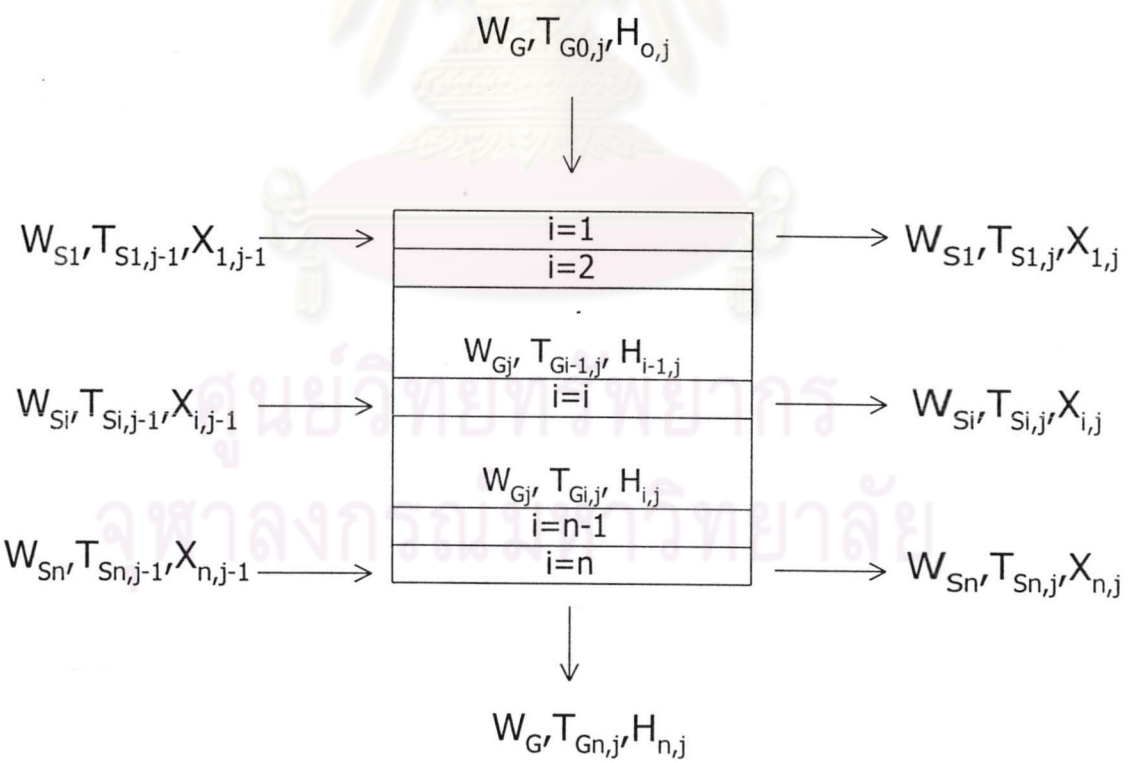
บทที่ 7

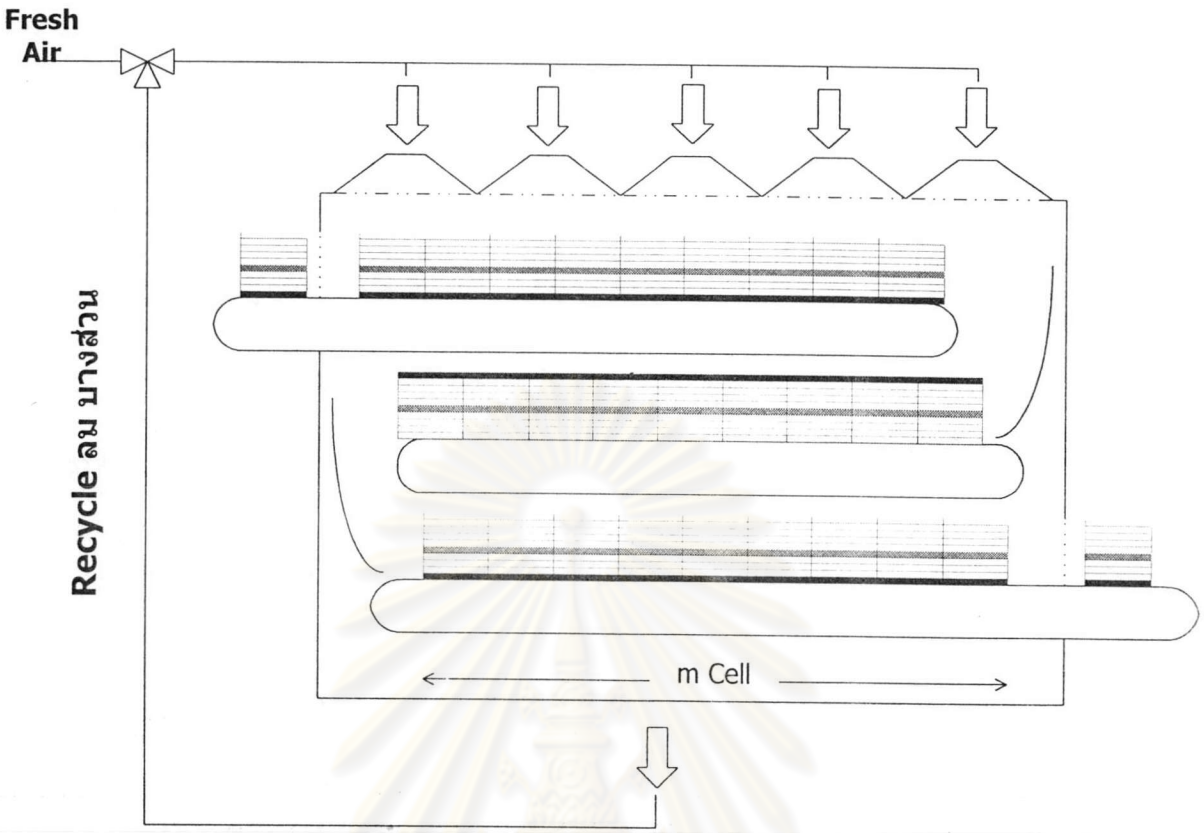
โปรแกรมประเมินขนาดของเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่อง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคัดเลือกเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องสำหรับอบแห้งของขบเคี้ยวสำหรับสุนัขทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลตั้งฉาก และเครื่องอบแห้งอุโมงค์แบบไหลขนาน ตามหลักการคัดเลือกเครื่องอบแห้งที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3.1 เพื่อมาประเมินหาขนาด โครงสร้าง และค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมต่อไป ในการประเมินหาขนาดนั้นจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแต่ละแบบและทำการจำลองกระบวนการ (Simulation) หาขนาดที่เหมาะสม จากนั้นจะทำการประเมินโครงสร้างของเครื่องอบแห้งและค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมในบทต่อๆไป

