

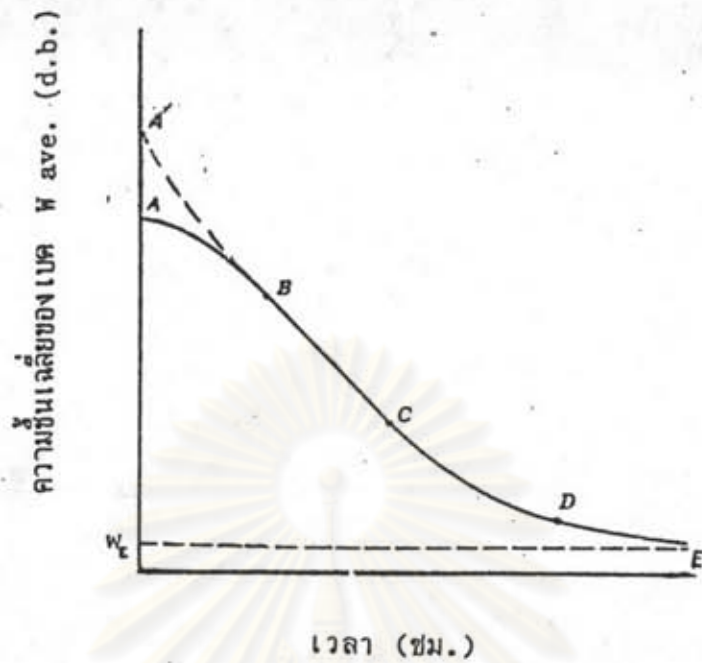


แบบจำลองคณิตศาสตร์ของ เครื่องอบแห้ง แบบไหลผ่าน

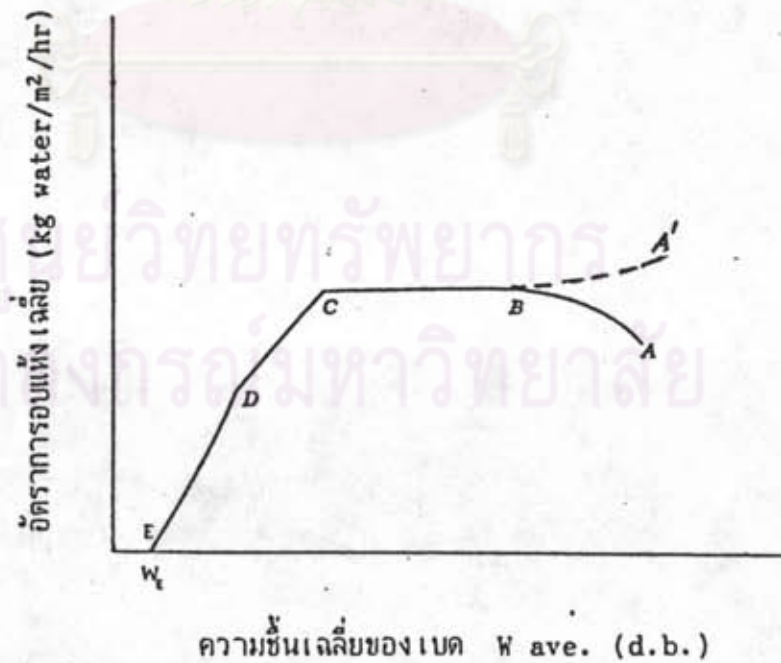
3.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีลดความชื้นในวัสดุขึ้นโดยให้สื่อกลาง (medium) ที่เฉื่อย, ความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว) และอุณหภูมิสูง ไหลมาสัมผัสกับวัสดุขึ้น เมื่อวัสดุขึ้นได้รับความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และระเหยความชื้นออกมาสู่สื่อกลางที่ไหลผ่านไป ทำให้วัสดุขึ้นมีความชื้นลดลง สาเหตุที่วัสดุขึ้นระเหยความชื้นออกไปได้เพราะความดันไอ (vapor pressure) ของความชื้นในวัสดุมีค่าสูงกว่าความดันย่อย (partial pressure) ของความชื้นในสื่อกลาง (42) วัสดุขึ้นจะระเหยความชื้นออกไปจนกระทั่งความดันทั้งสองสมดุลกัน จึงไม่ระเหยออกไปอีก นั่นคือวัสดุขึ้นมีความชื้นสมดุลกับความชื้นในสื่อกลาง โดยทั่วไปสื่อกลางและความชื้นไม่จำเป็นต้องหมายถึงลมร้อนกับน้ำเสมอ แต่อาจหมายถึง คู่อื่นก็ได้ เช่น ไนโตรเจนกับเบนซีน เป็นต้น

พฤติกรรมของการอบแห้งทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกันคือ เมื่ออบแห้งวัสดุขึ้นด้วยลมร้อน ปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ, ความชื้นและความเร็วคงที่ ทันทีที่ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุขึ้นอุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะค่อยๆเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ที่สภาวะคงที่อุณหภูมิวัสดุขึ้นจะมีค่าคงที่ ถ้าเป็นการอบแห้งด้วยวิธีสัมผัสกับลมร้อนโดยตรง (direct heating) อุณหภูมิวัสดุขึ้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ถ้าเป็นการอบแห้งด้วยวิธีให้ความร้อนทางอ้อม (indirect heating) ร่วมด้วย อุณหภูมิวัสดุขึ้นจะมีค่าอยู่บนเส้นความชื้นอิ่มตัวระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของลมร้อน (43) เนื่องจากในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นมีค่าคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate period) ช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อความชื้นของวัสดุขึ้นลดลงจนเท่ากับความชื้นวิกฤต หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงผิวหน้าของวัสดุขึ้นจะเพิ่มขึ้น และอัตราการอบแห้งจะช้าลงเรื่อยๆ จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate period) และในที่สุดอัตราการอบแห้งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อความชื้นในวัสดุสมดุลกับความชื้นในลมร้อน ซึ่งเป็นความชื้นต่ำสุด (ความชื้นสมดุล) ของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลาและอัตราการอบแห้งกับความชื้นในชั้นวัสดุ มีแสดงอยู่ในรูป 3.1 และ 3.2

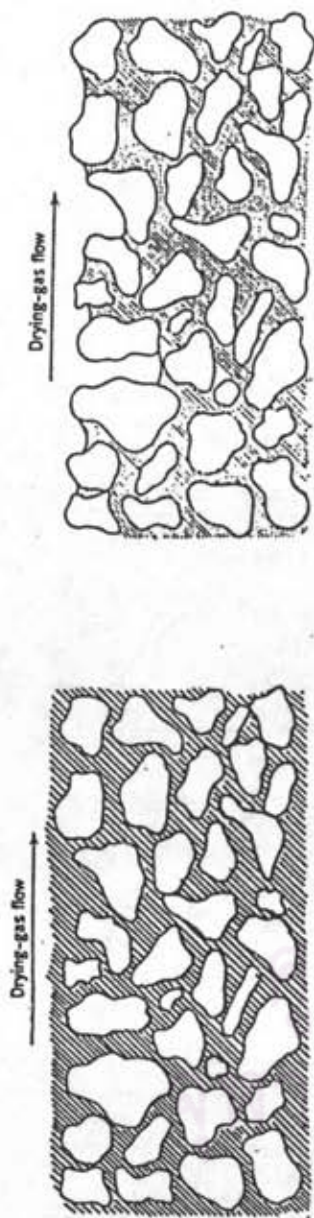


รูป 3.1 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการอบแห้งวัสดุขึ้นภายใต้เงื่อนไขของลมร้อนที่มีอุณหภูมิ, ความชื้น และความเร็วคงที่

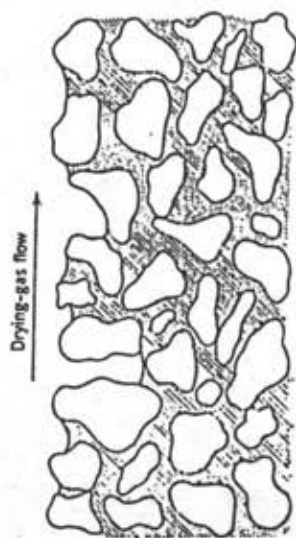


รูป 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งซึ่งได้มาจากรูป 3.1

ในรูป 3.1 และ 3.2 เส้น AB หรือ A'B เป็นช่วงที่วัสดุขึ้นอยู่ในสภาวะที่ไม่คงที่ (unsteady state) กำลังปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ที่จุด B ถ้าอุณหภูมิแรกเริ่มของวัสดุขึ้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุขึ้นที่จุด B อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปตามเส้น AB ในทางตรงข้ามถ้าอุณหภูมิแรกเริ่มของวัสดุขึ้นนั้นสูงกว่าอุณหภูมิของวัสดุขึ้นที่ B อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ไปตามเส้น A'B ต่อมาช่วง BC เป็นช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ในช่วงนี้ผิวหน้าของวัสดุขึ้นทั้งหมดจะเปียกน้ำ (มีฟิล์มของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ) ดังรูป 3.3 ก และอุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะมีค่าคงที่ (ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อนแก่วัสดุขึ้น) เช่น กรณีที่ให้ความร้อนโดยตรง อุณหภูมิของวัสดุขึ้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุขึ้นจะเคลื่อนที่มาแทนที่น้ำที่ระเหยออกไปกับการพาของกระแสลมร้อนได้ทัน ในช่วงนี้โครงสร้างภายในของวัสดุขึ้นไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง กลไกของการถ่ายเทน้ำจากภายในวัสดุออกมาที่ผิวหน้าของวัสดุขึ้น มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุขึ้น เช่น วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย (fibrous) หรืออสัณฐาน (amorphous) การถ่ายเทของน้ำจะเป็นลักษณะการแพร่, วัสดุขึ้นที่มีอัตราส่วนช่องว่างที่เปิดกว้าง (large open void space) การถ่ายเทของน้ำจะถูกควบคุมด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว เป็นต้น เนื่องจากการถ่ายเทน้ำด้วยการแพร่มีอัตราการถ่ายเทช้ามาก วัสดุขึ้นที่มีการถ่ายเทน้ำโดยวิธีนี้จะมีช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่สั้นมากหรืออาจไม่มีเลย ที่จุด C ผิวหน้าของวัสดุเริ่มปรากฏว่ามีน้ำห่อหุ้มไม่สม่ำเสมอ และเรียกจุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ในช่วง CE นั้นอัตราการอบแห้งของวัสดุขึ้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในวัสดุและลักษณะการถ่ายเทน้ำ (44) ในช่วง CD ซึ่งเรียกว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงแรก (first falling rate period) ในช่วงนี้ผิวหน้าของวัสดุขึ้นเริ่มมีน้ำห่อหุ้มน้อยลงทุกที (ดูรูป 3.3 ข) เนื่องจากอัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวหน้าของวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวหน้าของวัสดุ จนกระทั่งถึงจุด D ทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุจะไม่มีฟิล์มของน้ำเหลืออยู่เลย เมื่อวัสดุมีความชื้นต่ำกว่าจุด D ในรูป 3.2 (ช่วง DE) การระเหยทั้งหมดจะต้องเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุก่อน ในขณะที่ความชื้นของวัสดุมีค่าลดลงระยะทาง สำหรับการนำความร้อนและการแพร่ของมวลก็จะมากขึ้น จนกระทั่งวัสดุมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล (จุด E) ซึ่งจะไม่เกิดการอบแห้งอีกต่อไป ช่วงการอบแห้งช่วงนี้เรียกว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงที่สอง (second falling rate period) (ดูรูป 3.3 ค) เมื่อไม่มีการอบแห้งเกิดขึ้นอีก การกระจายตัวของความชื้นจะมีลักษณะดังในรูป 3.3 ง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

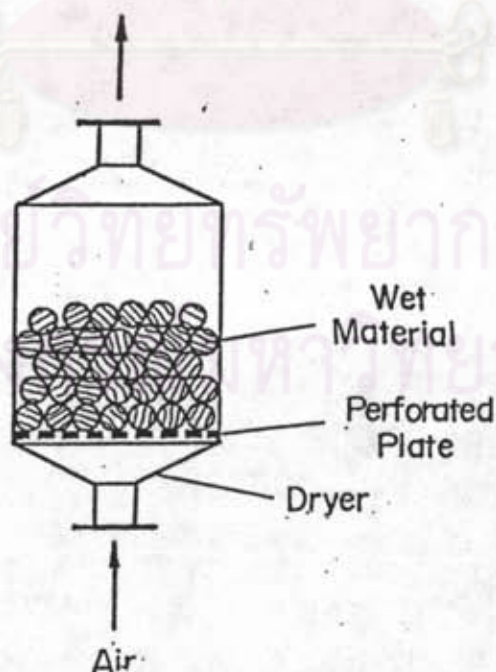
รูป 3.3 การกระจายความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งในช่วงต่างๆ

- (ก) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่
- (ข) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงแรก
- (ค) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงที่สอง
- (ง) เมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

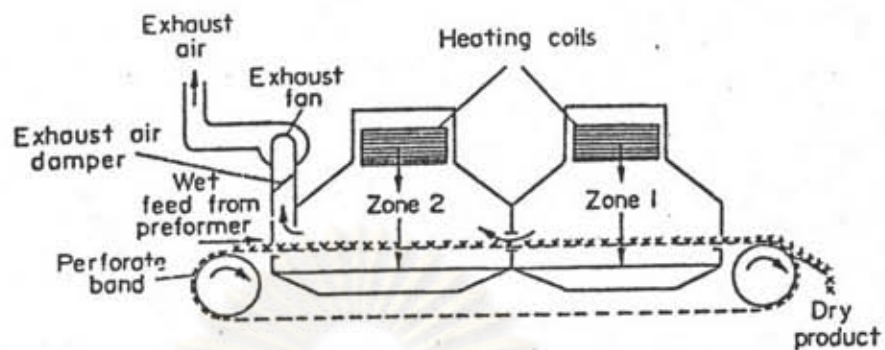
เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (drying characteristic curve) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวัสดุชิ้น, วิธีการอบแห้งและเงื่อนไขของการอบแห้ง (เช่น อัตราการป้อนความร้อน (heating rate) เป็นต้น) ยกตัวอย่าง ทราเยที่อบแห้งเป็นชั้นนิ่งบนสายพานที่กำลังเคลื่อนที่ ย่อมมีเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแตกต่างจากทราเยที่อบแห้งอยู่ในเครื่องอบแห้งแบบหมุน (rotary dryer) เป็นต้น (45)

