

**การหาสมการความชื้นสมดุลของถั่วเขียว**  
**Equilibrium Moisture Content Isotherms of Mungbean**

ธีระพล ตีลกุล<sup>1</sup>**Abstract**

The moisture isotherms of mungbean were determined at temperatures of 35, 45 and 55 °C using isopiestic method. The effect of initial moisture content of mungbean on equilibrium moisture content was also studied. Five different models namely, Henderson equation, Chung and Pfof equation, Halsey equation, Sehgal equation and G.A.B. equation were used to represent the experimental data. The Sehgal equation, which provided best fit for the experimental data, was subsequently used for calculating the latent heat of moisture vaporization from mungbean based on the Othmer's equation. It found that for moisture contents above 20% (dry basis), there is little difference between the heat of vaporization of moisture from mungbean and that of free water

**Keywords:** mungbean, equilibrium moisture content, latent heat of vaporization, initial moisture content

**บทคัดย่อ**

การทดลองนี้ได้ศึกษาความชื้นสมดุลของถั่วเขียวที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 35 45 และ 55 °C ด้วยวิธีสถิติ รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นต่อความชื้นสมดุลของถั่วเขียว รูปแบบสมการที่นำมาอธิบายผลการทดลองมี 5 สมการ คือ Henderson Chung และ Pfof Halsey Sehgal และ G.A.B ผลการทดลองพบว่า สมการของ Sehgal และ G.A.B อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด จากนั้นใช้สมการของ Sehgal มาคำนวณหาค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดถั่วเขียว ด้วยวิธีของ Othmer พบว่าเมื่อความชื้นของถั่วเขียวมากกว่า 20% (d.b.) ค่าความร้อนแฝงของการระเหยแตกต่างกันน้อยมาก  
**คำสำคัญ:** ถั่วเขียว, ความชื้นสมดุล, ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ด, ความชื้นเริ่มต้น

**คำนำ**

ความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการวางแผนและจัดการอบแห้งหรือเก็บรักษาเมล็ดถั่วเขียว คือความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content; EMC) และความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ด (Latent heat of vaporization; LHV) ความชื้นสมดุลคือความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีความดันไอเท่ากับความดันไอของอากาศที่อยู่รอบๆ ผลิตภัณฑ์นั้น ค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและชนิดของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ความร้อนแฝงของการระเหยหมายถึงความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสสารจากของเหลวให้เป็นไอที่อุณหภูมิและความดันที่คงที่

ในอดีตมีการหาความชื้นสมดุลในผลิตภัณฑ์เกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด (Ajibola, 1986; Cenkowski *et al.*, 1989; Chen และ Morey, 1989; Mazza และ Jayas, 1991; Talip *et al.*, 1995) ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายคือวิธีสถิติ ซึ่งเป็นวิธีที่ยอมรับกันโดยทั่วไป (Brooker *et al.*, 1981) จากข้อมูลความชื้นสมดุล สามารถนำมาคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดได้ (Cenkowski, *et al.*, 1992; Tagawa *et al.*, 1993; Thompson และ Shedd, 1954)

อย่างไรก็ตามความชื้นสมดุลของเมล็ดถั่วเขียวยังมีการรายงานอยู่น้อยมากและนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก ดังนั้นวัตถุประสงค์ประการแรกคือศึกษาความสัมพันธ์ของความชื้นสมดุลของเมล็ดถั่วเขียวที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่างๆ กันเพื่อนำไปสร้างเป็นสมการความชื้นสมดุล ประการที่สองคือนำสมการความชื้นสมดุลที่ได้ไปใช้คำนวณหาความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ด

**อุปกรณ์และวิธีการ**

ถั่วเขียว (*Vigna radiata* L.) พันธุ์ชัยนาท 36 ซึ่งมีความชื้นเมล็ดเริ่มต้น 8.7% (d.b.) แบ่งเมล็ดออกเป็น 3 ส่วน เพื่อนำไปเพิ่มความชื้นให้ได้ความชื้น 3 ระดับ คือ 17.93, 24.20 และ 37.04% (d.b.) โดยนำเมล็ดแช่น้ำตามระยะเวลาที่กำหนดของแต่ละระดับความชื้น เมื่อครบกำหนดเวลานำมาผึ่งในร่มประมาณ 2 ชั่วโมง แล้วจึงบรรจุในถุงพลาสติก 2 ชั้น เก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 5 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 1 สัปดาห์ เขย่าถุงทุกวันเพื่อให้ความชื้นกระจายเข้าไปในเมล็ด ได้อย่างทั่วถึง

