

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับยางแท่ง

การใช้ยางธรรมชาติในอุตสาหกรรมนั้นเริ่มมีขึ้นในปี ค.ศ. 1888 สืบเนื่องจากการค้นพบวิธีการทำให้ยางคงรูปโดยการใส่กำมะถันและอบด้วยความร้อน (vulcanization) เป็นการจดสิทธิบัตรครั้งแรกโดย John Dunlop สัตวแพทย์ชาวสก๊อต ผู้ผลิตยางอัดลมสำหรับรถจักรยานสองล้อได้สำเร็จเป็นครั้งแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1895 มีการผลิตยางอัดลมสำหรับรถยนต์สำเร็จและลองใช้เป็นครั้งแรกในสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 1900 จากนั้นการใช้ยางธรรมชาติก็เติบโตมาพร้อมกับอุตสาหกรรมรถยนต์และยานยนต์อื่นๆ มาตลอด มีการขยายพื้นที่ปลูกสวนยางในตะวันออกไกลโดย Sir Clement Markham ได้ทดลองปลูกยางฮีเวียในอุทยานดิว กรุงลอนดอนก่อนในปี ค.ศ. 1872 แล้วนำมาขยายพันธุ์ที่สิงคโปร์ มาเลเซีย อินโดนีเซีย ส่วนในประเทศไทยนั้นไม่มีหลักฐานบันทึกแน่นอน แต่เข้าใจกันว่าในประมาณปี พ.ศ. 2442-2444 (ค.ศ. 1899-1901) พระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี ขณะนั้นเป็นเจ้าเมืองตรัง ได้เป็นผู้นำต้นยางมาปลูกเป็นครั้งแรกที่อำเภอกันตัง จนถึงปัจจุบันนี้ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางทั้งในภาคใต้ ภาคตะวันออก และภาคอีสานรวมแล้วเป็นจำนวนมากกว่า 12 ล้านไร่ (สถาบันวิจัยยาง, 2545) และในปัจจุบันประเทศไทยกลายเป็นผู้ส่งออกยางรายใหญ่ที่สุดของโลก

ยางแท่ง (block rubber) เป็นยางธรรมชาติที่มีการผลิตโดยการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐานมีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน ซึ่งก่อนปี พ.ศ. 2508 ยางธรรมชาติส่วนใหญ่มีการผลิตในรูปแบบยางรมควัน ยางเครพ หรือน้ำยางข้น ไม่มีการระบุมาตรฐานในการจัดชั้นยางที่ชัดเจน จะพิจารณาโดยใช้สายตาในการตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี พ.ศ. 2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นมาเป็นครั้งแรก เพื่อพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของยางธรรมชาติให้มีมาตรฐาน มีขนาดเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน (เสาวนีย์, 2547) กรรมวิธีการผลิตยางดิบแห้งจากยางธรรมชาตินั้นได้ทำกันแบบง่าย ๆ หรือ แบบธรรมดา (conventional Method) มาช้านานแล้ว ซึ่งกรรมวิธีดังกล่าวนี้ คือ มีการกรีดยางรวบรวมน้ำยาง ทำให้ยางจับตัว แล้วทำให้เป็นแผ่นและทำให้แห้ง ขั้นตอนดังกล่าวจะสิ้นเปลืองพลังงานมาก แต่วิธีการนั้นง่ายไม่ว่าจะเป็นการผลิตปริมาณมากหรือน้อย อย่างไรก็ตามยางดิบที่ผลิตด้วยวิธีเก่านี้มีระบบการจัดแยกชั้นยางระบบใช้สายตาตรวจสอบ (visual Grading) ซึ่งเป็นการดูลักษณะทั่ว ๆ ไป ของยางมากกว่าการตรวจคุณสมบัติทางเทคนิค (Technical Properties) ของยาง ในขณะที่การใช้ยางเพิ่มมากขึ้น ทางโรงงานผู้ผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูปจากยาง

ได้มีความต้องการทราบถึงสมบัติทางเทคนิคของยาง ซึ่งความต้องการของผู้ใช้ข้างดังกล่าวนี้ได้ เป็นสาเหตุสำคัญในการริเริ่มผลิตยางดิบแห้งจากยางธรรมชาติโดยวิธีแบบใหม่ ซึ่งเป็นวิธีการผลิต ที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐาน (technically specified

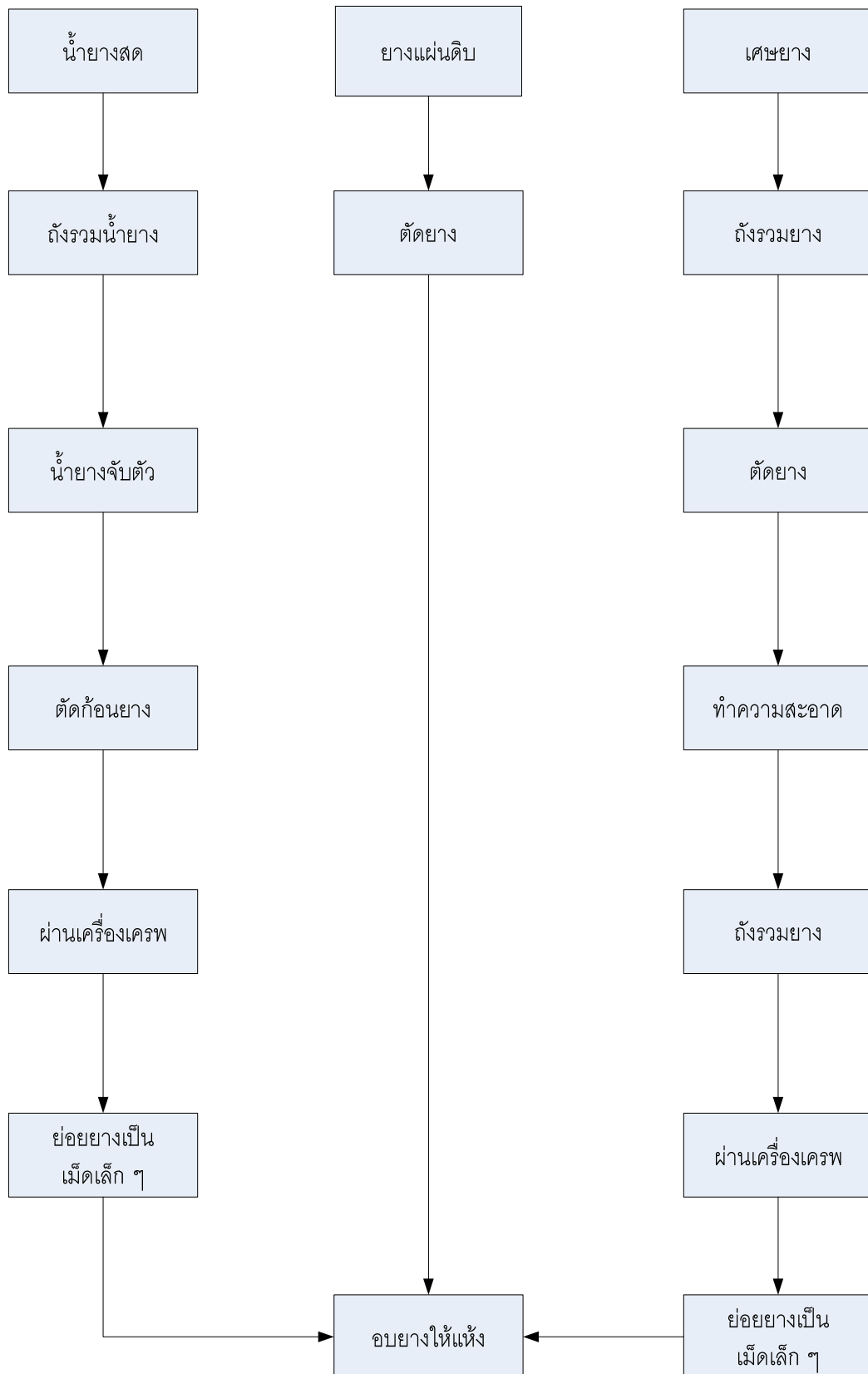
process) และเรียกขานนี้ว่า **Technically Specified Rubber** หรือมักเรียกว่า **Block Rubber** ตามรูปร่างการบรรจุหีบห่อ (วารสารณ์, 2531)

