การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

# คุณลักษณะการอบแห้งพริกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด

# Drying Characteristics of Chilli using Fluidized bed Technique

กิตติ สิทธิประภาพร[1)] และ กิตติชัย ไตรรัตนศิริชัย[2)]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002
โทร 0-43202845 โทรสาร 0-43202849 E-mail: st_kitti@hotmail.com[1], kittri@kku.ac.th[2]

Kitti Sittiprapaporn[1] Kittichai Trirattanasirichai[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Khon Kaen, 40002, Thailand
Tel: 0-43202845 Fax: 0-43202849 E-mail: st_kitti@hotmail.com[1], kittri@kku.ac.th[2]

**บทคัดย่อ**

พริก หรือ *Capsicum anum Linn* เป็นเครื่องเทศที่ใช้กันมากในการปรุงอาหาร เนื่องจากมีรสเผ็ดและมีสีแดง พริกที่เก็บสดจะมีความชื้นประมาณ 80% d.b. ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำการอบให้แห้งเพื่อประโยชน์ในการเก็บรักษาและการขนย้าย ในการอบพริกให้แห้งภายใต้แสงอาทิตย์จะใช้เวลาประมาณ 12 - 15 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของดินฟ้าอากาศและคุณภาพของพริก ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการอบแห้งพริกด้วยเครื่องอบแห้ง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคของฟลูอิดไดซ์เบดในการอบแห้งพริก โดยทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งแบบชั้นบาง อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ทางเข้าห้องอบแห้ง 4 ระดับคือ 70°C, 80°C, 90°C และ 100°C ความเร็วลมของอากาศร้อน 5 ระดับคือ 7, 7.5, 8, 8.5 และ 9 m/s จากการทดลองพบว่า พริกจะถูกอบให้แห้งและมีความชื้นเป็น 17% d.b. ในระยะเวลา 2 - 4 ชม.และพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความชื้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Wang และ Singh

**Abstract**

Chili, *Capsicum anum Linn*, the most common spice using in Thai food due to their pungent taste and red color. The freshly harvested chilies, contain about 80% d.b. moisture content required drying to a level of safe storage and handling. Presently, sun drying is used which takes about 12 to 15 days depending upon weather conditions and quality of chilies. These disadvantages can be eliminated by adopting the mechanical dryers Fluidized technique was used in this study. For chili drying, the temperature of hot air of 70°C, 80°C, 90°C and 100°C with an air velocity of 7, 7.5, 8, 8.5 and 9 m/s were used to determine the characteristic of chili. The result showed that the moisture content of chili was reduce to 17% d.b. within 2 to 4 hours. The changing of moisture behavior can be described by Wang and Singh's equations.

---

1) นักศึกษาปริญญาโท Graduate student

2) รองศาสตราจารย์ Associate Professor

## 1.บทนำ

พริก หรือชื่อทางวิทยาศาสตร์เป็น *Capsicum anum Linn* เป็นพืชที่อยู่ในตระกูล *Solanaceae* ซึ่งจัดเป็นตระกูลเดียวกันกับ มะเขือ มะเขือเทศ มันฝรั่ง และยาสูบ เชื่อกันว่าพริกมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาเขตร้อน ก่อนมีการเผยแพร่ไปตามส่วนต่างๆ ของทวีปยุโรปและเอเชีย พริกเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและอยู่คู่สังคมไทยมานาน คนไทยนิยมใช้พริกเป็นเครื่องปรุงแต่งรสชาติอาหาร สารให้ความเผ็ดในพริกนอกจากจะทำให้อาหารมีรสชาติที่มีเอกลักษณ์แล้ว ยังมีคุณสมบัติทางการแพทย์และวงการเภสัชกรรมอีกด้วย สารดังกล่าวเรียกว่า แคบไซซิน (capsaicin) ซึ่งสารแคบไซซินจะออกฤทธิ์ต่อระบบต่างๆ ของร่างกายเช่น ในระบบทางเดินอาหาร แคบไซซินจะเป็นส่วนผสมในยาน้ำผสม เพื่อเป็นยาน้ำ ยาเจริญอาหาร ยาขับลม ในระบบไหลเวียนเลือดและระบบหายใจ แคบไซซินจะช่วยให้หลอดเลือดขยายตัว และการไหลเวียนของเลือดเพิ่มขึ้น บรรเทาอาการปวดเมื่อย ปวดกล้ามเนื้อในระบบประสาทและอุณหภูมิของร่างกาย [1]