นำเมล็ดถั่วเขียวที่มีความชื้น 17.93% (d.b.) มาแบ่งเป็น 12 ส่วนๆ ส่วนละ 30 กรัม นำแต่ละส่วนใส่ตะแกรงที่วางไว้ในโหลแก้วที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัว 6 ชนิดๆ ละ 2 โหล สารละลายเกลืออิ่มตัวได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมไนเตรท โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ และแอมโมเนียมซัลเฟต ปิดฝาขวดให้แน่น จากนั้นนำโหลแก้วทั้งหมดใส่ไว้ในตู้อบเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 °C หลังจากความชื้นเมล็ดเข้าสู่ความชื้นสมดุลจึงนำไปหาความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำในทำนองเดียวกัน แต่เปลี่ยนความชื้นเริ่มต้นเป็น 24.20 และ 37.04% (d.b.) ตามลำดับ

การวิเคราะห์ข้อมูล รูปแบบสมการที่ใช้มี 5 สมการคือ Henderson (1952), Chung และ Pfost (1967), Halsey (1948), Sehgal (1980) และ Guggenheim-Anderson-de Boer (G.A.B.) (1986)

สมการของ Henderson

$$1 - rh = \exp(-a T M^b) \quad (1)$$

สมการของ Chung and Pfost

$$rh = \exp\left[-\frac{a}{T} \exp(-bM)\right] \quad (2)$$

สมการของ Halsey

$$rh = \exp\left[-\frac{a}{T} M^{-b}\right] \quad (3)$$

สมการของ Sehgal

$$rh = \exp\left[-\frac{a}{\sqrt{T}} \exp(-bM)\right] \quad (4)$$

สมการของ G.A.B.

$$M = \frac{m_0 c k rh}{(1 - k rh)(1 - k rh + c k rh)} \quad (5)$$

เมื่อ	rh	=	ความชื้นสัมพัทธ์, ทศนิยม
	M	=	ความชื้นสมดุล, % d.b.
	T	=	อุณหภูมิ, °C
	a, b, c, k	=	ค่าคงที่
	m <sub>0</sub>	=	monolayer moisture content

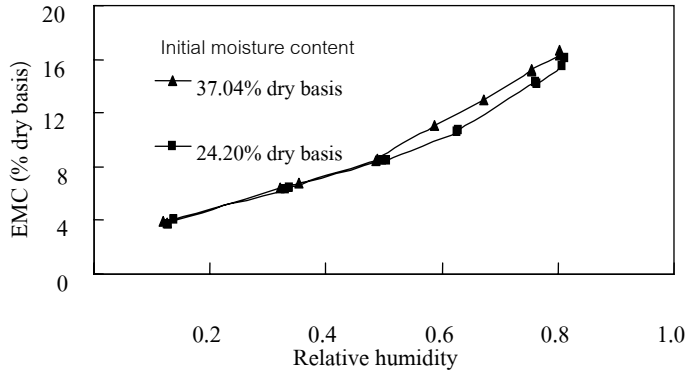
การหาค่าคงที่ของสมการที่ 1 ถึง 4 ได้จากนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ส่วนของสมการที่ 5 ให้ใช้วิธี nonlinear regression ทำการเปรียบเทียบสมการต่างๆ โดยใช้ค่า coefficient of determination (r<sup>2</sup>) และ ค่า Root Mean Square Error (RMSE) สมการที่มีค่า r<sup>2</sup> สูงสุดพร้อมด้วยค่า RMSE ต่ำสุด ถือว่าเป็นสมการที่อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด ค่า RMSE คำนวณดังนี้

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (M_{\text{expt}} - M_{\text{est}})^2}{n - 1} \right]^{0.5} \quad (6)$$

เมื่อ	M <sub>expt</sub>	=	ความชื้นที่ได้จากการทดลอง, % d.b.
	M <sub>est</sub>	=	ความชื้นที่ได้จากการคำนวณ, % d.b.
	n	=	จำนวนค่าสังเกต

**ผลและวิจารณ์**

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์ ในระดับใดระดับหนึ่ง ความชื้นสมดุลของถั่วเขียวลดลง ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับเมล็ดพืชอื่นๆ (Jayas และ Mazza, 1991; Oymael *et al.*, 1997) ในขณะที่เดียวกัน เมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 50% จะเห็นได้ชัดเจนดังแสดงในภาพที่ 1 อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 50% ความแตกต่างของความชื้นสมดุลจะลดลง