3.2 ลักษณะ และ รูปแบบทั่วไปของการอบแห้งแบบไหลผ่าน

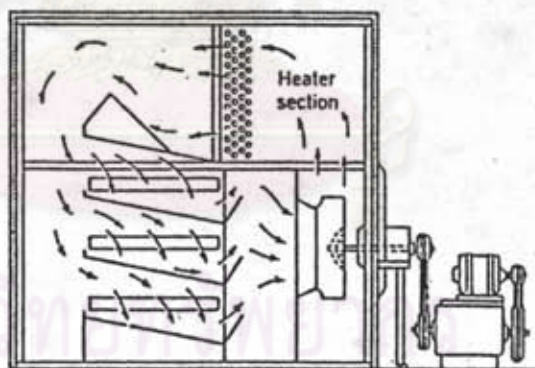
การอบแห้งแบบไหลผ่าน ซึ่งเป็นที่รู้จักแพร่หลายแบบหนึ่ง เป็นการอบแห้งประเภทหนึ่งที่ทำให้ความร้อนแก่วัสดุชิ้นโดยตรง (direct heating) คือให้ลมร้อนไหลทะลุผ่านชั้นวัสดุชิ้นโดยตรง (ดังรูป 3.4) ลักษณะการปฏิบัติงานมีทั้งเป็นแบบงวด (batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous) แล้วแต่ชนิดของเครื่องอบแห้ง เช่น เครื่องอบแห้งแบบแบนด์ไหลผ่าน (through-circulation band dryer), เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน เป็นต้น (ดูรูป 3.5-3.10) ได้มีการนำเอาเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านมาใช้อบแห้งวัสดุชิ้นต่างๆ เช่น ข้าวโพค, ข้าวเจ้า, มันสำปะหลัง, ถั่ว, โกโก้, เส้นใยสังเคราะห์, ขนแกะ เป็นต้น โดยที่วัสดุชิ้นอาจมีรูปร่างเป็น ทรงกลม, แท่ง หรือ รูปร่างอื่นๆแล้วแต่ความเหมาะสม โดยอบแห้งเป็นชั้นวัสดุบางหรือชั้นวัสดุหนา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องอบแห้ง



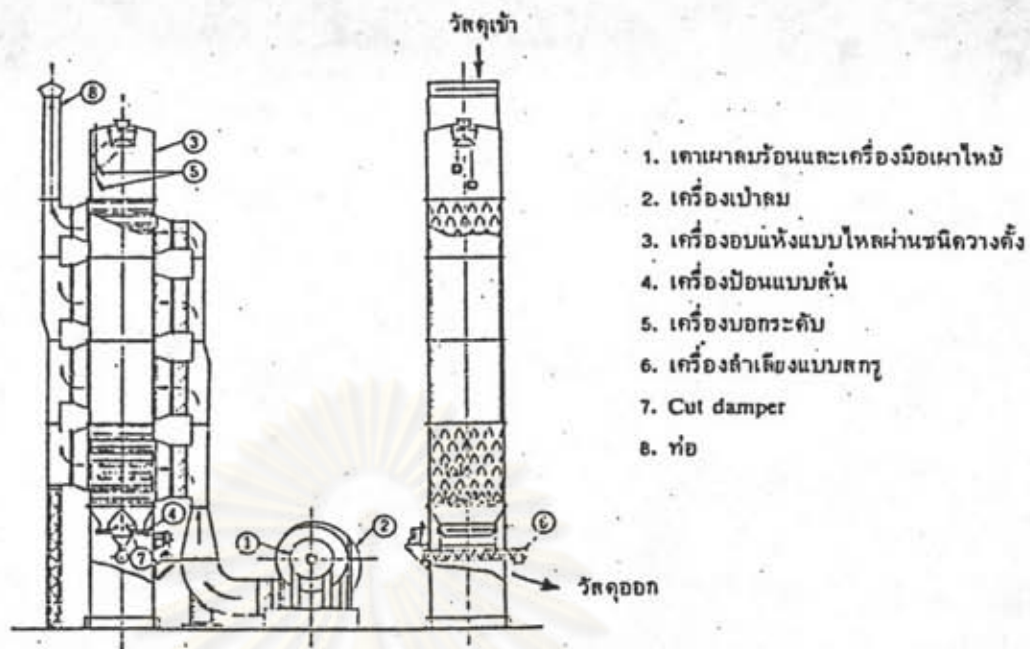
รูป 3.4 ลักษณะการอบแห้งแบบไหลผ่านที่ปฏิบัติงานเป็นงวด



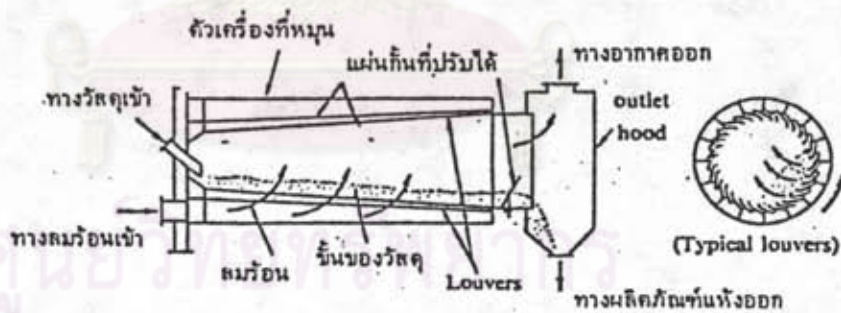
รูป 3.5 เครื่องอบแห้งแบบกลิ้งไหลผ่าน (through-circulation band dryer)



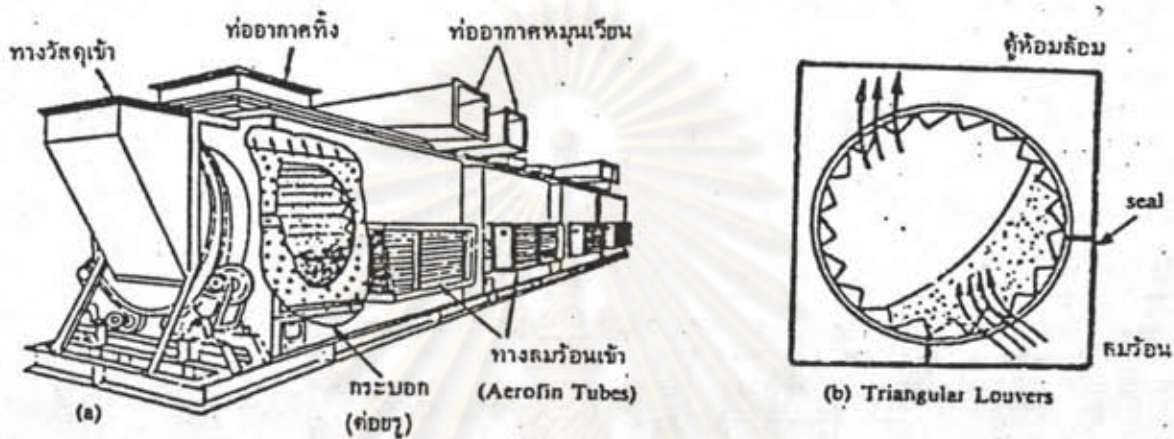
รูป 3.6 เครื่องอบแห้งไหลผ่านแบบถาด (through-circulation tray dryer)



รูป 3.7 เครื่องอบแห้งต่อเนื่องแบบไหลผ่านชนิดวางตั้ง



รูป 3.8 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน และ เป่าลมเข้าผิวปลาย

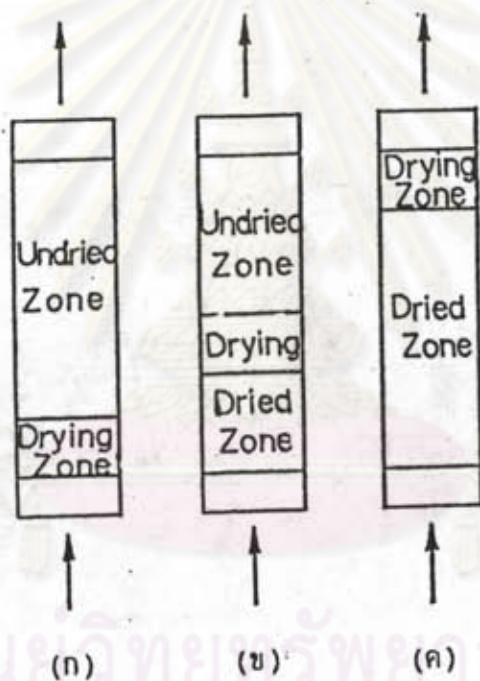


รูป 3.9 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดหมุน และ เป่าลมเข้าผิวด้านข้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นเฉพาะเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ที่ปฏิบัติงานเป็นวง - ของทั้ง
เบคบาง และ เบคหนา

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในเบค โดยทั่วไปจะมีลักษณะ เป็นโซนเหมือน
กับรูป 3.10 (46) กล่าวคือ เมื่อเริ่มอบแห้งภายในเบคจะปรากฏมีเพียง 2 โซน คือ โซนที่
กำลังอบแห้งอยู่ (drying zone) กับโซนที่ยังไม่เกิดการอบแห้ง (undried zone) ดังรูป
3.10 ก เมื่อเวลาผ่านไป วัสดุชิ้นเริ่มแห้งมากขึ้นก็จะปรากฏมี โซนที่แห้งแล้ว (dried zone)
เกิดขึ้นด้วยอีกโซน และจะเปลี่ยนไปเป็นรูป 3.10 ข และ 3.10 ค ในที่สุด สำหรับการเปลี่ยน
แปลงภายในโซนที่กำลังอบแห้งอยู่จะเหมือนกับพฤติกรรมที่กล่าวถึงข้างต้นในการอบแห้งทั่วไป

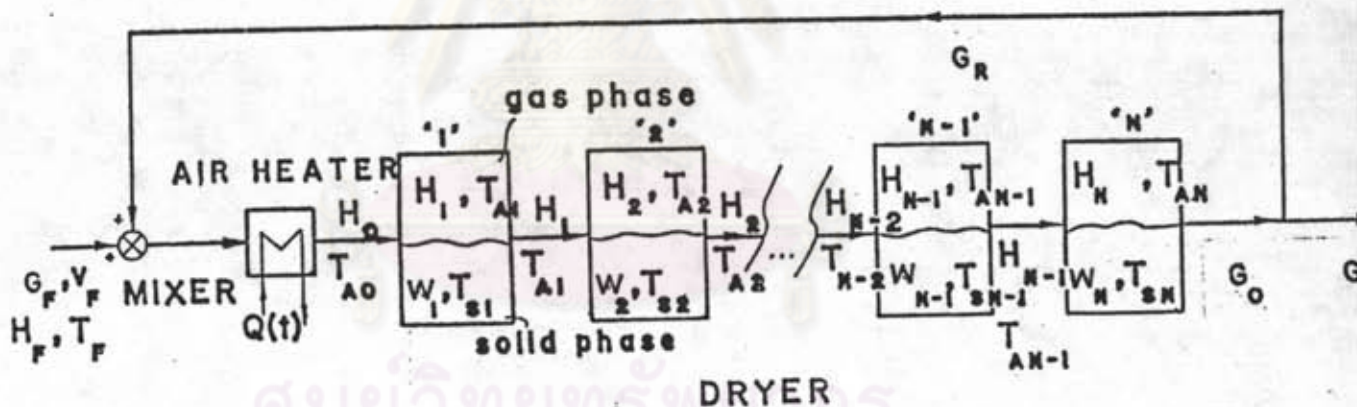


รูป 3.10 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในวัสดุชิ้นที่ตำแหน่งใด ๆ ของเบค เมื่อ
เวลาเพิ่มขึ้นตามลำดับ เรียงลำดับจากรูป (ก), (ข) และ (ค)

3.3 แบบจำลอง คณิตศาสตร์ของการอบแห้ง แบบไหลผ่าน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะ เสนอแบบจำลอง คณิตศาสตร์ของการอบแห้ง แบบไหลผ่านที่ปฏิบัติงาน เป็นวงวน ซึ่งได้มาจากการอนุพันธ์สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญต่อไปนี้ คือ ความชื้น, อุณหภูมิ ของวัสดุชื้นและลมร้อน, ความชื้นวิกฤตและความชื้นสมดุล, อัตราการอบแห้ง (drying rate), เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (drying time), ความดันตก (pressure drop) ของ เครื่องอบแห้ง นอกจากนี้ยังประเมินสมรรถนะการปฏิบัติงานของเครื่องอบแห้ง ทั้งในกรณีการอบแห้งที่มีการผสมวัสดุชื้นในเบคเป็นครั้งคราว และกรณีการอบแห้งที่มีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งบาง ส่วนกลับมาใช้อีก ผลการขีมือเลขยังใช้ประเมินกำลังและพลังงานของเครื่องเป่าลม (blower) ตลอดจนปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอุ่นลมร้อน ก่อนปล่อยเข้าเครื่องอบแห้งได้อีกด้วย

แบบจำลองนี้ใช้สมมติฐานว่าการไหลของลมร้อนผ่านเบคของวัสดุชื้น สามารถแทนได้ โดยการเอาถังกวนสมบูรณ์ (complete stirred tank) ขนาดเท่ากันจำนวน N ถังมาต่อ อนุกรมกัน (โดยทั่วไป N มีค่าประมาณ 8 - 10 ถัง) และการไหลของลมร้อนในแบบจำลองนี้จะ คล้ายกับแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งคิดว่าการไหลเป็นแบบลูกสูบ (plug flow model) ดังรูป 3.11

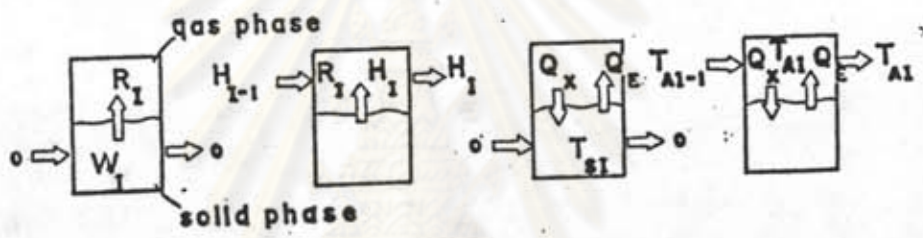


รูป 3.11 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านแทนด้วยถังกวน N ถังต่ออนุกรมกัน

