าการแห้งนั้นเป็นศาสตร์ที่มีความเข้าใจแล้วอย่างถ่องแท้ (1)

การแห้งนั้นประกอบไปด้วยกระบวนการถ่ายเทมวลสาร และการถ่ายเทความร้อน ที่เปลี่ยนไปตามเวลา รวมทั้งในอัตราที่เปลี่ยนไปตามคุณสมบัติของวัสดุที่จะเปลี่ยนไปในขณะที่กำลังแห้ง ทั้งนี้กลไกของการถ่ายเทมวลสาร และความร้อนก็จะเปลี่ยนไปด้วย กว่าร้อยละ 85 ของการอบแห้งในอุตสาหกรรมเป็นการพาความร้อนจากตัวกลางที่เป็นอากาศร้อน และกว่าร้อยละ 99 เป็นการแยกของเหลวที่เป็นน้ำออก ถ้ายกเว้นการให้ความร้อนแบบ dielectric เช่น ไมโครเวฟแล้ว ในการอบแห้งความร้อนจะต้องถ่ายเทเข้าสู่วัสดุจากภายนอกเข้าสู่ภายใน ส่วนน้ำจะเคลื่อนที่จากภายในสู่พื้นผิว ก่อนที่จะถูกเคลื่อนย้ายออกไปสู่บรรยากาศด้วยกลไกต่าง ๆ กัน (1)

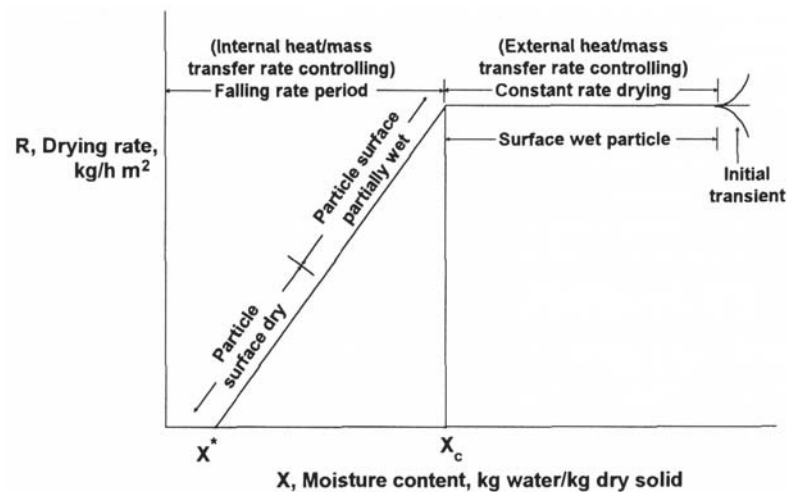
การถ่ายเทของน้ำภายในวัสดุสู่ผิววัสดุอาจเกิดได้จากกลไกเหล่านี้ วิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายๆ วิธีพร้อมกัน เช่น การแพร่ในรูปของของเหลว, การแพร่ในรูปของไอ, แรงแคปิลลารี และ ความดันที่แตกต่างกัน เป็นต้น (1, 2) ในขณะเดียวกันน้ำจะถูกนำออกจากพื้นผิววัสดุได้โดยการระเหย (evaporation) และการกลายเป็นไอ (vaporization) (3) และเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ อาจเปลี่ยนไปตามความแห้ง ดังนั้นกลไกการถ่ายเทความชื้นก็อาจเปลี่ยนไปตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

โดยทั่วไปการแห้งของวัสดุจะถูกแบ่งออกได้เป็น 2-3 ช่วง ตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของอัตราการแห้งต่อเวลา (2, 3) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับเวลา

กราฟอัตราการแห้งอาจจะถูกแสดงได้ในอีกลักษณะหนึ่งโดยแสดงอัตราการแห้งเทียบกับปริมาณความชื้นในวัสดุแทนที่เวลาดังรูปที่ 2 (3, 4, 5)



รูปที่ 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งกับปริมาณความชื้น

ในช่วงแรกของการอบแห้ง อัตราการแห้งจะคงที่และเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราแห้งคงที่ (constant rate period) ในช่วงดังกล่าวนี้ น้ำที่บริเวณผิวจะถ่ายเทออกไปและน้ำจากภายในจะถ่ายเทขึ้นมาที่บริเวณผิวได้ทันกับปริมาณน้ำที่ถ่ายเทออกจากผิว ทำให้ที่บริเวณผิวมีน้ำอุ่มตัวอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้เป็นปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิของเตาอบ, ความเร็วลม, ความชื้นของบรรยากาศเตาอบ เป็นต้น ในช่วงที่ 2 และ 3 นั้น การถ่ายเทมวลสารจากภายในเริ่มไม่ทันกันกับ การถ่ายเทมวลสารที่บริเวณผิว ทำให้อัตราการแห้งรวมลดลง เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงอัตราถดถอย (falling rate period) ปัจจัยที่มีผลต่อช่วงนี้เป็นปัจจัยภายใน เช่น โครงสร้างของวัสดุ, อุณหภูมิของวัสดุ, การกระจายตัวของความชื้นในตัววัสดุเนื่องมาจากการอบแห้ง เป็นต้น (1-3, 6) ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างช่วงทั้งสองนี้คือจุดวิกฤติ ซึ่งค่าความชื้นในวัสดุ ณ จุดนี้จะเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤติ (critical moisture content)

วัสดุอาจจะแสดงช่วงการแห้งมากกว่าสองช่วง ซึ่งทำให้มีค่าความชื้นวิกฤติได้มากกว่าหนึ่งค่า อาจเกิดขึ้นได้ถ้าวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือทางเคมี ในขณะอบแห้ง Keey (7) เสนอว่าค่าความชื้นวิกฤตินี้ เป็นค่าคงที่ของวัสดุ ไม่ขึ้นกับค่าความชื้นเริ่มต้น และสภาวะภายนอกของการอบแห้ง ในขณะที่ Devahastin (1) เสนอว่าค่าความชื้นวิกฤติไม่ใช่คุณสมบัติของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับอัตราการแห้งของวัสดุในขณะนั้นอีกด้วย

เนื่องจากขั้นตอนการอบแห้งในอุตสาหกรรมฟองยางธรรมชาตินั้น ใช้เวลานาน และใช้พลังงานสูง ฟองยางมีคุณสมบัติเป็นฉนวน ประกอบกับประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยอากาศร้อนนั้นต่ำ เทคโนโลยีการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในปัจจุบันจึงถูกมองว่าเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมกับการอบแห้งฟองยางธรรมชาติ และมีความพยายามที่จะสรรหาเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อมาทด

แทน การอบแห้งในอุตสาหกรรมมีหลากหลาย และสามารถจำแนกย่อยออกได้หลายประเภทตามลักษณะต่าง ๆ ทั้งวิธีการ, ลักษณะการถ่ายเทความร้อน, ตัวกลางในการอบ, อุณหภูมิที่ใช้ออบ เป็นต้น ระบบอบแห้งอาจจะเป็นแบบต่อเนื่อง หรือไม่ต่อเนื่อง การส่งถ่ายความร้อนก็เป็นไปได้ทั้งการนำ, การพา, การแผ่รังสี หรือว่าจะเป็นพลังงานจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความดันในการอบอาจเป็นที่สูญญากาศ หรือที่ความดันบรรยากาศ ในขณะที่ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนอาจเป็นอากาศ, ใช้น้ำยิ่งยวด, หรือ อื่น ๆ อีกทั้งอุณหภูมิในการอบก็เป็นไปได้ทั้งต่ำและสูงกว่าจุดเดือด หรือแม้กระทั่งต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (1-3, 7)

ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าในขณะที่ข้อมูลขั้นพื้นฐานคือกลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติยังไม่มีการศึกษาอย่างชัดเจน การศึกษาในขั้นตอนต่อเนื่อง เช่น การออกแบบเครื่องอบฟองยาง, การเลือกระบบการอบแห้งฟองยาง รวมไปถึงการศึกษาถึงเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการอบแห้งฟองยาง เช่น การใช้อินฟราเรด เป็นต้น จึงไม่สามารถทำได้เต็มที่

ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว การศึกษาขั้นพื้นฐานที่จะนำมาถึงความเข้าใจในกลไกของการแห้งของฟองยาง จึงเป็นขั้นตอนแรก และขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการพัฒนาการอบแห้งของฟองยางต่อไปในอนาคต ในการศึกษาถึงกลไกการแห้งนั้น ระบบการอบแห้งนั้นจะเป็นประเภทใดก็ได้ที่สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแห้ง ทั้งปัจจัยภายในและภายนอก ซึ่งสามารถนำมาพิจารณาถึงการแห้งในช่วงต่าง ๆ คือ ช่วงอัตราลดถอย และช่วงอัตราคงที่ ในที่นี้จะใช้ระบบการอบแห้งแบบอากาศร้อน โดยใช้ไฟฟ้าในการให้ความร้อนเป็นหลัก เนื่องจากสามารถควบคุมอุณหภูมิ, ความชื้นได้ดี ในส่วนปัจจัยภายในที่มาจากคุณสมบัติของฟองยางนั้น ก็สามารถศึกษาได้ในระบบนี้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการศึกษาลักษณะนี้จะนำมาซึ่งความเข้าใจขั้นพื้นฐานของกลไกการแห้งของฟองยาง พร้อมทั้งจะไปประยุกต์ใช้ในระบบการอบแห้งอื่น ๆ หรือ เป็นแนวทางในการเลือกเทคโนโลยีอบแห้งที่เหมาะสมต่อไป

2. วัตถุประสงค์

- 2.1. เพื่อที่จะศึกษาถึงกลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติ เข้าใจถึงปัจจัยสำคัญที่เป็นส่วนสำคัญที่จะลดเวลา และพลังงานที่ต้องใช้ในการอบแห้ง
- 2.2. เพื่อที่จะนำมาซึ่งองค์ความรู้ในการเลือกเทคโนโลยีในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติที่เหมาะสมเพื่อที่จะศึกษา หรือเลือกใช้ในอุตสาหกรรมฟองยางต่อไป

3. วิธีการทดลอง

3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1. ตู้อบ เป็นตู้อบของ membert ผลิตภัณฑ์ประเทศเยอรมันตะวันตก ขนาด 2000 วัตต์
- 3.1.2. ไฮโกรเทอร์โมมิเตอร์ (Hygrothermometer) ผลิตภัณฑ์ประเทศจีน รุ่น 444731 ใช้ในการวัดเปอร์เซ็นต์ความชื้น, อุณหภูมิ, แบตเตอรี่ขนาด 9 โวลต์ ขนาด 6.8 x 2.9 x 1.14 นิ้ว ขนาดหัววัด กว้าง 8.2 นิ้ว x หนา 0.7 นิ้ว น้ำหนัก 2 lbs.2 oz

3.1.3. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) ของ Brennan ผลิตที่ประเทศอังกฤษ

3.1.4. คาซัง CAMRY

3.1.5. เทอร์โมคอปเปิ้ล (Thermocouple) ของ CE แบตเตอรี่ขนาด DC 9 โวลต์ DIGICON DP – 50A

3.1.6. ฟองยางธรรมชาติจากบริษัท ปัตตานีอุตสาหกรรม (1971) จำกัด

3.2. วิธีการทดลอง

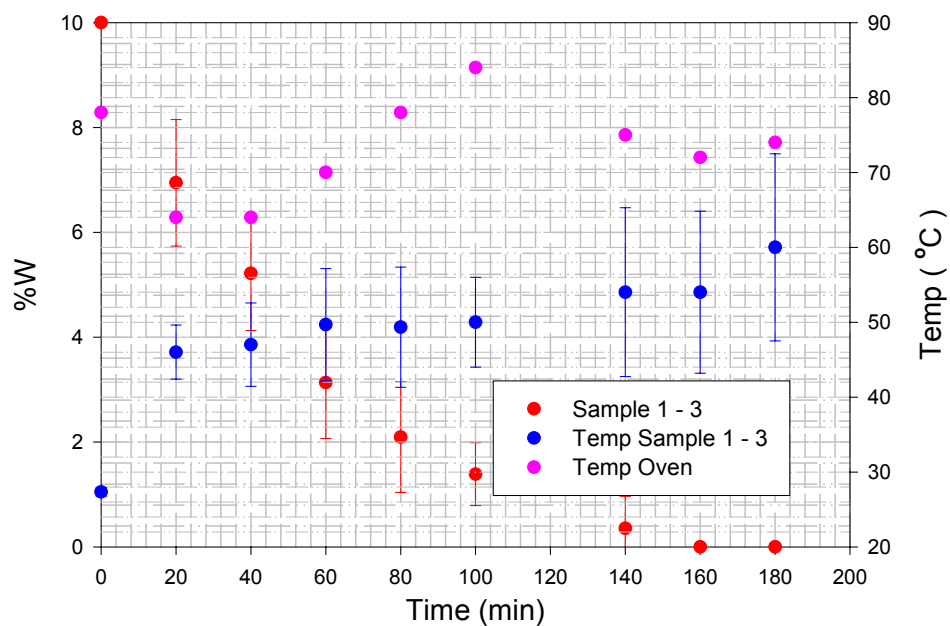
3.2.1. ในการทดลองนี้ทางผู้วิจัยใช้ฟองยางธรรมชาติผลิตสำเร็จในการทดลอง โดยนำชิ้นตัวอย่างที่มีความหนาแน่นที่ต้องการ มาตัดตามขนาดที่ต้องการแล้วชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณน้ำที่ต้องใส่เข้าไปตามปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ต้องการ หลังจากนั้นจะทำการชั่งอีกครั้งเพื่อยืนยันปริมาณความชื้นเริ่มต้นจริงของฟองยางชิ้นที่เตรียมได้ ก่อนที่จะทำการอบแห้ง จะวัดอุณหภูมิภายในบริเวณกึ่งกลางของชิ้นตัวอย่างโดยใช้เทอร์โมคอปเปิ้ล เตาอบจะตั้งอุณหภูมิที่ต้องการทิ้งไว้ ตรวจสอบด้วยเทอร์โมมิเตอร์ภายในเตาอบอีกครั้งเพื่อยืนยัน ในแต่ละการทดลองจะใช้ชิ้นตัวอย่างทั้งหมดสามชิ้น ค่าที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.2.2. เมื่ออุณหภูมิของตู้อบได้ที่แล้ว นำชิ้นตัวอย่างทั้งหมดเข้าอบ และเริ่มจับเวลา นำชิ้นตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักและบันทึกอุณหภูมิภายในตามช่วงเวลาที่ต้องการ แล้วอบต่อโดยสลับตำแหน่งในตู้อบเพื่อลดความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิในตู้อบเอง ต่อชิ้นตัวอย่างทั้งสามชิ้น อบต่อไปจนแห้ง