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานฟลูอิดไดซ์เซชัน

ให้อนุภาคของของแข็งบรรจุอยู่ภายในคอลัมน์ทรงกระบอกกลมโดยที่มีตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่เล็กที่สุดของของแข็ง เมื่อเราให้ของไหลผ่านเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ของไหลจะไหลผ่านตะแกรงผ่านกลุ่มอนุภาคแล้วออกจากคอลัมน์ทางด้านบน ถ้าหากใช้ความเร็วของของไหลต่ำๆ อนุภาคจะอยู่กับที่และเรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปเรื่อยๆ จะถึงจุดหนึ่งที่อนุภาคเริ่มขยับตัวมีการจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีการเคลื่อนไหวเกิดขึ้นในเบด ที่จุดนี้แรงพยุงอนุภาคของแข็งเนื่องจากของไหลจะสมดุลกับน้ำหนักของอนุภาคของแข็งลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เบดเริ่มฟลูอิดไดซ์ (Incipiently fluidized bed) ซึ่งความเร็วของของไหลตอนนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ (Minimum fluidization velocity) แต่ถ้าหากยังเพิ่มความเร็วต่อไปอีกเรื่อยๆ จะสังเกตเห็นว่าอนุภาคภายในเบดมีการหมุนเวียนเปลี่ยนที่กันมากขึ้น ในกรณีของไหลเป็นของเหลวลักษณะการขยายตัวของเบดจะสม่ำเสมอ (Particularly

fluidized bed) แต่เมื่อของไหลเป็นก๊าซมักจะเกิดการรวมตัวเป็นฟองก๊าซขึ้นภายในเบด (Aggregative fluidized bed) และถ้าเพิ่มความเร็วสูงขึ้นไปอีกจะพบว่า มีอนุภาคไหลออกไปจากคอลัมน์พร้อมกับของไหล ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่า ความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์ (Terminal velocity) [2]

**2.2 ความเร็วต่ำสุดและความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์**

ณ จุดที่เริ่มเกิดการฟลูอิดไดซ์นั้นอนุภาคของแข็งจะลอยตัวเป็นอิสระ อนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาวะสมดุลโดยที่มีแรง 2 แรงกระทำกับอนุภาคของแข็งได้แก่ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคกับแรงพยุงจากของไหล (แรงเสียดทานรวมกับแรงต้านของของไหล) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปสมการได้ดังนี้

แรงพยุง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน) = น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง

หรือ

$$\Delta PA = W = \left(AL_{mf}\right)\left(1-e_{mf}\right)\frac{g}{g_c}\left(\rho_p-\rho\right) \qquad (1)$$

จัดรูปสมการที่ (1) จะได้

$$\frac{p}{L_{mf}} = \left(1-e_{mf}\right)\frac{g}{g_c}\left(\rho_p-\rho\right) \qquad (2)$$

สมการของ Ergun ได้แสดงความดันตก (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของไหลผ่านเบด ณ จุดเริ่มฟลูอิดไดซ์เบด[3] ดังนี้

$$\frac{\Delta P g_c}{L_{mf}} = \frac{150\left(1-e_{mf}\right)\mu U_{mf}}{{e_{mf}}^3\left(\phi_s d_p\right)^2} + \frac{1.75\left(1-e_{mf}\right)\rho {U_{mf}}^2}{{e_{mf}}^3\phi_s d_p} \qquad (3)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) นำมารวมกันจะได้

$$\frac{1.75}{\phi_s {e_{mf}}^3}\left[\frac{d_p U_{mf}\rho}{\mu}\right]^2 + \left[\frac{150\left(1-e_{mf}\right)}{{\phi_s}^2{e_{mf}}^3}\right]\left[\frac{d_p U_{mf}\rho}{\mu}\right] = \frac{{d_p}^3\rho(\rho_p-\rho)g}{\mu^2} \qquad (4)$$