7.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง



รูปที่ 7.1 เซลล์เครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียงแทนด้วยถังกวน (i) n ถังต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 7.2 เครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง (ภาพด้านข้าง)

แบบจำลองนี้ใช้สมมติฐานว่าชั้นเบดบนสายพานลำเลียงแต่ละชั้นแทนได้ด้วยเซลล์จำนวน m เซลล์ที่วางเรียงติดกันในทิศการเคลื่อนที่ของสายพานและการไหลของลมร้อนผ่านแต่ละเซลล์ของวัสดุชื้น สามารถแทนได้โดยการเอาถังกวนสมบูรณ์ (Complete stirred tank) ขนาดเท่ากันจำนวน n ถังมาต่ออนุกรมกันในทิศการไหลของลมร้อน เนื่องจากการไหลของลมร้อนในแบบจำลองนี้จะคล้ายกันแบบจำลองอื่นๆ คือถือว่าการไหลเป็นแบบลูกสูบ (Plug flow model) ดังรูปที่ 7.1

สมมติฐานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้

1. ระบบอยู่ในสถานะคงที่ตามเวลา (Steady state)
2. การไหลของลมร้อนเป็นแบบลูกสูบ และเบดแทนด้วยถังกวนสมบูรณ์ n ถังต่ออนุกรมกัน
3. ไม่มีการสูญเสียความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม
4. เนื่องจากการไหลของลมร้อนเป็นแบบลูกสูบ จึงไม่มีเกรเดียนท์ของความชื้นและอุณหภูมิ ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

5. การนำความร้อนระหว่างชิ้นวัสดุภายในเบดนั้น ถือว่ามีค่าน้อยมากจนไม่คำนึงถึง
6. การแพร่ของความชื้นในทิศทางการไหลของลมร้อน ถือว่ามีค่าน้อยมากจนไม่คำนึงถึง
7. ในระหว่างการอบแห้งวัสดุชื้นจะไม่หดหรือขยายตัว หรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก
8. ลมร้อนชื้นนั้น ถือว่าเป็นก๊าซผสมในอุดมคติของอากาศแห้งที่ร้อนกับความชื้น (ไอน้ำ) จึงทำนายคุณสมบัติของอากาศชื้นได้ด้วยกฎของก๊าซในอุดมคติ

จากรูปและสมมติฐานดังกล่าว สามารถนำมาอนุพันธ์ของสมการดุลของมวลสารและพลังงานในวัสดุชื้นและลมร้อน ดังนี้

สมการดุลมวลสารที่สภาวะคงที่ (Steady state) จากสมการ 3.1 และ 3.2 จะได้

$$W_{si}\left(x_{i,j-1} - x_{i,j}\right) = R_{di,j} M_S \tag{7.1}$$

$$W_{Gj}\left(H_{i-1,j} - H_{i,j}\right) = -R_{di,j} M_S \tag{7.2}$$

ในการจำลองกระบวนการนี้จะสมมติให้

$$R_{di,j} \cong R_{di-1,j-1}$$

เนื่องจากค่าอัตราการอบแห้งก่อนเข้าสู่ถังกวนและค่าอัตราการอบแห้งที่ออกจากถังกวนเปลี่ยนแปลงไปไม่มาก

เมื่อรวมสมการ 7.1 และ 7.2 จะได้

$$W_{si}\left(x_{i,j-1} - x_{i,j}\right) = -W_{Gj}\left(H_{i-1,j} - H_{i,j}\right) \tag{7.3}$$

สมการดุลพลังงานที่สภาวะคงที่ จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 จะได้

$$-W_{si}\left[\left(c_s + c_w x_{i,j-1}\right)T_{si,j-1} - \left(c_s + c_w x_{i,j}\right)T_{si,j}\right] = \left(Ua\right)_{i,j} V_i \left(T_{Gi,j} - T_{Si,j}\right) - R_{di,j} M_S \left(\lambda_R + c_v T_{Gi,j}\right) \tag{7.4}$$

$$W_{Gj}\left(i_{Gi-1,j} - i_{Gi,j}\right) = \left(Ua\right)_{i,j} V_i \left(T_{Gi,j} - T_{Si,j}\right) - R_{di,j} M_S \left(\lambda_R + c_v T_{Gi,j}\right) \tag{7.5}$$