สมมติฐานของ แบบจำลอง คณิตศาสตร์ที่พัฒนา ขึ้นมีดังนี้

1. การไหลของลมร้อนเป็นแบบลูกสูบ และ เบคแทนด้วยถังกวนสมบูรณ์ N ถังต่อ อนุกรมกัน
2. ไม่มีการสูญเสียของความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านผนัง เครื่องอบแห้ง

3. เนื่องจากการไหลของลมร้อนเป็นแบบลูกสูบ จึงไม่มีเกรเดียนต์ของความชื้นและอุณหภูมิ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล
 4. การนำความร้อนระหว่างชั้นวัสดุภายในเบคินั้น ถือว่ามีค่าน้อยมากจนไม่คำนึงถึง
 5. การแพร่ (diffusion) ของความชื้นในทิศทางการไหลของลมร้อน ถือว่ามีค่าน้อยมากจนไม่คำนึงถึง
 6. ในระหว่างการอบแห้ง วัสดุชิ้นจะไม่หดหรือขยายตัว หรือเปลี่ยนรูปร่าง
 7. ลมร้อนชิ้นนั้น ถือว่าเป็นก๊าซผสมในอุณหภูมิต่ออากาศแห้งที่ร้อนกับความชื้น (ไอน้ำ) จึงทำนายคุณสมบัติของมันได้ด้วยกฎของก๊าซในอุณหภูมิต่ออากาศแห้งที่ร้อนกับความชื้น (ไอน้ำ) จึงทำนายคุณสมบัติของมันได้ด้วยกฎของก๊าซในอุณหภูมิต่ออากาศแห้งที่ร้อนกับความชื้น
- จากสมมติฐานข้างบนสามารถเขียนเป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทที่เกิดขึ้นภายในดังที่ 'I' ใ้ดังรูป 3.12



รูป 3.12 ปรากฏการณ์ถ่ายเทที่เกิดขึ้นในถัง 'I' ใ้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จากรูปของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และ สมมติฐานต่างๆข้างต้น สามารถนำมา เขียนอนุพันธ์ของสมการดุลของมวลสารและพลังงานในวัสดุชิ้นและลมร้อน ในถัง 'I' ใ้ดังนี้

3.3.1 กรณีการอบแห้งธรรมชาติที่ไม่มีการหมุนเวียนลมแห้ง ($r = 0$)

สมการดุลของมวลสาร

ดุลของน้ำในวัสดุชั้นในตั้ง 'I'

$$\begin{aligned} (\text{อัตราการสะสมน้ำในวัสดุชั้น}) &= (\text{อัตราการไหลเข้าของน้ำในวัสดุชั้น}) - \\ &(\text{อัตราการไหลออกของน้ำในวัสดุชั้น}) - \\ &(\text{อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุชั้น}) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt}[\rho_s(1-\epsilon)\left(\frac{A}{N}\right)W_I] = 0 - 0 - R_I\left(\frac{A}{N}\right)$$

$$\rho_s(1-\epsilon)\frac{d}{dt}W_I = -R_I \quad \text{--- (3.1)}$$

ดุลของไอน้ำในลมร้อนในตั้ง 'I'

$$\begin{aligned} (\text{อัตราการสะสมไอน้ำในลมร้อน}) &= (\text{อัตราการไหลเข้าของไอน้ำในลมร้อน}) - \\ &(\text{อัตราการไหลออกของไอน้ำในลมร้อน}) + \\ &(\text{อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุชั้น}) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{1}{V_{H_1}}\right)\epsilon\left(\frac{A}{N}\right)H_I\right] = AG_{I-1}H_{I-1} - AG_IH_I + R_I\left(\frac{A}{N}\right)$$

จากสมการการอนุรักษ์ของมวลของอากาศแห้งที่ผ่านเบค

$$G_{I-1}A = G_I A = G_{F_a}A$$

สำหรับทุกตั้ง 'I'

$$G_{I-1} = G_I = G_{F_a}$$

เมื่อแทนค่าลงไปในสมการดุลของไอน้ำในลมร้อน สมการจะกลายเป็น

$$\left(\frac{1}{V_{H_1}}\right)\epsilon\frac{d}{dt}H_I = \left(\frac{N}{L}\right)G_{F_a}(H_{I-1} - H_I) + R_I \quad \text{--- (3.2)}$$

สมการดุลของพลังงานความร้อน

ดุลของพลังงานความร้อนในวัสดุชั้น ในดัง 'I'

$$\begin{aligned} (\text{อัตราการสะสมพลังงานความร้อนในวัสดุชั้น}) &= (\text{อัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนในวัสดุชั้น}) - (\text{อัตราการไหลออกของพลังงานในวัสดุชั้น}) + (\text{อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากลมร้อนเข้ามา}) - (\text{อัตราของพลังงานความร้อนที่ใช้ไปในการระเหยน้ำ}) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt}[\rho_s(1-\epsilon)\left(\frac{AL}{N}\right)E_{s_1}] = 0 - 0 + ha(T_{A_1} - T_{s_1})\left(\frac{AL}{N}\right) - R_1(C_{p_w}T_{s_1} + \lambda_{s_1})\left(\frac{AL}{N}\right)$$

อนึ่งในการหาค่าเอนทัลปีของไอน้ำและอากาศ กำหนดให้เป็นน้ำและอากาศที่อุณหภูมิ 0 °ซ (46) ตามลำดับ
ดังนั้น เอนทัลปีของวัสดุชั้นคือ

$$E_{s_1} = (C_{p_s} + C_{p_w}W_1)T_{s_1}$$

เมื่อแทนค่าของ เอนทัลปีของวัสดุชั้นลงไปในสมการข้างต้น จะได้

$$\begin{aligned} \rho_s(1-\epsilon)\left(\frac{AL}{N}\right)(C_{p_s} + C_{p_w}W_1)\frac{d}{dt}T_{s_1} + \rho_s(1-\epsilon)\left(\frac{AL}{N}\right)C_{p_w}T_{s_1}\frac{d}{dt}W_1 &= ha(T_{A_1} - T_{s_1})\left(\frac{AL}{N}\right) \\ &\quad - R_1(C_{p_w}T_{s_1} + \lambda_{s_1})\left(\frac{AL}{N}\right) \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (3.1) ลงไปในเทอมที่ 2 ของสมการข้างบน จะได้

$$\rho_s(1-\epsilon)(C_{p_s} + C_{p_w}W_1)\frac{d}{dt}T_{s_1} = ha(T_{A_1} - T_{s_1}) - R_1\lambda_{s_1} \quad \text{--- (3.3)}$$

ดุลของพลังงานในลมร้อน ในถัง 'I'
 (อัตราการสะสมพลังงานความร้อนในลมร้อน) = (อัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนในลมร้อน) - (อัตราการไหลออกของพลังงานความร้อนในลมร้อน) - (อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากลมร้อนไปสู่วัสดุชั้น) + (อัตราของพลังงานความร้อนที่ไหลเข้ามาพร้อมกับไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุชั้น)

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{1}{V_{H_1}} \right) \epsilon \left(\frac{A_1}{N} \right) E_{A_1} \right] = AG_{I-1} E_{A_{1-1}} - AG_1 E_{A_1} - ha(T_{A_1} - T_{S_1}) \left(\frac{A_1}{N} \right) + R_1 (C_{P_W} T_{S_1} + \lambda_{S_1}) \left(\frac{A_1}{N} \right)$$

เอนทัลปีของลมร้อนขึ้นคือ

$$E_{A_1} = (C_{P_A} + C_{P_V} H_1) T_{A_1} + \lambda_0 H_1 \quad \text{--- (a)}$$

เมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียลค่านิยามของเอนทัลปีของลมร้อนขึ้นกับเวลา

จะได้

$$\frac{dE_{A_1}}{dt} = (C_{P_A} + C_{P_V} H_1) \frac{dT_{A_1}}{dt} + (\lambda_0 + C_{P_V} T_{A_1}) \frac{dH_1}{dt} \quad \text{--- (b)}$$

จากสมการการอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง

$$G_{I-1} = G_I = G_{Fa}$$

และจากสมมติฐานที่ว่า ลมร้อนขึ้นคือก๊าซผสมในอุดมคติ จะได้

$$C_{P_W} T_{S_1} + \lambda_{S_1} = \lambda_0 + C_{P_V} T_{S_1}$$

เมื่อบวกเข้าและลบออกด้วยเทอม $C_{pV}(T_{A1}-T_{S1})$ จะได้

$$C_{pW}T_{S1} + \lambda_{S1} + C_{pV}(T_{A1}-T_{S1}) = \lambda_0 + C_{pV}T_{A1} \quad \dots (c)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (a), (b) และ (c) ลงไปในสมการดุลของพลังงาน ความร้อนของลมร้อนขึ้น จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{1}{V_{H1}} \right) \epsilon \left(\frac{A1}{N} \right) (C_{pA} + C_{pV}H_1) \frac{d}{dt} T_{A1} + \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{1}{V_{H1}} \right) \epsilon \left(\frac{A1}{N} \right) (\lambda_0 + C_{pV}T_{A1}) \frac{d}{dt} H_1 \right] \right] &= \\ &= AG_{Fa} [(C_{pA} + C_{pV}H_{1-1}) T_{A1-1} + \lambda_0 H_{1-1} - (C_{pA} + C_{pV}H_1) T_{A1} - \lambda_0 H_1] \\ &\quad - ha(T_{A1} - T_{S1}) \left(\frac{A1}{N} \right) + R_1 (C_{pW}T_{S1} + \lambda_{S1}) \left(\frac{A1}{N} \right) \end{aligned}$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (3.2) ลงไปในเทอมที่ 2 ทางซ้ายมือของสมการข้างบน และบวกเข้าลบออกเทอม $R_1 \left(\frac{A1}{N} \right) C_{pV}(T_{A1}-T_{S1})$ จะได้

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{V_{H1}} \right) \epsilon \left(\frac{A1}{N} \right) (C_{pA} + C_{pV}H_1) \frac{d}{dt} T_{A1} + AG_{Fa} \lambda_0 (H_{1-1} - H_1) + AG_{Fa} C_{pV} H_{1-1} T_{A1} - AG_{Fa} C_{pV} H_1 T_{A1} + \\ + (\lambda_0 + C_{pV}T_{A1}) R_1 \left(\frac{A1}{N} \right) &= AG_{Fa} \lambda_0 (H_{1-1} - H_1) + AG_{Fa} C_{pA} (T_{A1-1} - T_{A1}) \\ &\quad + AG_{Fa} C_{pV} H_{1-1} T_{A1-1} - AG_{Fa} C_{pV} H_1 T_{A1} - ha(T_{A1} - T_{S1}) \left(\frac{A1}{N} \right) \\ &\quad + R_1 (C_{pW}T_{S1} + \lambda_{S1} + C_{pV}(T_{A1} - T_{S1})) \left(\frac{A1}{N} \right) - R_1 C_{pV} (T_{A1} - T_{S1}) \left(\frac{A1}{N} \right) \end{aligned}$$

จากสมการ (d) จะทำให้สมการข้างบนเป็น

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{V_{H1}} \right) \epsilon (C_{pA} + C_{pV}H_1) \frac{d}{dt} T_{A1} &= \left(\frac{N}{L} \right) G_{Fa} (C_{pA} + C_{pV}H_{1-1}) (T_{A1-1} - T_{A1}) \\ &\quad - ha(T_{A1} - T_{S1}) - R_1 C_{pV} (T_{A1} - T_{S1}) \quad \dots (3.4) \end{aligned}$$

อนึ่งอัตราการระเหยของน้ำออกจากวัสดุชั้นในดัง 'I' หรือ R_I หาได้จาก

$$R_I = ka(H_{s_1} - H_1)f(W_1^*) \quad \text{--- (3.5)}$$

ในที่นี้ค่าของฟังก์ชัน $f(W_1^*)$ จะขึ้นอยู่กับว่าขณะนั้นอยู่ในช่วงเวลาใดของการอบแห้ง ถ้าเป็นช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ค่าของ $f(W_1^*) = 1$, ถ้าเป็นช่วงอัตราอบแห้งที่ความเร็วลดลง ค่าของ $f(W_1^*) = \frac{W_1 - W_E}{W_C - W_E}$ จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความชื้นอิสระในวัสดุชั้น และลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุชั้น เป็นต้น และถ้าเป็นช่วงที่ไม่มีการระเหย ค่าของ $f(W_1^*) = 0$ สรุปแล้ว

$$f(W_1^*) = \begin{cases} 1 & ; W_1 > W_C \\ \frac{W_1 - W_E}{W_C - W_E} & ; W_E < W_1 < W_C \\ 0 & ; W_1 < W_E \end{cases} \quad \text{--- (3.6)}$$

ส่วนค่าของ H_{s_1} นั้นสามารถหาค่าได้จากสหสัมพันธ์ ในภาคผนวก ก.2, ค่า k หาได้จากความสัมพันธ์ (Lewis relation) (43,46) ดังนี้

$$k = \frac{h}{C_H}$$

และค่า h หาได้จากสหสัมพันธ์ (43) ดังนี้

$$\left(\frac{h}{C_H}\right) = \begin{cases} 2.41 \left[\frac{dG}{\mu}\right]^{-0.51} & ; \left(\frac{dG}{\mu}\right) < 350 \\ 1.31 \left[\frac{dG}{\mu}\right]^{-0.41} & ; \left(\frac{dG}{\mu}\right) > 350 \end{cases} \quad \text{--- (3.7)}$$

อนึ่งค่าของ λ_0 และ λ_{s_1} นั้นคือความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ ที่อุณหภูมิ 0°C และที่อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุชั้น ซึ่งค่าของ λ_{s_1} นั้นสามารถหาได้จากการทดลอง หรือสมการผลการทดลองของวัสดุชั้น (22, 47-48) ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า λ_0 และ λ_{s_1} ของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิตั้งกล่าวเท่านั้น (47, 49-52) (ดูได้จากภาคผนวก ก) ส่วนค่าของ V_H (ปริมาตรจำเพาะของลมร้อนขึ้น) สามารถหาจาก สมการ

$$V_{H_1} = \frac{22.4 \cdot (273 + T_{A_1}) \cdot (18 + 29 \cdot H_1)}{273 \cdot 18 \cdot 29}$$

