

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการบ่มใบยาสูบ (Tobacco Curing Process)

กระบวนการบ่มใบยาสูบ เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงใบยาสดให้กลายเป็นใบยาแห้ง โดยการควบคุมการระเหยน้ำออกจากใบยาสูบให้เป็นไปตามกำหนดเพื่อให้ได้คุณภาพใบยาสูบที่ดี การควบคุมการระเหยน้ำกระทำโดยการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ

สำหรับการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียจะใช้อากาศร้อนในการบ่มใบยาสูบฯ โดยขั้นตอนหลักของการบ่มใบยาสูบฯจะมีสองขั้นตอน คือ การบ่มเพื่อเปลี่ยนสีใบยาสูบฯให้ได้สีตามต้องการ และการบ่มเพื่อให้ใบและก้านของใบยาสูบฯแห้ง โดยในช่วงการบ่มเพื่อเปลี่ยนสีใบยาสูบฯให้ได้สีตามต้องการ ใบยาสูบฯจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทำให้เกิดการสร้างพลังงานขึ้นในใบยาสูบฯเอง ดังนั้นพลังงานความร้อนที่ใช้ในการบ่มจะได้จากอากาศร้อนที่ไหลผ่านชั้นใบยาสูบฯ และพลังงานความร้อนที่สร้างโดยใบยาสูบฯเอง ส่วนช่วงการบ่มเพื่อให้ใบและก้านของใบยาสูบฯแห้งจะไม่มีการสร้างพลังงานโดยใบยาสูบฯ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในช่วงนี้อากาศร้อนไหลผ่านชั้นใบยาสูบ ความร้อนสัมผัส(sensible heat) จะเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝง(latent heat) มีผลทำให้ปริมาณน้ำในอากาศมีมากขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวพิจารณาเป็น adiabatic process ในช่วงการเกิดกระบวนการ adiabatic process อยู่นั้นอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry Bulb Temperature)จะลดลง แต่ค่าอัตราส่วนความชื้น(Humidity Ratio) ,ค่าความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าเอนทัลปี (enthalpy) และอุณหภูมิกระเปาะเปียก(Wet bulb Temperature) จะมีค่าคงที่

สำหรับใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียในเขตร้อนมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามขั้นตอนย่อยๆดังนี้

1. การเปลี่ยนสีหรือการทำสี (Yellowing Stage) องค์ประกอบที่สำคัญในขั้นตอนนี้ คือ ต้องควบคุมอุณหภูมิและระดับการเปลี่ยนแปลงความชื้นให้เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่กำหนด เพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของใบยาสูบให้เป็นไปตามกำหนดเวลา โดยมีการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30°C ถึง 42°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้ลดลงจาก 85% เป็น 65% ในช่วงเวลา 35 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยน้ำตาลจะถูกสันดาปเป็น

คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะให้ความร้อนเกิดขึ้น เปลี่ยนใบยาสีเขียวเป็นใบยาสูบสีน้ำตาล และน้ำหนักใบยาสูบลดลง 20-40% ของน้ำหนักใบยาเริ่มต้น ในช่วงนี้จะมีสสารของแข็งของใบยาสูญหายไป 10-30% ของน้ำหนักสสารของแข็งของใบยาสูบ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั่นเอง โดยช่วงนี้เปิดช่องระบายอากาศเพียงบางส่วน

2. การตรึงสี (Colour fixing stage) องค์ประกอบสำคัญในขั้นตอนนี้ คือ ต้องควบคุมอุณหภูมิ และระดับการลดลงของความชื้นให้เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่กำหนด โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 42°C ถึง 53°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้ลดลงจาก 65% จนเหลือ 40% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง โดยช่วงเวลานี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบ และน้ำหนักใบยาสูบจะลดลงเหลือ 50% ของน้ำหนักใบยาสูบทั้งหมด

3. การไล่น้ำที่ใบหรือการทำแห้งใบยา (Leaf Drying Stage) องค์ประกอบสำคัญในขั้นตอนนี้ คือต้องควบคุมอุณหภูมิและระดับการลดลงของความชื้นให้เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่กำหนด จุดประสงค์คือ การไล่น้ำที่ใบออกมา โดยเพิ่มอุณหภูมิจาก 53°C ถึง 63°C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้ลดลงจาก 40% จนเหลือ 30% โดยใช้เวลาประมาณ 15 ชั่วโมง โดยช่วงเวลานี้จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของใบยาสูบ และน้ำหนักใบยาสูบจะลดลงไป 77% ของน้ำหนักใบยาสดทั้งหมด ซึ่งช่วงนี้จะต้องการพลังงานสูงเนื่องจากอุณหภูมิอากาศในห้องรมมีอุณหภูมิสูงและมีการระบายความชื้นออกจากห้องรมใบยาสูบสูง

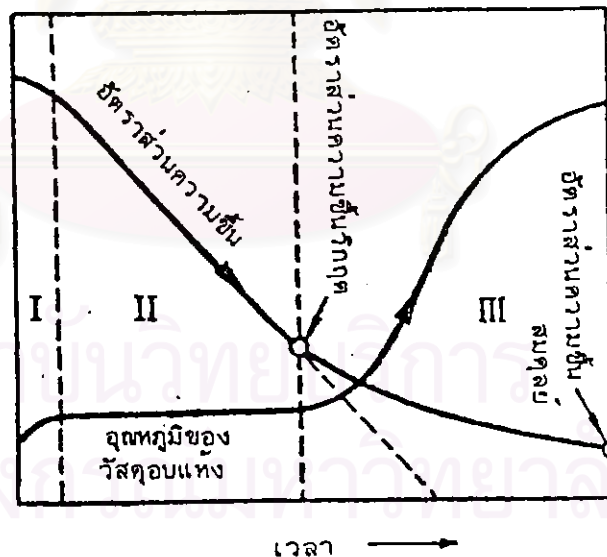
4. การไล่น้ำที่ก้าน (Stem Drying or Killing the Stem Stage) องค์ประกอบสำคัญของช่วงนี้ คือ ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้เปลี่ยนแปลงอย่างถูกต้อง จุดประสงค์คือ การไล่น้ำที่ก้านออกมา โดยควบคุมอุณหภูมิจาก 63°C เป็น 73°C และลดความชื้นสัมพัทธ์จาก 30% จนเหลือ 23% โดยใช้เวลาประมาณ 20 ชั่วโมง ช่วงนี้เกือบปิดช่องระบายอากาศเพื่อประหยัดพลังงานความร้อนและน้ำหนักใบยาสูบจะลดลงประมาณ 89% ของน้ำหนักใบยาสดเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1.1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการอบแห้ง (Drying fundamentals)

เนื่องจากกระบวนการบ่มโยยาสือบเป็นกระบวนการที่มีจุดประสงค์คือ การไล่ความชื้นออกจากโยยาสือบ ซึ่งมีลักษณะเดียวกับการอบแห้ง แต่เป็นการอบแห้งที่มีการกำหนดอัตราการอบแห้งให้เป็นไปตามโปรแกรมที่กำหนดจากอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ แต่อย่างไรก็ตามก็มีพื้นฐานที่เหมือนกัน

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ความร้อน ถูกถ่ายเทด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไปยังวัสดุที่มีความชื้น เพื่อไล่ความชื้นออก โดยอาศัยความร้อนที่ได้รับจะเปลี่ยนเป็นความร้อนแฝงของการระเหย การอบแห้งวัสดุเปียกชื้นใดๆภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งคงที่ เช่น ในกรณีที่ว่าวัสดุเปียกชื้นภายในกระแสมที่มีอุณหภูมิ ความชื้น (Humidity) และความเร็วคงที่ การเปลี่ยนแปลงมวล และอุณหภูมิของวัสดุอบแห้ง กับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง มีลักษณะดังรูปที่ 3.2.1



รูปที่ 3.2.1 การเปลี่ยนแปลงมวล และอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง

การอบแห้งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงใหญ่ๆดังนี้

1. ช่วงการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัสดุ
2. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ (Constant -rate drying period)
3. ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (Falling-rate drying period)