จากสมการ 7.4 และ 7.5 จะได้

$$W_{si}\left[\left(c_s + c_w x_{i,j}\right)T_{si,j} - \left(c_s + c_w x_{i,j-1}\right)T_{si,j-1}\right] = W_{Gj}\left(i_{Gi-1,j} - i_{Gi,j}\right) \tag{7.6}$$

สมการ 7.5 สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$W_{Gj}c_{Hi-1,j}\left(T_{Gi-1,j}-T_{Gi,j}\right)=(Ua)_{i,j}V_i\left(T_{Gi,j}-T_{si,j}\right) \tag{7.7}$$

ในการคำนวณนี้จะให้

$$W_{Gj}c_{Hi-1,j}\left(T_{Gi-1,j}-T_{Gi,j}\right)\cong(Ua)_{i-1,j}V_i\left(T_{Gi-1,j}-T_{Si,j-1}\right) \tag{7.7ก}$$

เอนธาลปีของอากาศชื้นหาได้จาก

$$i_G=c_GT_G+(\lambda_R+c_vT_G)H \tag{7.8}$$

ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศชื้นคือ

$$c_H=c_G-c_vH \tag{7.9}$$

อนึ่งอัตราการระเหยของน้ำจากวัสดุในถังหาได้จากการทดลองในบทที่ 6 ซึ่งจากการทดลองจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า อัตราการอบแห้ง (R_d) และอัตราส่วนความชื้น (x) ที่สภาวะต่างๆ จากนั้นนำมาทำการนอแมไรซ์ โดยนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง R* และ ϕ ดังนี้

$$R^* = R_d / R_c \tag{7.10}$$

$$\phi = X / X_C \tag{7.11}$$

ความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ทำการนอมัลไรซ์แล้วจะไม่ขึ้นกับความเร็วของลมร้อน และอุณหภูมิของลมร้อน (18) และค่า R_c ได้มาจาก

$$R_c=\frac{ha^*}{\lambda_w}\left(T_G-T_w\right) \tag{7.12}$$

โดยที่

$$\frac{hd}{k_s}=C\left(\frac{u_\infty d}{\nu_f}\right)^n \mathrm{Pr}_f^{1/3} \tag{7.13}$$

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho du}{\mu} \tag{7.14}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 ความสัมพันธ์ของกริมสัน (Grimson) สำหรับการถ่ายเทความร้อนผ่านแท่งรูปทรงกระบอกสำหรับสมการ 7.13

Re	C	n
40-4,000	0.683	0.466
4,000-40,000	0.193	0.618

อนึ่งการคำนวณความชื้นกระเปาะเปียกสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = P_w - K(T_G - T_w) \tag{7.15}$$

ในที่นี้

P คือ ความดันย่อย (Partial pressure) ของไอน้ำ หน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท ในอากาศ

P_w คือ ความดันไออิ่มตัวของน้ำที่อุณหภูมิ T_w (อ่านค่าได้จากตารางความดันอิ่มตัวในภาคผนวก ก)

K คือ สัมประสิทธิ์ซึ่งมีค่าประมาณ 0.5

หลังจากนั้นจะนำมาคำนวณความชื้นของอากาศได้

$$H = \frac{\text{มวลของไอน้ำ(kg)ในอากาศ}}{\text{มวลของอากาศแห้ง(kg)}}$$

$$= \frac{18}{29}\frac{P}{\pi - P} \tag{7.16}$$

7.1.1 อัลกอริทึมการคำนวณของโปรแกรม (Algorithm)

โปรแกรมการคำนวณขนาดของเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียงนี้เขียนขึ้นโดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิกเวอร์ชัน 6.0 (Visual Basic 6.0) ที่ทำงานบนโปรแกรมเอกซ์เซลล์ (Excel) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

7.1.1.1 ป้อนค่าตัวแปรเสริมต่างๆ ที่โปรแกรมต้องการ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุแห้งที่เข้ามาของวัสดุ, อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง, อุณหภูมิของวัสดุขาเข้า, อุณหภูมิของลมร้อนขาเข้า, ความชื้นของวัสดุ, ความชื้นของอากาศ, ความชื้นวิกฤต, ความเร็วของลมร้อน, พื้นที่ผิวของวัสดุ, อัตราส่วนการหมุนเวียนของอากาศ, เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ, จำนวนตะแกรงที่วางซ้อนกัน, จำนวนตะแกรงที่วางต่อกัน ,จำนวนชิ้นวัสดุต่อหนึ่งถังกวน, ปริมาตรของถังกวน, ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (C_G), ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (C_V), ความร้อนจำเพาะ

ของน้ำ (C_w), ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (C_s), การนำความร้อนของวัสดุ, จำนวนชั้นของสายพานลำเลียง และความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ กับ R*

7.1.1.2 คำนวณหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นที่ป้อนเข้ามา

7.1.1.3 คำนวณหาค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศ

7.1.1.4 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

7.1.1.5 คำนวณหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกโดยทำการลองผิดลองถูกจากความชื้นที่ป้อนเข้า, อุณหภูมิอากาศขาเข้า สมการที่ 7.15 และ 7.16