โดยที่ค่านึงว่า ลมร้อนเป็นกาซผสมในอุดมคติ ส่วนค่าคงที่อื่น ๆ ที่มีอยู่ในแบบจำลอง หาได้จาก (47-49) เงื่อนไขอื่น ๆ ที่ต้องการคือ เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปร $W_1(t=0)$, $H_1(t=0)$, $T_{s_1}(t=0)$ และ $T_{A_1}(t=0)$ ของทุกถัง และเงื่อนไขขอบเขต (ที่ปากทางเข้าของเครื่องอบแห้ง) ของ $T_{A_{in}}(t)$ และ $H_{in}(t)$ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ $T_{A_{in}}(t)$ คงที่ สมการคำนวณพลังงานที่ต้องใช้อุ่นอากาศ หาได้จากการทำดุลของ พลังงานรอบเครื่องผสมอากาศ และเครื่องอุ่นอากาศ ดังรูป 3.12

$$\begin{aligned} AG_{F_a} E_{F_a}(t) + Q(t) &= AG_{F_a} E_{A_{in}}(t) \\ Q(t) &= AG_{F_a} [E_{A_{in}}(t) - E_{F_a}(t)] \end{aligned}$$

เนื่องจากไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้งในกรณีนี้ เพราะฉะนั้นค่าของ และแทนค่าของเอนทัลปีของลมร้อน จะได้ว่า

$$Q(t) = AG_{F_a} \cdot [C_{p_A} + C_{p_V} H_{F_a}(t)] (T_{A_{in}} - T_{F_a}(t))$$

สำหรับสมการคำนวณความดันตก (pressure drop) ของชั้นวัสดุ สามารถหาได้จากสมการของ Ergun (43, 44, 46-48) คือ

$$\frac{(-\Delta P_0) g_c \epsilon^3 d_p^3 \left(\frac{1}{V_H}\right)}{L(1-\epsilon)G^2} = \frac{150 \cdot (1-\epsilon)}{(d_p G/\mu)} + 1.75 \quad \dots (3.10)$$

อนึ่งค่าของ λ_0 และ λ_{s_1} นั้นคือความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ ที่อุณหภูมิ 0 °ซ และที่อุณหภูมิผิวหน้าของวัสดุชั้น ซึ่งค่าของ λ_{s_1} นั้นสามารถหาได้จาก การทดลอง หรือสมการผลการทดลอง ของวัสดุชั้น (22,47-48) ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า λ_0 และ λ_{s_1} ของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น (47,49-52) (ดูได้จากภาคผนวก ก) ส่วนค่าของ V_H (ปริมาตรจำเพาะของลมร้อนขึ้น) สามารถหาจาก สมการ

$$V_{H_1} = \frac{22.4 \cdot (273 + T_{A_1}) \cdot (18 + 29 \cdot H_1)}{273 \cdot 18 \cdot 29}$$

โดยที่ค่านึงว่า ลมร้อนเป็นก๊าซผสมในอุดมคติ ส่วนค่าคงที่อื่น ๆ ที่มีอยู่ในแบบจำลอง หาได้จาก (47-49) เงื่อนไขอื่น ๆ ที่ต้องการคือ เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปร $W_1(t=0)$, $H_1(t=0)$, $T_{s_1}(t=0)$ และ $T_{A_1}(t=0)$ ของทุกถัง และเงื่อนไขขอบเขต (ที่ปากทางเข้าของเครื่องอบแห้ง) ของ $T_{A_{in}}(t)$ และ $H_{in}(t)$ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้ $T_{A_{in}}(t)$ คงที่ สมการคำนวณพลังงานที่ต้องใช้อุ่นอากาศ หาได้จากการทำคูลของ พลังงานรอบเครื่องผสมอากาศ และเครื่องอุ่นอากาศ ดังรูป 3.12

$$\begin{aligned} AG_{F_2} E_{F_2}(t) + Q(t) &= AG_{F_2} E_{A_{in}}(t) \\ Q(t) &= AG_{F_2} [E_{A_{in}}(t) - E_{F_2}(t)] \end{aligned}$$

เนื่องจากไม่มีการหมุนเวียนลมทิ้งในกรณีนี้ เพราะฉะนั้นค่าของ และแทนค่าของ เอนทัลปีของลมร้อน จะได้ว่า

$$Q(t) = AG_{F_2} \cdot (C_{P_A} + C_{P_V} H_{F_2}(t)) (T_{A_{in}} - T_{F_2}(t))$$

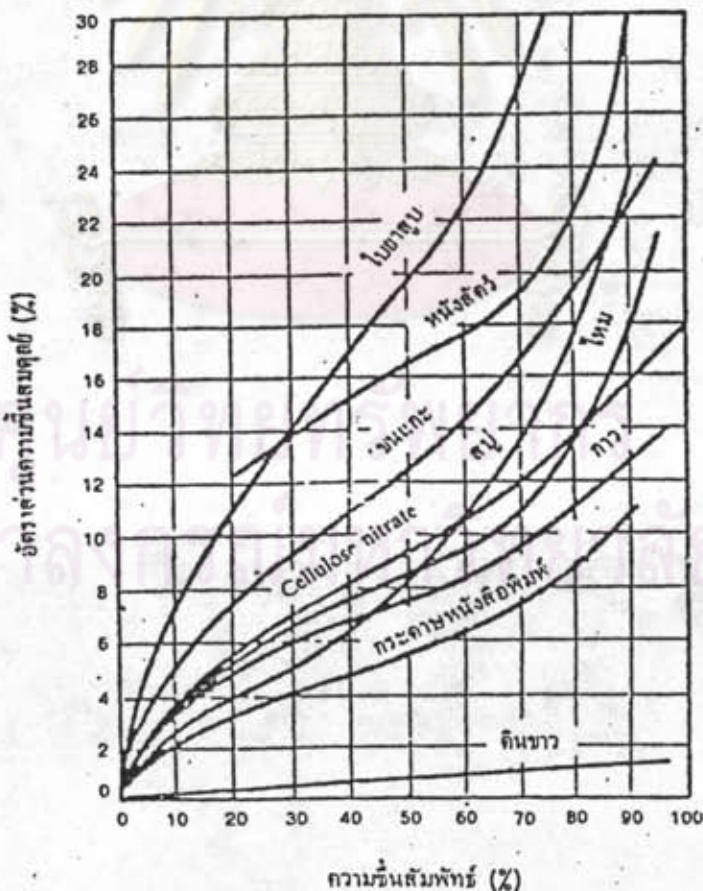
สำหรับสมการคำนวณความดันตก (pressure drop) ของชั้นวัสดุ สามารถหาได้จากสมการของ Ergun (43,44,46-48) คือ

$$\frac{(-\Delta P_v) g_c \epsilon^3 d^5 \left(\frac{1}{V_H}\right)}{L(1-\epsilon) G^2} = \frac{150 \cdot (1-\epsilon)}{(d_p G/\mu)} + 1.75 \quad \text{--- (3.10)}$$

ความชื้นวิกฤต w_c และ ความชื้นสมดุล w_e
 ค่าของ w_c และ w_e ของวัสดุชั้นบางชนิด อาจหาได้จากการทดลอง
 (42-44, 46-49) (ดูรูป 3.13) หรือหาจากสมการผลการทดลอง (47, 48) เช่น สมการของ
 Langmuir, สมการ BET, สมการของ Henderson, สมการของ Luikov, สมการของ
 Pfoest และคณะ, สมการของ Paulsen & Thompson เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้
 เฉพาะสมการของ Pfoest และคณะ (48) ซึ่งดัดแปลงมาจากสมการของ Henderson ในการ
 คำนวณความชื้นสมดุลของเมล็ดข้าวโพด (shelled corn)

$$1 - \phi = \exp[-c \cdot (T_A + k) \cdot (100 \cdot w_e)^n] \quad \text{--- (3.8)}$$

ในที่นี้ ϕ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (สัดส่วน) , ค่าของ c, k, n ได้มา
 จากการทดลองกับข้าวโพด ดังนี้ $c = 8.64 \times 10^{-5}$, $n = 1.8634$ และ $k = 49.81$



รูป 3.13 แสดงความชื้นสมดุลสำหรับวัสดุชั้นบางประเภท (อุณหภูมิ 25 °ซ)

สมการคำนวณความดันลอคคร่อมแผ่นรูพรุน (perforate plate) - หาได้จากสมการของ Henderson (47,48) ซึ่งใช้ทำนายความดันลอคของอากาศ เมื่อไหลผ่านแผ่นเหล็กเจาะรูพรุน ที่ถูกหับด้วยชั้นของเมลต์พีซี ดังกล่าวได้จากการทดลอง

$$-\Delta P_p = 2979 \times 10^{-7} \left(\frac{Q_0}{\epsilon_0} \right)^2 \quad \text{--- (3.11)}$$

ในที่นี้ Q_0 คือ ปริมาณของลมร้อนที่ไหลผ่านเบค, ϵ_0 คือพื้นที่ที่เป็นรู (เศษส่วน)

การคำนวณหาความดันลอคของ เบค และ ของแผ่นรูพรุน จะนำไปคำนวณหา กำลังของเครื่องเป่าลม และ พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้เดินเครื่อง ซึ่งการวิเคราะห์ จะทำในบทต่อไปสรุปแล้ว แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านในกรณีการอบแห้งธรรมชาติ จะประกอบด้วยสมการ (3.1) - (3.11)

3.3.2 กรณีที่มีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งส่วนหนึ่งกลับมาใช้อีก ($\tau = 0$)

วิธีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งบางส่วนกลับมาใช้อีก นั้นนับว่าเป็นวิธีประหยัดพลังงานในการอบแห้งที่นิยมใช้กันวิธีหนึ่ง ในกรณีที่ลมร้อนที่ปล่อยทิ้งออกจากเครื่องอบแห้งยังมีอุณหภูมิสูงอยู่และมีความชื้นต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว ลมร้อนนั้นยังคงมีศักยภาพในการอบแห้งเหลืออยู่ ซึ่งถ้าปล่อยทิ้งไปก็เป็นการสูญเสียอย่างน่าเสียดาย แต่การหมุนเวียนลมทั้งกลับมาใช้จะทำให้อัตราการอบแห้งช้าลง และ เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น การประหยัดพลังงานด้วยวิธีนี้จึงต้อง เลือกปริมาณของลมทั้งที่หมุนเวียนกลับมาใช้อีกอย่างเหมาะสม

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษากรณีที่อัตราการหมุนเวียนลมร้อน มีค่าคงที่ตามเวลา และมีนิยามเป็น

$$\tau = \frac{G_2}{G_{F_0}} \quad \text{--- (3.12)}$$

โดยที่ G_2 คือ ปริมาณอากาศแห้งที่หมุนเวียนกลับมาใช้อีก

ถ้ากำหนดให้ปริมาณอากาศแห้งที่ไหลผ่านชั้นวัสดุมีค่าคงที่ตลอดเวลา ในกรณีที่ปริมาณของอากาศแห้งของลมร้อนจะ เท่ากับ

$$G_{F_0} = \begin{cases} G_{F_0} & ; \quad t = 0 \\ \left(\frac{1}{1+\tau} \right) G_{F_0} & ; \quad t > 0 \end{cases} \quad \text{--- (3.13)}$$

สมการอุณหพลศาสตร์ และพลังงานความร้อนของลมร้อนขึ้น จะเปลี่ยนเป็น

$$\left(\frac{1}{V_{H_1}}\right) \epsilon \frac{d}{dt} H_1 = \left(\frac{N}{L}\right) G_{F_{R_0}} (H_{j-1} - H_j) + R_j \quad \text{--- (3.14)}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{V_{H_1}}\right) \epsilon (C_{P_A} + C_{P_V} H_1) \frac{d}{dt} T_{A_1} &= \left(\frac{N}{L}\right) G_{F_{R_0}} [C_{P_A} + C_{P_V} H_{j-1}] (T_{A_{j-1}} - T_{A_1}) \\ &\quad - ha(T_{A_1} - T_{S_1}) - R_1 C_{P_V} (T_{A_1} - T_{S_1}) \quad \text{--- (3.15)} \end{aligned}$$

ส่วนสมการอุณหพลศาสตร์และพลังงานความร้อนของวัสดุขึ้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง (เหมือนกับกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนลมทั้ง)

เงื่อนไขขอบเขตของความชื้นของลมร้อนที่ปากทางเข้าเครื่องอบแห้ง จะหาได้จากการทำอุณหพลศาสตร์รอบเครื่องผสมอากาศ ดังนี้

$$AG_{F_{R_0}} H_{in}(t) = AG_{F_R}(t) H_{F_R}(t) + AG_K H_N(t)$$

เมื่อแทนค่าของ $G_{F_R}(t)$ ลงไป สมการข้างต้นจะกลายเป็น

$$H_{in}(t) = \left(\frac{1}{1+\Gamma}\right) H_{F_R}(t) + \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right) H_N(t) \quad \text{--- (3.16)}$$

อนึ่ง $T_{A_{in}}$ จะถูกกำหนดให้คงที่ตามต้องการ

ส่วนพลังงานที่ต้องใช้อุ่นลมร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการจะหาได้จาก การทำอุณหพลศาสตร์รอบเครื่องผสมอากาศและ เครื่องอุ่นอากาศ

$$AG_{F_R}(t) E_{F_R}(t) + Q(t) + AG_K H_N(t) = AG_{F_{R_0}} E_{A_{in}}(t)$$

$$Q(t) = AG_{F_{R_0}} E_{A_{in}}(t) - AG_{F_R}(t) E_{F_R}(t) - AG_K H_N(t)$$

เมื่อแทนค่า (3.16) และ (a) ลงในสมการข้างบนจะได้

$$\begin{aligned} Q(t) &= AG_{F_{R_0}} [(C_{P_A} + C_{P_V} H_{in}(t)) T_{A_{in}} + \lambda_0 H_{in}(t) - \left(\frac{1}{1+\Gamma}\right) [(C_{P_A} + C_{P_V} H_{F_R}(t)) T_{F_R}(t) + \lambda_0 H_{F_R}(t)] \\ &\quad - \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right) [(C_{P_A} + C_{P_V} H_N(t)) T_{A_N}(t) + \lambda_0 H_N(t)]] \end{aligned}$$

$$Q(t) = AG_{F_{a_0}} [(C_{p_A} + C_{p_V} H_{in}(t)) T_{A_{in}} - \left(\frac{1}{1+\Gamma}\right) (C_{p_A} + C_{p_V} H_{Fa}(t)) T_{Fa}(t) - \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma}\right) (C_{p_A} + C_{p_V} H_{N}(t)) T_{A_N}(t)] \quad \text{..... (3.17)}$$