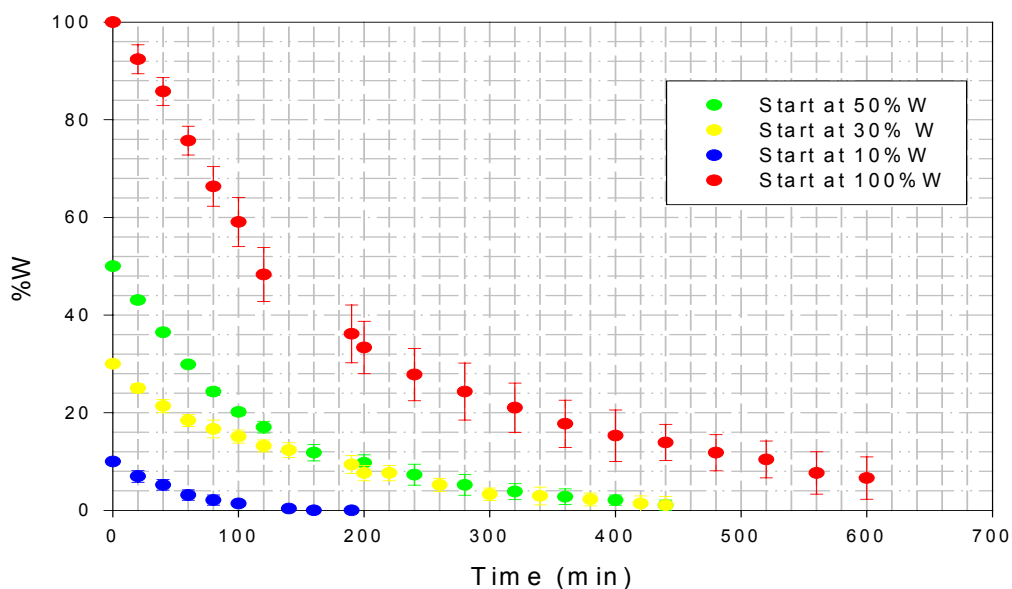
3.2.3. ทำการบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิภายในตู้อบ ตามช่วงเวลาที่ต้องการ

3.3. ผลการทดลอง

รูปที่ 1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาทิจ) และอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติและอุณหภูมิของตู้อบกับเวลา (นาทิจ) เส้นความผิดพลาด (Error Bar) แสดงถึงค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในการทดลอง ชิ้นตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 3x7.5x7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส โดยพบว่า เส้นกราฟของเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ที่ลดลง อุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติที่เพิ่มสูงขึ้นจนถึงเวลาหนึ่งแล้วคงที่ ซึ่งอุณหภูมิภายในฟองยางธรรมชาติจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของตู้อบประมาณ 20 – 30 °C และอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นในฟองยางธรรมชาติมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากการทดลองพบว่าค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิค่อนข้างสูงเนื่องจากตู้อบไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของตู้อบได้ดีและไม่สามารถให้ความร้อนได้สม่ำเสมอทั่วทั้งตู้อบ ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ที่มีการวางฟองยางธรรมชาติมีความแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามค่าที่แตกต่างกันก็ยังอยู่ในตำแหน่งที่สามารถยอมรับได้



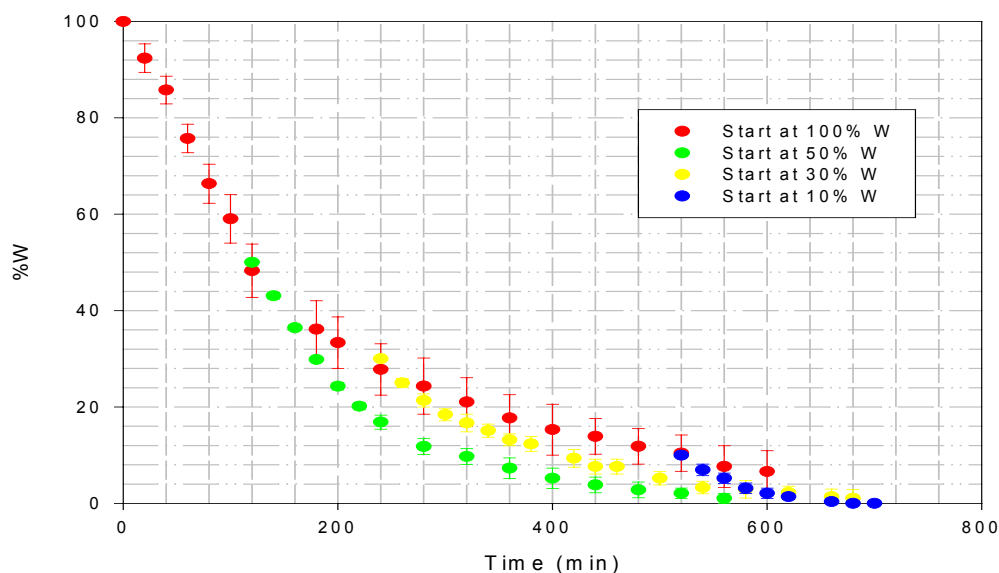
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) และอุณหภูมิ (°C) ของตัวอย่างและอุณหภูมิภายในฟองยางธรรมชาติกับเวลา (นาที)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น 100%, 50%, 30% และ 10%

ในรูปที่ 2 จะพบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของฟองยางจะลดลงด้วยอัตราที่ต่ำลงเมื่อเวลามากขึ้น หรือเปอร์เซ็นต์ความชื้นน้อยลง เมื่อนำผลการทดลองที่มีค่าความชื้นเริ่มต้น 50%, 30% และ 10% มาเลื่อนตามแกนเวลาเพื่อให้ค่าความชื้นเริ่มต้นต่าง ๆ เริ่มตรงกันกับปริมาณความชื้นคงเหลือ

ในชั้นตัวอย่างที่มีความชื้นเริ่มต้น 100% แล้ว ดังรูปที่ 3 พบว่าได้กราฟที่ค่อนข้างต่อเนื่องกัน ซึ่งแสดงถึงกลไกของการแห้งที่ไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นมากนัก แต่ขึ้นกับปริมาณความชื้นที่คงเหลือ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น 100%, 50%, 30% และ 10%

เมื่อทำการศึกษาถึงผลของขนาด, ความหนาแน่น ของชั้นตัวอย่าง ก็พบว่าไม่ว่าขนาดหรือความหนาแน่นของชั้นตัวอย่างจะมีผลต่อการค้นพบข้างต้น นั่นคือกลไกการแห้งนั้นไม่ขึ้นกับค่าความชื้นเริ่มต้นมากนัก ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4-6 ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนั้นยังแสดงให้เห็นอีกว่าถึงแม้ว่ากลไกโดยรวมนั้นไม่แตกต่างกันมากนักในขณะที่ค่าความชื้นเริ่มต้นแตกต่างกัน แต่โดยรายละเอียดแล้วจะยังมีความแตกต่างกันอยู่บ้างซึ่งการเป็นผลเนื่องจากการเตรียมชั้นตัวอย่าง, การกระจายตัวของความชื้นเริ่มต้นในชั้นตัวอย่าง เป็นต้น อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ลักษณะนี้ทำให้สามารถกำหนดกลไกการแห้งโดยรวมของชั้นฟองยางขนาดหนึ่ง ๆ ที่ความหนาแน่นหนึ่ง ๆ ได้โดยไม่ต้องกังวลถึงปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษา

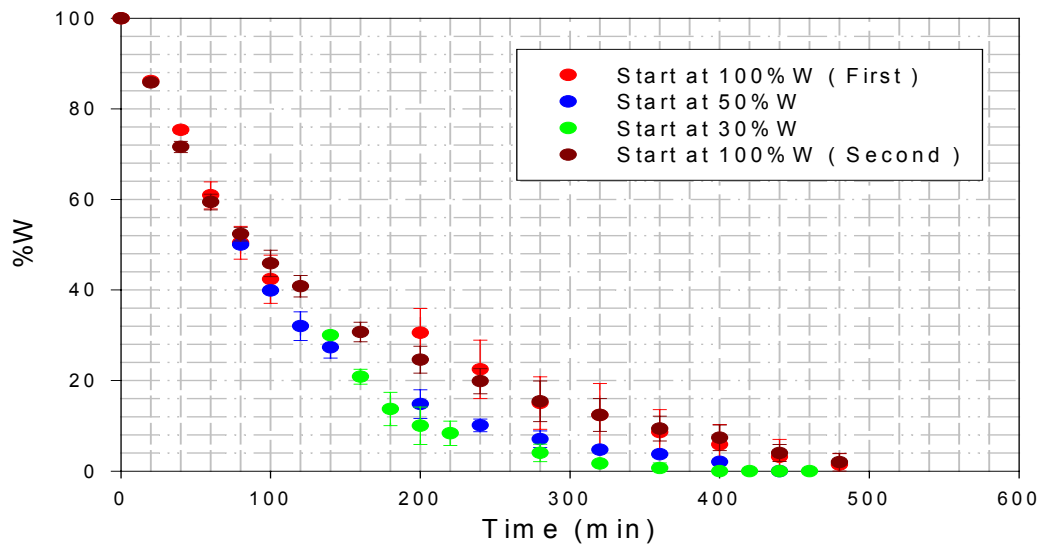
ดังนั้นเมื่อได้กราฟแสดงถึงการแห้งของฟองยางขนาดและความหนาแน่นหนึ่ง ๆ แล้ว เราจึงสามารถนำมาหาค่าวิเคราะห์กลไกการแห้งต่าง ๆ เช่น ค่าความชื้นวิกฤติ, อัตราการแห้งเป็นต้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 7 พบว่า

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ค่าความชื้นวิกฤติ (CMC)} = 36\%$$

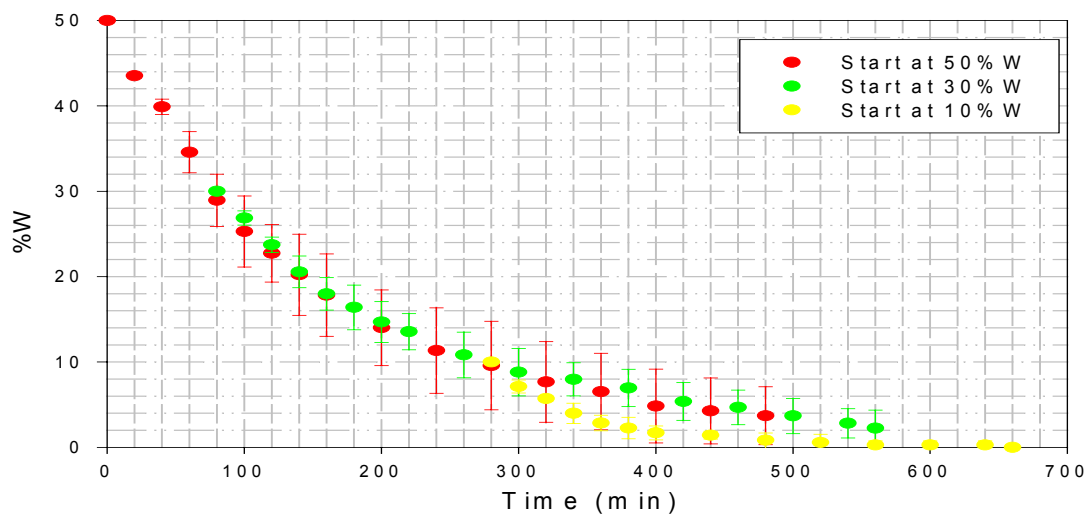
$$\text{เวลาที่จุดค่าความชื้นวิกฤติ (T}_c\text{)} = 168 \text{ นาที}$$

$$\text{เวลาที่จุดสิ้นสุดความชื้น (T}_p\text{)} = 700 \text{ นาที}$$

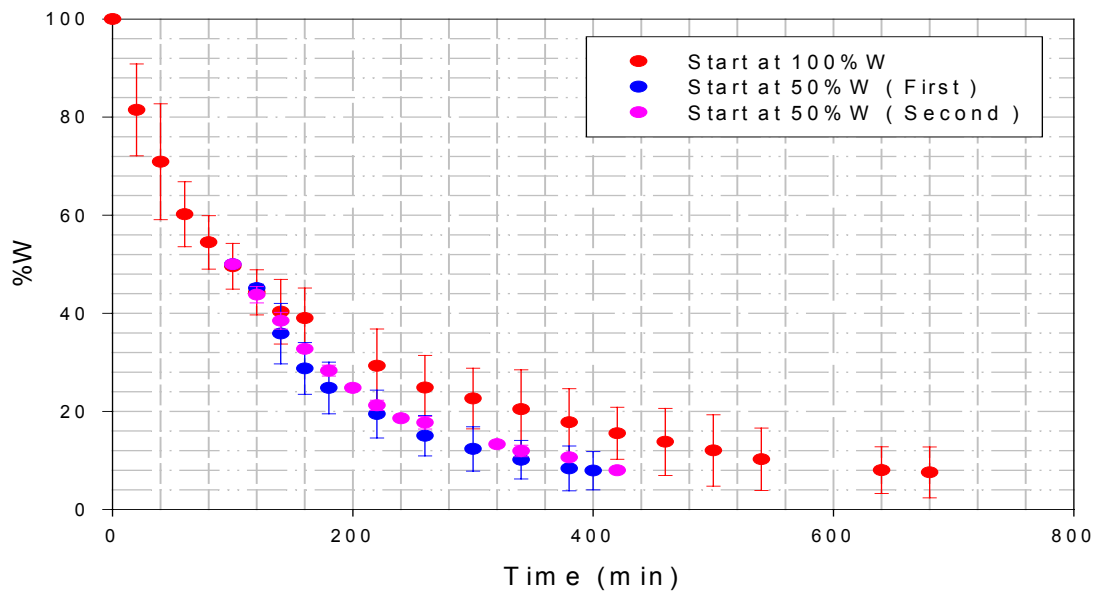
จากผลการทดลองสามารถหาอัตราการแห้งของฟองยางธรรมชาติในช่วงอัตราคงที่โดยหาความชันของกราฟในช่วงแรกของการทดลอง ดังรูปที่ 7



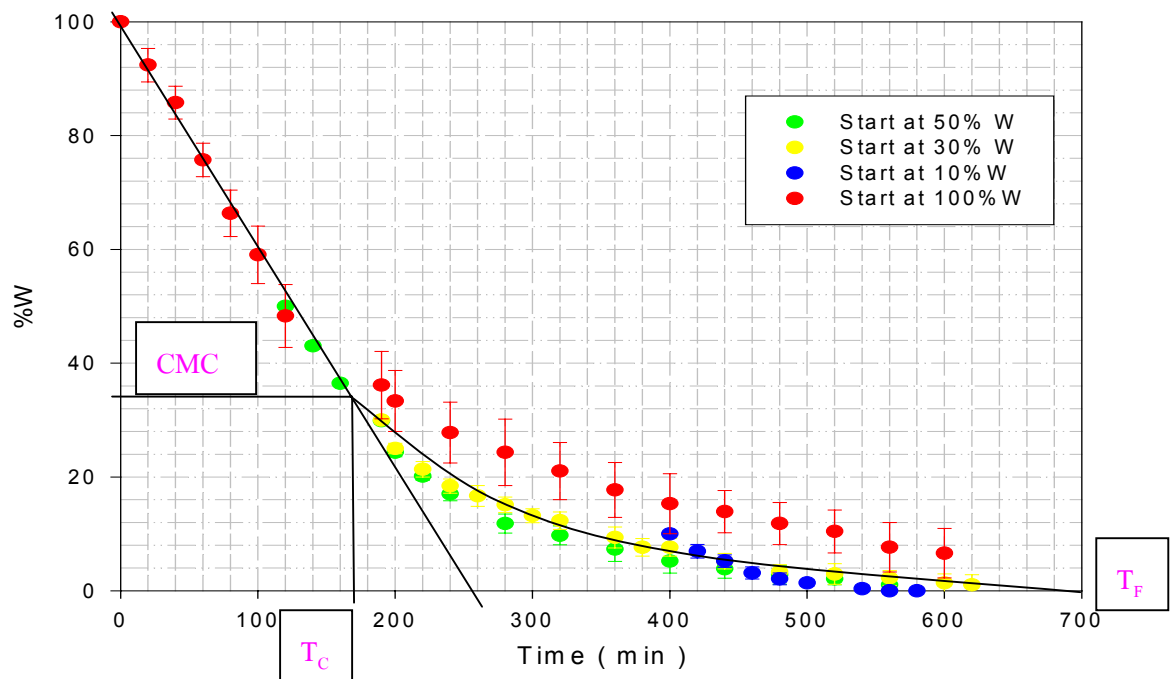
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาด 6 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว



รูปที่ 7 รูปตัวอย่างการหาอัตราการแห้ง

ค่าความชื้นวิกฤตสามารถหาได้จากจุดที่ผลการทดลองเริ่มแยกออกจากเส้นตรงที่แทนอัตราการแห้งในช่วงแรก ดังนั้นจะสามารถหาเวลาของค่าความชื้นวิกฤตได้ ส่วนเวลาที่ใช้ในการอบแห้งนั้นจะประมาณได้จากเส้นกราฟ ดังรูปที่ 7

เนื่องจากอัตราการแห้งจะขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัสกับตัวกลาง และความหนาแน่นของฟองยาง ทำให้อัตราการแห้งนั้นจะเปลี่ยนไปตามขนาดของชิ้นทดสอบ ดังนั้นในการเปรียบเทียบชิ้นทดสอบที่มีขนาดและความหนาแน่นแตกต่างกันจึงต้องมีการดัดแปลงอัตราการแห้งที่ได้เป็นอัตราการแห้งสุทธิดังนี้

การหาอัตราการแห้งในช่วงเริ่มต้น (N)

$$N = \text{ความชันของเส้นตรงในช่วงแรก}$$

การหาอัตราการแห้งสุทธิ (Nw)

$$N_w = (W_g / A) \times N$$

โดย W_g = น้ำหนักแห้งของฟองยางธรรมชาติ (g)

$$A = \text{พื้นที่ผิวของฟองยางธรรมชาติ}$$

การหาพื้นที่ผิวของฟองยางธรรมชาติ (A)

ในการพื้นที่ผิวของการอบแห้งนั้นคิดได้จากพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับอากาศร้อน คือ ผิวด้านบนของวัตถุและผิวรอบข้างของวัตถุทั้ง 4 ด้าน ซึ่งหาได้ดังนี้

$$\text{Area (A)} = [(4 \times \text{ความหนา} \times \text{ความกว้าง}) + (\text{ความกว้าง} \times \text{ความยาว})]$$

เมื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา (นาท) กับอัตราการแห้งสุทธิ $((g / m^2) \times (\% / min))$ ดังรูปที่ 8 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับอัตราการแห้งสุทธิ $((g / m^2) \times (\% / min))$ รูปที่ 9

จากรูปที่ 8 เป็นการแสดงถึงอัตราการแห้งสุทธิต่อระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงเวลาที่ใช้ในช่วงอัตราคงที่ (T_c) และช่วงอัตราลดลง (T_f) รวมทั้งเวลาที่ใช้อย่างทั้งหมด

$$(T_T = T_c + T_f)$$

จากรูปที่ 9 เป็นกราฟที่แสดงถึงกลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ ซึ่งแสดงถึงค่าความชื้นวิกฤตดังนั้นการแสดงผลกราฟในลักษณะนี้ทำให้เห็นถึงกลไกการแห้งของวัตถุได้ชัดเจนกว่า ซึ่งจากกราฟนี้สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการอบแห้งในช่วงต่าง ๆ ได้ดังนี้

การหาเวลาที่จุดค่าความชื้นวิกฤตของการอบแห้ง (T_C) คือ

$$T_C = - (W_g / A) \times ((X_C - X_i) / N_w)$$

โดย T_C = ระยะเวลาของการอบแห้งในช่วงอัตราคงที่ (min)

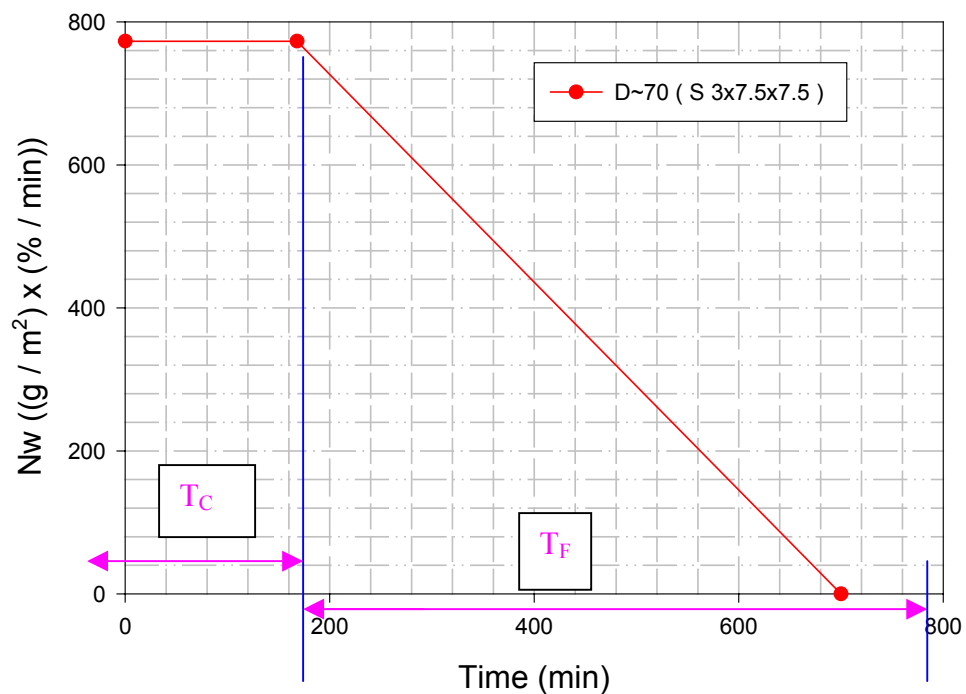
W_g = น้ำหนักแห้งของฟองยางธรรมชาติ (g)

X_C = ค่าความชื้นวิกฤต

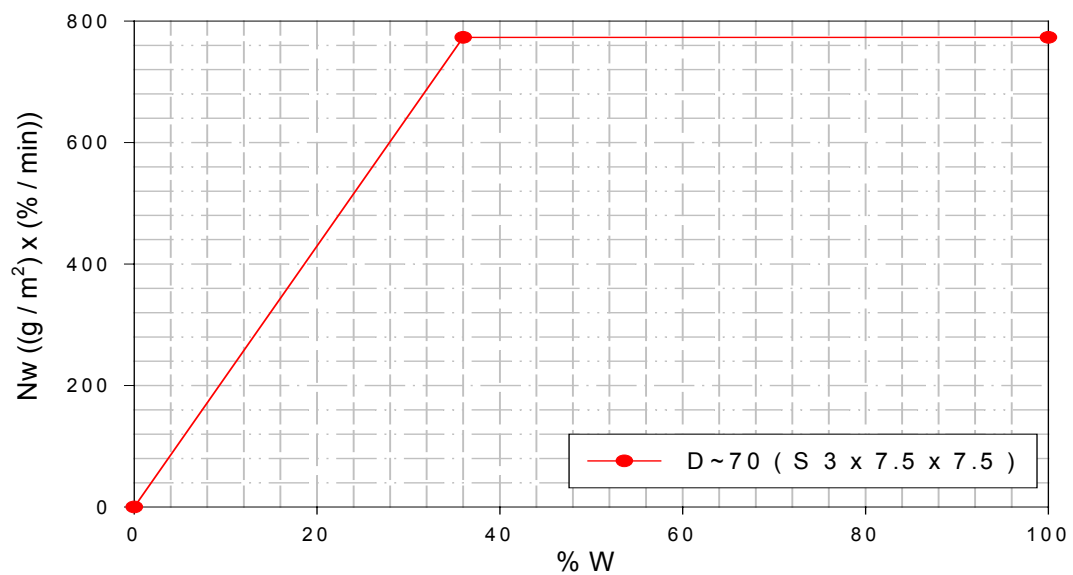
A = พื้นที่ผิวในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ (m^2)

N_w = อัตราการแห้งสุทธิ

X_i = เปอร์เซนต์ความชื้นที่เริ่มต้น (%W)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ($(g / m^2) \times (\% / min)$) กับเวลา (นาที)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติ

การหาเวลาของการอบแห้งในช่วงสุดท้าย (T_F) คือ

$$T_F = (Wg \times X_C) / (A \times N_w) \ln (X_C / X_3)$$

โดย T_F = ระยะเวลาของการอบแห้งในช่วงอัตราแห้งถดถอย (min)

Wg = น้ำหนักแห้งของฟองยางธรรมชาติ (g)

X_C = ค่าความชื้นวิกฤต

A = พื้นที่ผิวในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ (m²)

N_w = อัตราการแห้งสุทธิ

X₃ = ความชื้นสุดท้าย

การหาเวลาของการอบแห้งทั้งหมด (T_T) คือ

$$T_T = T_C + T_F$$

โดย T_T = ระยะเวลาของการอบแห้งทั้งหมด (min)

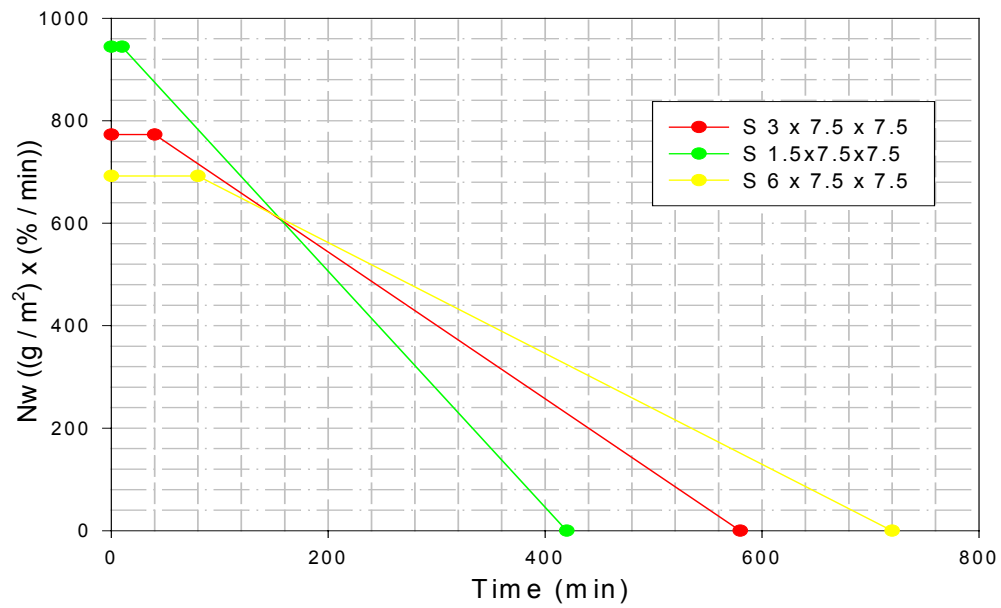
T_C = ระยะเวลาของการอบแห้งในช่วงอัตราคงที่ (min)

T_F = ระยะเวลาของการอบแห้งในช่วงอัตราถดถอย (min)

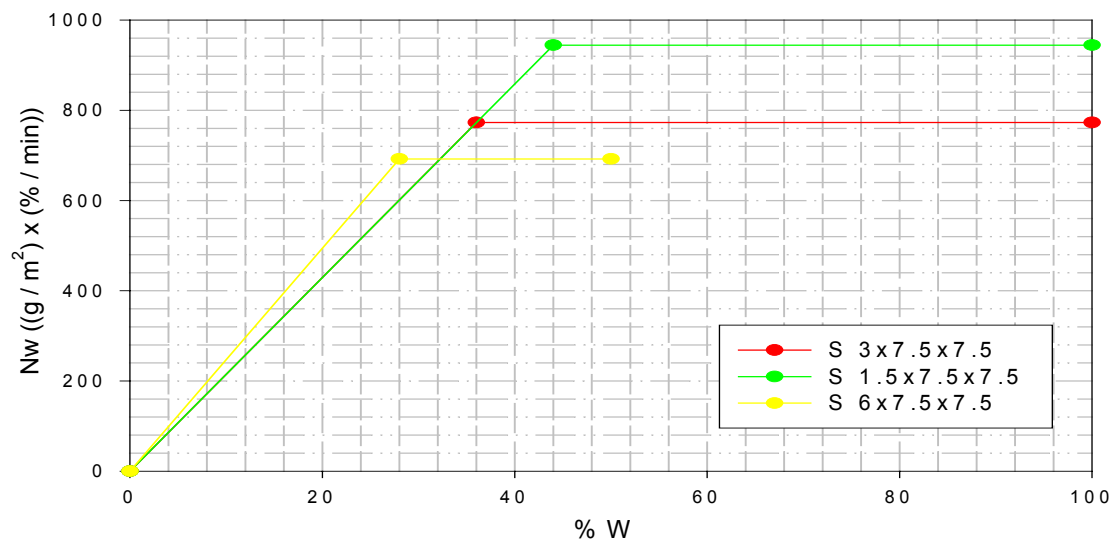
ดังนั้นเพื่อจะได้กราฟการอบแห้ง (รูปที่ 8 และ 9) จึงมีการทดลองที่ค่าความชื้นเริ่มต้นต่างกัน 2 – 3 ค่า เพื่อที่จะได้อัตราการแห้งที่ใช้ในกราฟการอบแห้ง ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไป

จากรูปที่ 10 เมื่อศึกษาฟองยางที่มีความหนาแน่นเดียวกัน ที่ความหนาแตกต่างกันพบว่า ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนา 1.5 นิ้ว มีค่าอัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่สูงที่สุด กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิต่อเวลาที่แสดงในผลการทดลองทั้งหมดจะเป็นเวลาเทียบกับเวลาที่ใช้สำหรับการอบแห้งฟองยางธรรมชาติที่ความชื้นเริ่มต้น 50 % ถึงแม้ว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิต่อปริมาณความชื้นจะเปรียบเทียบที่ความชื้นเริ่มต้นต่างกัน อัตราการลดลงของอัตราการแห้งสุทธิเร็วที่สุดและระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นที่สุด รองลงมาคือที่ความหนา 3 นิ้ว และที่ความหนา 6 นิ้ว มีอัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่ต่ำสุด อัตราการลดลงของอัตราการแห้งสุทธิช้าที่สุดและใช้ระยะเวลาในการอบให้แห้งนานที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากหลายปัจจัยตั้งแต่ปริมาณน้ำที่ต้องทำให้แห้งมีปริมาณมากในฟองยางธรรมชาติความหนา 6 นิ้ว และลดลงตามลำดับ อีกปัจจัยหนึ่งก็คือความหนาของวัตถุ จากรายงาน (William – Gardner, 1971) พบว่า อัตราการแห้งของวัตถุจะแปรผกผันกับความหนาของวัตถุ พื้นที่ผิวในการอบแห้งก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งพื้นที่ผิวมากจะทำให้แห้งได้เร็วขึ้น แต่จากการทดลองพบว่าพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของฟองยางธรรมชาติจากความหนาที่เพิ่มขึ้น ไม่มากพอที่จะชดเชยกับปริมาณน้ำและเวลาที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาของฟองยางธรรมชาติได้

จากรูปที่ 11 ที่ความหนา 1.5 นิ้ว มีค่าความชื้นวิกฤตที่สูงที่สุด และมีอัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่สูงที่สุดอยู่ในระดับที่สูงกว่าความหนา 3 นิ้ว และที่ความหนา 6 นิ้วเป็นลำดับสุดท้ายปริมาณน้ำในแต่ละความหนาไม่มีผลกระทบต่อกลไกที่เกิดขึ้นในการแห้ง ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่า ความหนาที่เพิ่มขึ้นของฟองยางธรรมชาติจะลดอัตราการแห้งในอัตราคงที่ลง ในขณะที่เดียวกันก็ลดค่าความชื้นวิกฤตลงด้วย