7.1.1.6 คำนวณหาค่าอัตราการอบแห้งคงที่

7.1.1.7 คำนวณหาค่าอัตราอัตราการอบแห้งลดลง

7.1.1.8 คำนวณหาค่าความชื้นในวัสดุ, ค่าความชื้นในอากาศ, อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิวัสดุ ลมร้อนและความชื้นของลมร้อนที่ออกจากถังกวน i จะไหลสู่ถังกวนถัดมา i+1 จะทำการคำนวณซ้ำโดยเปลี่ยนค่าคุณสมบัติของอากาศที่ออกมาจากตะแกรงชั้นบน โดยวัสดุจะเป็นวัสดุที่เข้ามาใหม่ ทำการคำนวณวนจนครบจำนวนตะแกรงที่วางซ้อนกันที่ป้อนไว้ในข้อ 7.1.1.1

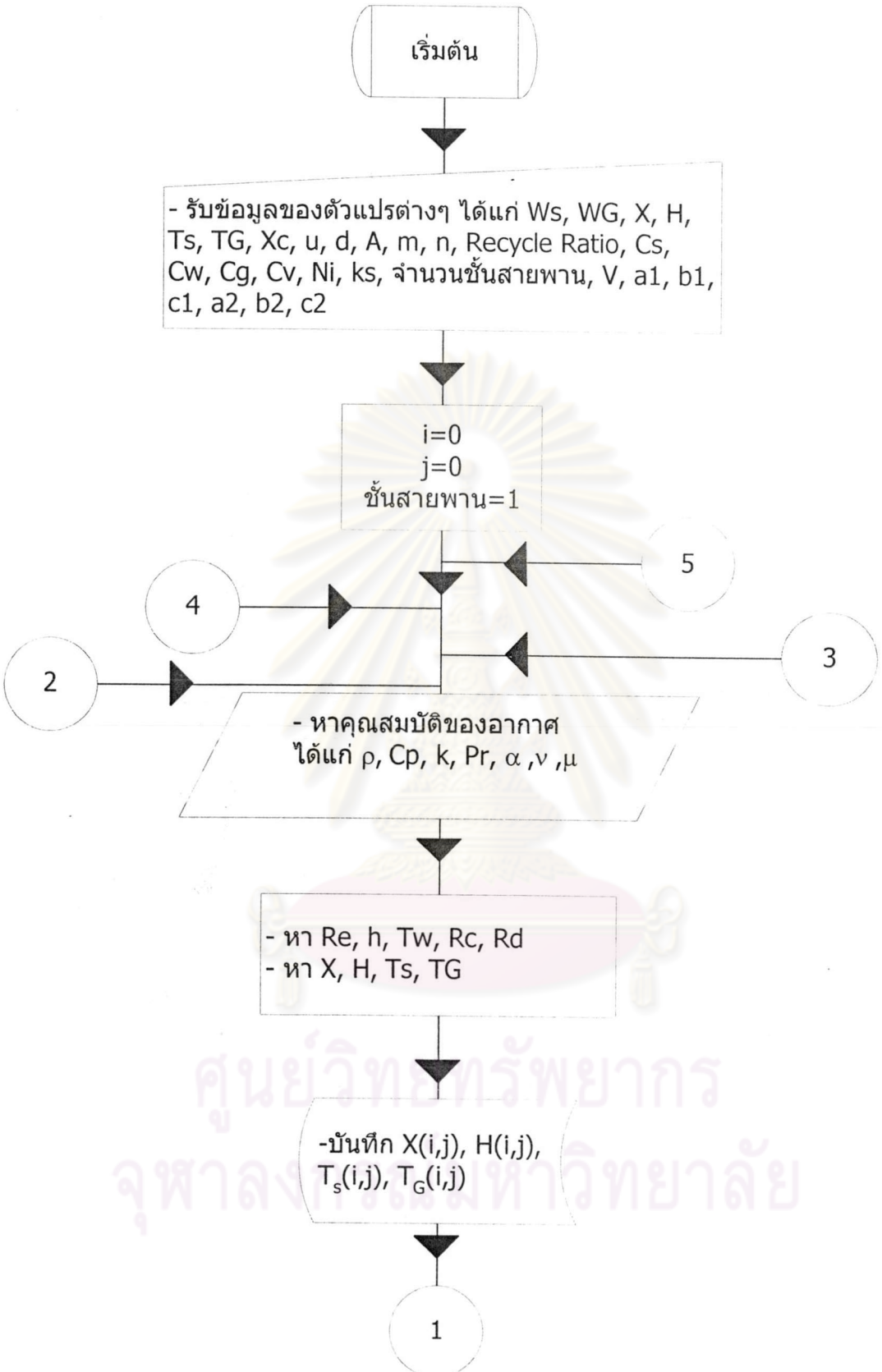
7.1.1.9 วัสดุจะเลื่อนไปในตำแหน่งถัดไป จะผ่านลมร้อนใหม่ ที่เข้าจากด้านบน จะทำการคำนวณซ้ำโดยจะเปลี่ยนค่าอุณหภูมิและความชื้นของวัสดุที่ออกมาจากถังที่ j ที่สัมผัสกับลมใหม่ ทำการคำนวณซ้ำจนครบจำนวนตะแกรงที่ป้อนค่าไว้ต่อ 1 ชั้นสายพาน แล้วทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิ และความชื้นของลมและวัสดุ