ที่ผิวของวัสดุเปียกชื้น ความชื้นที่ผิวอยู่ในรูปของน้ำ ถ้าเอาวัสดุนี้ไปอบแห้งภายใต้เงื่อนไขคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb Temperature) ของกระแสลมร้อน ช่วงเวลาที่วัสดุใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงค่านี้คือช่วงให้ความร้อนเบื้องต้น ในช่วงต่อไปเป็นช่วงของการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ อุณหภูมิของวัสดุจะมีค่าคงที่ตรงเท่าที่ังมีความชื้นเหลืออยู่ในรูปน้ำที่ผิววัสดุ ความร้อนทั้งหมดที่ได้รับในช่วงนี้จะถูกนำไปใช้ในการระเหยความชื้นออกเท่านั้น โดยที่ปริมาณความชื้นของวัสดุจะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในช่วงนี้ ในช่วงที่ 3 ความชื้นในรูปของน้ำที่ผิววัสดุจะระเหยหมดไป เพราะการถ่ายเทความชื้นในรูปของน้ำจากส่วนในของวัสดุเกิดขึ้นไม่ทันการระเหยของน้ำจากผิววัสดุ ดังนั้นผิววัสดุจะอยู่สภาพที่แห้งและอุณหภูมิของวัสดุจะเริ่มสูงขึ้น และความเร็วของการอบแห้งจะค่อยๆลดลง เพราะปริมาณความร้อนที่วัสดุได้รับนอกจากจะนำไปใช้ในการระเหยความชื้นในวัสดุ ยังต้องนำไปเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุอีกด้วย การอบแห้งจะสิ้นสุดลงเมื่อค่าความชื้นลดลงถึงค่าความชื้นสมดุลย์ (equilibrium moisture content) ค่าความชื้นที่ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ เปลี่ยนเป็นช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงนั้นเรียกว่า ค่าความชื้นวิกฤตของวัสดุ (critical moisture content) โดยปกติแล้วในการอบแห้งวัสดุการเกษตรจะพิจารณาถึงช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง (falling-rate drying period) เท่านั้น เนื่องจากการอบแห้งในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ มีระยะเวลาสั้นมาก และมีปริมาณความชื้นน้อยมากที่ระเหยออกจากวัสดุการเกษตร ก่อนจะถึงช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง

การคำนวณหาอัตราการอบแห้งของวัสดุการเกษตรกรรมในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง จะมีความยุ่งยากซับซ้อนกว่าในช่วงความเร็วคงที่มาก เพราะไม่เพียงแต่จะต้องพิจารณาถึงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและการถ่ายเทมวล (convective heat and mass transfer) ยังต้องพิจารณาถึงการแพร่กระจายของมวล (mass diffusion) อีกด้วย มีทฤษฎีอยู่หลายทฤษฎีที่ถูกเสนอขึ้นมา เพื่อใช้หาอัตราการอบแห้งของวัสดุการเกษตรที่อยู่ในช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลง แต่สมการกึ่งทฤษฎีและสมการจากการทดลอง (semitheretical and empirical equation) เท่านั้นที่ผู้ออกแบบเครื่องอบแห้งนิยมใช้ในการออกแบบเครื่องอบแห้ง เพราะสามารถใช้ได้ง่ายและมีความถูกต้อง

สำหรับไวยาสูบได้มีผู้วิจัยหาสมการการระเหยน้ำออกจากไวยาสูบไว้บ้างแล้วดังนี้

T.C. Bridge, L.R. Walton และ I.J. Ross(1981) ได้ทำการศึกษาสมการการระเหยน้ำออกจากไวยาสูบพันธุ์เบอร์เลย์แบบอัดแน่น โดยสมการอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ใช้ในการบ่มไวยาสูบ และความชื้นสมดุลย์ของไวยาสูบ ณ อุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ใช้ในการบ่มไวยาสูบขณะนั้น ซึ่งสมการอยู่ในรูป

$$\frac{MC - MC_0}{MC_0 - MC_0} = e^{-kt}$$

เมื่อ MC = ความชื้นของไวยาสูบมาตรฐานแห้งที่เวลา t (d.b)

MC₀ = ความชื้นของไวยาสูบมาตรฐานแห้งที่เวลาเริ่มต้น (d.b)

MC₀ = ความชื้นสมดุลย์ของไวยาสูบมาตรฐานแห้ง (d.b)

k = 2.14 x 10⁻⁸G

G = ผลต่างของความชื้นที่มีได้มากที่สุด ในอากาศ
กับความชื้นในอากาศที่มี ณ ขณะนั้น

t = เวลาที่ใช้ในการบ่ม

สำหรับไวยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียยังไม่มีผู้วิจัยเสนอสมการการระเหยน้ำออกจากไวยาสูบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและเสนอดังในรายละเอียดในบทที่ 4

3.3 ค่าความชื้นสมดุลย์ (Equilibrium moisture content)

ค่าความชื้นสมดุลย์เป็นค่าเฉพาะอย่างหนึ่งของวัสดุ ค่าความชื้นสมดุลย์จะถูกนำไปใช้ในการหาว่าวัสดุนั้นจะรับหรือระเหยความชื้นออก ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่อยู่โดยรอบวัสดุนั้นอย่างไร วัสดุจะอยู่ในสภาวะสมดุลย์กับบรรยากาศโดยรอบ เมื่ออัตราการระเหยความชื้นออกจากวัสดุสู่บรรยากาศเท่ากับอัตราการเพิ่มความชื้นของวัสดุจากบรรยากาศ โดยทั่วไปค่าความชื้นสมดุลย์จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศโดยรอบ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวนิยามมาจากการทดลอง

โดยสำหรับไบยาสูบได้มีผู้วิจัยหาค่าความชื้นสมดุยกไว้บ้างแล้วดังนี้

C.T. Kirahoudis, Z.B.Maroulis และ D.Marinos-kouris (1990) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุยก สำหรับไบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียดังนี้

$$MC_e = \frac{2.62}{T(1-\phi)^{0.637}} - 3.05 \times 10^{-4} \times T \times \phi$$

เมื่อ MC_e = ความชื้นสมดุยกของไบยาสูบมาตรฐานแห้ง (d.b.)

T = อุณหภูมิอากาศระเปาะแห้ง ($^{\circ}C$)

ϕ = ความชื้นสัมพัทธ์

3.4 ความชื้นในวัสดุ(Moisture Content)

ความชื้นในวัสดุเป็นตัวบอกปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุขึ้นหรือแห้ง ความชื้นในวัสดุสามารถแสดงได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{M-D}{M}$$

เมื่อ M_w คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก,เศษส่วน

M คือ มวลของวัสดุ,kg.

D คือ มวลวัสดุแห้ง(ไม่มีความชื้น),kg.

ความชื้นแบบนี้นิยมใช้กันในวงการค้า โดยทั่วไปจะอ้างถึงในรูปของเปอร์เซนต์ ($100M_w$)

2. ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_b = \frac{M-D}{D}$$

- เมื่อ M_D คือ ความขึ้นมาตรฐานแห้ง,เศษส่วน
 M คือ มวลของวัสดุ,kg.
 D คือ มวลวัสดุแห้ง(ไม่มีความชื้น),kg.

ความขึ้นแบบนี้นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้งทางทฤษฎีเพราะช่วยให้การคำนวณสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นเพราะมวลของวัสดุแห้ง(D)จะมีค่าคงที่หรือคงที่ระหว่างการอบแห้ง

3.5 กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิค

ระบบเปิดซึ่งมีมวลไหลตัดผ่านเส้นแบ่งขอบเขตระหว่างระบบและสิ่งแวดล้อมแล้ว จะสามารถเขียนกฎข้อหนึ่งทางเทอร์โมไดนามิคได้ดังนี้

$$\Delta U_c + \Delta H_f + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

เมื่อ ΔU_c คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม

ΔH_f คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของกระแสการไหลของของไหล

ΔKE คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์

ΔPE คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์

Q คือ ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมผ่านผนังของปริมาตร

W คือ งานเพลลาที่แลกเปลี่ยนระหว่างปริมาตรควบคุมและสิ่งแวดล้อมรวมกับงานจากการหดหรือขยายตัวของปริมาตรควบคุม

3.6 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนอาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ การนำ การพา และการแผ่รังสีความร้อน แต่ในที่นี้สามารถที่จะละทิ้งการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากระบบที่พิจารณามีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมಿಸังแวดล้อมน้อย

1. การนำความร้อน ในแท่งวัสดุเป็นไปตามกฎของ Fourier สามารถเขียนได้ว่า

$$\dot{q} = -kA \frac{dT}{dX}$$

เมื่อ \dot{q}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน
k	คือ	ค่าสภาพนำความร้อนของวัสดุ
A	คือ	พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน
$\frac{dT}{dX}$	คือ	เกรเดียนต์อุณหภูมิต่อระยะทางที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน

2. การพาความร้อน การพาความร้อนจะแตกต่างจากการนำความร้อนตรงที่ตัวกลางซึ่งความร้อนไหลผ่านมีการเคลื่อนที่ด้วย โดยมากมักได้แก่ น้ำ น้ำมัน หรือ อากาศ ซึ่งการพาความร้อนนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบบังคับ (Forced Convection) กับแบบธรรมชาติ (Free Convection) สามารถคำนวณหาอัตราการพาความร้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$q = h'A(T_s - T_\infty)$$

เมื่อ h'	คือ	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน
T_∞	คือ	อุณหภูมิกระแสการไหลอิสระของของไหล
T_s	คือ	อุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ

โดยค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h') ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการพาความร้อน ตลอดจนคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ ดังนี้

2.1 การไหลแบบบังคับ (Forced Convection)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าแสดงในรูปตัวแปรไร้มิติคือ

$$\bar{Nu} = \frac{h'L}{k} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/2} \quad 0.6 \leq Pr < 10$$