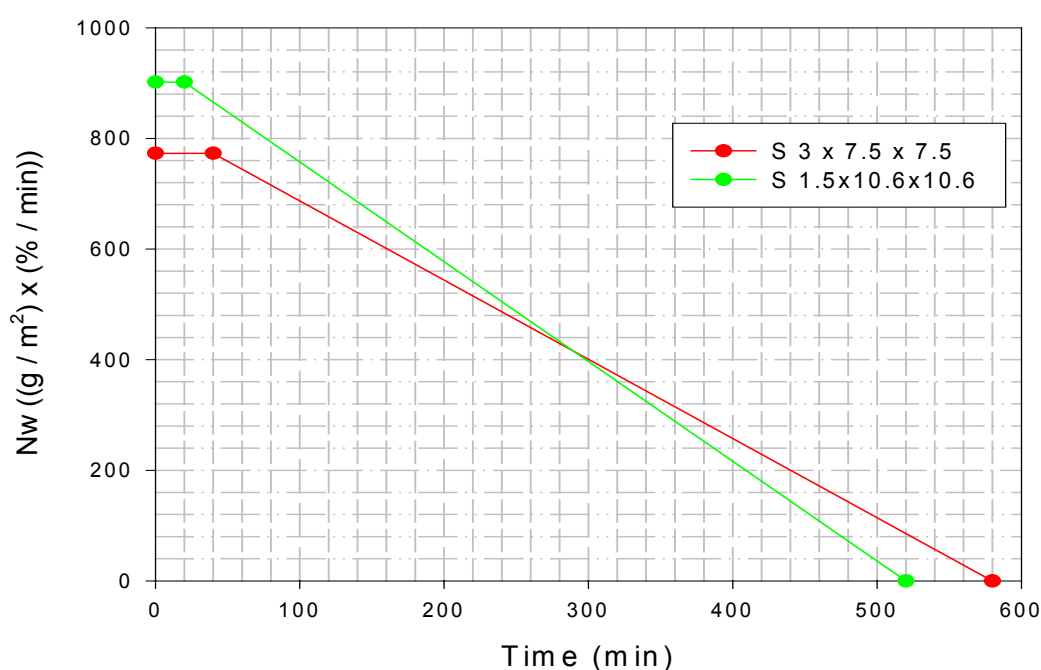
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก กับเวลาของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาต่างกัน



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุกกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาต่างกัน

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนามากแห้งช้ากว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาน้อย เพื่อที่จะตัดปัจจัยด้านปริมาณน้ำออก การทดลองนี้จึงใช้ฟองยางธรรมชาติที่มีปริมาตรเท่ากัน ดังนั้นปริมาณน้ำที่ต้องทำให้แห้งจึงมีปริมาณเท่ากัน

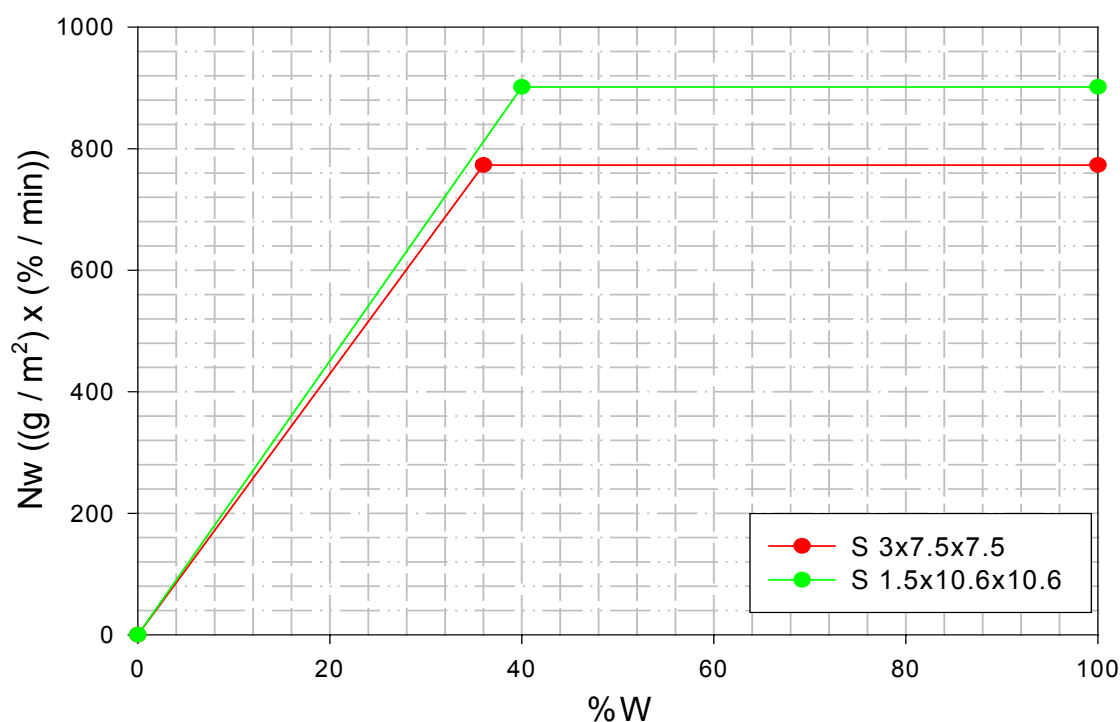
จากรูปที่ 12 ที่ฟองยางธรรมชาติมีปริมาตรเท่ากันแต่มีความหนาแตกต่างกันพบว่าที่ขนาดฟองยางธรรมชาติเป็น $1.5 \times 10.6 \times 10.6$ ลูกบาศก์นิ้ว มีอัตราการอบแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่ที่สูงกว่าอัตราการอบแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่ของฟองยางธรรมชาติขนาด $3 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว และมีค่าใกล้เคียงกันกับรูปที่ 10 และระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเพิ่มขึ้นจากรูปที่ 10 มาเข้าใกล้กับขั้นตอนตัวอย่างที่มีความหนา 3 นิ้ว การที่ฟองยางธรรมชาติมีปริมาตรเท่ากันแต่ขนาดที่แตกต่างกันโดยที่ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาน้อยกว่าสามารถเกิดการแห้งได้เร็วกว่าแต่เร็วกว่าไม่มากนักเป็นเพราะปริมาณน้ำที่มีในฟองยางธรรมชาติเท่ากันแต่มีความหนาที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นถึงความหนาข้อมมีผลมากต่ออัตราแห้งของฟองยางธรรมชาติ ในขณะที่ปริมาณน้ำที่ต้องทำให้แห้งมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง



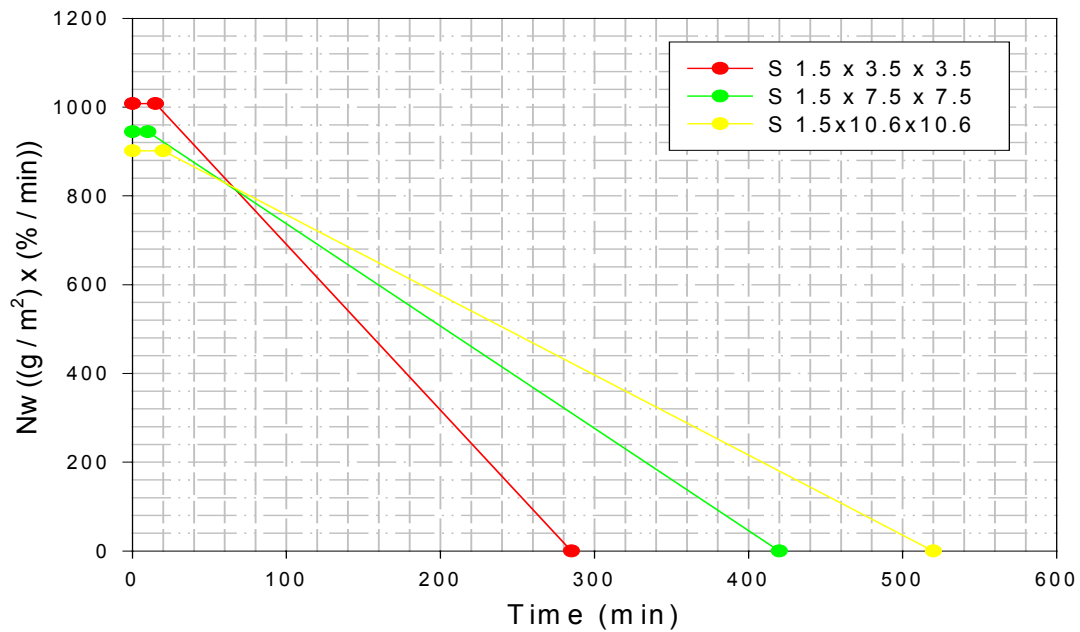
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ $((g / m^2) \times (\% / min))$ กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 13 ค่าความชื้นวิกฤตของฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 10.6 \times 10.6$ ลูกบาศก์นิ้ว มีค่าเป็น 40 %W ซึ่งสูงกว่าฟองยางธรรมชาติขนาด $3 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว ที่มีค่าเป็น 36 %W อัตราการแห้งสุทธิเช่นเดียวกับที่พบในการทดลองที่แล้วที่ฟองยางธรรมชาติความหนาน้อยมีค่าสูงกว่าในช่วงอัตราคงที่ การที่ฟองยางธรรมชาติมีความหนาที่น้อยทำให้อัตราการแห้งของฟองยางธรรมชาติมีค่าสูงเป็นผลเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายจึงมีผลทำให้เกิดการอบแห้งในช่วงเริ่มต้นได้เร็วและมีการถ่ายเทมวลของน้ำที่เกิดขึ้นในปริมาณที่สูงกว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนามากกว่า

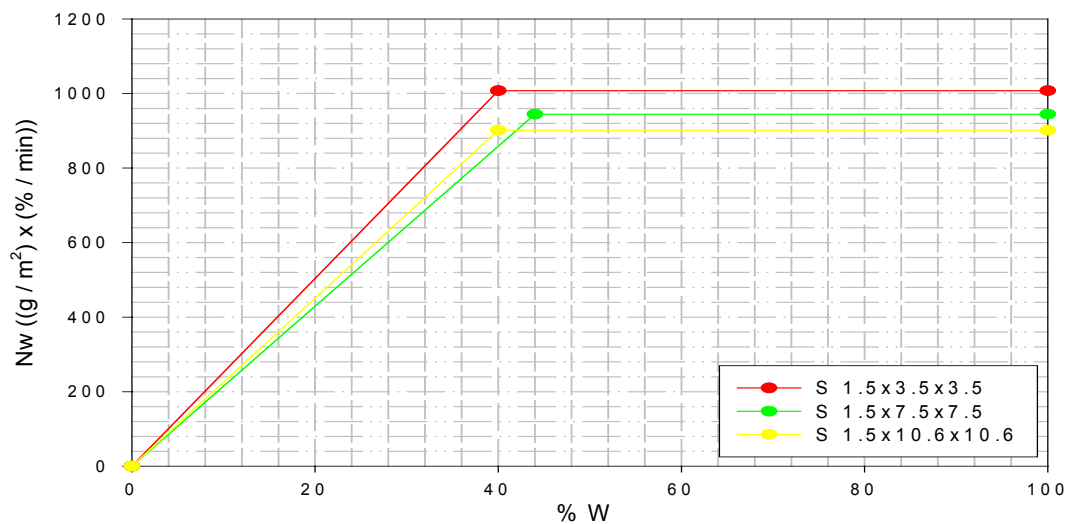
จากรูปที่ 14 ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาเท่ากันแต่มีความกว้างและความยาวไม่เท่ากัน พบว่า ที่ความหนาเท่ากันค่าอัตราการแห้งสุกในช่วงอัตราคงที่มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งไม่เท่ากัน โดยที่ฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 3.5 \times 3.5$ ลูกบาศก์นิ้ว ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด รองมาคือฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว และที่ใช้เวลานานที่สุดในการอบแห้งคือฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 10.6 \times 10.6$ ลูกบาศก์นิ้ว การที่ความหนาเท่ากันแต่ความกว้างและความยาวที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อระยะเวลาในการอบแห้ง เพราะจะทำให้ปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไปมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันไปตามขนาดของฟองยางธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันพื้นที่ผิวในการอบแห้งก็แตกต่างกันด้วย จากการทดลองพบว่าชิ้นฟองยางธรรมชาติที่เล็กกว่ามีปริมาณน้ำที่น้อยกว่าแห้งได้เร็วที่สุด ในขณะที่ฟองยางธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่ที่สุดและพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเพิ่มความเร็วในการอบแห้งได้เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่ต้องเพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก $((g / m^2) \times (\% / min))$ กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติมีปริมาตรเท่ากัน ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



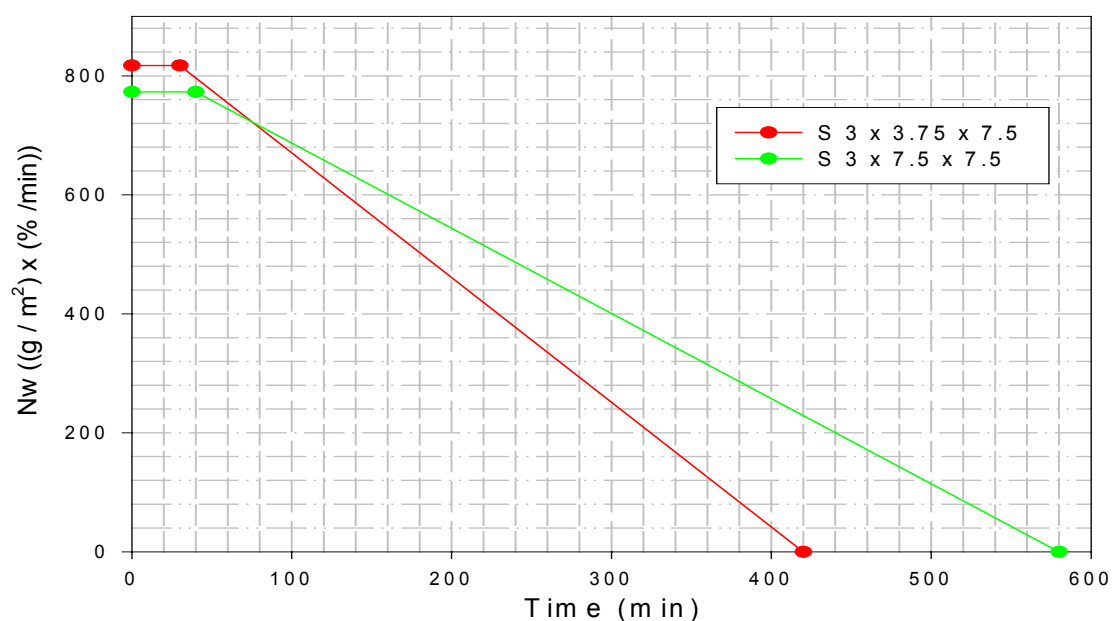
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ((g / m²) x (% / min)) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติความหนา 1.5 นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติมีความหนา 1.5 นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