7.1.1.10 เมื่อคำนวณจนครบรอบ 1 สายพานลำเลียง วัสดุจะตกลงสู่ชั้นที่ 2 และจะพลิกหรือเปลี่ยนตำแหน่งตะแกรงจากชั้น 1, 2, ...n เป็น ชั้น n, n-1, ...1 ในโปรแกรมจะทำการกลับตำแหน่งของตะแกรงของวัสดุ

7.1.1.11 จะทำการคำนวณซ้ำแบบเดียวกับข้อ 7.1.1.8 และ 7.1.1.9 อีกแต่เปลี่ยนจากลมใหม่เป็นลมที่ไหลผ่านมาจากสายพานลำเลียงชั้นบน และทำการบันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นของลมและวัสดุ

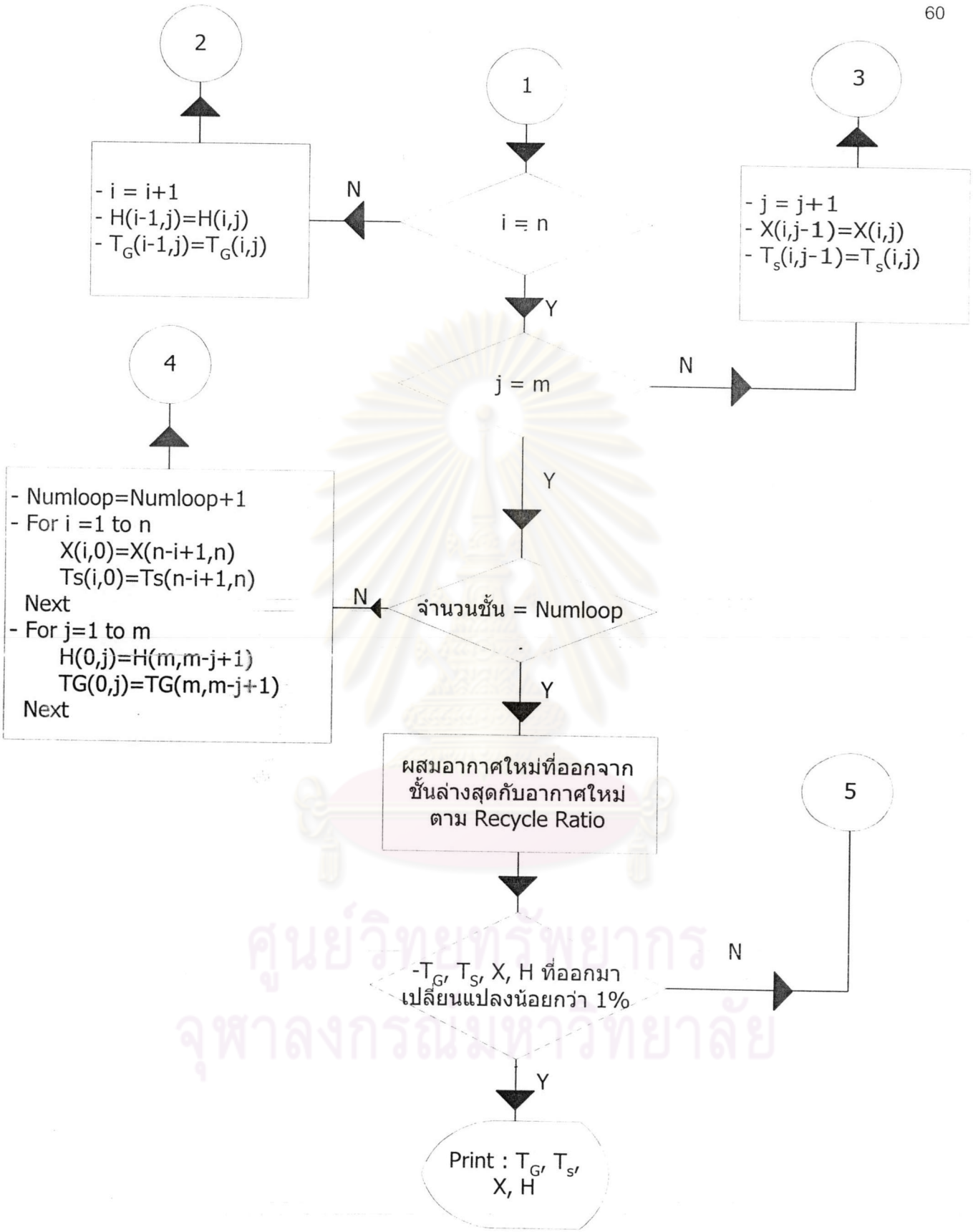
7.1.1.12 ทำการคำนวณซ้ำแบบเดียวกับข้อ 7.1.1.11 จนครบจำนวนชั้นสายพานที่ป้อนไว้ในข้อ 7.1.1.1

7.1.2 ผังการคำนวณของโปรแกรมการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 7.3 ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการคำนวณของโปรแกรมหาขนาดของเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