สมการที่ (4) สามารถคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เบดเกิดฟลูอิดไดซ์เซชั่นได้ ถ้าทราบถึงคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของอนุภาคของแข็งและของไหล

เมื่อระบบอยู่ภายใต้สภาวะฟลูอิดไดซ์เบด และของไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มถูกพาออกไปจากคอลัมน์ ความเร็วที่จุดนี้จะประมาณค่าได้ จากความเร็วตกอิสระของอนุภาคซึ่งหาค่าได้จาก

$$U_t = \left[\frac{4gd_p\left(\rho_p-\rho\right)}{3\rho C_d}\right]^{1/2} \qquad (5)$$

ในการหาค่า ความเร็วตกอิสระของอนุภาค เมื่ออนุภาคเป็นทรงกลมจะพบว่า

$$\begin{aligned} C_d &= 24/R_e & R_e &< 0.4 \\ C_d &= 10/{R_e}^{1/2} & 0.4 &< R_e < 500 \\ C_d &= 0.43 & 500 &< R_e < 200{,}000 \end{aligned}$$

**2.3 Modeling**

ในการทดสอบการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรแบบชั้นบาง[4] มีการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ของความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ความชื้นของผลิตภัณฑ์กับระยะเวลาการอบแห้งในหลายรูปแบบด้วยกันเช่น สมการของ Two-term model สมการของ Henderson และ Pabis model หรือสมการของ Lewis model เป็นต้น

Sharaf-Eldeen, Blaisdell และ Hamdy[5] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้สมการของ Two-term model ในการทำนายอัตราการอบแห้งข้าวโพด ซึ่งสมการของแบบจำลองดังกล่าวจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = A_0\exp\left(-k_0 t\right) + A_1\exp\left(-k_1 t\right) \qquad (6)$$

ส่วนสมการของ Henderson และ Pabis model[6] รวมไปถึงสมการของ Wang และ Singh[7] ซึ่งพัฒนามาจากสมการทฤษฎีการอบแห้ง (theoretical drying equation) จะมีรูปแบบเช่นเดียวกับเทอมแรกของสมการที่ (6) ดังต่อไปนี้

$$MR = \frac{M-M_e}{M_0-M_e} = A_0\exp\left(-k_0 t\right) \qquad (7)$$

แบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้ในการทำนายปรากฏการณ์อบแห้งข้าวโพด[6] ข้าวสาลี[8] และถั่วลิสง[9]

สมการของ Lewis model[10] พัฒนามาจากความสัมพันธ์ของอัตราการอบแห้ง ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของความชื้นของวัสดุในขณะที่อบแห้งกับความชื้นสมดุลดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k_0\left(M-M_e\right) \qquad (8)$$

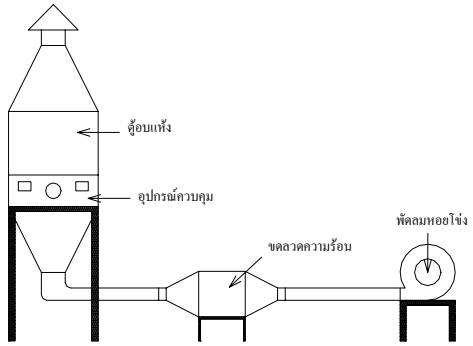
เมื่อทำการอินทิเกรทสมการข้างต้นจะได้

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k_0 t) \quad (9)$$

**3.การทดสอบ**

**3.1 อุปกรณ์การทดสอบ**

อุปกรณ์อบแห้งแสดงในรูปที่ 1 ได้ถูกออกแบบและประกอบขึ้นที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งประกอบด้วยพัดลมหอยโข่ง 1 ชุด พร้อมมอเตอร์ไฟฟ้า (ขนาด 3 hp) ชุดควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า ขดลวดความร้อนขนาด 500 watt 7 ชุด และขนาด 1000 watt 14 ชุด ชุดควบคุมอุณหภูมิ ท่อนำอากาศร้อน ตู้อบแห้งหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส พร้อมทั้งถาดบรรจุวัสดุในการอบแห้ง