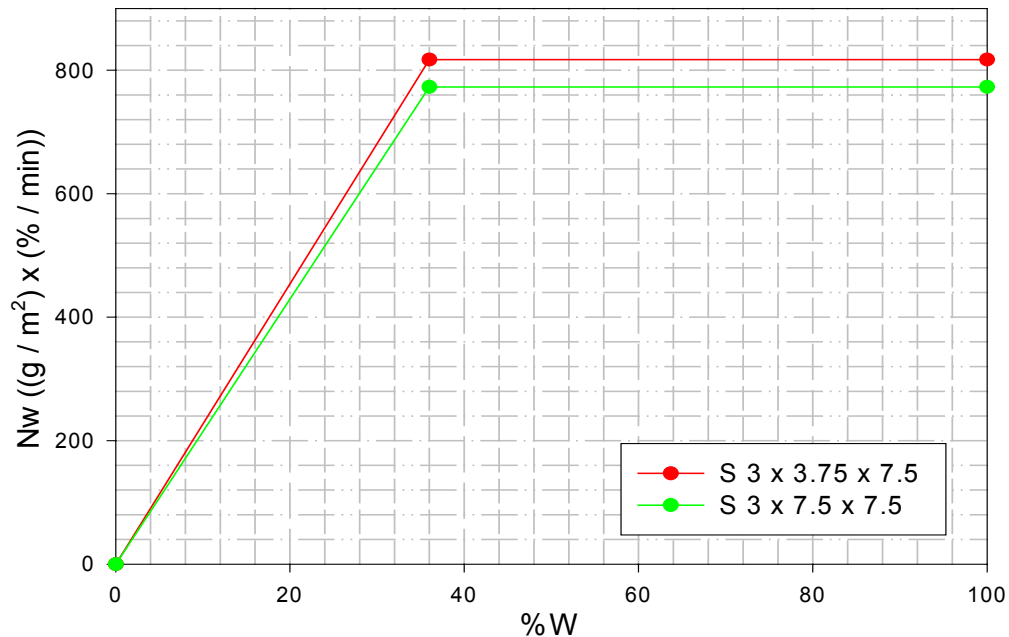
จากรูปที่ 15 ที่ฟองยางธรรมชาติมีความหนา 1.5 นิ้ว พบว่าค่าความชื้นวิกฤตของฟองยางธรรมชาติที่ความหนาเท่ากันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความชื้นวิกฤต 40 %W เป็นฟองยางธรรมชาติ

ที่มีขนาดเป็น 1.5 x 3.5 x 3.5 ลูกบาศก์นิ้ว และที่ฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 10.6 x 10.6 ลูกบาศก์นิ้ว ส่วนที่ฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว มีค่าความชื้นวิกฤตเป็น 44 %W โดยค่าอัตราการแห้งสุกของฟองยางธรรมชาติในช่วงอัตราคงที่จะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่ากลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับความหนาของฟองยางธรรมชาติเป็นอย่างมาก โดยไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาตรของฟองยางธรรมชาติหรือปริมาณความชื้นเริ่มต้นและปริมาณน้ำที่ใส่



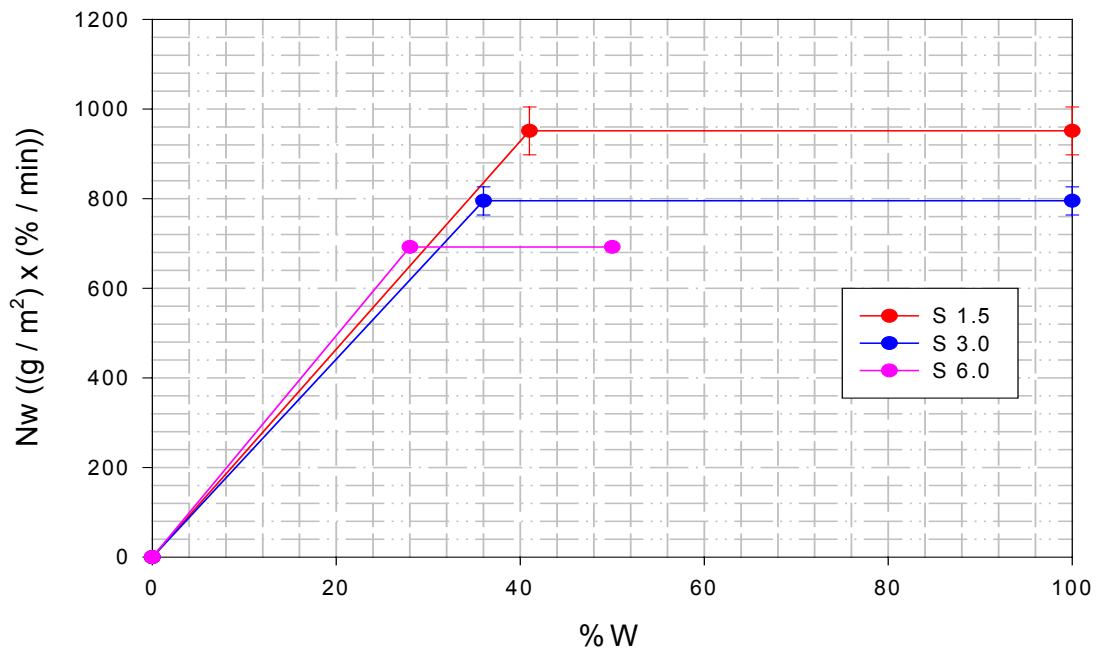
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ((g / m²) x (% / min)) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติมีความหนา 3 นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 16 ที่ฟองยางธรรมชาติมีความหนา 3 นิ้วเท่ากัน แต่ขนาดแตกต่างกันให้ผลคล้ายกันกับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนา 1.5 นิ้ว กล่าวคือ อัตราการแห้งสุกมีค่าใกล้เคียงกันและฟองยางธรรมชาติชิ้นใหญ่กว่าใช้เวลาในการแห้งช้ากว่า

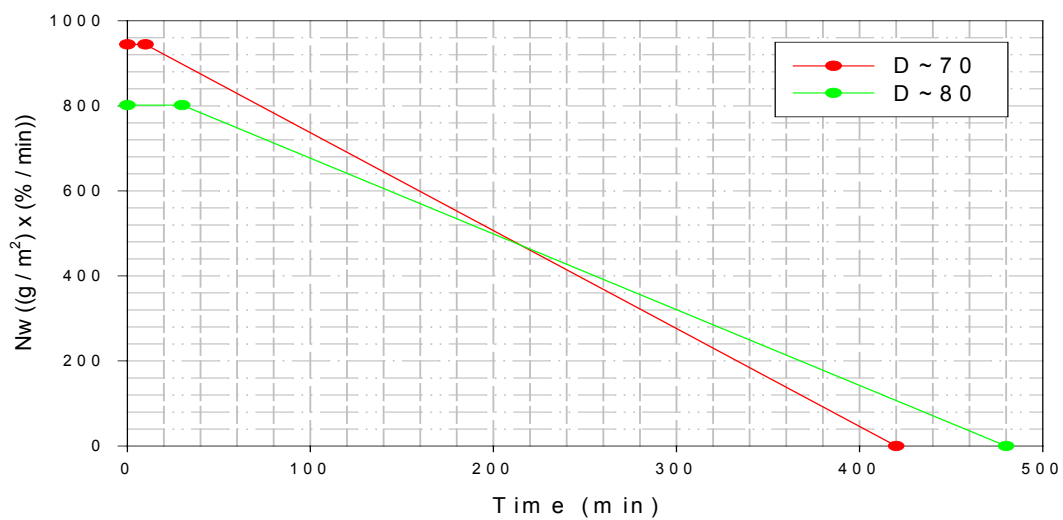


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติมีความหนา 3 นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

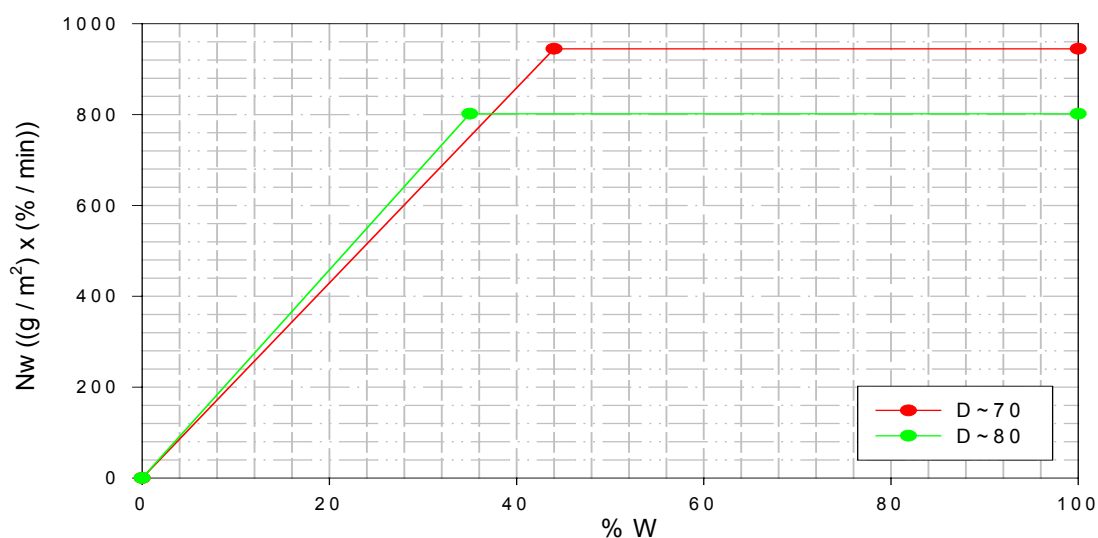
จากรูปที่ 17 เป็นกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) และอัตราการแห้งสุกในช่วงอัตราคงที่ของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนา 3 นิ้ว พบว่า ผลที่ได้นี้คล้ายคลึงกับที่พบในชั้นของฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 นิ้ว ดังนั้นถ้านำค่าเหล่านี้มาหาค่าเฉลี่ยตามความหนาแล้วนำมาเปรียบเทียบบั้กันดังรูปที่ 18 จะเห็นได้ชัดว่ากลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับความหนา แต่ไม่ขึ้นกับขนาดของฟองยางและปริมาณความชื้นเริ่มต้น อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณน้ำในระบบที่จำต้องระเหยออก



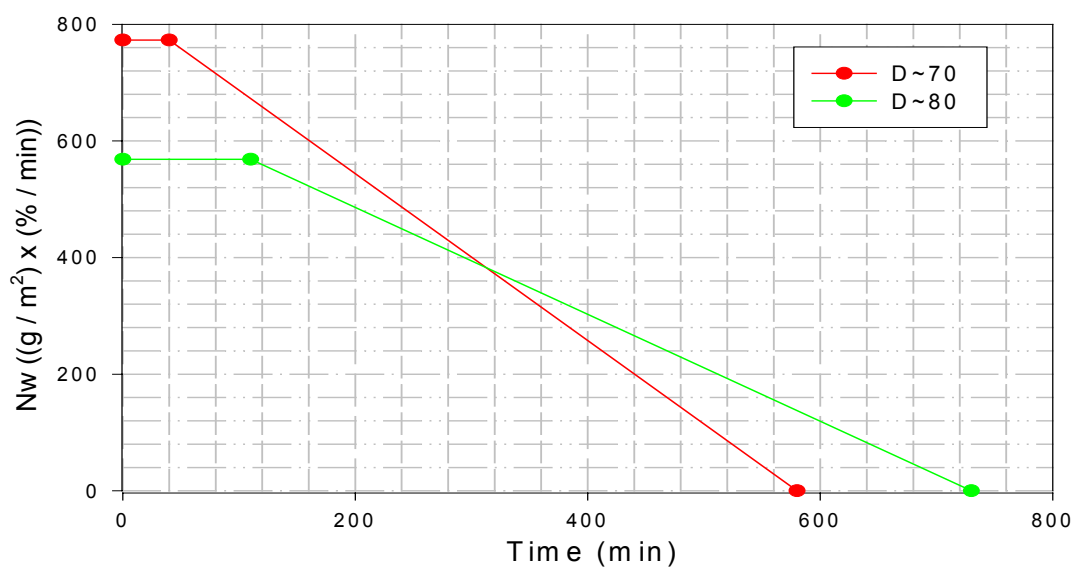
รูปที่ 18 เปรียบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก $((g / m^2) \times (\% / min))$ กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนา 1.5, 3 และ 6 นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก $((g / m^2) \times (\% / min))$ กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 และที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

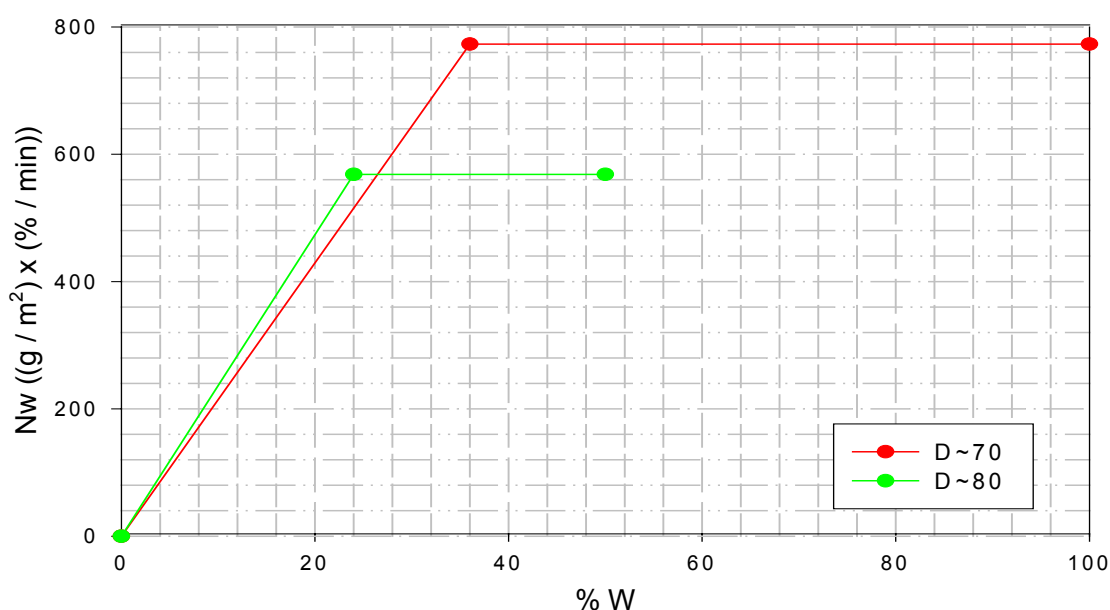


รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 และที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ((g / m²) x (% / min)) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 และที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

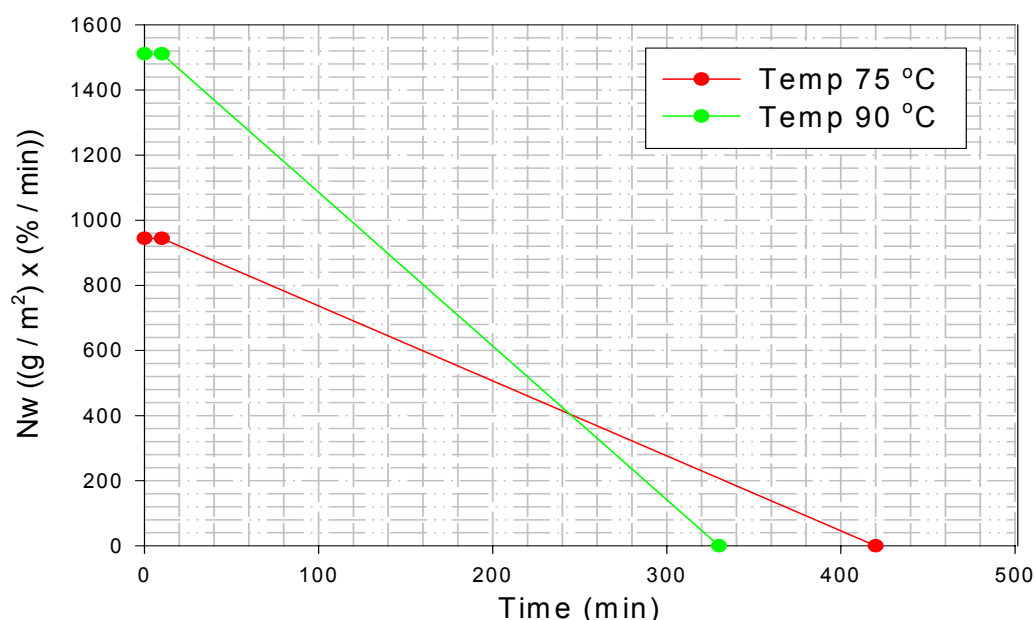
จากรูปที่ 19 และรูปที่ 21 พบว่าความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งฟองยางธรรมชาติขนาด $1.5 \times 7.5 \times 7.5$ และขนาด $3 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว มีระยะเวลาการแห้งที่เร็วกว่าฟองยางธรรมชาติความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นผลเนื่องจากความมีรูพรุนของฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าสูงกว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำให้การเกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าฟองยางธรรมชาติที่มีรูพรุนขนาดเล็ก อีกทั้งปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไปมีปริมาณที่มากกว่าสำหรับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูงกว่า