2.2 การไหลแบบตามธรรมชาติ (Free Convection)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าแสดงในรูปตัวแปรไร้มิติคือ

- สำหรับแผ่นราบในแนวตั้ง

$$\bar{Nu} = \frac{h'L}{k} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{1/4}} \right\}^2$$

สำหรับทุกค่าของ Ra_L

- สำหรับแผ่นราบในแนวนอน

กรณีด้านบนของแผ่นร้อนหรือด้านล่างของแผ่นเย็น

$$\bar{Nu} = \frac{h'L}{k} = 0.54Ra_L^{1/4} \quad 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$$

$$\bar{Nu} = \frac{h'L}{k} = 0.15Ra_L^{1/3} \quad 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$$

3.7 คุณสมบัติอากาศชื้น

1. คำจำกัดความของศัพท์ไซโครเมตริก(Psychometric term)

- ความดันไอ(Vapor Pressure)

ความดันไอ(P_v) คือ ส่วนของความดันย่อย(partial pressure)ที่กระทำโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศชื้น ถ้าอากาศนี้อิ่มตัวด้วยไอน้ำ เรียกว่า ความดันไอนี้ว่า ความดันไ่อิ่มตัว(Saturated Vapor Pressure, P_{vs}) ค่าความดันไ่อิ่มตัวจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

- ความชื้นสัมพัทธ์(Relative Humidity)

ความชื้นสัมพัทธ์(ϕ) คือ อัตราส่วนของเศษส่วนเชิงโมล(mole fraction) หรือ ความดันไอน้ำในอากาศต่อเศษส่วนเชิงโมลหรือความดันไอน้ำในอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศเดียวกัน ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

- อัตราส่วนความชื้น(Humidity Ratio)

อัตราส่วนความชื้น(W) คือ มวลไอน้ำต่อมวลอากาศแห้งที่มีอยู่ในอากาศแห้งหนึ่งหน่วย

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(Dry-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะแห้ง(T) คืออุณหภูมิของอากาศที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ทั่วไป

- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet-Bulb Temperature)

อุณหภูมิกระเปาะเปียก(T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศชื้นที่ช็อบอกโดยเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะถูกหุ้มด้วยผ้าก๊อซ และมีลมเป่าผ่านกระเปาะด้วยความเร็วอย่างน้อย 4-5 m/s

- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง(Dew-point Temperature)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง(T_{dp}) คือ อุณหภูมิไอน้ำในอากาศเริ่มควบแน่นเมื่ออากาศนั้นถูกทำให้เย็นลงที่อัตราส่วนความชื้น และความดันบรรยากาศคงที่

- เอนทัลปี(Enthalpy)

เอนทัลปี(Enthalpy) ของอากาศชื้น คือ ค่าปริมาณความร้อนของอากาศชื้นต่อหน่วยมวลอากาศแห้งที่สูงกว่าค่าอุณหภูมิอ้างอิงที่กำหนดขึ้น ในการคำนวณโดยทั่วไปจะเกี่ยวข้องกับความแตกต่างของเอนทัลปี ดังนั้นอุณหภูมิอ้างอิงจะเป็นอุณหภูมิใดๆก็ได้ โดยทางปฏิบัติมักใช้อุณหภูมิอ้างอิงของน้ำ 0°C ในระบบเมตริกและระบบสากล

- ปริมาตรจำเพาะ(Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะ(V) ของอากาศ คือ ปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของอากาศแห้ง

2. ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคุณสมบัติของความชื้น

- กฎของก๊าซสมบูรณ์(Perfect Gas Law)

ที่ความดันบรรยากาศสามารถพิจารณาได้ว่าส่วนผสมของก๊าซต่างๆและไอน้ำในอากาศชื้นเป็นส่วนผสมของก๊าซอุดมคติ จะได้ว่า

$$P = P_a + P_v$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันรวมของอากาศ
	P_a	คือ	ความดันอากาศแห้ง
	P_v	คือ	ความดันของไอน้ำ

- ความดันไอน้ำอิ่มตัวและความชื้นสัมพัทธ์

ความดันไอน้ำอิ่มตัว(P_{vs}) สามารถหาได้จากสมการของ Clausius-Clapeyron ซึ่งประยุกต์ใช้กับการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ใดๆ ค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\ln(P_{vs}) = 24.2779 - \frac{6238.46}{T} - 0.344438 \ln(T) \quad \text{เมื่อ } 233.15 \text{ K} < T < 273.16 \text{ K}$$

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-7511.52}{T} + 89.63 + 0.02399T - 1.16E - 5T^2 - 1.28E - 8T^3$$

$$+ 2.099E - 11T^4 - 12.12 \ln(T)$$

เมื่อ $273.16 \text{ K} < T < 393.16 \text{ K}$

จากค่าจำกัดความของความสัมพันธ์ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ค่าเท่ากับ

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}}$$

- อัตราส่วนความชื้น

จากกฎของก๊าซสมบูรณ์ จะได้ว่าอัตราส่วนความชื้น(W) ว่า

$$\begin{aligned} W &= \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V_v M_v}{P_a V_a M_a} \\ &= \left(\frac{18.01}{28.96} \right) \frac{P_v}{(P - P_v)} \\ &= 0.62189 \frac{P_v}{(P - P_v)} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } W = 0.62189 \phi \frac{P_{vs}}{(P - \phi P_{vs})}$$

- เอนทัลปีของอากาศชื้น

เอนทัลปีของอากาศชื้น (h) เท่ากับผลบวกของเอนทัลปีของอากาศแห้ง (h_a) และ เอนทัลปีของไอน้ำในอากาศ (h_v)

$$h = h_a + Wh_v$$

ถ้าให้อุณหภูมิอ้างอิงเท่ากัน 0°C สมการของ h_a และ h_v ได้ คือ

$$h_a = C_p T = 1.006T$$

$$h_v = C_v(T - T_{dp}) + h_{fg}(\text{at } T_{dp}) + C_w T_{dp}$$

ซึ่ง T และ T_{dp} คือ อุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิจุดน้ำค้าง C_v C_w คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ของไอน้ำในอากาศและของน้ำตามลำดับ h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ

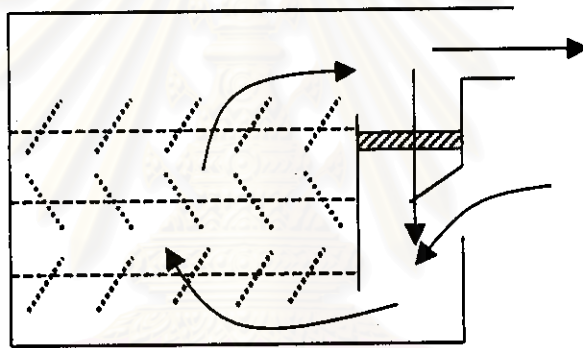
$$\begin{aligned} \text{ซึ่ง } h_v \text{ สามารถ ประมาณได้ว่า } h_v &= C_v T + h_{fg}(\text{ที่ } 0^\circ \text{C}) \\ &= 1.88T + 2501 \end{aligned}$$

$$h = 1.006T + W(1.88T + 2501) \text{ kJ/kg dry air}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.8 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของการใช้พลังงานในการบ่มไບยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย แบบอัดแน่น

ห้องบ่มไບยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัดแน่นจะประกอบด้วยชั้นไບยาสูบจำนวน 3 ชั้น โดยอากาศร้อนจะไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและไหลผ่านจากชั้นล่างสุดก่อนแล้วจึงไหลสู่ชั้นบนสุด และหมุนเวียนกลับมาใช้อีกครั้ง แต่ก็มีอากาศส่วนหนึ่งไหลออกจากห้องบ่มไບยาสูบเพื่อระบายความชื้นออกจากห้องบ่มไບยาสูบฯ ส่วนอากาศที่หมุนเวียนก็จะได้รับความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและผสมกับอากาศแห้งจากภายนอกก่อนจะไหลเข้าสู่ชั้นไບยาสูบชั้นล่างสุดอีกครั้งหนึ่งดังแสดงในรูปที่ 3.8.1