**ภาพที่ 1** อิทธิพลของความชื้นเริ่มต้นต่อความชื้นสมดุลของถั่วเขียวที่อุณหภูมิ 45 °C

ข้อมูลความชื้นสมดุล ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้นำมาหาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการต่างๆ ดังได้แสดงผลเปรียบเทียบของสมการต่างๆ ในตารางที่ 1 และ 2 ซึ่งพบว่าสมการทั้งหมดให้ค่า  $r^2$  สูง แต่มีค่า RMSE แตกต่างกัน สำหรับสมการ G.A.B. เป็นสมการที่ค่าคงที่ต่างๆ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับสมการที่เหลือทั้ง 4 ได้ สมการของ Sehgal และ G.A.B. อธิบายผลการทดลองได้ดีเนื่องจากมีค่า  $r^2$  สูงสุด และมีค่า RMSE ต่ำสุด

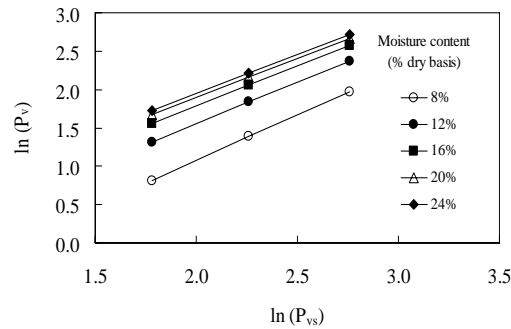
**ตารางที่ 1** ค่าคงที่ของสมการความชื้นสมดุล 4 แบบ

Model	Parameter		$r^2$	RMSE
	a	B		
Hederson (Eq. 1)	0.00033692	1.72245	0.974	0.968
Chung and Pfost (Eq. 2)	172.538	0.18500	0.971	0.769
Halsey (Eq. 3)	867.630	1.58560	0.952	1.586
Sehgal (Eq. 4)	24.7323	0.18029	0.983	0.588

**ตารางที่ 2** ค่าคงที่ของสมการ G.A.B. ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ

Parameter	Temperature (°C)		
	35	45	55
$m_0$	6.70393	6.23079	5.84596
c	15.14627	9.90907	8.02039
k	0.75357	0.78645	0.80975
$r^2$	0.981	0.989	0.994
RMSE	0.612	0.474	0.327

Thompson และ Shedd (1954) ได้อธิบายวิธีการหาค่าความร้อนแฝงของการระเหย โดยนำสมการความชื้นสมดุลมาใช้ประโยชน์ ในการทดลองนี้ได้แทนค่าความชื้นสมดุลตั้งแต่ 8, 12, 16, 20 และ 24% (d.b.) ในสมการของ Sehgal ณ อุณหภูมิ 35, 45 และ 55 °C จากผลดังกล่าวทำให้ทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละระดับความชื้นสมดุลและอุณหภูมิ นำค่าความชื้นสัมพัทธ์มาคำนวณหาค่าความดันไอของไอน้ำที่อยู่ในเมล็ด เมื่อทราบค่าความดันดังกล่าว จึงนำมา plot กับความดันไออ้อมตัวตามวิธีของ Othmer ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของไอน้ำที่อยู่ในเมล็ด ( $P_v$ ) กับความดันไออิ่มตัว ( $P_{vs}$ ) ตามวิธีของ Othmer

จากวิธีของ Othmer นำมาหาค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดถั่วเขียว ได้สมการดังนี้

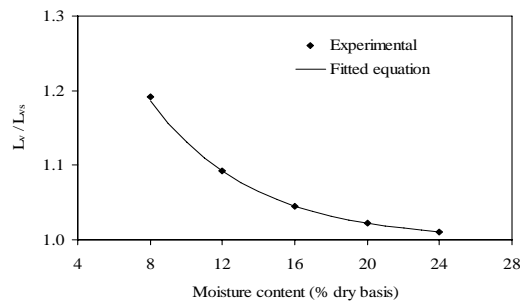
$$L_v = L_{vs} (1 + 0.7600e^{-0.17604M}) \quad (7)$$

เมื่อ

$$L_v = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำในเมล็ดถั่วเขียว, kJ/kg}$$

$$L_{vs} = \text{ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำอิสระ, kJ/kg}$$

$$M = \text{ความชื้นสมดุล, \% d.b.}$$



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของเมล็ดถั่วเขียวกับอัตราส่วนของความร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำในเมล็ดระเหยไปกับการร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำอิสระระเหยไป

จากภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นของเมล็ดมากกว่า 20% (d.b.) ค่าอัตราส่วนของความร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำในเมล็ดระเหยไปกับการร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำอิสระระเหยไป ( $L_v/L_{vs}$ ) แตกต่างกันน้อยมาก แต่ที่ความชื้นของเมล็ดต่ำกว่า 20% (d.b.) ความแตกต่างเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเพราะว่าเมล็ดที่มีความชื้นต่ำต้องใช้ปริมาณความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากเมล็ดเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างน้ำกับของแข็งภายในเมล็ด

### สรุป

ความชื้นสมดุลที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ระดับใดระดับหนึ่งลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อความชื้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ความชื้นสมดุลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 50% จากการเปรียบเทียบสมการความชื้นสมดุลรูปแบบต่างๆ พบว่า สมการของ Sehgal ใช้อธิบายผลการทดลองได้ดีที่สุด จากนั้นใช้สมการนี้มาคำนวณค่าความร้อนแฝงของการระเหย ด้วยวิธีของ Othmer พบว่าเมื่อความชื้นของถั่วเขียวมากกว่า 20% (d.b.) ค่าอัตราส่วนของความร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำในเมล็ดระเหยไปกับการร้อนที่ใช้เพื่อให้น้ำอิสระระเหยไปแตกต่างกันน้อยมาก

### เอกสารอ้างอิง

- Ajibola, O.O. 1986. Equilibrium Moisture Properties of Winged Bean Seed. *Trans. of ASAE*. 29(5): 1485-1487.
- Bakker-Arkema, F.W. 1986. Modeling of Forced Convection in In-Store Grain Drying: The State of the Art. *In* Champ, B. R. and E. Highley (eds). *Preserving Grain Quality by Aeration and In-Store Drying*. ACIAR Proceedings. 15: 89-95.
- Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall. 1981. *Drying Cereal Grains*. The AVI Publ. Co. Inc. Westport. Connecticut. USA. 265 p.
- Cenkowski, S., D.S. Jayas and D. Hao. 1992. Latent Heat of Vaporization for Selected Foods and Crops. *Can. Agr. Eng.* 34(3): 281-286.

- Cenkowski, S., S. Sokhansanj and F.W. Sosulski. 1989. Equilibrium Moisture Content of Lentils. *Can. Agr. Eng.* 31(2): 159-162.
- Chen Chia-Chung and R.V. Morey. 1989. Comparison of Four EMC/ERH Equations. *Trans. of ASAE.* 32(3): 983-990.
- Chung, D.S. and H.B. Pfof. 1967. Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and Their Products. *Trans. of ASAE.* 10(4): 552-555.
- Halsey, G. 1948. Physical Adsorption on Non-uniform Surfaces. *J. of Chem. Phys.* 16: 83-92.
- Henderson, S.M. 1952. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agr. Eng.* 33(1): 29-32.
- Jayas, D.S. and G. Mazza. 1991. Equilibrium Moisture Characteristics of Safflower Seeds. *Trans. of ASAE.* 34(5): 2099-2103.
- Mazza, G. and D. S. Jayas. 1991. Equilibrium Moisture Characteristics of Sunflower Seeds, Hulls, and Kernels. *Trans. of ASAE.* 34(2): 534-538.
- Oymael, B., H.I. Ekiz and M. Turhan. 1997. Adsorption Isotherms of Bulgur. <http://www.confex2.com> (accessed Oct 1997).
- Sehgal, V.K. 1980. Equilibrium Moisture Content Isotherms of Rough Rice based on a Dynamic Method. M. Eng. thesis. Asian Institute of Technology. Bangkok.
- Tagawa, A., S. Murata, and H. Hayashi. 1993. Latent Heat of Vaporization in Buckwheat using the Data of Equilibrium Moisture Content. *Trans. of ASAE.* 36(1): 113-118.
- Talip, M.Z.M., W.R.W. Daud and M.H. Ibrahim. 1995. Moisture Desorption Isotherms of Cocoa Beans. *Trans. of ASAE.* 38(4): 1153-1155.
- Thompson, H.J. and C.K. Shedd. 1954. Equilibrium Moisture and Heat of Vaporization of Shelled Corn and Wheat. *Agr. Engi.* 35 (11): 786-788.