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติขนาด $3 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 และความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

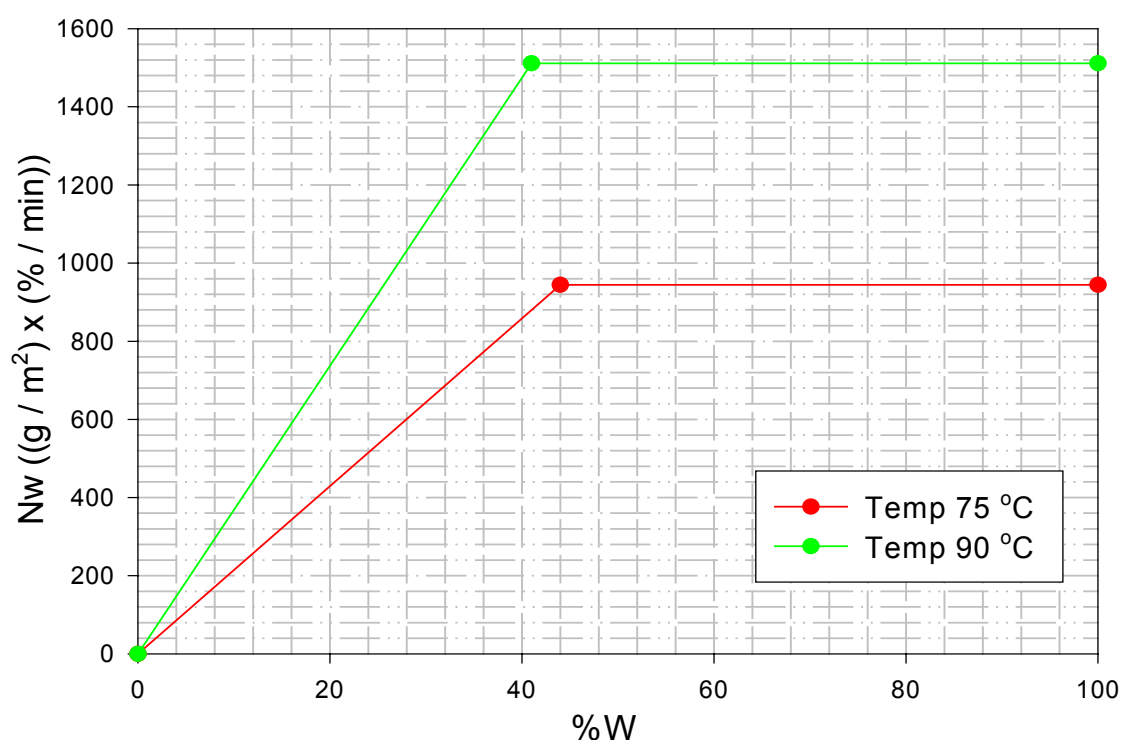
ในรูปที่ 20 และ 22 พบว่าที่ฟองยางธรรมชาติทั้งที่ขนาด $1.5 \times 7.5 \times 7.5$ และ $3 \times 7.5 \times 7.5$ ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าความชื้นวิกฤตที่สูงกว่าฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยมีค่าความชื้นวิกฤตสูงกว่าประมาณ 10 % และที่ฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยังมีค่าอัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่ที่สูงกว่าฟองยางธรรมชาติที่ความหนาแน่น 80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เช่นกัน ดังนั้นจึงเห็นได้ชัดว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีอัตราการแห้งในช่วงอัตราคงที่สูงกว่า ถึงแม้ว่าจะถึงจุดความชื้นวิกฤตที่ความชื้นที่สูงกว่าแต่ใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่า รวม

ทั้งอัตราการลดลงของอัตราการแห้งในช่วงอัตราคงที่ของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นต่ำ มีค่าสูงกว่าทำให้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าฟองยางธรรมชาติความหนาแน่นสูง



รูปที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุทธิ ((g / m²) x (% / min)) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรที่อุณหภูมิ 75 °C และ 90 °C

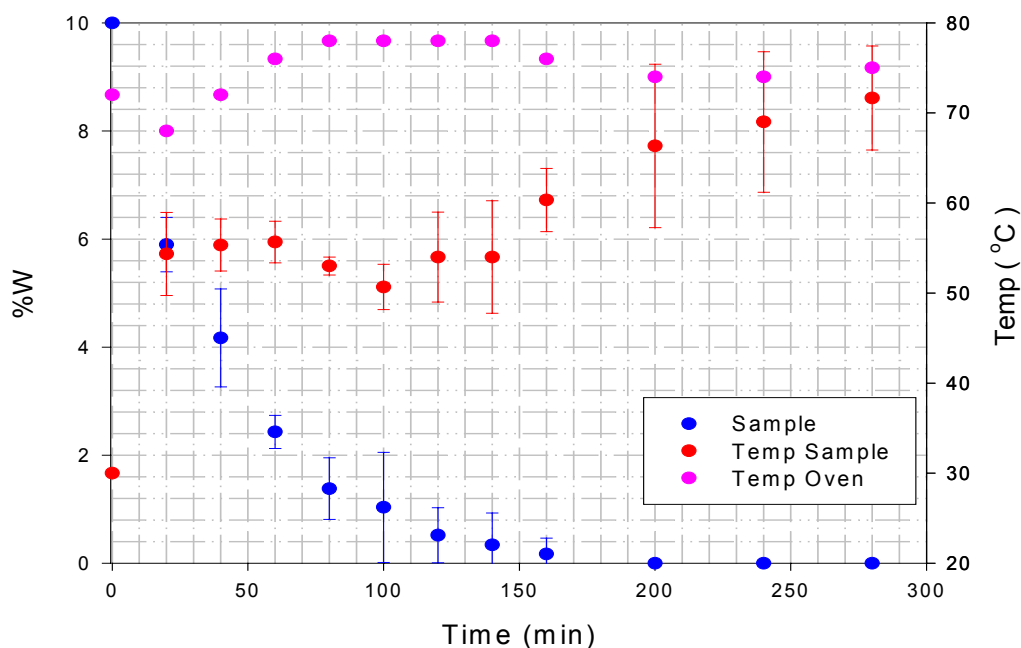
จากรูปที่ 23 ที่มีขนาดฟองยางธรรมชาติ 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่นเดียวกัน แต่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าอัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่ของฟองยางธรรมชาติที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 90 °C มีค่าสูงกว่าและใช้ระยะเวลาในการอบที่เร็วกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 75 °C เป็นผลเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลได้มากขึ้นการกลายเป็นไอของน้ำจึงเกิดขึ้นได้ง่าย



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ((g / m²) x (% / min)) กับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิ 75 °C และ 90 °C

จากรูปที่ 24 พบว่าการอบฟองยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 90 °C มีอัตราการแห้งสุกในช่วงอัตราคงที่ที่สูงเมื่อเทียบกับการอบแห้งฟองยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 75 °C อัตราการลดลงของอัตราการแห้งสุกของวัตถุที่อบที่อุณหภูมิ 90 °C ยังมีค่าสูงกว่าการอบแห้งฟองยางธรรมชาติที่อุณหภูมิ 70 °C และค่าความชื้นวิกฤตของฟองยางธรรมชาติที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C มีค่าเป็น 41 %W ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความชื้นวิกฤตของฟองยางธรรมชาติที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 75 °C คือ 44 %W ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งในอากาศและวัตถุเพิ่มสูงขึ้น การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้ดีขึ้น รวมทั้งความดันไอน้ำที่มีค่าสูงขึ้นยังทำให้การถ่ายเทมวลสารออกจากวัตถุเป็นไปได้เร็วมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากเวลาการอบแห้งที่สั้นลงอย่างเห็นได้ชัดจากรูปที่ 23

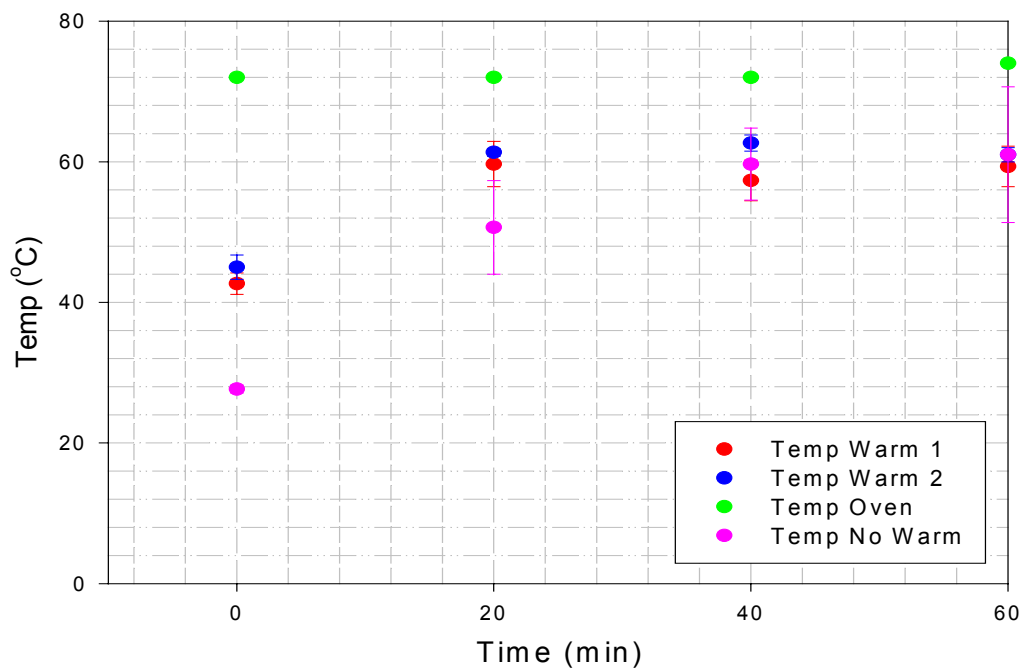
อย่างไรก็ตามฟองยางธรรมชาติที่ได้หลังจากอบที่อุณหภูมิสูงจะมีการเสื่อมคุณภาพ คือ การเปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน ซึ่งเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติ



รูปที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) และอุณหภูมิ (°C) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 25 พบว่าในช่วงเริ่มต้นฟองยางธรรมชาติมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 20 นาทีแรก จากนั้นอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติจะเริ่มคงที่โดยที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเมื่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าเข้าใกล้ 0 %W ตั้งแต่เวลา 140 นาทีขึ้นไป อุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิของตู้อบมากขึ้นและอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติเท่ากับอุณหภูมิของตู้อบเมื่อฟองยางธรรมชาติไม่มีความชื้นเหลืออยู่ ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นมีความสมดุลกันระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากระบบกับพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ ทำให้อุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติมีค่าคงที่ จนกระทั่งอยู่ในช่วงที่เปอร์เซ็นต์ความชื้นมีค่าต่ำมาก พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำที่ความชื้นดังกล่าวมีมากและเป็นผลทำให้ไปเพิ่มอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติจนกระทั่งฟองยางธรรมชาติมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของตู้อบ

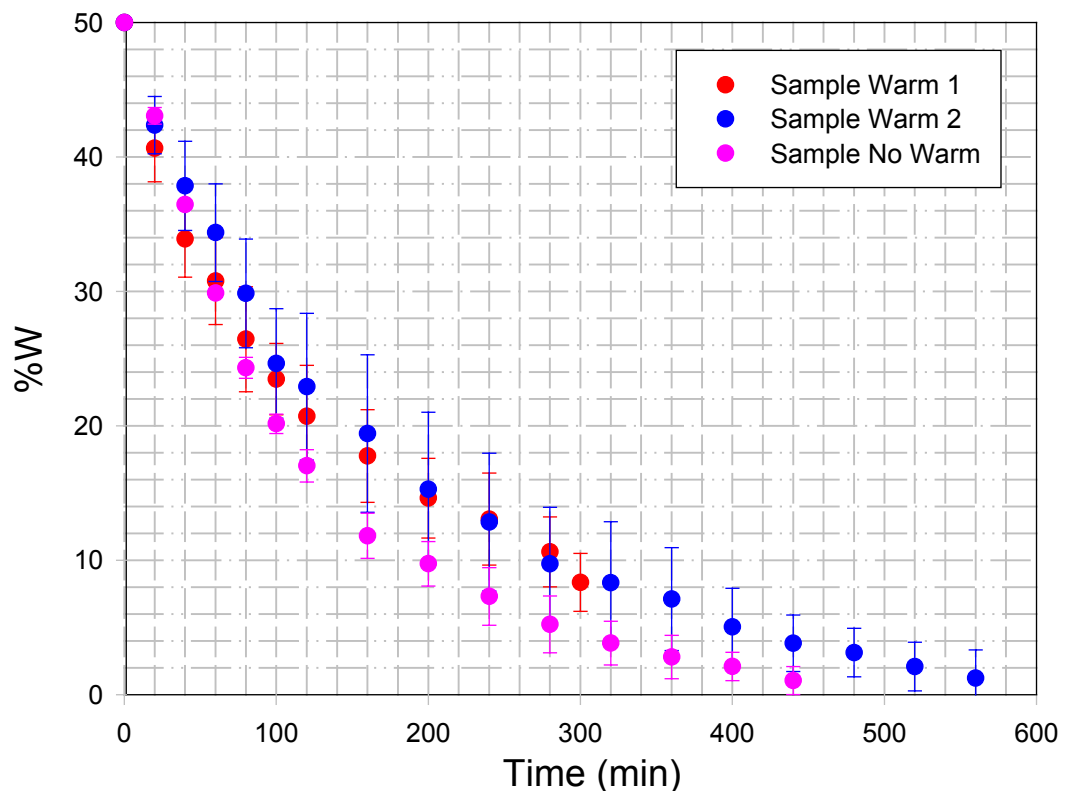
จากการสังเกตจะเห็นได้ว่าถึงแม้ว่ายางจะเป็นฉนวน แต่การที่ฟองยางธรรมชาติมีลักษณะเป็นโพรงอากาศที่ต่อเนื่องกัน การถ่ายเทความร้อนในฟองยางธรรมชาติใช้เวลาประมาณ 20 นาทีในการเพิ่มอุณหภูมิของฟองยางธรรมชาติจากที่ 30 °C เป็น 55 °C



รูปที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (°C) ของฟองยางธรรมชาติและอุณหภูมิของผู้อบกับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