ประเทศไทยเริ่มผลิตยางแท่งในปี พ.ศ. 2511 ตามโครงการพัฒนายาง ซึ่งได้รับความช่วยเหลือจากสหประชาชาติ ยางแท่งที่ผลิตใช้ชื่อว่า TTR (Thai Tested Rubber) และได้เปลี่ยนเป็น STR (Standard Thai Rubber) ในปี พ.ศ. 2538 ตามโครงการปรับปรุงมาตรฐานยางไทย โดยการเพิ่มชนิดของยางแท่ง รวมทั้งการปรับมาตรฐานให้สูงขึ้น (ไวยวุฒิ, 2539)

2.1.1 การผลิตยางแท่ง

สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ฉบับที่ 6 มิถุนายน 2545 มีการรายงานว่าปัจจุบันประเทศไทยผลิตยางพาราธรรมชาติได้มากที่สุดในโลก เนื้อที่ปลูกประมาณ 12.3 ล้านไร่ มีผลผลิตส่งออกปีละประมาณ 2.5 ล้านตัน มูลค่า 100,000 ล้านบาทต่อปี ส่งออกไปในรูปน้ำยางข้น (concentrate latex) ยางแผ่นลมควัน (Ribbed Smoke Sheet: RSS) ยางอบแห้ง (Air Dried Sheet: ADS) และยางแท่ง (Standard Thai Rubber: STR) ยางที่ตลาดต้องการมากที่สุดคือยางแผ่นลมควันชั้น 3 (RSS3) และยางแท่งเบอร์ 20 (STR 20) เพราะยางทั้งสองชนิดนี้นำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมยางรถยนต์ (สถาบันวิจัยยาง, 2545)

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตเป็นยางแท่ง สามารถใช้ตั้งแต่วัตถุดิบที่สะอาด คือ น้ำยาง (latex) ไปจนถึงวัตถุดิบยางแท่ง คือ พกยางที่จับตัวแล้ว (field coagula material) ซึ่งกระบวนการผลิตโดยการใช้ยางทั้ง 2 ประเภทนี้จะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในแผนผังดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางแท่งจากเศษยางและจากน้ำยางสด

1) การผลิตยางแท่งจากน้ำยาง

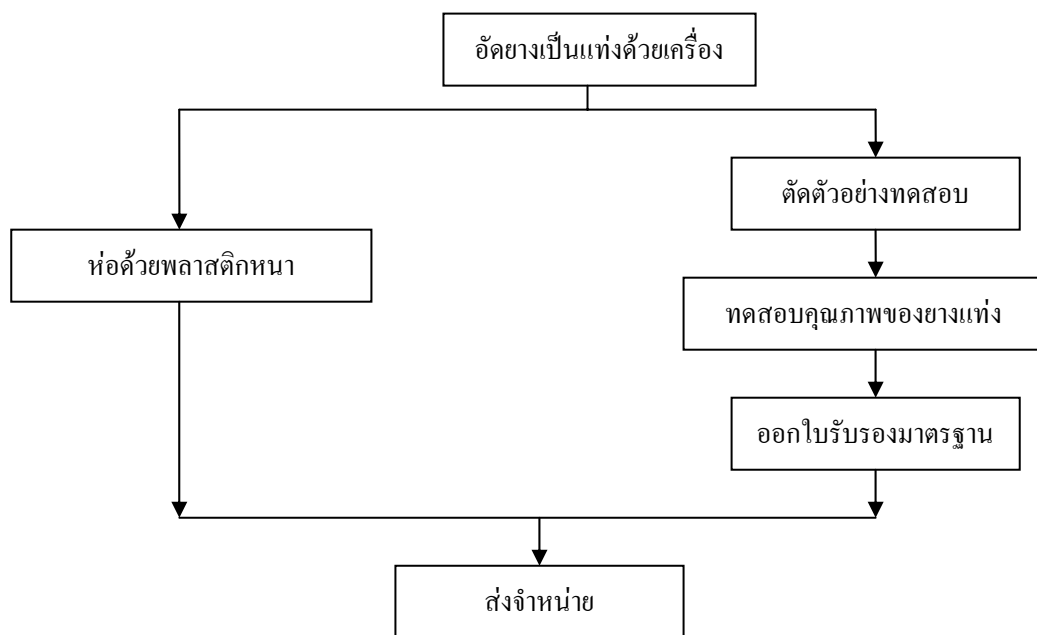
เริ่มต้นจากการรวบรวมน้ำยางสดในถังรวมน้ำยาง ทำการกรองน้ำยางให้สะอาด แล้วทำให้น้ำยางจับตัว โดยใช้กรดฟอร์มิก หรือกรดอะซิติก หรือสารเคมีอื่นๆ เมื่อได้ยางที่จับตัวแล้วนำไปผ่านเครื่องตัด ซึ่งจะตัดหรือย่อยยางเป็นชิ้นเล็กๆ ในขณะที่ยางกำลังผ่านเครื่องตัดนี้จะต้องฉีดน้ำเพื่อชะล้างสิ่งสกปรกที่อาจติดมากับยาง ในการผ่านยางเข้าเครื่องตัดหากก้อนยางที่ได้มีการจับตัวอย่างหลวมๆ คือลักษณะก้อนยางเป็นรูปรุณคล้ายๆ ฟองน้ำ ก็อาจนำยางเข้าเครื่องตัดชนิดที่เรียกว่าแกรนูเลเตอร์ (granulator) ได้เลย แต่หากว่าก้อนยางจับตัวกันแน่นหนาให้นำก้อนยางเข้าเครื่องเครพเพื่อรีดยางออกให้เป็นแผ่นเสี้ยก่อนและในขณะที่รีดยางเป็นแผ่น ยางจะถูกฉีดด้วยน้ำยางเพื่อชะล้างสิ่งสกปรก จากนั้นจึงนำแผ่นเครพที่ได้ไปผ่านเครื่องตัดยาง ซึ่งอาจเป็นชนิดแฮมเมอร์มิล (hammer mill) หรือแกรนูเลเตอร์ หรือ เซร์คเตอร์ (shredder) เมื่อได้ยางอยู่ในลักษณะเป็นเม็ด หรือชิ้นเล็กๆ แล้วรวบรวมยางเหล่านี้ลงกระบะอบ โดยเม็ดยางจะถูกทำให้แห้งโดยการไล่น้ำและสิ่งระเหยที่มีอยู่ในยางออกไปด้วยความร้อน ซึ่งความร้อนนี้ได้จากการเผาไหม้ น้ำมันเชื้อเพลิงในเตาเผา แล้วปล่อยความร้อนออกมาตามท่อ มีพัดลมเป่าเพื่อให้ความร้อนกระจายและถ่ายเททั่วถึงภายในเตา มีท่อระบายความชื้นหรือน้ำออกสู่ภายนอก อุณหภูมิของเตาอบยางอยู่ในช่วง 100-125 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบประมาณ 3-4 ชั่วโมง และควรอบยางครั้งเดียวให้แห้งเลย มิฉะนั้นจะต้องนำมาอบใหม่อีกครั้ง หากจำเป็นต้องอบใหม่ควรทำให้ยางชุ่มด้วยน้ำอีกครั้งหนึ่ง เพื่อป้องกันยางเี่ยม ในกรณีที่ยางบางส่วนในกระบะอบยางไม่แห้ง อาจใช้วิธีเพิ่มเวลาในการอบยางชุดนั้นให้นานต่อไปอีกเล็กน้อย เมื่อยางที่อบแห้งแล้วจะนำมาชั่งน้ำหนัก และอัดเป็นแท่งๆ ละ 33.3 กิโลกรัม ขนาด 675x330x190 มิลลิเมตร และห่อแท่งยางด้วยพลาสติกโพลีเอททีลีน (Polyethylene) แล้วบรรจุลงลังไม้