ส่วนสมการอื่นๆของระบบจะคงเหมือนเดิม

สรุปแล้ว แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบไหลผ่าน ในกรณีที่มีการหมุนเวียนลมร้อนทั้งบางส่วนกลับมาใช้อีก จะประกอบด้วยสมการ (3.1), (3.4), (3.14), (3.15), (3.5)-(3.8), (3.10), (3.11), (3.16) และ (3.17) และเมื่อกำหนดให้ค่าของ $r = 0$ แบบจำลองในหัวข้อนี้ จะเปลี่ยนรูปไปเหมือนกับแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีลมร้อนทั้งในหัวข้อ 3.3.1

3.3.3 กรณีที่มีการผสมวัสดุขึ้นในเบคเป็นครั้งคราว

ในการอบแห้งชั้นวัสดุหนาแบบไหลผ่านนั้น ปัญหาสำคัญปัญหาหนึ่งที่มีมักจะประสบอยู่เสมอคือ เมื่อเวลาผ่านไปที่บริเวณทางเข้าของลมร้อนนั้น วัสดุมักจะแห้งมากเกินไปเกินความต้องการ (overdried) จนบางครั้งผลิตภัณฑ์อาจเสื่อมคุณภาพได้ ส่วนที่ปลายทางออกของเครื่องอบแห้ง วัสดุจะชื้นมากกว่า จะทำให้ผลิตภัณฑ์แต่ละส่วนมีความชื้นไม่สม่ำเสมอ วิธีหนึ่งที่ใช้บรรเทาปัญหานี้ได้ก็คือ การผสมวัสดุภายในเบคเป็นครั้งคราว เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีการกระจายของความชื้นสม่ำเสมอขึ้น และยังทำให้อัตราการอบแห้งเฉลี่ยของทั้งชั้นเพิ่มขึ้น อันทำให้เวลาในการอบแห้งลดลง และเพิ่มผลผลิตได้ อนึ่งในการเลือกระยะเวลาที่เหมาะสมที่จะผสมวัสดุขึ้นในเบคนั้นควรจะเป็นช่วงเวลาที่น่าไปหารเวลาอบแห้งกรณีการอบแห้งธรรมดาได้ค่าลงตัว หรือเกือบลงตัวพอดี (2, 40)

การผสมวัสดุขึ้นในเบคเป็นครั้งคราว ไม่ทำให้สมการต่างๆของแบบจำลองในหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ที่บรรยายพฤติกรรมต่างๆเปลี่ยนไปเลย เว้นแต่ว่าในทันทีที่ผสมวัสดุขึ้นในเบค เงื่อนไขเริ่มต้นใหม่หลังการผสมวัสดุในเบค (ถ้าถือว่าเป็นการผสมอย่างสมบูรณ์) จะเปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} W_I &= W_{ave} \quad (\text{ก่อนการผสม}) \\ H_I &= H_I(t = 0) \\ T_{S_I} &= T_{S_I} \quad (\text{ก่อนการผสม}) \\ T_{A_I} &= T_{A_I}(t = 0) \end{aligned}$$

เท่านั้น

3.4 อัลกอริทึมและผังการคำนวณ (Algorithm & Flowchart)

3.4.1 อัลกอริทึมของโปรแกรมชิมูเลชัน

3.4.1.1 ก่อนอื่นบ่อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่โปรแกรมต้องการ คือ ความสูงของเบค, พื้นที่หน้าตัดของเบค, พื้นที่ผิวจำเพาะเชิงปริมาตร (effective area), ความหนาแน่นปรากฏของวัสดุแห้ง, อัตราส่วนช่องว่าง, เส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่าของวัสดุ (equivalent diameter), ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง, ของน้ำ, ของอากาศแห้ง และของไอน้ำ, ความชื้นวิกฤต, ความชื้นสมมูลของวัสดุ (มาตรฐานแห้ง), ความเร็วของลมร้อน, ความชื้นของลมร้อน, อุณหภูมิของอากาศใหม่ (fresh air), อัตราการหมุนเวียนกลับ, จำนวนดั่งที่ใช้ชิมูเลต, ความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์, เวลาที่ชิมูเลตนานที่สุด (เพื่อป้องกันมิให้โปรแกรมชิมูเลตนานไม่มีที่สิ้นสุด ถ้าเกิดมีการผิดพลาดขึ้น), ช่วงเวลาที่พิมพ์ผลลัพธ์ทุกๆกันาที, เวลาที่จะผสมวัสดุภายในเบค

3.4.1.2 คำนวณปริมาตรของวัสดุขึ้นในเบค, มวลของวัสดุขึ้น, อัตราการไหลของอากาศใหม่ (fresh air) ที่บ่อนที่เวลาใดๆ

3.4.1.3 พิมพ์ค่าพารามิเตอร์ที่บ่อนเข้าไป ปริมาตรของวัสดุขึ้น มวลของวัสดุขึ้น อัตราการไหลของอากาศใหม่

3.4.1.4 กำหนดเวลาเริ่มต้น และบ่อนเงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ คือ ความชื้นของวัสดุขึ้นและของอากาศ, อุณหภูมิของวัสดุขึ้นและอากาศ ที่ตำแหน่งต่างๆ, อุณหภูมิของอากาศที่ปากทางเข้าเครื่องอบแห้ง

3.4.1.5 คำนวณความชื้นเฉลี่ย และอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุขึ้นเฉลี่ยในถัง เบค

3.4.1.6 ทดสอบว่าเวลาขณะนี้เท่ากับเวลาเริ่มต้น หรือเท่ากับเวลาที่พิมพ์

ผลลัพธ์ หรือยัง

ถ้าถึงแล้ว ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.7

ถ้าไม่ถึงแล้ว ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.8

3.4.1.7 พิมพ์ค่าตัวแปรของความชื้นในวัสดุขึ้นและของอากาศ, อุณหภูมิของวัสดุขึ้นและของอากาศ ที่ตำแหน่งต่างๆ, พลังงานในการอุ่นลมร้อน, ความชื้นของวัสดุเฉลี่ยในเบค, อุณหภูมิของวัสดุขึ้นเฉลี่ย, พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออกจากวัสดุขึ้น, อัตราการระเหยน้ำเฉลี่ยของเบค, ประสิทธิภาพของการอบแห้ง

3.4.1.8 ทดสอบว่าถึงเวลาผสมวัสดุขึ้นในเบคแล้ว หรือยัง

ถ้าถึงแล้ว ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.9

ถ้ายังไม่ถึงแล้ว ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.10

3.4.1.9 ทิมพ์บอกว่าถึงเวลาผสมวัสดุขึ้นในเบคแล้ว กำหนดค่าของตัวแปรต่างๆ หลังการผสม คือ ความชื้นของวัสดุขึ้นและอุณหภูมิของวัสดุขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าเท่ากับ ค่าเฉลี่ยก่อนการผสม, ความชื้นของอากาศและอุณหภูมิของอากาศขึ้นให้เท่ากับเงื่อนไขที่เริ่มต้นซีมูลเต

3.4.1.10 ทดสอบว่าความชื้นของวัสดุขึ้นที่ปลายทางออก มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ ความชื้นสุดท้ายที่ต้องการ หรือ เวลาขณะนี้ น้อยกว่า เวลานานที่สุด หรือยัง

ถ้าเป็นจริง ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.11

ถ้าเป็นเท็จ ให้ไปทำตามข้อ 3.4.1.13

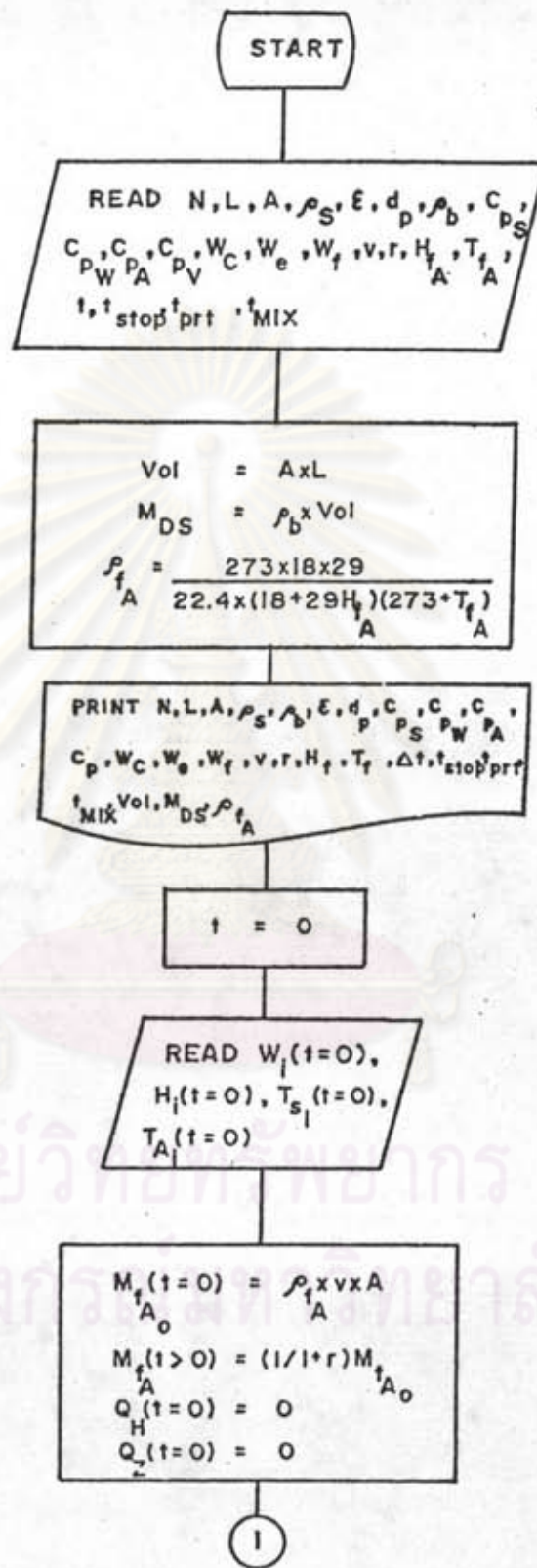
3.4.1.11 เพิ่มเวลาขึ้นอีก 1 ช่วงเวลา (step) แล้วเรียกสับรูทีน RUNGKT มาคำนวณค่าความชื้น, อุณหภูมิของวัสดุขึ้นและของอากาศ, หลังงานในการอุ่นอากาศและประสิทธิภาพของการอบแห้ง ของแบบจำลองจากสมการสมดุลมวลสารและพลังงาน ในสมการ (3.1)-(3.4) หรือ (3.1), (3.3), (3.4) และ (3.15) โดยต้องอาศัยสับรูทีน RCZHS, PSHS สำหรับคำนวณอัตราการระเหยของความชื้นที่ตังโค และสับรูทีน LHVP สำหรับคำนวณความร้อนแฝงของการระเหยของความชื้นที่ตังโค ด้วย

3.4.1.12 เปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตของความชื้น และอุณหภูมิของอากาศขึ้นที่ปากทางเข้าเครื่องอบแห้ง แล้วกลับไปทำข้อ 3.4.1.6

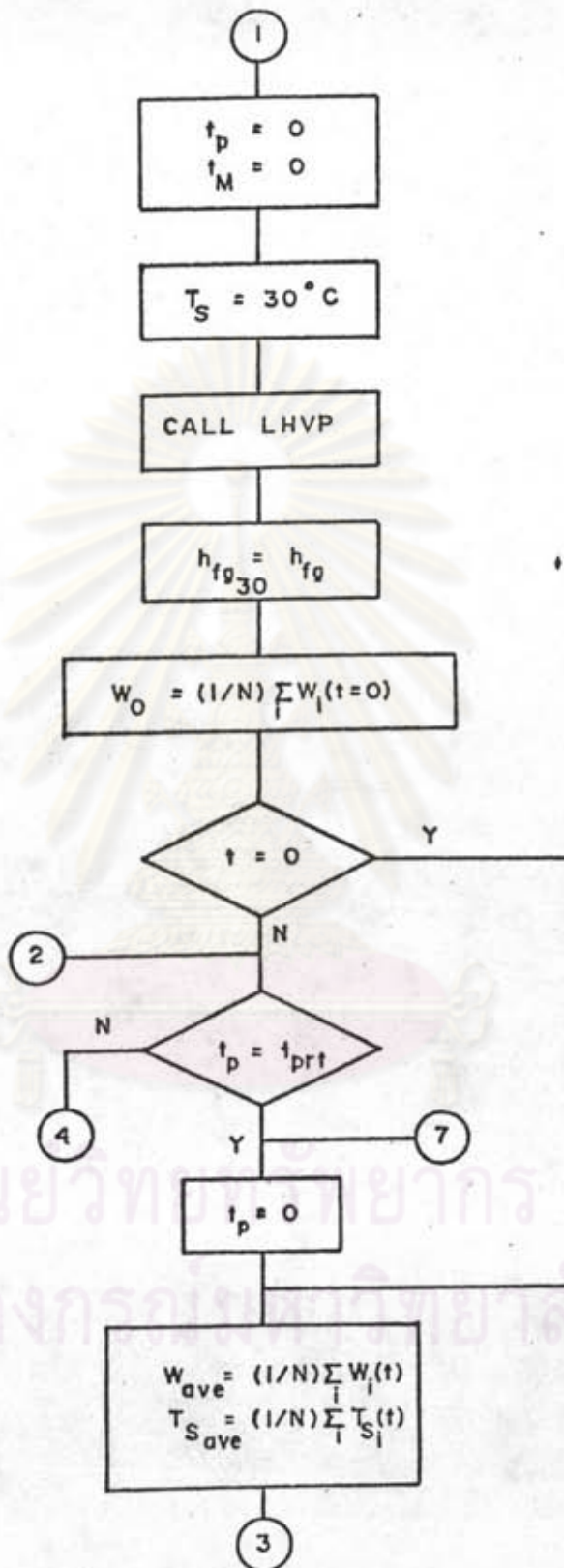
3.4.1.13 คำนวณความชื้นเฉลี่ย และอุณหภูมิของวัสดุเฉลี่ย แล้วทิมพ์ค่าความชื้นและอุณหภูมิ ของวัสดุขึ้นและของลมร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ, หลังงานที่ใช้ในการอุ่นอากาศทั้งหมด, เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง, พลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำจากวัสดุ, ประสิทธิภาพของการอบแห้ง, แล้วจบการซีมูลเตโปรแกรม