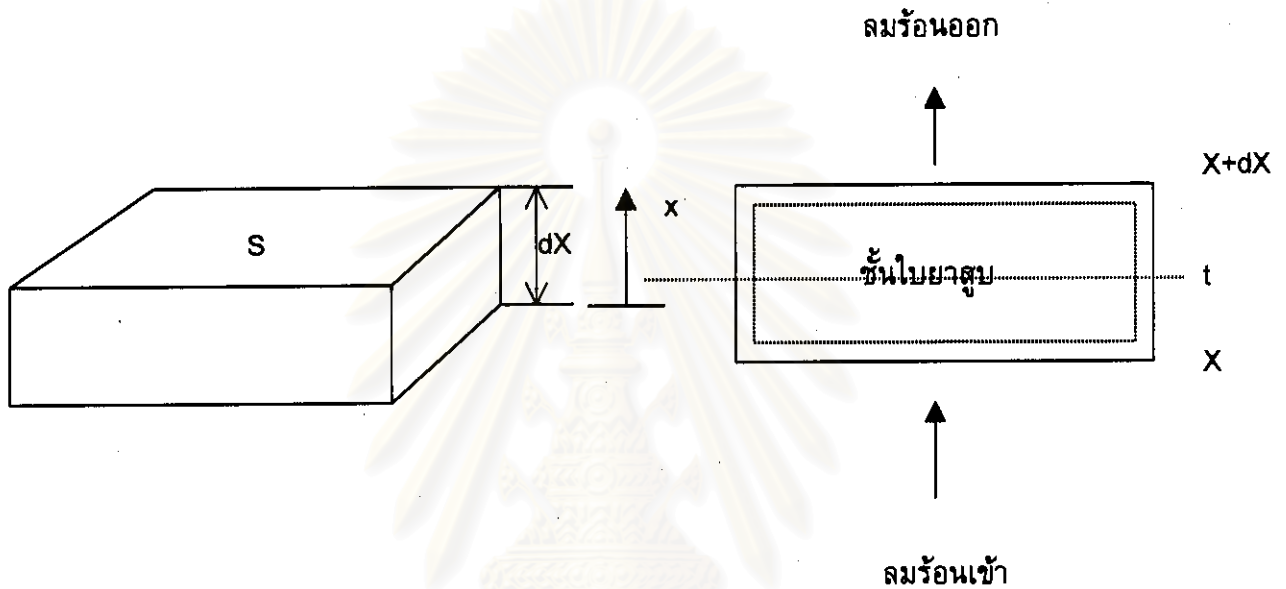
รูปที่ 3.8.1 แสดงลักษณะการไหลของอากาศในห้องบ่มไບยาสูบฯแบบอัดแน่น

ในหัวข้อที่ 4.1 ในบทที่ 4 ได้พิจารณาถึงสมการการระเหยน้ำของไບโดยสมการได้จากการทดลองกับไບยาสูบชั้นล่างสุดของห้องบ่มไບยาสูบฯที่อยู่กันอย่างอัดแน่น ซึ่งไບยาสูบฯที่ทดลองเป็นไບยาสูบล่างสุดที่รู้อุณหภูมิและความชื้นของอากาศก่อนเข้าทำการบ่มไບยาสูบ ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างจำกัด เพราะห้องบ่มไບยาสูบฯจะบ่มมากกว่า 1 ชั้น เป็นชั้นหนา ซึ่งการพิจารณาการระเหยน้ำแบบชั้นหนาจะใช้เป็นการระเหยน้ำแบบชั้นเดียวที่มีการนำเอาชั้นเดี่ยวย่อยๆนำมาเรียงต่อกัน

ในการพิจารณาถึงสมการทางคณิตศาสตร์ของการไล่ความชื้นเป็นชั้นๆของไບยาสูบจะเริ่มจากการพิจารณาไບยาสูบชั้นย่อยๆชั้นเดียวที่ประกอบกันเป็นชั้นหนา โดยจะเริ่มจากไບยาสูบฯชั้นแรกในชั้นล่างสุด จะมีลมร้อนเข้าที่มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่าหนึ่งเป็น input เมื่อลมร้อนได้ผ่านชั้นไບยาสูบชั้นแรกไป จะทำให้มีอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเปลี่ยนแปลงไป โดยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ผ่านชั้นของไບยาสูบชั้น

แรกมาแล้วจะเป็น input เข้าของชั้นของโพลียสไตรีนที่สองต่อไป และลมร้อนก็จะผ่านชั้นของโพลียสไตรีนชั้นต่างๆทั้งหมดจนถึงชั้นบนสุด

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไล่ความชื้นเป็นชั้นๆ ของโพลียสไตรีน



รูปที่ 3.8.2 แสดงชั้นโพลียสไตรีนที่อัดแน่นในห้องปมโพลียสไตรีน

ข้อสมมติ

1. ไม่มีการหดตัวของโพลียสไตรีนระหว่างการไล่ความชื้น
2. ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นโพลียสไตรีน
3. ความร้อนจำเพาะของอากาศชั้นและโพลียสไตรีนมีค่าคงที่ตลอดช่วงการปม
4. อุณหภูมิอากาศ เท่ากับอุณหภูมิโพลียสไตรีนตลอดช่วงการปม
5. $\frac{\partial T}{\partial t}$ และ $\frac{\partial W}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ และ $\frac{\partial W}{\partial x}$

1.1 พิจารณาสมดุลมวลของชั้นไบนายาสูบ

ปริมาณความชื้นของไบนายาสูบที่สูญเสียไปเท่ากับปริมาณความชื้นที่ถูกอากาศนำออกไปจากปริมาตรบังคับ (Sdx) ลบด้วยปริมาณความชื้นที่อากาศนำเข้ามาในปริมาตรบังคับ บวกด้วยปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของอากาศที่อยู่ตามช่องว่างระหว่างชั้นไบนายาสูบ

ปริมาณไอน้ำที่ไหลผ่านระนาบ x และ $x + dx$ เท่ากับ

$$\rho_a v_a S w dt \quad \text{และ} \quad \rho_a v_a S \left(w + \frac{\partial w}{\partial x} dx \right) dt \quad \text{ตามลำดับ}$$

การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนความชื้น (Humidity Ratio) ของอากาศภายในช่องว่างระหว่างไบนายาสูบที่ Void fraction เท่ากับ ϵ มีค่าเท่ากับ

$$\epsilon S dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} dt$$

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นของไบนายาสูบในปริมาตร (Sdx) ในเวลา dt เท่ากับ

$$D_s S dx \frac{\partial MC}{\partial t} dt$$

โดยสมการสมดุลย์ทางมวลจะได้

$$D_s S dx \frac{\partial MC}{\partial t} dt = \rho_a v_a S w dt - \rho_a v_a S \left(w + \frac{\partial w}{\partial x} dx \right) dt - \epsilon S dx \rho_a \frac{\partial w}{\partial t} dt$$

จากข้อสมมุติฐาน $\frac{\partial w}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial w}{\partial x}$

$$D_s \frac{\partial MC}{\partial t} = -\rho_a v_a \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{D_s}{\rho_a v_a} \frac{\partial MC}{\partial t}$$

(1)

1.2 พิจารณาความชื้นของไบยาสูบ

ในการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นของไบยาสูบ กับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ใช้ในการบ่ม ซึ่งได้มีผู้ทำการศึกษาทดลองไว้บางส่วนแล้วดังนี้

1.2.1 T.C.Bridges, L.R. Walton และ I.J. Ross (1981) ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้น สำหรับไบยาสูบพันธ์เบอร์เลย์ ดังนี้

$$\frac{MC - MC_e}{MC_o - MC_e} = e^{-kt}$$

เมื่อ MC = ความชื้นของไบยาสูบมาตรฐานแห่งที่เวลา t (d.b)

MC_o = ความชื้นของไบยาสูบมาตรฐานแห่งที่เวลาเริ่มต้น (d.b)

MC_e = ความชื้นสมดุลย์ของไบยาสูบมาตรฐานแห่ง (d.b)

k = $2.14 \times 10^8 G$

G = ผลต่างของความชื้นที่มีได้มากที่สุด ในอากาศ กับความชื้นในอากาศที่มี ณ ขณะนั้น

t = เวลาที่ใช้ในการบ่ม

1.2.2 C.T. Kirahoudis, Z.B. Maroulis และ D. Marinou-kouris (1990)

ได้เสนอสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้นสมดุลย์ สำหรับไบยาสูบพันธ์เวอร์จิเนียดังนี้

$$MC_e = \frac{2.62}{T(1-\phi)^{0.637}} - 3.05 \times 10^{-4} \times T \times \phi$$

เมื่อ MC_e = ความชื้นสมดุลย์ของไบยาสูบมาตรฐานแห่ง (d.b.)