2) การผลิตยางแท่งจากยางแห้ง

ยางแห้งที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเป็นยางแท่ง ได้แก่ พวกรยางดิบ ยางก้นถ้วยและเศษยางต่างๆ โดยปกติผู้ผลิตมักใช้วิธีการผสมระหว่างยางที่มีความสะอาดพอควร ซึ่งยางเหล่านี้จะมีราคาสูงได้แก่ยางแผ่นดิบผสม กับยางที่มีความสกปรกแต่มีราคาต่ำ ชั้นแรกของการผลิต ยางคุณภาพต่ำหรือยางที่มีความสกปรก อันเนื่องจากการมีสารอื่นเจือปนจะถูกรวบรวมลงในถังแช่ด้วยน้ำ เพื่อให้ปล่อยให้สิ่งสกปรกต่างๆ มีโอกาสตะกอนไปก่อนบ้าง แล้วจึงผ่านยางที่แช่น้ำแล้วไปยังเครื่องตัดย่อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งจำนวนครั้งและจำนวนเครื่องที่ใช้ขึ้นอยู่กับความสกปรกมากน้อยของยาง ต่อไปยางจะถูกนำผ่านเครื่องรีดเครพ จากนั้นก็จะมีกรรมวิธีแผ่นที่มี ความสะอาดพอควรลงไป โดยจะปล่อยให้ยางแผ่นผสมคลุกเคล้ากับเศษยางที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมาแล้วลงในบ่อรวมแล้ว ยางผสมนี้จะผ่านเครื่องรีดเครพและเครื่องตัดย่อยตามลำดับ ในกรณีของการใช้ยางแห้งทำเป็นยางแท่งทุกขั้นตอนจะอาศัยน้ำฉีดชะล้างยาง

อย่างมาก เมื่อได้ยางออกมาในลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นเล็ก ๆ แล้วลำเลียงยางดิบที่ย่อยเป็นชิ้นเล็ก ๆ อยู่ในกระบะใส่ยางเข้าสู่ห้องอบยางเพื่ออบยางให้แห้ง ซึ่งภายในห้องอบมีอุณหภูมิประมาณ 100-125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้น้ำมันในเตา และภายในห้องอบยางมีพัดลมเป่าเพื่อถ่ายเทความร้อน

หลังจากการอบแห้งยางแล้ว มีการอัดยางให้เป็นแท่งแล้วห่อด้วยพลาสติกเก็บตัวอย่างยางเพื่อทดสอบคุณภาพและออกไปรับรองคุณภาพของยางแท่งก่อนส่งจำหน่าย



ภาพประกอบที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตยางแท่งหลังอบแห้ง

ยางเมื่ออบเสร็จควรปล่อยให้เย็นจนกระทั่งมีอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำยางมาชั่งให้ได้น้ำหนัก 33.3 กิโลกรัม อัดให้เป็นแท่งด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิค ใช้แรงอัดขนาด 30-70 ตัน เวลาในการอัดประมาณ 1-3 นาที แล้วลำเลียงยางแท่งผ่านสายพานลำเลียงผ่านเครื่องตรวจสอบโลหะอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสิ่งปลอมปนอยู่ในเนื้อยาง จากนั้นจะนำมาบรรจุถุงพลาสติกพอลิเอthin (polythene) ขนาด 625 x 900 มิลลิเมตร (24.4 x 36 นิ้ว) ถุงพลาสติกที่ใช้บรรจุและห่อยางควรมีความกว้างจำเพาะ 0.92 จุดหลอมเหลวไม่เกิน 109 องศาเซลเซียส สามารถผสมกับยางได้ที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 110 องศาเซลเซียส มีความหนา 0.03-0.04 มิลลิเมตร และมีแถบพลาสติกคาดบนถุงระบุคุณภาพชั้นยางของยางแท่งนั้น ๆ

2.1.2 มาตรฐานยางแท่ง (เสาวนีย์, 2547)

ยางแท่งเป็นยางที่ผลิตขึ้นโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้ตามมาตรฐานสากล (ISO 2000 Rubber, Natural (NR), Specifications) ตามข้อตกลงของ IRA (International Rubber Association) มีชื่อเรียกยางแท่งชนิดต่างๆ ว่า TSR (Technically Specified Rubber) ประเทศไทยเริ่มผลิตยางแท่งเมื่อปี พ.ศ. 2511 เพื่อปรับปรุงรูปแบบให้มีขนาดเหมาะสมกับการใช้ในภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องมีการตรวจสอบคุณภาพทางวิทยาศาสตร์ และจำแนกชั้นตามข้อกำหนดมาตรฐาน ซึ่งยางแท่งของประเทศต่าง ๆ จะระบุขีดจำกัดสมบัติของยางแท่ง ซึ่งผู้ผลิตส่วนใหญ่จะอิงการกำหนดขีดจำกัดของมาตรฐานขององค์การมาตรฐานระหว่างประเทศ (ISO) ชั้นและมาตรฐานยางแท่งของไทย ซึ่งจะมีการระบุคุณภาพมาตรฐานทางวิชาการ (Technically Specification Rubber) โดยเรียกชื่อว่า ยางแท่งที่ทีอาร์ (TTR : Thai Tested Rubber) มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2511 มีสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตรเป็นผู้รับผิดชอบ และได้กำหนดให้ยางแท่งที่ทีอาร์ประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ 5 ชั้น ได้แก่ 5L 5 10 20 และ 50 (สทนท, 2538) และมีการกำหนดมาตรฐานชั้นยางโดยอาศัยสิ่งสกปรกเป็นเกณฑ์ และมีสมบัติอื่นๆ ตามที่สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กำหนดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานยางแท่งไทย (TTR) ชนิดต่างๆ

Parameter	TTR5L	TTR5	TTR10	TTR20	TTR50
ปริมาณสิ่งสกปรก, % ไม่เกิน	0.05	0.05	0.10	0.20	0.50
ปริมาณเถ้า, % ไม่ เกิน	0.60	0.60	0.75	1.00	1.50
ปริมาณไนโตรเจน, % ไม่เกิน	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, % ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า	30	30	30	30	30
ดัชนีความอ่อนตัวของ ยาง (PRI), ไม่ต่ำ กว่า	60	60	60	60	60
สีเทียบกับไลวบอนด์ ไม่เกิน	6.0	-	-	-	-

ที่มา : (สนท, 2538)

ปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงชื่อจากยางแท่ง TTR มาเป็น STR (Standard Thai Rubber) ซึ่งมีการกำหนดชั้นยางและขีดจำกัดของมาตรฐานยางแท่งไทยเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีการประกาศใช้ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2539 โดยกำหนดชั้นของยางแท่งไทยในแต่ละชนิด ตามปริมาณสิ่งสกปรก ปริมาณเถ้า ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณสิ่งระเหย ดัชนีความอ่อนตัวของยาง และความหนืดของเนื้อยาง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานยางแท่งไทยชนิดต่าง ๆ ในปัจจุบัน

Parameter วัตถุดิบที่ผลิต	STR XL	STR 5L	STR 5	STR 5 CV	STR 10	STR 10 CV	STR 20	STR 20 CV
	น้ำยาง		น้ำยาง/ยางแผ่น		ยางก้อน /ยางแผ่น			
ปริมาณสิ่งสกปรก, % ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
ปริมาณเถ้า, % ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.80	0.80
ปริมาณไนโตรเจน, % ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
ปริมาณสิ่งระเหย, % ไม่เกิน*	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po), ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
ดัชนีความอ่อนตัวของยาง (PRI), ไม่ต่ำกว่า	60	60	60	60	50	50	40	40
สีเทียบกับโลวิบอนด์ ไม่เกิน	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
ความหนืด(Moony Viscosity)	-	-	-	**	-	**	-	**
รหัสชั้นใช้สี	ฟ้า	เขียวอ่อน	เขียวอ่อน	ตัวอักษร ขาวบน พื้นเขียว	น้ำตาล	ตัวอักษร ขาวบนพื้น น้ำตาล	แดง	ตัวอักษร ขาวบนพื้น แดง

* เป็นขีดจำกัดสำหรับผู้ใช้ ถ้าผู้ผลิตต้องมีปริมาณสิ่งระเหย ไม่เกิน 0.05 %

** ขีดจำกัดของผู้ผลิต คือ

STR 5 CV มีค่าความหนืด 70 (+7,-5), 60 (+7,-5) และ 50 (+7,-5)

STR 10 CV มีค่าความหนืด 60 (+7,-5)

STR 20 CV มีค่าความหนืด 65 (+7,-5)

ที่มา : (สถาบันวิจัยยาง, 2538)

ยางแท่งที่ผลิตได้มาตรฐานจะมีการแสดงชั้นของยาง ด้วยรหัสสี่ประจําชั้นยาง โดยจะใช้เป็นแถบคาดพลาสติกสีต่างๆ ตามชั้นของยางพันรอบยางแท่ง

2.1.3 ทฤษฎีการอบแห้ง (สมชาติ, 2540)