3.4.2 ผังการคำนวณของโปรแกรมซีมูลเตชัน

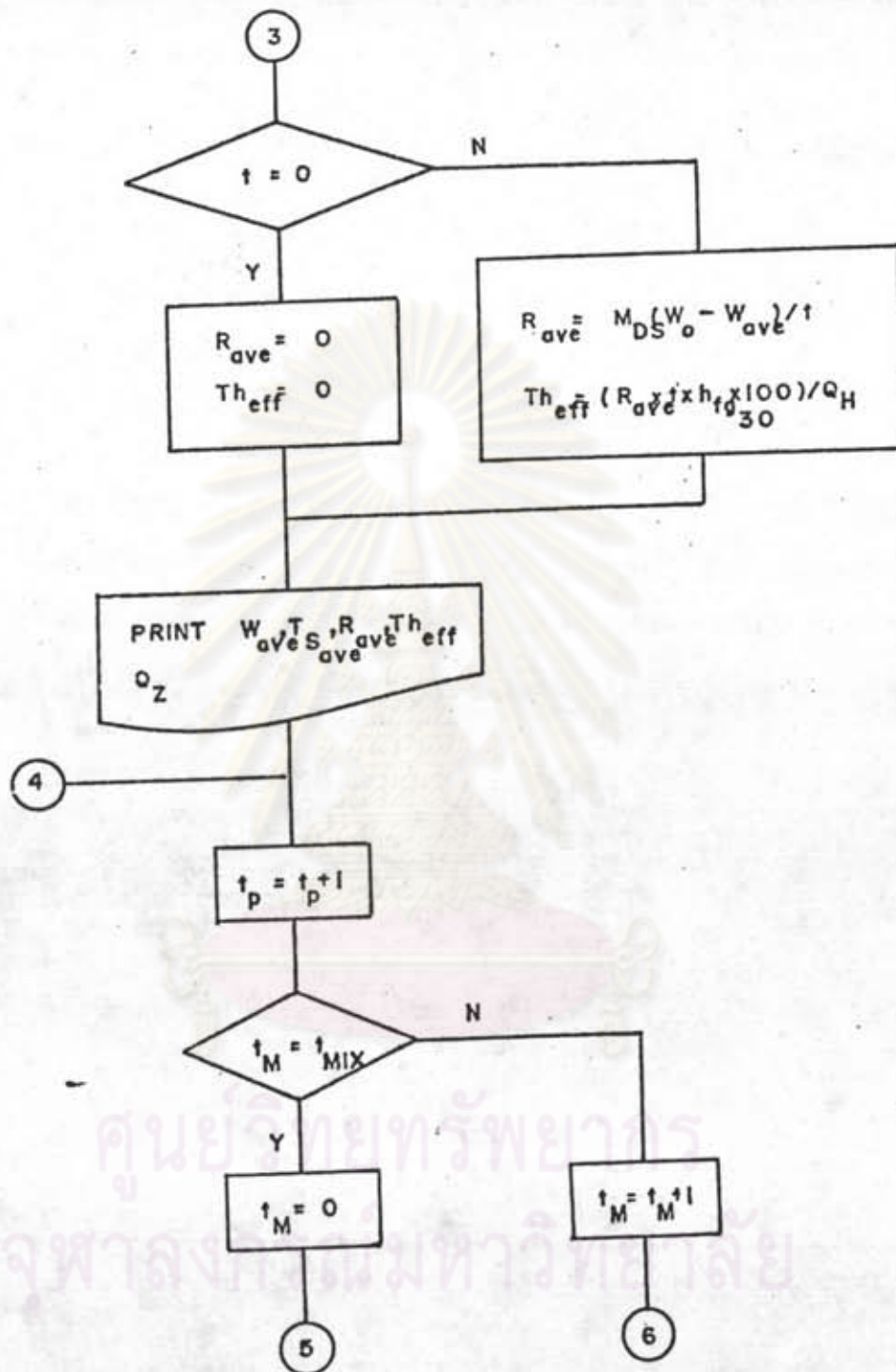
ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



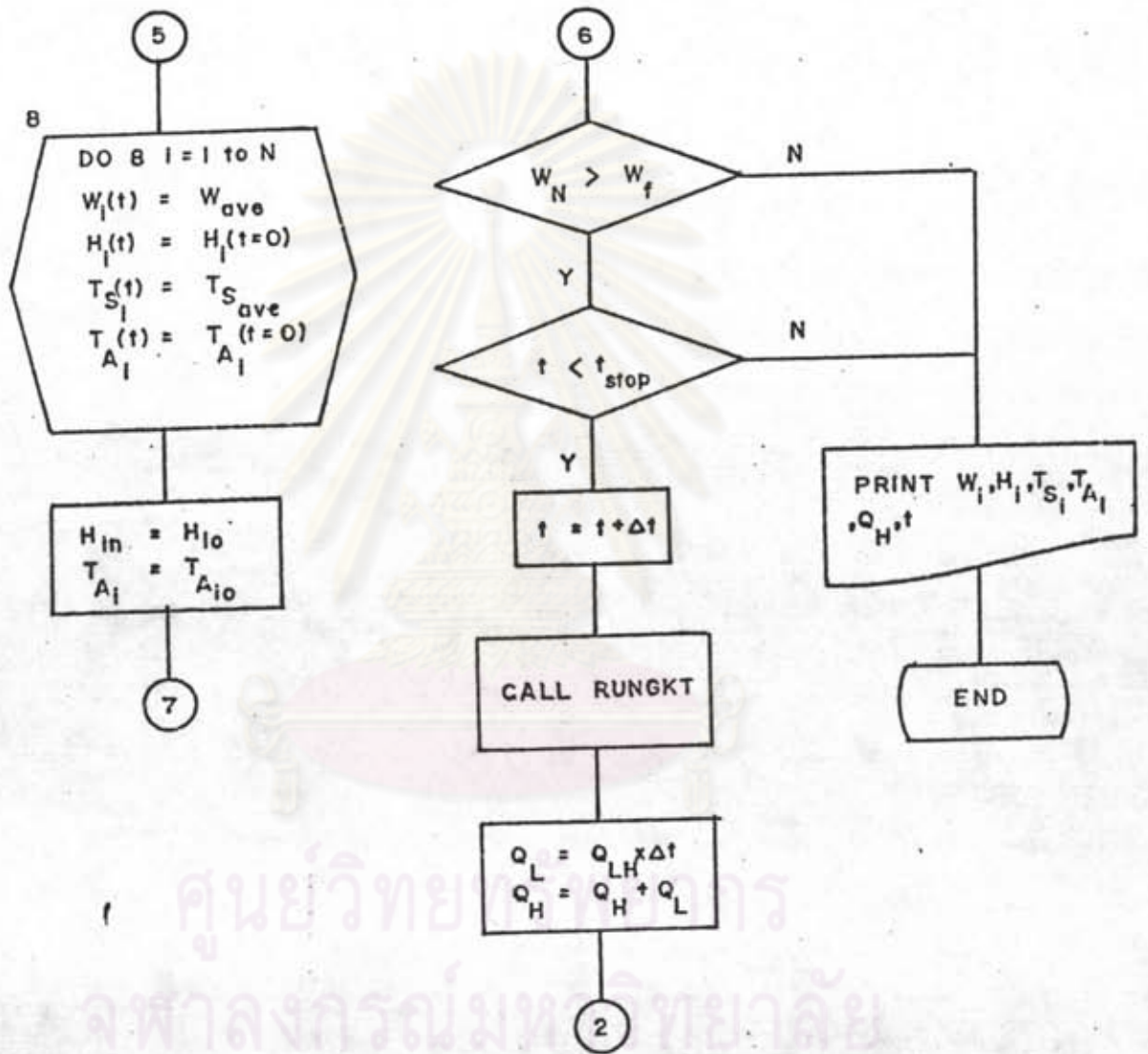
รูป 3.14 ผังการคำนวณของโปรแกรมหลัก



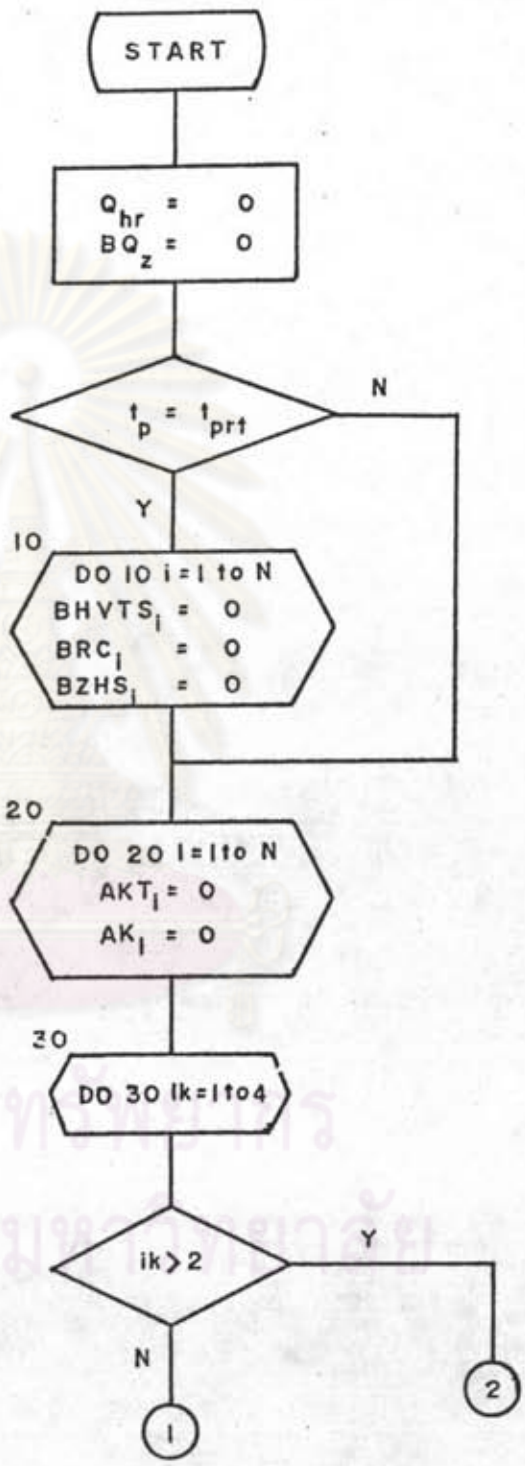
รูป 3.14 (ต่อ)



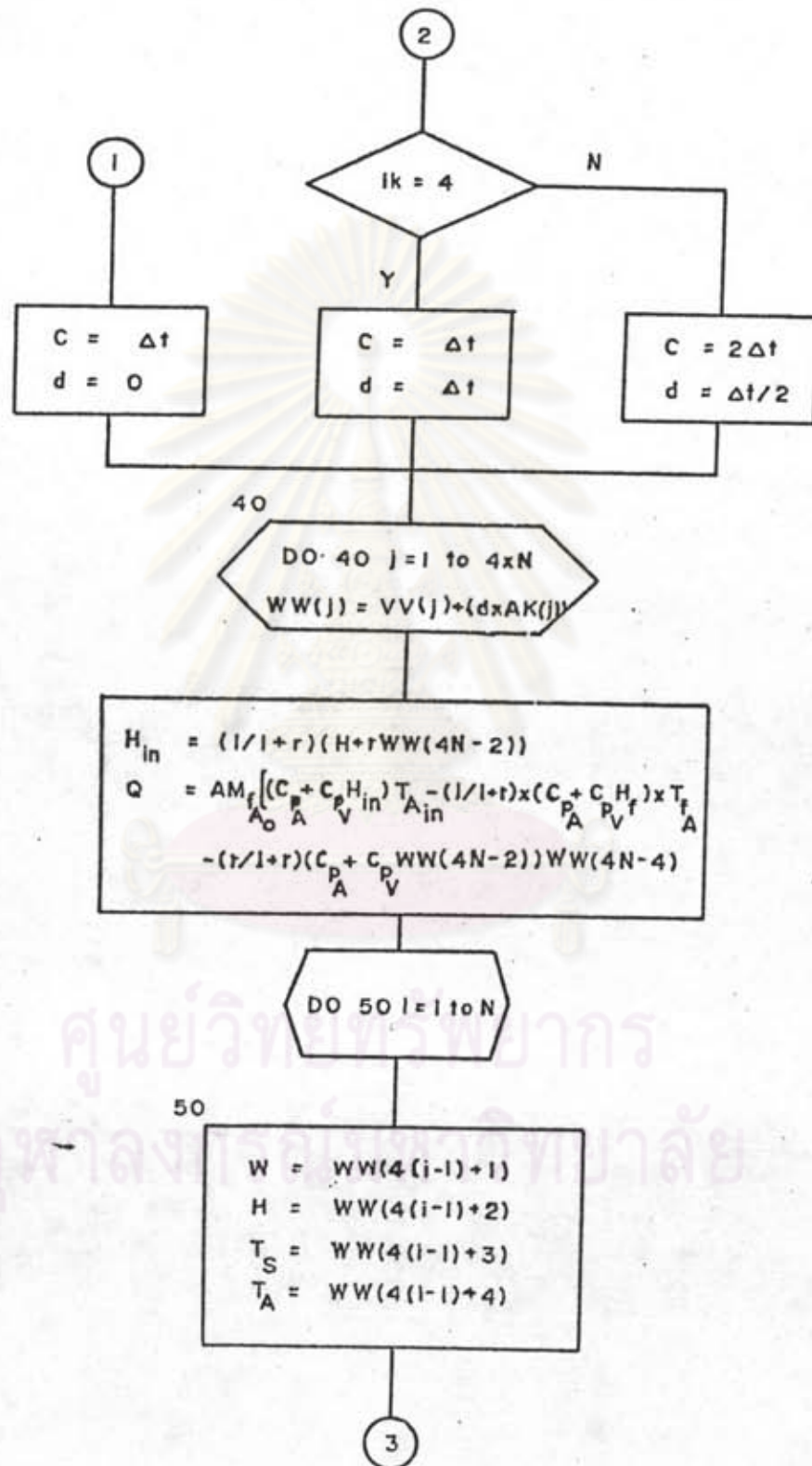
รูป 3.14 (ต่อ)