T = อุณหภูมิอากาศระเปาะแห่ง ($^{\circ}C$)

ϕ = ความชื้นสัมพัทธ์

ซึ่งจากการค้นคว้าผลงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีผู้วิจัยคนใดทำสมการความสัมพันธ์ของปริมาณความชื้น กับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มไບยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนีย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้หาความสัมพันธ์นี้ โดยทำการทดลองกับไບยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียทางภาคเหนือของประเทศไทย ที่โรงบ่มไບยาสูบ บริษัท สหไບยาสูบไทย จำกัด โดยทดลองกับไບยาสูบน้ำหนักประมาณ 2 kg แล้วทำการบ่มและชั่งน้ำหนักตามเวลาตลอดช่วงทำการบ่ม และนำไບยาสูบที่ผ่านการบ่มแล้วมาหาความชื้นที่เหลือสุดท้ายโดยการอบในตู้อบ ซึ่งผลการทดลองดังแสดงในตาราง ข.2 ในภาคผนวก ข. และได้นำข้อมูลมาสร้างสมการในรูป $\frac{MC - MC_e}{MC_o - MC_e} = e^{-kt}$

ตามรูปแบบสมการของ T.C.Bridges จึงขอเสนอสมการของความสัมพันธ์ของความชื้นมาตรฐานแห้งของไບยาสูบกับระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มดังนี้

$$\frac{MC - MC_e}{MC_o - MC_e} = e^{-(AXG + B)t} \quad (2)$$

- โดย MC = ความชื้นของไບยาสูบมาตรฐานแห้งที่เวลาใดๆ (d.b)
 MC_o = ความชื้นของไບยาสูบมาตรฐานแห้งตอนเริ่มต้น (d.b)
 MC_e = ความชื้นสมดุลย์ของไບยาสูบมาตรฐานแห้งจากสมการของ C.T.Kiranoudis
 G = ความแตกต่างของความชื้นที่มีได้มากที่สุด กับความชื้นในอากาศปัจจุบัน
 t = เวลาที่ใช้ในการบ่ม
 A = ค่าคงที่จากการทดลอง
 B = ค่าคงที่จากการทดลอง

โดยมีรายละเอียดการคำนวณอยู่ในหัวข้อที่ 4.1 ในบทที่ 4

1.3 พิจารณาสมการสมดุลย์ทางความร้อนของไບยาสูบ

เอนทาลปีของอากาศชื้นออกจากชั้นไບยาสูบลบเอนทาลปีของอากาศชื้นเข้าสู่ไບยาสูบเท่ากับ พลังงานที่สร้างโดยไບยาสูบจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ลบเอนทาลปีของไບยาสูบที่เปลี่ยนแปลงในเวลาขณะใดขณะหนึ่ง

เอนทาลปีของอากาศที่ไหลผ่านระนาบ x และ $x + dx$ เท่ากับ

$$\rho_a V_a S [Cp_a T + W(2501 + Cp_w T)] dt$$

และ $\rho_a V_a S \left[Cp_a \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) + \left(W + \frac{\partial W}{\partial x} dx \right) (2501 + Cp_w \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right)) \right] dt$ ตาม

ลำดับ

การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของอากาศภายในช่องว่างระหว่างใบยาสูบในปริมาตร Sdx เท่ากับ

$$\in Sdx \rho_a \left[Cp_a \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) + \left(W + \frac{\partial W}{\partial t} dt \right) (2501 + Cp_w \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right)) - (Cp_a T + W(2501 + Cp_w T)) \right]$$

การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของใบยาสูบในปริมาตร (Sdx) เท่ากับ

$$Sdx \left[(D_s Cp_t + D_s Cp_w (MC + \frac{\partial MC}{\partial t} dt)) \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) - (D_s Cp_t + D_s Cp_w MC) (T) \right]$$

การสร้างพลังงานในตัวเองที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของใบยาสูบปริมาตร Sdx เท่ากับ $Sdx \psi_T$

โดย

$$\psi_T = D_s \times 0.476 \times (2.251T - 29.81 + (1607.7 - 85.1T + 1.126T^2)^{1/2})$$

ซึ่งเสนอโดย Johnson และ Hassle (1963) สำหรับ $T < 45^\circ C$ และ $T > 45^\circ C$ การสร้างพลังงานในตัวเองจะไม่มีเกิดขึ้น

โดยสมดุลย์ทางความร้อนจะได้

$$\rho_a V_a S \left[Cp_a \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) + \left(W + \frac{\partial W}{\partial x} dx \right) (2501 + Cp_w \left(T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right)) \right] dt$$

$$- \rho_a V_a S [Cp_a (T) + W(2501 + Cp_w T)] dt$$

$$= Sdx \psi_T - \in Sdx \rho_a \left[Cp_a \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) + \left(W + \frac{\partial W}{\partial t} dt \right) (2501 + Cp_w \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right)) - Cp_a - W(2501 + Cp_w T) \right]$$

$$- Sdx \left[(D_s Cp_t + D_s Cp_w (MC + \frac{\partial MC}{\partial t} dt)) \left(T + \frac{\partial T}{\partial t} dt \right) - (D_s Cp_t + D_s Cp_w MC) (T) \right]$$

จากข้อสมมุติ $\frac{\partial T}{\partial t}$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ $\frac{\partial T}{\partial x}$ จะได้

$$\rho_a V_a S \left[C_{p_n} \frac{\partial T}{\partial x} dx + W(C_{p_w} \frac{\partial T}{\partial x} dx) + \frac{\partial W}{\partial x} dx (2501 + C_{p_w} (T + \frac{\partial T}{\partial x} dx)) \right] dt$$

$$= S dx \psi_T dt - S dx \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} dt \right] T dt$$

$$\frac{\frac{S dx \psi_T}{dt} - S dx \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} dt \right] T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} dx (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} dx C_{p_w} T}{C_{p_n} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx}$$

$$\frac{\frac{\psi_T}{dt} - \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} dt \right] T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} C_{p_w} T}{C_{p_n} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx}$$

กรณี $T < 45^\circ C$

$$\frac{\frac{\psi_T}{dt} - \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} dt \right] T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} C_{p_w} T}{C_{p_n} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx}$$

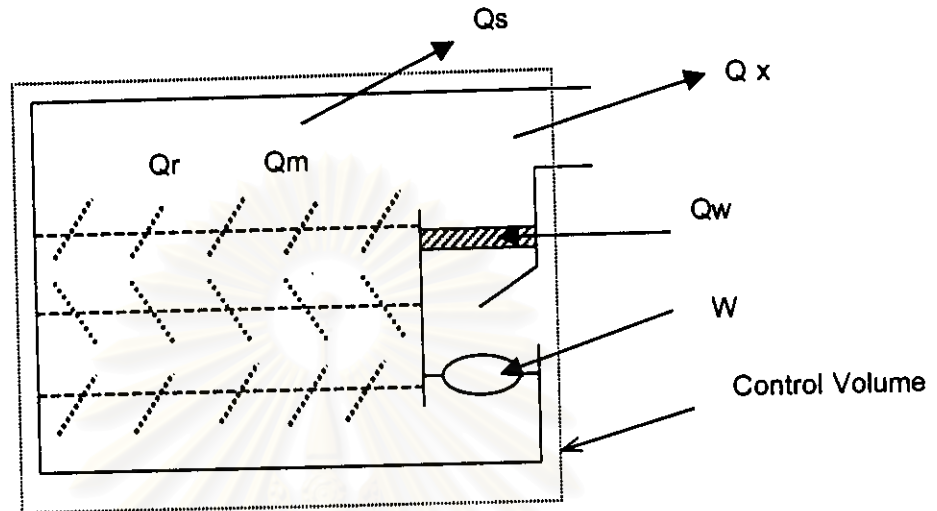
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (3.1)

กรณี $T > 45^\circ C$

$$\frac{- \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} dt \right] T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} C_{p_w} T}{C_{p_n} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx}$$

(3.2)

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานในการบ่มไบโয়াซูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัดแน่น



รูปที่ 3.8.3 แสดงภาคตัดขวางของห้องบ่มไบโয়াซูบฯ

กำหนดให้ห้องบ่มไบโয়াซูบเป็นปริมาตรควบคุม

พิจารณาสมดุลย์พลังงานในห้องบ่มไบโয়াซูบในชั่วเวลา Δt ใดๆจะได้

$$Q_w + Q_r - W = Q_x + Q_s + Q_m \quad (4)$$

โดย	Q_w	=	พลังงานจากน้ำร้อนที่ให้แก่ห้องบ่ม	KJ
	W	=	พลังงานที่ให้กับพัดลมหมุนเวียนอากาศ	KJ
	Q_r	=	พลังงานจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี	KJ
	Q_x	=	พลังงานของการถ่ายเทอากาศ	KJ
	Q_m	=	พลังงานที่ต้องการเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิของไบโয়াซูบ	KJ
	Q_s	=	พลังงานที่ต้องการเพิ่มและควบคุมอุณหภูมิโครงสร้าง	KJ
			รวมถึงพลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้าง	

2.1 Q_w เป็นพลังงานจากน้ำร้อนที่ให้แก่ห้องบ่มไบโয়াซูบในช่วงการบ่ม โดย

$$Q_w = m_{w_i} \times C_{p_w} \times (T_{\text{tubein}_i} - T_{\text{tubeout}_i}) \Delta t \quad \text{kJ}$$

โดย	m_w	=	อัตราการไหลของน้ำร้อน	kg/s
	C_{p_w}	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ	kJ/(kg • C)

$T_{\text{tube in}}$	=	อุณหภูมิผิวท่อทางเข้า	C
$T_{\text{tube out}}$	=	อุณหภูมิผิวท่อทางออก	C
Δt	=	ช่วงเวลา	S
ตัวห้อย i	=	ช่วงเวลาที่	

2.2 W เป็นพลังงานที่ให้แก่พัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนอากาศภายในห้องบ่มไยยาสูบ และดูดอากาศแห้งเข้าสู่ห้องบ่มไยยาสูบ

2.3 Q_r เป็นพลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีในไยยาสูบในช่วงทำสี โดยสมการของ Q_r เสนอโดย Johnson และ Hassler (1963)

$$Q_r = 0.476 \times M_{\text{dry matter}} \times \left[2.251T_i - 29.81 + (1607.7 - 85.1T_i + 1.126T_i^2)^{1/2} \right] \text{ kJ}$$