ปริมาณความชื้น (moisture content) ในของแข็งสามารถระบุได้โดยการใช้มาตรฐานแห้ง (dry-basis) และมาตรฐานเปียก (wet-basis) ได้ โดยปริมาณความชื้นบนฐานแห้งจะเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำ (หรือของเหลวอื่นที่สนใจ) ที่อยู่ในของแข็งเปียกต่อน้ำหนักของแข็งแห้ง

$$M_w = \frac{(w-d)}{d} \quad (2.1)$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

w คือ มวลของแข็งเปียก, kg

d คือ มวลของแข็งแห้ง, kg

ความชื้นบนมาตรฐานแห้งนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี เพราะช่วยในการคำนวณสะดวกขึ้น เพราะมวลของแข็งแห้งจะมีค่าคงที่หรือเกือบจะคงที่ระหว่างการอบแห้ง ในขณะที่ความชื้นบนมาตรฐานเปียกจะเป็นอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในของแข็งเปียกต่อน้ำหนักของแข็งเปียก

$$M_d = \frac{(w-d)}{w} \quad (2.2)$$

เมื่อ M_d คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก, เศษส่วน

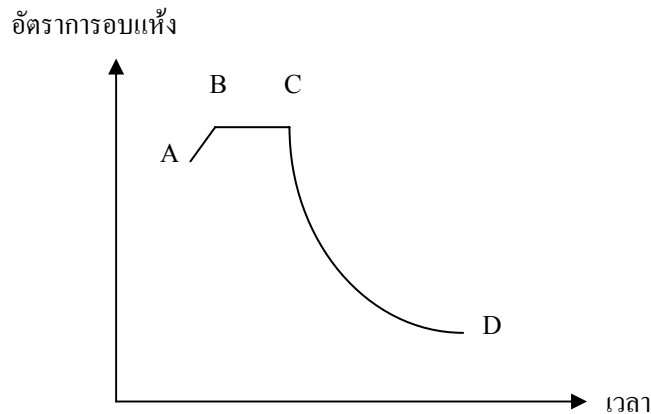
w คือ มวลของแข็งเปียก, kg

d คือ มวลของแข็งแห้ง, kg

ความชื้นบนมาตรฐานเปียกนี้นิยมใช้ในวงการค้า โดยทั่วๆ ไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซ็นต์ ($100 M_w$)

2.1.3.1 ช่วงการอบแห้ง

การทดสอบการอบแห้งโดยปกติมักต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการอบแห้ง โดยให้ใช้เวลาให้น้อยที่สุด การหาสภาวะที่เหมาะสมจะได้จากการเขียนกราฟระหว่างความชื้นของผลิตภัณฑ์กับเวลา ซึ่งจะได้อัตราการอบแห้งดังภาพประกอบที่ 2.3



ภาพประกอบที่ 2.3 ช่วงการอบแห้ง

จากภาพประกอบที่ 2.3 ในช่วง AB เป็นช่วงแรกของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ถูกทำให้ร้อนขึ้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นแต่เป็นช่วงสั้น ๆ จึงมีอิทธิพลต่อกระบวนการน้อยมาก ช่วง BC เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period, CRDP) ในช่วงสุดท้าย CD เป็นช่วงที่อัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period, FRDP)

2.1.3.1.1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant Rate Drying Period, CRDP)

การอบแห้งของผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นมากกว่าร้อยละ 70 (มาตรฐานเปียก) อัตราการอบแห้งจะคงที่ ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ ความชื้นของอากาศ และพื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ โดยที่อุณหภูมิของฟิล์มของน้ำที่เคลือบผลิตภัณฑ์และอุณหภูมิที่ผิวผลิตภัณฑ์จะคงที่ประมาณเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอบแห้ง ช่วง CRDP สามารถพบได้ในผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นภายในสามารถถ่ายโอนมาที่ผิวเร็วกว่าการระเหยน้ำออกจากผลิตภัณฑ์

การอบแห้งในช่วง CRDP สามารถประมาณการอบแห้งได้ โดยใช้การวิเคราะห์ห่ออุณหภูมิกระเปาะเปียก ซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียน้ำของผลิตภัณฑ์ในช่วง CRDP ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_d A (P_{vwb} - P_v)}{R_v T_{abs}} = \frac{h A (T - T_{wb})}{h_{fg}} \quad (2.3)$$

เมื่อ	h_d	คือ	สัมประสิทธิ์การพามวล, $\text{kg/m}^2\text{-s}$
	A	คือ	พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์, m^2
	R_v	คือ	ค่าคงที่ของก๊าซสำหรับไอน้ำ, 0.46152 kJ/kg K
	T_{abs}	คือ	อุณหภูมิกระเปาะแห้งสัมบูรณ์, K
	P_{vwb}	คือ	ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิกระเปาะเปียก, kPa
	P_v	คือ	ความดันไอน้ำในอากาศ, kPa
	h	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $\text{W/m}^2 \text{ K}$
	h_{fg}	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ, kJ/kg
	T	คือ	อุณหภูมิของอากาศชื้น, K
	T_{abs}	คือ	อุณหภูมิกระเปาะเปียก, K

การคำนวณหาค่าอัตราการอบแห้ง (kg/s) สามารถใช้สมการ (2.3) หากทราบค่าของ A และ h_d หรือ h ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด (ค่าอื่นๆ ที่เหลือเป็นค่าที่สามารถวัดได้) แต่ในบางครั้งค่าเหล่านี้หาได้ยาก เพราะรูปร่างของผลิตภัณฑ์ไม่ได้เป็นทรงเรขาคณิตที่แน่นอน

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อัตราการอบแห้งเปลี่ยนไปจากช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ไปเป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า ความชื้นวิกฤติ (**critical moisture content**) ค่าความชื้นวิกฤตินี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์และรวมถึงสภาวะของการอบแห้ง

ในช่วงการอบแห้งคงที่ ซึ่งเป็นช่วงแรกของการอบแห้งนั้น บริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ จะมีน้ำเกาะอยู่เป็นจำนวนมากทำให้การถ่ายโอนมวลและความร้อนจะเกิดขึ้นที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เท่านั้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านผลิตภัณฑ์ จะทำให้ฟิล์มอากาศนี้มีความหนาลดลง เป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิวของผลิตภัณฑ์และของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น เป็นผลให้การถ่ายโอนมวลและความร้อนดีขึ้น และเมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้ง จะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนระหว่างความชื้นอิมิตัวที่ผิวผลิตภัณฑ์และอัตราส่วนความชื้นของกระแสอากาศที่ไหลอย่างอิสระมีมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลดีขึ้น

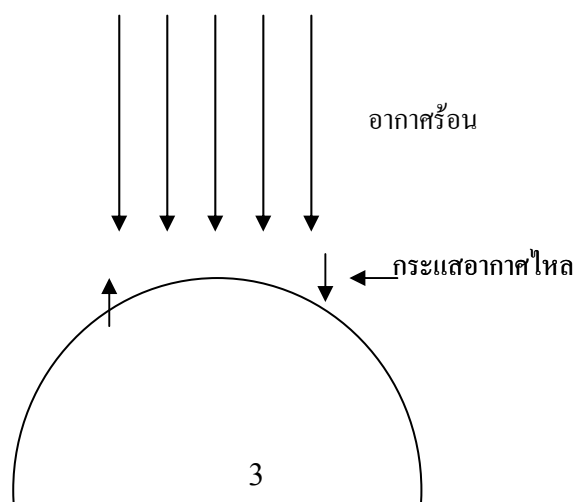
ผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปจะไม่ปรากฏการอบแห้งในช่วง CRDP นอกจากว่าจะมีความชื้นอยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์มากจนมีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำเคลือบอยู่ที่ผิว ผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้งส่วนใหญ่จะเป็นการอบแห้งในช่วงการอบแห้งลดลง และจะไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของอัตราการอบแห้งอย่างเด่นชัดเหมือนในภาพประกอบที่ 2.4

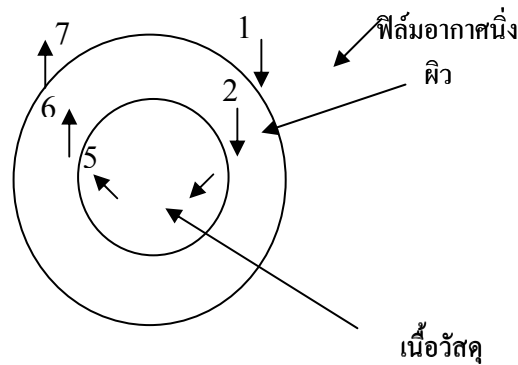
2.1.3.1.2 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling Rate Drying Period, FRDP)