รูปที่ 1 อุปกรณ์ทดสอบ

**3.2 ขั้นตอนการทดสอบ**

พริกจะถูกนำมาวางเรียงลงในถาดเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นพริกตามที่กำหนดคือ 30 mm ก่อนทำการกำหนดระดับเงื่อนไขความเร็วลมในการทดลอง จะต้องสังเกตลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์ โดยทำการปรับเปลี่ยนระดับอัตราการไหลของลมร้อน ส่วนระดับเงื่อนไขอุณหภูมิจะมีการปรับเปลี่ยนไปตามระดับต่างๆ โดยมีการเปรียบเทียบสีกับพริกแห้งที่มีขายตามท้องตลาด

ในการทดลองจะทำการวัดหาค่าน้ำหนักพริกทุกๆ 5 นาทีในช่วงครึ่งชั่วโมงแรก ทุกๆ 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงต่อมา และทุก 15 นาที หลังจากนั้น น้ำหนักพริกที่สูญเสียไปจากการอบแห้ง จะหาค่าได้จากการนำเอาถาดบรรจุพริกออกไปชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งดิจิทัลอย่างรวดเร็ว และนำเอาถาดบรรจุพริกใส่กลับเข้าไปในชุดอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งดำเนินการทดลองอย่างต่อเนื่อง และการทดลองจะหยุดลงเมื่อน้ำหนักของพริกมีค่าคงที่ ในการทดลองภายใต้เงื่อนไขแต่ละเงื่อนไข ผู้วิจัยจะดำเนินการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ

**4.ผลการทดลองและสรุปผล**

**4.1 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของพริก**

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ระดับความเร็วลมร้อนระดับเดียวกันพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับของอุณหภูมิลมร้อนเป็น 70 °C, 80 °C, 90 °C และ 100°C การเปลี่ยนแปลงของความชื้นของพริกมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดในระดับ 90 °C และ 100°C โดยความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 90 นาทีแรก และจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีระดับความชื้นคงที่ประมาณ 17% เมื่อเวลาผ่านเลย 2 ชั่วโมงแล้ว และเมื่อพิจารณาที่ระดับอุณหภูมิของลมร้อนระดับเดียวกันพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับความเร็วลมร้อนเป็น 7, 7.5, 8, 8.5 และ 9 m/s ผลกระทบของความเร็วของลมร้อนจะไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความชื้นอย่างมีนัยยะสำคัญอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2

**4.2 ค่าความชื้นสมดุลของพริก**

จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของความชื้นของตัวอย่างพริก ที่นำไปอบแห้งด้วยแสงอาทิตย์ ในระยะเวลาประมาณ 30 วันพบว่าความชื้นของพริกจะมีค่าประมาณ 5.43% d.b. และเมื่อเพิ่มระยะเวลาของการอบแห้งต่อไปพบว่า ค่าความชื้นของพริกไม่ลดลงต่อไปอีก ดังนั้น ค่าความชื้น 5.43% d.b. จะจัดให้เป็นค่าความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content, EMC) ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปใช้ในการหาค่าอัตราส่วนความชื้น (moisture ratio, MR)

**4.3 คุณลักษณะการอบแห้งพริกด้วยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด**

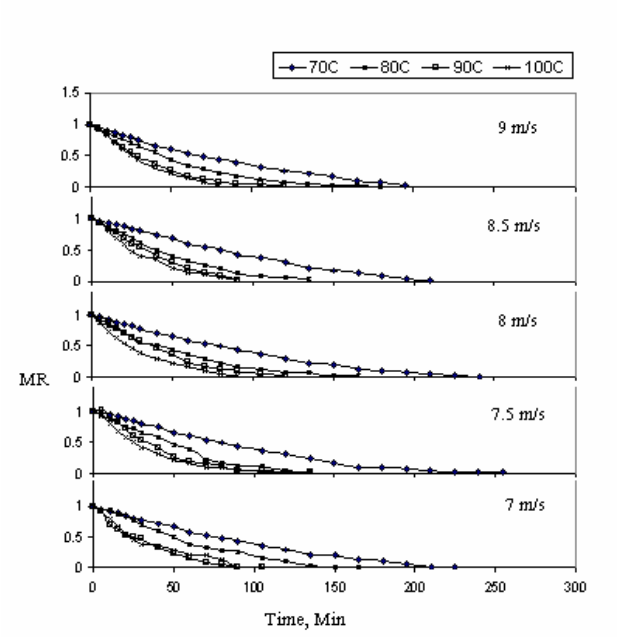
ข้อมูลของอัตราส่วนความชื้นของพริกกับระยะเวลาในการอบแห้งจากการทดลอง จะมีความสัมพันธ์มีอยู่ในรูป exponential model ดังนี้