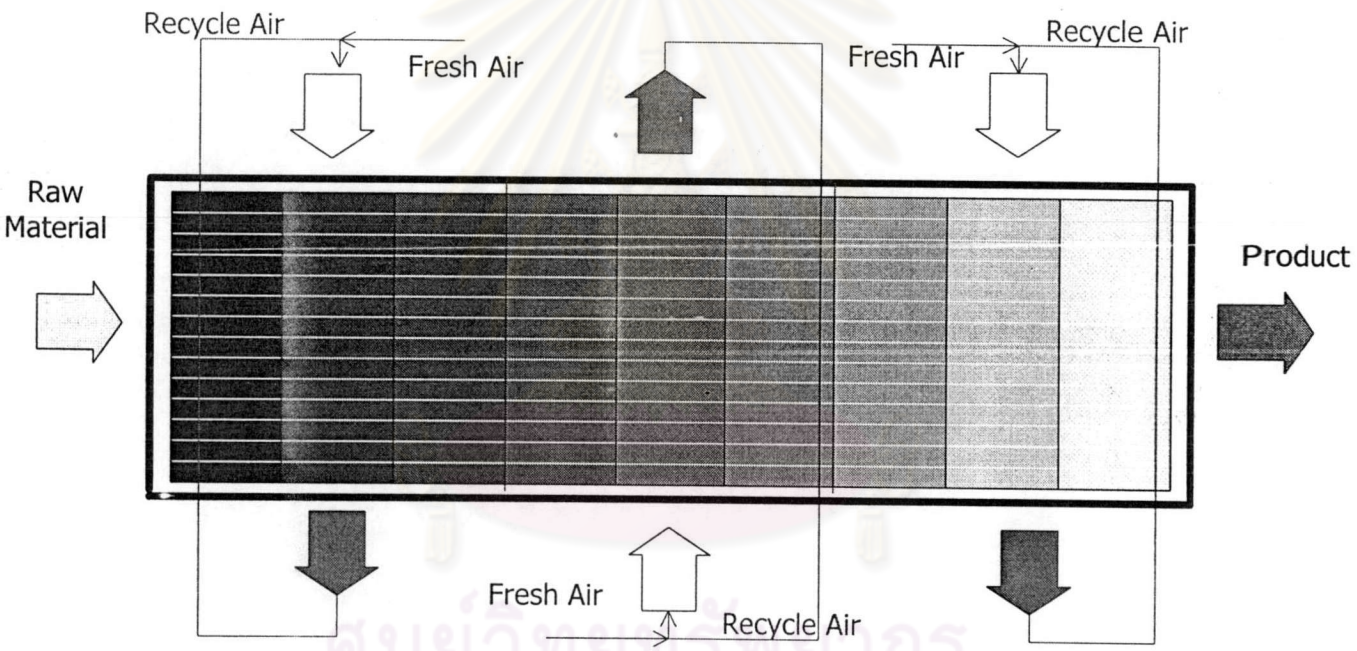


รูปที่ 7.3 (ต่อ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลตัด

ลักษณะของเครื่องแบบอุโมงค์ไหลตัดมีลักษณะของเครื่องดังรูปที่ 7.4 คือ วัสดุจะไหลตามอุโมงค์จากซ้ายไปขวา โดยจะถูกบรรจุอยู่บนตะแกรงรถเข็นที่วางซ้อนกันอยู่ ลมร้อนจะไหลตั้งฉากกับทิศทางการไหลของวัสดุ ภายในอุโมงค์จะแบ่งเป็นช่วงๆ เพื่อทำการสลับทิศทางการไหลของลมร้อนซึ่งจะทำให้การกระจายตัวของความชื้นในวัสดุมีความสม่ำเสมอ ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะถือว่าตะแกรงแต่ละชั้นที่วางซ้อนกันอยู่นั้นจะมีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจะพิจารณาเพียงชั้นเดียว และจำนวนชั้นที่วางซ้อนกันนั้นจะเป็นจำนวนเท่าของความจุของอุโมงค์ที่สามารถรับได้



รูปที่ 7.4 ภาพด้านบนของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลตัดขวาง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่พิจารณาจะมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียงในรูปที่ 7.1 โดยในรูปที่ 7.1 ถังกวนในชั้นแรกจะแทนด้วยวัสดุกลุ่มแรกที่ลมไหลผ่านและชั้นสุดท้ายก็คือวัสดุชุดสุดท้ายในตะแกรง ซึ่งลมที่ไหลผ่านตะแกรงไปแล้วก็จะถูกหมุนเวียนบางส่วนกลับ ส่วนวัสดุจะเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งถัดไปเช่นเดียวกับแบบสายพานลำเลียง