ในระหว่างช่วง FRDP ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์จะไม่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มของน้ำ เหมือนกับในช่วง CRDP เพราะว่าการแพร่ของน้ำจากภายในออกสู่ภายนอก จะมีค่าน้อยกว่าอัตราการระเหยน้ำที่ผิวนอก เมื่อความชื้นของผลิตภัณฑ์ตกลงต่ำกว่าความชื้นวิกฤติ ศักยภาพการระเหยน้ำของกระบวนการอบแห้งซึ่งคิดจากความแตกต่างระหว่างความดันไอของน้ำที่ผิวกับความดันไอของน้ำในอากาศลดลงตามอัตราการอบแห้งที่ลดลงอย่างต่อเนื่องในระหว่างการอบแห้ง

การทำนายอัตราการอบแห้ง ของผลิตภัณฑ์ในช่วง FRDP มีความยุ่งยากมากกว่าในช่วง CRDP เพราะว่าจะต้องวิเคราะห์กลไกการถ่ายโอนความร้อนและมวลภายในผลิตภัณฑ์ด้วย ถึงแม้ว่าจะมีทฤษฎีที่ทำนายพฤติกรรมของการอบแห้งในช่วง FRDP แต่โดยมากแล้วใช้ความสัมพันธ์กึ่งทฤษฎี (semi-theoretical relationship) และความสัมพันธ์เอมพิริคัล (Empirical relationship) จากที่กล่าวมาทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง ได้แก่ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และอาจจะมีอิทธิพลของความเร็วลมด้วยโดยเฉพาะอัตราการอบแห้งคงที่ หรือช่วงต่อกับอัตราการอบแห้งลดลง ภาพประกอบที่ 2.4 แสดงการไหลของความร้อนและความชื้นผ่านความต้านทานหลายตัว ซึ่งความต้านทานดังกล่าวได้แก่ความต้านทานในเนื้อผลิตภัณฑ์ ความต้านทานที่ผิวผลิตภัณฑ์ อย่างเช่นในกรณีของเปลือกผลไม้เป็นต้น และความต้านทานของฟิล์มอากาศนิ่งที่อยู่รอบๆ ผลิตภัณฑ์

ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง การถ่ายโอนความร้อนและมวลจะไม่จำกัดอยู่เฉพาะที่ผิวนอกของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่จะเกิดขึ้นภายในผิวและเนื้อผลิตภัณฑ์ด้วย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย (คิระ และสมชาติ, 2533) ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแล้ว จะเป็นผลให้การถ่ายโอนความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วลมจะพบว่าความหนาของฟิล์มอากาศนิ่งมีค่าลดลง เป็นผลให้ความต้านทานลดลงเนื่องจากความต้านทานที่ฟิล์มอากาศมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานตัวอื่น ดังนั้นจึงไม่มีผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลมากนัก





- 1 ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนที่ฟิล์มอากาศนิ่ง
- 2 ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนที่ผลิตภัณฑ์
- 3 ความต้านทานการถ่ายโอนความร้อนในเนื้อผลิตภัณฑ์
- 4 น้ำที่ระเหย
- 5 ความต้านทานการถ่ายโอนมวลในเนื้อผลิตภัณฑ์
- 6 ความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ผิวผลิตภัณฑ์
- 7 ความต้านทานการถ่ายโอนมวลที่ฟิล์มอากาศนิ่ง

ภาพประกอบที่ 2.4 การถ่ายโอนความร้อนและมวลในผลิตภัณฑ์

2.1.4 สมการอบแห้งเบื้องต้น (สมชาติ, 2540)

สมการอบแห้ง คือ สมการที่อาจเขียนขึ้นโดยใช้ทฤษฎีหรือผลการทดลองหรือทั้งสองประกอบกันเพื่อนำมาใช้ทำนายอัตราการอบแห้งตลอดจนถึงผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการอบแห้งผลิตภัณฑ์นั้นๆ สมการอบแห้งชั้นบางสามารถแบ่งได้เป็น สมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีและสมการอบแห้งเอมพิริคัล

2.1.4.1 สมการอบแห้งทางทฤษฎี

ได้มีผู้นำหลักการทางทฤษฎีหลายทฤษฎีมาอธิบายการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุที่มีโครงสร้างภายในเป็นรูพรุนในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง Luikov (1996) ได้เสนอกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุ ซึ่งอาจเกิดขึ้นในแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจาก capillary flow ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิว (surface force)
2. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลว เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (liquid diffusion)
3. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวเนื่องจากการแพร่ของความชื้นบนผิวของรูพรุนเล็ก ๆ (surface diffusion)

4. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น (vapor diffusion)

5. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (thermal diffusion)

6. การเคลื่อนที่ของน้ำในรูปของของเหลวและไอน้ำเนื่องจากความแตกต่างของความดันรวม (hydrodynamic flow)

จากกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุดังกล่าว Luikov (1996) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นของวัสดุ อุณหภูมิของวัสดุ และความดันรวม เนื่องจากแบบจำลองของ Luikov (1996) มีความยุ่งยากมาก เพราะมีตัวแปรและค่าพารามิเตอร์หลายตัว ดังนั้นจึงยังไม่มีให้นำแบบจำลองนี้ไปใช้

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุโดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของของเหลวที่เป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น อาจเขียนในรูปสมการ

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \quad (2.4)$$

เมื่อ M คือ ความชื้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น, m^2/h
 t คือ เวลา, h

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สามารถทำการทดลองหาค่าออกมาได้ และอาจเขียนอยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$D = A \exp\left(\frac{-B}{T_{abs}}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่ของสมการ
 T_{abs} คือ อุณหภูมิ, K

จากสมการที่ (1) สภาวะขอบเขตและสภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการแก้สมการ คือ

สภาวะเริ่มต้น $M(r,0) = M_{in}$

สภาวะขอบเขต $M(r_0,t) = M_{eq}$

เมื่อ r คือ ระยะทางวัดจากจุดกึ่งกลางของวัสดุ
 r_0 คือ ความกว้างหรือรัศมี
 M_t คือ ความชื้นที่เวลา t ใด ๆ
 M_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง
 M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

และกำหนดให้

$$MR = \frac{(M_t - M_{eq})}{(M_{in} - M_{eq})} \quad (2.6)$$

จากวิธีเชิงวิเคราะห์ ได้คำตอบสำหรับการเคลื่อนที่ความชื้นภายในวัสดุรูปทรงต่างๆ ดังต่อไปนี้

รูปทรงแผ่นแบนราบกว้างและยาวมาก

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{1}{(2p+1)^2}\right] \exp\left[-\frac{(2p+1)^2 \pi^2 X^2}{4}\right] \quad (2.7)$$

รูปทรงกลม

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{1}{p^2}\right) \exp\left(-\frac{p^2 \pi^2 X^2}{9}\right) \quad (2.8)$$

รูปทรงลูกบาศก์

$$MR = \left(\frac{8}{\pi^2}\right)^3 \left[\exp\left(-\frac{3\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \left(\frac{3}{9}\right) \exp\left(-\frac{11\pi^2 Dt}{l^2}\right) + \left(\frac{3}{25}\right) \exp\left(-\frac{27\pi^2 Dt}{l^2}\right) \right] \quad (2.9)$$

รูปทรงกระบอกยาวมาก

$$MR = \sum_{p=0}^{\infty} \left(\frac{4}{\lambda_n^2}\right) \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 X^2}{4}\right) \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$X = \frac{A}{V} (Dt)^{1/2} \quad \text{คือ} \quad \text{ระยะทางเฉพาะ (characteristic length)}$$

A คือ พื้นที่ผิว, m^2

V คือ ปริมาตร, m^3

p คือ จำนวนเต็มมีค่าเป็น 1, 2, 3,

λ_n คือ รากของเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์

2.1.4.2 สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying equation)

ในการนำสมการทางทฤษฎีที่ประกอบด้วยเทอมที่ไม่สิ้นสุดมาใช้งาน นิยมทำให้ง่ายขึ้นโดยการตัดเทอมหลังทิ้ง

จากสมการที่ (2.8) ถ้าคงไว้เพียงเทอมแรกจะได้

$$MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp\left(-\frac{D\pi^2 t}{r_0}\right) \quad (2.11)$$

หรือ $MR = \left(\frac{6}{\pi^2}\right) \exp(-Kt) \quad (2.12)$

เมื่อ r_0 คือ รัศมีของทรงกลม, m

K คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, $h^{-1} = \frac{D\pi^2}{r_0}$