$$MR = A\exp(-kt) \quad (10)$$

โดยค่าคงที่ของการอบแห้ง $A$ และ $k$ จะหาได้จากความสัมพันธ์ของระดับอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนได้ดังนี้

$$A = 7.2558 - 0.0417(T) - 0.0178(V) + 0.0044(TV) - 1.8997\log(V) \quad (11)$$

$$k = 0.3226 + 0.0001(T) + 0.0285(V) + 0.0001(TV) - 0.2797\log(V) \quad (12)$$




รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความชื้นเทียบกับเวลาที่ระดับอุณหภูมิและความเร็วลมร้อนต่างๆ

**เอกสารอ้างอิง**


[1] มณีฉัตร นิกรพันธุ์ (2541), พริก, ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[2] สมบัติ ขอทวีวัฒนา (2529), กรรมวิธีการอบแห้ง, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] สมศักดิ์ ดำรงเลิศ (2528), ฟลูอิดไดซ์เซชั่น, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[4] ASAE (2002), Thin-Layer Drying of Agricultural Crop, ASAE Standard 2002, ANSI/ASAE S448.1 jul01, 592-595.

[5] Sharaf-Eldeen et al., 1980. Y.I. Sharaf-Eden, J.L. Blaisdell and M.Y. Hamdy, Amodel for ear corn drying, Transaction of ASAE 23 1980 pp. 1261-1265

[6] Henderson, S.M., and Pabis, S. (1969). Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. Journal of Agriculture Engineering Research, 6(3) 169-174.

[7] Wang, C.Y., and Singh, P., (1978). A Single Layer Drying Equation for Rough Rice. Paper No. 78-3001. Am.Soc.Agr.Eng., St.Joseph. MI.

[8] Watson, E. L., and Bhargava, V.k. (1974). Thin layer studies on wheat. Canadian Agricultural Engineering, 16, 18-22.

[9] Moss, J.R., and Otten, L. (1989). A relationship between color development and moisture content during roasting of peanut. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 22, 34-39.

[10] Lewis, 1921. W.K. Lewis , The rate of drying of Solids materials. Industrial Engineering Chemistry 13 (1921), p.427.


**สัญลักษณ์**

$\Delta P$ = ค่าการลดของความดัน ($N/m^2$)

$A$ = พื้นที่ภาคตัดขวางของภาชนะหรือของเบด (m.)

$W$ = น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง (kg.)

$L_{mf}$ = ความสูงของเบดเมื่อเกิดสภาพฟลูอิดไดซ์ (m.)

$e_{mf}$ = Void fraction

$g$ = Gravitational acceleration ($m/s^2$)

$g_c$ = Gravitational constant

$\rho, \rho_p$ = ความหนาแน่นของไหลและของแข็งตามลำดับ ($kg/m^3$)

$\mu$ = ค่าความหนืดของของไหล (kg/m.s)

$d_p$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m.)

$\phi_s$ = ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาค (พื้นที่ผิวของทรงกลม / พื้นที่ผิวของอนุภาค)

$U_{mf}$ = ค่าความเร็วต่ำที่สุดในการฟลูอิดไดซ์ (m/s)

$U_t$ = ความเร็วตกอิสระของอนุภาค หรือความเร็วสุดท้ายของการฟลูอิดไดซ์ (m/s)

$C_d$ = ค่าสัมประสิทธิ์การหน่วง (Drag coefficient) หาค่าได้จากการทดลอง

$M, M_o, M_e$ = ความชื้นของวัสดุ ,ความชื้นเริ่มต้น และความชื้นสมดุลตามลำดับ

$A, k, A_o, k_o, A_1, k_1$ = ค่าสัมประสิทธิ์หลักของแบบจำลอง

$T$ = อุณหภูมิลมร้อน ($^{\circ}C$)

$V$ = ระดับความเร็วของลมร้อน (m/s)