โดย T = อุณหภูมิอากาศในห้องบ่มไยยาสูบ ($^{\circ}\text{C}$)

ตัวห้อย i = ช่วงเวลาที่

เมื่อ $T < 45^{\circ}\text{C}$

2.4 Q_x เป็นพลังงานของอากาศที่ไหลผ่านห้องบ่มไยยาสูบ ซึ่งเป็นรูปสมการที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทาง Psychrometric ของอากาศที่ออกและเข้าสู่ห้องบ่มไยยาสูบ

$$Q_x = m^{\circ} a_i (h_{\text{out}_i} - h_{\text{in}_i})$$

$$h_{\text{out}} = C_{p,a} T_{\text{out}_i} + W_{\text{out}_i} (2501 + C_{p,w} T_{\text{out}_i})$$

$$h_{\text{in}} = C_{p,a} T_{\text{in}_i} + W_{\text{in}_i} (2501 + C_{p,w} T_{\text{in}_i})$$

โดย $m^{\circ} a$ = อัตราการไหลของอากาศแห้งออกจากห้องบ่มไยยาสูบ kg_a/s

$C_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนของอากาศ $\text{kJ}/(\text{kg}_a \cdot \text{C})$

$C_{p,w}$ = ค่าความจุความร้อนของน้ำ $\text{kJ}/(\text{kg}_a \cdot \text{C})$

T_{in} = อุณหภูมิของอากาศทางเข้าห้องบ่มไยยาสูบ C

T_{out} = อุณหภูมิของอากาศทางออกห้องบ่มไยยาสูบ C

W_{in} = ความชื้นของอากาศทางเข้าห้องบ่มไยยาสูบ kg_w/kg_a

W_{out} = ความชื้นของอากาศทางออกห้องบ่มไยยาสูบ kg_w/kg_a

2.5 Q_s เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิและควบคุมอุณหภูมิของโครงสร้างของห้องปมไบยาสูบ รวมถึงพลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้างจะได้

$$Q_s = Q_{sl} + Q_{ss} \quad \text{kJ}$$

โดย Q_{sl} = พลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้าง kJ
 Q_{ss} = พลังงานที่สะสมอยู่ในโครงสร้างของห้องปมไบยาสูบ kJ

2.5.1 Q_{sl} เป็นพลังงานสูญเสียผ่านโครงสร้างประกอบด้วย

$$\begin{aligned} \text{(ก)} \quad Q_{wl} &= \text{พลังงานสูญเสียผ่านผนังห้องปมไบยาสูบ} \\ &= U_w \times A \times (T_{\text{inroom}_i} - T_{\text{outroom}_i}) \Delta t \quad \text{kJ} \end{aligned}$$

โดย U_w = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ซึ่งประกอบด้วย
 การถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนและ
 การพาความร้อน $\frac{\text{KW}}{(\text{m}^2 \cdot \text{C})}$

A = พื้นที่การถ่ายเทความร้อน m^2

T_{inroom} = อุณหภูมิในห้องปม C

T_{outroom} = อุณหภูมินอกห้องปม C

$$\text{(ข)} \quad Q_{fl} = \text{พลังงานสูญเสียผ่านพื้นห้องปมไบยาสูบ}$$

ในการพิจารณาพลังงานสูญเสียผ่านพื้นได้มีผู้ทำการศึกษาค้นคว้าทดลองไว้บางส่วนแล้วดังนี้

A.E.DELSANTE (1990) ได้พัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์และมีการทดลอง หาพลังงานสูญเสียผ่านพื้นเปรียบเทียบกับสมการที่ได้พัฒนาขึ้น โดยสมการพิจารณาเป็น 3 มิติ ดังสมการนี้

$$Q = U_f \times A \times (T_{\text{inroom}_i} - T_{\text{outroom}_i})$$

$$\text{โดย } U_f = \frac{3.3k}{\pi ab} \left[a \ln\left(\frac{4a}{U^*}\right) + b \ln\left(\frac{4b}{U^*}\right) + 2\sqrt{a^2 + b^2} - a - b \right]$$

$$- b \ln \left[\sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + b}{a}} \right] - a \ln \left[\sqrt{\frac{(a^2 + b^2) + a}{b}} \right]$$

$$U^* = U \left(1 + \frac{1.74}{Uh} \right)$$

เมื่อ	k	=	Soil Conductivity	$W/(m^{\circ}C)$
	2a	=	ความยาวของด้านยาวของพื้น	m
	2b	=	ความยาวของด้านกว้างของพื้น	m
	U	=	ความหนาของพื้น	m
	h	=	$\frac{H}{k}$ เมื่อ H = Surface air film conductance	

Chin C. Yang และ William H. Johnson ได้ทำการศึกษาการใช้ finite Element ในการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นของห้องบ่มใบยาสูบ แล้วทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของผู้วิจัยคนอื่นๆ ผลการคำนวณโดยใช้ finite Element และผลการทดลองของผู้วิจัยคนอื่นๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยแสดงไว้ในตารางที่ 3.8.1 และตารางที่ 3.8.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8.1 แสดงพลังงานความต้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FE)

อุณหภูมิอากาศในห้องบ่มฯ	40°C	50°C	70°C
พลังงานสูญเสียผ่านพื้น คำนวณโดย FE (MJ/m ² -hr)	0.23	0.36	0.50

ตารางที่ 3.8.2 แสดงพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องบ่มใบยาสูบจากการทดลองโดย Chang et. al

อุณหภูมิอากาศในห้องบ่มฯ	40°C	50°C	70°C
พลังงานสูญเสียผ่านพื้น จากการทดลอง (MJ/m ² -hr)	0.25	0.35	0.50

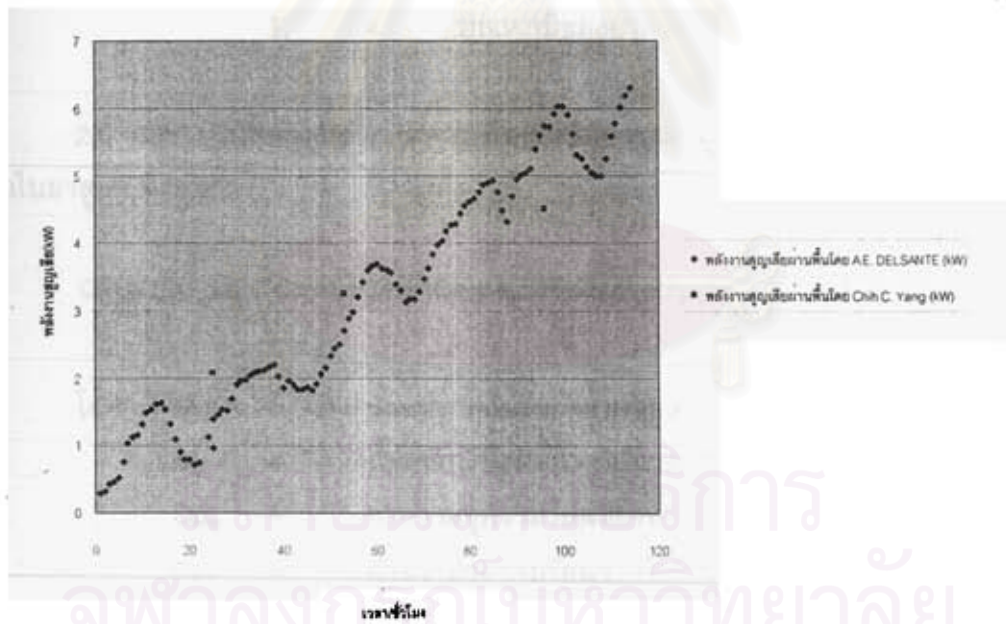
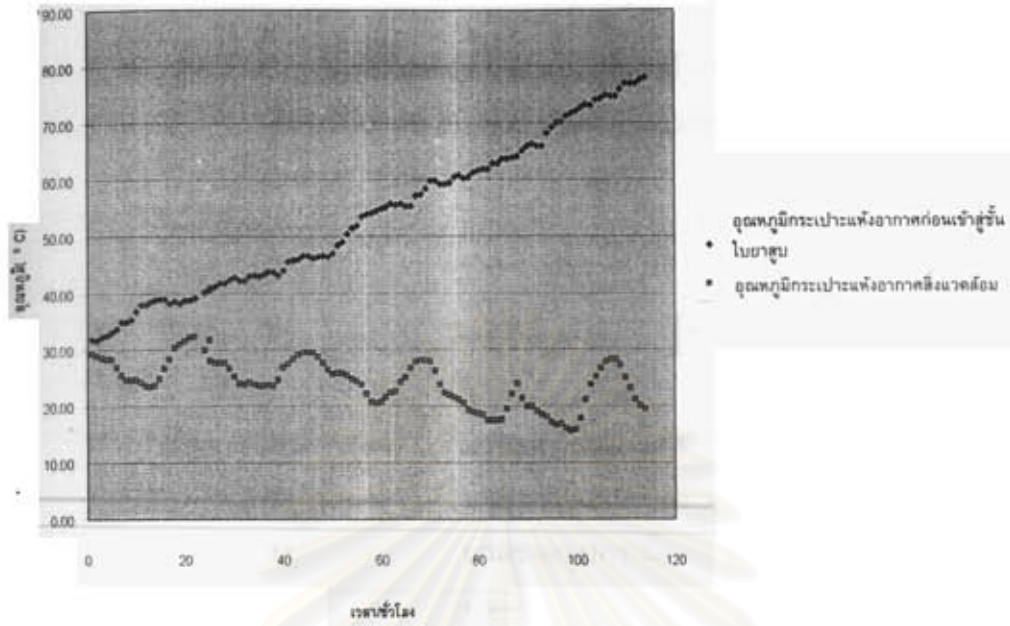
จากตารางที่ 3.8.1 และตารางที่ 3.8.2 แสดงให้เห็นว่าพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นห้องปรมโบยาสูป จากการคำนวณโดย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์(FE) และจากการทดลองของ Chang et.al มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 3 ช่วงการปรม