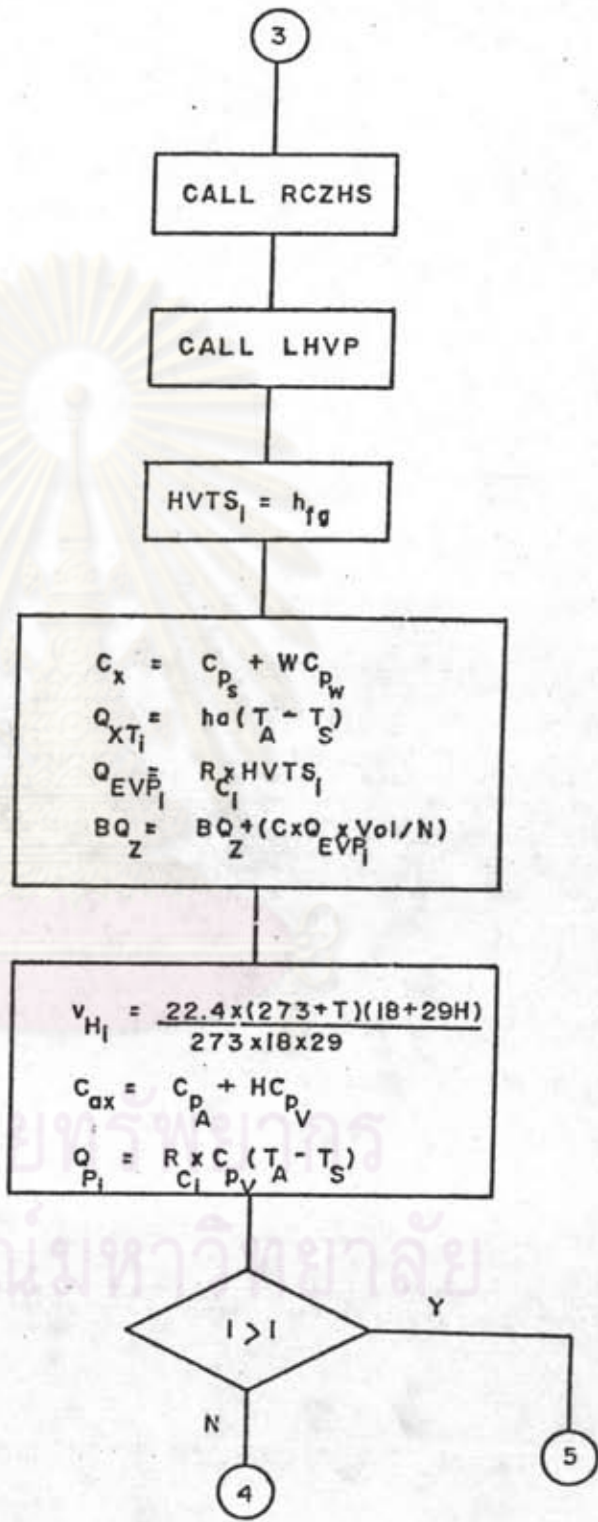
รูป 3.14 (ต่อ)



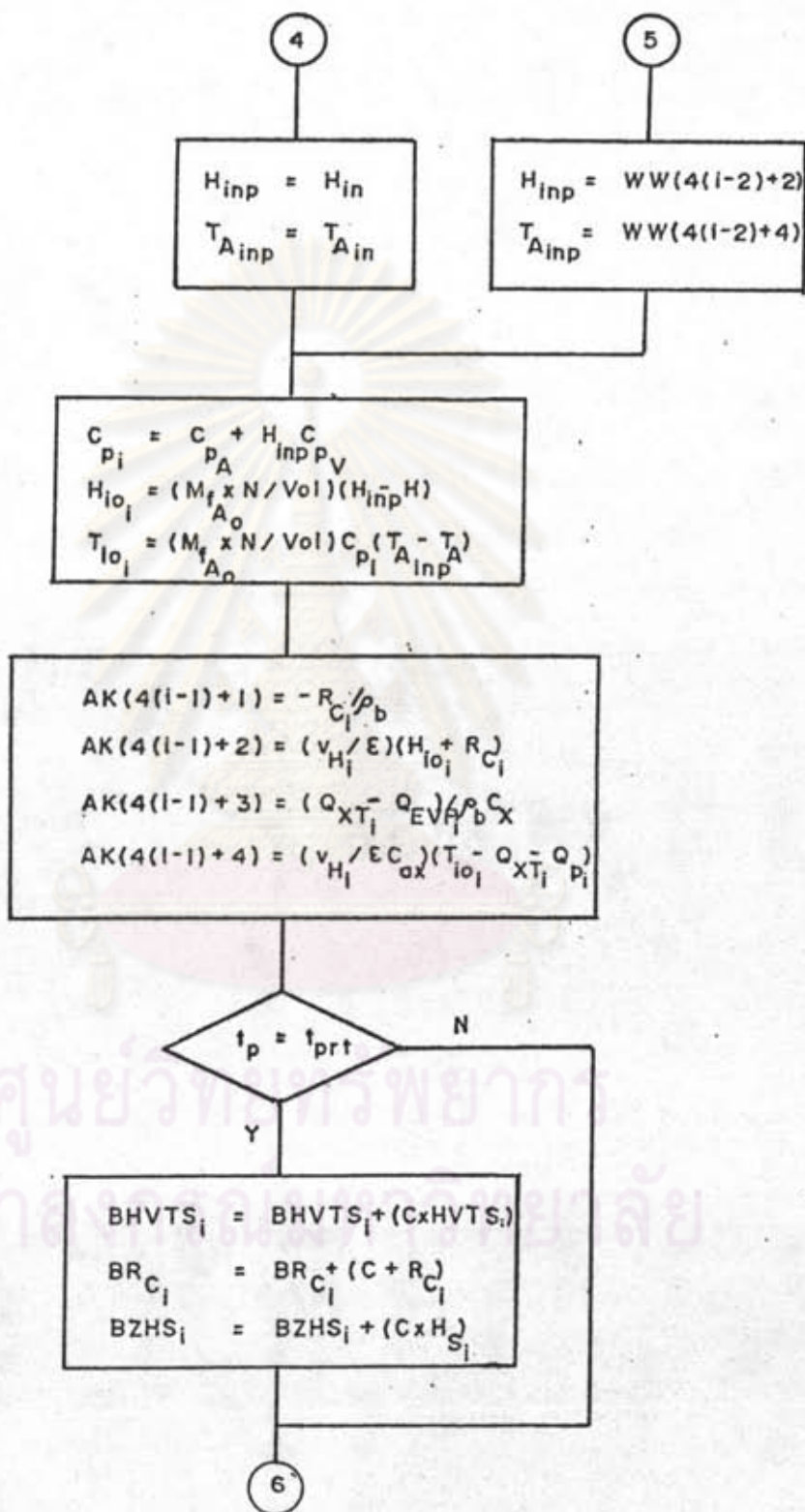
รูป 3.15 ผังการคำนวณของสับรูกี่ RUNGKT



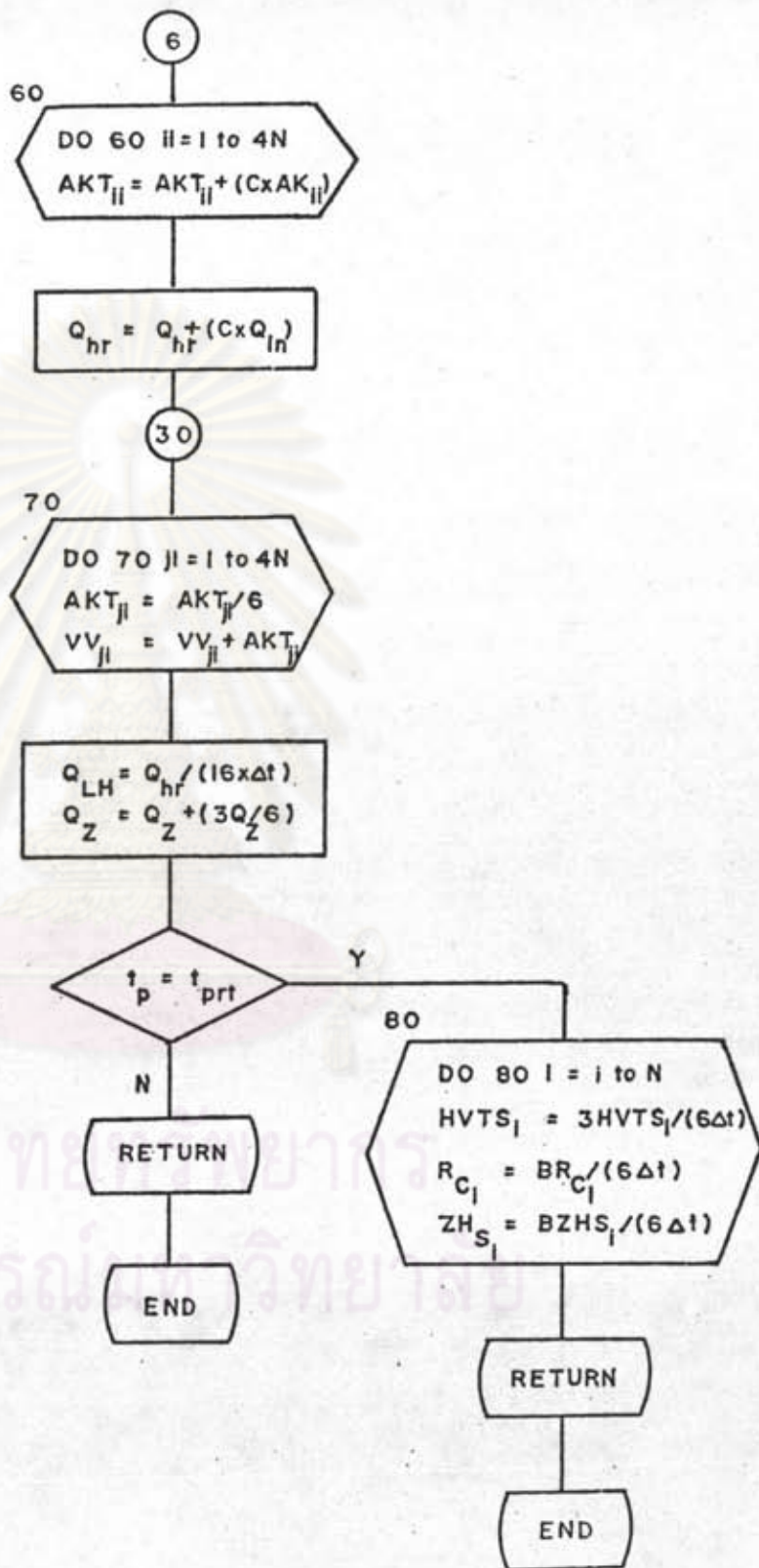
รูป 3.15 (ต่อ)



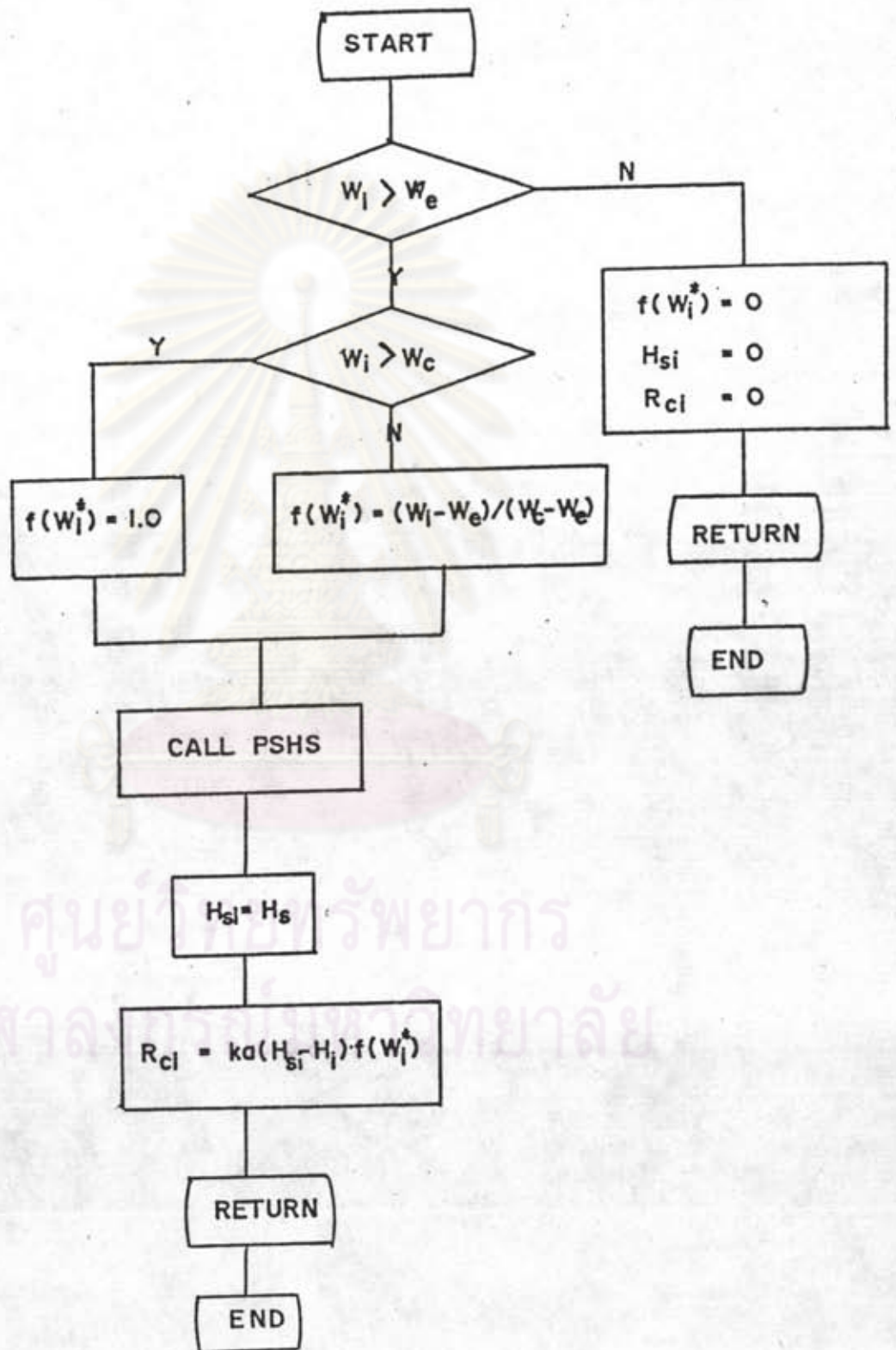
รูป 3.15 (ต่อ)