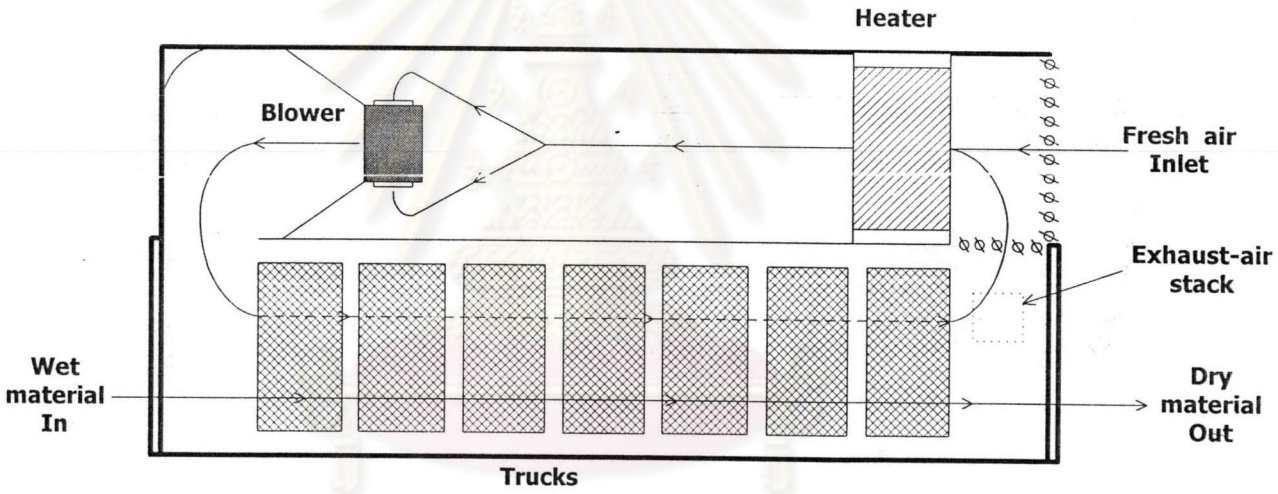
7.2.1 **อัลกอริทึมการคำนวณของโปรแกรม** (Algorithm)

จะคล้ายคลึงกับแบบสายพานลำเลียง โดยการเปลี่ยนทิศทางลมจะเหมือนกับการเปลี่ยนจากสายพานลำเลียงชั้นบน ลงมาชั้นถัดมานั้นเอง

7.1.2 **ผังการคำนวณของโปรแกรมการจำลองกระบวนการ**

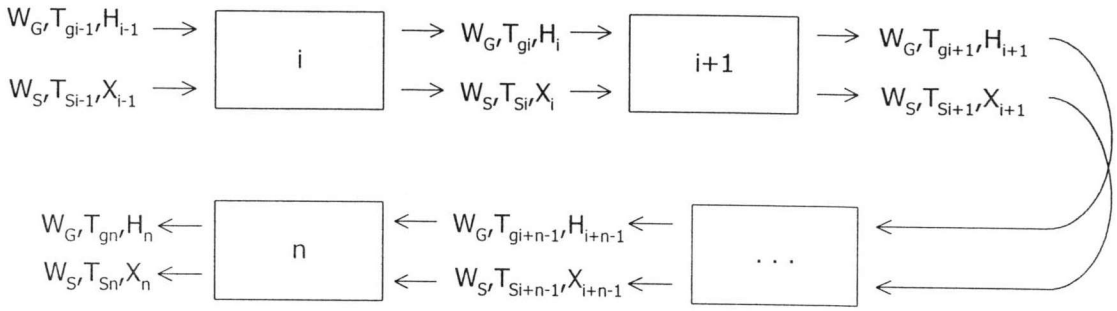
จะคล้ายคลึงกับแบบสายพานลำเลียงโดยจะแตกต่างตรงที่แบบสายพานลำเลียงลมจะผ่านจากชั้นบนสู่ชั้นล่างสุดแล้วจึงหมุนเวียนลมกลับไปใช้ใหม่ แต่แบบนี้การหมุนเวียนลมเมื่อเทียบเป็นแบบสายพานลำเลียงจะมีการหมุนเวียนของลมแยกออกจากกันในแต่ละรถเข็น

7.3 <u>แบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลขนาน</u>



รูปที่ 7.5 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลขนาน (ภาพด้านข้าง)

ลักษณะการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลขนานมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 7.5 ในแบบจำลองของเครื่องอบแห้งแบบนี้ตะแกรงที่ซ้อนกันบนรถเข็นแต่ละชั้นจะมีลักษณะการคิดที่คล้ายกัน ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจะพิจารณาเพียงตะแกรงเดียว โดยจำนวนชั้นตะแกรงที่เพิ่มเข้ามาจะเป็นการเพิ่มความจุของเครื่องอบแห้ง แบบจำลองที่คิดประกอบไปด้วยถังกวนสมบูรณ์ n ถังต่ออนุกรมกันเพียงแกนทิศทางเดียว ซึ่งจะต่างจากแบบจำลองของสองแบบที่ผ่านมาที่พิจารณาสองแกน รูปแบบจำลองแสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.6 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลขนานที่แทนด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์

7.3.1 **อัลกอริทัมการคำนวณของโปรแกรม** (Algorithm)

7.3.1.1 ป้อนค่าตัวแปรเสริมต่างๆ ที่โปรแกรมต้องการ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุที่เข้ามา (คิดเป็นวัสดุแห้งที่เข้ามา), อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง, อุณหภูมิของวัสดุขาเข้า, อุณหภูมิของลมร้อนขาเข้า, ความชื้นของวัสดุ, ความชื้นของอากาศ, ความชื้นวิกฤตของวัสดุ, ความเร็วของลมร้อน, พื้นที่ผิวของวัสดุ, อัตราส่วนการหมุนเวียนของอากาศ, เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุ, จำนวนตะแกรงที่วางต่อกัน, จำนวนชิ้นวัสดุต่อหนึ่งถังกวน, ปริมาตรของถังกวน, ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง (C_G), ความร้อนจำเพาะของไอน้ำ (C_V), ความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_W), ความร้อนจำเพาะของวัสดุแห้ง (C_s), การนำความร้อนของวัสดุ, และความสัมพันธ์ระหว่างค่า ϕ กับ R*