สมการที่ (2.8) และ (2.11) จะให้ค่าใกล้เคียงกันมากเมื่อเวลาการอบแห้ง

มีค่ามาก และค่าความแตกต่างจะน้อยกว่า 5% ถ้าอัตราส่วน $\frac{D\pi^2 t}{r_0}$ มีค่ามากกว่า 1.2

สามารถสร้างแบบจำลองการอบแห้งง่าย ๆ โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุและความชื้นสมดุล ข้อสมมติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) เมื่อเขียนในรูปสมการอบแห้งจะได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_{eq}) \quad (2.13)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

สภาวะเริ่มต้น $M\{0\} = M_{in}$

สภาวะขอบเขต $M\{t\} = M_{eq}$

คำตอบของสมการที่ (8) คือ

$$MR = \exp(-Kt) \quad (2.14)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) และค่าคงที่การอบแห้ง (K) เป็นค่าคงที่จากสมการแต่ละสมการดังกล่าว ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของผลิตภัณฑ์หนึ่ง ๆ ภายในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อบแห้งนี้นิยมใช้สมการแบบอาเรเนียสเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ดังต่อไปนี้

$$K = A \exp\left(\frac{-B}{T_{abs}}\right) \quad (2.15)$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ของสมการซึ่งขึ้นกับชนิดของวัสดุ

K คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, h^{-1}

T_{abs} คือ อุณหภูมิอบแห้ง, K

2.1.4.3 สมการอบแห้งเอมพิริคัล

สมการอบแห้งเอมพิริคัล คือ สมการที่สร้างจากข้อมูลการทดลองสำหรับวัสดุในช่วงอุณหภูมิ ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่ง ๆ พบว่า สามารถใช้

ทำนายอัตราการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขการอบแห้งที่ต้องการตรงกับสภาวะการทดลอง

นอกจากสมการอบแห้งเอมพิริคัลที่ใช้ทำนายการอบแห้ง ในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งที่ระบุไว้ สมการอบแห้งเอมพิริคัลยังคงเป็นสมการที่นำไปใช้เป็นแบบจำลองการออกแบบเครื่องอบแห้งขนาดใหญ่ ที่ช่วงสภาวะอบแห้งเดียวกันได้อย่างดี

สำหรับงานโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์อบแห้งในการทดลองอบแห้งยางพาราแห้งชั้นบาง แล้วนำข้อมูลไปสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการอบแห้งทางทฤษฎี สมการอบแห้งกึ่งทฤษฎีและสมการอบแห้งเอมพิริคัล

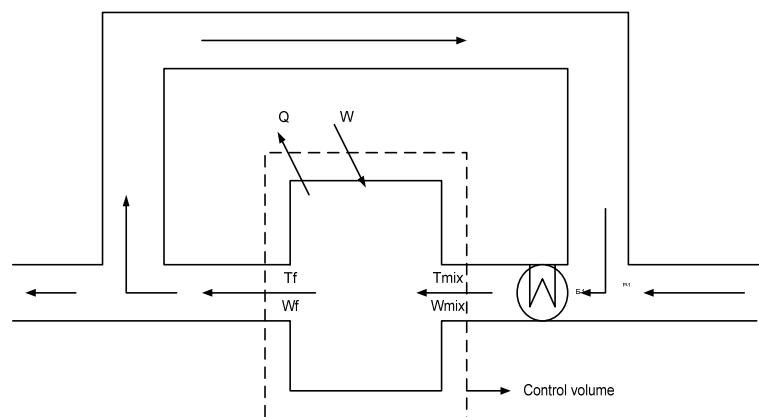
2.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใกล้สมดุล

ศิระ อัจฉริยะวิริยะ และสมชาติ โสภณธนฤทธิ์ (2532) และ Saponronnarit *et.al.* (1993) พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งแบบตู้ โดยสมมุติว่าเกิดสมดุลทางความร้อนระหว่างวัสดุและอากาศ จากการพิจารณาห้องอบแห้งทั้งห้องเป็นระบบเทอร์โมไดนามิกส์ ดังภาพประกอบที่ 2.5 จะสามารถเขียนสมดุลพลังงานโดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์ได้ดังนี้

$$\frac{Q}{m_a} + c_a T_{mix} + W_{mix} (h_{fg} + c_v T_{mix}) = c_a T_f + W_f (h_{fg} + c_v T_f) + R\Delta U_{pw} + R'\Delta U_d - \frac{W_s}{m_a}$$

หรือ

$$T_f = \frac{\left[\frac{Q}{m_a} + c_a T_{mix} + W_{mix} (h_{fg} + c_v T_{mix}) - W_f h_{fg} - R\Delta U_{pw} - R'\Delta U_d + \frac{W_s}{m_a} \right]}{(c_a + W_f c_v)} \quad (2.16)$$



ภาพประกอบที่ 2.5 ปริมาตรควบคุมของส่วนการอบแห้ง

เมื่อ ΔU_{pw} และ ΔU_d คือการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในจำเพาะของวัสดุอบแห้ง และของเครื่องอบแห้งตามลำดับ เทอมทั้งสองนี้มีค่าไม่มากนัก ดังนั้นจึงอาจตัดทิ้งได้

	R	คือ อัตราส่วนของมวลวัสดุแห้งต่อมวลอากาศแห้ง $= \frac{M_p}{(M_{mix} \Delta t)}$
และ	R'	คือ อัตราส่วนของมวลเครื่องอบแห้งต่อมวลอากาศแห้ง $= \frac{M_d}{(M_{mix} \Delta t)}$
เมื่อ	m	คือ มวล , kg/h
	\dot{m}	คือ อัตราไหลเชิงมวล , kg/h
	Δt	คือ ช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ , h
	W_s	คือ งานเพลลา , kJ
	Q	คือ ความร้อนที่สูญเสียจากเครื่องอบแห้ง ,kJ
	T	คือ อุณหภูมิ , °C
	c	คือ ความร้อนจำเพาะ , kJ/kg °C
	W	คือ อัตราส่วนความชื้น , kg น้ำ / kg อากาศแห้ง
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ , kJ/kg

สัญลักษณ์กำกับด้านล่าง

a	คือ อากาศแห้ง
d	คือ เครื่องอบแห้ง
f	คือ อากาศออกจากเครื่องอบแห้ง
p	คือ วัสดุแห้ง
pw	คือ วัสดุชื้น
v	คือ ไอน้ำ
mix	คือ อากาศผสม

และสามารถเขียนสมการสมดุลมวลได้ว่า

$$W_f - W_{mix} = (\overline{M}_0 - \overline{M}_f)R$$

$$\text{หรือ} \quad W_f = (\overline{M}_0 - \overline{M}_f)R + W_{mix} \quad (2.17)$$

เมื่อ \overline{M} คือ ความชื้นเฉลี่ย , เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

สัญลักษณ์กำกับด้านล่าง 0 และ f คือ ภาวะของวัสดุก่อนและหลังอบแห้งของ ช่วงเวลา Δt

และสมการการอบแห้งวัสดุในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง อาจเขียนได้ว่า

$$\frac{d\overline{M}}{dt} = f(T, \Phi, I, \overline{M}_{in}, t)$$

$$\text{หรือ } \overline{M}_f = \Delta t f(T, \Phi, I, \overline{M}_{in}, t) + \overline{M}_0 \quad (2.18)$$