จากผลการศึกษาของ A.E.DELSANTE และ Chin C. Yang นำมาเปรียบเทียบกัน โดยใช้พื้นที่ห้องปรมโบยาสูปยาว 10 เมตร กว้าง 3.25m จะใช้ข้อมูลในการคำนวณหาผลการทดลองครั้งที่ 1 ที่ บริษัท สหโบยาสูป จำกัด โดยข้อมูลและผลของการคำนวณพลังงานความร้อนสูญเสียผ่านพื้นของผลการศึกษาของทั้ง 2 ผู้วิจัยแสดงในรูปที่ 3.8.1

จากรูปจะเห็นว่าผลการศึกษาทั้ง 2 มีค่าใกล้เคียงกัน และมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึง ใช้สมการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นห้องปรมโบยาสูปที่ทำการศึกษาโดย A.E.DELSANTE



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8.4 แสดงข้อมูลและผลการคำนวณพลังงานสูญเสียผ่านพื้นที่นจากสมการทางคณิตศาสตร์ของ A.E. DELSANTE และผลการทดลองของ Chang et.al

2.5.2 Q_{ss} เป็นพลังงานที่สะสมในโครงสร้างของห้องปั๊มไบนาสูบ โดยโครงสร้างประกอบด้วยพื้นคอนกรีต, โครงสร้างเหล็ก และอุปกรณ์ใช้แขวนไบนาสูบ ซึ่ง

จะได้สมการ

$$Q_{ss} = [M_c C_{p_c} + M_s C_{p_s} + M_r C_{p_r}] [T_i - T_{i-1}]$$

โดย	M_c	=	มวลของคอนกรีตในห้องปั๊ม	kg
	M_s	=	มวลของโครงสร้างของห้องปั๊ม	kg
	M_r	=	มวลของอุปกรณ์แขวนไบนาสูบ	kg
	C_{p_c}	=	ความจุความร้อนจำเพาะของคอนกรีต	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$
	C_{p_s}	=	ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$
	T_{i-1}	=	อุณหภูมิของอากาศในห้องปั๊มที่เวลา $t-\Delta t$	C
	T_i	=	อุณหภูมิของอากาศในห้องปั๊มที่เวลา t	C

2.6 Q_m เป็นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มและรักษาอุณหภูมิของไบนาสูบ ตลอดช่วงทำการปั๊มไบนาสูบฯ ดังสมการ

$$Q_m = (C_{p_w} M_i + C_{p_t} M_t)(T_i) - (C_{p_w} M_{i-1} + C_{p_t} M_t)(T_{i-1}) \quad \text{kJ}$$

โดย	M_{i-1}	=	น้ำหนักน้ำในไบนาสูบที่เวลา $t-\Delta t$	kg
	M_i	=	น้ำหนักน้ำในไบนาสูบที่เวลา t	kg
	C_{p_w}	=	ค่าความจุความร้อนของน้ำ	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$
	C_{p_t}	=	ค่าความจุความร้อนของไบนาสูบ	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$
	T_{i-1}	=	อุณหภูมิของอากาศในห้องปั๊มที่เวลา $t-\Delta t$	C
	T_i	=	อุณหภูมิของอากาศในห้องปั๊มที่เวลา t	C

3.9 การแก้ปัญหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของ การใช้พลังงานในการบ่มใบยาสูบพันธุ์เวอร์จิเนียแบบอัดแน่น

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของการใช้พลังงานใน
การบ่มใบยาสูบฯ มีดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{D_s}{\rho_a V_a} \frac{\partial MC}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{MC - MC_e}{MC_o - MC_e} = e^{-(0.23G + 0.0016)t} \quad (2)$$

เมื่อ $MC_e = \frac{2.62}{T(1-\phi)^{0.637}} - 3.05 \times 10^{-4} \times T \times \phi$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\frac{\psi_T}{dt} - \left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} \right]_T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} C_{p_w} T}{C_{p_r} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx} \quad (3.1)$$

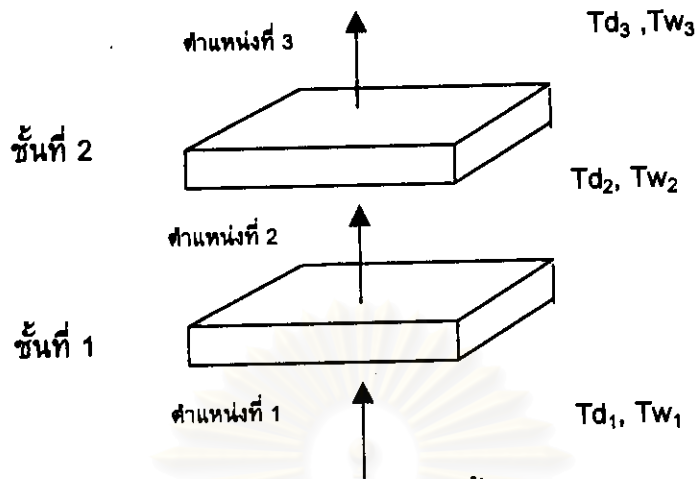
สำหรับ $T < 45^\circ\text{C}$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-\left[D_s C_{p_w} \frac{\partial MC}{\partial t} \right]_T}{\rho_a V_a} - \frac{\frac{\partial W}{\partial x} (2501) - \frac{\partial W}{\partial x} C_{p_w} T}{C_{p_r} + W C_{p_w} + C_{p_w} \frac{\partial W}{\partial x} dx}$$

(3.2)

สำหรับ $T > 45^\circ\text{C}$

เมื่อ $\psi_T = M_{\text{drymatter}} \times 0.476 \times [2.25T - 29.81 + (1607.7 - 85.1T + 1.126T^2)^{1/2}]$

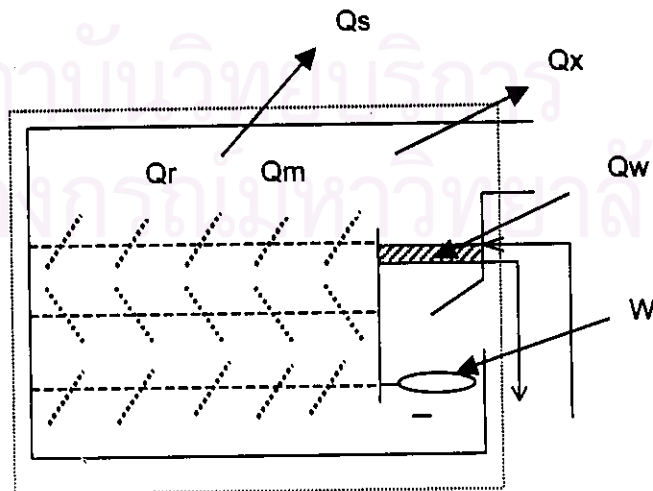


รูปที่ 3.9.1 แสดงการแบ่งชั้นของโอบยาสูบ

ในการพิจารณาแบบจำลองฯ จะมีขั้นตอนการคำนวณโดยใช้สภาวะของอากาศที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นข้อมูลเพื่อคำนวณสภาวะอากาศที่ตำแหน่งที่ 2 และใช้ผลการคำนวณจากตำแหน่งที่ 2 นี้เป็นข้อมูลเพื่อไปคำนวณหาสภาวะอากาศที่ตำแหน่งที่ 3 และทำนองเดียวกันนี้ต่อไป จนถึงชั้นบนสุดของชั้นโอบยาสูบโดยการคำนวณจะใช้สมการที่ (1), (2), (3.1) และ (3.2) ดังแสดงในรูปที่ 3.9.1