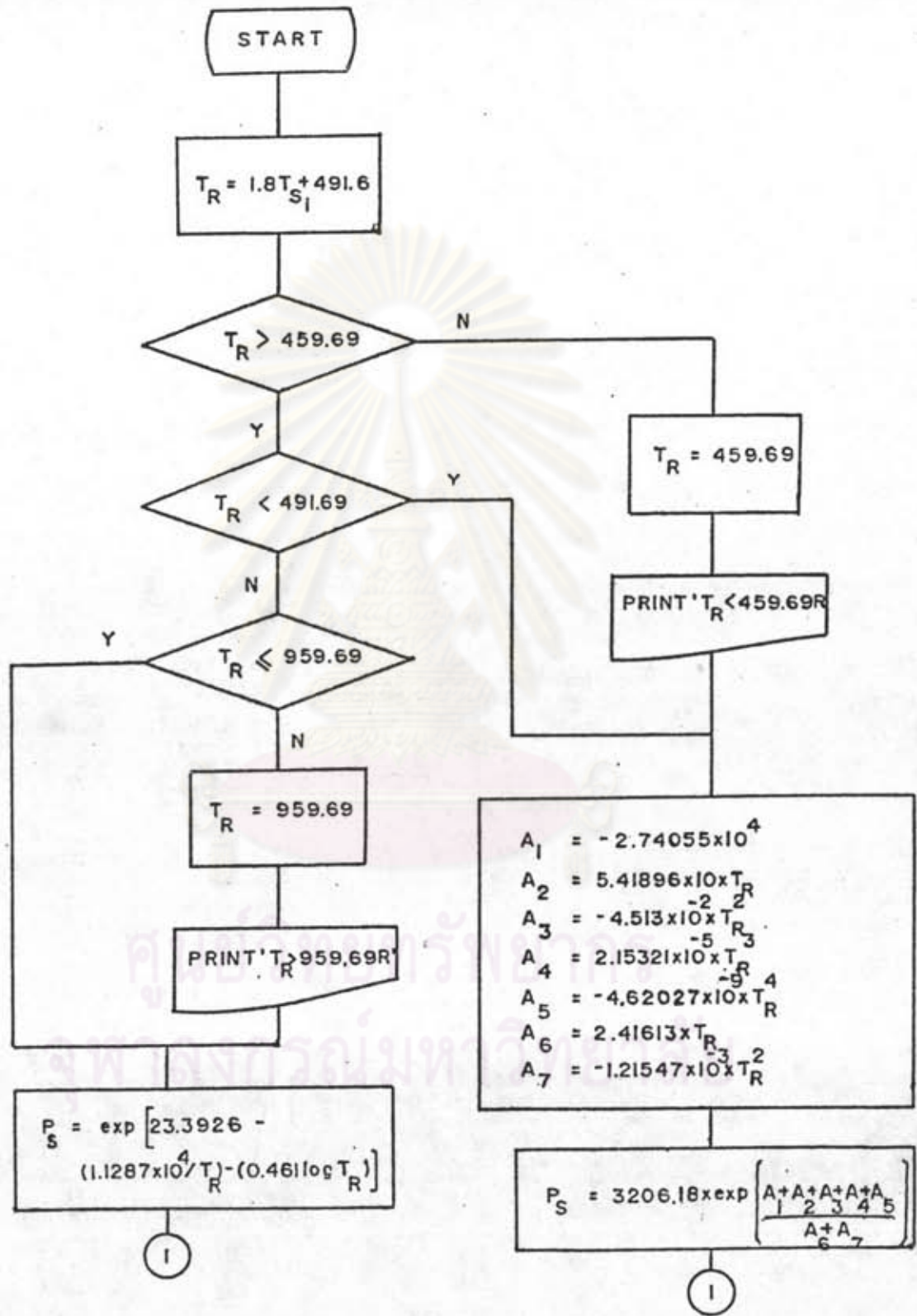
รูป 3.15 (ต่อ)



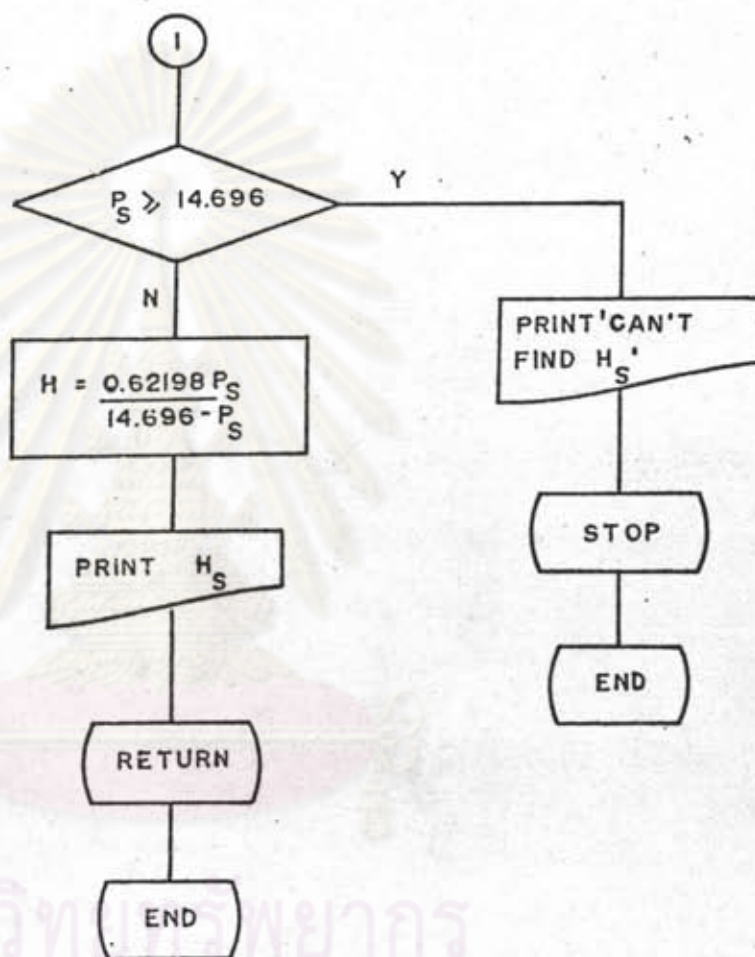
รูป 3.15 (ต่อ)



รูป 3.16 ผังการคำนวณของสับรูดหิน RCZHS

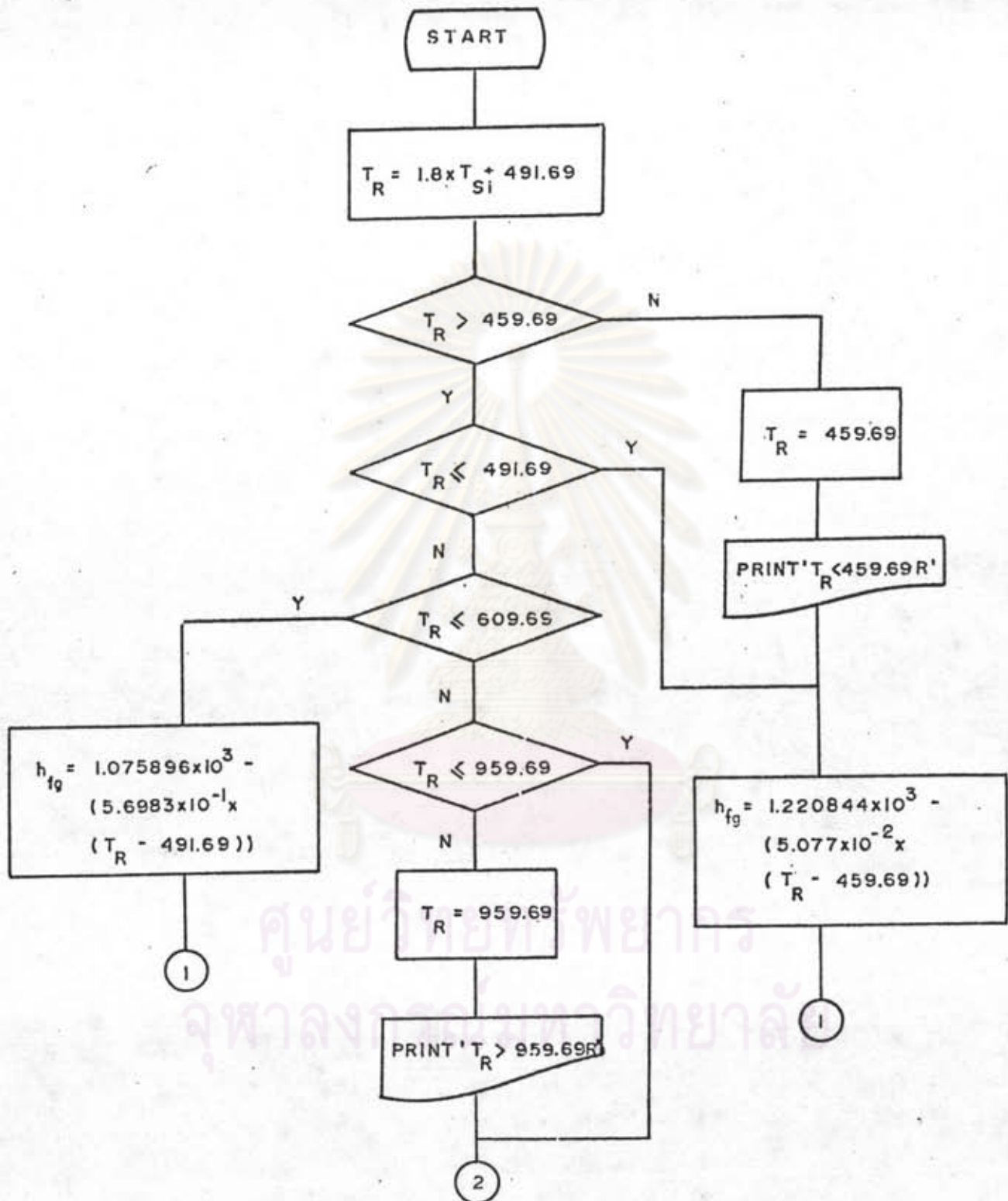


รูป 3.17 ผังการคำนวณของสับรู่ทึน PSHS

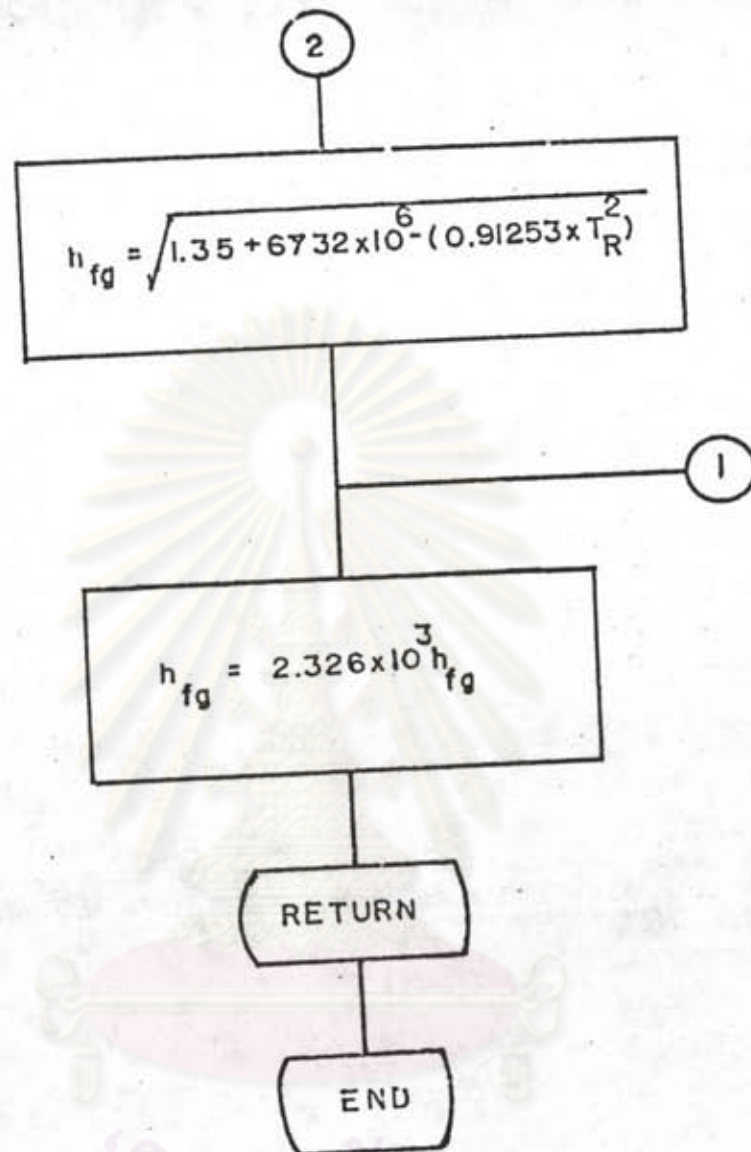


ศูนย์วิจัยเภสัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 3.17 (ต่อ)



รูป 3.18 ฟังก์ชันคำนวณของตัวรูดน้ำ LHPV



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 3.18 (ต่อ)