เมื่อ Φ คือ ความชื้นสัมพัทธ์, เศษส่วน

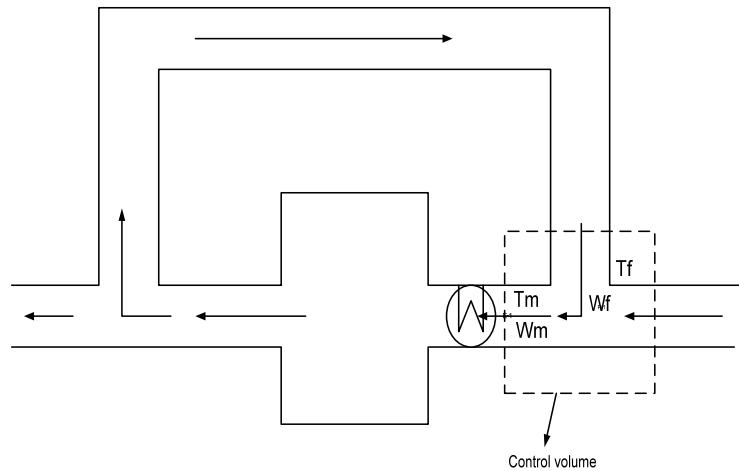
I คือ ขนาดของวัสดุ, m

\overline{M}_{in} คือ ความชื้นเริ่มต้น, เศษส่วนมาตรฐานแห้ง

t คือ เวลา, h

จากภาพประกอบที่ 2.6 แสดงปริมาณบังคับของส่วนที่เกี่ยวข้องกับการผสมกันของอากาศแวดล้อมและอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จากหลักการทรงมวลจะสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลของไอน้ำได้ว่า

$$\dot{M}_{mix} W_{mix} = \dot{M}_i W_i + \dot{M}_{RC} W_f$$



ภาพประกอบที่ 2.6 ปริมาณบังคับของส่วนที่อลม

เมื่อสัญลักษณ์กำกับด้านล่าง i และ RC หมายถึงอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศใหม่ และของอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่ตามลำดับ และสามารถเขียนสมการแสดงสมดุลมวลอากาศแห้งได้ว่า $\dot{M}_{mix} = \dot{M}_i + \dot{M}_{RC}$

จากสมการสมดุลมวลทั้งสอง จะสามารถหาได้ว่า

$$W_{mix} = (1 - RC)W_i + RCW_f \quad (2.19)$$

เมื่อ RC คือ สัดส่วนการนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาใช้ใหม่ และมีค่าเท่ากับ

$\frac{\dot{M}_{RC}}{\dot{M}_{mix}}$ นอกจากนี้ยังต้องใช้สมการคุณสมบัติของอากาศชื้นและสมการความชื้นสัมพัทธ์ของวัสดุ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Phi = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (2.20)$$

และ $M_{eq} = f(T, \Phi)$ (2.21)

เมื่อ P_v และ P_{vs} คือความดันไอน้ำและความดันไออิ่มตัว ตามลำดับ

M_{eq} คือ ความชื้นสมมูล

จากสมการ 2.16 - 2.21 สามารถแก้หาค่าตอบได้โดยการลองผิดลองถูก ดังนี้ โดยสมมติค่า $W_f \neq W_i$ แล้วแทนในสมการ 2.19 จะคำนวณได้ค่า W_{mix} จากนั้นใช้สมการ 2.16 คำนวณหา T_f โดยในที่นี้ T_{mix} เป็นอุณหภูมิที่รู้ เพราะโดยทั่วไปจะถูกควบคุมโดยเทอร์โมสแตท แล้วจึงคำนวณหา Φ จากสมการ 2.20 และ M_{eq} จากสมการ 2.21 โดยใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของอากาศที่สภาวะ mix และ f หลังจากนั้นจึงไปคำนวณหา \bar{M}_f จากสมการ 2.18 และคำนวณค่า W_f ใหม่จากสมการ 2.17 เมื่อได้ค่า W_f ใหม่แล้ว เปรียบเทียบกับ W_f ที่สมมติ ถ้าผลต่างระหว่าง W_f กับ W_f ที่สมมติมากกว่าค่าที่ยอมรับได้ ก็กลับไปคำนวณใหม่เหมือนวิธีการข้างต้น โดยสมมติค่า W_f เท่ากับค่าเฉลี่ยของ W_f ใหม่กับ W_f ที่สมมติมาก่อน ถ้าผลต่างน้อยกว่าค่าที่ยอมรับได้ก็ทำการคำนวณค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศร้อนที่ออกจากเครื่องอบแห้ง (Φ_f) เพื่อตรวจสอบดูว่า Φ_f มีค่าเกิน 1 หรือไม่ ถ้าเกิน 1 ซึ่งเป็นสภาวะที่เป็นไปไม่ได้ของอากาศให้ทำการจำลองแบบการควบคุมของไอน้ำกลับมายังวัสดุ แต่ถ้า Φ_f มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ก็เป็นอันว่าการคำนวณสำหรับช่วงเวลา Δt นั้นได้เสร็จสิ้นลงแล้วและเราสามารถที่จะทำการคำนวณการอบแห้งสำหรับ Δt ถัดไปโดยใช้วิธีเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น

2.1.5 แบบจำลองพลังงานของการอบแห้ง

2.1.5.1 การคำนวณอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าพัดลม

พิจารณาปริมาตรควบคุมจากภาพประกอบที่ 2.7 จากหลักการทรงพลังงาน อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของอากาศจะเท่ากับศูนย์ ไม่คิดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนน้อยมาก สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$m_{mix} C_a T_x + m_{mix} W_{mix} (2502.3 + C_v T_x) - m_i C_a (T_i) - m_i W_i (2502.3 + C_v T_i) - RC m_{mix} C_a T_{f2} - RC m_{mix} C_a T_{f2} - RC m_{mix} W_f (2502.3 + C_v T_{f2}) = 0 \quad (2.22)$$

เมื่อ T_x คือ อุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าพัดลม, °C

T_i คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม, °C

2.1.6.1 การคำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพัดลม

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสน้ำอากาศเท่ากับงานเพลลาที่ให้แก่พัดลม โดยสมมติว่า การถ่ายเทความร้อนที่ปริมาตรควบคุมมีน้อยมาก ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta T_{fan} = \frac{P_t}{1000(\rho_a \eta_f)(C_a + C_v W_{mix})} \quad (2.23)$$

เมื่อ ΔT_{fan} คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพัดลม, °C

P_t คือ ความดันรวมของระบบ, Pa (ซึ่งประกอบด้วยความดันลดภายในระบบท่อทั้งหมด และความดันลดที่เกิดจากเบตภายในห้องอบแห้ง)

η_f คือ ประสิทธิภาพของพัดลม, เศษส่วน

2.1.6.2 การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน

พิจารณาส่วนที่ให้พลังงานความร้อนได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสอากาศเท่ากับการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม และปริมาณความร้อนที่ได้รับจากตัวอุ่นอากาศ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_h = [m_{mix}(C_a + C_v W_{mix})T_{mix} - T_b] - Q_5 \quad (2.24)$$

เมื่อ Q_h คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, kW

Q_5 คือ อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ตัวทำความร้อน, kW

T_b คือ อุณหภูมิของอากาศที่ออกจากพัดลม

2.1.6.3 การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของพัดลม

การคำนวณหาความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของพัดลมก็คืองานที่ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนพัดลม สามารถคำนวณได้จากกำลังงานที่เอาชนะแรงเสียดทานของระบบซึ่งจะมีกระแสลมร้อนไหลผ่านระบบโดยแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนของระบบท่อต่างๆ ภายในระบบทั้งหมด (P_L) และส่วนของเบตภายในห้องอบแห้ง (P_B) ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$P_B = H(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho_a) \left(\frac{g}{g_c} \right) \quad (2.25)$$

โดย P_L คือ ความดันลดภายในระบบท่อทั้งหมด, Pa

P_B คือ ความดันลดที่เกิดจากเบตภายในห้องอบแห้ง, Pa

ε คือ สัดส่วนช่องว่างของอากาศของยางดิบ, เศษส่วน

ρ_a คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m^3

ρ_p คือ ความหนาแน่นของยางดิบ, kg/m^3

g คือ ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง

g_c คือ ค่าคงที่แรงโน้มถ่วง

ดังนั้นความดันรวมของระบบจะคำนวณจากสมการ

$$P_t = P_L + P_B \quad (2.26)$$

จากนั้นนำค่าความดันลดในระบบมาคำนวณหาค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของพัดลมตั้งสมการ

$$W_M = \frac{P_t(m_{mix} / \rho_a)}{\eta_f} \quad (2.27)$$

เมื่อ W_M คือ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์, kW

ดังนั้นจะพิจารณาหาความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption: SEC) ซึ่งเป็นพลังงานที่ใช้ต่อหน่วยมวลของน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุ จากสมการ

$$SEC = \frac{[2.6(\sum W_M) + (\sum Q_h)]\Delta t}{M_w} \quad (5.28)$$

เมื่อ SEC คือ ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ / kg of water evaporated

$\sum W_M$ คือ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์, kW

$\sum Q_h$ คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อน, kW

M_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออก, kg

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี และวิธีการต่าง ๆ ของการอบแห้งวัสดุต่าง ๆ และยางพาราแห้ง เพื่อต้องการความชื้น ทำให้ลดการสูญเสียและเพิ่มคุณภาพของวัสดุ ซึ่งงานที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

Cousin *et. al.* (1993) ทำการทดลองอบแห้งซี่ยางธรรมชาติ (natural crumb rubber) ด้วยอุณหภูมิ 100°C ความเร็วลม 1.2 เมตรต่อวินาที ทำการวิเคราะห์หากลไกการอบแห้งโดยการวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของยาง การทดลองใช้ตัวอย่างยางหนา 30 เซนติเมตร น้ำหนักเริ่มต้น 10 กิโลกรัม โดยแบ่งยางออกเป็น 5 ชั้น และไม่มีการวนอากาศกลับมาใช้ใหม่ จากผลการทดลองพบว่า ช่วงการอบแห้งมี 3 ช่วง ช่วงแรกชั้นยางจะอิมตัวด้วยน้ำ อุณหภูมิของอากาศและเม็ดยางจะเท่ากับอุณหภูมิของกระเปาะเปียก ในช่วงที่ 2 เกิดการอบแห้งแบบอัตราคงที่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและปริมาณน้ำในยางลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 3 จะเป็นช่วงอัตราอบแห้งลดลง (Falling rate) อากาศที่ใช้ออบแห้งจะเพิ่มขึ้น

Naon *et. al.* (1995) ทำการทดลองอบแห้งยางธรรมชาติและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับอบแห้งยางธรรมชาติ โดยใช้เครื่องอบแห้งขนาด ยาว X กว้าง X สูง เท่ากับ $3 \times 1 \times 2$ เมตร ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที อุณหภูมิอากาศ $20-150^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ 0-100% จากผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลาการอบแห้ง และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยการพา (h) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุและอุณหภูมิของอากาศ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการอบแห้งชิ้นบางและนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้น ไปทำนายอัตราการอบแห้งชิ้นหนาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าผลจากแบบจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยกำหนดความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งเท่ากับ 0.8 % และจากการนำแบบจำลองไปใช้เปรียบเทียบเครื่องอบแห้ง Trolly แบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้ในอุตสาหกรรมพบว่าให้ผลใกล้เคียงกันทั้งด้านความชื้น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และพลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง

ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช (2547) ได้นำเสนอถึงหลักการพื้นฐานในการอบแห้งวัสดุพอรุนโดยการถ่ายโอนความร้อนและการเคลื่อนย้ายมวลสาร (ความชื้น) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอบแห้ง สิ่งสำคัญของการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎี คือ การทราบกลไกหลักที่มีอิทธิพลต่อการควบคุมกระบวนการ เพื่อนำไปสู่การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับปรากฏการณ์นั้น ปกติการอบแห้งจะถูกแบ่งออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling rate period) ในกรณีแรกอัตราการอบแห้งหาได้จากอิทธิพลของสภาวะภายนอก กลไกที่ควบคุมกระบวนการอบแห้งในช่วงนี้ ได้แก่ พลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับวัสดุหรือการถ่ายโอนมวลสารที่ออกจากผิวของวัสดุ ส่วนในช่วงอัตราการอบแห้งที่ลดลง อัตราการอบแห้งจะลดลงตามเวลาที่ผ่านไปและอัตราการถ่ายโอนมวลสารภายในจะเป็นกลไกที่ควบคุมกระบวนการช่วงนี้

Srivastava and John (2002) ได้เสนอการอบแห้งเมล็ดพืช โดยใช้การอบแห้งชิ้นบางและสมการเอมพิริคัล ในการทำนายความชื้นของอากาศ อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิของเมล็ดพืช โดยเปลี่ยนแปลงความสูงของเมล็ดพืช ซึ่งจะมีผลกับความเร็วของอากาศและการหดอายุของเมล็ดพืช ซึ่งทั้งสองสมการที่ใช้ในการทำนายทั้ง Partial และ Ordinary จะใช้ระเบียบวิธีการแบบ Backward Implicit Numerical Scheme และ ระเบียบวิธี RungeKutta มาใช้ในการหาผลเฉลย โดยในกระบวนการอบแห้งแบบอยู่กับที่นั้น อากาศแห้งจะเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนสุดของชั้นเมล็ดพืช เป็นผลให้เกิดการถ่ายโอนความชื้นจากเมล็ดพืชสู่อากาศแห้งโดยอุณหภูมิของอากาศแห้ง อุณหภูมิของเมล็ดพืช ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในเมล็ดพืช และความชื้นของอากาศจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและอัตราการอบแห้ง

ฐานันดรศักดิ์ เทพา (2539) ได้ออกแบบและพัฒนาเตาเผาอิฐที่ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยศึกษากระบวนการถ่ายโอนมวลและความร้อนในเตาเผาอิฐแบบอยู่กับที่ และให้ความร้อนไหลลง และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองเผาอิฐด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในกระบวนการจำลองมีอยู่ 4 สมการ คือ สมการทำนายอุณหภูมิของอากาศ สมการทำนายความชื้นของอากาศ สมการทำนายอุณหภูมิของอิฐ และสมการทำนายความชื้นของอิฐ จากผลการทดลองพบว่าในกระบวนการอบอิฐ อุ่นอิฐและเผาอิฐ มีความใกล้เคียงกับผลการทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำนวนอิฐ 2500 ก้อน หรือน้อยกว่า จากการจำลองแบบกระบวนการเผาอิฐถูกนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบเตาเผาอิฐ 4 ห้อง ที่มีการทำงานหมุนเวียนกันคือ ลดอุณหภูมิ เผา อุ่น และอบอิฐ ซึ่งพบว่าเตาที่ออกแบบนี้ใช้พลังงานเผาอิฐต่ำมีค่าประมาณ 1.4-2.2 MJ/kg อิฐ โดยในการประหยัดพลังงานอาจเลือกใช้อุณหภูมิสูงและใช้อัตราการไหลของอากาศสันดาปต่ำ การเพิ่มผลผลิตควรเพิ่มอากาศสันดาปเพิ่มขึ้น เตาเผาอิฐขนาดใช้งานจริงแบบ 4 ห้อง ถูกสร้างขึ้นและทดลองเผาอิฐ พบว่าการใช้พลังงานอยู่ในช่วง 2.258-3.764 MJ/kg อิฐ ซึ่งการเผาที่ใช้พลังงานต่ำทำได้ โดยการเผาที่เวลาอันสั้นและเพิ่มอุณหภูมิเผาจากการสันดาปไม่พินให้เร็วที่อุณหภูมิอากาศสันดาปสูง ประสิทธิภาพของเตาเผาอิฐที่ทดสอบมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 62.6% ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเตาเผาอิฐแบบความร้อนไหลขึ้นที่มีใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป และทำให้มีต้นทุนในการผลิตลดลง 17% โดยใช้เวลาในการ ค่ินทุนน้อยกว่า 9 เดือน

ธวัชชัย สุวรรณวงศ์ (2547) ได้ทำการศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งยางแท่ง เอส ที อาร์ 20 ระยะที่สอง โดยศึกษาการลดลงของความชื้นเทียบกับเวลาเมื่อทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิคงที่ มีการปรับปรุงเครื่องอบแห้งชั้นบางที่ใช้ในการอบยางพาราแท่ง และทดลองอบแห้งยางพาราแท่งชั้น บางที่อุณหภูมิลมร้อนในช่วง 100°C ถึง 130°C โดยเพิ่มทีละ 10°C ซึ่งทำให้ทราบว่า ความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้งมีผลต่อการอบแห้งชั้นบาง โดยที่อุณหภูมิลมร้อนที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงด้วย

Tirawanichakul and Tirawanichakul (2005) ได้ศึกษาปริมาณความชื้นสมดุลของเศษยางซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตยางแท่ง ภายใต้สภาวะคงที่ ที่อุณหภูมิ 35-60°C ความชื้นสัมพัทธ์ 10-90% จากผลการทดลองได้นำสมการหาค่าความชื้นสมดุล 4 สมการเปรียบเทียบโดยขึ้นอยู่กับค่าความแปรปรวน 2 สอง คือ SSE (sum of squares error) และ SD (standard deviation) พบว่าสมการของ Halsey เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการทำนายค่าความชื้นสมดุลของยาง ซึ่งพบว่าการคายความชื้นของยางสัมพันธ์กับอุณหภูมิแวดล้อมที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการอบแห้งขึ้นกับระยะเวลาและอุณหภูมิลมอบแห้ง