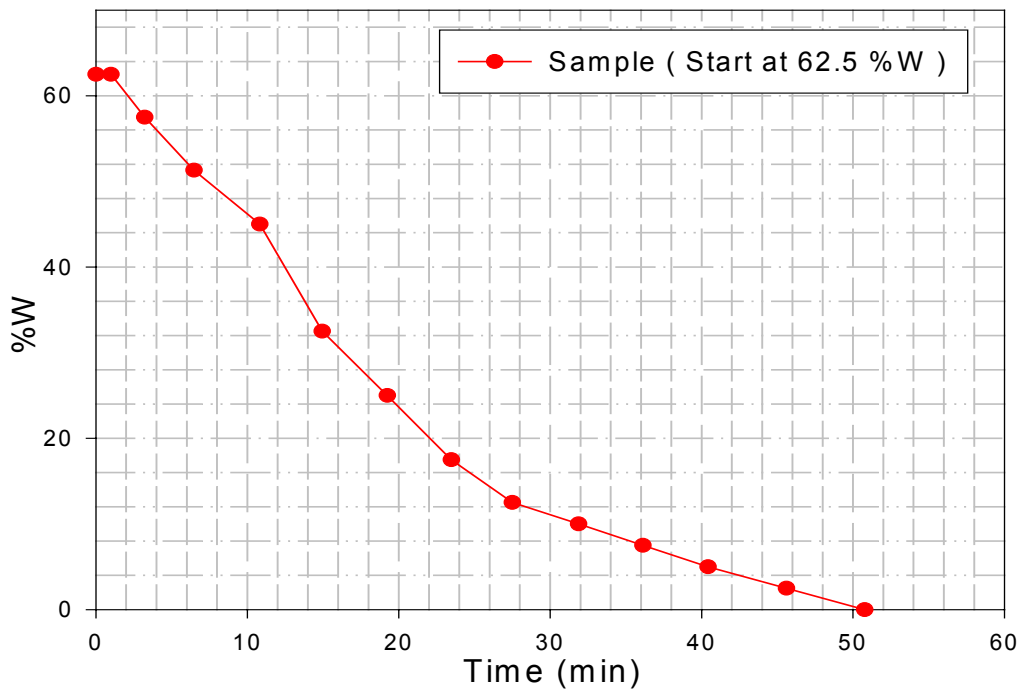
จากรูปที่ 26 พบว่าระหว่างการอบฟองยางธรรมชาติและอบน้ำให้ร้อนก่อนการอบให้แห้ง (Temp Warm 1 และ Temp Warm 2) กับฟองยางธรรมชาติและน้ำที่ไม่มีการอบให้ร้อนก่อนทำการอบให้แห้ง (Temp No Warm) มีความแตกต่างกันในช่วงประมาณ 40 นาทีแรก คือ ฟองยางธรรมชาติที่มีการอบให้ร้อนมาก่อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 20 °C จากนั้นอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเวลาประมาณ 40 นาทีจึงมีอุณหภูมิที่เท่ากัน

ในการทดลองนี้ฟองยางธรรมชาติจะถูกอุ่นให้ร้อนก่อน เพื่อศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกของการอบแห้ง โดยทั้งน้ำที่จะถูกเติมและฟองยางธรรมชาติจะถูกอบให้ร้อนกว่าชั้นฟองยางธรรมชาติปกติ



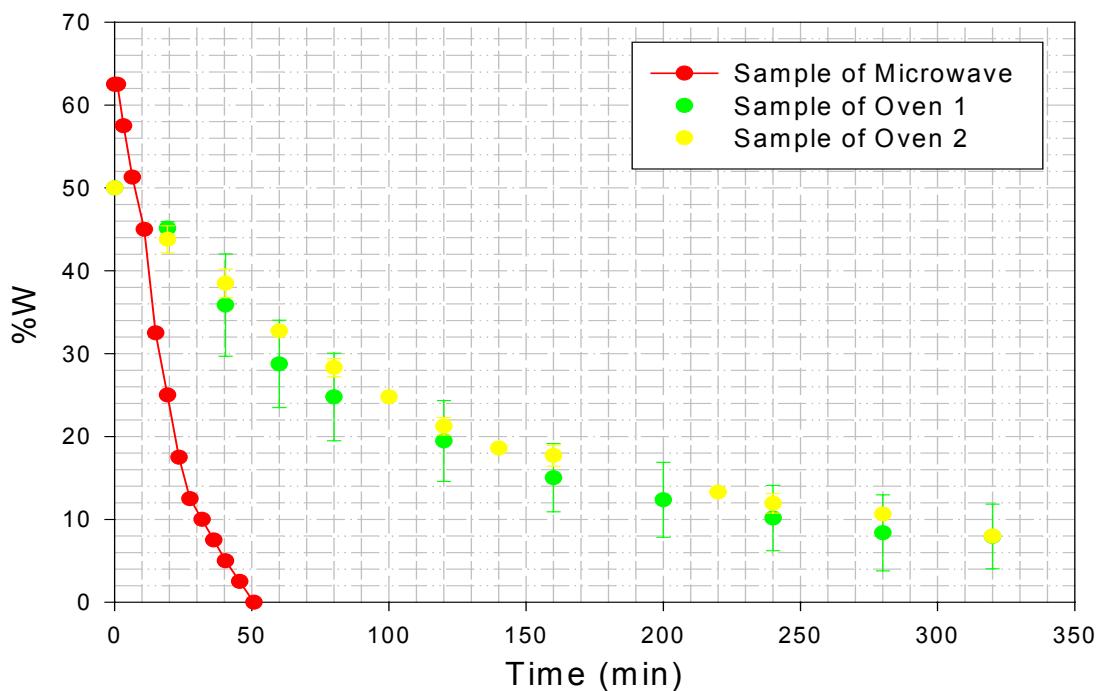
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติ ขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 27 จะพบว่าการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกนั้นแทบจะไม่มีผลต่อเวลาการอบแห้ง



รูปที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติ ขนาด 6 x 7 x 7 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 78.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของตู้อบไมโครเวฟ (Microwave)

ในรูปที่ 28 เป็นการอบฟองยางธรรมชาติที่ใช้ตู้อบไมโครเวฟพบว่าใช้ระยะเวลาประมาณ 50 นาที ในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติที่มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นเริ่มต้น 62.5 %W



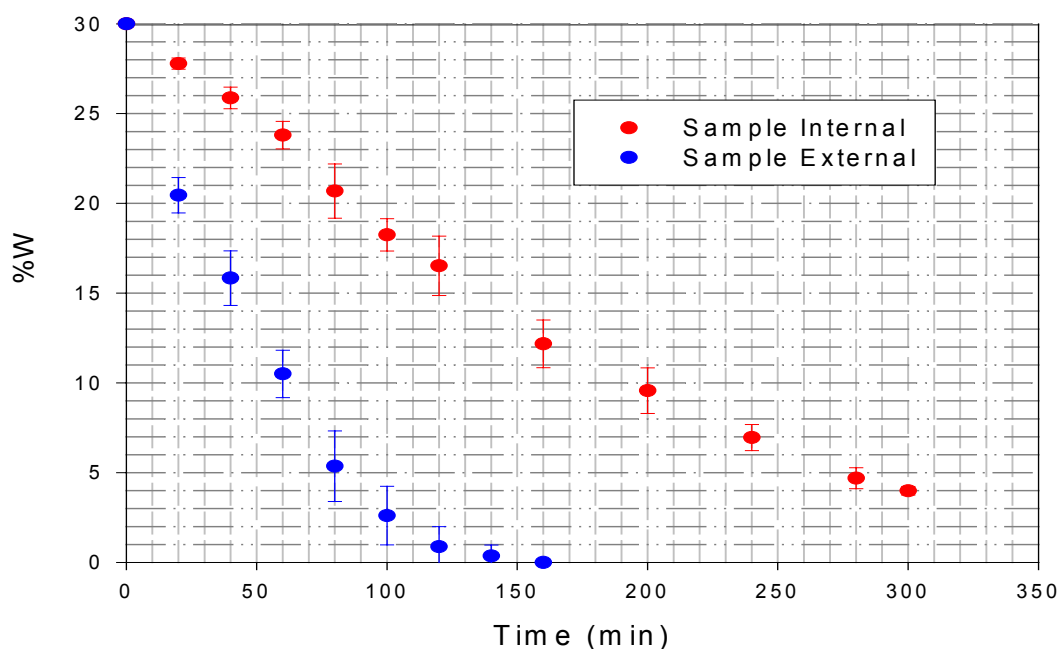
รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติ ขนาด 6 x 7 x 7 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 78.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของตู้อบไมโครเวฟ (Microwave) และฟองยางธรรมชาติขนาด 6 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ของตู้อบอากาศร้อน (Oven)

จากรูปที่ 29 พบว่าเมื่อทำการนำฟองยางธรรมชาติอบด้วยตู้อบไมโครเวฟสามารถทำให้การแห้งของฟองยางธรรมชาติเกิดการแห้งที่เร็วกว่าการอบฟองยางธรรมชาติด้วยตู้อบอากาศร้อน (Oven) โดยการอบด้วยตู้อบไมโครเวฟใช้เวลาสั้นกว่าเป็นอย่างน้อยประมาณ 7 เท่าของเวลาที่อบด้วยตู้อบอากาศร้อน แม้ว่าจะมีความหนาแน่นเท่ากัน คือ 6 นิ้ว ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากตู้อบไมโครเวฟมีการใช้คลื่นไมโครเวฟในการสั่นโมเลกุลของน้ำเพื่อให้เกิดความร้อน การถ่ายเทความร้อนของฟองยางธรรมชาติไม่มีผลต่อการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟซึ่งสามารถให้ความร้อนได้ทั่วทั้งฟองยางธรรมชาติพร้อม ๆ กันนอกจากนี้การถ่ายเทมวลสารของน้ำจะเป็นในรูปแบบของการแพร่ของไอ (Gas Diffusion) แทนที่จะเป็นการแพร่ของของเหลว (Liquid Diffusion) เหมือนกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

3.4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลอง พบว่า อัตราการแห้งของฟองยางธรรมชาติมีค่าสูงเมื่อเริ่มต้น และลดช้าลงเมื่อระดับความชื้นในฟองยางธรรมชาติเหลือน้อยลง (รูปที่ 1) ไม่ว่าระดับความชื้นเริ่มต้นจะมีค่าเท่าใดก็ตาม

ในขณะที่เดียวกันอุณหภูมิภายในของฟองยางธรรมชาติจะเพิ่มสูงขึ้น และคงที่เป็นช่วงเวลาหนึ่งจนกระทั่งระดับความชื้นในฟองยางธรรมชาติเข้าใกล้ร้อยละศูนย์ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับกลไกการแห้งที่พบทั่วไปในวัสดุชนิดอื่น ๆ (2, 3, 6) ซึ่งเสนอแนะว่ากลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติจะประกอบด้วยช่วงการอบแห้ง 2 ช่วง เพื่อแสดงให้เห็นว่ากลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาตินั้นถูกควบคุมด้วยอัตราการแห้งของความชื้นภายในหรือช่วงอัตราลดลงในกลไกการอบแห้ง การทดสอบง่าย ๆ โดยการเตรียมฟองยางธรรมชาติที่มีความชื้นบริเวณผิวและบริเวณภายในและนำมาอบแห้งพร้อม ๆ กัน จากรูปที่ 30 เห็นได้ชัดว่า การแห้งของความชื้นภายในของฟองยางธรรมชาติเป็นไปได้ช้ากว่าภายนอกเป็นอย่างมาก ดังนั้นในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติเวลาส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราลดลง ซึ่งอัตราการแห้งของความชื้นภายในเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการแห้งโดยรวม



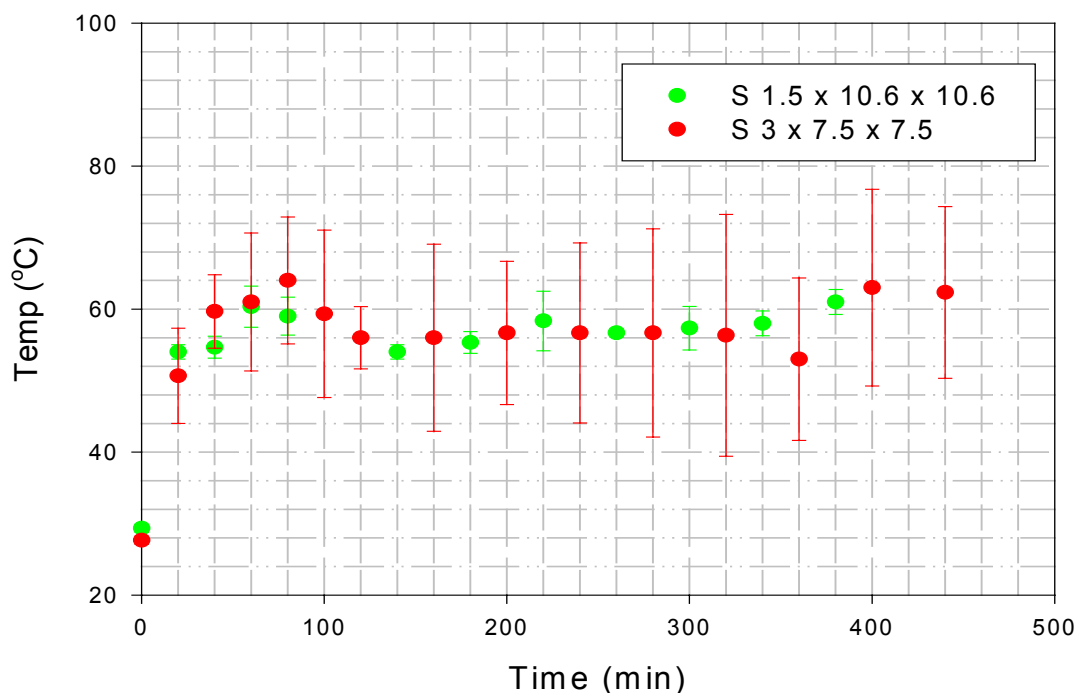
รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติที่มีการฉาบน้ำที่ผิวภายนอกกับการฉีดน้ำไว้ภายในฟองยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 3 - 6 พบว่า การทดลองที่ใช้ความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันให้ผลการทดลองที่มีค่าคล้ายคลึงกัน อยู่ในลำดับของความผิดพลาดของการทดลอง ซึ่งหมายความว่าผลการทดลองจากความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันสามารถใช้แทนกันได้ ถ้าหากมีการปรับแกนเวลาให้สอดคล้องกันตามระดับความชื้นเริ่มต้นเรียบร้อยแล้ว ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ค่าความชื้นเริ่มต้น 100% เพื่อความชัดเจนและสะดวกในการคำนวณอัตราการแห้งในช่วงอัตราคงที่ และในค่าความชื้นเริ่มต้น

50%, 30% และ 10% นั้นมีการทำซ้ำหลายครั้งเพื่อประหยัดเวลาและเพื่อเพิ่มระดับความเชื่อมั่นของผลการทดลองทั้งในช่วงอัตราดกถอยและค่าความชื้นวิกฤต

ในบทความนี้ได้แสดงถึงการคำนวณอัตราการแห้งสุกจากผลการทดลอง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการแห้งสุก ($(g / m^2) \times (\% / min)$) กับเวลา (นาท) และอัตราการแห้งสุกกับเปอร์เซ็นต์ความชื้น (%W) เป็นกราฟสำคัญที่ใช้วิเคราะห์กลไกการแห้งของฟองยางธรรมชาติ จากรูปที่ 10 พบว่า ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาต่ำมีอัตราการแห้งสุกสูงกว่าในช่วงอัตราคงที่ และแห้งได้เร็วกว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาสูง อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำที่แตกต่างกันในแต่ละความหนาของฟองยางธรรมชาติอาจเป็นผลทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งต่างกันได้

จากรูปที่ 12 พบว่า ในขณะที่มีปริมาณน้ำเท่ากันฟองยางธรรมชาติมีความหนาแตกต่างกัน ยังคงให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน โดยฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาต่ำมีอัตราการแห้งสุกในช่วงอัตราคงที่สูงกว่าและแห้งได้เร็วกว่า ค่าความชื้นวิกฤตก็ยังคงสูงกว่าฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาสูง (รูปที่ 13) เช่นเดียวกับการทดลองที่แล้ว แสดงให้เห็นว่าความหนาของฟองยางธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งไม่เป็นที่น่าแปลกใจเนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารมีค่าสูงที่สุดที่ด้านบนของฟองยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นด้านที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่สำคัญที่สุด (มากที่สุด) ซึ่งรูปที่ 31 พบว่า อุณหภูมิภายในของตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สรุปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนของฟองยางธรรมชาติทั้งสองความหนาไม่แตกต่างกัน รวมทั้งอุณหภูมิภายในที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง ผิดจากชิ้นงานทั่วไปที่ทำจากยางที่มีสมบัติเป็นฉนวน ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ไม่ได้เกิดจากการนำความร้อน แต่ควรจะเกิดจากการแผ่ของอากาศร้อนจากบรรยากาศในตู้อบเข้าสู่ภายในผ่านทางโพรงอากาศที่ต่อเนื่องกันของฟองยางธรรมชาติ เช่นเดียวกับรูปที่ 31 แสดงให้เห็นว่า ข้อจำกัดในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติไม่ใช่การถ่ายเทความร้อนแต่เป็นการถ่ายเทมวลสาร โดยเฉพาะการถ่ายเทมวลสารของน้ำจากภายในสู่ภายนอกก่อนที่จะระเหยออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในฟองยางธรรมชาติ (°C) กับเวลา (นาที) ของฟองยางธรรมชาติขนาด 1.5 x 10.6 x 10.6 ลูกบาศก์นิ้ว และขนาด 3 x 7.5 x 7.5 ลูกบาศก์นิ้ว ที่ความหนาแน่น 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิคู่อบ 70 °C

รูปที่ 15, 17 และ 18 แสดงให้เห็นชัดว่าความหนาของฟองยางธรรมชาติเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างมากต่อการอบแห้ง กลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาเท่ากันมีการเกาะกลุ่มกันอย่างเห็นได้ชัด ตั้งแต่อัตราการแห้งสุดทิวในช่วงอัตราคงที่ไปจนถึงค่าความชื้นวิกฤตที่มีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วเมื่อฟองยางธรรมชาติที่มีขนาดใหญ่กว่า (กว้าง x ยาว) ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากันจะมีปริมาณน้ำที่ต้องทำให้แห้งสูงกว่า ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการอบแห้งโดยรวมนานกว่า ดังรูปที่ 14 และ 16 เนื่องจากทั้งการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในฟองยางธรรมชาตินั้นถูกควบคุมด้วยลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุนของฟองยางธรรมชาติ จึงไม่เป็นที่น่าแปลกใจว่า ความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติเป็นดัชนีโดยตรงของโครงสร้างของโพรงอากาศภายในฟองยางธรรมชาติที่ส่งผลต่อกลไกการแห้ง ตามที่ได้คาดหมายไว้ดังรูปที่ 19 และ 20 ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นต่ำกว่ามีอัตราการแห้งสุดทิวในช่วงอัตราคงที่ที่สูงกว่า ค่าความชื้นวิกฤตที่สูงกว่าและเวลาในการอบแห้งสั้นกว่า เช่นเดียวกับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งในรูปที่ 21 และ 22 แสดงให้เห็นว่า ความแตกต่างทางโครงสร้างนี้ส่งผลให้เกิดความแตกต่างอย่างมากในฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งเป็นการสนับสนุนความคิดข้างต้นที่กล่าวว่า กลไกการแห้งของฟอง

ยางธรรมชาตินั้นควบคุมด้วยการถ่ายเทมวลจากภายในสู่ภายนอก กล่าวคือ ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูงโพรงอากาศมีขนาดเล็ก การถ่ายเทมวลสารเป็นไปได้ช้ากว่า เมื่อความหนาของฟองยางธรรมชาติสูงขึ้นการถ่ายเทมวลสารจากภายในก็ส่งผลต่อกลไกการแข็งจึงมากขึ้นตามลำดับ

ผลของอุณหภูมิในการอบแห้งได้ถูกแสดงในรูปที่ 23 และ 24 อัตราการแห้งสุทธิในช่วงอัตราคงที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งเป็นไปตามที่คาดหมายเนื่องจากช่วงอัตราคงที่ถูกควบคุมโดยการถ่ายเทมวลสารจากภายนอกหรือการระเหยของน้ำบริเวณผิวฟองยางธรรมชาติออกสู่บรรยากาศมีผลต่อการระเหยนี้ อย่างไรก็ตามค่าความชื้นวิกฤตนั้นไม่ได้เปลี่ยนไปจากเดิมมากนัก แสดงให้เห็นว่ากลไกการแห้งโดยทั่วไปไม่เปลี่ยนแปลง นอกเหนือไปจากอัตราการระเหยที่ผิวเปลี่ยนไปเท่านั้น อย่างไรก็ตามระยะเวลาในการอบแห้งไม่ได้แตกต่างกันมาก เนื่องจากเวลาส่วนใหญ่ในการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราคงที่ ซึ่งอุณหภูมิเป็นเพียงปัจจัยทางอ้อมเท่านั้น ซึ่งอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ในการแพร่ของของเหลวนั่นเอง

เมื่อพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้ ตามที่ได้กล่าวแสดงว่าอุณหภูมิภายในของฟองยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิคู่ออบและคงที่อยู่ที่ค่าประมาณ 55°C ภายในเวลา 20 นาที ซึ่งการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นนี้แสดงให้เห็นว่าการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นไม่ใช่การนำความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ส่วนสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก็เนื่องมาจากการแพร่ของอากาศร้อนที่บรรยากาศผ่านโพรงอากาศที่ต่อเนื่องกันของฟองยางธรรมชาติและเข้าสู่ภายในฟองยางธรรมชาติ อุณหภูมิที่คงที่ในช่วงหนึ่งนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบเกิดความสมดุลกันระหว่างพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นออกจากผิวของวัตถุกับพลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อนกับวัตถุ ดังนั้นพลังงานทั้งหมดจะถูกใช้ไปในการระเหยความชื้นโดยที่วัตถุมียุณหภูมิคงที่ จนกระทั่งความชื้นที่บริเวณผิวของวัตถุมีน้อยลงในกรณีที่ความชื้นโดยรวมของวัตถุมีน้อยลง พลังงานที่เหลือจากการระเหยความชื้นจึงทำให้วัตถุมียุณหภูมิสูงขึ้นเข้าใกล้อุณหภูมิของคู่ออบ เมื่อระดับความชื้นในฟองยางธรรมชาติลดลงเข้าใกล้ 0 เปอร์เซนต์ ดังรูปที่ 25

ในการเปรียบระหว่างการอบฟองยางธรรมชาติและอบน้ำให้ร้อนก่อนการอบให้แห้งกับฟองยางธรรมชาติและน้ำที่ไม่มีการอบให้ร้อนก่อนทำการอบให้แห้งมีความแตกต่างกัน เพื่อศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกจากรูปที่ 26 พบว่าในช่วงประมาณ 40 นาทีแรก คือ ฟองยางธรรมชาติที่มีการอบให้ร้อนมาก่อนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 20°C จากนั้นอุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจนกระทั่งเวลาประมาณ 40 นาทีจึงมีอุณหภูมิเท่ากัน เนื่องจากในฟองยางธรรมชาติมีโพรงอากาศที่สามารถเกิดการไหลผ่านของอากาศร้อนของระบบได้ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและเกิดการถ่ายเทมวลในช่วงเริ่มต้นได้ง่ายเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างความดันไอของฟองยางธรรมชาติกับความดันไอของบรรยากาศโดยรอบ

จากการศึกษาถึงผลกระทบของช่วงการอุ่นฟองยางธรรมชาติในช่วง 20 นาทีแรก พบว่าผลกระทบจากอุณหภูมิมีน้อยมาก ฟองยางธรรมชาติที่ผ่านการอุ่นก่อนไม่ได้มีการช่วยให้แห้งเร็ว

ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดดังรูปที่ 27 ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบใช้เวลาอันสั้น (40 นาที) ในการเข้าสู่สภาวะสมดุล ดังนั้นช่วงอุณหภูมิแตกต่างกันในช่วงแรกจึงมีผลไม่มากนักดังรูปที่ 26

ในการให้ความร้อนด้วยอากาศร้อนนั้นเป็นที่ยอมรับกันว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพต่ำ แต่เป็นวิธีที่สะดวกและค่าใช้จ่ายน้อยในการลงทุนเริ่มต้น Dielectric Heating เช่น คลื่นไมโครเวฟหรือคลื่นวิทยุ ได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อใช้กับวัตถุที่มีสมบัติเป็นฉนวน การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้แตกต่างจากระบบอากาศร้อนที่มีการถ่ายเทความร้อนจากภายนอกสู่ภายในวัตถุ แต่จะให้ความร้อนทั่วกันทั้งปริมาตรของวัตถุ ดังนั้นสภาวะการส่งผ่านคลื่นเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญ รวมไปถึงการถ่ายเทมวลสารจากภายในวัตถุเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 29 พบว่า ฟองยางธรรมชาติขนาดเดียวกัน การอบแห้งด้วยไมโครเวฟจะเร็วกว่ามาก ทั้ง ๆ ที่พลังงานที่ใช้ในไมโครเวฟมีค่า 900 วัตต์ ส่วนพลังงานที่ใช้ในตู้อบอากาศร้อน คือ 2000 วัตต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนจากภายในฟองยางธรรมชาติในระบบไมโครเวฟนั้นได้เปลี่ยนจากการแพร่ของของเหลวไปเป็นการแพร่ของก๊าซ จึงเปรียบเสมือนว่า กลไกการแห้งโดยใช้ระบบไมโครเวฟจะเพิ่มอัตราส่วนของช่วงอัตราคงที่ที่สูงขึ้น ทำให้ย่นระยะเวลาในการอบแห้งโดยรวม

3.5 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ พบว่า กลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราคงที่ (Constant Rate Period) ซึ่งเป็นการระเหยความชื้นบริเวณผิวของฟองยางธรรมชาติ และช่วงอัตราลดลง (Falling Rate Period) ซึ่งเป็นอัตราการแห้งของความชื้นภายในและเวลาในการอบแห้งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราลดลง ดังนั้นปัจจัยที่ควบคุมอัตราการแห้งของความชื้นภายในซึ่งควบคุมกลไกการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้แก่

- ความหนาของฟองยางธรรมชาติ : ระยะทางที่ความชื้นต้องเดินทางจากภายในสู่บริเวณผิว

- ความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติ : ลักษณะโครงสร้างของฟองยางธรรมชาติ

โดยพบว่าความหนาของฟองยางธรรมชาติเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกลไกการอบแห้ง โดยฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาเท่ากันการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันนั้นจะมีกลไกการแห้งเหมือนกัน กล่าวคือ อัตราการแห้งสุทธิเท่ากันและค่าความชื้นวิกฤตเท่ากัน แม้ว่าจะมีความกว้างและความยาวที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้งยังคงขึ้นกับปริมาณความชื้นที่ต้องทำให้แห้งอยู่ด้วย ฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาสูงอัตราการแห้งสุทธิจะลดลงและค่าความชื้นวิกฤตก็ลดลงเช่นกัน

ความหนาแน่นของฟองยางธรรมชาติมีผลคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น กล่าวคือ กลไกการแข็งมีการเปลี่ยนแปลง โดยฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นสูงขึ้นเกิดผลเช่นเดียวกับฟองยางธรรมชาติที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น คือ อัตราการแข็งสุทธิลดลงและค่าความชื้นวิกฤตลดลง

อุณหภูมิการอบแห้งมีผลเป็นอย่างมากต่ออัตราการแข็งสุทธิ ดังนั้นจึงส่งผลต่อช่วงอัตราลดลงและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งตามลำดับ โดยที่ค่าความชื้นวิกฤตไม่มีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิไม่ใช่ปัจจัยโดยตรงในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติ เนื่องจากเวลาส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอัตราลดลงและยิ่งไปกว่านั้นช่วงของอุณหภูมิที่ยอมรับได้ในการอบแห้งฟองยางธรรมชาติจะมีค่าค่อนข้างแคบเนื่องจากการเสื่อมสภาพของฟองยางธรรมชาติ ทำให้ฟองยางธรรมชาติเกิดการเปลี่ยนสี

การถ่ายเทความร้อนในฟองยางธรรมชาติไม่ได้เกิดจากการนำความร้อน แต่เป็นการแพร่ของอากาศร้อนผ่านสู่ช่องเปิดที่เป็นโครงสร้างของฟองยางธรรมชาติ ดังนั้นข้อจำกัดในการอบแห้งของฟองยางธรรมชาติจึงไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำของฟองยางธรรมชาติ แต่เป็นการถ่ายเทความร้อนจากภายในของฟองยางธรรมชาติที่เป็นไปได้ช้า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเตรียมชิ้นงานโดยการอุ่นไม่มีผลต่อการอบแห้ง แต่การเปลี่ยนระบบการอบแห้ง เช่น การใช้ไมโครเวฟ ซึ่งการเปลี่ยนระบบการถ่ายเทมวลสารจากการแพร่ความร้อนในรูปของของเหลวไปเป็นรูปของก๊าซเปลี่ยนแปลงกลไกการแห้งไปโดยสิ้นเชิง

สรุปผลการดำเนินงาน และผลที่ได้รับ

ตารางแผนงาน

กิจกรรม	การปฏิบัติงาน	เดือนที่					
		1	2	3	4	5	6
1. เปลี่ยนแปลงความชื้นเริ่มต้นของฟองยาง	แผนงาน	●	●				
	ปฏิบัติจริง	●	●	●			
2. เปลี่ยนแปลงขนาดของฟองยาง	แผนงาน	●	●				
	ปฏิบัติจริง	●	●	●			
3. เปลี่ยนอุณหภูมิการอบแห้ง	แผนงาน		●	●			
	ปฏิบัติจริง			●	●		
4. เปลี่ยนความหนาแน่นของฟองยาง	แผนงาน			●	●		
	ปฏิบัติจริง			●	●		
5. วิเคราะห์ผลขั้นต้น และ เขียนรายงานฉบับย่อ	แผนงาน		●	●			
	ปฏิบัติจริง	●	●	●			
6. ศึกษาการถ่ายเทความร้อน	แผนงาน				●	●	
	ปฏิบัติจริง				●	●	
7. ศึกษากระบวนการให้ความร้อนแบบอื่น	แผนงาน					●	●
	ปฏิบัติจริง					●	●
8. วิเคราะห์ผล และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์	แผนงาน					●	●
	ปฏิบัติจริง				●	●	●

ตาราง Output

Output		สาเหตุในกรณีล่าช้า และการแก้ไข
กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ	ผลสำเร็จ	
1. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการแห่งของฟองยางธรรมชาติ	100%	
2. เทคโนโลยีการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับยางธรรมชาติ	100%	
3. โมเดลการแห่งของฟองยางธรรมชาติ	100%	โมเดลสำหรับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน
4. สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย	100%	
5. อื่น ๆ		

เอกสารอ้างอิง

1. Devahastin, S., 2000, *Mujamdar's Practical Guide to Industrial Drying*, Exergex Corporation, Montreal.
2. Williams-Gardner, A., 1971, *Industrial Drying*, Gulf Publishing Company, Houston.
3. Mujumdar, A. S., 1995, *Handbook of Industrial Drying*, 2nd Edition, Marcel Dekker Inc., New York.
4. Keey, R.B., 1992, *Drying of Loose and Particulate Materials*, Hemisphere, Washington.
5. Keey, R.B., 1978, *Introduction to Industrial Drying Operations*, Pergamon Perss, Oxford.
6. Perry, R.H., and Don Green, 1984, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, New York.
7. Keey, R.B., and M. Suzuki, On the characteristic drying curve, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 1455-1464, 1974.