7.3.1.2 คำนวณหาค่าคุณสมบัติของอากาศชื้นที่ป้อนเข้ามา

7.3.1.3 คำนวณหาค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอากาศ

7.3.1.4 คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

7.3.1.5 คำนวณหาค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกโดยทำการลองผิดลองถูกจากความชื้นที่ป้อนเข้า, อุณหภูมิอากาศขาเข้า สมการที่7.15 และ 7.16

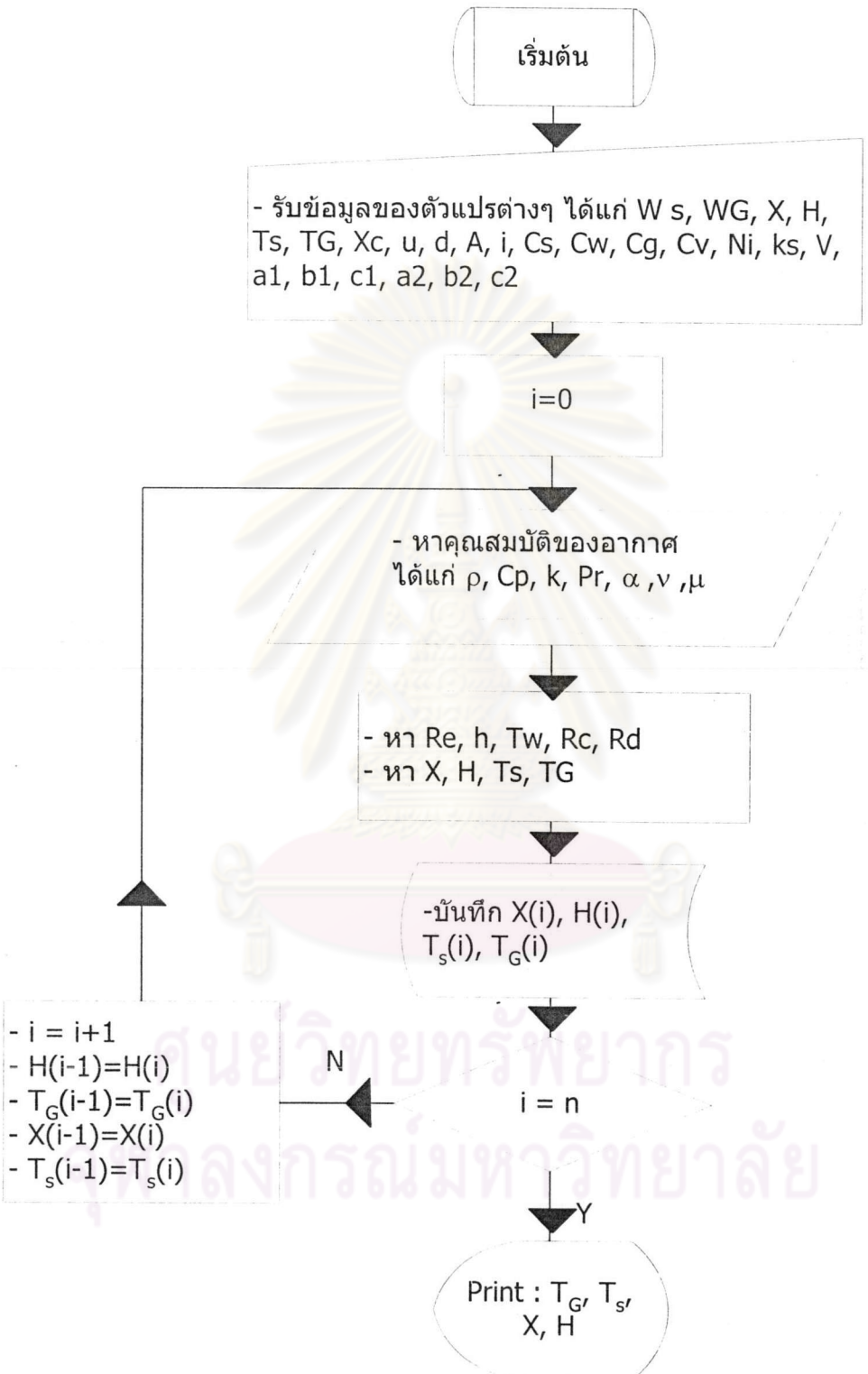
7.3.1.6 คำนวณหาค่าอัตราการอบแห้งคงที่

7.3.1.7 คำนวณหาค่าอัตราการอบแห้งที่ลดลง

7.3.1.8 คำนวณหาค่าความชื้นในวัสดุ, ค่าความชื้นในอากาศ, อุณหภูมิอากาศ และอุณหภูมิวัสดุ

7.3.1.9 จากนั้นวัสดุจะเลื่อนไปในตำแหน่งถัดไป (i+1) ลมร้อนที่ออกจากตำแหน่ง i จะไหลเข้าสู่วัสดุในตำแหน่ง i การคำนวณก็จะทำซ้ำใหม่เหมือนกับในข้อ 7.3.1.8 จนถึงตำแหน่งที่ n ที่วัสดุออกจากอุโมงค์

7.1.2 ผังการคำนวณของโปรแกรมการจำลองกระบวนการ



รูปที่ 7.7 ผังแสดงขั้นตอนอย่างง่ายของการคำนวณของโปรแกรมหาขนาดของเครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ไหลขนาน