หลังจากได้สภาวะของอากาศชั้นบนสุดของชั้นโอบยาสูบ ซึ่งก็เป็นสภาวะของอากาศที่ไหลออกนอกห้องปมโอบยาสูบแล้วต่อไปใช้สมการ

$$Q_w + Q_r - W = Q_x + Q_s + Q_m \quad (4)$$



รูปที่ 3.9.2 แสดงการสมดุลย์พลังงานความร้อนของห้องปมโอบยาสูบฯ

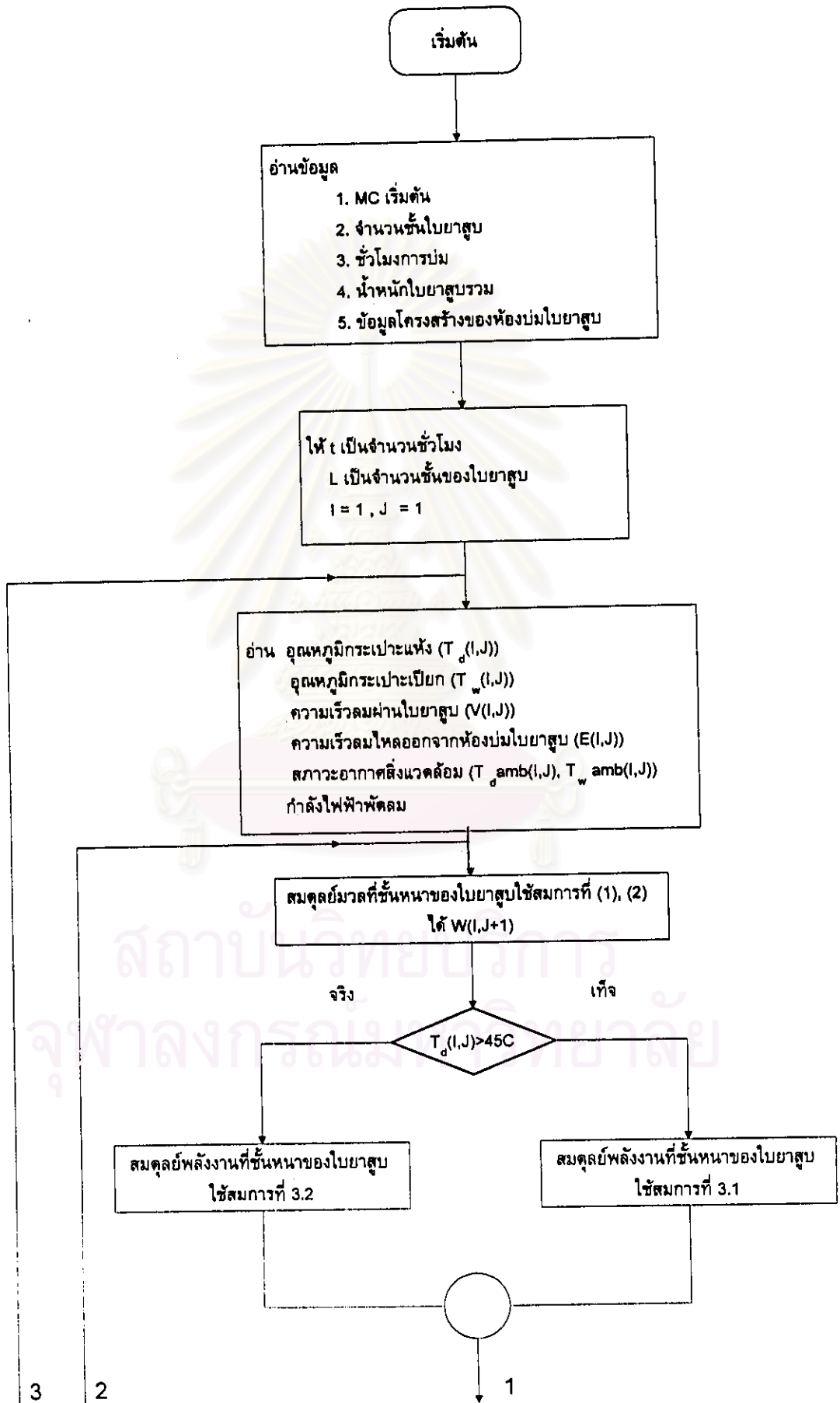
เพื่อใช้คำนวณหา Q_w , โดย Q_r , Q_x , Q_s , Q_m และ W ใช้ตามสมการในหัวข้อ 3.8 โดยมี สมดุลย์พลังงานความร้อนดังรูปที่ 3.9.2 และใช้สมการ

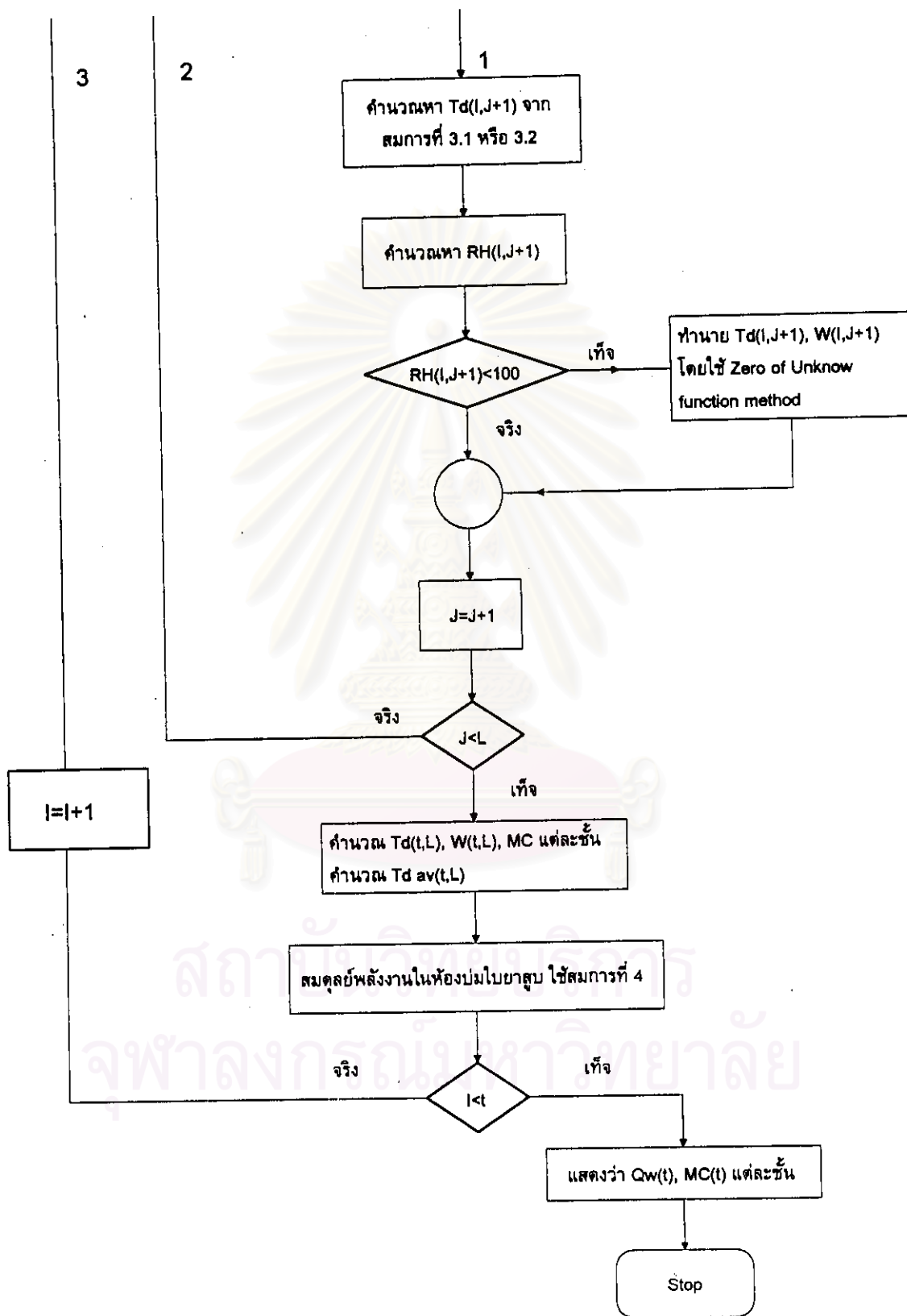
$$Q_w = Q_x + Q_s + Q_m - Q_r + W$$

หา Q_w ที่เวลาใดๆ ตลอดช่วงการบ่มใบยาสูบ โดยขั้นตอนการคำนวณจะแสดงใช้ใน Flow Chart of Energy Model for tobacco curing



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.9.3 แสดง Flow Chart ของ energy Model for tobacco curing

3.10 พลังงานความร้อนทางทฤษฎีที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ

พลังงานความร้อนทางทฤษฎีที่ใช้ในการบ่มใบยาสูบ (Q_{the}) คือพลังงานความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำที่อยู่ในใบยาสูบ รวมกับพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิใบยาสูบ

โดยมีสมการเป็น	Q_{the}	=	$\bar{H} \cdot \Delta M + Q_m$	
เมื่อ	\bar{H}	=	Heat of Vaporization	kJ/kg
		=	$2501 + C_{p_w} T$	kJ/kg
	ΔM	=	น้ำที่ระเหยจากใบยาสูบในเวลา Δt	
	Q_m	=	ดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.8	kJ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย