$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{(2n+1)^2}\exp[-(2n+1)^2\frac{\pi^2 D_{eff}\, t}{L^2}] \qquad (1)$$

โดยที่ MR คืออัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย, $MR = (M_t - M_{eq}) / (M_{in} - M_{eq})$

D_{eff} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีหน่วยเป็น m^2/min

t คือเวลาในการอบแห้งมีหน่วยเป็นนาที

L คือความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุมีหน่วยเป็นเมตร

M_t คือความชื้นที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง

M_{in} คือความชื้นที่เวลาเริ่มต้น มีหน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง

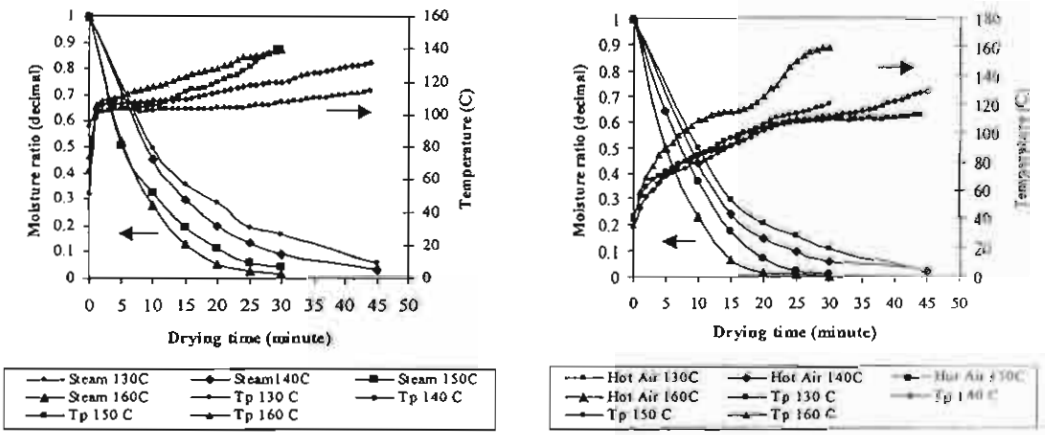
M_{eq} คือความชื้นสมดุล มีหน่วยเป็นร้อยละมาตรฐานแห้ง โดยให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิมากกว่า 100°C

การทดสอบสี

การวัดสีจะทำการวัดการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อหมูขณะทำการอบแห้งโดยใช้เครื่องวัดสีอัตโนมัติ ชนิด Model BYK-Gardner ซึ่งจะแสดงค่าสี 3 อย่างคือ ค่าสีเขียวหรือแดง (a) ค่าสีน้ำเงินหรือเหลือง (b) และค่าความสว่าง (L) โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของสีแดงเท่านั้น

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์



(ก) ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ข) อากาศร้อน

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเนื้อหมูที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ก) และอากาศร้อน (ข) ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

รูปที่ 2ก และ 2ข แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเนื้อหมูที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเนื้อหมูสูงขึ้นทั้งการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกันพบว่า การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากสมการที่ 1 จะใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูสำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius's equation) ดังต่อไปนี้

ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง : $$D_{eff} = 1.00 * 10^{-6} \exp(-\frac{14110}{R(273+T)}) \qquad R^2 = 98.57\% \qquad (3)$$

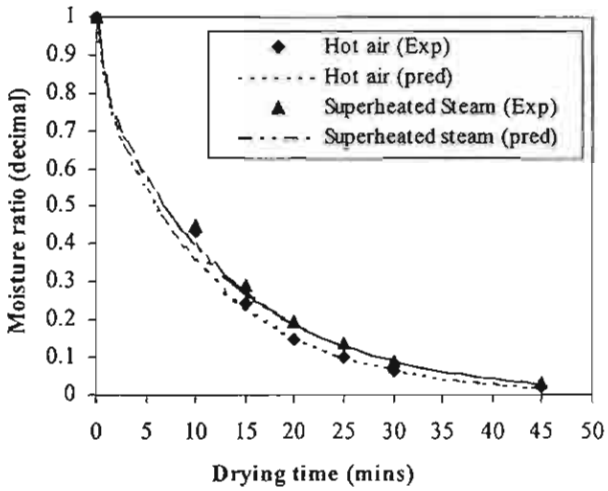
อากาศร้อน : $$D_{eff} = 1.00 * 10^{-6} \exp(-\frac{13636}{R(273+T)}) \qquad R^2 = 97.23\% \qquad (4)$$

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature (°C)	Effective diffusion coefficient ($x10^{-8}$ m^2/min)	
	Hot air	Superheated steam
130	1.708	1.483
140	1.885	1.642
150	2.071	1.809
160	2.264	1.985

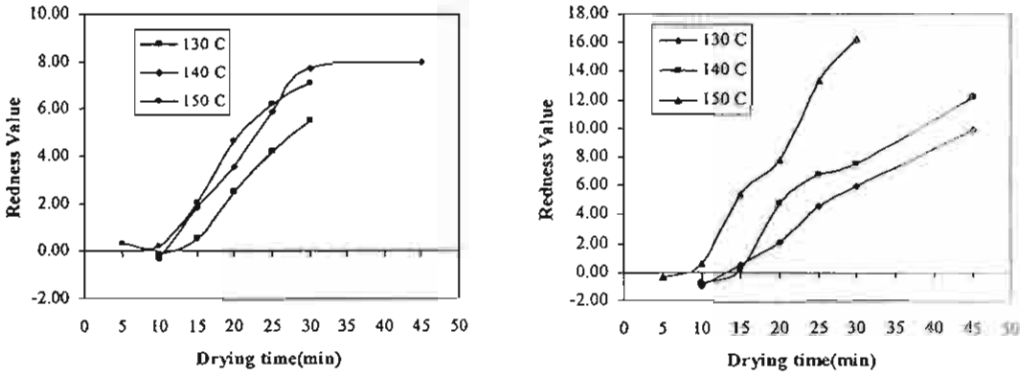
ตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ได้จากสมการที่ 3 และ 4 เมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ กันพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น และในช่วงอุณหภูมิอบแห้งที่ทำการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูเมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อน จะมีค่ามากกว่าเมื่ออบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังนั้นจะทำให้อัตราการอบแห้งเนื้อหมูด้วยอากาศร้อนจะสูงกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อหมูขณะทำการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเนื้อหมูที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 140°C

การเปลี่ยนแปลงสี



(ก) อากาศร้อน (ข) ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าสีแดงของเนื้อหมูที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน (ก) และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ข) ที่อุณหภูมิอบแห้งต่าง ๆ

การเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อหมูที่ทำการอบแห้งจะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแสดงสีแดง จากผลการทดสอบการเปลี่ยนสีของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ

อบแห้งต่าง ๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4ก และ 4ข ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาและอุณหภูมิในการอบแห้งมากขึ้นจะทำให้เนื้อหมูมีสีแดงมีค่ามากขึ้น โดยที่การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำให้เนื้อหมูมีสีแดงมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิอบแห้งเดียวกัน เนื่องจากในช่วงแรกของการอบแห้งอุณหภูมิของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะสูงกว่าที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน (ดังรูปที่ 2 ก และ 2ข) ทำให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (browning reaction) ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมากกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังการอบแห้งมีสีแดงเข้มกว่า

สรุปผล

จากการศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนพบว่า เมื่อทำการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะให้อัตราการอบแห้งต่ำกว่าเมื่ออบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีค่าน้อยกว่าเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ในขณะที่เนื้อหมูที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีสีแดงเข้มกว่าเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดสอบสีอาหาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Mujumdar, A.S. (1995), Superheated steam drying. Handbook of industrial drying, 2nd edition Vol. 2, Macel Dekker Inc.
2. Wimmerstedt, R. (1994), Steam drying: history and future, Drying'94, Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS'94) Vol. A, Australia, pp. 3-14
3. Schwartze, J., and Brocker, S. (2002), A theoretical explanation for the inversion temperature. Chemical Engineering Journal, Vol. 86, pp. 61-67.
4. Moreira, G.R., (2001), Impingement drying of foods using hot air and superheated steam. Journal of Food Engineering, Vol. 49, pp. 291-295
5. Li, Y.B., Seyed-Yagoobi, J., Moreira, G.R., and Yamsaengsung, R. (1999), Superheated steam impingement drying of tortilla chips, Drying Technology, Vol.17(1&2), pp. 191-213.
6. Gou, P., Comaposada, J., and Arnau, J. (2002), Meat pH and meat fibre direction effects on moisture diffusivity in salted ham muscles dried at 5°C, Meat Science, Vol. 61, pp. 25-31.
7. Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. 2nd. Bristol, J.W. Arrowsmith LTD.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบเป็นตัวกลางในการดูดซับ

DRYING OF PADDY USING RICE HUSK AS AN ADSORPTION MEDIUM

กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์[1,*] สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2] อดิศักดิ์ นาถกรณกุล[1] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1]
[1]คณะพลังงานและวัสดุ [2]คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบเป็นตัวกลางในการดูดซับ เพื่อศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรแกลบกับข้าวเปลือก อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของแกลบที่มีผลต่อระยะเวลาในการดูดซับ และความชื้นสุดท้ายของข้าวเปลือก โดยทำการทดลองในภาชนะหุ้มฉนวนที่ปิดสนิทเพื่ออบแห้งข้าวเปลือกจากความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33%d.b. โดยใช้อัตราส่วนระหว่างแกลบต่อข้าวเปลือกเท่ากับ 0.8, 1.5 และ 2.0 ต่อ 1 โดยปริมาตร (0.14, 0.26 และ 0.34:1 โดยมวล) และอุณหภูมิแกลบเริ่มต้น 33, 45, 60 และ 90^{0}C ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นแกลบประมาณ 11.5, 5.0, 2.5 และ 0.8%d.b. จากการทดลอง พบว่าเมื่อใช้แกลบความชื้นเริ่มต้นแกลบต่ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้เร็วกว่าการใช้แกลบความชื้นเริ่มต้นสูง เนื่องจากมีความแตกต่างของความชื้นเริ่มต้นระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกที่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกสูงสามารถอบแห้งได้เร็วกว่าที่อัตราส่วนผสมต่ำ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณแกลบทำให้มีพื้นที่ในการดูดซับความชื้นได้มากขึ้น และในการวิเคราะห์คุณภาพของข้าว พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบและอัตราส่วนระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของร้อยละต้นข้าวและความขาว

ABSTRACT

This research is to study paddy drying using rice husk as an adsorbent medium. The effects of the volumetric mixing ratio between rice husk and paddy, temperature and initial moisture content of rice husk on the adsorption time and final moisture contents of paddy were determined. The experiments were conducted in the closed insulated plastic vessels to dry 33%d.b. paddy by using rice husk at the volumetric mixing ratios of 0.8:1, 1.5:1, and 2.0:1; corresponding to mass ratios of 0.14:1, 0.26:1, and 0.34:1, and the initial rice husk temperatures of 33, 45, 60, and 90^{0}C; corresponding to moisture contents of 11.5, 5.0, 2.5 and 0.8% d.b., respectively. The experimental results showed that rice husk with low moisture content faster desorption rate of paddy moisture content than that with high moisture content. This is because of high moisture gradient between paddy and rice husk with low moisture content. The high mixing ratio resulted in the faster desorption rate of paddy moisture

* **Corresponding author**. Tel.: (02)-4708695 ext 112
E-mail address: k_yong28@hotmail.com (K.Witinantakit)

content than the low on. Initial temperatures of rice husk and the mixing ratios between rice husk and paddy have no effect on head rice yield and whiteness of paddy.

คำสำคัญ: แกลบ, การดูดซับ, สารดูดความชื้น

บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีอากาศร้อนชื้น ข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวมีความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง เพื่อลดความชื้นของข้าวเปลือกให้สามารถเก็บรักษาได้ยาวนานขึ้นโดยไม่สูญเสียคุณภาพ การใช้สารดูดความชื้นผสมกับข้าวเปลือกเป็นวิธีการหนึ่งในการลดความชื้นของข้าวเปลือกให้ลดต่ำลงระดับหนึ่ง เพื่อยืดระยะเวลาในการเก็บให้นานขึ้นก่อนที่จะทำการอบแห้งให้มีความชื้นอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา และการใช้สารดูดความชื้นเป็นการดูดซับความชื้นของข้าวเปลือกที่อุณหภูมิต่ำทำให้เมล็ดข้าวเปลือกไม่เกิดการแตกร้าวเมื่อเปรียบเทียบกับการลดความชื้นอย่างรวดเร็วโดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูง

สารดูดความชื้น (adsorbent) จะดูดซับไอน้ำในอากาศเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าต่ำกว่าความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ และจะคายไอน้ำให้กับอากาศเมื่อความดันไอน้ำที่ผิวของสารดูดความชื้นมีค่าสูงกว่าความดันไอน้ำของอากาศที่อยู่รอบๆ ความดันไอน้ำที่ผิวสารดูดความชื้นจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิและปริมาณความชื้นของสารดูดความชื้นที่สูงขึ้น และมีแนวโน้มสู่จุดสมดุลกับความดันของไอน้ำบริเวณรอบ ๆ ตามเวลาที่ผ่านไป ปริมาณน้ำที่ดูดซับโดยสารดูดความชื้นที่จุดนี้เรียกว่า ความจุสมดุล (equilibrium capacity) [1, 2] การอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้สารดูดความชื้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง คือ สมบัติของสารดูดความชื้น ความชื้นเริ่มต้นและปริมาณสารดูดความชื้น Yamaguchi และคณะ [3], Sturton และคณะ [4] และ Raghavan และคณะ [5] ได้ศึกษาอัตราส่วนโดยมวลระหว่างสารดูดความชื้นกับเมล็ดพืช พบว่าการใช้อัตราส่วนผสมที่สูงขึ้นสามารถลดความชื้นของเมล็ดพืชได้มากขึ้น และการคลุกเคล้ากันระหว่างสารดูดความชื้นและเมล็ดพืชที่ทั่วถึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดความชื้นของเมล็ดพืชได้ดียิ่งขึ้น [3] นอกจากนี้อุณหภูมิเริ่มต้นของสารดูดความชื้นที่สูงสามารถลดความชื้นของเมล็ดพืชได้เพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง [5] และการใช้สารดูดความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำสามารถลดความชื้นของเมล็ดพืชได้ดีกว่าการใช้สารดูดความชื้นที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง [4]

แกลบเป็นผลพลอยได้ส่วนหนึ่งจากการสีข้าวเปลือกซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากเพียงพอต่อความต้องการ แกลบมีลักษณะที่บางและมีรูพรุนสามารถดูดซับความชื้นได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ใช้แกลบเป็นตัวกลางในการดูดซับความชื้น เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกและแกลบที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก ความชื้นและอุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบต่างๆ กัน และคุณภาพของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง คือ ร้อยละต้นข้าวและความขาว

อุปกรณ์และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ คือ ข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 30-33%d.b. โดยใช้แกลบอุณหภูมิเริ่มต้น 33, 45, 60 และ 90°C ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นแกลบประมาณ 11.5, 5.0, 2.5, 0.8%d.b.ตามลำดับ โดยมีอัตราส่วนระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกประมาณ 0.8, 1.5 และ 2.0 ต่อ 1 โดยปริมาตร (0.14, 0.26 และ 0.34:1 โดยมวล) ข้าวเปลือกหลังจากอบแห้งจะนำไปทดสอบคุณภาพของข้าวเปลือกทางด้านกายภาพ ได้แก่ร้อยละต้นข้าว และความขาว ซึ่งรายละเอียดของการทดลองมีดังนี้

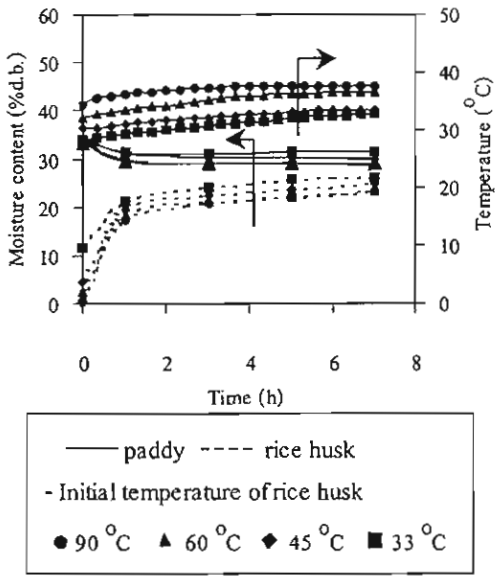
การทดลองนี้ได้ใช้ถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 18 cm สูงประมาณ 22 cm หุ้มด้วย urethane foam หนาประมาณ 2 cm และใยแก้ว (Glass wool) หนาประมาณ 10 cm ข้าวเปลือกที่ใช้ในการทดลองจะถูกทำให้ชื้น แล้วนำไปเก็บในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 3-5°C เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดลองได้นำข้าวเปลือกที่เก็บไว้ในห้องเย็นออกมาทิ้งไว้ในบรรยากาศแวดล้อม จนกระทั่งอุณหภูมิของข้าวเปลือกใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม ส่วนแกลบที่ใช้ทดลองจะนำไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้ข้าวเปลือกประมาณ 1280 g ผสมกับแกลบตามเงื่อนไขแต่ละการทดลอง และวัดอุณหภูมิของผสมระหว่างข้าวเปลือกกับแกลบภายในถังโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกผล (รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ –100-1300°C ความละเอียด ± 0.2% ของค่าที่อ่านได้) จากนั้นนำของผสมระหว่างข้าวเปลือกกับแกลบมาแยกแกลบออกโดยใช้ลมเป็นตัวเป่าแกลบออกจากข้าวเปลือก แล้วนำข้าวเปลือกที่ผ่านการแยกแกลบไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเหลือประมาณ 16%d.b. สุดท้ายนำข้าวเปลือกไปทดสอบคุณภาพการสี และตรวจสอบความขาวของข้าวสารด้วยเครื่องวัดความขาว Kett-C300

สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือก จะเก็บตัวอย่างครั้งละประมาณ 50 g ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

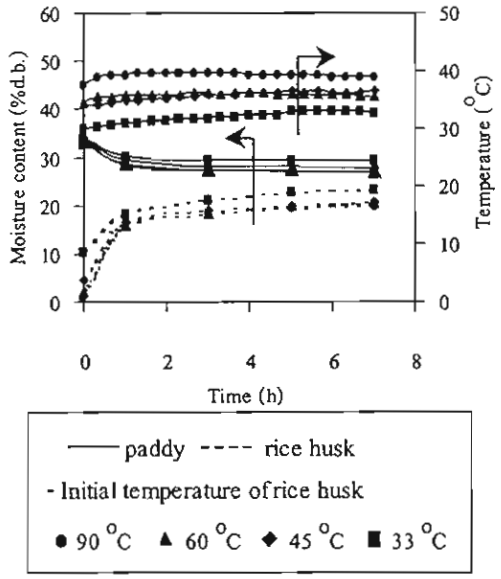
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของอุณหภูมิของผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกภายในถัง

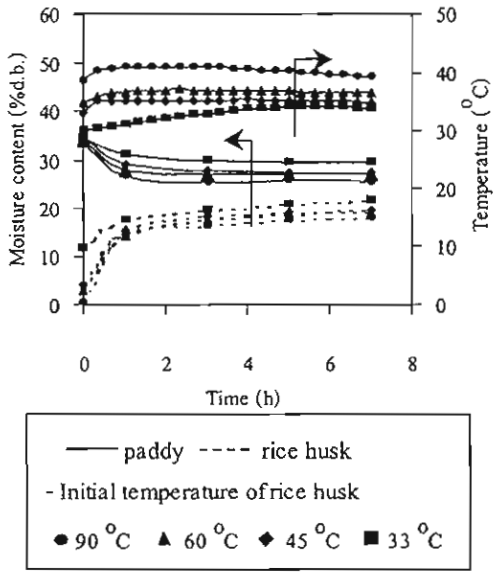
ในการทดลองได้นำแกลบที่อุณหภูมิเริ่มต้น 33, 45, 60 และ 90°C ผสมกับข้าวเปลือกที่อุณหภูมิประมาณ 30°C ที่อัตราส่วน 0.8, 1.5 และ 2:1 โดยปริมาตร (0.14, 0.26 และ 0.34:1 โดยมวล) แกลบมีความหนาแน่นน้อยกว่าข้าวเปลือกประมาณ 5 เท่า เมื่อผสมกับข้าวเปลือกตามเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ส่งผลให้อุณหภูมิของผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกในถังมีค่าประมาณ 31-40°C ซึ่งอุณหภูมิของผสมในถังจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเริ่มต้นและมวลของแกลบที่สูงขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของอุณหภูมิของผสมภายในถังที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองมีค่าประมาณ 1-3°C ดังแสดงในรูปที่ 1



(ก) อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก 0.8:1 โดยปริมาตร (0.14:1 โดยมวล)

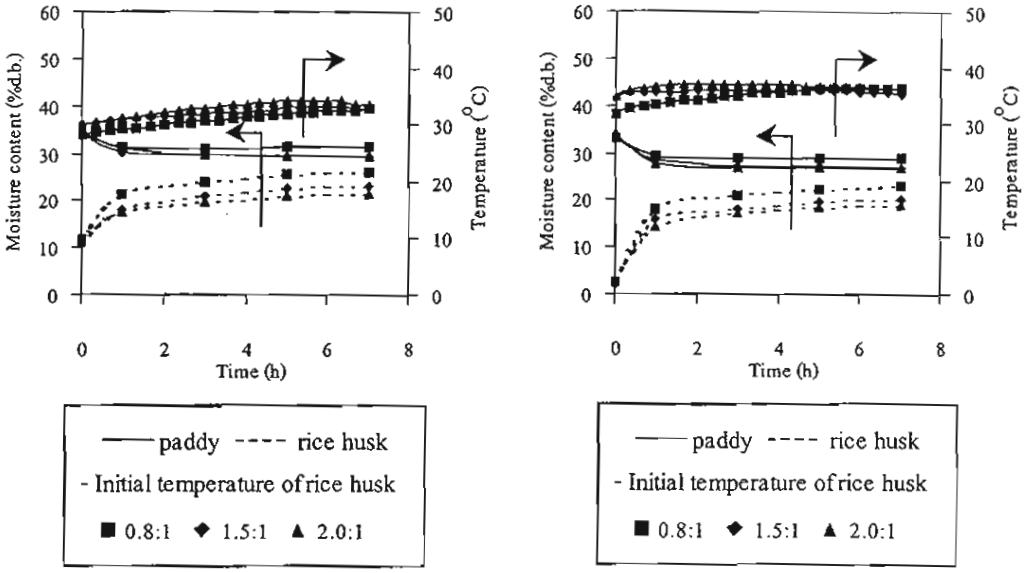


(ข) อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก 1.5:1 โดยปริมาตร (0.26:1 โดยมวล)



(ค) อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก 2.0:1 โดยปริมาตร (0.34:1 โดยมวล)

รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความชื้นของข้าวเปลือกและแกลบ และอุณหภูมิของผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกภายในถัง ที่อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบต่างๆ กัน



(ก) อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบ 33°C (ข) อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบ 60°C

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความชื้นของข้าวเปลือกและแกลบ และอุณหภูมิของผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกภายในถัง ที่อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกต่างๆ กัน

ผลของความชื้นและอุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบต่อการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความชื้นข้าวเปลือกและแกลบระหว่างการดูดซับ

จากผลการทดลองโดยใช้แกลบอุณหภูมิเริ่มต้น 33, 45, 60 และ 90°C ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นแกลบประมาณ 11.5, 5.0, 2.5, 0.8%d.b.ตามลำดับ พบว่าการใช้แกลบความชื้นเริ่มต้นต่ำสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากและเร็วกว่าการใช้แกลบที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง ดังแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากความแตกต่างระหว่างความชื้นเริ่มต้นของแกลบกับข้าวเปลือกมีค่ามาก และแกลบที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงเมื่อผสมกับข้าวเปลือกทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกสูงขึ้น ส่งผลให้ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกแพร่ออกมาที่ผิวของเมล็ดได้มากขึ้นทำให้แกลบสามารถดูดซับความชื้นได้ดี

ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกต่อการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของความชื้นข้าวเปลือกและแกลบระหว่างการดูดซับ

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก พบว่าการใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกที่สูงขึ้นจาก 0.8:1 เป็น 1.5:1 โดยปริมาตร สามารถลดความชื้นของ

ข้าวเปลือกได้เร็วกว่าดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากการใช้ปริมาณแกลบที่มากขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับความชื้นได้มากขึ้น แต่การเพิ่มอัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกที่มากเกินไปจาก 1.5:1 เป็น 2:1 โดยปริมาตร ไม่สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากนักส่งผลให้ความชื้นของข้าวเปลือกมีค่าแตกต่างกันน้อย

การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวและความขาวของข้าวสารในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง

จากการวิเคราะห์ร้อยละต้นข้าวและความขาวหลังผ่านการดูดซับความชื้น พบว่า มีความแตกต่างของร้อยละต้นข้าวและความขาวในแต่ละเงื่อนไขการทดลองเพียงเล็กน้อย และส่วนใหญ่มีแนวโน้มลดลงจากค่าร้อยละต้นข้าวและความขาวอ้างอิง เนื่องจากการดูดซับความชื้นของข้าวเปลือกเป็นการดูดซับความชื้นที่อุณหภูมิต่ำจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของข้าวมากนัก ซึ่งค่าร้อยละต้นข้าวและความขาวในทุกเงื่อนไขการทดลองอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงร้อยละต้นข้าวและความขาว

เงื่อนไขการทดลอง		ร้อยละต้นข้าว		ความขาว	
อุณหภูมิเริ่มต้นของแกลบ (^{o}C)	อัตราส่วนระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกโดยปริมาตร (โดยมวล)	ร้อยละต้นข้าวอ้างอิง	ร้อยละต้นข้าว	ความขาวอ้างอิง	ความขาว
33	0.8 (0.14)	58.1	58.1	56.0	55.5
	1.5 (0.26)		58.5		55.8
	2.0 (0.34)		58.5		56.2
45	0.8 (0.14)		57.5		55.4
	1.5 (0.26)		57.8		56.0
	2.0 (0.34)		57.9		55.9
60	0.8 (0.14)	59.7	58.8	58.4	57.2
	1.5 (0.26)		58.9		58.6
	2.0 (0.34)		58.9		58.0
90	0.8 (0.14)		58.5		58.2
	1.5 (0.26)		59.5		57.6
	2.0 (0.34)		60.2		57.3

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้แกลบดูดซับความชื้นจากข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 33%d.b. โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแกลบกับข้าวเปลือก ความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของแกลบ พบว่าการใช้อัตราส่วนผสมระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกที่สูงขึ้นถึงระดับหนึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับความชื้นของแกลบ และการใช้ความชื้นเริ่มต้นของแกลบต่ำทำให้มีความแตกต่างของความชื้นเริ่มต้นระหว่างแกลบกับข้าวเปลือกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการดูดซับความชื้นจากข้าวเปลือกสูงขึ้น และสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้มากขึ้นด้วย สำหรับคุณภาพข้าว พบว่า ร้อยละต้นข้าวและความขาวของข้าวสารมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณภาพความขาวของข้าวสาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (1993), 1993 ASHRAE *Handbook: Fundamentals*, Atlanta, GA. : ASHRAE, pp. 19.1-19.6.
2. Ruthven, D.M. (1984), *Principles of Adsorption & Adsorption Processes*, John Wiley & Sons, New York, pp. 1-27.
3. Yamaguchi, S. and Kawasaki, H. (1994), Basic Research for Rice Drying with Silica Gel, *Drying Technology*, Vol. 12 No. 5, pp. 1053-1067.
4. Sturton, S.L., Bilanski W.K. and Menzies D.R. (1983), Moisture Exchange between Corn and the Desiccant Bentonite in an Intimate Mixture, *Canadian Agricultural Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 139-141.
5. Raghavan, G.S.V., Alikhani, Z., Fanous, M. and Block, E. (1988), Enhanced Grain Drying by Conduction Heating Using Molecular Sieves, *Transactions of the ASAE*, Vol. 31 No. 4 pp. 1289-1294.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล

FRUIT AND HERB DRYING USING COMBINED TECHNIQUES OF HEAT PUMP AND FAR-INFRARED RADIATION

ศรีมา แจ้คำ* สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ อดิศักดิ์ นาถกรณกุล

คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิจัย การอบแห้งผลไม้และสมุนไพรโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล โดยทำการทดลองอบแห้งมะละกอเส้น ข่า และตะไคร้ ตลอดจนศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล ในการศึกษาใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรดไกล 45 องศาเซลเซียส ผลการศึกษา พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ความชื้นเริ่มต้นสูงรังสีอินฟราเรดไกลช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุด ช่วยให้ผลิตภัณฑ์ในห้องอบแห้งมีความการกระจายตัวของความชื้นสม่ำเสมอและคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์ดี การอบแห้งมะละกอเส้นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 2,300 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุดเท่ากับ 30% ลดการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 3% ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเท่ากับ 3.56 และจากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์เมื่อใช้มะละกอเส้นเป็นผลิตภัณฑ์ในการอบแห้ง พบว่า เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล มีระยะเวลาการคืนทุนเร็วกว่าเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนประมาณ 2 เดือน

ABSTRACT

Combined techniques between heat pump and far-infrared (FIR) radiation was used to dry fruit and herb in this study. Sliced papaya, galingale and lemongrass were dried in this combined-technique dryer in order to investigate its performance and energy consumption. Color of these products dried by this dryer at drying temperature of 55°C and controlled temperature for FIR operation of 45°C was also investigated. The experimental results showed that the FIR-heat pump dryer can reduce drying time for high moisture products and to distribute products' moisture contents uniformly during drying process in the chamber. Color quality of the products dried by this combined dryer was in a good condition. Drying sliced papaya with an initial moisture content of 2,300 %db gave the maximum drying time reduction of 30%, specific energy consumption reduction of 3% and coefficient of performance of about 3.56. Economical comparison between FIR-heat pump dryer and heat pump dryer in case of using sliced papaya as a drying product showed that FIR-heat pump dryer has faster rate of return than that of heat pump dryer, approximately two months.

คำสำคัญ : การอบแห้ง / ปั๊มความร้อน / รังสีอินฟราเรด

---

* **Corresponding author**. Tel.: (02)-2944758; fax: (02)-2944759
E-mail address: Srima_j@hotmail.com

1. บทนำ

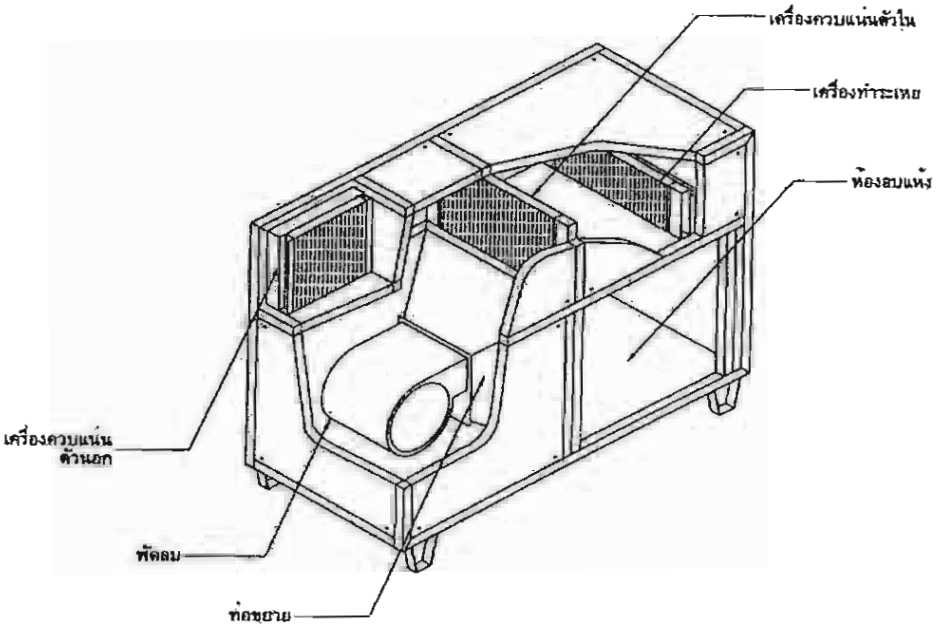
ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการประกอบอาชีพทางเกษตรกรรมเป็นหลัก มีพืชผลทางการเกษตรหลายชนิดที่ทำรายได้ให้แก่ประเทศ เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง และผลไม้ต่างๆ เป็นต้น ผลผลิตของพืชผลทางการเกษตรเหล่านี้มีมาก จนเกินความต้องการของตลาดและมีราคาต่ำ ดังนั้น จึงต้องมีวิธีการเก็บรักษา และการแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตรดังกล่าว การอบแห้งเป็นกระบวนการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย และได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวาง ในปัจจุบันเทคโนโลยีการอบแห้งผลผลิตทางการเกษตรโดยใช้ปั๊มความร้อนเป็นวิธีการที่นิยมใช้ เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง วิธีการนี้ใช้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งต่ำ ทำให้ช่วยรักษากลิ่นและสีของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ แต่ก็มีข้อเสียคือใช้เวลาในการอบแห้งค่อนข้างนานส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงาน การนำกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปั๊มความร้อน จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจในการลดเวลาในการอบแห้งให้น้อยลง เพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นภาคอุตสาหกรรมจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาเครื่องต้นแบบในการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการลดเวลาในการอบแห้งให้มากที่สุด

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น จึงได้มีแนวคิดที่จะนำรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ร่วมกับปั๊มความร้อน [1,2] โดยคาดว่าจะช่วยลดเวลาและการใช้พลังงานรวมทั้งรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งให้อยู่ในเกณฑ์ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับกระบวนการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ตลอดจนปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการอบแห้งพืชผลทางการเกษตรที่เหมาะสมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล ได้ออกแบบรถเข็น 2 คัน และติดตั้งแท่งรังสีอินฟราเรดไกลในแนวตั้งฉากกับพื้นห้องอบแห้ง ระหว่างรถเข็นทั้งสองจำนวน 2 แท่ง และติดตั้งตรงด้านข้างของรถเข็นคันที่ 2(ทางออกของลมร้อน)อีก 1 แท่ง แต่ละหลอดมีขนาด 650 W โดยระยะห่างระหว่างแท่งรังสีอินฟราเรดกับผลิตภัณฑ์อบแห้งเท่ากับ 0.10 เมตร ปั๊มความร้อนมีขนาดเครื่องควบแน่นตัวใน 4.6 kW เครื่องควบแน่นตัวนอก 2.2 kW เครื่องทำระเหย 3.66 kW เครื่องอัดไอ 1.3 kW รถเข็นแต่ละคันบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ 12 ถาด รวมทั้งหมดบรรจุผลิตภัณฑ์ได้ 24 ถาด ทำการทดลองอบแห้งมะละกอเส้น ข่า และตะไคร้แบบระบบปิด โดยใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิควบคุมการเปิดปิดแท่งรังสีอินฟราเรด 45 องศาเซลเซียส อุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ –100-1300 องศาเซลเซียส ความละเอียด $\pm$ 0.2% ของค่าที่อ่าน ความเร็วอากาศอบแห้งที่ท่อลมอากาศไหลกลับ วัดโดย

ใช้ hot wire anemometer ปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้จากการอ่านค่าที่ กิโลวัตต์เอาว์-มิเตอร์ และวัดกระแสไฟฟ้าโดยใช้ Clip on meter ปริมาณน้ำที่ควบแน่นออกจากเครื่องทำระเหยรายชั่วโมง วัดได้โดยใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอล (รับน้ำหนักได้สูงสุด 2,100 g และอ่านได้ละเอียด 0.01 g) สำหรับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนได้แสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลองการอบแห้งผลไม้และสมุนไพร ด้วยเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน(HPD) และแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล (HPD&FIR) จะวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบ โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเครื่องอบแห้ง รวมทั้งการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องอบแห้งทั้งสองแบบ

3.1 ผลกระทบของอัตราการไหลของอากาศอบแห้ง ต่อประสิทธิภาพการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล

เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในห้องอบแห้งมีผลกระทบ ทำให้เกิดการพาความร้อนแบบบังคับ ระหว่างผิวแท่งรังสีอินฟราเรดกับอากาศภายในห้องอบแห้ง ซึ่งพบว่า พลังงานความร้อนที่สูญเสีย

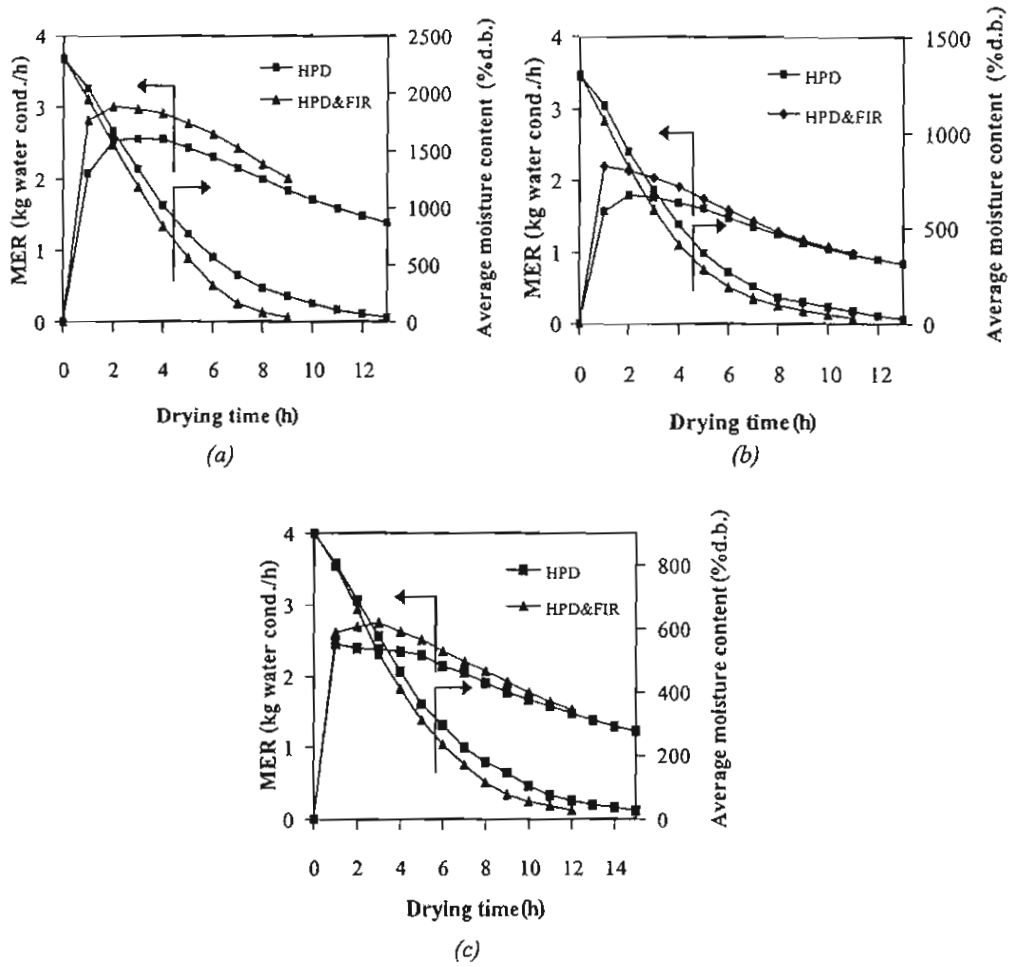
เนื่องจากการพาความร้อนมีค่ารวมทั้งหมดประมาณ 700 W และพลังงานที่ใช้ประโยชน์จากการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 350 W จะเห็นว่า 66.6% สูญเสียไปกับการพาความร้อน และพลังงานที่เหลือใช้จริงสำหรับการแผ่รังสีเท่ากับ 33.4%

3.2 ผลกระทบของความชื้นเริ่มต้นต่อการลดระยะเวลาการอบแห้ง ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล

ในการศึกษาผลกระทบของรังสีอินฟราเรดไกล ในช่วงความชื้นเริ่มต้นที่แตกต่างกัน (ดูตารางที่ 1) พบว่าการอบแห้งมะละกอเส้นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นสูงที่สุด การใช้รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับปั๊มความร้อนจะช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้มากที่สุดถึง 4 ชั่วโมง เนื่องจากรังสีอินฟราเรดที่แผ่ไปยังผลิตภัณฑ์ส่วนมากจะถูกดูดกลืนโดยชั้นฟิล์มบางๆของน้ำที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดไกลก็จะมีประสิทธิภาพสูง ทำให้ลดเวลาในการอบแห้งได้มาก สำหรับการอบแห้งข่า ช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้ 2 ชั่วโมง และการอบตะไคร้ ช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้ 3 ชั่วโมง พอสรุปได้ว่าในการอบแห้งข่าและตะไคร้ รังสีอินฟราเรดไกลมีส่วนช่วยลดเวลาในการอบแห้งได้ระดับหนึ่ง สำหรับมะละกอเส้นซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นที่สูงกว่า สามารถลดเวลาได้มากที่สุด

3.3 ผลกระทบของการใช้รังสีอินฟราเรดต่อสมรรถนะ ของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อน

จากผลการอบแห้งมะละกอเส้น ข่า และตะไคร้ เมื่อเปรียบเทียบกราฟ Moisture extraction rate (MER) ของผลิตภัณฑ์ทั้งสาม(รูปที่ 2) พบว่า ช่วงเริ่มต้นของการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล ค่า MER สูงกว่าการอบแห้งโดยใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว หลังจากนั้นจะเริ่มลดลงกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงท้ายของการอบแห้ง แสดงว่าการใช้รังสีอินฟราเรดสามารถช่วยลดเวลาในการอบแห้งช่วงแรก แต่ในช่วงท้ายของการอบแห้ง ผลิตภัณฑ์เริ่มแห้งทำให้ปริมาณน้ำภายในผลิตภัณฑ์ลดลง การดูดซับรังสีอินฟราเรดไกลจึงต่ำลง ทำให้รังสีอินฟราเรดไกลไม่มีส่วนช่วยในการระเหยน้ำในช่วงท้ายของการอบแห้ง สมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{hp,used}$) ของการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล มีค่าน้อยกว่าการอบแห้งที่ใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการใช้รังสีอินฟราเรดทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งขาออกจากห้องอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่เหลือในสารทำความเย็นต้องไประบายทิ้งที่คอนเดนเซอร์ตัวนอกมากขึ้น ทำให้คอนเดนเซอร์ตัวในระบายความร้อนได้น้อยลง สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นเริ่มต้นสูง สมรรถนะของปั๊มความร้อน ($COP_{hp,used}$) ที่อบโดยใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล มีค่ามากกว่าการอบแห้งที่ใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว เนื่องจากอุณหภูมิอากาศอบแห้งขาเข้าและขาออกจากห้องอบแห้งมีความแตกต่างกันมากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2. การเปลี่ยนแปลง MER และความชื้นเฉลี่ยของ *(a)* มะละกอเส้น *(b)*ข่า และ *(c)* ตะไคร้ เทียบกับเวลา (อุณหภูมิอากาศร้อนเข้าห้องอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส)

3.4 การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาระยะเวลาการคืนทุนระหว่างเครื่องอบแห้งที่ใช้ปั๊มความร้อนและเครื่องอบแห้งที่ใช้ปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียวประมาณ 11 เดือน และระยะเวลาการคืนทุนของเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกลใช้เวลาประมาณ 9 เดือน จะเห็นว่า การลงทุนกับเครื่องอบแห้งแบบปั๊มความร้อนร่วมกับอินฟราเรดไกล สามารถคืนทุนได้เร็วกว่า เนื่องจากใช้เวลาในการอบแห้งต่อครั้งน้อยกว่า ทำให้ประหยัดเวลา และสามารถบริหารเครื่องในการอบแห้งเพื่อให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่าเครื่องอบแห้งที่ใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองอบแห้งผลไม้และสมุนไพร

Description	Test Drying.					
	มะละกอเส้น		ข่า		ตะไคร้	
	HP	HP&FIR	HP	HP&FIR	HP	HP&FIR
Condition of product						
Average moisture before drying (%d.b.)	2,300	2,300	1,300	1,300	900	900
Average moisture after drying (%d.b.)	39.8	38.7	15.1	16.8	10.3	9.6
Initial weight (kg)	19.2	19.2	12	12	21	21
Final weight (kg)	1.052	1.02	1.004	1.092	2.522	2.458
Moisture removed (kg)	18.15	18.18	11.00	10.91	18.48	18.54
Drying air conditions						
Average temperature (^{0}C)	55	55	55	55	55	55
Set point temperature of infrared (^{0}C)	-	45	-	45	-	45
Evaporator by-pass air (%)	55	55	55	55	55	55
Energy consumption of infrared (kWh)	-	6	-	6.4	-	7.8
Energy consumption of heat pump dryer (kWh)	**25.5**	**18.8**	**26.1**	**21.8**	**29.1**	**24**
Total energy consumption(kWh)	**25.5**	**24.8**	**26.1**	**28.2**	**29.1**	**31.8**
Drying time (h)	13	9	13	11	15	12
Performance of heat pump dryer						
drying rate (kg water evap. / h)	1.40	2.02	0.85	0.99	1.23	1.55
MER (kg water cond. / h)	1.39	2.00	0.84	0.99	1.22	1.53
SMER (kg water evap. / kWh)	**0.71**	**0.73**	**0.42**	**0.39**	**0.63**	**0.58**
SEC (MJ / kg water evap.)	**5.06**	**4.91**	**8.54**	**9.31**	**5.67**	**6.17**
$COP_{hp,used}$	**3.29**	**3.56**	**3.38**	**3.14**	**3.24**	**2.67**
COP_{hp}	**3.99**	**4.34**	**3.67**	**3.83**	**4.04**	**4.26**

4. สรุปผลการทดลอง

จากการอบแห้งผลไม้และสมุนไพรด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล พบว่าที่ความชื้นเริ่มต้นสูง การแผ่รังสีอินฟราเรดจะมีส่วนดึงความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ได้มาก การระเหยน้ำช่วงแรกจะมีปริมาณมาก เป็นผลให้การอบแห้งเร็วขึ้น และยังพบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะจะใกล้เคียงกันที่ความชื้นเริ่มต้นสูงและจะเพิ่มขึ้นในกรณีความชื้นเริ่มต้นต่ำ และที่ความชื้นเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ต่ำ ค่าสมรรถนะของปั๊มความร้อนเมื่อใช้ร่วมกับอินฟราเรดไกลโดยรวม ($COP_{hp,used}$) จะน้อยกว่า การอบโดยใช้ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว สำหรับคุณภาพด้านสีและกลิ่นอยู่ในเกณฑ์ดีและใกล้เคียงกัน ดังนั้นการใช้รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับปั๊มความร้อนจึงไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพด้านสีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองยังพบว่า ผลของการพาความร้อนภายในห้องอบแห้งทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่ผิวแท่งอินฟราเรด ซึ่งจากการทดลองปรากฏว่าเกิดการสูญเสียความร้อนจากการพาถึง 700 W และเหลือการใช้งานในส่วนของการแผ่รังสี 350 W เท่านั้น ดังนั้น จำเป็นต้องออกแบบและติดตั้งตำแหน่งของแท่งรังสีอินฟราเรด ให้เกิดความสูญเสียความร้อนจากการพาให้น้อยที่สุด เพื่อประสิทธิภาพในการแผ่รังสีของแท่งอินฟราเรดไกล

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Tan, S.L., Chou, S.K., Mujumdar, A.S. and Chua, K.J. 2001, "Convective and Intermittent radiative drying of model foods, Effect on Drying Kinetics and Co lour Change. In ACD 2001; pp. 537-546.
2. กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์. (2545), วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยฟลูอิไดซ์เบดแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

SOYBEAN DRYING USING SUPERHEATED STEAM FLUIDIZED BED

ปาวีณา ปรัชญาวศิน [1,*] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [2] และ สมเกียรติ ปรัชญาวรากร [1]

[1] *ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์*
[2] *คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ค่าการละลายของโปรตีน และกรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชั่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ภายใต้เงื่อนไขการทดลองดังนี้ อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วง 120-150°C และความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง 13.5-36% มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการอบแห้งซึ่งอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลกับอุณหภูมิ นอกจากนั้นอัตราการอบแห้งมีค่าสูงเมื่อความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง และจากการอบแห้งถั่วเหลืองที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลือง ซึ่งสามารถอธิบายด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุงโดยพบว่าค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองสูง เมื่อพิจารณาผลของการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสร่วมกับค่าการละลายของโปรตีน และกรดอะมิโนไลซีนพบว่าควรใช้อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วง 120-135°C ในการอบแห้งถั่วเหลือง และการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชั่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเหมาะกับถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 20% มาตรฐานแห้ง โดยสามารถลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสและความชื้นได้ในช่วงที่เหมาะสม สำหรับถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงควรใช้การอบแห้งแบบสองขั้นตอนเพื่อหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนกับถั่วเหลืองมากเกินไป

Abstract

This research presents the effect of temperature and moisture to effective diffusion coefficient, kinetics of urease inactivation, protein solubility and lysine quality of soybean drying with superheated steam fluidization technique. The experiments were carried at superheated steam temperature 120-150°C and initial

* **Corresponding author.** Tel.: (02)-5212295
E-mail address: paveena_prachayawasin@hotmail.com

moisture content 13.5-36% dry basis. The result showed that the drying rate was exponentially increased with superheated steam temperature and it was interpreted by the effective diffusion coefficient. In addition, the drying rate is also faster with higher initial moisture content. During soybean drying at high temperature, the activity of urease enzyme was inactivated and its inactivation was explained modified first order reaction of which the reaction constant is related superheated steam temperature and the initial moisture content in away that the higher rate of inactivation followed with higher temperature and initial moisture content. The kinetics of urease inactivation, along with protein solubility and lysine content, suggest that the soybean should be treated with superheated steam at the temperature ranging from 120 to 135°C. The superheated steam fluidized-bed technique can simultaneously be applied for both drying and inactivating such components in soybean by a single operation when the initial moisture content falls in a suitable range, approximately lower than 20%d.b. At elevated initial moisture content, two-stage drying technique is recommended in order to avoid excessive cooked soybeans.

คำสำคัญ: ถั่วเหลือง, สารยับยั้งทริปซิน, เอนไซม์ยูริเอส, ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

บทนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะสารอาหารประเภทโปรตีน แต่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับอาหารประเภทอื่นๆที่มีสารอาหารโปรตีนสูง ดังนั้นในอุตสาหกรรมจึงนิยมนำถั่วเหลืองมาใช้เลี้ยงสัตว์ แต่พบว่าในถั่วเหลืองดิบไม่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ทันที เนื่องจากภายในถั่วเหลืองมีสารยับยั้งโภชนาการหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารยับยั้งทริปซิน ซึ่งมีผลต่อการเกิดการขยายตัวของตับอ่อน รวมไปถึงการทำให้สัตว์เกิดการชะงักการเจริญเติบโต [1] อย่างไรก็ดีสารยับยั้งทริปซิน สามารถทำลายได้เมื่อให้ความร้อนที่สภาวะเหมาะสม

การอบแห้งเป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมใช้ในการลดความชื้นของถั่วเหลืองโดยอาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งไปสู่ถั่วเหลืองเพื่อระเหยน้ำภายในถั่วเหลืองให้ต่ำลง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นนอกจากสามารถลดความชื้นในถั่วเหลืองยังสามารถสารยับยั้งทริปซินได้ด้วย C.A. Osella และคณะ [2] ทำการทดลองอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้น 14-31%มาตรฐานแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้อากาศร้อน จากการทดลองพบว่าอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C สามารถลดสารยับยั้งทริปซินได้ตามเกณฑ์ได้เฉพาะช่วงความชื้นเริ่มต้นสูงแต่ใช้เวลาค่อนข้างนาน และที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C สามารถลดสารยับยั้งทริปซินได้ตามเกณฑ์ในทุกความชื้นและใช้เวลาสั้น

อย่างไรก็ดี ในปัจจุบันมีการนำไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้ในการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ [3,4,5] เนื่องจากข้อดีของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่มีเหนือการใช้อากาศร้อน เช่น ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงเนื่องจากมีการนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ กลับมาใช้ใหม่ รวมทั้งไม่มีมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และมีความปลอดภัยสูง นอกจากนั้นความแตกต่างที่สำคัญสำหรับสิ่งที่เกิดขึ้นในการอบแห้งระหว่างการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน คือในการอบแห้งด้วย

ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งสัมผัสกับวัสดุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำบนผิวของวัสดุส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งไปสู่วัสดุเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้อุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นได้เร็วเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งหากนำถั่วเหลืองมาอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งน่าจะลดสารยับยั้งทริปซินได้เร็วกว่าการใช้อากาศร้อน

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาผลของการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชั่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส ค่าการละลายของโปรตีน และปริมาณกรดอะมิโนไลซีน

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ คือ 1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) 2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (superheater) เพื่อทำไออิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งขนาด 13.5 kW 3) ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ความสูง 100 cm 4) พัดลม (Blower) แบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 3.2 m/sซึ่งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม

การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดทำการทดลองโดยป้อนถั่วเหลืองปริมาณ 1.3 kg ลงในห้องอบแห้ง โดยทำการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 13.5 19.5 และ36% มาตรฐานแห้ง ที่อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 120 135 และ 150°C

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการศึกษากลไกการอบแห้งถั่วเหลือง โดยกำหนดให้รูปทรงของถั่วเหลืองเป็นทรงกลม การถ่ายเทความชื้นเกิดในแนวรัศมี เราสามารถหาความชื้นของถั่วเหลืองที่เวลาใดๆได้จากสมการการแพร่ทางทฤษฎี [6]

$$\frac{M(t)}{M_{in}} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\exp\left(\frac{-n^2\pi^2 D_{eff}t}{r^2}\right) \qquad (1)$$

เมื่อ M(t) คือปริมาณความชื้นของถั่วเหลืองเมื่อผ่านการอบแห้งด้วยเวลา t (% มาตรฐานแห้ง) M_{in} คือความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง D_{eff} คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล (m^2/s) t คือเวลาในการอบแห้ง (วินาที) และ r คือรัศมีของถั่วเหลือง (เมตร) ซึ่งหากความชื้นในถั่วเหลืองมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากวิธีของความชัน (method of slope) [7] ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\frac{d(M(t)/M_{in})}{dt} = \frac{-6D_{eff}}{r^2}\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(\frac{-n^2\pi^2 D_{eff}t}{r^2}\right) \qquad (2)$$

จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส

ในการหาปริมาณUrease inactivationของถั่วเหลืองอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองกับยูเรีย ซึ่งทำการทดลองตามวิธีของ Rasmussen [8] โดยถั่วเหลืองที่ดีควรมีค่า Urease inactivation 80-90% (หรือค่า Residual urease activity 10-20%) โดยจลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุง (modified first order reaction)

$$\frac{(C-C_{eq})}{(C_0-C_{eq})}=\exp(-kt) \qquad (3)$$

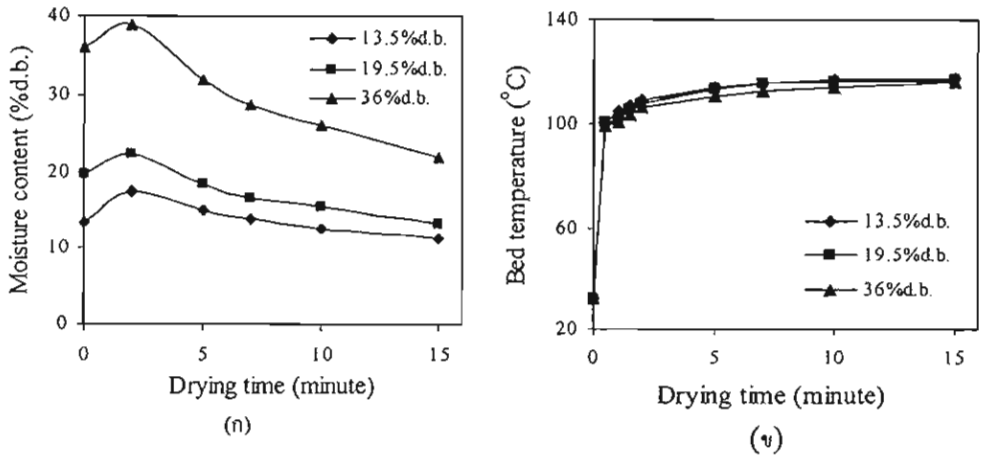
โดยค่า k คือ ค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส (นาที $^{-1}$) และ C C_0 และ C_{eq} คือ ปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสที่เหลือ ณ เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ตอนเริ่มต้น และที่สภาวะสมดุล (%) ตามลำดับ

ค่าการละลายของโปรตีน (protein solubility) และกรดอะมิโนไลซีน (lysine)

ค่าการละลายของโปรตีนทำการทดลองตามมาตรฐาน AOCS BA 10-65 [9] โดยค่าการละลายของโปรตีน คือ ร้อยละของปริมาณโปรตีนในถั่วเหลืองที่ละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.2 % ต่อปริมาณโปรตีนที่มีอยู่ในถั่วเหลืองทั้งหมด และสำหรับการหาปริมาณกรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลือง ทำการทดลองตามวิธี AccQ• Tag [10] ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค High performance liquid chromatography ที่ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์ฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence detector)

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์



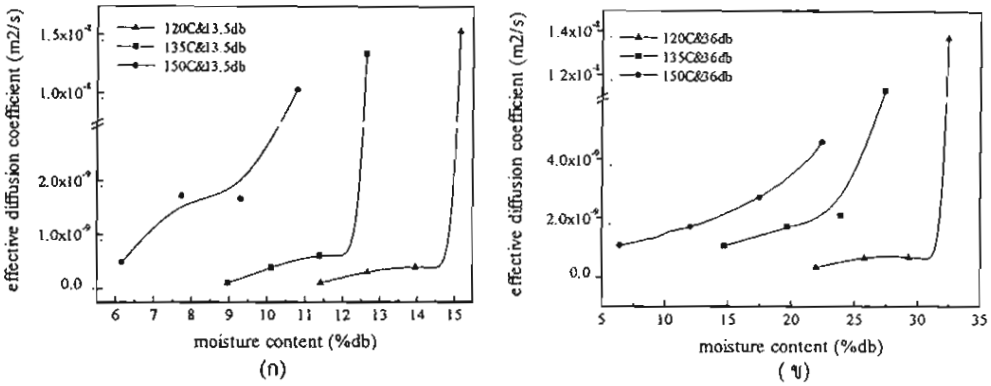
รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองที่ความชื้นเริ่มต้นต่างๆ ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C

การเปลี่ยนแปลงความชื้นของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งแสดงในรูปที่ 1ก พบว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสามารถแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกของการอบแห้งความชื้นของถั่วเหลืองสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งสัมผัสถั่วเหลืองที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าส่งผลให้เกิดการควบแน่นที่ผิวและเกิดการดูดซับเข้าสู่เมล็ดถั่วเหลือง ซึ่งผลดังกล่าวทำให้อุณหภูมิภายในเบดของถั่วเหลืองสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูป 1ข จากนั้นความชื้นของถั่วเหลืองจะมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการระเหยน้ำภายในเมล็ดถั่วเหลือง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลจากสมการที่ 2 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2 โดยความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองกับอุณหภูมิและความชื้นของถั่วเหลืองแสดงดังสมการที่ 4 เมื่อ T คืออุณหภูมิของเบด (K) และ M คือความชื้นของถั่วเหลือง(มาตรฐานแห้งแบบทศนิยม) จากสมการจะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิและความชื้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง

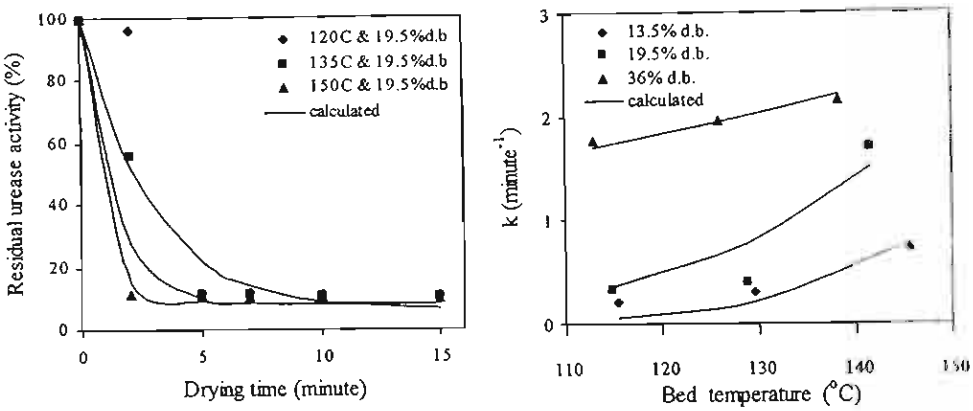
$$D_{eff} = [5.4364 \times 10^{-20} + 5.111 \times 10^{-18} M^{2}] \exp(0.053718T) \qquad (4)$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับความชื้นของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่างๆ

จลนศาสตร์การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส

ในการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีการลดลงเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยการลดลงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการอบแห้งดังแสดงในรูป 3ก และในการหาค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอส (k) จากสมการที่ 3 พบว่าค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิภายในเบดและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่นำมาอบแห้งมีค่าสูงดังแสดงในรูปที่ 3ข ซึ่งความสัมพันธ์ของค่า k และ C_{∞} กับอุณหภูมิภายในเบด (K) และความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลือง(มาตรฐานแห้งแบบทศนิยม) แสดงดังสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



(ก) (ข)

รูปที่ 3 การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

$$k = \left(5.7696 \times 10^{-18} + 1.3531 \times 10^{-16} M_{in}^{2} - \frac{8.59758 \times 10^{-15}}{T} \right) \exp(-0.245571 M_{in} T + 97.7304 M_{in} + 0.09702 T) \quad (5)$$

$$C_{eq} = (-0.047523 + 0.071742 M_{in}^{2} + 0.000122 T) \exp\left(-\frac{978.15 M_{in}}{T} + \frac{3227.286}{T} \right) \quad (6)$$

ค่าการละลายของโปรตีน (protein solubility) และกรดอะมิโนไลซีน (lysine)

เมื่อนำถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งที่มีปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดมา วิเคราะห์ค่าการละลายของโปรตีน จากผลการทดลองพบว่าถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับถั่วเหลืองดิบที่ยังไม่ผ่านการอบแห้งที่มีค่าการละลายของโปรตีนประมาณ 95% โดยการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้น 13.5% มาตรฐานแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าใช้เวลาในการอบแห้งเพียง 7 นาที สามารถลดเอนไซม์ยูรีเอสได้ตามเกณฑ์และค่าการละลายของโปรตีน รวมถึงปริมาณกรดอะมิโนไลซีนยังอยู่ในเกณฑ์ดี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังกล่าวกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนพบว่าการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งถั่วเหลืองใช้เวลาสั้นกว่าถึง 4 เท่า [2]

สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูง ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีในแง่การลดปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสได้เร็วกว่าการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นต่ำ รวมถึงค่าการละลายของโปรตีนยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ แต่อย่างไรก็ตามถั่วเหลืองที่ได้มีความชื้นหลังการอบแห้งสูงกว่าเกณฑ์ที่เก็บรักษาได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการอบแห้งนานขึ้นเพื่อลดปริมาณความชื้นได้ตามเกณฑ์ ซึ่งการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งถั่วเหลืองเป็นเวลานานส่งผลให้ค่าการละลายของโปรตีนลดลงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นการอบแห้งถั่วเหลืองความชื้นเริ่มต้นสูงควรประยุกต์ใช้การอบแห้งแบบ2 ขั้นตอน โดยในช่วงแรกควรอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพื่อลดเอนไซม์ยูรีเอสตามด้วยการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการเสียสภาพของโปรตีน รวมทั้งลดปริมาณความชื้นให้ได้ตามเกณฑ์ในการเก็บรักษา

ตารางที่ 1 ค่าการละลายของโปรตีนและปริมาณกรดอะมิโนไลซีนของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่สภาวะต่างๆ

ความชื้นเริ่มต้น (%d.b.)	อุณหภูมิขาเข้า(°C)	เวลาอบแห้ง(นาที)	ความชื้นหลังอบแห้ง(%d.b.)	ค่าการละลายของโปรตีน(%)	กรดอะมิโนไลซีน (mg/g of soybean)
ถั่วเหลืองดิบ			-	94.28	2.85
13.5	120	7	13.95	85.66	2.80
	135	5	12.44	71.76	2.76
	150	5	10.67	54.94	-
19.5	120	5	18.34	85.20	2.67
	135	5	16.52	82.25	2.71
	150	5	14.06	72.90	2.82
36	120	2	38.95	80.59	-
	135	2	34.14	81.38	-
		15	14.70	59.41	-
	150	2	31.61	75.13	-
		10	11.42	53.59	-
มาตรฐาน			< 14	73-85	> 2.40

สรุปผล

จากการศึกษาการอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของถั่วเหลืองมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิและความชื้นของถั่วเหลืองมีค่าสูง สำหรับการเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแห้งสามารถอธิบายได้ด้วยปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบปรับปรุง โดยค่าคงที่การเสื่อมสลายของเอนไซม์ยูรีเอสมีค่าสูง เมื่ออุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นของถั่วเหลืองที่นำมาอบแห้งมีค่าสูง การอบแห้งถั่วเหลืองด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชั่นโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการให้ความร้อนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการลดความชื้นและปริมาณเอนไซม์ยูรีเอสในถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่า 20% มาตรฐานแห้งได้ดีโดยค่าการละลายของโปรตีนและปริมาณกรดอะมิโนไลซีนในถั่วเหลืองมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ แต่สำหรับถั่วเหลืองที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงควรใช้การอบแห้ง 2 ขั้นตอนมาประยุกต์ใช้ในการอบแห้งเพื่อหลีกเลี่ยงการให้ความร้อนแก่ถั่วเหลืองมากเกินไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Rackis, J.J., McGhee, J.E. and Booth, A.N.(1975), Biological Threshold Level of Soybean Trypsin Inhibitor, *Cereal Chemistry*, Vol. 52, pp. 85-92.
2. Osella, C.A., Gordo, N.A., Gonzalez, R.J., Tosi, E. and Re, E. (1997), Soybean Heat-treated Using a Fluidized Bed, *Lebensmittel Wissenshaft und Technologie*, Vol. 30, pp.676-680.
3. Jensen, A.S. (1992), Pressurized Drying in Fluid Bed with steam, *Procedings of the Eighth International Drying Symposium*, Amsterdam, pp.1593-1601.
4. Seyed-Yagoobi, J., Moreira, R.G. and Yamsaengsung, R. (1998), Soperheated Steam Impingment Drying of Tortilla Chips, *Procedings of the Eleventh International Drying Symposium*, Vol. B, Halkidiki, Greece, pp. 1221-1228.
5. Stubbing, T.J. (1993), Airless Drying : Its Invention, Method and Application, *Transaction of the Institution of Chemical Engineering, Procedings of the Eighth International Drying Symposium*,Vol. 71, pp.488-495.
6. Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. 2nd. Bristol, J.W. Arrowsmith LTD
7. Saravacos, G.D., Raouzeos, G.S. (1986), Diffusivity of moisture in air drying of raisins, *Drying'86*, Vol. 2, Mujumdar, A.S.. (ed), Hemisphere, McgrawHill, pp.487-491.
8. Rasmussen. (2002), Determination of residual urease avtivity., *http:// www.analytichem.com/Applications/Kjeldahl/*
9. American Oil Chemists' Society (AOCS), (1979), *Method BA 10-65*.
10. Water AccQ-Tag Instruction Manual. Lysine determination. Manual no. WAT052874. Revo April, 1993.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษาหาแนวทางในการอบแห้งกระเทียมที่เหมาะสม

APPROPRIATE STRATEGY FOR DRYING GARLIC

ณรงค์ศักดิ์ แก้วนิล[1], สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2], สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1], อดิศักดิ์ นาถกรณกุล[1]

[1]คณะพลังงานและวัสดุ [2]คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของกระเทียม จากการทดลองอบแห้งกระเทียมแบบปอกเปลือก พบว่าการลดลงของความชื้นอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงโดยสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงคือช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก ในช่วงนี้อุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่สูงมีผลทำให้อัตราการอบแห้งสูง สำหรับช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สองนั้นพบว่าเฉพาะอุณหภูมิเท่านั้นที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง คุณภาพของกระเทียมที่เปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการอบแห้ง พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำโครงสร้างเนื้อของกระเทียมเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กและเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงรูพรุนมีขนาดโตขึ้น ส่งผลให้การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเกิดการหดตัวของเนื้อกระเทียมสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงสีโดยวัดในรูปของค่า L, a และ b พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำค่า L มีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สำหรับค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกัน ปริมาณการสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหยหลังการอบแห้งกระเทียมที่เหลือจากการอบแห้งกระเทียมที่อุณหภูมิต่ำมีน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง

ABSTRACT

The objective of this research is to study the influences of drying temperatures and air velocities on the drying rate and the garlic qualities. The experimental results for peel clove garlic drying have shown that the decrease of moisture content could be divided into two falling rate periods. In the first falling rate period, the drying rate increased with the increase of drying temperature and air velocity. For the second falling rate period, the drying rate was limited by diffusion mechanisms and the diffusion coefficient depended solely on the temperature. Garlic structure changed when it exposed to hot air. Higher temperature caused larger pores inside the garlic tissues. Color of garlic was generally varied with drying temperature. The higher temperature resulted in the lower L value. However, a and b values were slightly different for the range of drying temperatures studied (50-70^{0}C). The experimental results indicated that loss of volatile oil was larger for garlic dried at low temperature

*** Corresponding author.** Tel.: (02)-4708695 ext 112
E-mail address: adnakrab@yahoo.com

than that dried at high temperature. Moreover, air velocity had no significant effect on garlic qualities.
คำสำคัญ: กระเทียม, น้ำมันหอมระเหย, สัมประสิทธิ์การแพร่

บทนำ

กระเทียม (*allium sativum linn.*) เป็นพืชที่นิยมปลูกกันมากในแถบภาคเหนือของประเทศไทย โดยปกติการเก็บรักษากระเทียมหลังการเก็บเกี่ยวจะต้องเก็บไว้ในที่แห้งเพื่อป้องกันการเน่าเสีย การอบแห้งกระเทียมเป็นวิธีการรักษาคุณภาพของกระเทียมอย่างหนึ่ง เพื่อให้คุณภาพของกระเทียมคงสภาพไว้มากที่สุด ประกอบกับปัจจุบันคนเริ่มให้ความสนใจสุขภาพมากขึ้นโดยหันมาใช้พืชสมุนไพรช่วยในการรักษาโรค กระเทียมเป็นพืชสมุนไพรชนิดหนึ่งที่มีสรรพคุณในการป้องกันและรักษาโรคได้หลายชนิดเช่น โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือดรวมทั้งการลดระดับไขมันในเส้นเลือด ฯลฯ [1] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอบแห้งกระเทียมและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรหลายชนิดด้วยกัน เช่น Sharma และ Prasad [2]ได้ศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งกระเทียมโดยใช้อากาศร้อนและใช้ microwave ร่วมกับอากาศร้อน Ponciano และคณะ [3] ได้ศึกษาอบแห้งกระเทียมด้วยอากาศร้อนโดยอบแห้งแบบชั้นบาง พบว่าการอบแห้งจะอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง สำหรับคุณภาพของกระเทียม Dawn Ambrose และ Sreenarayanan [4] พบว่าปริมาณวิตามินซี และสารประกอบน้ำมันหอมระเหย หลังการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยพลังงานแสอาทิตย์ สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทดลองอบแห้งกระเทียมที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงทางด้านคุณภาพของกระเทียมโดยศึกษาปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่เหลือหลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้เครื่องอบแห้งเป็นแบบเมล็ดพืชอยู่กับที่เพื่ออบแห้งกระเทียมในลักษณะเป็นแบบชั้นบาง ซึ่งอากาศถูกดูดเข้าภายในระบบโดยพัดลมขนาด ½ hp ผ่านเข้าสู่ heater แล้วไหลเข้าสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งผ่านกระเทียมขึ้นสู่ด้านบน อากาศทั้งหมดจะถูกปล่อยทิ้งออกนอกระบบ ห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm. ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 0.7 และ 1.7 m/s และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับ 50, 60 และ 70^{o}C กระเทียมที่นำมาใช้อบแห้งมี ความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 181 – 203%d.b. อบแห้งจนเหลือความชื้นอยู่ในช่วง 3- 15%d.b. โดยทำการวัดอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งทางเข้า ทางออก ของห้องอบแห้ง อุณหภูมิภายในเมล็ด อุณหภูมิกระเปาะแห้ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแวดล้อม โดยใช้สายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูลมีความถูกต้อง ± 1^{o}C การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบน้ำมันหอมระเหยใช้วิธีของ Shankaranarayana และคณะ [5] ส่วนการถ่ายภาพกระเทียมเพื่อดูลักษณะโครสร้างของเนื้อเยื่อกระเทียมใช้เครื่อง SEM ที่ผลิตจากบริษัท LEICA CAMBRIDGE TLD. รุ่น Stereosoan 206 โดยการหั่นเนื้อกระเทียมตัดขวางกับท่อ

ลำเลียงน้ำให้หนาประมาณ 2-3 mm. หลังจากนั้นนำตัวอย่างกระเทียมมาถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง SEM ในการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงสีจะใช้เครื่องวัดสียี่ห้อ JUKI รุ่น JP-700

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้ง

ในการอบแห้งกระเทียมสมมติให้กระเทียมมีลักษณะเป็นทรงกลมโดยอบแห้งกระเทียมแบบปอกเปลือกซึ่งจะเกิดช่วงอัตราการอบแห้งลดลงสองช่วงคือช่วงอัตราการอบแห้งช่วงแรกและช่วงที่สอง และใช้สมการของ Fick second low ซึ่งแสดงดังสมการที่ (1) มาทำนายอัตราการอบแห้งทั้งสองช่วงโดยวิธี finite difference มาคำนวณหาค่าคงที่ของการอบแห้งทั้งสองช่วง ในงานวิจัยนี้สมมุติค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลตลอดการอบแห้งมีค่าคงที่

การเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านเนื้อกระเทียมสำหรับช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก

ในช่วงแรกของการอบแห้ง ช่วงนี้จะเกิดการระเหยของความชื้นที่บริเวณผิวของเนื้อกระเทียม ซึ่งการระเหยของความชื้นจะเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (first falling rate period) ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้งและอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้งโดยกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำถูกควบคุมด้วยความต้านทานที่บริเวณผิวของกระเทียมซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ (1) โดยสมมติให้กระเทียมมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมและขณะอบแห้งเนื้อกระเทียมจะเกิดการหดตัวทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของน้ำเปลี่ยนแปลงไปจึงจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาช่วยในการแก้ปัญหาโดยสามารถกำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรัศมีให้เท่ากับ r_o และตำแหน่งรัศมีนอกสุดเท่ากับ R โดยแบ่งจำนวน node ได้ตั้งแต่ตำแหน่ง i =0 ถึง i = N ซึ่งตำแหน่งที่ r_o กำหนดให้เป็น i = 0 และที่ตำแหน่งรัศมี R เป็น i = N โดยในช่วงระหว่างหนึ่ง node จะเท่ากับ Δr

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r}(\frac{\partial M}{\partial r})] \quad (1)$$

$$-D\frac{\partial M}{\partial r}\Big|_{r=R} = k(M_s - M_{eq}) \quad (2)$$

นอกจากสมการที่ (2) แล้วยังมีสภาวะเงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

$$M(r,0) = M_{in} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial r}(0,t) = 0 \quad (4)$$

ความชื้นเฉลี่ยของกระเทียมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$M = \int M_{i,t} * \frac{1}{V} dv \quad (5)$$

การหดตัวของเนื้อกระเทียมสามารถอธิบายด้วยสมการที่ (6)

$$\frac{V_t}{V_{in}} = a\exp(-b\frac{M}{M_{in}}) \quad (6)$$

การเคลื่อนที่ของความชื้นผ่านเนื้อของกระเทียมสำหรับอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง

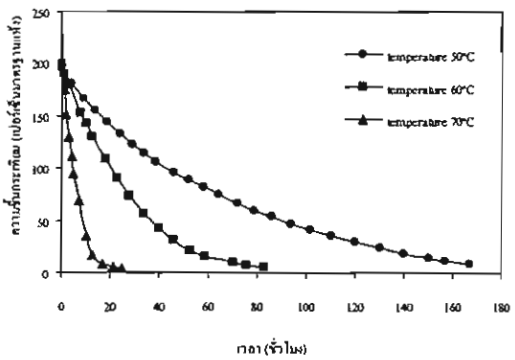
ในช่วงอัตราการอบแห้งช่วงที่สองอัตราการอบแห้งจะเป็นไปอย่างช้าๆซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอัตราการอบแห้งโดยพิจารณาการแพร่ของความชื้นในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ สำหรับวิธีการคำนวณจะเหมือนกับช่วงแรกของการอบแห้งแต่จะแตกต่างกันที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตของการคำนวณใหม่เป็นดังนี้

$$M(r,0) = M_{in} \quad (7)$$

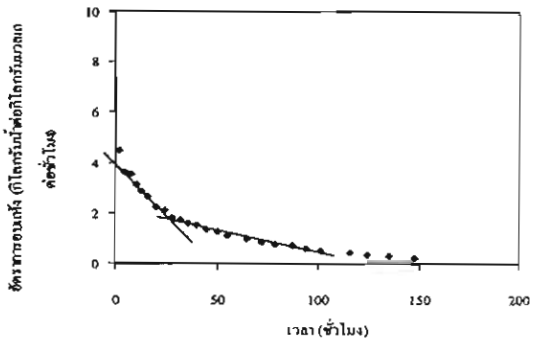
$$M(R,t) = M_{eq} \quad (8)$$

ผลและวิจารณ์

รูปที่ 1 เป็นการทดลองอบแห้งกระเทียมที่อุณหภูมิต่างๆโดยใช้ความเร็วอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งยิ่งสูงอัตราการอบแห้งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น จากการเปรียบเทียบการอบแห้งระหว่างอุณหภูมิ 70 กับ 60°C พบว่าอุณหภูมิอบแห้งที่ 70°C ความชื้นภายในกระเทียมจะลดลงเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 60°C ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของความชื้นกระเทียมภายใต้อุณหภูมิอบแห้งต่างๆ ที่ความเร็ว 0.7 m/s



รูปที่ 2 อัตราการอบแห้งกระเทียมที่อุณหภูมิ 50°C ความเร็ว 1.7 m/s

รูปที่ 2 เป็นผลของอัตราการอบแห้งกระเทียมที่อุณหภูมิ 50°C ความเร็วของอากาศ 1.7 m/s พบว่าสามารถแบ่งช่วงอัตราการอบแห้งได้เป็นสองช่วงสำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศอื่นๆพบว่าผลของอัตราการอบแห้งมีแนวโน้มเหมือนกับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

เนื่องจากช่วงแรกเป็นการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่หนึ่งสามารถหาค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) โดยใช้สมการที่ (2) พบว่าความเร็วของอากาศและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งจะมีผลต่อค่าคงที่ของการอบแห้ง จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าการอบแห้งที่ความเร็วของอากาศและอุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้ค่าของ k สูงขึ้น

นอกจากนี้จากตารางที่ 1 ยังพบว่าอุณหภูมิอบแห้งมีผลต่อค่าของความชื้นวิกฤติขณะที่ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความชื้นวิกฤติ จากการทดลองพบว่าความชื้นวิกฤติอยู่ในช่วง 67 ถึง 122%d.b.ซึ่งหลังจากการอบแห้งในช่วงความชื้นที่ต่ำกว่านี้จะเป็นการอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งช่วงที่สอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของการอบแห้ง ความชื้นวิกฤติและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	ความเร็วอากาศ (m/s)	ค่าคงที่ของการอบแห้ง (m/h)	ความชื้นเริ่มต้น (% d.b.)	ความชื้นที่จุดวิกฤติ (%d.b.)	Diffusion (m^2/h)
50	0.7	0.00035	194.41	122.9	$1.851*10^{-8}$
50	1.7	0.0018	203.3	120.9	$2.052*10^{-8}$
60	0.7	0.00040	198.51	108.86	$5.821*10^{-8}$
60	1.7	0.0022	192.34	107.47	$5.998*10^{-8}$
70	0.7	0.0018	202.11	69.35	$2.601*10^{-7}$
70	1.7	0.0025	181.32	67.27	$2.755*10^{-7}$

สำหรับในช่วงของอัตราการอบแห้งช่วงที่สองนั้น การเคลื่อนที่ของน้ำเกิดขึ้นเนื่องจากผลต่างความเข้มข้นภายในเนื้อวัสดุ และค่าคงที่ของอัตราการอบแห้งสามารถอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ซึ่งแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำในกระเทียมที่อุณหภูมิ 70°C จะมีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60 และ 50°C แสดงว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ สำหรับความเร็วของอากาศไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง

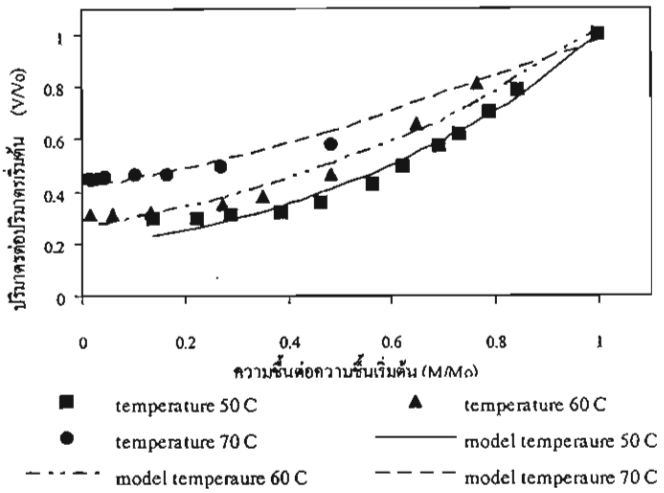
สำหรับผลของการหดตัวของเนื้อกระเทียมเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสัดส่วนของการหดตัวของเนื้อกระเทียมจะหดตัวได้น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จากผลการทดลองการหดตัวของเนื้อกระเทียม พบว่าจะมีลักษณะเป็นเอ็กซ์โปเนนเชียลกับสัดส่วนของความชื้น (ความชื้นต่อความชื้นเริ่มต้น) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งเป็นตัวแปรหลักที่มีผลต่อการหดตัวของเนื้อกระเทียม ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 6 โดยค่าคงที่ a และ b มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$a = 684171.982* \exp(-4907.86/T) \qquad R^2 = 0.997 \quad MRS = 0.0000225 \qquad (9)$$

$$b = 0.043884* T - 15.9188 \qquad R^2 = 0.993 \quad MRS = 0.000868 \qquad (10)$$

รูปที่ 4 เป็นภาพถ่ายด้วย SEM ที่ใช้กำลังขยาย 20.3X และนำมา scan ด้วยด้วยเครื่อง scanner ปรับความละเอียดเท่ากับ 300 DPI พบว่าเนื้อของกระเทียมเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดรูพรุนที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้เมื่อเวลาอบแห้งผ่านไปกระเทียมจะเกิดการหดตัวมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอบแห้งที่สูงกว่า เนื่องจากเนื้อกระเทียมจะค่อยๆหดตัวอย่างช้าๆเพราะผิวนอกของเนื้อกระเทียม

ไม่เกิดการแข็งตัวประกอบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำความดันไอที่เกิดขึ้นภายในเนื้อกระเทียมมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเนื้อของกระเทียมจะเกิดเป็นรูพรุนที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นตามลำดับ

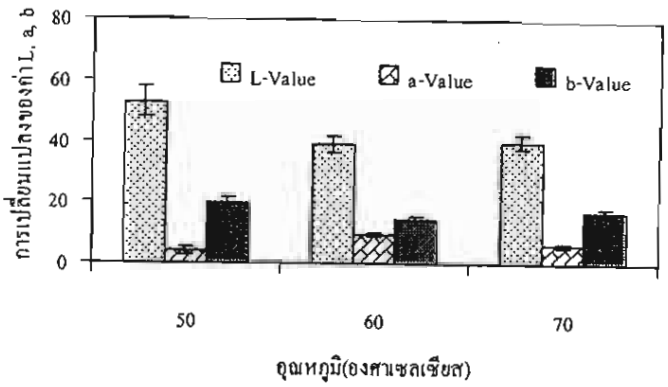


รูปที่ 3 การหดตัวของกระเทียมเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

รูป ก รูป ข รูป ค

รูปที่ 4 โครงสร้างของเนื้อเยื่อกระเทียมที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70^{o}C ตามลำดับ

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า L, a และ b ของกระเทียมที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส โดยค่า L, a และ b ในช่วงเริ่มต้นมีค่าอยู่ในช่วง 67.64 ถึง 67.56 , -3.39 ถึง -3.42 และ 11.35 ถึง 11.76 ตามลำดับ ซึ่งจะอบแห้งกระเทียมจนเหลือความชื้นประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากรูปพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า L, a และ b โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำค่า L มีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สำหรับค่า a และ b จะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 5 แสดงค่าของ L, a, b ของกระเทียมแบบปอกเปลือกจากการอบแห้งภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 2 ผลของการสูญเสียปริมาณสารประกอบน้ำมันหอมระเหยในกระเทียมที่อบแห้งกระเทียมที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศต่างๆ

อุณหภูมิอบแห้ง (^{o}C)	ความเร็วอากาศ (m/s)	ปริมาณVolatile oil เริ่มต้น (mg oil/g dry matter)	ปริมาณVolatile oil หลังการอบแห้ง (mg oil /g dry matter)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสีย Volatile oil
50	0.7	10.8	2.7	75
50	1.7	7.2	1.5	78
60	0.7	9.6	3.3	65
60	1.7	10.7	3.4	67
70	0.7	9.6	2.8	71
70	1.7	10.6	3.2	70

การสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหย

จากตารางที่ 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำมันหอมระเหยจะสูญเสียมากสุดที่อุณหภูมิ 50 รองลงมาคือ 70^{o}C สำหรับที่ 60^{o}C จะเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่า ความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อปริมาณของสารประกอบน้ำมันหอมระเหยที่ได้

สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งกระเทียมพันธุ์เชียงใหม่ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิและความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าสามารถแบ่งช่วงอัตราการอบแห้งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกและช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง โดยค่าความชื้นวิกฤติอยู่ในช่วง 67 ถึง 122%d.b. ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกอัตราการแพร่ของความชื้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเร็วของอากาศที่ใช้ในการอบแห้ง สำหรับในช่วงอัตราการอบแห้งช่วงที่สองการเคลื่อนที่ของน้ำสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแพร่ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งเพียงอย่างเดียว ลักษณะโครงสร้างเนื้อเยื่อของกระเทียมเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าเนื้อของกระเทียมเกิดรูพรุน การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำรูพรุนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขนาดรูพรุนจะโตขึ้น และในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง

ยังพบอีกว่าเนื้อเยื่อกระเทียมเกิดการหดตัวน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับการเปลี่ยนแปลงสีของกระเทียมโดยวัดในรูปของค่า L, a และ b พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำค่า Lมีค่าสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ส่วนค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกัน การสูญเสียสารประกอบน้ำมันหอมระเหยพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำมีแนวโน้มเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน ยกเว้นการอบแห้งอบแห้งที่อุณหภูมิ 70°C พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C โดยความเร็วของอากาศไม่มีผลต่อการปริมาณของสารประกอบน้ำมันหอมระเหย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินในการทำวิจัย

รายการสัญลักษณ์

D = ค่าสัมประสิทธิการแพร่, m^2/h

D_{eff} = ค่าสัมประสิทธิการแพร่ประสิทธิผล, m^2/h

D_o = ค่าคงที่ของสัมประสิทธิการแพร่, m^2/h

M = ความชื้นเฉลี่ย, % d.b.

M_{eq} = ความชื้นสมดุล, % d.b.

M_{in} = ความชื้นเริ่มต้น, % d.b.

M_s = ความชื้นที่ผิวนอกสุดของกระเทียม, % d.b.

E_a = ค่าพลังงาน, kJ/mole-K

k = ค่าคงที่ของการอบแห้ง, m/h

r = รัศมีกระเทียม, m

R = ค่าคงที่ของก๊าซสมบูรณ์, kJ/kg mole-K

t = เวลา, h

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์, K

V = ปริมาตรของกระเทียม, m^3

v = ความเร็วของอากาศ, m/s

V_{in} = ปริมาตรเริ่มต้นของกระเทียม, m^3

V_t = ปริมาตรของกระเทียมที่เวลาอบแห้งใดๆ, m^3

เอกสารอ้างอิง

1. ปาริชาติ สักกะทำนุ และ บรรจบ ชุณหสวัสดิกุล (2540), *กระเทียมสมุนไพรเสริมสุขภาพจากงานวิจัยล่าสุด*, พิมพ์ครั้งที่ 8, รวมทัศน์, กรุงเทพฯ, หน้า 21-75.
2. Sharma, G.P. and Prasad (2001), Drying of garlic (allium sativum) cloves by microwave-hot air combination, *Journal of Food Engineering*, Vol. 50, No. 2, pp. 99-105.
3. Ponciano S. Madamba P.S., Driscoll Robert H. and Ken A. Buckle K.A. (1996), The thin-layer drying characteristics of garlic slices, *Journal of Food Engineering*, Vol. 29, No. 1, pp. 75-97.
4. Ambrose C.P. Dawn and Sreenarayanan, V.V. (1998), Studies on the dehydration of garlic, *Journal Food Science Technology*, Vol. 35, No. 3, pp. 242-244.
5. Shankaranarayana, M.O., Abraham, K.O., Raghavan, B. and Natarajan, C.P. (1981), Determination of flavour strength in alliums (onion and garlic), *Indian Food Packer*, Vol. 35, No. 1, pp. 3-8.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การอบแห้งข้าวนึ่งสำหรับข้าวหอมโดยเทคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

THE DRYING FOR PARBOILING AROMATIC RICE USING SUPERHEATED-STEAM FLUIDIZED BED

เฉลิมพร เอี่ยมมิ[1], พัชรี ตั้งตระกูล[2], ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์[3], สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]

[1]นักศึกษาปริญญาโท, [2]นักวิจัยชำนาญการ, [3]อาจารย์, [4] ศาสตราจารย์

[1,4]คณะพลังงานและวัสดุ , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ, กรุงเทพฯ

[2]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เขตจตุจักร, กรุงเทพฯ

[3]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร สนามจันทร์, นครปฐม

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการอบแห้งข้าวนึ่งสำหรับข้าวหอมด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง ซึ่งพิจารณาถึงอิทธิพลของระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่มีต่อการเพิ่มปริมาณต้นข้าว สี White belly คุณภาพการหุงต้มและ การเกิด gelatinization ทำการทดลองโดยใช้ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นก่อนแช่ 15.7% d.b. แช่ในน้ำอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 0.5-3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบแห้ง ที่อุณหภูมิอบแห้ง 150°C เป็นระยะเวลา 0.5-7 นาที ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 3.0 m/s และความสูงของเบด 10 cm จากผลการศึกษาพบว่า การแช่และการอบแห้งสามารถเพิ่มปริมาณต้นข้าวได้สูงสุด 67.9% เมื่อแช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และอบแห้ง 2 นาที โดยคุณภาพด้านความขาว จะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการแช่และการอบแห้ง ส่วน White belly จะเพิ่มสูงขึ้นกว่าข้าวอ้างอิงทุกเงื่อนไขการทดลอง นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์การเกิด gelatinization ด้วยเครื่อง DSC ข้าวที่แช่นาน 3 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที เกิดการ gelatinization มากกว่าข้าวที่แช่เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาทีโดยมี Degree of gelatinization เท่ากับ 88.5% และ78% ตามลำดับ

ABSTRACT This research is to study the drying for parboiling aromatic rice using superheated steam fluidized bed drying. The effects of soaking times and drying times on the head rice yield, color, white belly, cooking quality and gelatinization are considered. In the experiments, paddy with initial moisture content of 15.7% d.b. was soaked by hot water at temperature of 80°C for 0.5-3 hours. Next, paddy was dried at 150°C for 0.5-7 minutes at superheated steam velocity of 3.0 m/s and bed height of 10 cm. Experimental results found that the soaking time of 3 hour and drying time of 2 minutes provide considerable increase in head rice yields which the maximum value of 67.9%. Moreover, whiteness are the good criteria; however, it will be reduced with increase in soaking and drying time. White belly of all condition are increased more than rice reference. Besides, the gelatinization analysis by DSC, paddy with soaking time of 3 hours and drying 2 minutes appears to have the gelatinization more than the one with

soaking time of 2 hours and drying 2 minutes (Degree of gelatinization of 88.5 and 78% for soaking time of 3 and 2 hours respectively).

Keywords: การอบแห้งข้าวเปลือก, ข้าวหอมมะลิ, ฟลูอิไดซ์เบด

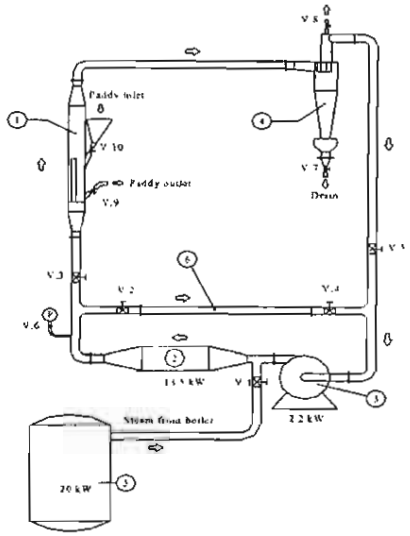
บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตข้าวหอมที่สำคัญ ผลผลิตข้าวหอมนอกจากใช้บริโภคในประเทศยังสามารถส่งออกในปีหนึ่งๆนั้นมีมูลค่าหลายพันล้านบาท ข้าวนึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมูลค่าข้าวที่ประเทศไทยส่งออกในแต่ละปี การผลิตข้าวนึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆคือ การแช่ (Soaking) การนึ่ง (Steaming) และการอบแห้ง (Drying) ถ้าสามารถลดขั้นตอนการผลิตโดยการรวมกระบวนการในการผลิตซึ่งจะสามารถลดต้นทุนและประหยัดพลังงานในขั้นตอนนั้นด้วย ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยสามารถแข่งขันและมีความได้เปรียบทางด้านการค้ามากขึ้น Kar และคณะ [1] พบว่าความร้อนจะทำให้น้ำแพร่เข้าไปในเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตข้าวนึ่งลงได้มาก แต่ระยะเวลาและอุณหภูมิตลอดจนน้ำที่ใช้ในการแช่มีอิทธิพลต่อคุณภาพข้าวนึ่งที่ได้ Bhattacharya [2] ได้นำข้าวเปลือกไปทำการแช่น้ำอุณหภูมิ 70°C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงจากนั้นจึงนำไปนึ่งด้วยไอน้ำภายใต้ความดันต่างๆ คือ 101-304 kPa (ระบบปิด) ระยะเวลา 0-60 นาที พบว่าการเปลี่ยนสีของข้าวนึ่ง ทั้งหมดเป็นไปตามจลนศาสตร์อันดับศูนย์ ถ้าระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตนานและความดันที่ใช้เพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ข้าวสารที่ได้มีความเหลืองเพิ่มขึ้น Toshinori และคณะ [3] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่ง พบว่าเมื่ออุณหภูมินึ่งสูงร้อยละความขาวของเมล็ดข้าวจะลดลงและเมื่อระยะเวลาในการนึ่งมากขึ้นความขาวของเมล็ดข้าวมีแนวโน้มลดลง Taechapairoj และคณะ [4] ได้ศึกษา การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ที่ความชื้นเริ่มต้น 44.4% มาตรฐานแห้ง ให้เหลือความชื้นสุดท้าย 16-28% มาตรฐานแห้ง โดยใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 150-170°C ความสูงของเบด 10-15 cm และความดันสมบูรณ์ของไอน้ำในระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อย พบว่าอุณหภูมิของไอน้ำมีผลต่อการอบแห้งมากกว่าความสูงของเบดและความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกมีอิทธิพลต่อร้อยละ White belly นอกจากนี้ พบว่าทำให้ได้ปริมาณต้นข้าวเพิ่มขึ้น แต่สีของข้าวสารที่ขัดสีแล้วมีสีที่เข้มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นและเมื่อนำไปทดสอบคุณภาพจะมีลักษณะคล้ายข้าวนึ่งมาก จากกระบวนการผลิตข้าวนึ่งดังกล่าวข้างต้น อาจรวมขั้นตอนการนึ่งและการอบแห้งเข้าเป็นขั้นตอนเดียวกันโดยการประยุกต์ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางในการนึ่งและอบแห้งในฟลูอิไดซ์เบด จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดีบางประการ เช่น อัตราการอบแห้งสูงและการกำจัดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [5, 6]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลของการผลิตข้าวนึ่งโดยการรวมกระบวนการนึ่งและการอบแห้งข้าวนึ่งข้าวหอมไว้ด้วยกัน ตลอดจนสมบัติของข้าวทางด้านกายภาพและการเกิด gelatinization ของข้าวหอมที่ได้หลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งข้าวนึ่งโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในการงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด โดยมีไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลางชนิดอบแห้งเป็นงวด แสดงดังรูปที่ 1 มีรายละเอียดดังนี้ ห้องอบแห้งเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm และสูง 100 cm อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater) มีขนาด 13.5 kW โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$ พัดลม (Blower) เป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (Backward – curved centrifugal blower) มอเตอร์ขนาด 2.2 kW สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ เครื่องดักฝุ่น (Cyclone) เป็นแบบ Reverse flow ทำด้วยสแตนเลส เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ออกแบบความดันใช้งานสูงสุด 3.5 bars โดยมีวาล์วระบายไอน้ำเพื่อระบายไอน้ำเมื่อความดันเกินพิกัด ตั้งที่ค่าความดัน 3.5 bars ความสามารถผลิตไอน้ำได้ 31 kg/h ที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ ความดันบรรยากาศ หรือเทียบได้กับพลังงานความร้อน 20 kW ใช้ไฟฟ้า 380/3/50



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการทดลอง 1) Drying chamber 2) Superheater; 3) Blower; 4) Cyclone; 5) Boiler; 6) Bypass line; 7) V= Valve, P = Pressure gauge

เงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้คือแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิน้ำแช่ $80^{\circ}C$ เวลาในการแช่ 0.5-3 ชั่วโมง นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่ง $150^{\circ}C$ เวลาในการอบแห้ง 0.5-7 นาที ความสูงเบดของข้าวเปลือก 10 cm ความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง 3.0 m/s ความดันของระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อยเพื่อป้องกันการรั่วเข้าของอากาศจากนั้นนำข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วมาปล่อยไว้ให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องภายในถุงปิดสนิทเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเหลือ 16% d.b. สุดท้ายนำข้าวไปทดสอบคุณภาพต่อไปซึ่งการทดสอบคุณภาพต่างๆ จากการทดลองทำการทดสอบ 2 ซ้ำ

สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกใช้ตู้อบไฟฟ้า (oven) โดยการวัดความชื้นของข้าวเปลือกจะทำโดยอบข้าวเปลือกตัวอย่างที่อุณหภูมิ$103^{\circ}C$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง สำหรับคุณภาพของข้าวทางด้านกายภาพ

ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว เปอร์เซ็นต์ความขาว และ % white belly

- เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวคือน้ำหนักของต้นข้าวที่ผ่านการอบแห้งหารด้วยน้ำหนักข้าวเปลือก
- เปอร์เซ็นต์ความขาววัดได้จากเครื่องวัดความขาวของ Kett model C-300
- เปอร์เซ็นต์ white belly คือจำนวนของข้าวที่เป็นจุดขาวขุ่นในเมล็ดข้าวใน 100 เมล็ด โดยการสุ่มตัวอย่าง

นอกจากนี้ ยังได้ทำการวิเคราะห์การเกิด gelatinization โดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (Pyris-I, Perkin) และโครงสร้างระดับไมโครด้วย Scanning Electron Micrographs (JSM-5600LV/JSM5600 Japan)

ผลและวิจารณ์

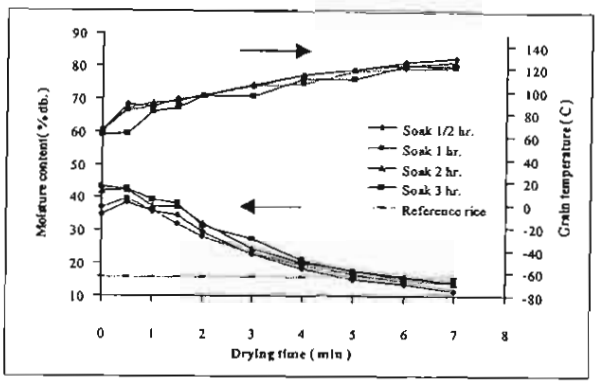
การเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

จากรูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาในการแช่และการอบแห้งต่าง ๆ พบว่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน (15.7% d.b.) เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการแช่และเมื่อนำไปอบแห้งที่เวลาการอบแห้งต่างกัน พบว่าในช่วงเวลาการอบแห้ง 0.5 นาที ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นเนื่องจากไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก จึงทำให้ไอน้ำเกิดการควบแน่นและเกิดชั้นฟิล์มของของเหลวขวางทิศทางการไหลของไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นซึ่งเปรียบเทียบได้กับช่วงการนึ่ง (Steaming) ของการผลิตข้าวนึ่งและเมื่อระยะเวลาการอบแห้งเพิ่มมากขึ้นความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกลดลงมีแนวโน้มใกล้เคียงกันเป็นไปตามจลนศาสตร์ของการอบแห้ง เพราะว่าความชื้นของเมล็ดส่วนใหญ่จะอยู่ที่ภายในเมล็ด อุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกจึงเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการอบแห้งโดยอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลาสั้นเพิ่มขึ้นเร็วกว่าเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านระยะเวลาการแช่นาน เนื่องจากเมล็ดข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลาสั้นมีความชื้นน้อยกว่าทำให้เกิดช่วงระยะเวลาการอบแห้งลดลงเร็วกว่า ส่งผลให้ผิวของเมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลานานเมล็ดข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูงจึงมีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่นานอุณหภูมิเมล็ดจึงเพิ่มขึ้นช้ากว่า

ปริมาณต้นข้าว

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและร้อยละต้นข้าว ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าเมื่อความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกเริ่มต้นที่ผ่านการแช่อย่างเดียว (เวลาการอบแห้ง 0 นาที) มีค่าต่ำ จะได้ร้อยละต้นข้าวลดลงต่ำกว่าข้าวอ้างอิง (50.2%) และถ้าความชื้นเมล็ดข้าวเปลือกสูงขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่นานขึ้น ร้อยละต้นข้าวจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ร้อยละต้นข้าวของข้าวเปลือกที่ผ่าน การอบแห้งตามระยะเวลาต่างๆ จะสูงขึ้นและค่อนข้างคงที่ (66-68% มาตรฐานแห้ง) ที่ความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือกสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 18-20% มาตรฐานแห้งเนื่องจากการเกิดgelatinization สามารถอธิบายได้ดังนี้ ภายในเมล็ดข้าวนั้นประกอบด้วยกลุ่มแป้งและโปรตีนเกาะตัวกัน ส่วนที่เป็นแอมิโลสจะละลายและดูดซับน้ำทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงกัน

ส่วนที่เป็นแอมิโลสจะละลายและดูดซับน้ำทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับไม่ได้ เช่นส่วนผลึกหาย

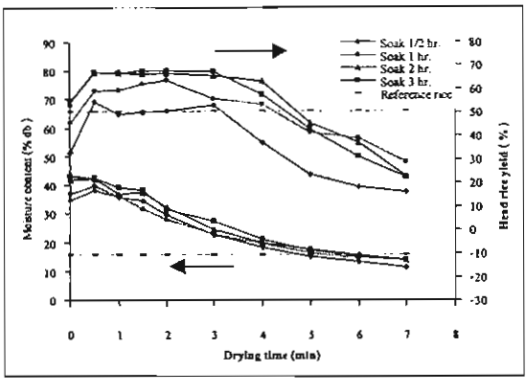


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกที่เวลาในการแช่และการอบแห้งต่าง ๆ

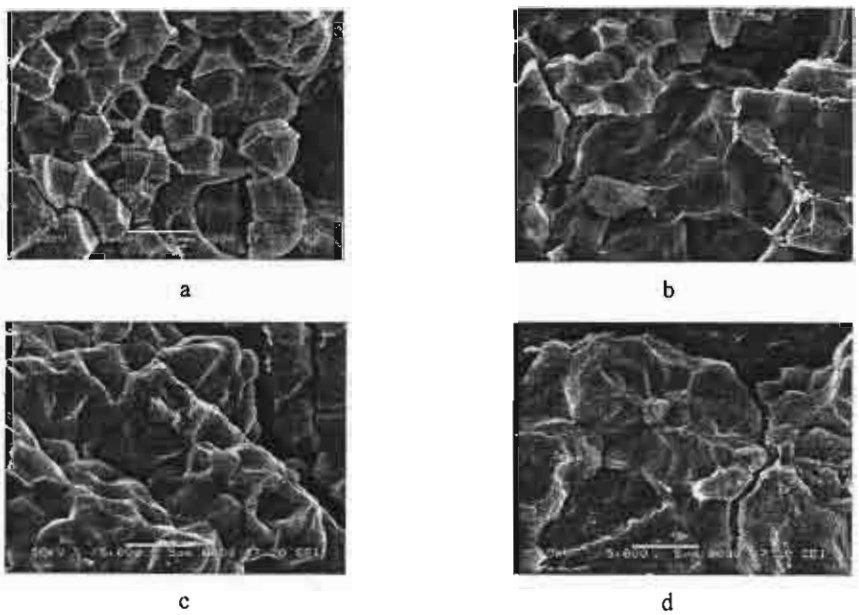
ไป (Crystalline melting) ไม่เห็นลักษณะกากบาท (Loss of birefringence) โดยโมเลกุลจะยึดเกาะเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น [7] รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดสามารถประสานกันมากขึ้นดังรูปที่ 4 และเมื่อนำมาทำให้แห้งเมล็ดข้าวจะมีลักษณะแข็งใสเหนียวทนต่อการขัด เมื่อนำเมล็ดไปขัดสีจะได้ร้อยละต้นข้าวสูง การเกิด gelatinization มากหรือน้อยขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวเปลือก และระยะเวลาที่เหมาะสม ถ้าความชื้นเริ่มต้นสูงจะทำให้ช่วงเวลาการเกิดgelatinization มากขึ้นส่งผลให้ร้อยละต้นข้าวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเกิดgelatinization ของข้าวที่ผ่านกระบวนการโดยเครื่อง DSC ดัง ตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวที่แช่ระยะเวลานานขึ้นมีร้อยละต้นข้าวสูงขึ้น จากการทดลองใช้อุณหภูมิน้ำแช่เริ่มต้น 80°C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิการเกิด gelatinization ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีอุณหภูมิการเกิด gelatinization ประมาณ 64-68°C [8] ในกรณีที่ร้อยละต้นข้าวที่เวลาการแช่ 0.5 และ 1 ชั่วโมงต่ำกว่าข้าวอ้างอิง เนื่องจากช่วงเวลาในการเกิด gelatinized สั้นทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวลดลงและสาเหตุที่ความชื้นสุดท้ายต่ำที่เวลา การอบแห้งต่าง ๆ ได้ร้อยละต้นข้าวลดลงต่ำมาก เนื่องจากใช้เวลาการอบแห้งนานเกินไปทำให้ปริมาณความร้อนส่วนใหญ่ที่ใช้ในการระเหยน้ำถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิแก่เมล็ดข้าวเปลือกเมล็ดข้าวจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากเกิน โครงสร้างเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงถึงขั้นเกิดเป็นโพรงอากาศลักษณะคล้ายการเดือดของน้ำแป้งขึ้นภายในเมล็ดข้าวดังรูปที่ 5 ทำให้เกิดการแตกหักได้ง่ายและอีกประการหนึ่งเมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกออกจากห้องอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงและเกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ด ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดนำไปสู่การเกิดรอยร้าว เมื่อนำไปขัดสีจึงได้ร้อยละต้นข้าวลดลง

ความขาวของข้าวสาร

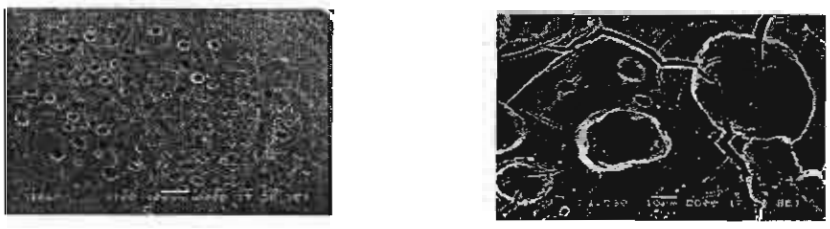
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและความขาวของข้าวสาร ที่เวลาในการ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของร้อยละความชื้นและร้อยละต้นข้าว ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

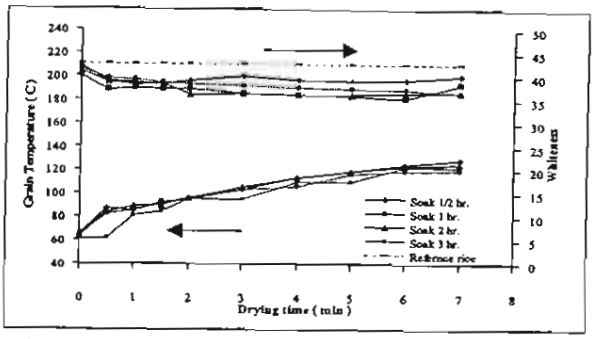


รูปที่ 4 ลักษณะการเกิดgelatinizationของข้าวโดยเครื่อง Scanning electron micrographs
(a)โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชข้าวอ้างอิง (b) ข้าวที่ผ่านการแช่ 0.5 และอบแห้ง 2 นาที
(c)ข้าวที่ผ่านการแช่ 1 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที (d) ข้าวที่ผ่านการแช่ 2 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที



รูปที่ 5 ลักษณะการเกิดgelatinizationของข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 0.5 ชั่วโมง และอบแห้ง 7 นาที โดยเครื่อง Scanning electron micrographs (a) ภาพขยาย X100 (b) ภาพขยาย X 1000

แช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าข้าวที่ผ่านการแช่และการอบแห้งจะมีความขาวลดลงต่ำกว่าข้าวอ้างอิงในทุกเงื่อนไขการทดลอง การเปลี่ยนแปลงสีของข้าวดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากสารประกอบ



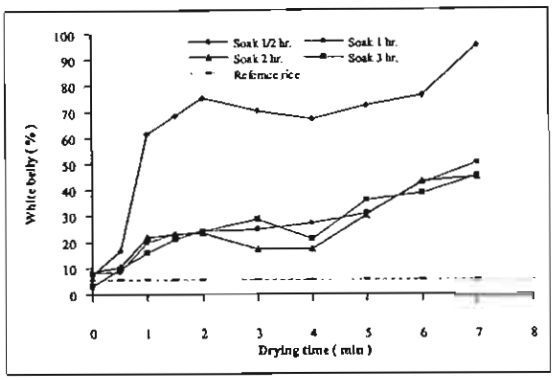
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือกและความขาวของข้าวสาร ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

ที่อยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Browning reaction) แบบเมลลาร์ด โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อน้ำตาลที่มีอยู่ในข้าวได้รับความร้อน ซึ่งความร้อนจะไปทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกันกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำและเมื่อให้ความร้อนต่อไปพันธะภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำจะหลุดออกจากกันและเกิดเป็นสารประกอบคีโตนขึ้นมา ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่ทำให้เกิดสีคล้ำในเมล็ดข้าวและสีน้ำตาลอาจมีส่วนเกิดจากสีของเปลือกข้าวซึมแพร่เข้าสู่เนื้อเมล็ดขณะแช่และติดแน่นขณะอบแห้ง ระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีช่วงการเกิดการควบแน่นของไอน้ำอุณหภูมิของเมล็ดต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอภายในเมล็ดข้าวเปลือก ความดันไอภายนอกเมล็ดจะสูงกว่าภายในเมล็ดจึงเกิดการแพร่ความชื้นเข้าภายในเมล็ดและพาเอาสารประกอบและสารสีของข้าวเปลือกและข้าวกล้องที่อยู่บริเวณผิวซึมแพร่เข้าไปภายในเมล็ด ด้วยเหตุดังกล่าวจึงทำให้ข้าวมีความขาวลดต่ำลงหรือมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการแช่และอบแห้ง

ร้อยละ White belly

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ White belly ของข้าวสาร ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ พบว่าปริมาณ White belly ของข้าวสารเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวอ้างอิงในทุกเงื่อนไขการทดลอง ข้าวที่ผ่านการแช่ระยะเวลาสั้นและอบแห้งระยะเวลานานจะมีแนวโน้มการเพิ่มในปริมาณที่สูงขึ้นกว่าข้าวที่แช่ระยะเวลาการแช่มากขึ้นและระยะเวลา การอบแห้งน้อยลง จากคุณสมบัติของข้าวที่ใช้ในการทดลองคือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ จากการทดลองพบว่าปริมาณ White belly เพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้คือ White belly เกิดจากการหักเหของแสงที่ส่องผ่านเมล็ดข้าวทำให้มองเห็นมีลักษณะขาวขุ่นตรงกลางเมล็ดข้าวสาร [9] เนื่องจากแอมิโลเพกตินมีโครงสร้างของโมเลกุลเป็นกิ่งก้านสาขาเมื่อเกิดการพองตัวเป็นเจลโมเลกุลซ้อนทับกันแสงที่สองผ่านจึงเกิดการหักเหทำให้มองเห็นเมล็ดข้าวมีลักษณะขาวขุ่น

ส่วนแอมิโลสโครงสร้างของโมเลกุลเป็นเส้นตรงการหักเหของแสงจึงน้อยกว่า ดังนั้นในช่วงที่ใช้ระยะเวลาการอบแห้งที่มากขึ้นข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำเมื่อเกิด gelatinization ภายในเมล็ดขึ้นปริมาณ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของปริมาณ White belly ของข้าวสาร ที่เวลาในการแช่และการอบแห้งที่เวลาต่าง ๆ

แอมิโลสไม่สามารถไปแทรกอุดตามโครงสร้างของแอมิโลเพกตินภายในเมล็ดได้ทั่วถึงและนอกจากนี้โครงสร้างของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงมีลักษณะเกิดเป็นโพรงอากาศคล้ายการเดือดของน้ำแป้ง(รูปที่ 5) ทำให้เกิดการหักเหของแสงมากขึ้นจึงมีปริมาณ White belly เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

การเกิด gelatinization ของข้าวโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

การวิเคราะห์ค่าเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลง (ΔH) แสดงผลดังตารางที่ 1 จะเห็นว่า T_{onset} หรืออุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิด gelatinized ของข้าว, T_{peak} หรืออุณหภูมิสูงสุดในการเกิด gelatinized และ $T_{conclusion}$ หรืออุณหภูมิสุดท้ายในการเกิด gelatinized ของข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งสูงขึ้นจากข้าวอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ผ่านการแช่และอบแห้งได้เกิดการเจลาทิไนซ์ไปบางส่วนแล้ว ค่า ΔH หรือพลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิด gelatinized จะแสดงถึงการใช้พลังงานความร้อนในการทำให้ข้าวสุก จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าข้าวอ้างอิง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์การเกิด gelatinization ของข้าวโดยใช้เครื่อง DSC

ตัวอย่างข้าว	Temperature(^{o}C)			ΔH	Degree
	T onset	T peak	T conclusion	(J/g)	of gelatinization
อ้างอิง 15.7% มาตรฐานแห้ง	63.8	69.0	72.3	3.32	0
แช่ 0.5 ชั่วโมง	63.7	68.8	70.9	3.27	1.5
แช่ 1 ชั่วโมง	63.9	68.7	72.2	3.11	6.3
แช่ 2 ชั่วโมง	63.6	68.7	72.3	2.9	12.6
แช่ 3 ชั่วโมง	63.7	68.7	72.0	2.62	21.1
แช่ 0.5 ชั่วโมงอบแห้ง 2 นาที	63.8	68.8	71.9	2.28	31.3
แช่ 1 ชั่วโมงอบแห้ง 2 นาที	63.9	68.8	72.0	1.29	61.1
แช่ 2 ชั่วโมงอบแห้ง 2 นาที	68.0	68.8	71.7	0.73	78.0
แช่ 3 ชั่วโมงอบแห้ง 2 นาที	68.2	68.8	71.7	0.38	88.5

ค่า ΔH จะลดลงตามระยะเวลาการแช่เช่นกันนั่น แสดงถึงว่าข้าวที่ผ่านการแช่ ได้เกิดการ gelatinized ไปบางส่วนแล้วจึงใช้พลังงานความร้อนในการทำให้ข้าวสุกน้อยลง ข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง มีค่า ΔH น้อยกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลา 0.5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลายาวนานจะเกิดการเจลาทิไนซ์มากกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลาสั้นซึ่งเมื่อนำมาคิดเป็น Degree of gelatinization ข้าวที่แช่ 0.5 ชั่วโมงจะมีค่า 1.5% และข้าวที่แช่ 3 ชั่วโมงจะมีค่า 21% และเมื่อผ่าน การอบแห้งที่ระยะเวลา 2 นาที ข้าวที่แช่ 0.5 ชั่วโมงจะมีค่า 31.3% และข้าวที่แช่ 3 ชั่วโมงจะมีค่า 88.5% จากการวิเคราะห์การเกิด gelatinization ของข้าวโดยใช้เครื่อง DSC นี้เป็นการยืนยันว่าข้าวที่แช่นานกว่า (แช่ 3 ชั่วโมง) เกิดการgelatinization มากกว่าข้าวที่ผ่านการแช่เป็นระยะเวลาน้อยกว่า (แช่ 0.5 ชั่วโมง) ที่ระยะเวลาในการอบแห้งค่าเดียวกัน

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการอบแห้งข้าวนึ่งสำหรับข้าวหอมโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าร้อยละต้นข้าวเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาการแช่และอบแห้งนานขึ้นซึ่งได้ร้อยละต้นข้าวสูง 65-67% ที่เวลาการอบแห้ง 1.5-3 นาที และลดลงเมื่อใช้เวลาการอบแห้งมากกว่า 3 นาทีขึ้นไป เมื่อใช้เวลาในการอบแห้งนานความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลของข้าวจึงส่งผลให้ความขาวของข้าวลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาการแช่และการอบแห้ง เมื่อเวลาในการอบแห้งนานขึ้นทำให้ช่วงเวลาการเกิดgelatinization มากขึ้น แต่เนื่องจากพันธุ์ข้าวที่ใช้ทดลองเป็นพันธุ์ข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ ทำให้แอมิโลสไม่สามารถอุดตามรอยแตกร้าวได้ทั่วถึงส่งผลทำให้ปริมาณ White belly เพิ่มมากขึ้นในทุกเงื่อนไขการทดลอง การทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าวสุก เวลาอบแห้งที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ข้าวสุกมีความแข็งและร่วนมากขึ้น เนื่องจากการเกิด gelatinization ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำลดลง และจากการวิเคราะห์การเกิด gelatinization ของข้าวด้วยเครื่อง DSC เป็นการยืนยันว่าข้าวที่แช่และอบแห้งที่ระยะเวลานานกว่าจะเกิดการgelatinization มากกว่า โดยมีร้อยละDegree of gelatinization สูงสุดเท่ากับ 88.5% ที่ระยะเวลาการแช่ 3 ชั่วโมงและอบแห้ง 2 นาที

คำขอบคุณ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่อง

เอกสารอ้างอิง

1. Kar, N., Jain, R.K., Srivastav. P.P. (1999), Parboiling of Dehusked Rice, *Journal of Food Engineering*, Vol. 9, pp.17-22.

2. Bhattacharya, S. (1996), Kinetics on Colour Changes in Rice due to Parboiling, *Journal of Food Engineering*, Vol. 29, pp. 99-106.

3. Toshinori, K., Bhattacharya, K.R., and Ali, S.Z. (1993), Effect of Processing Conditions on the Color

Intensity of Parboiled Rice, *Journal of Society of Agricultural Structures Japan*, Vol. 20, No. 1, pp. 153-160.

4. Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronarit, S., Wetchacama, S., and Prachayawarakorn, S. (2003), Superheated Steam Fluidised Bed Paddy Drying , *Journal of food Engineering* , pp. 67-73.
5. Tang, Z., Cenkowski, S. and Muir, W.E. (2000), Dehydration of sugar-beet pulp in superheated steam and hot air, *Transactions of the ASAE*, Vol. 43(3), pp. 685-689.
6. Iyota, H., Nishimura, N., Onuma, T. and Nomura, T. (2001), Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air, *Drying Technology*, Vol.19(7), pp.1411-1424.
7. Lai, H. (2000), Effects of Hydrothermal Treatment on the Physicochemical Properties of Pregelatinized Rice Flour, *Food Chemistry*, Vol. 72, pp. 455-463.
8. ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, กรมวิชาการเกษตร. (2542), การวิเคราะห์คุณภาพข้าวหอมมะลิทางเคมี, ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, 70 หน้า
9. Kim, S.S., Lee, S.E., Kim, O.W., Kim, D.C. (2000), Physicochemical Characteristics of Chalky Kernels of Cook Rice, *Cereal Chemistry*, Vol.77, pp. 376-379.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อิทธิพลของการกระจายขนาดรูพรุนที่มีต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุรูพรุน

EFFECT OF PORE SIZE DISTRIBUTION ON WATER TRANSPORT INSIDE POROUS MATERIALS

ปรีดา ปรากฏมาก[1,*] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1] สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2]

[1] *คณะพลังงานและวัสดุ* [2] *คณะวิศวกรรมศาสตร์*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายวัสดุรูพรุนแบบสองมิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการแจกแจงขนาดท่อรูพรุนที่มีต่ออัตราการอบแห้ง ภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่โดยใช้สมการการแพร่ในสภาวะไม่คงตัวตามกฎของฟิค มาอธิบายกลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุรูพรุน โดยรูพรุนมีรูปแบบสุ่มการแจกแจงแบบเส้นโค้งปกติและการแจกแจงแบบเอกรูปภายใต้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ผลของการแจกแจงขนาดรูพรุนที่มีต่ออัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในโครงข่ายรูพรุนอธิบายด้วยค่าความชื้นเฉลี่ยและทัศนะการกระจายความชื้นภายในโครงข่ายซึ่งแสดงเป็นความเข้มสีระดับเทา ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเปลี่ยนลักษณะทางโครงสร้างของโครงข่ายให้เป็นระเบียบในลักษณะแบบก้นหอย (Spiral) พบว่าโครงข่ายที่จัดเรียงแบบ Inward spiral ให้การแพร่ของน้ำดีกว่าโครงข่ายที่เรียงแบบ Outward spiral

Abstract

This research was theoretically studied on the water transport in a 2-D pore network by considering the influence of throat distribution on drying rate under unsteady state condition. The moisture movement within network of pores is presumably followed with Fick's law of diffusion. The simulations have shown that the moisture movement within network of pores randomly distributed according to probability density functions i.e. uniform and normal distributions becomes different which can be interpreted by the average moisture content. A 2-D representation of network composition gradients in spaces has been developed using grey-scale colour to represent pore moisture content.In addition to pore size distribution, the geometrically arranged pore network shows some effect in which the spiral inward structure shows the higher potential capability of removing water from the network, comparing to either random or spiral outward structures.

คำสำคัญ : การอบแห้ง/โครงข่ายรูพรุน / วัสดุรูพรุน

* **Corresponding author**. Tel.: 0-1711-9781 E-mail address: preedaenergy@yahoo.com

1. บทนำ

ปัจจุบันการอบแห้งวัสดุรูพรุนมีความสำคัญในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น การเคลือบผิววัสดุ การอบแห้งอาหาร กระดาษ สิ่งทอ ไม้ วัสดุก่อสร้าง เซรามิก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และยาเป็นต้น ประโยชน์ของการอบแห้งวัสดุรูพรุนก็เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนัก เพื่อการถนอมรักษาอาหาร ตลอดจนช่วยให้กระบวนการการผลิตดีขึ้น กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำในระดับรูพรุนซึ่งมีโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนยากต่อการทำความเข้าใจ ดังนั้นการพัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโครงข่ายรูพรุนมีส่วนช่วยทำให้เข้าใจสภาพการเคลื่อนที่ของน้ำภายในวัสดุรูพรุน และเป็นแนวทางในการสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น

เดิมทีมีการใช้แบบจำลองโครงข่ายรูพรุนเพื่ออธิบายการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในคะตะลิสต์และการไหลของน้ำในช่องว่างหินใต้ผืนดิน[1] ต่อมาได้มีการนำหลักการดังกล่าวเข้ามาประยุกต์ใช้ในการอธิบายการอบแห้งวัสดุรูพรุน ซึ่งมีการศึกษากันอย่างแพร่หลายอาทิเช่น ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นภายในวัสดุโดย Huinink และคณะ[2] พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุมีผลทำให้การลดลงของความชื้นภายในวัสดุไม่สม่ำเสมอและในบางบริเวณไม่สามารถกำจัดออกไปได้ นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างรูพรุนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในการอบแห้งเช่นกัน ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างรูพรุนประกอบไปด้วยท่อรูพรุนขนาดต่างๆที่ไม่เท่ากัน ถ้าท่อมีขนาดใหญ่โมเลกุลจะเคลื่อนที่ผ่านได้สะดวกกว่าท่อที่มีขนาดเล็ก อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีท่อเล็กและใหญ่มีการเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายอย่างอิสระต่อกัน การเคลื่อนที่ของของเหลวอาจมีการแพร่ของโมเลกุลที่แตกต่างกันไปด้วย Rigby และ Sandra[3] ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุรูพรุนพบว่า เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงจะทำให้สัดส่วนรูพรุนขนาดใหญ่ถูกรูพรุนขนาดเล็กบดบังลดลง และจากการศึกษาของ Portsmouth และ Gladden[4] พบว่าการเพิ่มค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกระจายขนาดรูพรุนจะมีผลกระทบจากรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของของไหลภายในโครงข่ายรูพรุนลดลง จากผลการศึกษาข้างต้นทำให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการกระจายขนาดรูพรุนในโครงข่ายมีผลกระทบต่อการแพร่ของโมเลกุลโดยตรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำแบบจำลองของโครงข่ายวัสดุรูพรุนสองมิติสร้างเป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการแจกแจงขนาดของรูพรุนและรูปแบบของการจัดเรียงของรูพรุนในรูปแบบต่างๆที่มีผลต่ออัตราการอบแห้งโดยในงานวิจัยนี้สมมติว่ากระบวนการอบแห้งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิคงที่

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การแพร่ของน้ำในโครงข่ายรูพรุน

โมเลกุลจะเคลื่อนที่ได้จำเป็นต้องอาศัยความแตกต่างอันเนื่องมาจากแรงขับเคลื่อน เช่น ความเข้มข้น ความดัน อุณหภูมิ และแรงกระทำภายนอก แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการแพร่ของโมเลกุลภายในวัสดุรูพรุนจะเกิดขึ้นจากความแตกต่างของความเข้มข้นของความชื้น กลไกการเคลื่อนที่ของน้ำที่เกิดจากปัจจัยดังกล่าวเราสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟิค พิจารณาการถ่ายเทมวลในท่อทรงกระบอกรูเดี่ยวใดๆ

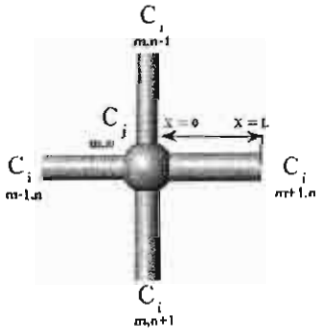
ภายในโครงข่ายรูพรุนโดยสมมติว่าท่อมีความยาว L ให้ปลายท่อทั้งสองด้านมีความเข้มข้นคงที่ C_i และ C_j และเมื่อเขียนสมการอนุพันธ์ในสภาวะไม่คงตัวพร้อมทั้งสมการควบคุมและสมการขอบเขตของปัญหาจะได้ว่า

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \qquad (1)$$

โดยที่ M คือความชื้นภายในรูพรุน (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง), D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ (m^2/s), x คือระยะการแพร่ (meter), และ t คือเวลาในการอบแห้ง (sec) เงื่อนไขขอบเขตเป็นดังนี้ $M(0,t) = C_i$ และ $M(L,t) = C_j$ เมื่อ $t > 0$, สภาวะเริ่มต้น $M(x,0) = f(x) = M_{in}$ เมื่อ $0 \le x \le L$. จากสมการที่ (1) พร้อมกับสภาวะเริ่มต้นและสภาวะขอบเขตสามารถแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์แบบพาร์เชียลในสภาวะไม่คงตัวเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันการกระจายความชื้น M(x,t) ภายในท่อรูพรุนได้ดังนี้

$$M(x,t) = \frac{2}{\pi}\left[2(M_{in}-C_i)+(C_i-C_j)\right]\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)e^{-n^2\pi^2 Dt/L^2} + \frac{1}{L}(C_j-C_i)x + C_i \qquad (2)$$

ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำสมการนี้ไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายรูพรุนที่ประกอบไปด้วย Node และรูพรุนที่มีขนาดเล็กและใหญ่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นอิสระดังรูปที่ 1 กำหนดให้ (m,n) เป็นตำแหน่งของ Node และ (m-1,n), (m+1,n), (m,n+1) และ (m,n-1) คือตำแหน่ง Node ที่อยู่ข้างๆทางด้านซ้าย ขวา ล่างและบนตามลำดับ



รูปที่ 1 ตัวอย่างการเชื่อมต่อของรูพรุนที่ตำแหน่งใดๆภายในโครงข่าย

ทำสมดุลมวลของน้ำที่ตำแหน่งของ Node m, n โดยสมมติว่าไม่มีการสะสมของมวลเกิดขึ้น สามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\sum_{i=1}^{4} N_{i,j} = 0 \qquad (3)$$

โดย $N_{i,j} = -\pi r_i^2 D\left(\left.\frac{dM_j(x,t)}{dx}\right|_{x=0}\right)$ เมื่อ $N_{i,j}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของน้ำของรูพรุน i, j เมื่อแทนค่า $N_{i,j}$ ลงในสมการที่ (3) และนำไปใช้กับทุกๆ Node บนโครงข่ายลักษณะของสมการประกอบไปด้วยเทอมของความเข้มข้นของความชื้นคูณอยู่กับเทอมค่าคงที่หนึ่งๆประกอบไปด้วยรัศมีรู

พรุน ความยาวรูพรุน เวลา และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ จะเห็นได้ว่าสามารถแยกค่าคงที่และสัมประสิทธิ์จัดรูปเป็นเมตริกซ์ได้ดังลักษณะตัวอย่างต่อไปนี้

$$[A][C]=[b] \qquad (4)$$

โดย [A] คือพจน์ของ r_i ที่คูณกับเทอมของสัมประสิทธิ์ที่เปลี่ยนไปกับเวลาและเป็นเมตริกซ์แบบ Pentadiagonal , [C] คือความเข้มข้นที่ Node ต่างๆภายในโครงข่ายจำนวน N^2 Node, [b] คือพจน์ของค่าคงที่ หลังจากทราบความชื้นที่ Node ต่างๆภายในโครงข่ายเราสามารถคำนวณความชื้นเฉลี่ยในโครงข่ายรูพรุนได้จากสมการที่ (5) เมื่อ $\overline{M}_{network}$ คือความชื้นเฉลี่ยในโครงข่าย, $kg_{water} / kg_{drysolid}$, z คือจำนวนท่อทั้งหมดในโครงข่าย

$$\overline{M}_{network} = \frac{\pi \sum_{i=1}^{z} r_i^2 \int_0^L M(x,t)dx}{\pi L \sum_{i=1}^{z} r_i^2} \qquad (5)$$

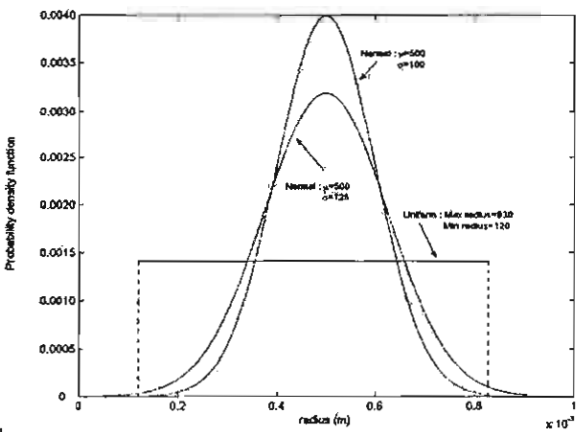
หลังจากที่กำหนดขนาดรูพรุนต่างๆลงไปในโครงข่าย แล้วสามารถคำนวณหาความเข้มข้นในแต่ละ Node ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยการแก้สมการที่ (4) นำค่าความเข้มข้นในแต่ละ Node ในเวลานั้นคำนวณหาความเข้มข้นเฉลี่ยภายในโครงข่ายตามสมการที่(5) การคำนวณจะดำเนินไปจนกระทั่งความเข้มข้นเฉลี่ยมีค่าเท่ากับความชื้นสมดุลซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ความชื้นสมดุลเป็น 15% มาตรฐานแห้ง

3. การแจกแจงขนาดของรูพรุน

ในการสร้างโครงข่ายรูพรุนนั้น เรากำหนดขนาดของรูพรุนภายใต้ Probability density function โดยใช้ Random number generator เป็นตัวสุ่มขนาดของรูพรุนและนำรูพรุนขนาดต่างๆที่จำลองขึ้นมาแทนลงในโครงข่ายอย่างอิสระ ซึ่งประกอบไปด้วยจำนวนท่อรูพรุนทั้งสิ้น 2N(N+1) ท่อ เมื่อ N คือขนาดของโครงข่ายที่กำหนด

การแจกแจงขนาดรูพรุนแบบเส้นโค้งปกติ: $f(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < r < +\infty$

การแจกแจงขนาดรูพรุนแบบเอกรูป: $f(r) = \frac{1}{\beta-\alpha}, \quad \alpha \le r \le \beta$



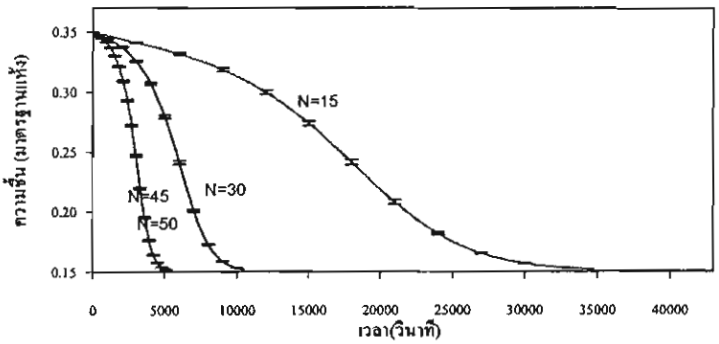
รูปที่ 2 แสดงความหนาแน่นความน่าจะเป็นของการแจกแจงขนาดรูพรุน

เมื่อ μ คือรัศมีท่อเฉลี่ยและ σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของรัศมีท่อ ส่วน β และ α คือ รูปแบบพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของโครงข่ายที่มีการแจกแจงขนาดของรูพรุนแบบเอกรูป รูปที่ 2 แสดง Probability density function ที่ใช้ในการจำลองของปัญหา

4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการศึกษา

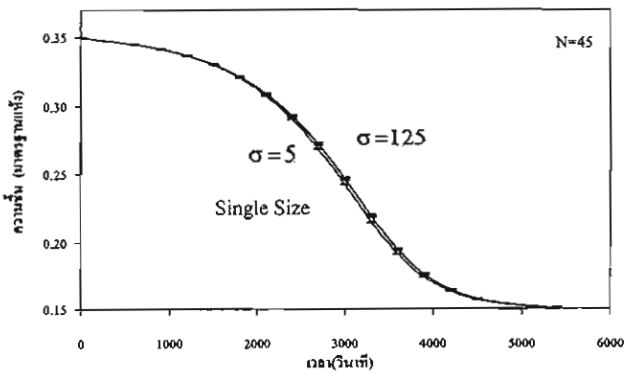
4.1 อิทธิพลของขนาดโครงข่าย

ในการจำลองปัญหากำหนดเงื่อนไขต่างๆดังนี้ ค่าความชื้นเริ่มต้น $M_{in}=0.35\ kg_{water}/kg_{drysolid}$ ความชื้นสมดุล $M_{eq}=0.15\ \ kg_{water}/kg_{drysolid}$ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $1\times10^{-12}\ m^2/s$ และขนาดของอนุภาค 3×3 มิลลิเมตร รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของขนาดโครงข่ายที่มีต่อการลดความชื้นโดยคำนวณจากการแจกแจงขนาดของรูพรุนแบบเส้นโค้งปกติโดยให้ μ=500 ไมครอน และ σ =125ไมครอน พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดโครงข่ายมากขึ้นเรื่อยๆจนถึงโครงข่ายขนาด 45×45 เป็นต้นไปจะมีผลทำให้การลดลงของความชื้นเฉลี่ยมีความเสถียรที่ยอมรับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ขนาดโครงข่าย 45×45 ทุกๆการทำ Simulation



รูปที่ 3 ผลของกระทบขนาดของโครงข่ายที่มีต่อการลดความชื้น

4.2 อิทธิพลของการแจกแจงขนาดรูพรุน

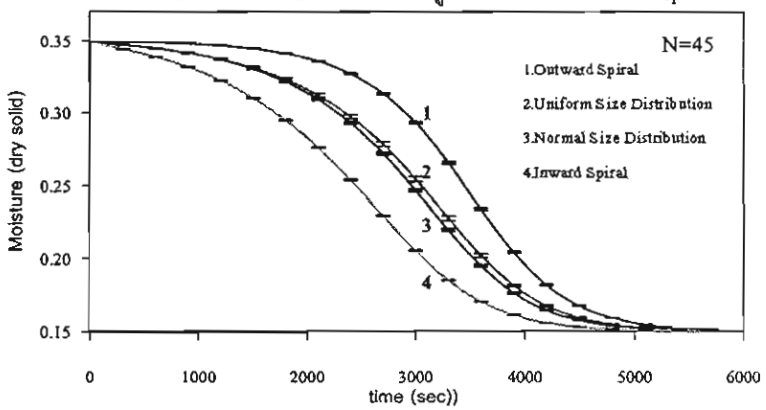


รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นภายในโครงข่ายรูพรุนที่มีการแจกแจงขนาดของรูพรุนแบบปกติที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 125 และ 5 ไมครอน

รูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยระหว่าง σ =5 ไมครอน กับโครงข่ายที่มีขนาดท่อเท่ากันทั้งโครงข่ายซึ่งเท่ากับ 500 ไมครอน พบว่าลักษณะกราฟของความชื้นเฉลี่ยมีความแตกต่างกันน้อยเนื่องจากการกระจายขนาดของรูพรุนในโครงข่ายใกล้เคียงกัน จากนั้นเปรียบเทียบการลดลงของความชื้นเฉลี่ยระหว่าง σ =125 และ σ =5 ไมครอน พบว่าความชื้นเฉลี่ยที่ σ =5 ไมครอน มีค่าลดลงตามเวลาต่ำกว่าที่ σ =125 ไมครอน โดยไม่ค่อยเด่นชัดมากในช่วงแรกๆ และเริ่มมีความแตกต่างมากขึ้นที่ช่วงกลางของการอบแห้งแสดงว่าอิทธิพลของการแจกแจงขนาดรูพรุนจากการเปลี่ยนแปลงความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีผลกระทบต่อการลดลงของความชื้น โดยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำให้การแพร่ของน้ำดีกว่าโครงข่ายที่ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง

4.3 อิทธิพลของรูปแบบการแจกแจงขนาดรูพรุน

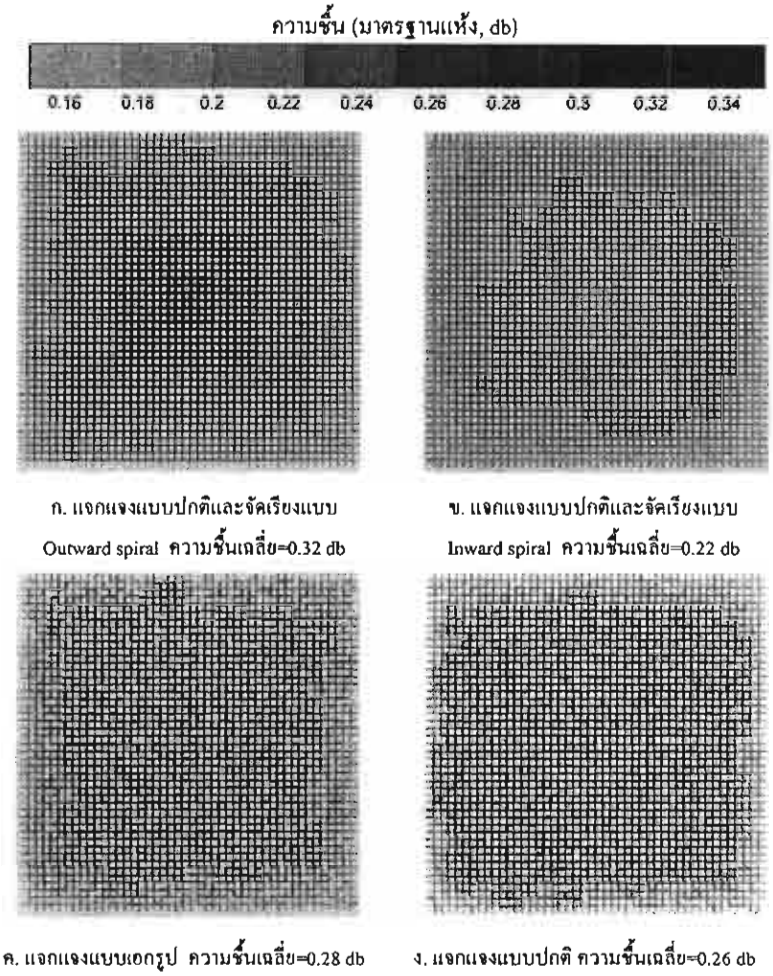
รูปที่ 5 แสดงการลดลงของความชื้นเฉลี่ยในโครงข่ายจากรูปแบบการกระจายขนาดรูพรุนภายใต้ปริมาตรของรูพรุนทั้งโครงข่ายเท่ากันโดยพิจารณาการแจกแจงขนาดรูพรุนแบบเอกรูปและการแจกแจงแบบเส้นโค้งปกติ นอกจากรูปแบบการแจกแจงขนาดรูพรุนที่กล่าวมาแล้วยังแสดงผลของการจัดเรียงท่อรูพรุนที่มีผลต่อการลดลงของความชื้น โดยนำขนาดท่อจากการแจกแจงแบบปกติที่กล่าวข้างต้นมาวางลงบนโครงข่ายแบบตามเข็มนาฬิกาโดยให้ท่อที่มีขนาดใหญ่ที่สุดอยู่รอบนอกและลดหลั่นขนาดท่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งท่อขนาดเล็กที่สุดอยู่กึ่งกลางโครงข่ายเรียกการจัดเรียงแบบนี้ว่า Inward spiral ส่วนการจัดเรียงแบบ Outward spiral ก็ทำในทำนองเดียวกันนี้แต่ให้ขนาดรูพรุนที่เล็กที่สุดอยู่รอบนอก ผลที่ได้พบว่าความชื้นเฉลี่ยสะสมของการจัดเรียงแบบ Inward spiral ลดลงได้เร็วที่สุด รองลงมาคือความชื้นเฉลี่ยสะสมของการแจกแจงแบบเส้นโค้งปกติ แบบเอกรูป และแบบ Outward spiral ตามลำดับ



รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงความชื้นจากการกระจายและจัดเรียงขนาดท่อแบบต่างๆ

รูปที่ 6 แสดงความชื้นเฉลี่ยภายในโครงข่ายแบบต่างๆที่เวลาเดียวกัน ให้ระดับความเข้มสีแทนความชื้นที่ตำแหน่ง Node ต่างๆ จากรูปที่ 6ค และ 6ง พบว่าระดับความเข้มสีไม่สม่ำเสมอแสดงว่าการแพร่ของน้ำในแต่ละทิศทางไม่เท่ากันเนื่องจากกระจายตัวของรูพรุนในตำแหน่งต่างๆบนโครงข่ายไม่เป็นระเบียบทำให้เส้นทางการแพร่ไม่แน่นอนเมื่อพิจารณาการกระจายตัวจากการสุ่มขนาดรูพรุนแบบเอกรูปพบว่าความหนาแน่นของรูพรุนขนาดใหญ่มีน้อยกว่าการแจกแจงปกติและเกิดการเชื่อมต่อของรู

พรุนที่มีขนาดแตกต่างกันมาก(ต่างจากการแจกแจงแบบปกติที่มีรูพรุนขนาดใกล้เคียงกันมากกว่า) ทำให้เส้นทางการแพร่ของน้ำมีความคดเคี้ยว ส่งผลให้ประสิทธิภาพการลดลงของความชื้นต่ำกว่าการแจกแจงแบบปกติและเมื่อเปรียบเทียบระดับความเข้มสี พบว่าการแจกแจงแบบปกติมีความแตกต่างของระดับสีต่ำแสดงว่ามีความชื้นสะสมในโครงข่ายน้อยกว่า โดยความชื้นเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางของโครงข่ายที่กระจายแบบปกติและเอกรูปคือ 0.312 db และ 0.321 db ตามลำดับ นอกจากนี้ความชื้นเฉลี่ยทั้งโครงข่ายที่แจกแจงแบบปกติและแบบเอกรูปคือ 0.270 db และ 0.279 db ตามลำดับดังนั้นจึงเป็นตัวบ่งชี้ว่าการแพร่ของน้ำมีอัตราสูงกว่าการแจกแจงแบบเอกรูปอีกทางหนึ่งด้วย



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความชื้นในแต่ละ Node จากการจัดเรียงรูพรุนแบบต่างๆ ที่เวลา 2800 วินาที

จากรูปที่ 6ข แสดงการจัดเรียงตัวของรูพรุนอย่างเป็นระเบียบแบบ Inward spiral จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการแพร่ของน้ำเร็วที่สุด (ความแตกต่างของระดับความเข้มสีน้อย) ความชื้นเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางของโครงข่ายคือ 0.34 db การแพร่ของน้ำมีลักษณะสม่ำเสมอทุกทิศทางและแพร่ได้อย่างสะดวก เนื่องจากท่อโตขึ้นเรื่อยๆจากภายในไปสู่ภายนอกโครงข่าย เมื่อมีท่อขนาดใหญ่ซึ่งลำเลียงน้ำได้มากอยู่

ด้านนอกส่งผลการแพร่ของน้ำออกจากโครงข่ายเป็นไปได้อย่างสะดวกตรงข้ามกับในกรณีของรูปที่ 6 มีความแตกต่างของระดับความเข้มสีมากเนื่องจากมีความชื้นสะสมในโครงข่ายมากมีความชื้นเฉลี่ยบริเวณกึ่งกลางของโครงข่ายคือ 0.31 db การแพร่ของน้ำถูกจำกัดด้วยท่อขนาดเล็กที่อยู่ด้านนอกซึ่งมีลักษณะเหมือนคอคอดทำให้น้ำเคลื่อนที่ออกจากโครงข่ายได้ไม่สะดวกจึงต้องใช้เวลาในการแพร่ยาวนานที่สุด

5. สรุป

จากการทำ Simulation พบว่าโครงข่ายขนาด 45 × 45 เป็นโครงข่ายที่เหมาะสมในการคำนวณและมีผลกระทบต่อการลดลงของความชื้นดังนี้ 1.อิทธิพลจากรูปแบบการสุ่มการแจกแจงขนาดรูพรุน 2.อิทธิพลจากลักษณะการจัดเรียงขนาดรูพรุน 3.อิทธิพลของขนาดรูพรุนจากการเปลี่ยนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการจำลองแต่ละครั้ง โดยสองกรณีแรกมีผลกระทบมากที่สุดจากกรณีแรกพบว่าการแจกแจงขนาดรูพรุนแบบเส้นโค้งปกติให้การแพร่สูงกว่าโครงข่ายที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป เนื่องจากการแจกแจงขนาดรูพรุนแบบปกติมีผลกระทบจากรูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งมีประสิทธิภาพการแพร่สูงและในกรณีที่สองพบว่าการจัดเรียงขนาดรูพรุนแบบ Inward spiral จะให้อัตราการแพร่ดีที่สุด เนื่องจากมีท่อขนาดใหญ่อยู่ด้านนอกโครงข่ายทำให้ประสิทธิภาพในเคลื่อนที่ของน้ำสูง ตรงข้ามกับกรณีการจัดเรียงแบบ Outward spiral ซึ่งใช้เวลาในการแพร่ยาวนานที่สุด และในกรณีที่สามพบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำให้การแพร่ของน้ำดีกว่าโครงข่ายที่ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง เนื่องจากที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงการแจกแจงขนาดรูพรุนจะมีผลกระทบจากรูพรุนขนาดเล็กซึ่งประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของน้ำต่ำ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่สนับสนุนทางด้านการเงินของงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Sahimi, M. (1995), Flow and transport in porous media and fractured rock, VCH, Weinheim, pp.12-35.
2. Huinink, H.P., Pel, L., Michels M.A.J. and Prat, M. (2002), Drying processes in the presence of temperature gradients - pore-scale modeling; *Eur. Phys. J. E 9*, pp. 487-498.
3. Rigby, S.P., Fletcher, R.S. and Sandra S.N. (2001), "Characterization of macroscopic structural disorder in porous media using mercury porosimetry", *Journal of Colloid and Interface Science*, No. 240, pp. 190-210.
4. Portmouth, R.L.and Gladden L.F. (1991), "Determination of pore connectivity by mercury porosimetry", *Chem Eng Sci.*, Vol. 46, pp. 3023-3036.
5. ต่อพงศ์ ทองทิพย์วิลาส. (2545), วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การออกแบบเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

HEAT PUMP DRYER DESIGN USING OPTIMIZATION TECHNIQUE

อำไพศักดิ์ ทีบุญมา[1,*] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
[2]คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่เหมาะสมที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์เครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน หลังจากนั้นแบบจำลองคณิศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นถูกนำมาใช้ร่วมกับโปรแกรมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหา จากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นของตัวอย่างในถาดแต่ละชั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนั้นจากการทดลองยังพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนมากที่สุด คือ ความชื้นสุดท้ายของตัวอย่าง

ABSTRACT

The objectives of this work were to design, constructed, and tested the performance of optimal heat pump dryer. To achieve these purposes, the mathematical model of heat pump dryer was developed and implemented in the optimization program. The optimum conditions were determined using search method. It was found that the differences of drying air temperature and sample moisture contents of each tier are insignificant. Furthermore, it is revealed from experimental results that the final moisture content of sample remarkably affects the heat pump dryer performance.

คำสำคัญ: การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน, การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด, แบบจำลองคณิตศาสตร์

บทนำ

เครื่องอบแห้งด้วยลมร้อนมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีระบบที่ไม่ซับซ้อนและต้นทุนการสร้างเครื่องต่ำ อย่างไรก็ตามปัญหาที่พบ คือ การอบแห้งด้วยลมร้อนจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งค่อนข้างสูง เนื่องจากลมร้อนที่ใช้อบแห้งไม่มีขั้นตอนการดึงความชื้นในอากาศออกซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อนคุณภาพไม่ค่อนดี การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นอีกทางเลือก

* **Corresponding author.** Tel.: 0-4528-8376 ext 3815; fax: 0-4528-8378
E-mail address: enaumpte@ubu.ac.th

ที่สามารถอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์และพลังงานที่ต่ำ [1] จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยปั๊มความร้อนมีคุณภาพทางด้านสี และกลิ่น ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยลมร้อน [2,3,4] ข้อเสียของเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน คือ เงินลงทุนในการสร้างเครื่องสูงเมื่อเทียบกับระบบอบแห้งด้วยขดลวดความร้อน หรือเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะถูกกว่า [2,5] งานวิจัยในด้านเงื่อนไขการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน Clement และคณะ [6] แนะนำให้ใช้สัดส่วนอากาศไม่ผ่านเครื่องระเหยประมาณ 60-70% ซึ่งจะทำให้ได้อัตราการดึงน้ำออกจำเพาะสูงที่สุด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องอบแห้งผลไม้ด้วยปั๊มความร้อน โดยมีเป้าหมายหลัก คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดรายปีต่อกิโลกรัมน้ำระเหยต่ำที่สุด ในขั้นตอนแรกของการศึกษาจะพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และขั้นตอนที่สองจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นครอบคลุมผลไม้หลากหลายชนิด การศึกษาในครั้งนี้ได้ปรับเปลี่ยนสมการจลนศาสตร์การอบแห้งที่ใช้ในแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้ง ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การแพร่ ความชื้นเริ่มต้น และขนาดของผลิตภัณฑ์ และในขั้นตอนสุดท้ายได้นำเอาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณีมาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำไปสร้างเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

อุปกรณ์และวิธีการ

หลักการพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ อากาศร้อนจะไหลผ่านเข้าไปยังห้องอบแห้งเพื่อให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์และดึงความชื้นออก อากาศชื้นที่ออกจากห้องอบแห้งบางส่วนจะไหลผ่านเครื่องระเหยเพื่อดึงความชื้นออก หลังจากนั้นอากาศจะไหลมารับความร้อนที่เครื่องควบแน่นและเข้าสู่ห้องอบแห้งอีกครั้ง ในส่วนของการทำงานโซลินอยด์วาล์ว เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้โซลินอยด์วาล์วจะเปิดและพัดลมของเครื่องควบแน่นตัวนอกจะทำงานเพื่อระบายความร้อนส่วนเกินทิ้ง การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ แบบจำลองการอบแห้งและปั๊มความร้อน ซึ่งทั้งสองส่วนพัฒนาโดยใช้หลักการอนุรักษ์มวลและพลังงานซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดได้จากเอกสารอ้างอิง [7] ในส่วนของแบบจำลองการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมีสมมุติฐานที่สำคัญหลักๆ คือ 1.) ห้องอบแห้งมีขนาดความจุ 100 กิโลกรัมผลิตภัณฑ์สด 2.) ผลต่างของความชื้นสุดท้ายระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ทางเข้าและทางออกห้องอบแห้งต้องไม่เกิน 3 % d.b. 3.) เวลาที่ใช้ในการอบแห้งแต่ละครั้งไม่เกิน 41 ชั่วโมง โดยใช้เตรียมการ 6 ชั่วโมง และที่เหลือใช้ในการอบแห้ง 4.) สมมุติฐานที่ใช้วิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ คือ อายุใช้งานเครื่องอบแห้ง 5 ปี มูลค่าซากที่ปีสุดท้ายเท่ากับ 10% ของราคาต้นทุน อัตราดอกเบี้ย 8% ค่าบำรุงรักษาเท่ากับ 5% ของราคาต้นทุนและอัตราค่าพลังงาน

ไฟฟ้าเท่ากับ 3 บาท/ยูนิต สำหรับ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุด คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดรายปีต่อกิโลกรัมน้ำระเหย ค่าใช้จ่ายทั้งหมดประกอบด้วยมูลค่าของห้องอบแห้งซึ่งรวมถาด คอมเพรสเซอร์ เครื่องระเหย เครื่องควบแน่น พัดลม ค่าบำรุงรักษา และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งมีรายละเอียดในเอกสารอ้างอิง [7]

การทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ค่าเฉลี่ยจากหลายๆ กรณี ซึ่งมีรายละเอียดคร่าวๆ ดังรูปที่ 2 เงื่อนไขการอบแห้งที่ใช้ทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน คือ สัดส่วนอากาศนำกลับมาใช้อีกเท่ากับ 100% สัดส่วนอากาศไม่ผ่านเครื่องระเหย 67% อุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 55°C และอัตราการการไหลอากาศเท่ากับ 1620 kg/h (0.42 m^3/s) สำหรับขนาดของอุปกรณ์ประกอบด้วย คอมเพรสเซอร์ขนาด 2 kW เครื่องระเหยขนาด 6 kW เครื่องควบแน่นตัวในและตัวนอกขนาดเท่ากับ 8 kW มอเตอร์พัดลมที่ใช้ขนาด 0.75 kW ในการทดสอบได้เลือกใช้ผ้าชุบน้ำเป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบ เนื่องจากผ้าสามารถควบคุมความชื้นได้ง่าย ในช่วงทำการทดสอบจะบันทึกค่าอุณหภูมิของสารทำงานและอุณหภูมิอากาศ ณ จุดต่างๆ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ data logger สำหรับการวัดความเร็วอากาศใช้ hot wire anemometer และการวัดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานได้ใช้ clamp-on meter ในส่วนของความดันสารทำงานได้วัดโดยใช้ bourdon gauge

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

เงื่อนไขการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนที่เหมาะสมที่สุด

จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมที่สุดพบว่าควรสร้างเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้ อัตราการไหลอากาศอยู่ระหว่าง 1400-1900 kg/h สัดส่วนอากาศไม่ผ่านเครื่องระเหยอยู่ระหว่าง 60-70% สัดส่วนอากาศนำกลับมาใช้อีกเท่ากับ 100% และอุณหภูมิอากาศอบแห้งเท่ากับ 55°C โดยที่อุปกรณ์ของปั๊มความร้อนควรมีขนาดดังต่อไปนี้ คอมเพรสเซอร์มีขนาดระหว่าง 1.6-1.8 kW เครื่องระเหยขนาดเท่ากับ 5.0-7.5 kW และเครื่องควบแน่นมีขนาดเท่ากับ 6.5-9.0 kW

สมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน

ผลการทดลองสามารถสรุปได้ในตารางที่ 1 ซึ่งในการทดลองยังได้ตรวจสอบกระจายตัวของอุณหภูมิอากาศอบแห้ง และความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างในแต่ละชั้นด้วย โดยที่ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 3-4 และ 5-6 ตามลำดับ จากตารางที่ 1 จะสังเกตเห็นว่าตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะเครื่องอบ

แห้งด้วยปั๊มความร้อนมากที่สุด คือ ความชื้นสุดท้าย ซึ่งกล่าวได้ว่าสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนจะสูง เมื่อความชื้นสุดท้ายของตัวอย่างสูง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า อัตราการอบแห้งในช่วงแรกจะสูงเนื่องจากความชื้นในตัวอย่างสูง หลังจากเวลาผ่านไปเรื่อยๆอัตราการอบแห้งจะลดลงเนื่องจากความชื้นของตัวอย่างลดลง ในขณะที่อัตราการอบแห้งลดลงตามเวลาพลังงานที่ถูกใช้โดยเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนยังค่อนข้างคงที่ ดังนั้นยิ่งอบแห้งนานเท่าไรสมรรถนะเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนก็จะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเราจะสังเกตเห็นว่าการทดลองที่ใช้เวลาในการอบแห้งนานจะให้อัตราการอบแห้งที่ต่ำ ในทางตรงกันข้ามสำหรับการทดลองที่ใช้เวลาในการอบแห้งสั้นจะให้อัตราการอบแห้งที่สูง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าความชื้นสุดท้ายไม่มีผลต่อสัมประสิทธิ์สมรรถนะปั๊มความร้อน จากรูปที่ 3-4 จะเห็นว่าอุณหภูมิในแต่ละชั้นของถาดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และแทบจะไม่แตกต่างกันเลยเมื่อเวลาการอบแห้งนานขึ้น หากพิจารณาในด้านผลต่างของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ทางเข้าและทางออกของห้องอบแห้งจะเห็นว่าในช่วงแรกจะมีผลต่างของอุณหภูมิประมาณ 6-7 °C หลังจากนั้นจะลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการลดลงของความชื้นในตัวอย่าง ซึ่งในช่วงเริ่มต้นความชื้นในตัวอย่างจะสูงดังนั้นพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิและระเหยน้ำในตัวอย่างจึงถูกใช้มาก ทำให้อุณหภูมิอากาศอบแห้งลดลงค่อนข้างมาก สำหรับในช่วงท้ายของการอบแห้งความชื้นในตัวอย่างลดลงรวมทั้งอุณหภูมิของตัวอย่างเริ่มเข้าสู่สมดุลกับอากาศอบแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ในรูปที่ 5-6 เป็นผลการทดสอบเพื่อดูการกระจายตัวของความชื้นตัวอย่างในแต่ชั้น จากการศึกษาพบว่ามีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของอุณหภูมิและลมที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบ สร้าง และทดสอบเครื่องอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนตามเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ผ้าเป็นตัวอย่างเบื้องต้น จากการทดสอบเครื่องพบว่าสมรรถนะเครื่องอบแห้งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี และมีการกระจายตัวของอุณภูมิและความชื้นที่สม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้เงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

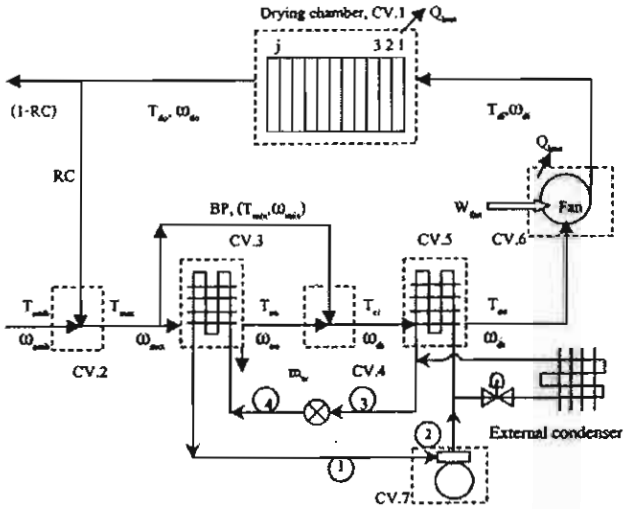
1. Va′zquez, G., Chenlo, F., Moreria, R.,and Cruz, E. (1997), Grape drying in a pilot plant with a heat pump, *Drying Technology-An International Journal*, Vol. 15(3&4), pp. 899-920.

2. Prasertsan, S. and Saen-saby, P. (1998), Heat pump drying of agricultural materials, *Drying Technology-An International Journal*, Vol. 16(1&2), pp. 235-250.
3. Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T.,and Rukprang, P. (1998), Fruit drying using heat pump, *RERIC International Energy Journal*, Vol. 20, pp. 39-53.
4. Strommen, I. (1994), New applications of heat pumps in drying processes, *Drying Technology-An International Journal*, Vol. 12(4), pp. 889-901.
5. Meyer, J.P. and Greyvenstein, G.P. (1992), The drying of grain with heat pumps in South Africa: A techno-economic analysis, *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, pp. 13-20.
6. Clement, S., Jai, X.,and Jolly, P. (1993), Experimental verification of a heat pump assisted-continuous dryer simulation model, *International Journal of Energy Research*, Vol. 17, pp. 19-28.
7. Teeboonma, U., Tiansuwan, J., and Soponronnarit, S. (2003), Optimization of heat pump fruit dryers, *Journal of Food Engineering*, Vol. 59, pp. 369-377.

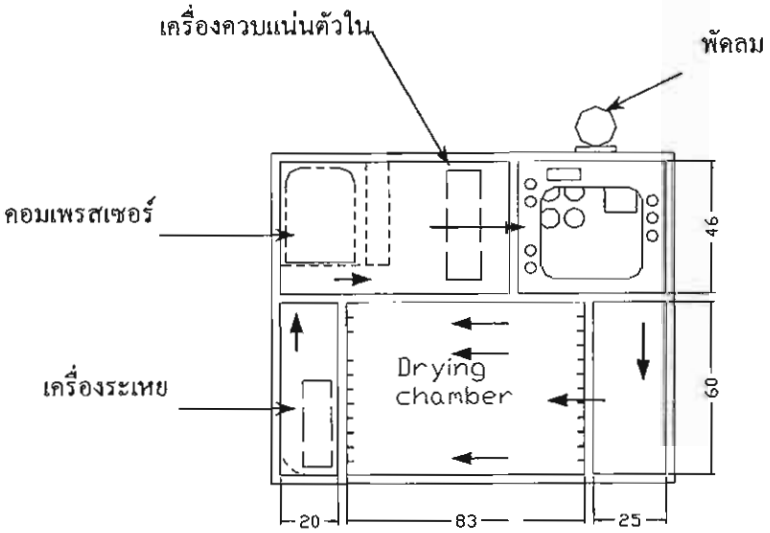
ตารางที่ 1. The experimental results of cloth drying

Description	Cloth				
	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5
Air flow rate, kg / h	1620	1620	1620	1620	1620
Evaporator by pass air, %	67	67	67	67	67
Average moisture before drying, % d.b	169	171	212	218	119
Average moisture after drying, % d.b	5.6	6.9	13	17.5	18.1
Initial weight, kg	50.2	50.7	58.3	59.5	40.6
Final weight, kg	19.8	20.0	21.1	22.0	21.9
Average temperature, ^{0}C	54.7	55.4	55.6	55.3	55.2
Average power consumption, kW	3.15	3.16	3.16	3.17	3.17
Energy consumption, kWh	22.05	22.1	22.1	19.0	9.5
Drying time, h	7	7	7	6	3
Drying rate$_{avg}$, kg water evap. / h	4.34	4.39	5.31	6.25	6.23
SMER$_{avg}$, kg water evap. / kWh	1.38	1.39	1.68	1.79	1.97
SEC$_{avg}$, MJ / kg water evap.	2.61	2.59	2.14	2.01	1.83
COP$_h$	4.40	4.38	4.33	4.45	4.41

(Exp. = Experiment)

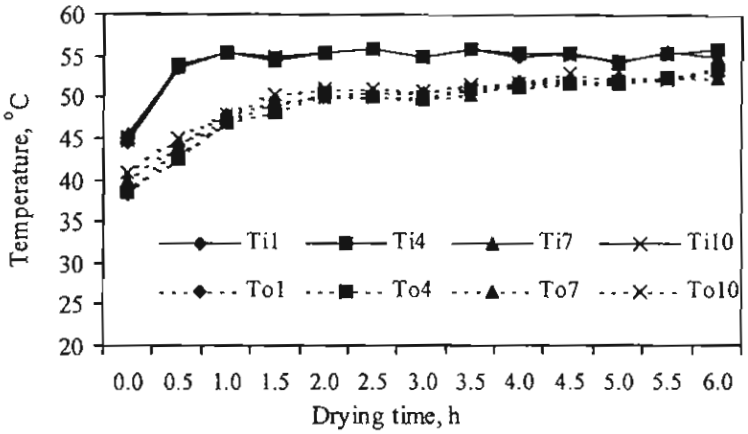


รูปที่ 1. Diagram of a heat pump dryer. (CV = Control volume)



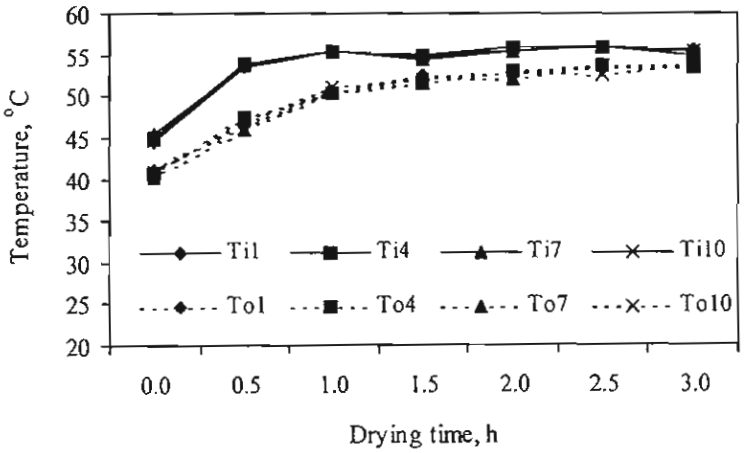
(หน่วย: cm)

รูปที่ 2. Optimal heat pump dryer



รูปที่ 3. The relationships between temperature and drying time for experiment 4.

(M_i = 218 % d.b.)



รูปที่ 4. The relationships between temperature and drying time for experiment 5.

(M_i = 119 % d.b.)

Til = inlet temperature of tray 1

To1 = outlet temperature of tray 1

Ti4 = inlet temperature of tray 4

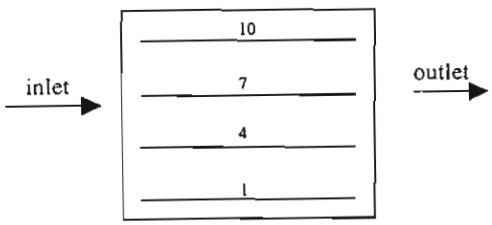
To4 = outlet temperature of tray 4

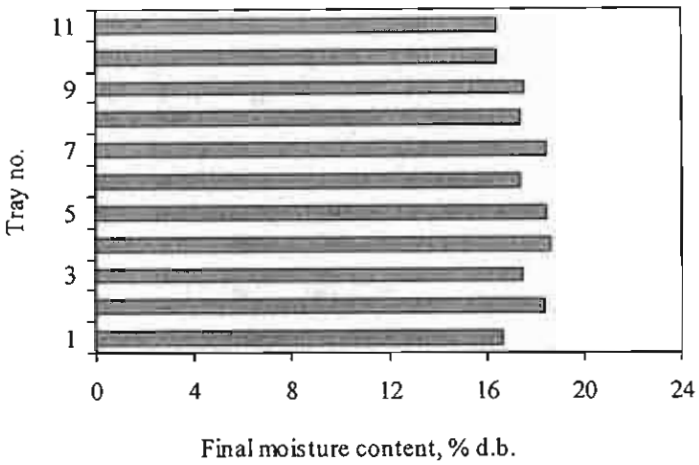
Ti7 = inlet temperature of tray 7

To7 = outlet temperature of tray 7

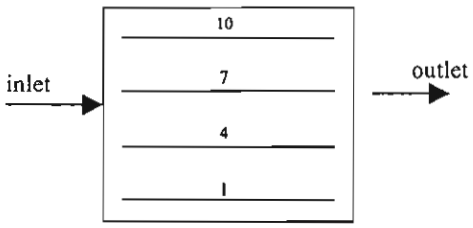
Ti10 = inlet temperature of tray 10

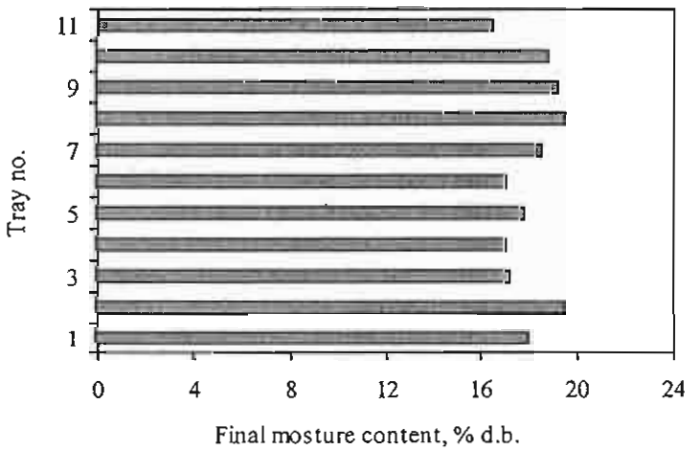
To10 = outlet temperature of tray 10





รูปที่ 5. Moisture content distribution of each tray for experiment 4.
(M_i =218 % d.b.)





รูปที่ 6. Moisture content distribution of each tray for experiment 5.
(M_i =119 % d.b.).

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชื้นสมดุลและสมการการอบแห้งของใบหม่อน

Equilibrium Moisture Content and Drying Kinetics of Mulberry leaves

ธนากร บูรณเพชร[1,*] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2] และ ณัฐพล ภูมิสะอาด[3]

[1,3]*คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150*
[2]*คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140*

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างสมการจลศาสตร์ของการอบแห้งใบหม่อน ซึ่งประกอบไปด้วยสมการความชื้นสมดุลและสมการอบแห้งชั้นบางสำหรับใบหม่อนสองพันธุ์คือ พันธุ์นครราชสีมา 60 และพันธุ์บุรีรัมย์ 60 โดยความชื้นสมดุลทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45-65^{o}C และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ 10-90% พบว่าความชื้นสมดุลของใบหม่อนลดลงตามอุณหภูมิ และเพิ่มขึ้นตามความชื้นสัมพัทธ์ สมการในรูปแบบของ Halsey สามารถทำนายผลการทดลองความชื้นสมดุลได้ดีที่สุดสำหรับใบหม่อนทั้งสองพันธุ์ ในส่วนของการอบแห้งชั้นบางซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80^{o}C ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้ง 0.35 เมตรต่อวินาที พบว่าใบหม่อนทั้งสองพันธุ์ให้ผลที่เหมือนกันคืออัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและสมการของ Page สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดีกว่าสมการอบแห้งกึ่งทฤษฎี

Abstract

Drying characteristics of mulberry (*Moraceae*) leaves including equilibrium moisture content and thin layer drying was investigated. Two varieties of mulberry namely Nakhonratchasima 60 and Burirum 60 were studied. Equilibrium moisture content at temperature between 45-65^{o}C and relative humidities 10-90% was determined. The result found that equilibrium moisture contents decreased with the temperature and increased with the relative humidity. Halsey's equation that provided best fit was used to represent the experimental data for both varieties of mulberry. The thin layer drying experiments were conducted with a constant air velocity of 0.35 m/s at 40, 60 and 80 ^{o}C. It was found the same result for both varieties that the drying rate increased with the temperature and the Page's equation was suitable for predicting the drying rate of mulberry leaves.

คำสำคัญ: การอบแห้ง, ความชื้นสมดุล, สมการจลศาสตร์

***Corresponding author.** Tel.: (043)754316; fax: (043)754316
Email address: kkcfarm@hotmail.com (T. Buranapetch)

บทนำ

หม่อนเป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ *Moraceae* มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Morus. Sp.* ลักษณะที่สำคัญของพืชวงศ์นี้คือ มีขน มียาง และมีเส้นใย อยู่ในประเภทพุ่มใบใหญ่พวก Dioecios หม่อนเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเอเชียเป็นส่วนใหญ่โดยเฉพาะในประเทศจีน ญี่ปุ่น และทางตอนเหนือของประเทศไทย ใบหม่อนมีลักษณะคล้ายใบโพธิ์และแตกต่างกันตามชนิดของพันธุ์ โดยที่สามารถปลูกได้ทุกสภาพอากาศในประเทศไทย

ใบหม่อนนอกเหนือจากใช้เป็นอาหารของหม่อนไหมแล้ว สามารถนำมาใช้ในการปรุงอาหารได้หลายประเภทและประกอบในการทำเครื่องดื่มชาใบหม่อนและอาหารเสริมสุขภาพ เพราะใบหม่อนสามารถเพิ่มรสชาติของอาหารและมีสรรพคุณทางด้านโภชนาการ เนื่องจากมีโปรตีนและแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น แคลเซียมสูง

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่สำคัญในการแปรรูปใบหม่อน วิธีการอบแห้งมีผลต่อคุณภาพใบหม่อน จึงควรมีการศึกษาและสร้างเครื่องอบแห้งใบหม่อนที่เหมาะสม นอกจากนี้พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการศึกษากระบวนการอบแห้งคือความชื้นสมดุล เพราะเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้สภาวะอากาศคงที่ค่าหนึ่ง ความชื้นของวัสดุจะลดต่ำลงถึงจุด ๆ หนึ่งซึ่งไม่เปลี่ยนแปลง เรียกความชื้นที่จุดนี้ว่าความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content: EMC) [1]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่ศึกษาและสร้างสมการจลศาสตร์การอบแห้งชั้นบางของพันธุ์นครราชสีมา 60 และใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองหาความชื้นสมดุลและสมการความชื้นสมดุลแบบสถิต โดยนำตัวอย่างใบหม่อนที่เตรียมไว้สำหรับการทดลองการคายความชื้นของใบหม่อน พันธุ์นครราชสีมา 60 และพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ประมาณ 2.5-3.5 กรัม มาบรรจุลงในกระบอกพลาสติกที่มีการเจาะรูโดยรอบชั่งน้ำหนักรวมกับภาชนะบรรจุ จากนั้นนำไปบรรจุในขวดขนาดความจุ 10 oz. ที่มีสารละลายเกลืออิ่มตัวของ Lithium chloride, Magnesium chloride, Sodium bromide, Sodium nitrate และ Potassium chloride [2] ปิดฝาขวดให้แน่น และกระบอกพลาสติกวางอยู่บนขาตั้งสูงจากสารละลายเกลืออิ่มตัวประมาณ 15-20 mm อบในตู้อบและปรับอุณหภูมิเป็น 45°C เมื่ออบได้ 1 สัปดาห์ก็นำกระบอกพลาสติกที่บรรจุใบหม่อนไปชั่งน้ำหนัก ทำเช่นนี้ไปทุกวันเว้นวันจนกระทั่งน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงและทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับอุณหภูมิ 55 และ 65°C

การทำนายผลการทดลองค่าความชื้นสมดุล American Society of Agricultural Engineering [3] ได้นำเสนอสมการที่มีค่าพารามิเตอร์ 3 ค่า เพื่อทำนายค่าความชื้นสมดุลของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เป็นสมการที่เป็นไปได้เพื่อหาค่าความเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ทดลองได้ดังสมการ

สมการดัดแปลงของ Henderson $$RH = 1 - \exp\left(-A \times (T + C) \times (M_e)^B\right) \quad (1)$$

สมการดัดแปลงของ Chung-Pfost $$RH = \exp\left(-\frac{A}{T + C}\exp\left(-B \times M_e\right)\right) \quad (2)$$

สมการดัดแปลงของ Halsey $$RH = \exp\left(-\frac{\exp\left(A + B \times T\right)}{\left(M_e\right)^C}\right) \quad (3)$$

สมการดัดแปลงของ Oswin $$M_e = \frac{A + B \times T}{\left(\frac{1}{RH} - 1\right)^{\frac{1}{C}}} \quad (4)$$

สมการ Guggenheim-Anderson-deBoer (GAB)

$$M_e = \left(\frac{A \times B \times C \times RH}{\left(1 - B \times RH\right)\left(1 - B \times RH + B \times C \times RH\right)}\right) \quad (5)$$

เมื่อ RH คือความชื้นสัมพัทธ์, decimal T คือ อุณหภูมิ, ^{o}C

M_e คือความชื้นสมดุล, decimal dry basis A,B,C คือค่าคงที่

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการไอโซเทอมได้ใช้เทคนิคของการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) และ SSE (Summation of Square Error) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง นิยามของ SSE เป็นดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^{n}\left(M_e\left(Experiment\right) - M_e\left(\Pr ediction\right)\right)^2 \quad (6)$$

เมื่อ M_e คือความชื้นสมดุล, decimal dry basis n คือจำนวนข้อมูลในการวิเคราะห์

การทดลองอบแห้งชั้นบางและสมการอบแห้งชั้นบาง นำตัวอย่างใบหม่อนที่เตรียมไว้สำหรับอบแห้งประมาณ 125 กรัม มาทดสอบในอุปกรณ์ทดสอบอัตราการอบแห้ง ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ บรรจุตัวอย่างในตะแกรงที่ทราบน้ำหนักแล้วปรับความเร็วลมที่ใช้อบแห้ง 0.35 เมตรต่อวินาที และอุณหภูมิลมร้อนที่ 40^{o}C จากนั้นจะทำการนำตะแกรงบรรจุใบหม่อนออกจากห้องอบมาทำการชั่งน้ำหนักใบหม่อนที่เวลา 3,6,9,12,15,20,25,30 และที่ทุกๆ 10 นาที โดยการชั่งน้ำหนักจะต้องรีบชั่งทันทีเมื่อถึงเวลาที่กำหนด ความละเอียดของตาชั่งที่ใช้มีความละเอียด 0.01 กรัม ทำเช่นนี้กระทั่งน้ำหนักเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงหยุดการทดลองและทำการทดลองเช่นเดิมแต่ปรับเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่ใช้เป็น 60 และ 80^{o}C ตามลำดับ

การวิเคราะห์สมการอบแห้งชั้นบาง American Society of Agricultural Engineering [4] ได้เสนอสมการพื้นฐาน เพื่อแสดงข้อมูลอัตราการอบแห้ง ตามสมการที่ (7) และสมการที่ (8)

สมการของ Page (Page's Equation) $$MR = \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e}\right) = \exp\left(-kt^n\right) \quad (7)$$

สมการกึ่งทฤษฎี (Semi Theoretical Equation)

$$MR = \left(\frac{M - M_e}{M_i - M_e}\right) = \exp(-kt) \qquad (8)$$

เมื่อ MR คืออัตราส่วนความชื้น M คือความชื้นที่เวลาใดๆ, % dry basis

M_e คือความชื้นสมดุล, % dry basis M_i คือความชื้นเริ่มต้น, % dry basis

t คือเวลา, นาที k,n คือค่าคงที่

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

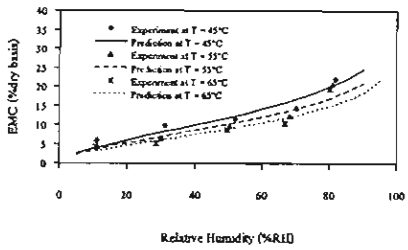
จากผลการทดลองหาค่าความชื้นสมดุล นำไปวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาค่าคงที่ของสมการต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาจากค่า SSE พบว่าสมการของ GAB มีค่าต่ำสุดทั้ง 2 พันธุ์ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (coefficient of determination) ของสมการ Halsey มีค่าสูงสุด ผลที่ได้นำไปแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จากผลการทดลองและผลการทำนายจากสมการ แสดงดังรูปที่ 1 โดยที่สมการของ Henderson, Chung and Pfost และ Halsey สามารถแสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความชื้นสมดุลของใบหม่อนทั้ง 2 พันธุ์ได้ดีกว่าสมการของ Oswin และ GAB ดังนั้นสมการของ Halsey ที่มีค่า r^2 สูงสุด เหมาะสำหรับนำไปใช้ทำนายความชื้นสมดุลของใบหม่อนทั้ง 2 พันธุ์มากที่สุด

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลความชื้นสมดุลของใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60

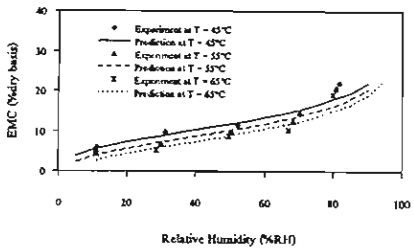
สมการ	A	B	C	r^2	SSE
Henderson	0.738460951	1.653810837	-13.59243333	0.93084	0.005440285
Chung-Pfost	165.0927747	18.4492933	-18.06407165	0.94450	0.005811651
Halsey	-2.65350827	-0.029826185	1.672236096	0.96919	0.003105722
Oswin	0.150257724	-0.000894417	2.201677294	0.94268	0.002710858
GAB	0.048576587	0.943947541	128.4973691	0.94258	0.00271564

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลความชื้นสมดุลของใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60

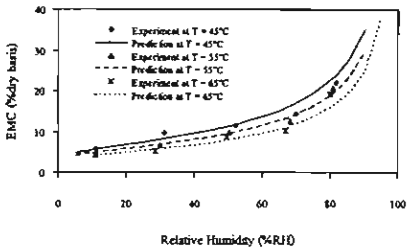
สมการ	A	B	C	r^2	SSE
Henderson	0.442406336	1.443840346	-8.91446703	0.91307	0.00814105
Chung-Pfost	165.2284997	16.98465013	-8.826270838	0.90679	0.01074777
Halsey	-2.731070032	-0.023772878	1.521908774	0.96866	0.004051504
Oswin	0.144027265	-0.000907371	1.837652656	0.92949	0.004250479
GAB	0.041399936	1.003006217	605.7033335	0.94067	0.003576849



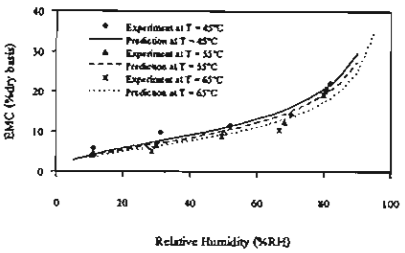
สมการคัดแปลง Henderson



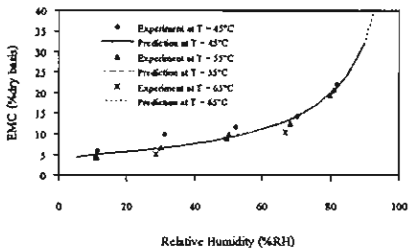
สมการคัดแปลง Chung and Pfost



สมการคัดแปลง Halsey



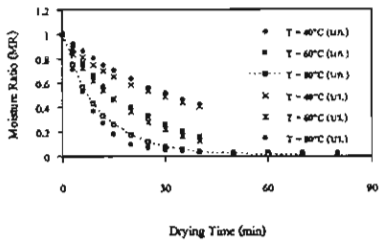
สมการคัดแปลง Oswin



สมการคัดแปลง GAB

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศกับความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content: EMC) ของใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60 จากการทดลองและผลการทำนายโดยสมการต่าง ๆ

สมการอบแห้งชั้นบาง จากการทดลองการอบแห้งใบหม่อนแบบชั้นบางในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 80°C เมื่อนำค่าความชื้นที่เวลาต่าง ๆ และค่าความชื้นสมดุลที่ทำนายจากสมการของ Halsey มาคำนวณหาอัตราส่วนความชื้นที่ระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในรูป 2 พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการอบแห้ง เมื่ออุณหภูมิของลมร้อนสูงขึ้น อัตราการอบแห้งชั้นบางเพิ่มขึ้นตามไปด้วยโดยที่อัตราการอบแห้งของใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60 สูงกว่าใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60



รูปที่ 2 เปรียบเทียบอัตราส่วนความชื้นของใบหม่อนทั้งสองพันธุ์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาค่าคงที่ของสมการของ Page และสมการกึ่งทฤษฎีแล้วนำค่าคงที่ที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปแบบสมการโพลีนอเมียล จะได้สัมประสิทธิ์ของสมการแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีนอเมียลของสมการกึ่งทฤษฎี ของใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60 และพันธุ์บุรีรัมย์ 60

$$k = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$

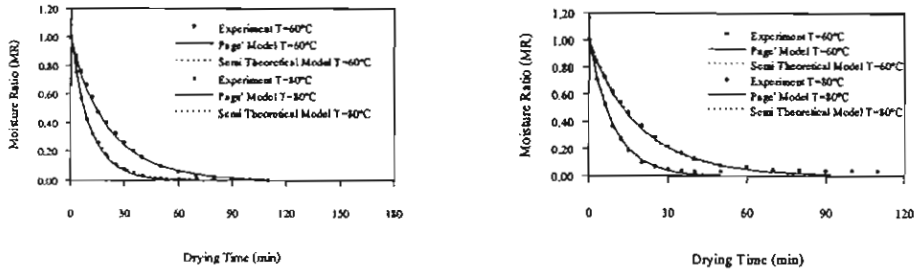
พันธุ์	พารามิเตอร์	b0	b1	b2
นครราชสีมา 60	k	-0.007	-6E-05	1.6E-05
บุรีรัมย์ 60	k	0.02249	-0.00105735	0.000026448

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลีนอเมียลของสมการ Page ของใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60 และพันธุ์บุรีรัมย์ 60

$$k = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$
$$n = b_0 + b_1 \times T + b_2 \times T^2$$

พันธุ์	พารามิเตอร์	B0	b1	b2
นครราชสีมา 60	k	-0.004	0.00039	1.1E-05
	n	0.64832	0.00668	-3E-05
บุรีรัมย์ 60	k	0.05772	-0.00147828	0.00002641
	n	0.55034	0.009254941	-0.000045983

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า SSE ของสมการของ Page มีค่า SSE ต่ำกว่าของสมการกึ่งทฤษฎีทุกค่าอุณหภูมิ และเมื่อนำผลการทดลองและการทำนายไปเขียนกราฟได้ผลแสดงดังรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าสมการของ Page สามารถทำนายผลการทดลองการอบแห้งใบหม่อนทั้ง 2 พันธุ์ได้ดีในทุกอุณหภูมิและทุกช่วงเวลาการทดลอง



ใบหม่อนพันธุ์นครราชสีมา 60 ใบหม่อนพันธุ์บุรีรัมย์ 60

รูปที่ 3 แสดงอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วย ที่ได้จากการทดลองและทำนายผลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สรุปผล

จากการศึกษาสมการความชื้นสมดุลแบบต่าง ๆ จำนวน 5 สมการ พบว่าสมการดัดแปลงของ Halsey สามารถใช้อธิบายผลการทดลองของใบหม่อนทั้ง 2 พันธุ์ ได้ดีกว่าอีก 4 สมการ โดยที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความชื้นสมดุลอย่างเห็นได้ชัด ส่วนการอบแห้งชั้นบาง อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความชื้นและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองภายใต้สภาวะอากาศคงที่ พบว่ามีลักษณะลดลงแบบ Exponential และสมการของ Page ใช้อธิบายข้อมูลจากการทดลองของใบหม่อนทั้ง 2 พันธุ์ได้ดีกว่าสมการกึ่งทฤษฎี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคามและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณ คุณวิเชษฐ์ โกศล ผู้ช่วยเก็บข้อมูลประกอบการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. (2540), การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ, หน้า 63-87
2. Hygrodynamics inc., (November 30, 2002), Saturated salt solution, http://www.fsci.unm.edu/Ted_Labuza/
3. ASAE STANDARD. (1999), Moisture relationships of Plant-base Agricultural Products, ASAE D245.5 Oct95, pp. 512-528
4. ASAE STANDARD. (1999), Thin-Layer Drying of Grains and Crops, ASAE S448 Dec98, pp.581-583

การประชุมวิชาการครั้งที่ 5 ประจำปี 2547
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
26-27 เมษายน 2547 ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

COMPARATIVE ASSESSMENT OF R134a, R407C, AND R410A AS ALTERNATIVES TO R22

U. Teeboonma[1,*] and S. Soponronnarit[2]

[1] *Deparment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering*
Ubon Ratchathani University, Ubonrachathani province, 34190, Thailand
[2]*School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi*
Suksawat 48 Rd., Bangkok 10140, Thailand

ABSTRACT

R22, R134a, R407C, and R410A are chosen to comparatively study their thermodynamic performances, focusing on saturated pressure, pressure ratio, refrigerating effect, specific compressor displacement, and coefficient of performance of heat pump. R134a, R407C, and R410A are alternatives to R22 for using in the air conditioners and heat pump dryer. The study conditions were as follows: evaporator outlet temperatures ranging from 0 to 20°C and condensing or dew point temperatures ranging from 45 to 60°C.

The results revealed that R407C is a suitable refrigerant for replacing R22. This is due to its saturated pressure, refrigerating effect, and specific compressor displacement are the closest to those for R22. Although R410A has a potential to replace R22, its saturated pressure is rather high. As a result of high-saturated pressure, some components of former heat pump cannot be applied with R410A such as solenoid valve and expansion valve.

KEYWORDS: Refrigerants, Thermodynamic performance

INTRODUCTION

R22 has been widely used as a working fluid in both air conditioning and heat pump applications. It is non-flammable and non-toxic refrigerant. However, the Ozone depletion potential (ODP) and Global warming potential (GWP) of R22 are 0.05 and 0.35, respectively, with respect to R11 [1]. The chlorine contained in HCFCs is believed to be the major factor causing the ozone-layer depletion. As a result of this, Gradual phase-out of hydrochlofluorocarbons (HCFCs), including R22, has been decided at the Montreal Protocol and this will be done by 2030 in developed countries and 2040 in developing countries. Therefore, searching for alternatives to R22 is an important area of research.

In this study, R22, R134a, R407C, and R410A are selected to study their thermodynamic performances, focusing on saturated pressure, pressure ratio, refrigerating effect, specific compressor displacement, and coefficient of performance of heat pump. R22 and R134a are the pure refrigerants whilst R407C and R410A are

* **Corresponding author**. Tel.: 0-4528-8376 ext 3815; fax: 0-4528-8378
E-mail address: enaumpte@ubu.ac.th (U. Teeboonma)

the zeotropic and near azeotropic mixture refrigerant, respectively. R407C consists of 23% of R32, 25% of R125, and 52% of R134a in which its temperature glide is around 6°C. R410A, temperature glide of 0.1°C, comprises 50% of R32 and 50% of R125 [2].

MATERIALS AND METHODS

The thermodynamic performances of R134a, R407C, and R410A are theoretically compared to that of R22. To simplify the problem, the following assumptions are applied:

1. Pressure drop in refrigerant pipe is negligible.
2. Compression process is assumed to be isentropic
3. Expansion process is assumed to be isenthalpic.
4. The refrigerant at outlet evaporator and condenser are saturated vapor and liquid, respectively.

Based on above-mentioned assumptions, the vapor compression cycle used in this study can be illustrated in Fig. 1. The study conditions are as the followings:

1. Evaporator outlet temperatures range from 0 to 20°C.
2. Condensing or dew point temperatures range from 45 to 60°C

The criteria used for evaluating the heat pump operating on various refrigerants are saturated pressure (P_{sat}), pressure ratio (PR), refrigerating effect (RE), specific compressor displacement (SCD), and coefficient of performance of heat pump (COP_h). These parameters are defined as the following equations.

$$PR = \frac{P_{co}}{P_{ev}} \tag{1}$$

$$RE = h_1 - h_4 \tag{2}$$

$$SCD = \frac{h_1 - h_4}{v_1} \tag{3}$$

$$COP_h = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} \tag{4}$$

Where P_{co} = condensing pressure, kPa
P_{ev} = evaporating pressure, kPa
h_1 = enthalpy at outlet evaporator, kJ/kg
h_2 = enthalpy at inlet condenser, kJ/kg
h_3 = enthalpy at outlet condenser, kJ/kg
h_4 = enthalpy at inlet evaporator, kJ/kg
v_1 = specific volume at inlet compressor, m^3/kg

RESULTS AND DISCUSSION

In the following sections, the results of the performance evaluation and analysis of some of the alternatives to R22 are presented and discussed. The study

conditions are an evaporator outlet temperature varied between 0 and 20°C, and condensing or dew point temperature varied from 45 to 60°C.

Saturated Pressure

Fig. 2 presents the relationships between the saturated pressure and temperature of each working fluid in which the temperatures range from 0 to 20°C. At these conditions, the saturated pressures for R410A are the highest whilst the saturated pressures of R134a are the lowest, compared to the other working fluids. At 0°C, the saturated pressures for R134a, R407C, and R22 are lower than that for R410A by 172, 73, and 60%, respectively. Under the temperature of 20°C, the saturated pressures for R134a, R407C, and R22 are lower than that for R410A by 152, 63, and 58%, respectively. As can be seen in Fig. 2, the saturated pressures for R407C are slightly lower than that of R22. It is worth to mention that the saturated pressure of all refrigerants increases with the increasing of temperature.

The saturated pressures of various refrigerants at the temperatures ranging from 45 to 60°C are shown in Fig. 3. It is obviously observed that the saturated pressures for R407C are almost equal to those for R22. At these conditions, the saturated pressures for R410A are still the highest whilst the saturated pressures for R134a are also the lowest when compared to the other working fluids. At the temperature of 45°C, the saturated pressures for R134a, R407C, and R22 are lower than that for R410A by 134, 55, and 57%, respectively. Under the temperature of 60°C, the saturated pressures for R134a, R407C, and R22 are lower than that for R410A by 128, 52, and 58%, respectively.

It is evident from Fig. 2 and 3 that the saturated pressure for R407C is the closest to that for R22.

Pressure Ratio

Fig. 4 illustrates the relationships between the pressure ratio and an evaporator outlet temperature of various working fluids at the condensing or dew point temperature of 45°C. It is clearly seen from Fig. 4 that the pressure ratios for all working fluids decrease as the increasing of temperature at outlet evaporator. The pressure ratios for R22, R407C, and R410A at evaporator outlet temperature of 0°C are lower than that for R134a by 14, 4, and 16%, respectively. At an evaporator outlet temperature of 20°C, the pressure ratios for R22, R407C, and R410A are lower than that for R134a by 6.8, 1.9, and 7.4%, respectively. The pressure ratios for R407C are slightly lower than those for R134a whilst the pressure ratio for R410A is the closest to that for R22, especially at high evaporator outlet temperature.

Fig. 5 shows the relationships between the pressure ratio and evaporator outlet temperature of various working fluids at the condensing or dew point temperature of 53°C. The trends of the result are similar to previous case as discussed earlier in Fig. 4. It should be emphasized here that the pressure ratio for R410A is the closest to that for R22 within the same condition. This result is similar to the preliminary studies [3,4]. The pressure ratio for R134a and R410A is the highest and the lowest, respectively. Under the same evaporator outlet temperature, the pressure ratio for all refrigerants increases with the increasing of condensing or dew point temperature.

This is because of the fact that the saturated pressure depends remarkably on the temperature.

Refrigerating Effect

Fig. 6 is a plot of refrigerating effect against evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 45°C. It is revealed from Fig. 6 that the refrigerating effect for R407C is the closest to that for R22. The refrigerating effect for R407C and R22 are almost identical at lower evaporator outlet temperature, whereas the refrigerating effect for R407C is slightly higher when an evaporator outlet temperature is higher than 10°C. This result confirms the previous results [3,4,5,6,7,8]. At an evaporator outlet temperature of 0°C, the refrigerating effects for R134a and R410A are lower than that for R22 and R407C by 10 and 1.8%, respectively. For the condition of 20°C, the refrigerating effects for R22, R134a, and R410A are lower than that for R407C by 1.3, 7.9 and 4.4%, respectively. It should be emphasized here that the refrigerating effect for all working fluids increases with increasing of an evaporator outlet temperature. Based on this study, the refrigerating effect is linearly proportional to an evaporator outlet temperature. As can be seen from Fig. 6, the refrigerating effect for R134a is the lowest whilst the increasing rate of refrigerating effect for R410A is the highest when an evaporator outlet temperature increases. This conclusion is similar to preliminary study [9].

Fig. 7 shows the relationships between the refrigerating effect and an evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C. The trends of the results are slightly different from the previous case, in particular for R22 and R407C. The refrigerating effects for all refrigerants are still increasing when an evaporator outlet temperature increases. In addition, the refrigerating effect for R407C is the closest to that for R22 and the refrigerating effect for R134a is the lowest when compared to the other working fluids. It is obvious from Figs. 6-7 that the refrigerating effect for R22 is slightly higher than that for R407C when the condensing or dew point temperature increases. The refrigerating effect for R134a is slightly higher than that for R410A when the condensing or dew point temperature increases, especially for higher evaporator outlet temperature. It can be explained by the fact that the increasing rate of refrigerating effect for R410A is lower than that for R134a. For an identical evaporator outlet temperature, the refrigerating effect decreases when the condensing or dew point temperature increases.

Specific Compressor Displacement

Fig. 8 presents the relationships between the specific compressor displacement and an evaporator outlet temperature at the condensing or dew point temperature of 45°C. The specific compressor displacements for all refrigerants decrease when an evaporator outlet temperature increases. This is due to the specific volume of the refrigerant increases with the increasing of evaporator outlet temperature. On the other hand, the density of the refrigerant decreases when the temperature increases. As can be seen in Fig. 8, it is obvious that the specific compressor displacement for R134a and R410A are the highest and lowest, respectively. Additionally, it should be noted that the specific compressor displacement for R407C is the closest to that for R22. Considering at an evaporator outlet temperature of 0°C, specific compressor

displacements for R410A, R407C, and R22 are lower than that for R134a by 129, 51, and 62%, respectively. In the case of an evaporator outlet temperature of 20°C, specific compressor displacements for R410A, R407C, and R22 are lower than that for R134a by 110, 46, and 47%, respectively.

Fig. 9 illustrates the relationships between the specific compressor displacement and an evaporator outlet temperature at the condensing or dew point temperature of 53°C. The similar result to the earlier case is achieved. It is important to point out from Figs. 8-9 that at the constant condensing or dew point temperature the specific compressor displacement for all refrigerants decreases with increasing an evaporator outlet temperature. At an identical evaporator outlet temperature, the specific compressor displacement for all refrigerants increases when the condensing or dew point temperature increases. It can also be concluded that the specific compressor displacement for R407C is the closest to that for R22, corresponding to previous work [3].

Coefficient of Performance of Heat Pump

Fig. 10 presents the relationships between the coefficient of performance of heat pump and an evaporator outlet temperature at the condensing or dew point temperature of 45°C. It can be seen from the Fig. 10 that the coefficient of performance of heat pump increases with increasing an evaporator outlet temperature. For an identical conditions, the coefficient of performance of heat pump for R134a is the closest to that for R22 whilst the coefficient of performance of heat pump for R407C is slightly lower than that for R22. It is interesting to note that the coefficient of performance of heat pump for R410A is the lowest. For the condition of an evaporator outlet temperature of 0°C, the coefficient of performance of heat pump for R134a, R407C, and R410A are lower than that for R22 by 0.7, 2.8, and 7.5%, respectively. At an evaporator outlet temperature of 20°C, the coefficient of performance of heat pump for R407C and R410A are lower than that for R22 by 3.1 and 6.5%, respectively, whilst the coefficient of performance of heat pump for R134a and R22 are almost the same.

Fig. 11 is the plot of the coefficient of performance of heat pump against an evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C. The trends of the results are similar to the previous case.

It should be remarked from Figs. 10-11 that the coefficient of performance of heat pump for all refrigerants, based on constant condensing or dew point temperature, increases with increasing evaporator outlet temperature. At the same evaporator outlet temperature, the coefficient of performance of heat pump for all working fluids decreases when the condensing or dew point temperature increases. It should also be noted that the coefficient of performance of heat pump for R134a is the closest to that for R22. The similar result is revealed by several researchers [3,4,8,9].

CONCLUSIONS

The results clearly showed that R407C is a suitable refrigerant for replacing R22 because its saturated pressure, refrigerating effect, compressor work, and specific compressor displacement are the closest to those for R22. Although R410A has a potential to replace R22, its saturated pressure is rather high. As a result of high-

saturated pressure, some components of former heat pump can not be applied with R410A such as solenoid valve, compressor valve, and expansion valve. In the case of R134a, it requires a large specific compressor displacement, causing low cooling and heating capacity.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their sincere thanks to the Thailand Research Fund for financial support.

REFERENCES

1. Sand, J.R., Vineyard, E.A., and Nowak, R.J. (1990), Experimental performance of ozone-safe alternative refrigerants, *ASHRAE Transaction*, Vol. 95, pp. 173-183.
2. Richard, L.P. (2002), CFC Phase-Out: have we met the challenge?, *Journal of Fluorine Chemistry*, Vol. 114, pp. 237-250.
3. Devotta, S., Waghmare, A.V., Sawant, N.N., and Domkundwar, B.M. (2001), Alternatives to HCFC-22 for air conditioners, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 703-715.
4. Sami, S.M. and Desjardins, D.E. (2000), Performance analysis of new alternative to HCFC22 inside air/refrigerant-enhanced surface tubing, *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, pp. 759-768.
5. Aprea, C. and Greco, A. (2003), Performance evaluation of R22 and R407C in a vapour compression plant with reciprocating compressor, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, pp. 215-227.
6. Cecilia, G. and Lennart, V. (2001), Drop-in replacement of R22 in heat pumps used for district heating-influence of equipment and property limitations, *International Journal of Energy Research*, Vol. 24, pp. 660-675.
7. Lee, D.Y., Ahn, Y., Kim, Y., Change, Y.S. and Nam, L. (2002), Experimental investigation on the drop-in performance of R407C as a substitute for R22 in a screw chiller with shell and tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 25, pp. 575-585.
8. Mongey, B., Hewitt, N.J. and Mcmullan, J.T. (1996), R407C as an alternative to R22 in refrigeration system, *International Journal of Energy Research*, Vol. 20, pp. 245-254.
9. Man-Hoe, K. (2002), Performance evaluation of R-22 alternative mixtures in a breadboard heat pump with pure cross-flow condenser and counter-flow evaporator, *Energy*, Vol. 27, pp. 167-181.

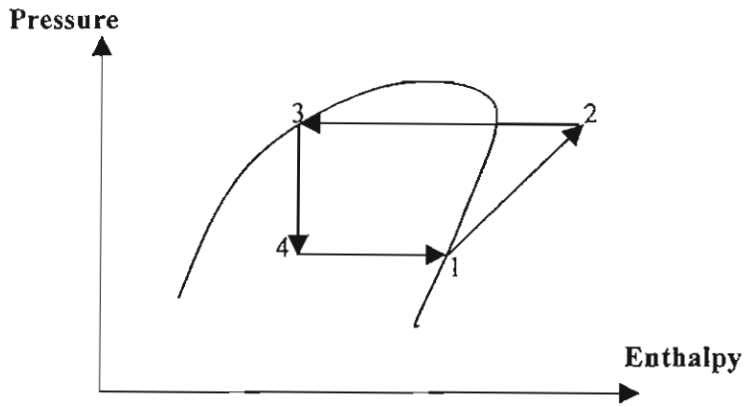


Figure 1. Vapor compression cycle of heat pump

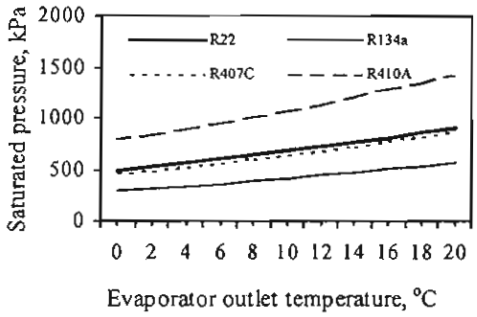


Figure 2. The relationships between saturated pressure and evaporator outlet temperature

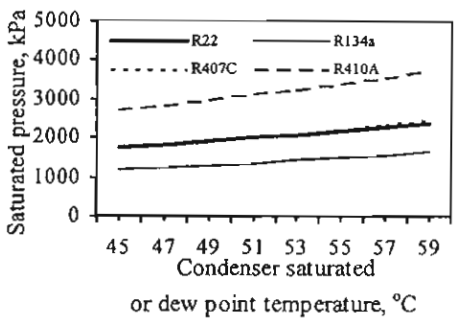


Figure 3. The relationships between saturated pressure and condensing or dew point temperature

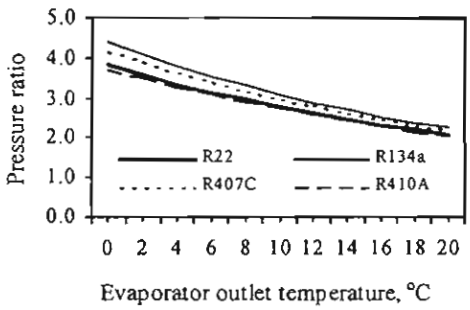


Figure 4. The relationships between pressure ratio and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 45°C

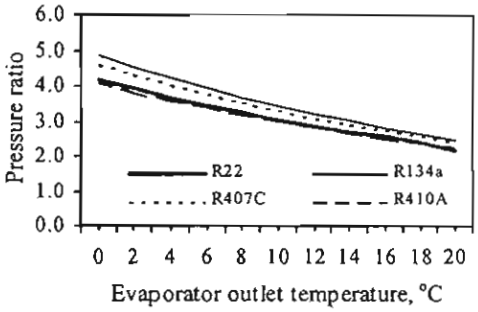


Figure 5. The relationships between pressure ratio and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C

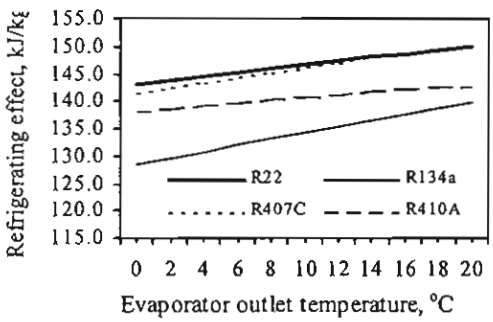


Figure 6. The relationships between refrigerating effect and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 45°C

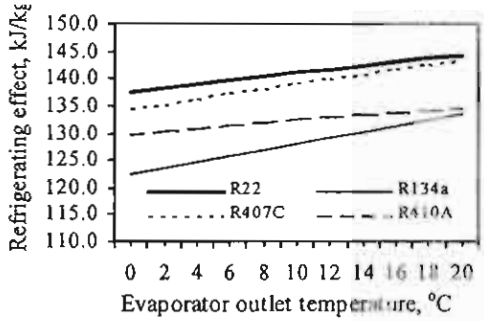


Figure 7. The relationships between refrigerating effect and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C

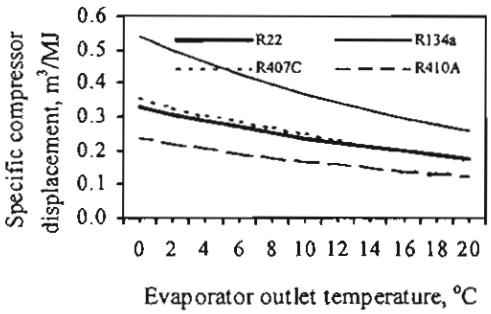


Figure 8. The relationships between specific compressor displacement and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 45°C

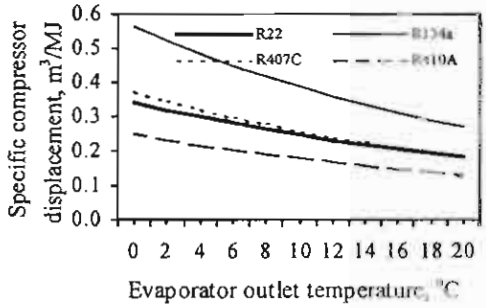


Figure 9. The relationships between specific compressor displacement and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C

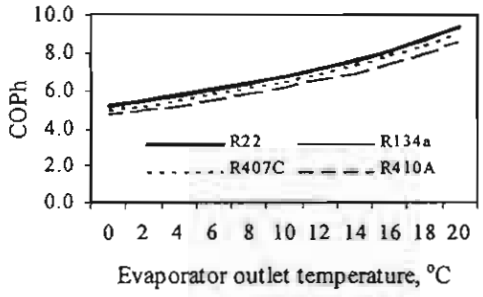


Figure 10. The relationships between coefficient of performance of heat pump and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 45°C

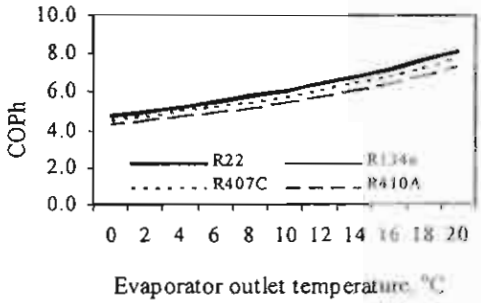


Figure 11. The relationships between coefficient of performance of heat pump and evaporator outlet temperature for condensing or dew point temperature of 53°C

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

การผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากกะลามะพร้าวด้วยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้โมลาสเป็นตัวประสาน

Briquette fuel producing from coconut shell by extrusion technique using molass as binder

ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์[1], ฐานิตย์ เมธิยานนท์[2] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[3]
[1]นักศึกษา ป.โท [3]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
โทร 0-2988-3666 ต่อ 244 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 E-mail: xmankmitnb@yahoo.com[1], Thanid@mut.ac.th[2]

Prasan Sathitruangsak[1], Somchart Soponronnarit[3]
Faculty of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140
Thanid Madhiyanon[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University
51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น รวมถึงศึกษาสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง คือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านใยกะลามะพร้าว สัดส่วน 40:60 และใช้โมลาสเป็นตัวประสาน โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ ซึ่งจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบดังนี้ คือ 10:100, 15:100 และ 20:100 ซึ่งสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ทดสอบได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าการต้านทานแรงกด และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ผลที่ได้พบว่าพบว่าอัตราการผลิตและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ แต่ค่าความหนาแน่นและการใช้พลังงานในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเพาะจะแปรผกผันกับปริมาณสัดส่วนการผสมโมลาส สำหรับอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองประมาณ 20% โดยมีอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาทีมีค่าระหว่าง 0.8 0.9 kg/min และแท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1283 1342 kg/m^3 ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 2.60 2.87 MPa สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 19.0 20.3 MJ/kg ในขณะที่พลังงานจำเพาะในการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 0.14 0.18 MJ/kg

Abstract

The objectives of this research are to study and design a screw for producing solid fuel by extrusion technique, as well as physical properties of extruded fuel are also discussed. Crushed coconut shell char mixed to coconut fiber char at the mass ratio of 40:60 was used as base material and molass was chosen as binder in this study. To investigate the influence of molass on physical properties of fuel such as density, compressive strength and high heating value, mass ratio of molass to base material was varied from one experimental to the other as follows: 10:100, 15:100 and 20:100. It was found that output of product and compressive strength were directly proportional to amount of molass whereas density, high heating value and specific energy consumption (SEC) increased as amount of molass decreased. The output of product was about 20% deviated from a design value. At screw speed of 145 rpm, the results are the output 0.8-0.9 kg/min, density 1283-1342 kg/m^3, compressive strength 2.60-

2.87 MPa, high heating value 19.0-20.3 MJ/kg and SEC 0.14-0.18 MJ/kg

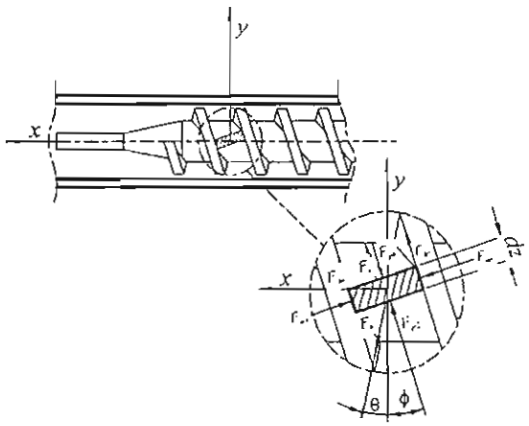
1. บทนำ

ในปัจจุบันสภาวะการใช้พลังงานของประเทศไทย มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกขณะ โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้นั้นเป็นพลังงานความร้อนซึ่งได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ต้องมีการนำเข้ามาจากต่างประเทศทำให้ต้องสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศ เพื่อที่จะซื้อเชื้อเพลิงเหล่านี้เข้ามาแต่จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงทำให้มีวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมากที่สามารถนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีศักยภาพใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยจากการสำรวจข้อมูลที่ผ่านมาพบว่าศักยภาพของพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรมีมากถึง $156,402\times10^6$ MJ [1] โดยวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่เหมาะกับการนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือ ผลมะพร้าว ซึ่งมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตรวมปีละเกือบ 1.5 ล้านตัน โดส่วนที่เป็นกะลาและใยกะลาจะให้ค่าความร้อนสูงถึง 17.93 MJ/kg และ 16.23 MJ/kg [1] ตามลำดับ ในการแปรรูปวัสดุเหลือใช้จากผลมะพร้าวเป็นแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะสามารถเลือกใช้ได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน หรือ กระบวนการอัดไฮดรอกลิกส์ เป็นต้น แต่สำหรับกระบวนการอัดด้วยไฮดรอลิกส์นั้นจะมีอุปกรณ์ที่ซับซ้อน และมีการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับการอัดด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งโดยปกติกระบวนเอ็กซ์ทรูชันจะมีด้วยกัน 2 แบบคือกระบวนการอัดรีดร้อนและกระบวนการอัดรีดเย็น ซึ่งกระบวนการอัดรีดร้อนนั้นมักจะใช้กับวัตถุดิบที่มีลิกนินเป็นส่วนประกอบหลัก การให้ความร้อนก็เพื่อที่จะทำให้ลิกนินที่มีอยู่ในวัตถุดิบละลายออกมายึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยจากการทดลองที่ผ่านมาซึ่งทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากขี้เลื่อยด้วยการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดร้อน โดยใช้ขดลวดความร้อนเป็นตัวให้ความร้อนกับขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัตถุดิบที่นำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง [2] พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงต่ำและใช้พลังงานจำเพาะสูงรวมถึงมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก แต่ในกรณีที่เป็นกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็นนั้น จะต้องใช้ตัวประสานเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งตัวประสานนั้นมีด้วยกันหลายแบบเช่น โมลาส หรือกากน้ำตาล ซึ่งมีสมบัติที่สามารถยึดเกาะวัตถุดิบให้เป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ ลักษณะเด่นของการนำโมลาสมาใช้เป็นตัวประสานคือมีควันน้อยเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปเผาไหม้ [3] นอกจากนี้ยังมีตัวประสานชนิดอื่น ๆ เช่น แป้งมัน รวมถึงเคมีภัณฑ์ที่เหลือจากกระบวนการทางปิโตรเลียมจำพวก แอสฟัลต์ เป็นต้น โดยปกติแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตต้องมีการทดสอบสมบัติทางกายภาพก่อนการนำไปใช้ เช่น ค่าความร้อน การต้านทานแรงกด ซึ่งการต้านทานแรงกดนั้นจะมีค่าที่ยอมรับได้ต่ำสุดคือ 0.375 MPa [4] แต่ค่าความร้อนนั้นจะขึ้นกับชนิดของวัตถุที่นำมาใช้

ดังนั้นจากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นจึงได้ทำการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงเพื่อใช้กับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น และเลือกใช้กะลามะพร้าวผสมกับใยกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นแท่งเชื้อเพลิงและใช้โมลาสเป็นตัวประสาน เพื่อที่จะยึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ทั้งนี้ในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะใช้หลักการในการออกแบบสกรูลำเลียง [5] มาประยุกต์ใช้เพื่อให้สามารถอัดแท่งเชื้อเพลิงได้ภายในขั้นตอนเดียว นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยสมบัติทางกายภาพที่ทดลองได้แก่ ความหนาแน่น การต้านทานแรงกด และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

2. การออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

ในการวิเคราะห์เพื่อคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้น จะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการลำเลียงอนุภาคสำหรับร่องเกลียวลำเลียง และช่วงการอัดรีดชีวมวลให้ออกมาเป็นแท่งเชื้อเพลิง ในการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับเบดอนุภาคของชีวมวล จะพิจารณาตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 แรงที่กระทำกับเบดอนุภาคของชีวมวล

2.1 การคำนวณในช่วงการลำเลียงอนุภาค

ในการวิเคราะห์ในช่วงการลำเลียงอนุภาคของสกรูอัดเดี่ยว (Single screw extrusion) มีสมมุติฐานดังนี้ [5]

1. อนุภาคชีวมวลเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการสะสมมวล
2. เบดอนุภาคของชีวมวลจะสัมผัสกับผนังของ barrel ฐานสกรู และใบเกลียวสกรู
3. ความสูงของใบเกลียวมีค่าคงที่
4. ไม่พิจารณาช่องว่างระหว่างในเกลียวกับผนัง barrel
5. อนุภาคเคลื่อนที่แบบ plug flow
6. ความดันในเบดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการลำเลียงอนุภาค
7. ไม่พิจารณาแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
8. ไม่พิจารณาแรงเหวี่ยงที่เกิดจากการหมุนของสกรู
9. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเบดอนุภาคตลอดช่วงการลำเลียง

การหาอัตราการขนถ่ายเบดอนุภาคจำเป็นต้องหามุมขนถ่ายเบดอนุภาคของชีวมวลซึ่งเป็นมุมที่แรงลัพธ์กระทำกับเบดอนุภาค โดยการ

หาค่ามุมขนถ่ายเบดอนุภาคสามารถหาได้จากการสมดุลแรง และสมดุลแรงบิดที่กระทำกับเบดอนุภาคตามรูปที่ 1 ดังนี้

สมดุลแรงในแนวแกน x จะได้

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{bx} - (F_{p2} - F_{p1})_x - (F_{na} - F_{np})_x + F_{fa} + F_{fpx} + F_{rx} = 0 \qquad (1)$$

สมดุลแรงบิดรอบแกน x จะได้

$$\sum M_x = 0$$

$$F_{bx}\frac{D_b}{2} - (F_{p2} - F_{p1})_y \frac{D_w}{2} - (F_{na} - F_{np})_y \frac{D_m}{2} - F_{fay}\frac{D_m}{2} - F_{fpy}\frac{D_w}{2} - F_{ry}\frac{D_s}{2} = 0 \qquad (2)$$

จากสมการสมดุลแรงและแรงบิดตามสมการที่ (1) และ(2) จะกำหนดให้สกรูหยุดนิ่งอยู่กับที่และ barrel หมุนรอบแกนสกรู โดยจะสามารถหาแรงลัพธ์ซึ่งเป็นแรงผลักดันให้เบดอนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ด้านหน้าได้ ผลเฉลยของสมการ (1) และ (2) จะอาศัยลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของสกรูดังรูปที่ 2 และไดอะแกรมความเร็วของเบดและสกรูอัดดังรูปที่ 3 ประกอบการคำนวณ หลังจากนั้นสามารถจัดรูปสมการที่ (1) และ (2) ให้เป็นสมการที่ (3) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาค่ามุมขนถ่ายเบดอนุภาคและนำไปหาค่าอัตราการผลิตแห่งเชื้อเพลิง ($\dot{M}_S$) ในสมการที่ (9) ต่อไป โดยตัวแปรต่าง ๆจากรูปที่ 1,2 และ3 มีความหมายดังนี้

F_r = แรงเสียดทานระหว่าง เบดอนุภาคกับฐานสกรู

F_{na} = แรงตั้งฉากระหว่างเบดอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา (active flight flank)

F_{np} = แรงตั้งฉากระหว่างเบดอนุภาคกับดานข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป (passive flight flank)

F_{fa} = แรงเสียดทานระหว่างเบดอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่รับอนุภาคเข้ามา

F_{fp} = แรงเสียดทานระหว่างเบดอนุภาคกับด้านข้างของเกลียวที่ส่งอนุภาคออกไป

F_{p1} = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะใด ๆ

F_{p2} = แรงเนื่องจากความดันที่ระยะ $Z + dZ$

$\overline{V_b}$ = ความเร็วของ barrel

$\overline{V_{xz}}$ = ความเร็วของเบดอนุภาคในทิศทาง Z (ตามแนวร่องสกรู)

$\Delta\overline{V}$ = ผลต่างระหว่าง $\overline{V_b}$ และ $\overline{V_{xz}}$

ϕ_s = มุมเกลียวสกรู

ϕ_m = มุมเกลียวเฉลี่ย

θ = มุมขนถ่ายเบดอนุภาค

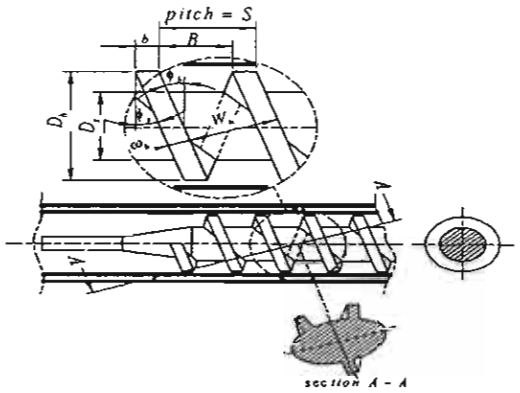
D_b = เส้นผ่านศูนย์กลาง barrel

D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางสกรู

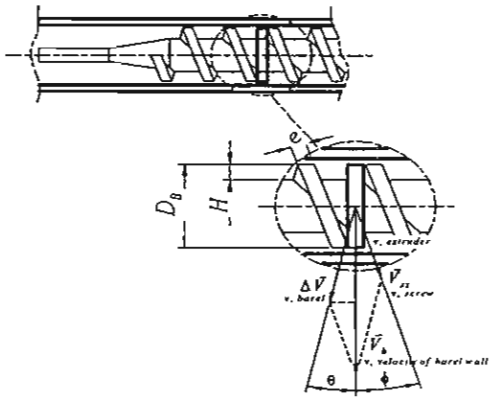
D_m = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของร่องสกรู

P_1 = ความดันที่ตำแหน่งทางเข้าร่องเกลียว

P_2 = ความดันที่ตำแหน่งทางออกร่องเกลียว



รูปที่ 2 รูปทรงทางเรขาคณิตของสกรู



รูปที่ 3 ไดอะแกรมความเร็วของเบดและสกรู

มุมขนถ่ายเบดอนุภาคสามารถหาได้จาก

$$\theta = arcsin\left[\frac{(1 + K^2 - M_{total}{}^2)^{1/2} - KM_{total}}{1 + K^2}\right] \qquad (3)$$

โดยมีตัวแปรช่วยในสมการ (3) มีดังนี้

$$K = \frac{D_m(sin\phi_m + f_s cos\phi_m)}{D_b(cos\phi_m - f_s sin\phi_m)} \qquad (4)$$

$$M_{total} = M_1 + M_2 + M_3 \qquad (5)$$

$$M_1 = \frac{2Hf_s}{W_b f_b} sin\phi_b (K + \frac{D_m}{D_b} cot an\phi_m) \qquad (6)$$

$$M_2 = \frac{W_s f_s}{W_b f_b} sin\phi_b (K + \frac{D_s}{D_b} cot an\phi_s) \qquad (7)$$

$$M_3 = \frac{W_m H}{W_b z_b f_b} sin\phi_m (K + \frac{D_m}{D_b} cot an\phi_m) ln\frac{P_2}{P_1} \qquad (8)$$

ดังนั้นสามารถหาอัตราการขนถ่ายเบดอนุภาคหรืออัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$\dot{M}_s = \rho HpWV_a = \rho HWpV_b \frac{\sin\theta}{\sin(\theta+\phi_m)} \quad (9)$$

โดยที่

ρ =ความหนาแน่นของเบดอนุภาคของชีวมวล, (kg/m^3)

p = จำนวนปากของเกลียวสกรู

V_b= ความเร็วของ Barrel ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi D_b N/60$, m/s

D_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของ Barrel, (m)

2.2 การคำนวณในช่วงการอัดอนุภาค

ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในช่วงการอัดจะแตกต่างจากการคำนวณในช่วงลำเลียง เพราะสมมุติฐานที่ใช้ในการคำนวณช่วงลำเลียงนั้นไม่เกิดการอัดตัวของอนุภาคในร่องเกลียวทำให้ความดันในเบดอนุภาคไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากความดันแตกต่างระหว่างความดันในร่องเกลียวที่ทางเข้า (P_1) และความดันในร่องเกลียวที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน (P_2) ไม่เกิดขึ้น (P_2/P_1=1) จะทำให้เทอมของตัวแปร M_3 ในสมการที่ 8 มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่ในช่วงการอัดนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของร่องเกลียวสกรูเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเบดอนุภาค โดยการลดลงของปริมาตรของร่องเกลียวสกรูจะเป็นการลดลงของความสูงของใบสกรู สำหรับความดันที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดตัวของเบดอนุภาค เพื่อเพิ่มความหนาแน่นหาได้จากการทดลองซึ่งได้ความสัมพันธ์ของความดันและความหนาแน่นที่เปลี่ยนแปลงตามความดันดังสมการที่ (10) [6]

$$P = a\exp(bD) \quad (10)$$

โดยที่ P เป็นความดันที่ใช้ในการอัด; MPa

D เป็นความหนาแน่นของเบดอนุภาคชีวมวล; kg/m^3

a, b เป็นค่าคงที่ของสมการเอมไพริกัล

a = 0.05818

b = 0.0041

ความดันในร่องเกลียวที่ทางเข้า (P_1) ของร่องเกลียวอัดร่องแรกจะให้มีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศและความดันในร่องเกลียวที่ทางออกของร่องเกลียวเดียวกัน (P_2) นั้นจะต้องหาความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากปริมาตรของร่องเกลียวที่ลดลง แล้วนำความหนาแน่นดังกล่าวแทนค่าลงในสมการที่ (10) ซึ่งความดัน P_2 ที่หาได้จากร่องเกลียวอัดร่องแรกจะเป็นค่า P_1 ของร่องเกลียวอัดร่องต่อไปซึ่งจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ความหนาแน่นตามที่ต้องการ ในการคำนวณสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงทั้งสองช่วงนั้นจะใช้วิธีการทำคำนวณซ้ำ (Iteration) โดยจะกำหนดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่จะผลิตได้ซึ่งจะสมมติความสูงของใบเกลียวเริ่มต้น โดยจะกำหนดให้ระยะพิทช์ของร่องเกลียวมีค่าคงที่แล้วคำนวณซ้ำจนได้อัตราการผลิตและความหนาแน่นที่ต้องการที่ร่องเกลียวสุดท้ายซึ่งในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงในการวิจัย จะกำหนดให้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้ไว้ที่ 1 kg/min และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าประมาณ 1,000 kg/m^3

3. วัตถุดิบในการทดลองและการทดลอง

3.1 วัตถุดิบในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านใยกะลามะพร้าว โดยวัตถุดิบทั้งสองนั้นได้จากการนำกะลา มะพร้าวแห้งไปทำการเผาจนได้ถ่านกะลามะพร้าว หลังจากนั้นนำกะลาที่ผ่านการเผามาทำการบดด้วยเครื่องบด (Hammer mill) ซึ่งผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดและผงถ่านใยกะลาจะมีหลายขนาด ซึ่งสามารถคัดแยกเป็นร้อยละโดยมวลด้วยเครื่อง Sieve analysis โดยขนาดของผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลามีสัดส่วนมากสุดที่ขนาด 0.6mm ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 39.63 สำหรับผงถ่านกะลา และร้อยละ 47.34 สำหรับผงถ่านใยกะลา สำหรับตัวประสานที่เลือกใช้คือโมลาส หรือกากน้ำตาล ซึ่งจะผสมลงในส่วนผสมของผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลาเพื่อเป็นตัวยึดเกาะวัตถุดิบให้เกาะตัวกันเป็นแท่งเชื้อเพลิงตามแบบของแม่พิมพ์ โดยมีอัตราผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านใยกะลาที่สัดส่วน 40:60 และผสมโมลาสสัดส่วน 10:100 จะมีค่าความหนาแน่น (Bulk Density) 415 kg/m^3 ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นเริ่มต้นในการออกแบบสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง

3.2 การทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะมีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

1. เครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงแข็ง
2. ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter)
3. นาฬิกาจับเวลา
4. ตาชั่งน้ำหนัก
5. แคล์มมิเตอร์ซึ่งมีความแม่นยำ ± 0.2 แอมแปร์
6. มีดตัดแท่งเชื้อเพลิง
7. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
8. เครื่องบดย่อยวัสดุ
9. เครื่องทดสอบค่าการต้านทานแรงกด (UTM)
10. เครื่องทดสอบค่าความร้อน (Bomb Calorimeter)
11. สารละลายที่ใช้ทดสอบค่าความหนาแน่น

3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

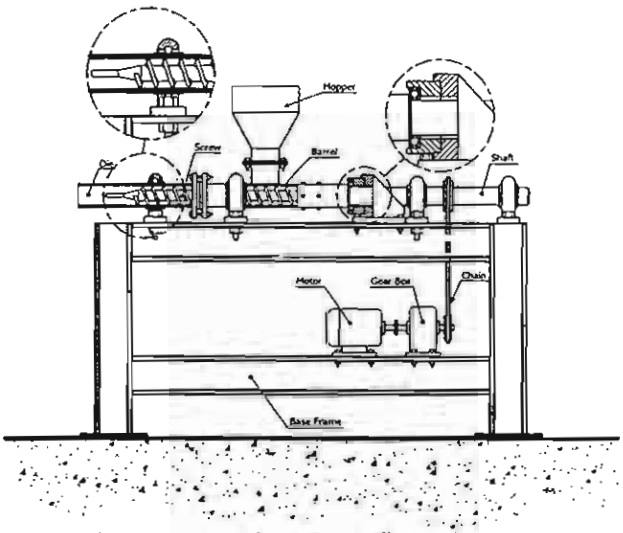
เงื่อนไขการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจะกำหนดสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาที่ 40:60 และความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 145 รอบต่อนาที แล้วทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการผลิต และสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้โดยเงื่อนไขการทดลองมีดังนี้

1. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 10:100
2. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 15:100

3. สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 20:100

3.2.3 วิธีการทดลอง

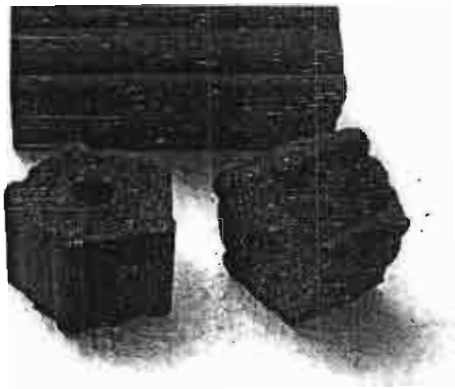
1. เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลอง
2. ทำการเดินเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงดังรูปที่ 4 เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่อง
3. ปรับความเร็วรอบของสกรูตามเงื่อนไขการทดลอง
4. นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ใส่ลงในถังพักป้อน (Hopper)
5. นำภาชนะมารองชิ้วมวลที่ยังไม่เป็นแท่ง
6. สังเกตการอัดแท่งเชื้อเพลิงซึ่งจะรอจนออกมาเป็นแท่งอย่างสม่ำเสมอจึงเริ่มบันทึกผลการทดลองโดยจะทำการวัดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเพาะ
7. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปอบให้มีความชื้นประมาณ10% d.b เพื่อเตรียมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ
8. เปลี่ยนสัดส่วนของโมลาสตามเงื่อนไขการทดลองจนครบ
9. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ



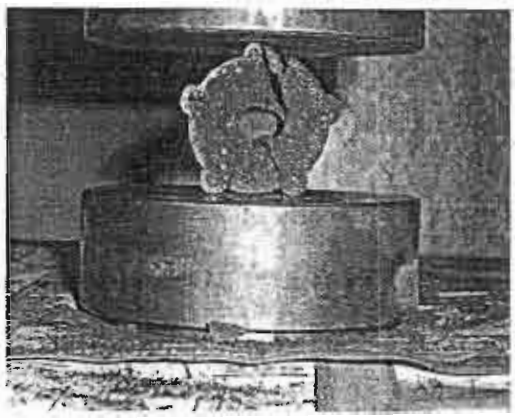
รูปที่ 4 ลักษณะของเครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

4. ผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้วัตถุดิบผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านใยกะลาที่สัดส่วน 40:60 แล้วทำการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 10:100, 15:100 และ 20:100 ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาที ซึ่งจากการออกแบบนั้นได้คำนวณอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงไว้ 1 kg/min ที่ค่าความหนาแน่นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ผสมแล้ว 415 kg/m^3 (ผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาที่ 40:60 สัดส่วนการผสมโมลาส 10:100) ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิง 145 รอบต่อนาที แต่ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าที่เงื่อนไขการออกแบบจะได้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจริงเพียง 0.8 kg/min ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใช้คำนวณไม่ตรงกับประเภทของวัตถุดิบ โดยแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้มีลักษณะดังรูปที่ 5 และการวางแท่งเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการต้านทานแรงกดและลักษณะการแตกของแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ผลการทดลองของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้เมื่อนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7-9

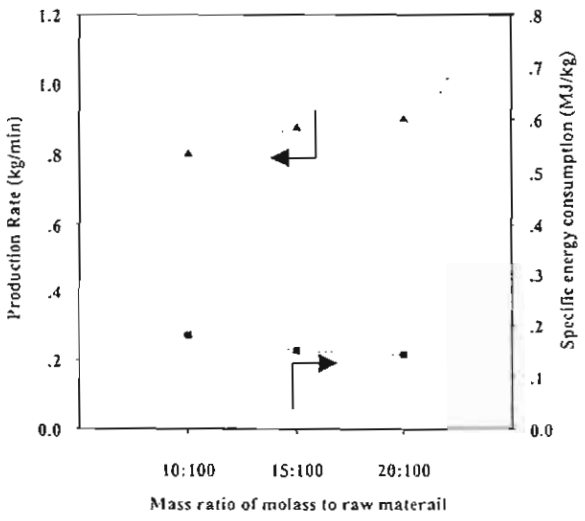


รูปที่ 5 แสดงแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้จากงานวิจัย



รูปที่ 6 การวางแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบการต้านทานแรงกด

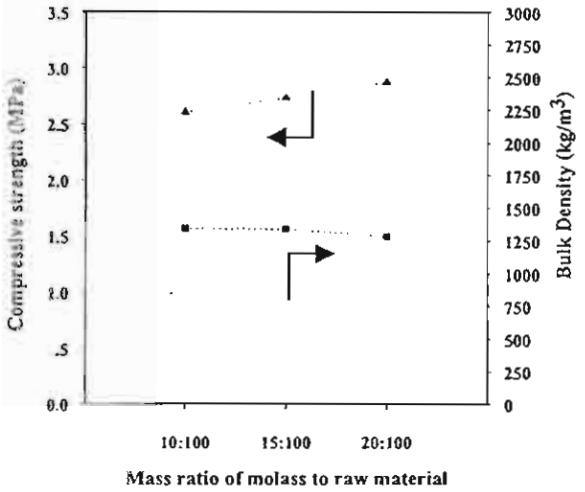
4.1 อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและการใช้พลังงานจำเพาะ



รูปที่ 7 แสดงอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและการใช้พลังงานจำเพาะที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจะทำให้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น เพราะโมลาสซึ่งมีความหนืด แต่สามารถลดความเสียดทานที่บริเวณผิวของแท่งเชื้อเพลิงที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและเร็ว ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานในการอัดหรือพลังงานจำเพาะลดลง โดยจากรูปที่ 7 พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 0.8-0.9 kg/min และการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าระหว่าง 0.14-0.18 MJ/kg

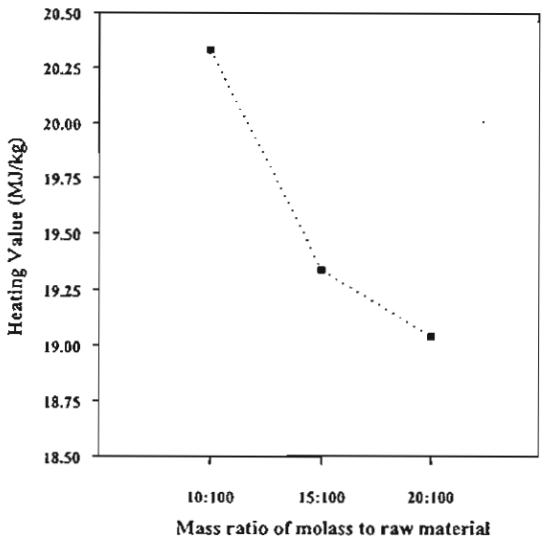
4.2 การต้านทานแรงกดและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 8 แสดงการต้านทานแรงกดและความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลอง พบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ลดลงเพราะในตัวประสานโมลาส จะมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 25% โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ไปอบทำให้น้ำที่ผสมอยู่ในโมลาสระเหยทำให้น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงลดลงแต่ไม่เกิดการหดตัวของแท่งเชื้อเพลิงทำให้ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงเท่าเดิม ดังนั้นความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบมีความหนาแน่นลดลง โดยจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ แต่ในกรณีของการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงนั้นจะพบว่าการต้านทานแรงกดจะแปรผันตรงกับการเพิ่มสัดส่วนผสมโมลาส เพราะการผสมโมลาสมากจะทำให้ปริมาณของโมลาสที่จะยึดเกาะวัตถุดิบเพียงพอและทั่วถึง ส่งผลให้สามารถรับแรงกดได้ดี โดยจากรูปที่ 8 พบว่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 2.49-2.87 MPa โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาส 20:100 ในขณะที่ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1283-1342 kg/m^3 โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100

4.3 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 9 แสดงค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาเท่ากับ 40:60

จากการทดลองพบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้นั้นมีค่าลดลง เพราะเมื่อผสมโมลาสในปริมาณมากจะทำให้สัดส่วนของปริมาณผงถ่านกะลาซึ่งให้ค่าความร้อนสูงกว่าโมลาสที่ผสมในแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ลดลงทุกๆ 1 กิโลกรัมมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าน้อยลง ตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ โดยจากรูปที่ 9 พบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 19.0 20.3MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนจะสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่ 10:100

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากชีวมวลโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น ซึ่งใช้โมลาสเป็นตัวประสานนั้นพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ออกแบบไว้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองจริงประมาณ 20% และการเปลี่ยนสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 10:100 ไปเป็น 15:100 และ 20:100 ส่งผลต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ โดยจากการทดลองที่สัดส่วนของผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาที่ 40:60 ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 145 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตจะแปรผันตรงกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.8-0.9 kg/min โดยอัตราการผลิตสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 20:100 ในขณะที่การใช้พลังงานจำเพาะในการผลิต จะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมโมลาสต่อ

น้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.14-0.18 MJ/kg ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดที่สัดส่วนโมลาสที่ 20:100 นอกจากนี้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความหนาแน่นระหว่าง 1283-1342 kg/m^3 ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 2.6-2.87 MPa โดยค่าความต้านทานแรงกดนี้มีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรมมาก (ค่าที่ยอมรับได้ต่ำสุด 0.375 MPa) สำหรับค่าความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100 และ 20:100 ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้มีค่าระหว่าง 19.04-20.33 MJ/kg ซึ่งจะสูงสุดที่สัดส่วนการผสมโมลาสที่ 10:100

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานสนับสนุนการทำวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่เอื้อเฟื้อเครื่องบดย่อยวัสดุในการบดถ่านกะลามะพร้าว

เอกสารอ้างอิง

[1] การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลของประเทศไทย, วารสารนโยบายพลังงาน, ฉบับที่ 55 ม.ค.-มี.ค. 2543

[2] ฐานิดย์ เมธิยานนท์, เมธี ใบงาม และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, "การผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากขี้เลื่อยโดยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ปี พ.ศ. 2546, หน้า 656-661

[3] M.C. Mayoral, M.T. Izquierdo, M.J. Blesa, J.M Andres, B. Rubio and J.L. Miranda, 2001, "DSC study of curing in smokeless briquetting", Thermochimica Acta [Electronic], Vol. 371, pp. 41-44, Available : Elsevier / Science Direct [2001]

[4] S.R. Richard, 1989, "Physical of Fuel Briquettes", Fuel Processing Technology [Electronic], Vol.25, pp. 89-100, Available: Elsevier / Science Publishers

[5] Rauwendaal,C., "Function process analysis", Polymer Extrusion, 2nd edition, 1990, p.p 222-256

[6] Z. Husain, Z. Zainac and Z. Addullah, 2002, "Briquetting of palm fiber and shell from the processing of palm nuts to palm oil", Biomass and Bioenergy [Electronic], Vol. 22, No. 10, pp. 505-509, Available: Elsevier / Science Direct [2002]

การศึกษาผลของตัวประสานที่ผลิตจากฟางข้าวต่อสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง

A Study of Influences of Binder Treated from Wheat Straw on Physical Properties of Fuel Briquette

ฐานิตย์ เมธิยานนท์[1] ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์[2] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[3]
[1,2]ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
[3]คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร 0-2988-3666 ต่อ 244 โทรสาร 0-2988-3666 ต่อ 241 E-mail: Thanid@mut.ac.th[1] , xmankmitnb@yahoo.com[2]

Thanid Madhiyanon[1], Prasan Sathitruangsak[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University
51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530
Somchart Soponronnarit[3]
Faculty of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตตัวประสานที่ทำมาจากการนำฟางข้าวเป็นไปหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อนำไปใช้เป็นตัวประสานในการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็นและศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมตัวประสานต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ซึ่งสมบัติทางกายภาพที่ทำการทดสอบคือ ความหนาแน่น การต้านทานแรงกดและค่าความร้อน โดยวัตถุดิบที่นำอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงคือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านไยกะลามะพร้าวที่สัดส่วน 50:50 และปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมของตัวประสานฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 15:100 ไปเป็น 20:100 และ 25:100 ผลที่ได้พบว่าอัตราการผลิตและค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสมตัวประสานที่เพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่น, การต้านทานแรงกดและพลังงานที่ใช้ในการอัดจำเพาะจะลดลงตามสัดส่วนตัวประสานที่เพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงที่ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 200 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1.39-1.52 kg/min และการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าระหว่าง 0.09-0.12 MJ/kg โดยที่ความหนาแน่นมีค่าในช่วง 1328-1388 kg/m^3 ซึ่งค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 0.33-0.49 MPa และค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่า 23.6-24.5 MJ/kg

Abstract

The objectives of this research are to study the process of binder producing from wheat straw treated with sodium hydroxide for solid fuel produced by extrusion technique and to investigate the influence of mass ratio of binder to base material on physical properties of extruded fuel. The base materials are crushed coconut shell char and its fiber char which were mixed together at the mass ratio of 50:50. To study the effect of binder on physical properties, i.e. density, compressive strength and high heating value, the mass ratios of binder were varied from one experiment to the other as the follows: 15:100, 20:100 and 25:100, respectively. The experimental results showed that the output and high heating value increased as an increase of binder fraction whereas density, compressive strength and specific energy consumption (SEC) were decreased. At screw speed of 200 rpm, the results are the output 1.39-1.52 kg/min, SEC 0.09-0.12 MJ/kg, density 1328-1388 kg/m^3, compressive strength 0.33-0.49 MPa and high heating value 23.6-24.5 MJ/kg.

1. บทนำ

ในสถานการณ์ปัจจุบันสภาวะการใช้พลังงานของประเทศไทยมีแนว โน้มเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี ทั้งนี้เนื่องมาจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการใช้พลังงานปฐมภูมิ (Primary energy) หรือพลังงานความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ส่วนหนึ่งต้องนำเข้าทำให้ประเทศต้องเสียเงินตราออกไปต่างประเทศเพื่อจ่ายค่าพลังงานเหล่านี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเชื้อเพลิงอื่น ๆ เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ซึ่งภายหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตจะมีวัสดุที่เหลือใช้จากการเกษตรจำนวนมาก โดยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้ มีศักยภาพในการนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงได้ และจะเป็นการลดปริมาณวัสดุที่ต้องทำลายอีกทางหนึ่ง จากการสำรวจข้อมูล พบว่าวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรของประเทศไทยมีศักยภาพในการแปรรูปเป็นพลังงานได้รวม 156,402×10^6 MJ [1] โดยวัสดุเหลือจากการเกษตรที่มีศักยภาพสูงแต่มีสัดส่วนการนำไปใช้ประโยชน์น้อย คือผลมะพร้าวซึ่งกะลาของผลมะพร้าวมีค่าความร้อนถึง 17.93 MJ/kg [1] นอกจากนี้ฟางข้าวที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวข้าวยังมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อย ในขณะที่ปริมาณการเก็บเกี่ยวมีกว่า 24 ล้านตันต่อปี [1] จากที่กล่าวมานั้นพบว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้เหมาะกับ การนำมาแปรรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงซึ่งในการแปรรูปนั้น จะทำได้โดยการนำวัสดุดังกล่าวมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง โดยการอัดแท่งเชื้อเพลิงนั้นสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การอัดด้วยไฮดรอลิกส์ การอัดด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งในการอัดด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน จะสามารถอัดได้อย่างต่อเนื่อง และการทำงานที่สะดวกกว่าการอัดด้วย ไฮดรอลิกส์ สำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันนั้นยังสามารถแบ่งออกได้อีก 2 แบบคือการอัดรีดร้อนและกระบวนการอัดรีดเย็น โดยกระบวนการอัดรีดร้อนจะใช้กับวัตถุดิบที่มีลิกนินเป็นส่วนประกอบ การให้ความร้อนก็เพื่อที่จะทำให้ลิกนิน ที่มีอยู่ในวัตถุดิบละลายออกมายึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง แต่ในกระบวนการอัดรีดเย็นนั้นไม่ต้องการความร้อนในระหว่างการอัด แต่จะต้องใช้ตัวประสานเพื่อทำหน้าที่ยึดเกาะวัตถุดิบให้คงรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง จากการทดลองของ [2] ได้ทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากขี้เลื่อยของไม้ 3 ชนิด ด้วยการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดร้อนซึ่งใช้ขดลวดความร้อนเป็นแหล่งความร้อนซึ่งพบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงจะต่ำและใช้พลังงานจำเพาะสูง ซึ่งมีค่าอัตราการผลิต 0.27 kg/min การใช้พลังงานจำเพาะ 0.9 MJ/kg การอัดแท่งเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดร้อนจะมีความยุ่งยาก จึงเปลี่ยนมาใช้กระบวนการอัดรีดเย็นแทนซึ่งจะใช้เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิง ที่ออกแบบไว้ใช้กับการอัดรีดเย็นโดยเฉพาะ ซึ่งจะอาศัยหลักการของสกรูขนถ่ายวัสดุของ [3] ในการออกแบบซึ่งจำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นและความดัน ซึ่งจะใช้สมการเอมไพริกัลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ผงถ่านกะลาปาล์มผสมกับผงถ่านใยกะลาปาล์มที่สัดส่วน 40:60 มาเป็นวัสดุทดสอบ [4] สำหรับตัวประสานที่สามารถใช้เพื่อยึดเกาะผงวัตถุดิบมีหลายชนิดเช่น โมลาส หรือ กากน้ำตาล ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าการใช้โมลาสเป็นตัวประสานเพื่อยึดเกาะผงถ่านหินในการอัดเป็นแท่งซึ่งจะทำให้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นมีควันน้อย [5] นอกจากนี้ยังสามารถผลิตตัวประสานจากฟางข้าว [6] ซึ่งทำการทดลองโดยการนำฟางข้าวมาหมักกับสารละลาย 3 ชนิดคือ กรดซัลฟูริก น้ำปูนใส และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยผลการทดลองพบว่าฟางข้าวที่หมักด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะให้ผลดีที่สุดในด้านความแข็งแรงของแท่งเชื้อเพลิง สำหรับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นจะต้องมีการนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่น การต้านทานแรงกดและ ค่าความร้อน ซึ่งพบว่าการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงต่ำสุดที่ยอมรับได้ในภาคอุตสาหกรรมมีค่า 0.375 MPa [7] สำหรับค่าความร้อนจะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงตัดสินใจทำการทดลองผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งโดยใช้กะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบและใช้ตัวประสานที่ทำมาจากการนำฟางข้าวไปหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะศึกษาถึงอิทธิพลของสัดส่วนการผสมตัวประสานฟางข้าวหมักที่มีต่อ การผลิตแท่งเชื้อเพลิงและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้

2. การผลิตตัวประสานฟางข้าวหมัก

ในการผลิตตัวประสานจากฟางข้าวหมักนั้นจะนำฟางข้าวแห้งหลังจากการเก็บเกี่ยวที่มีความชื้นประมาณ 15% db มาหมักกับสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้น 50% แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ลิกนินและเซลลูโลสที่มีอยู่ในฟางข้าวแตกตัวออกมาเป็นสารยึดเกาะของตัวประสานจากฟางข้าว โดยในตัวประสานจากฟางข้าวหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นจะประกอบ ด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่มีลักษณะคล้ายเจล ซึ่งส่วนที่เป็นของเหลวจะมี เซลลูโลส, แทนนิน, เปคติน และลิกนิน เป็นสารที่มีคุณสมบัติคล้ายกับซีเมนต์ในคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ช่วยในการยึดเกาะวัตถุดิบที่นำมาอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงให้แข็งแรงเมื่อผ่านกระบวนการอัด สำหรับในส่วนที่เป็นเจลจะมีฟางข้าวเป็นเส้นใย ซึ่งเปรียบเสมือนกับเส้นเหล็กที่เป็นวัสดุเสริม แรงในคอนกรีต เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ [6] โดยลักษณะของตัวประสานจากฟางข้าวหมักนั้นแสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 แสดงลักษณะของตัวประสานฟางข้าวหมัก

3. วัตถุดิบในการทดลองและการทดลอง

3.1 วัตถุดิบในการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองคือผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านใยกะลามะพร้าว โดยวัตถุดิบทั้งสองนั้นได้จากการนำกะลา มะพร้าวแห้งไปทำการเผาจนได้ผงถ่านดังกล่าว หลังจากนั้นนำกะลาที่ผ่านการเผามาทำการบดด้วยเครื่องบด (Hammer mill) โดยผงถ่านกะลาที่ผ่านการบดและผงถ่านใยกะลาจะมีหลายขนาด ซึ่งสามารถคัดแยกเป็นร้อยละโดยมวลด้วยเครื่อง Sieve analysis โดยขนาดของผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลามีสัดส่วนมากสุดที่ขนาด 0.6mm. ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 39.63 สำหรับผงถ่านกะลา และร้อยละ 47.34 สำหรับผงถ่านใยกะลา สำหรับตัวประสานที่เลือกใช้คือฟางข้าวหมัก ซึ่งจะผสมลงในส่วนผสมของผงถ่านกะลาและผงถ่านใยกะลา เพื่อเป็นตัวยึดเกาะวัตถุดิบให้เกาะตัวกันเป็นแท่งเชื้อเพลิงตามแบบของแม่พิมพ์

3.2 การทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองการอัดแท่งเชื้อเพลิงที่เงื่อนไขต่าง ๆ จะมีอุปกรณ์ในการทดลองดังนี้

1. เครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงแข็ง
2. ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Inverter)
3. นาฬิกาจับเวลา
4. ตาชั่งน้ำหนัก
5. แคล์มมิเตอร์ซึ่งมีความแม่นยำ ± 0.2 แอมแปร์
6. มีดตัดแท่งเชื้อเพลิง
7. เวอร์เนียคาลิปเปอร์
8. เครื่องบดย่อยวัสดุ
9. เครื่องทดสอบค่าการต้านทานแรงกด (UTM)
10. เครื่องทดสอบค่าความร้อน (Bomb Calorimeter)
11. สารละลายที่ใช้ทดสอบค่าความหนาแน่น

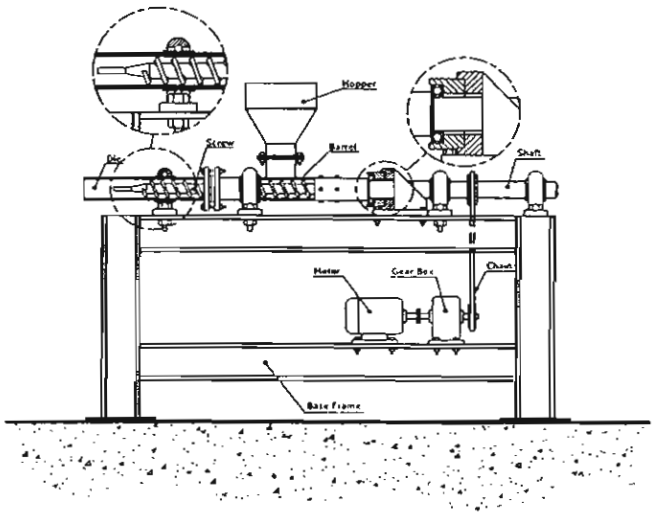
3.2.2 เงื่อนไขการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง โดยจะกำหนดสัดส่วนการผสมผงถ่านกะลาต่อผงถ่านใยกะลาที่ 50:50 และความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 200 รอบต่อนาที แล้วทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่มีต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ โดยเงื่อนไขการทดลองมีดังนี้

1. สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 15:100
2. สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 20:100
3. สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ 25:100

3.2.3 วิธีการทดลอง

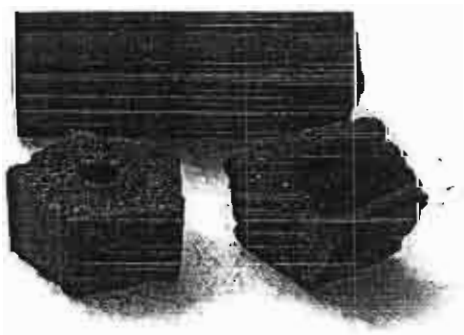
1. เตรียมวัตถุดิบและอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลอง
2. ทำการเดินเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงดังรูปที่ 2 เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่อง
3. ปรับความเร็วรอบของสกรูตามเงื่อนไขการทดลอง
4. นำวัตถุดิบที่เตรียมไว้ใส่ลงในถังพักป้อน (Hopper)
5. นำภาชนะมารองชิ้วมวลที่ยังไม่เป็นแท่ง
6. สังเกตการณ์อัดแท่งเชื้อเพลิง รอจนออกมาเป็นแท่งอย่างสม่ำเสมอจึงเริ่มบันทึกผลการทดลองโดยจะทำการวัดอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงและพลังงานที่ใช้ในการอัดแท่งเชื้อเพลิงจำเพาะ
7. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ไปอบให้มีความชื้นประมาณ10% d.b เพื่อเตรียมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ
8. เปลี่ยนสัดส่วนของฟางข้าวหมักตามเงื่อนไขการทดลองจนครบ
9. นำแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ



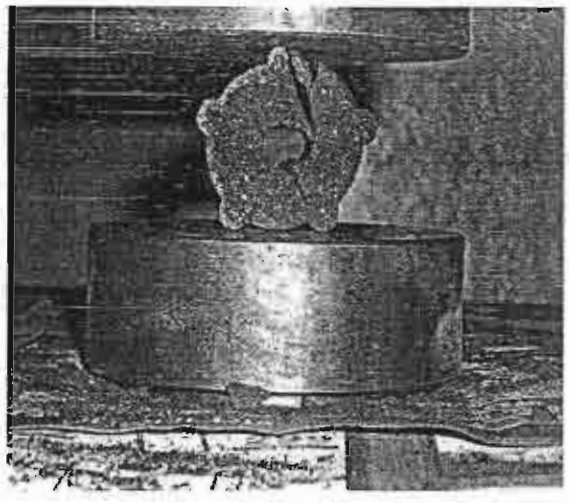
รูปที่ 2 ลักษณะของเครื่องอัดรีดแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัย

4. ผลการทดลอง

จากการทดลองผลิตแท่งเชื้อเพลิงจากผงถ่านกะลามะพร้าวผสมกับผงถ่านใยกะลามะพร้าวที่สัดส่วน 50:50 เป็นวัตถุดิบ และเปลี่ยนสัดส่วนการผสมตัวประสานฟางข้าวหมักจาก 15:100 ไปเป็น 20:100 และ 25:100 ซึ่งจะอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงได้ลักษณะดังรูปที่ 3 ซึ่งลักษณะการวางแท่งเชื้อเพลิงเพื่อทดสอบการต้านทานแรงกดและลักษณะการแตกของแท่งเชื้อเพลิง เมื่อนำไปทดสอบการต้านทานแรงกดจะแสดงดังรูปที่ 4 สำหรับผลการทดลองที่ได้จากการผลิตและการทดสอบการต้านทานแรงกดจะแสดงดังรูปที่ 5-7

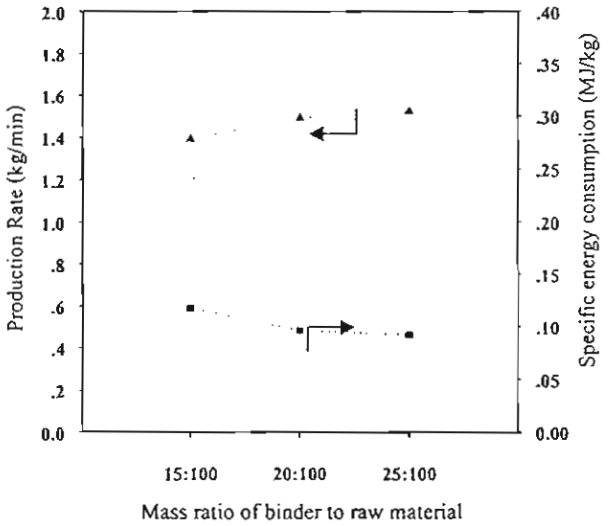


รูปที่ 3 ลักษณะของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ในงานวิจัย



รูปที่ 4 ลักษณะการวางแท่งเชื้อเพลิงในการทดสอบการต้านทานแรงกด

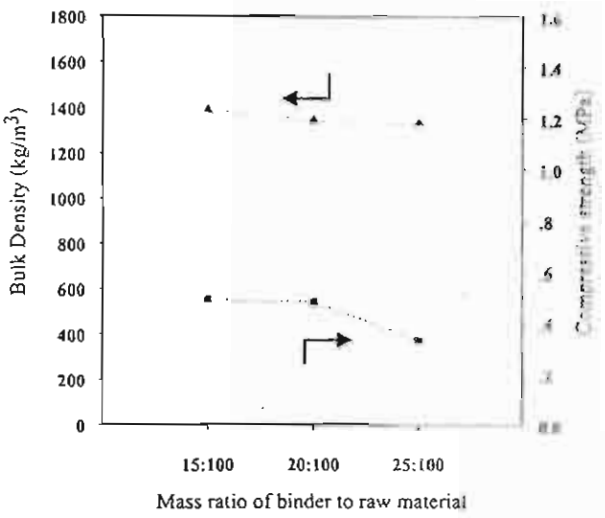
4.1 อัตราการผลิตและการใช้พลังงานจำเพาะ



รูปที่ 5 แสดงอัตราการผลิตและการใช้พลังงานจำเพาะที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 50:50

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมตัวประสานที่ทำจากฟางข้าวมาหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจะทำให้อัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้นเพราะฟางข้าวที่หมักแล้วนั้น เมื่อนำมาทำการบีบพบว่าจะมีความลื่น คล้ายเจลหล่อลื่นซึ่งสามารถลดความเสียดทานที่บริเวณผิวของแท่งเชื้อเพลิงที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ทำให้แท่งเชื้อเพลิงสามารถไหลออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและเร็ว ซึ่งส่งผลให้การใช้พลังงานในการอัดหรือพลังงานจำเพาะลดลง โดยจากรูปที่ 5 พบว่าอัตราการผลิตแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1.39-1.52 kg/min และการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าระหว่าง 0.09-0.12 MJ/kg

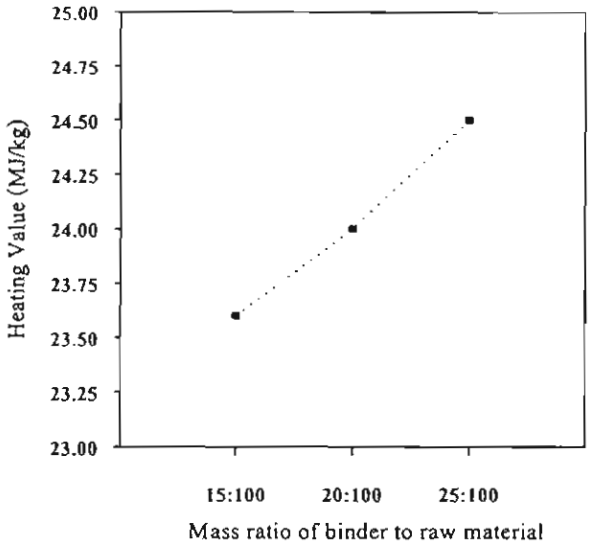
4.2 ความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 6 แสดงความหนาแน่นและการต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 50:50

จากการทดลองพบว่าเมื่อสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ได้ลดลง เนื่องจากในการผลิตตัวประสานจากฟางข้าวหมักนั้นจะต้องใช้น้ำเป็นส่วนผสมมากถึงร้อยละ 80 นอกจากนี้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมในการหมักนั้นก็มีสถานะเป็นของเหลวเช่นกันเป็นผลให้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวประสานจากฟางข้าวหมักนั้นมีมาก เมื่อนำแท่งเชื้อเพลิงที่มีการผสมฟางข้าวหมักในสัดส่วนที่มากไปทำการอบจะทำให้น้ำที่ผสมอยู่ในตัวประสานฟางข้าวหมักระเหยทำให้น้ำหนักของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบลดลง และจะทำให้เกิดรูพรุนในแท่งเชื้อเพลิง ในขณะที่ปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงเท่าเดิมทำให้ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงที่ผ่านการอบจะมีความหนาแน่นลดลง ดังนั้นความหนาแน่นจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบและจากการที่แท่งเชื้อเพลิงที่ได้มีรูพรุนมากนั้น จึงส่งผลให้การต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงลดลง โดยจากรูปที่ 6 พบว่า การต้านทานแรงกดของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 0.33-0.40 MPa โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมัก 15:100 ในขณะที่ความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 1328-1388 kg/m³ โดยมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักวัตถุดิบที่ 15:100

4.3 ค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง



รูปที่ 7 แสดงค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนผงถ่านกะลาต่อผงถ่านไยกะลาเท่ากับ 50:50

จากการทดลองพบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักวัตถุดิบเพราะตัวประสานที่ผลิตจากฟางข้าวนั้นจะมีฟางข้าวที่สามารถเผาไหม้และให้ความร้อนได้ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่าความร้อนให้กับแท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ จากการทดลองจะพบว่าค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักวัตถุดิบ 15:100 จะน้อยกว่าสัดส่วน 25:100 โดยค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าระหว่าง 23.6–24.5 MJ/kg

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งจากชีวมวลโดยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบบอัดรีดเย็น โดยใช้ผงถ่านกะลาผสมกับผงถ่านไยกะลาที่สัดส่วน 50:50 เป็นวัตถุดิบในการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง และใช้สัดส่วนการผสมตัวประสานที่นำฟางข้าวแห้ง ซึ่งมีความชื้นประมาณ 15% db. มาหมักกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 50% พบว่าเมื่อเปลี่ยนสัดส่วนการผสมตัวประสานฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบจาก 15:100 ไปเป็น 20:100 และ 25:100 จะส่งผลต่อการผลิตและสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้ โดยจากการทดลองที่ความเร็วรอบของสกรูอัดแท่งเชื้อเพลิงที่ 200 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการผลิตจะแปรผันตรงกับสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบซึ่งมีค่าระหว่าง 1.39-1.52 kg/min โดยอัตราการผลิตสูงสุดอยู่ที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักที่ 25:100 ในขณะที่การใช้พลังงานจำเพาะในการผลิตจะแปรผกผันกับสัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักของวัตถุดิบ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.09-0.12 MJ/kg ซึ่งจะมีค่าต่ำสุดที่สัดส่วนฟางข้าวหมักที่ 25:100 นอกจากนี้แท่งเชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีความหนาแน่นระหว่าง 1328-1388 kg/m^3 ซึ่งมีค่าการต้านทานแรงกดระหว่าง 0.33-0.49 MPa โดยค่าความต้านทานแรงกดนี้ มีเพียงที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักต่อน้ำหนักวัตถุดิบที่ 15:100 เท่านั้นที่มีค่าสูงกว่าค่าที่ยอมรับในระดับอุตสาหกรรม (ค่าที่ยอมรับได้ต่ำสุด 0.375 MPa) สำหรับค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่อัดได้มีค่าระหว่าง 23.6–24.5 MJ/kg ซึ่งจะสูงสุดที่สัดส่วนการผสมฟางข้าวหมักที่ 25:100

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานสนับสนุนการทำวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการวิจัยและ ขอบคุณกองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตรที่เอื้อเฟื้อเครื่องบดย่อยวัสดุเพื่อใช้ในการบดถ่านกะลาให้เป็นผงถ่านกะลาในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลของประเทศไทย, วารสารนโยบายพลังงาน, ฉบับที่ 55 ม.ค.-มี.ค. 2545

[2] ฐานิตย์ เมธียานนท์, เมธี ใบงาม และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์, "การผลิตเชื้อเพลิงแท่งแข็งจากขี้เลื่อยโดยเทคนิคเอ็กซ์ทรูชัน", การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, ปี พ.ศ. 2546, หน้า 656-661

[3] Rauwendaal,C., "Function process analysis", Polymer Extrusion, 2nd edition, 1990, p.p 222-256

[4] Z. Husain, Z. Zainac and Z. Addullah, 2002, "Briquetting of palm fiber and shell from the processing of palm nuts to palm oil", Biomass and Bioenergy [Electronic], Vol. 22, No. 10, pp. 505-509, Available: Elsevier / Science Direct [2002]

[5] M.C. Mayoral, M.T.Izquierdo, M.J. Blesa, J.M Andres, B.Rubio and J.L. Miranda, 2001, "DSC study of curing in smokeless briquetting", Thermochimica Acta [Electronic], Vol. 371, pp. 41-44, Available: Elsevier / Science Direct [2001]

[6] Z. Xianglan, X. Deping, X. Zhihua and C. Qingru, 2001, "The effect of different treatment condition on binder preparation for lignite briquette", Fuel Processing Technology [Electronic], Vol. 73, pp. 185-196, Available : Elsevier / Science Direct [2001]

[7] S.R. Richard, 1989, "Physical of Fuel Briquettes", Fuel Processing Technology [Electronic], Vol.25, pp. 89-100, Available: Elsevier / Science Publishers

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด : Part I ผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตา

VORTEXING-FLUIDIZED BED COMBUSTOR (VFBC) : Part I EFFECTS OF PRIMARY AIR ON PERFORMANCE OF COMBUSTOR

ฐานิศย์ เมธิยานนท์[1] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์[2] พีระวัตร์ ทองนอก[3] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
[1,2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
โทร 02-9883666 ext. 244 E-mail : thanid_m@yahoo.com[1]
[3]นักศึกษา ป. โท [4]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400 โทร 02-4708693-9 ext. 111 E-mail: somchart.sop@kmutt.ac.th[4]

Thanid madhiyanon[1] Niwat Piriyarungroj[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University
51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530
Peerawat Thongnork[3] Somchart Soponronnarit[4]
Faculty of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด (Vortex-Fluidized Bed Combustor, VFBC) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยรวมลักษณะเด่นของเตาเผาไหม้ไซโคลนและเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด เพื่อต้องการเตาเผาไหม้แบบใหม่ที่ให้ค่าภาระความร้อน (MW_{th}/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) สูง แต่มีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ โดยวัตถุประสงค์ของโครงงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งจ่ายมาพร้อมกับเชื้อเพลิงในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านบนของเตาที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของเตาเผา VFBC โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง ในขณะคงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ (SFR) อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (เป็นอากาศที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เซชัน) และอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งที่ตำแหน่งต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคในแต่ละเงื่อนไขของการทดลอง จากการทดลองพบว่าเมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งทำให้มีปริมาณอากาศส่วนเกินทั้งหมดที่ใช้ในการเผาไหม้เท่ากับ 164% เตาเผา VFBC มีสมรรถนะของเตาสูงสุด แต่ถ้าใช้ปริมาณส่วนที่หนึ่งมากกว่าหรือน้อยกว่านั้น จะทำให้ η_{th} ลดลง พบว่าที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 164% ทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,030 องศาเซลเซียส η_{th} เท่ากับ 90% ได้ค่าภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.82 MW/m^3 ได้ปริมาณก๊าซ CO_2, CO และ NO_x จากการเผาไหม้เท่ากับ 8.7%, 335 และ 300 ppm (คิดที่ O_2 ส่วนเกินเท่ากับ 7%)

Abstract

A novel vortexing-fluidized bed combustor (VFBC) which has been combined a main feature of cyclone and fluidized bed combustors has been developed in order to achieve high thermal load and high efficiency of combustor whereas ratio of diameter to height of combustor is low. To investigate the influence of primary air, which carries rice husk to the top of VFBC in tangential direction, Which is a purpose of this study, the amount of primary air was varied from one experiment to the other while specific fuel rate, secondary air (fluidization air) and tertiary air (air tangentially distributed under a vortex-ring) were kept unchanged in each experiment. The results showed that when primary air was distributed with a corresponding excess air of 164%, VFBC perform very well but if amount of primary air was further either increased or decreased, thermal efficiency would be dropped. Under proper operating condition, the maximum exit gas temperature obtained at 1030°C, thermal efficiency a about 90% and thermal load of combustor is 0.82 MW_{th}/m^3 while amount of emission gases, i.e. CO_2, CO and NO_x determined base on excess O_2 of 7% were 8.7%, 335 ppm and 300 ppm, respectively.

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานความร้อนในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากต้องผลิตสินค้าอุปโภคบริโภค ให้เหมาะสมกับความต้องการของประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน โดยพลังงานความร้อนที่ใช้ส่วนใหญ่ที่ใช้จะเป็นพลังงานที่ได้จากน้ำมันซึ่งมีราคาสูงเพราะต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ จึงได้มีผู้ประกอบการหลายรายได้นำเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานความร้อนเพื่อทดแทนพลังงานความร้อนจากน้ำมันทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง โดยเตาเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ เตาเผาไหม้แบบไซโคลน [1] การเผาไหม้ภายในเตาจะอาศัยหลักการของการไหลวนหรือการไหลแบบวอร์เทค ทำให้สามารถดักเถ้าไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับก๊าซเผาไหม้ ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ [2, 3, 4] เป็นต้น ข้อเสียของเตาเผาไหม้ประเภทนี้คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและค่าภาระความร้อนต่ำ สำหรับเตาฟลูอิไดซ์เบดได้ใช้หลักของการเกิดฟลูอิไดเซชั่น ทำให้การเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้มีการกระจายอุณหภูมิทั่วถึงตลอดทั้งความสูงของเตา เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบและขี้เลื่อย [5, 6, 7] ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีน้ำหนักเบาทำให้ยากต่อการเกิดฟลูอิไดเซชัน ดังนั้นจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อย เช่น ทรายซิลิกา อลูมินา ลงในเบด [5, 8] ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ทำให้ความดันตกคร่อมภายในเตาค่อนข้างสูงจำเป็นต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ และในการออกแบบเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดต้องออกแบบให้เตาเผาไหม้มีความสูงพอที่จะทำให้อนุภาคภายในไม่หลุดออกนอกเตา ส่งผลให้ค่าสัดส่วนความสูงของเส้นผ่านศูนย์กลางเตาค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนาให้มีการฉีดอากาศเข้าบริเวณ free board เพื่อดักเถ้าไม่ให้หลุดลอยออกไปพร้อมกับก๊าซเผาไหม้ และลดความสูงของเตาเผาไหม้ลง [9 ,10, 11] ซึ่งคล้ายกับ U.S. Patent no. 4,867,079 [17] และได้มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของก๊าซและอนุภาคแบบวอร์เทค[12] พบอากาศบริเวณผนังจะมีทิศทางการไหลลงด้านล่างเตา ดังนั้นเมื่อเมื่อมีการฉีดอากาศเข้าบริเวณ free board ก็จะทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคภายในเตา ส่งผลถึง residence time นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้านำจุดเด่นของเตาเผาไหม้ ทั้งสองแบบมารวมกันจะทำให้มีค่าภาระความร้อน (MW_{th}/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ ทำให้ติดตั้งในโรงงานได้สะดวก ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ โดยเมื่อนำจุดเด่นของเตาทั้งสองมารวมกันจะได้เป็นเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดขึ้นมา โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดจำลอง [13] เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบ พบว่าเตาเผาวอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดจำลองสามารถรวมคุณลักษณะเด่นของการไหลแบบฟลูอิไดซ์เบดและแบบวอร์เทคเข้าไว้ด้วยกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบเตาเผา VFBC โดย เตาเผา VFBC จะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วนคืออากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) เป็นอากาศที่พาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้โดยอากาศส่วนที่หนึ่งและแกลบนี้จะถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ตำแหน่งด้านบนของเตาที่เหนือแผ่นวงแหวนวอร์เทค ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบวอร์เทคของ อากาศและเชื้อเพลิงซึ่งจะป้องกันไม่ให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ไม่ให้หลุดออกนอกเตาทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตามีมากขึ้น อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นอากาศที่จ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาเพื่อทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดและอากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) เป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค ขนาดของเตาและอุปกรณ์ต่างๆ ของเตา VFBC ได้แสดงในรูปที่ 1(a) และ 2 โดยไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ [18] โดยศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่มีผลต่อการเผาไหม้ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นหลัก โดยปริมาณอากาศส่วนที่สามจะไม่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้องของเตาดราบที่ปริมาณอากาศส่วนเกินรวมทั้งหมดเหมาะสม แต่การจ่ายอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1,000 องศาเซลเซียส โดยโครงงานวิจัยนี้เป็นโครงงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้จของเตาเผา VFBC

2.วิธีการทดลอง

2.1 การศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาเผา VFBC

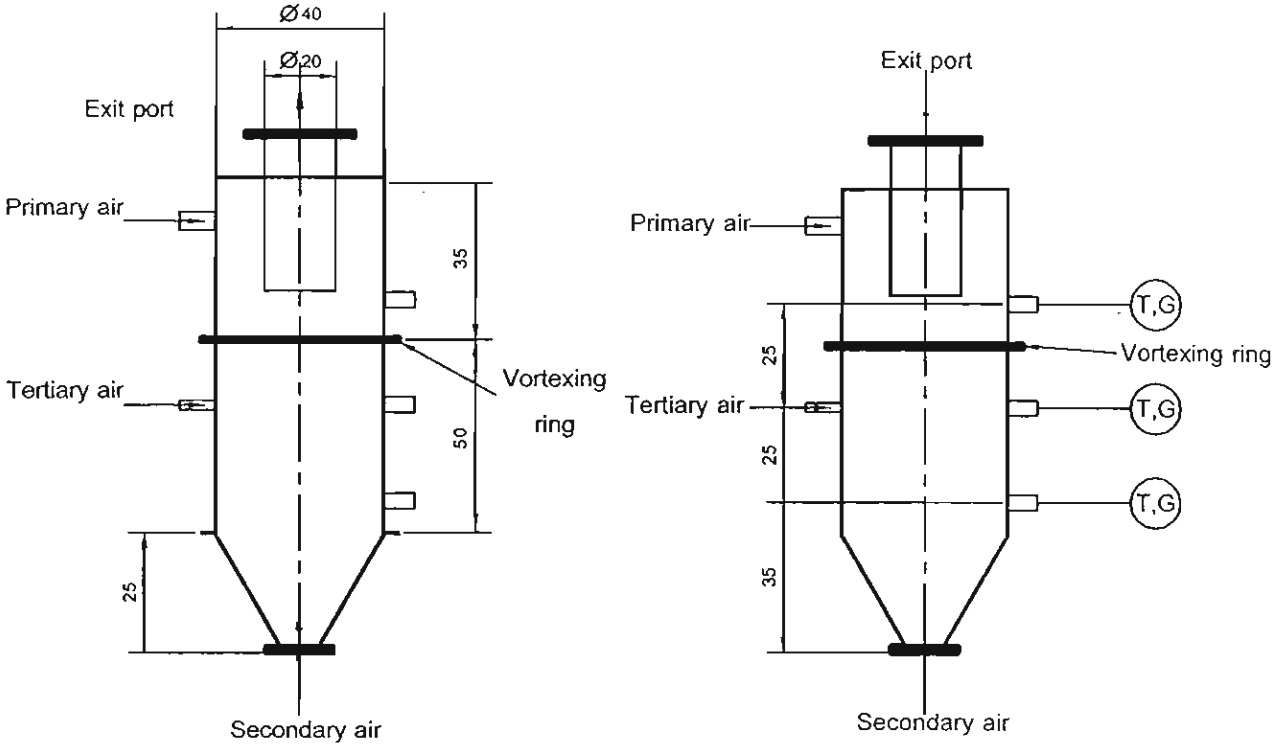
เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600 °C จึงเริ่มทำการทดลอง

1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 1 ในตารางที่ 1 ซึ่งในการทดลองจะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW เป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ออริฟิสมิเตอร์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ซึ่งออริฟิสมิเตอร์ทั้ง 3 ชุดได้ถูกปรับเทียบจาก Hot wire ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้และในการควบคุมอัตราการป้อนแกลบจะใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังในการขับสกรูที่ใช้ในการป้อนแกลบ

2. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาทีจนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ อุปกรณ์ชี้วัดซึ่งมีความละเอียดในหลักหน่วยในการแสดงผล

3. บันทึกองค์ประกอบของก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ 1) ตำแหน่ง Y_1 = 0.35 m, 2) ตำแหน่ง Y_2 = 0.60 m, 3) ตำแหน่ง Y_3 = 0.85 m และ 4) ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC (เมื่อ Y คือ ความสูงของเตาเผา VFBC โดยความสูงของเตาจะเริ่มวัดจากตำแหน่งด้านล่างสุดของเตาที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงาย) ดังแสดงในรูปที่ 1(b)

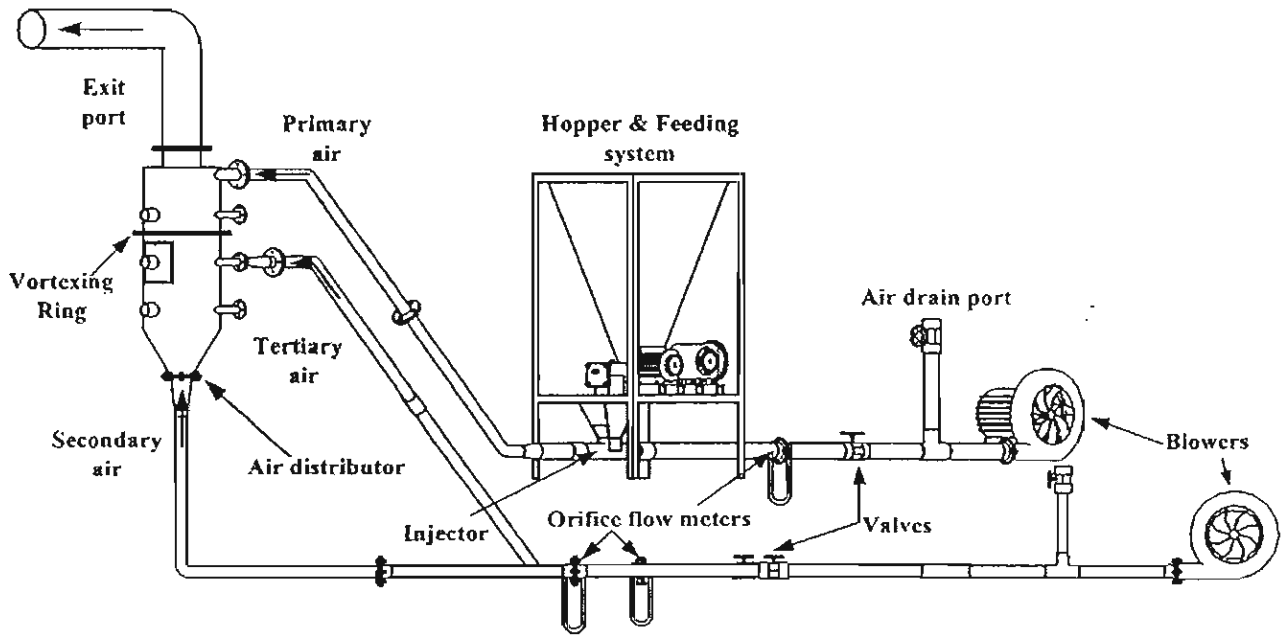
4.ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขการทดลองที่ 2-4 ในตารางที่ 1



(a) ขนาดของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด (VFBC)

(b) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ(T) และองค์ประกอบก๊าซร้อน (G)

รูปที่ 1 ขนาดและตำแหน่งวัดอุณภูมิของเตาเผาไหม้ VFBC



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผา VFBC

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองที่ศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งที่มีผลต่อสมรรถนะของ VFBC

Run No.	Specific Rice husk feed rate (kg/h-m^3)	Primary air		Secondary air		Thirdly air		Excess air (%)
		Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	
1	240	2	16	0.85	1.75	0.76	25	149
2	240	2.19	18	0.85	1.75	0.76	25	167
3	240	2.31	19	0.85	1.75	0.76	25	176
4	240	2.43	20	0.85	1.75	0.76	25	186

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a\left(c_{p,g}T_e - c_{p,a}T_i\right)}{\dot{m}_f HHV} \qquad (1)$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s

$c_{p,g}$, $c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนของแก๊สเสียและอากาศที่เข้าเผาไหม้

HHV = ค่าความร้อนสูงของแกลบ = 14.5 MJ/kg

e = ที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

i = ที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

โดยกำหนดให้ $c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออก เท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิก๊าซร้อน

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_a >> \dot{m}_f$ ดังนั้น มวลของก๊าซจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

3.ผลการทดลอง

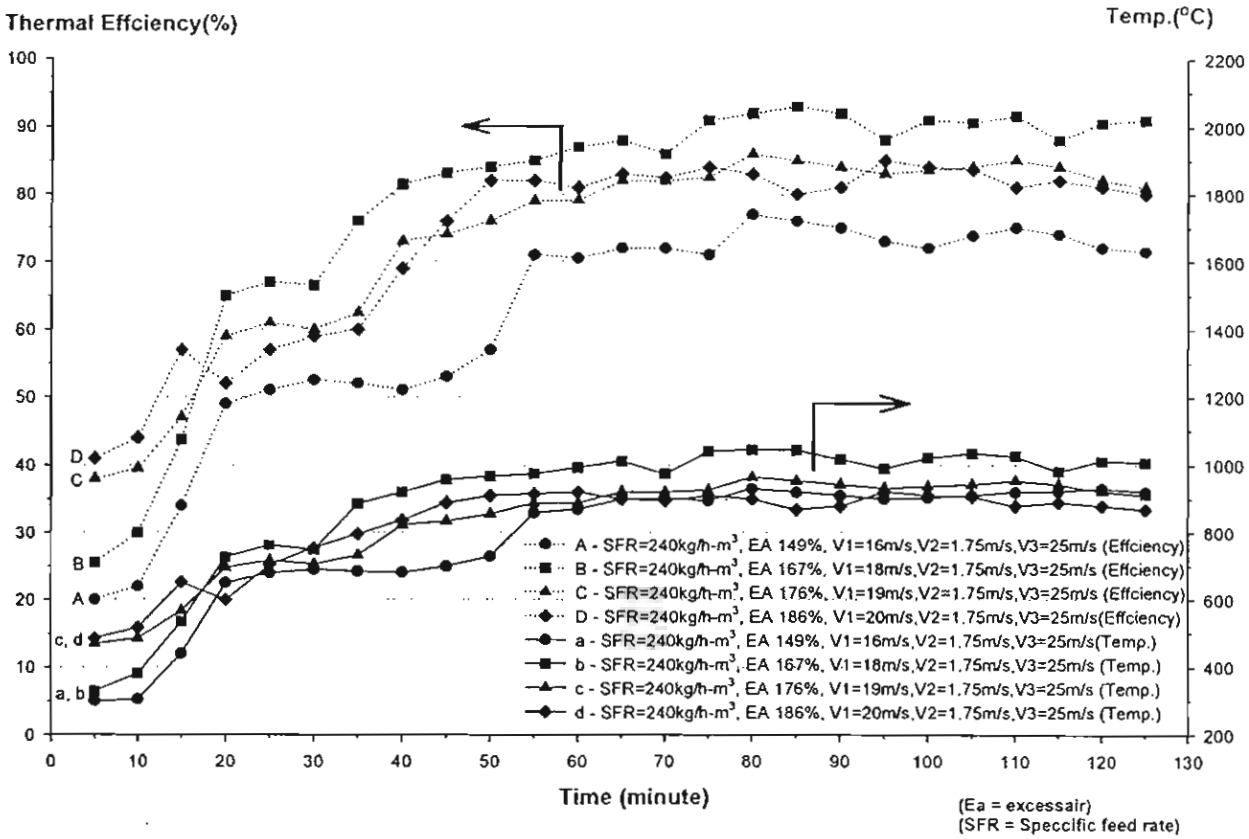
เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะเตาเผา VFBC ซึ่งในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยคงที่อัตราการป้อนแกลบจำเพาะ (SRF) เท่ากับ 240 kg/h-m^3, อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) และสาม (m_3) เท่ากับ 0.85 m^3/min และ 0.76 m^3/min ตามลำดับ ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ข้อดังต่อไปนี้

3.1 สมรรถนะของเตา VFBC

ในการพิจารณาถึงสมรรถนะของเตาเผาจะพิจารณาจาก ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และภาระความร้อนของเตา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นดัชนีที่ใช้บอกความคุ้มค่าของการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง ส่วนภาระความร้อนของเตาเผาไหม้เป็นตัวบ่งบอกถึงความคุ้มค่าในการใช้พื้นที่ภายในเตาเผาไหม้ ในการศึกษาถึงผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะของเตา VFBC นี้พบว่าสามารถแบ่งข้อสังเกตที่ได้จากการทดลองออกเป็น 2 ช่วงหลักๆ คือ

ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 5 ถึง 60 นาที) จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทั้ง 4 เงื่อนไข (ดังแสดงในตารางที่ 1) จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3 เส้นกราฟ a-d โดยเฉพาะที่เงื่อนไขปริมาณอากาศส่วนเกิน (EA) เท่ากับ 167 (เส้นกราฟ b) อุณหภูมิที่ทางออกสามารถเพิ่มจาก 310 °C ถึง 1,000 °C ภายในเวลา 55 นาที ซึ่งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่เร็วที่สุดในการทดลอง

ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 65 ถึง 125 นาที) เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง(m_1) เท่ากับ 2.0 m^3/min (V_1 = 16 m/s,149%EA) โดยคงที่ SFR = 240 kg/h-m^3, m_2 = 0.85 m^3/min, m_3 = 0.76 m^3/min จากการทดลองพบว่าโดยอากาศส่วนที่หนึ่งจะถูกจ่ายในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านบนของเตา เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่เหนือวงแหวนวอร์เทค (ซึ่งคล้ายคลึงกับการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ-แกลบภายในเตาเผาจำลอง [13] ซึ่งมีการจ่ายอากาศที่ตำแหน่งด้านบนของเตาเผาเช่นกัน ทำให้เกิดแรงเหวี่ยงของอากาศที่เหนือและใต้แผ่นวงแหวนวอร์เทค ซึ่งบริเวณนี้จะทำหน้าที่ดักอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไม่ให้ผ่านออกจากเตาได้) จากการทดลองพบว่า m_1 เท่ากับ 2.0 m^3/min นี้สามารถทำให้เกิดการเผาไหม้ของแกลบและอากาศภายในเตาเผาไหม้ VFBC ได้ แต่ไม่สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดได้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์สังเกตได้จากขี้เถ้าที่ได้มีสีดำแดงและอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 930 °C ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) เท่ากับ 76% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.69 MW_{th}/m^3 (คำนวณโดยใช้ค่า HHV ที่ 14.5 MJ/kg) เมื่อเพิ่ม m_1 เท่ากับ 2.19 m^3/min (V_1 = 19 m/s,176%EA) พบว่าทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,038 องศาเซลเซียส η_{th} เท่ากับ 90% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.82 MW_{th}/m^3 เนื่องจากการเพิ่ม m_1 1) เป็นการเพิ่มความปั่นป่วนภายในเตาทำให้ชั้นของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงถูกทำลายทำให้ออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ดีขึ้น 2) ทำให้ความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่แบบหมุนวนเหนือและใต้วง แหวนวอร์เทคมากขึ้น ส่งผลให้ให้อนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่สามารถออกจากเตาได้ ซึ่งสังเกตได้จากขี้เถ้าที่ออกมามีขนาดเล็กละเอียดสีเทาปนดำ ซึ่งเท่ากับการเพิ่ม



รูปที่ 3 แสดงการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ทางออกและประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา

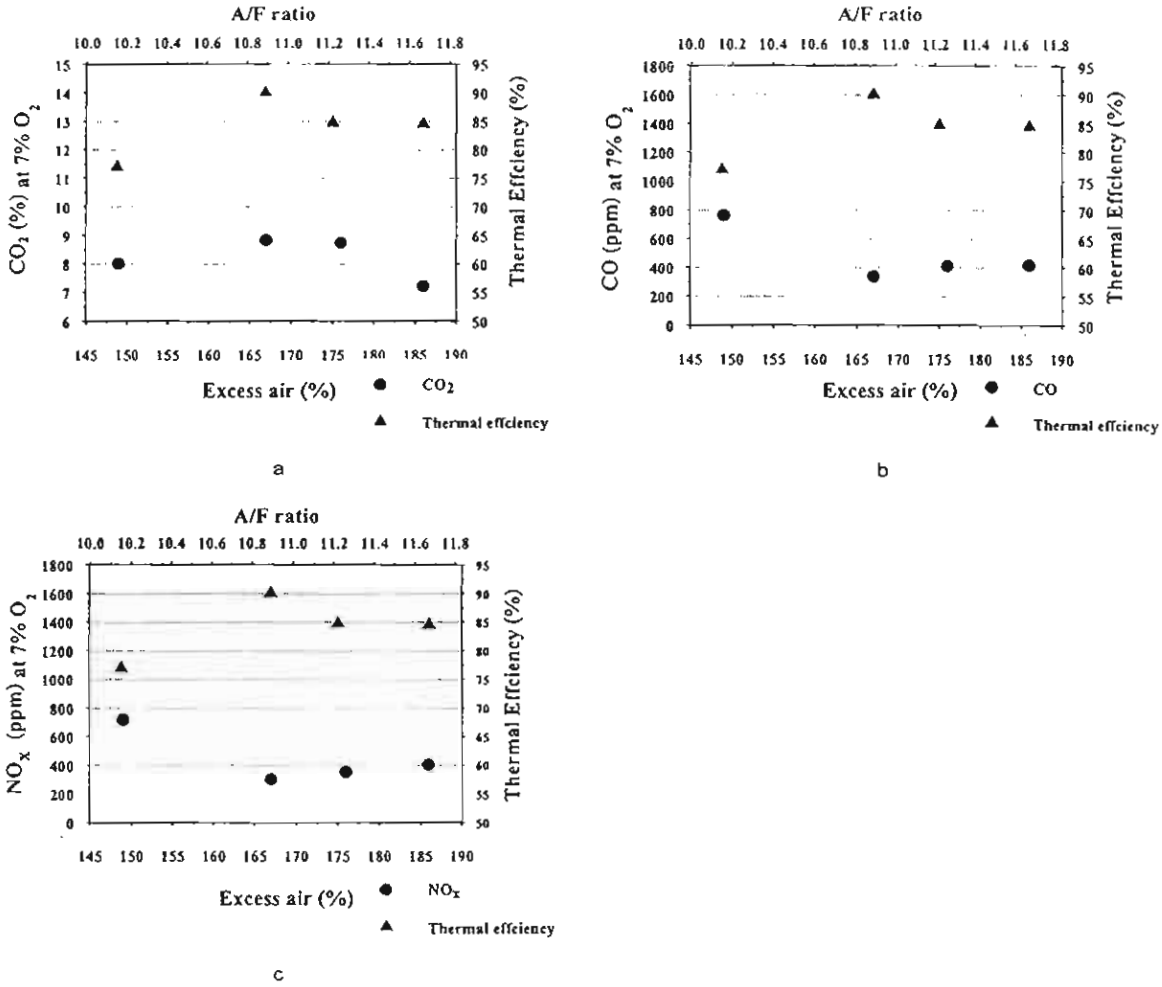
ระยะเวลาการเผาไหม้ของอนุภาคให้อยู่ภายในเตามากขึ้น ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์, เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ 2.31 m^3/min (V_1 = 19 m/s,176%EA) พบว่า m_1 ดังกล่าวนี้ยังคงสามารถดักอนุภาคเชื้อเพลิงแกลบที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไว้ได้ ซึ่งสังเกตได้จากขี้เถ้าที่ออก มามีขนาดเล็กละเอียดสีดำ แต่การใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นทำให้ต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งไปให้กับไนโตรเจนในอากาศส่วนเกินนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเหลือเท่ากับ 960 °C ทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นไม่ดีระหว่างแกลบและอากาศเกิดได้ไม่ดีทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 85% และมีค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.75 MW_{th}/m^3 เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ 2.43 m^3/min ขึ้นอีก (V_1 = 20 m/s,186%EA)พบว่าเตา VFBC ต้องสูญเสียความร้อนให้กับไนโตรเจนในอากาศส่วนเกินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ยิ่งต่ำลงซึ่งเท่ากับ 906 °C และทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 84% และได้ค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.72 MW_{th}/m^3 (คล้ายคลึงกับกรณี 176%EA)

3.2 องค์ประกอบก๊าซเสีย

จากการทดลองพบว่าปริมาณ CO_2 และ CO ที่ได้จากการเผาไหม้ (ดังในรูปที่ 5a, b) สอดคล้องกับอุณหภูมิก๊าซร้อนและประสิทธิภาพเชิงความร้อนทั้ง 4 เงื่อนไข จากผลการทดลองพบว่า

เมื่อ m_1 เท่ากับ 2.0 m^3/min (V_1 = 16 m/s,149%EA) ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนวนที่เหนือวงแหวนวอร์เทคนั้นไม่สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดได้ ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1) อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำซึ่งเท่ากับ 930 °C และได้ η_{th} เท่ากับ 76% ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ CO_2 ที่ออกมาน้อยซึ่งเท่ากับ 8% ดังแสดงในรูป 4a และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO ออกมามากซึ่งเท่ากับ 760 ppm ดังแสดงในรูป 4b (โดยปริมาณ CO_2, CO และ NOx ที่นำเสนอทั้งหมดคิดเทียบที่ปริมาณ O_2 ส่วนเกิน 7%) เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ 2.19 m^3/min (V_1 = 19 m/s, 176%EA) ทำให้ความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่แบบหมุนวนมากขึ้น เป็นการเพิ่มระยะเวลาการเผาไหม้ของอนุภาคให้มากขึ้น ทำให้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้นได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,030 °C ได้ η_{th} เท่ากับ 90% ทำให้ได้ปริมาณ CO_2 ออกมามากขึ้นซึ่งเท่ากับ 8.7% และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO ลดลงซึ่งเท่ากับ 335 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ 2.31 m^3/min (V_1 = 19 m/s,176%EA) พบว่าเป็นการใช้อากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นทำให้เตาเผาต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้กับอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นให้มี

อุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ลดลงเหลือเท่ากับ 960 °C และ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 85% ซึ่งพบว่า



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียและประสิทธิภาพเชิงความร้อนกับปริมาณอากาศส่วนเกิน

สอดคล้องกับปริมาณ CO_2 ที่ลดลงซึ่งเหลือเท่ากับ 8.6% และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้นซึ่งเท่ากับ 410 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ และเมื่อเพิ่ม m_1 ซึ่งเท่ากับ 2.43 m^3/min (V_1 = 20 m/s, 186%EA) พบว่าเตาเผา VFBC ต้องสูญเสียความร้อนให้กับอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นเพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ต่ำลงซึ่งเท่ากับ 906 °C และทำให้ η_{th} ลดลงเหลือเท่ากับ 84% และปริมาณ CO_2 ลดลงเหลือเท่ากับ 7.2% และสอดคล้องกับการที่ได้ปริมาณ CO เพิ่มขึ้นซึ่งเท่ากับ 415 ppm ดังแสดงในรูป 4a,b ตามลำดับ

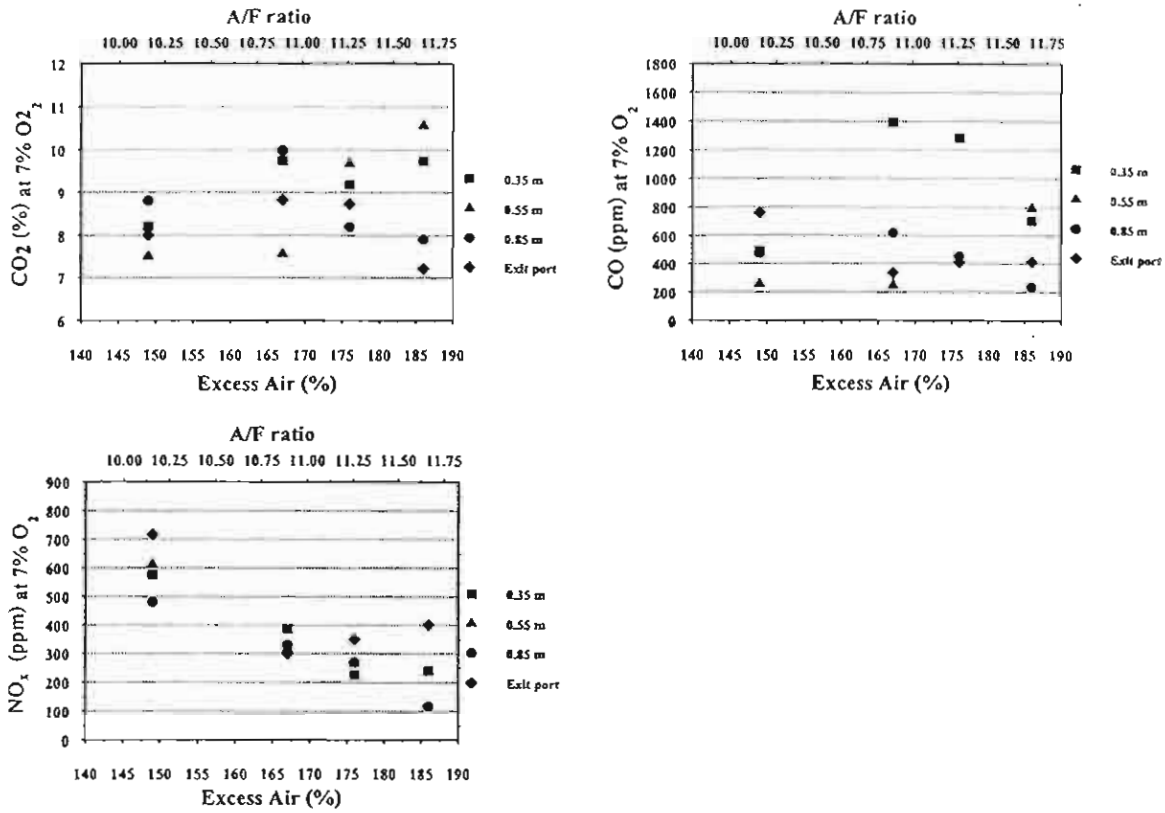
ในการศึกษาถึงปริมาณ CO_2 และ CO ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งความสูง (Y) เท่ากับ 0.35 m, 0.6 m, 0.85 m และ ที่ตำแหน่งทางออกของเตาดังแสดงในรูปที่ 5a-d พบว่าไม่สามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ CO_2, COและ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้ในแต่ระดับความสูงของเตา VFBC กับปริมาณอากาศส่วนเกินได้ แต่มีข้อสังเกตว่าที่ 165% EA และ 175% EA มีปริมาณ CO มากที่ตำแหน่งความสูง (Y) เท่ากับ 0.35 m เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ใกล้กับห้องเผาไหม้รูปกรวยหงายซึ่งเป็นที่รองรับอนุภาคเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ไม่หมดและเชื้อเพลิงส่วนนี้จะถูกอากาศส่วนที่สองที่จ่ายมาด้านล่างกรวยดังแสดงในรูป (2b) ทำให้เกิดการเผาไหม้ แต่เนื่องจากสัดส่วนเชื้อเพลิงมากกว่าปริมาณอากาศส่วนที่สอง (m_2) ที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จึงทำให้การได้ปริมาณ CO ออกมามาก

4.สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ โดยคงที่ SFR เท่ากับ 240 kg/h-m^3, m_2 เท่ากับ 0.85 m^3/min, m_3 เท่ากับ 0.76 m^3/min

1. การเผาไหม้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ 1) ช่วงก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่โดยอุณหภูมิและประสิทธิภาพเชิงความร้อนแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้โดยเฉพาะที่ 167% EA สามารถเพิ่มอุณหภูมิ 310 °C เป็น 1,000 °C ในเวลา 55 นาที 2) ช่วงเข้าสู่สภาวะคงตัว พบว่าที่ 167%EA เช่นกันมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดที่ 1,015 °C และมีการเปลี่ยนแปลงที่ ± 50 °C

2. ปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนและสมรรถนะของเตาโดยตรงโดยพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2 m^3/min (149%EA) ไม่สามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบก๊าซเสียกับปริมาณอากาศส่วนเกินที่ระดับความสูงต่าง ๆ

ไม่หมดไม่ให้ออกจากเตาเผาได้ทำได้ η_{th} ต่ำ ซึ่งเท่ากับ 76% เมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2.19 m^3/min (167%EA) ทำให้เกิดความปั่นป่วนภายในเตาทำให้ชั้นของเถ้าที่ปกคลุมเชื้อเพลิงถูกทำลาย ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ดีขึ้น และสามารถดักอนุภาคที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้ออกจากเตาเผาได้ทำได้ η_{th} สูงขึ้นซึ่งเท่ากับ 90% ได้ค่าภาระความร้อนเตาเท่ากับ 0.82 MW_{th}/m^3 แต่ถ้าจ่ายปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเพิ่มมากขึ้นอีก (176, 186 %EA) จะทำให้เตาต้องสูญเสียความร้อนส่วนหนึ่งให้กับปริมาณอากาศส่วนเกินที่เกินความจำเป็นในการเผาไหม้ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้และη_{th} ลดลงซึ่งเท่ากับ 85% และ 86% ตามลำดับ

3. ปริมาณ CO_2 และ CO สอดคล้องกับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ และภาระทางความร้อน โดยพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่หนึ่งเท่ากับ 2.19 m^3/min (167%EA) ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณ CO_2 สูงสุดเท่ากับ 8.7%, CO ออกมาต่ำสุดเท่ากับ 335 ppm และ NO_x เท่ากับ 300 ppm ที่อุณหภูมิทางออกเท่ากับ 1,030 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและคุณวิบูรณ์ เทเพนทร์ สถาบันวิจัยเกษตรวิศวกรรม กลุ่มงานวิจัยวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวที่กรุณาให้คำแนะนำต่องานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] A.k. Gupta, Lilley D.G and Syred N. "Swirl Flows. Abacus Press", Tunbridge Wells, England, 1984

[2] R. Singh, Maheshwari R.C and Ojha T.P. "Development of a Husk Fired Furnace", Journal of Agricultural Engineering Research, 1980, Vol,25, pp.119-120.

[3] J.A. Tumambig. "Testing and Evaluation of Rice Hull-Fed Furnace for Grain Drying", National Post Harvest Institute for Research and Extension, 1984, pp.197-214

[4] S. Soponronnarit, Swasdisevi T, Wetchacama S, Shujinda A and Srisawat B. "Cyclone Rice Husk Furnace and Its Application on Paddy Drying", International Energy Journal, 2000, Vol 1, No 2, pp.67-75

[5] E. Natarajan, Nordin A and Rao A.N. "Overview of Combustion and Gasification of Rice Husk in Fluidized Bed Reactor", Biomass and Bioenergy, Vol 14, No 5/6, pp.533-546

[6] J. Werther, Saenger M , Hartge E.U , Ogada T and Siagi Z. "Combustion of Agricaltural residues", Progress in Energy and Combustion Science, 2000,Vol 26, No1, pp.1-27

[7] L. Armesto, Bahillo A, Veijonen k, Cabanillas A and Otero J.

"Combustion Behavior of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed", Biomass and Bioenergy, 2002, Vol 23, No 3, pp 171-179

[8] T.R. Rao and Bheemarasetti J.V. Ram. "Minimum Fluidization Velocities of Mixtures of Biomass and Sands", Energy, 2000, Vol 26, No 6, pp.633-644

[9] G. Yang and Nieh S. "Particle Flow Pattern in the Freeboard of a Vortexing Fluidized Bed", Powder Technology, 1987, Vol 50, pp.121-131

[10] G.Yang and Nieh S. "On the Suspension Layers in the Freeboard of Vortexing Fluidized Beds", Powder Technology, 1989, Vol 57, pp.171-179

[11] S. Nigh, Yang G, Zhu A.Q and Zhao C.S. "Measurements of Gas-Particle Flows and Elutriation of an 18 i.d. Cold Vortexing Fluidized-Bed Combustor Model", Powder Technology, 1992, Vol 69, pp. 139-146

[12] S. Nieh and Zhang J. "Swirling, Reacting, Turbulent Gas-Particle Flow in a Vortex Combustor", Powder Technology, 2000, Vol 122, pp.70-78

[13] T. Madhiyanon, Piriyarungroj N, Nathakarannakule A and Soponronnarit S. "A Study on Air-Rice Husk Flow Behavior Cold Model. In Proc", the Technical Conference of the Thai Society of Agricultural Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 13th-14th March 2003, pp.332-343

[14] Patent Number: 4,881,476. "Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation"

[15] Patent Number: 4,867,079. "Combustor with Multistage Internal Vortices"

[16] Becker et al, Patent Number: 4,881,476. "Cyclone Reactor with Internal Separation and Axial Recirculation"

[17] Shang et al, Patent Number: 4,867,079. "Combustor with Multistage Internal Vortices"

[18] T. Madhiyanon, Piriyarungroj N, Nathakarannakule A and Soponronnarit S. "Development of a Vortexing-Fluidized bed Combustor for Rice Husk Fuel, The 17th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand, 15th-17th October 2003, 113(IC033)

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18
18-20 ตุลาคม 2547 จังหวัด-ขอนแก่น

เตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด : Part II ผลกระทบของอากาศส่วนที่สองต่อสมรรถนะเตา

VORTEXING-FLUIDIZED BED COMBUSTOR (VFBC) : Part II EFFECTS OF SECONDARY AIR ON PERFORMANCE OF COMBUSTOR

ฐานิตย์ เมธิยานนท์[1] นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์[2] พีระวัตร์ ทองนอก[3] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
[1,2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
โทร 02-9883666 ext. 244 หรือ 09-8160456 E-mail: thanid_m@yahoo.com[1]
[3]นักศึกษา ป. โท [4]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10400 โทร 02-4708693-9 ext. 111 E-mail: somchart.sop@kmutt.ac.th[4]

Thanid madhiyanon[1] Niwat Piriyarungroj[2]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Mahanakorn University
51 Cheum-Sampan Road, Nong Chok, Bangkok 10530
Peerawat Thongnork[3] Somchart Soponronnarit[4]
Faculty of Energy and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi
91 Prachauthit Road, Bangmod, Thung Kharu District, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

จากการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งใน Part I พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) จะแปรผันตรงกับอากาศส่วนที่หนึ่ง แต่เมื่ออากาศส่วนที่หนึ่งมีค่ามากเกินไป η_{th} ก็จะลดลง ซึ่งโครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่องโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่สอง (ซึ่งเป็นอากาศส่วนที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เซชัน) ต่อสมรรถนะเตาเผาไหม้วอร์เทคฟลูอิไดซ์เบด โดยปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองซึ่งทำให้ปริมาณอากาศส่วนเกินเปลี่ยนไป แต่คงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ (SFR) อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง ซึ่งจ่ายมาพร้อมกับเชื้อเพลิงในแนวสัมผัสที่ตำแหน่งด้านบนของเตา และอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สามที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งที่ตำแหน่งต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทค โดยค่า SFR เท่ากับ 240 kg/h-m^3 จากการทดลองพบว่าปริมาณอากาศส่วนที่สองมีผลต่อสมรรถนะของเตาในมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่หนึ่งใน Part I โดยพบว่า η_{th} จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณอากาศส่วนเกินโดยการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สอง แต่หากปริมาณอากาศส่วนที่สองมีค่ามากเกินจะทำให้ค่า η_{th} ลดต่ำลง โดยที่ปริมาณอากาศส่วนเกิน 164% พบว่าเตามีสมรรถนะสูงที่สุด โดยทำให้ได้อุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาสูงสุดเท่ากับ 1,070 องศาเซลเซียส η_{th} เท่ากับ 93% ได้ค่าภาระความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.84 MW$_{th}$ /m^3 ปริมาณก๊าซ CO_2, CO และ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้เท่ากับ 8.47%, 298 และ 4.93 ppm (ที่ O_2 ส่วนเกินเท่ากับ 7%)

Abstract

In part I, a study which has been investigated the effect of primary air concluded that thermal efficiency was directly proportioned to amount of primary air but if primary air was provided too much, thermal efficiency would be dropped. In this part, the experiment were farther studied to investigate the influence of secondary air (fluidization air) on performance of VFBC by change amount of secondary air while keeping specific fuel rate (SFR), primary air and tertiary air unchanged. SFR was held constant at 240 kg/h-m^3. The similar trends of experimental results as that of obtaining from part I were also observed in this study, that thermal efficiency increased as an increase of excess air by increasing amount of secondary air but if amount of secondary air was further increased beyond a proper value, Thermal efficiency would be dropped. At excess air of 164%, VFBC perform very well, with maximum exit gas temperature of 1,070 °C, thermal efficiency of 93% and thermal load of combustor of 0.84 MW$_{th}$/m^3 The amount of emission gases, i.e CO_2, CO and NO_x determined base on excess O_2 of 7% were 8.47%, 298 ppm and 4.93 ppm, respectively.

1.บทนำ

จากสภาวะในปัจจุบันน้ำมันมีราคาสูงขึ้นมากในสภาวะเศรษฐกิจของไทยในเวลานี้ อันมีสาเหตุมาจากความต้องการใช้น้ำมันมากขึ้น จึงทำให้ธุรกิจต่างๆ ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงต่างๆ เริ่มหาพลังงานชนิดอื่นมาทดแทนน้ำมัน โดยได้มีการใช้เชื้อเพลิงประเภทชีวมวลที่เหลือใช้จากโรงงานต่างๆมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล แกลบเป็นเชื้อเพลิงประเภทชีวมวลอีกอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแทนน้ำมันได้ โดยปัจจุบันเตาเผาไหม้ที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง คือ เตาเผาไหม้แบบไซโคลนและเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด ซึ่งเตาทั้งสองประเภทนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่างกัน คือเตาไซโคลนจะอาศัยหลักการไหลวนของอากาศซึ่งทำให้อนุภาคภายในเตาไม่หลุดออกนอกเตาได้ ความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางจึงมีค่าน้อย (H/D = 2.5) แต่มีข้อเสียคือประสิทธิภาพการเผาไหม้ (65-80%) และค่าภาระความร้อนเตา (0.25MW/m^3) ค่อนข้างต่ำ [1, 2, 3, 4] ส่วนเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบด [5, 6, 7] จะออกแบบให้อนุภาคภายในเตาเผาไหม้เกิดฟลูอิไดเซชั่น ทำให้เกิดการเผาไหม้ทั่วทั้งบริเวณเตา ส่งผลให้ได้ค่าภาระทางความร้อนเตาเผาไหม้ (1 MW/m^3) และประสิทธิภาพการเผาไหม้ (80-95%) สูง แต่มีข้อเสียคือ เมื่อนำหลักการนี้ไปใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำและรูปร่างไม่กลม จะทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดยาก ดังนั้นจำเป็นต้องผสมวัสดุเฉื่อยเช่น ทราย ซิลิกา อลูมินา ลงไปในเตาเผาไหม้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม [5, 8] เพื่อช่วยให้เกิดฟลูอิไดซ์เบดได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามการผสมวัสดุเฉื่อยจะทำให้ความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้มีค่าสูง ทำให้การต้องสูญเสียพลังงานมากเพราะต้องใช้พัดลมที่มีขนาดใหญ่ ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ ความสูงของเตาเพราะเตาเผาไหม้ฟลูอิไดซ์เบดจำเป็นต้องออกแบบให้เตาสูงเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคภายในเตาหลุดลอยออกนอกเตาเผาไหม้ โดยสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาประมาณ 13 ทำให้ได้มีการพัฒนาเพื่อลดความสูงของเตาลงโดยการฉีดอากาศส่วนที่สองเข้าไปในแนวสัมผัสบริเวณ free board [9, 10, 11] เพื่อตักอนุภาคภายในเตาเผาไหม้ไม่ให้หลุดออกนอกเตา พบว่าสามารถลดความสูงของเตาเผาไหม้ลงได้ และมีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาคและก๊าซ [12] เมื่อมีการฉีดอากาศส่วนที่สองในแนวสัมผัส พบว่า บริเวณใกล้ผนังเตาก๊าซและอนุภาคจะมีไหลลงด้านล่างเตาเผาไหม้ ทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในเตาส่งผลถึงเวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาเผาไหม้นานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้านำจุดเด่นของเตาเผาไหม้ ทั้งสองแบบมารวมกันจะทำให้มีค่าภาระความร้อน(MW_{th}/m^3) และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง แต่ในขณะเดียวกันมีค่าสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำ ทำให้ติดตั้งในโรงงานได้สะดวกและ ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ โดยเมื่อนำจุดเด่นของเตาทั้งสองมารวมกันจะได้เป็นเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดขึ้นมา โดยผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดจำ ลอง [13] เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลของอากาศและแกลบ พบว่าเตาเผาวอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดจำลองสามารถรวมคุณลักษณะเด่นของการไหลแบบฟลูอิไดซ์เบดและแบบวอร์เทคเข้าไว้ด้วยกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาออกแบบเตาเผา VFBC โดย เตาเผา VFBC จะแบ่งอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ออกเป็นสามส่วนคืออากาศส่วนที่หนึ่ง (Primary air) เป็นอากาศที่พาเชื้อเพลิงแกลบเข้าสู่เตาเผาไหม้โดยอากาศส่วนที่หนึ่งและแกลบนี้จะถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ตำแหน่งด้านบนของเตา เพื่อให้เกิดการเผาไหม้แบบวอร์เทค อากาศส่วนที่สอง (Secondary air) เป็นอากาศที่จ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาเพื่อทำให้เชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบด และอากาศส่วนที่สาม (Tertiary air) เป็นอากาศที่ถูกจ่ายในแนวสัมผัสตั้งฉากกับรัศมีของเตาที่ต่ำกว่าวงแหวนวอร์เทคโดยวงแหวนวอร์เทคจะคั่นระหว่างห้องเผาไหม้ทั้งสอง เพื่อเพิ่มการหมุนวนของอากาศและเชื้อเพลิงเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคของเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ไม่ให้หลุดออกนอกเตา ส่งผลให้เวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตามีมากขึ้น โดยสัดส่วนของเตาและอุปกรณ์ต่างๆแสดงในรูปที่ 1(a) และ 2 และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ[18] โดยศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สามที่มีผลต่อการเผาไหม้ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา จะขึ้นกับปริมาณอากาศส่วนเกินเป็นหลัก โดยปริมาณอากาศส่วนที่สามจะไม่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพเชิงความร้องของเตาตราบที่ปริมาณอากาศส่วนเกินรวมที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งหมดเหมาะสม แต่การจ่ายอากาศส่วนที่สามจะมีผลต่อการควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 1000 องศาเซลเซียส โดยโครงงานวิจัยนี้เป็นโครงงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะทำการศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผา VFBC

2.วิธีการทดลอง

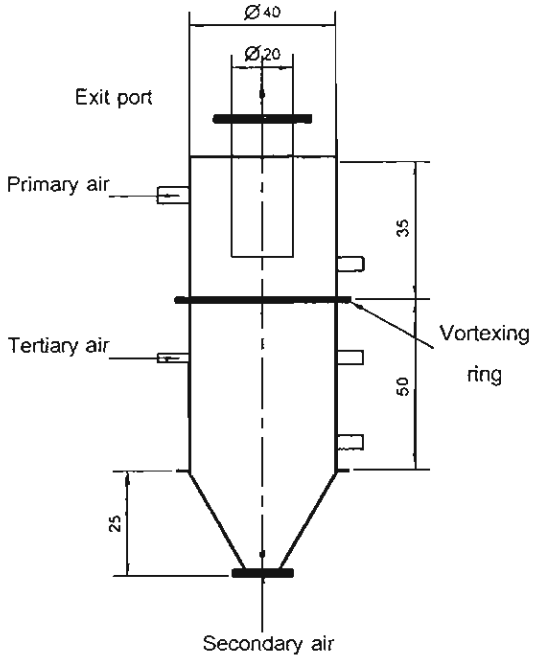
2.1การศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อการเผาไหม้ภายในเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการติดเตาเผาโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงและอุ่นเตาจนอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ประมาณ 600 °C จึงเริ่มทำการทดลอง

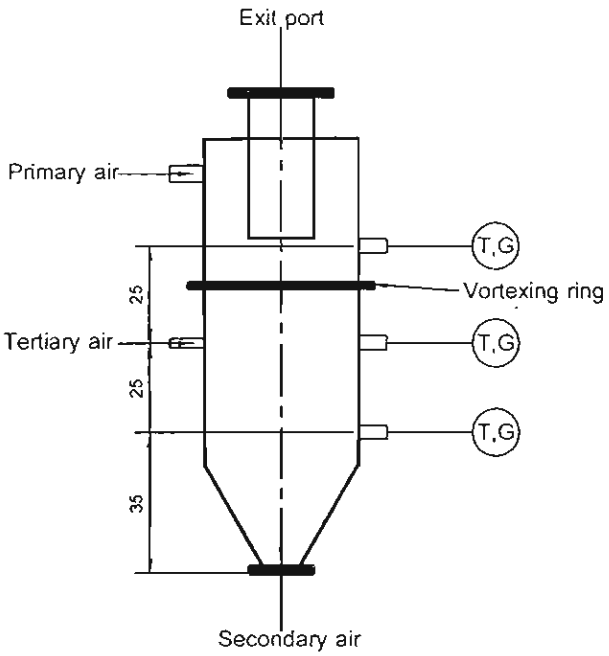
1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและแกลบให้สอดคล้องกับเงื่อนที่ 1 ในตารางที่ 1 ซึ่งในการทดลองจะใช้พัดลมอัดอากาศ 2 ตัว ตัวละ 2.2 kW เป็นต้นกำลังในการทำให้เกิดอัตราการไหลของอากาศ โดยใช้ออริฟิสมิเตอร์ในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสามส่วน ซึ่งออริฟิสมิเตอร์ทั้ง 3 ชุดได้ถูกปรับเทียบจาก Hot wire ที่มีค่าความคลาดเคลื่อน 3% ของค่าที่วัดได้และในการควบคุมอัตราการป้อนแกลบจะใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งเป็นต้นกำลังในการขับสกรูที่ใช้ในการป้อนแกลบ

2. บันทึกอุณหภูมิที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC ทุก 5 นาที จนครบ 120 นาที โดยใช้ Thermocouple type K และใช้ อุปกรณ์ชี้วัดซึ่งมีความละเอียดในหลักหน่วยในการแสดงผล

3. บันทึกองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้โดยใช้เครื่อง Gas Analyzer รุ่น Testo 350 XL ทั้งหมด 4 ตำแหน่งคือ 1) ที่ Y_1 = 0.35 m 2) ที่ Y_2 = 0.55 m, 3) ที่ Y_3 = 0.85 m และ 4) ที่ตำแหน่งท่อทางออกเตาเผา VFBC (เมื่อ Y คือ ความสูงของเตาเผา VFBC โดยความสูงของเตาจะเริ่มวัดจากตำแหน่งด้านล่างสุดของเตาที่มีลักษณะเป็นทรงกรวยหงายดังแสดงในรูปที่ 1(b)

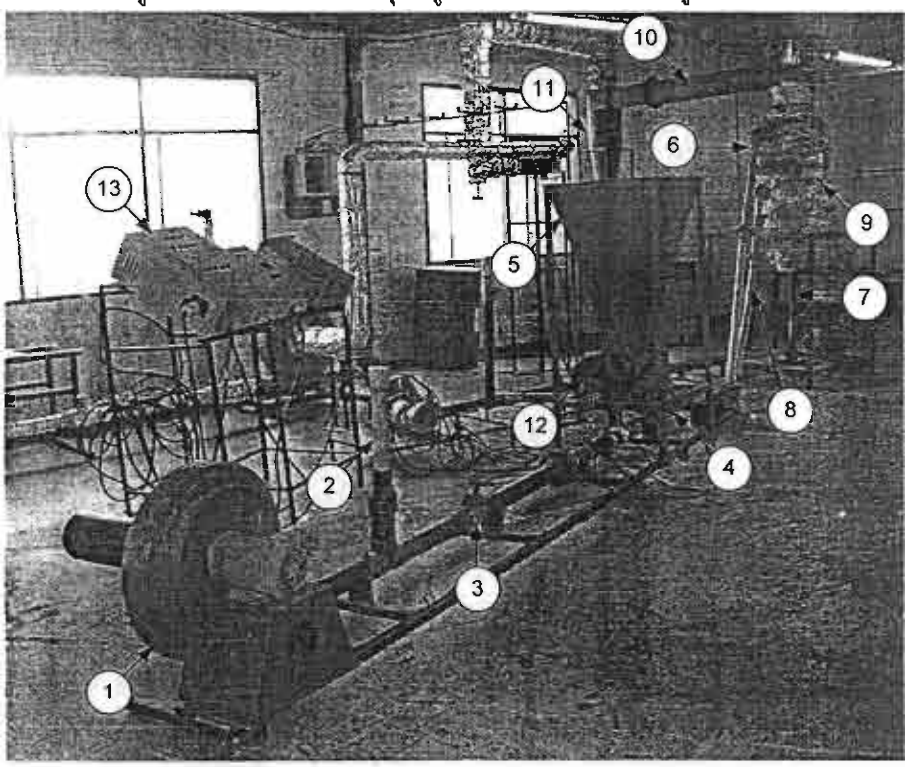


(a) ขนาดของเตาวอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด



(b) ตำแหน่งวัดอุณหภูมิ (T) และก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (G)

รูปที่ 1 ขนาดและตำแหน่งวัดอุณหภูมิของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิไดซ์เบด

1. Blowers	2. Air drain port	3. Valves	4. Injector
5. Hopper	6. Primary air	7. Secondary air	8. Tertiary air
9. VFBC	10. Exit port	11. Cyclone	12. Feeding system
13. Temperator Control			

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองที่ศึกษาถึงปริมาณอากาศส่วนที่สองที่มีผลต่อสมรรถนะเตา VFBC

Run No.	Specific Rice husk feed rate (kg/h-m^3)	Primary air		Secondary air		Thirdly air		Excess air (%)
		Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	Flow rate (m^3/min)	Velocity (m/s)	
1	240	2.34	17	0.61	1.25	0.37	12.34	117
2	240	2.34	17	0.73	1.5	0.37	12.34	125
3	240	2.34	17	0.97	2	0.37	12.34	140
4	240	2.34	17	1.23	2.52	0.37	12.34	157
5	240	2.34	17	0.66	1.35	0.76	25	145
6	240	2.34	17	0.93	1.92	0.76	25	164
7	240	2.34	17	1.22	2.5	0.76	25	182

4.ทำการทดลองซ้ำข้อ 2-3 โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของแกลบและอากาศให้สอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 2-7 ในตารางที่ 1

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th}) ของเตานิยามได้ด้วยสมการดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a\left(c_{p,g}T_e - c_{p,a}T_i\right)}{\dot{m}_f HHV}$$

เมื่อ

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$\dot{m}_f$ = อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบ, kg/s

$c_{p,g}$, $c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนของแก๊สเสียและอากาศที่เข้าเผาไหม้

HHV = ค่าความร้อนสูงของแกลบ = 14.5 MJ/kg

e = ที่ตำแหน่งทางออกของ VFBC

i = ที่ตำแหน่งทางเข้าของ VFBC

โดยกำหนดให้ $c_{p,g}$ ที่ตำแหน่งทางออก เท่ากับ $c_{p,a}$ ที่มีอุณหภูมิก๊าซร้อน

สมการที่ (1) อยู่บนสมมติฐานที่ว่า $\dot{m}_a >> \dot{m}_f$ ดังนั้น มวลของก๊าซจึงประมาณเท่ากับมวลของอากาศที่เข้าเผาไหม้

3.ผลการทดลอง

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอากาศส่วนที่ 2 ต่อสมรรถนะเตาเผาไหม้ โดยเงื่อนไขการทดลองจะปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สอง (m_2) โดยแสดงเงื่อนไขต่างๆ ในตารางที่ 1 ซึ่งจะแบ่งเงื่อนไขการทดลองเป็น 2 ช่วงหลักๆ คือ 1) คงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงจำเพาะเท่ากับ (SFR) 240 kg/h-m^3 คงที่อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่งและสามเท่ากับ 2.34 และ 0.37 m^3/min ตามลำดับ และปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่สองให้ได้อากาศส่วนเกินทั้งหมดเท่ากับ 117% 125% 140% และ157% ตามลำดับ 2) กำหนดให้คงที่ SFR และ m_1 เท่ากับเงื่อนไขที่ 1 แต่คงที่อัตราการไหลส่วนที่สาม (m_3) เท่ากับ 0.76 m^3/min (V_3 = 25 m/s) และปรับอัตราการไหลส่วนที่สองให้ได้อากาศส่วนเกินดังนี้ คือ 145%, 164% และ 182% ตามลำดับ

3.1 สมรรถนะเตาเผาไหม้ VFBC เมื่อคงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบจำเพาะ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่หนึ่ง และ อัตราการไหลของอากาศส่วนที่สาม (m_3 = 0.37 m^3/min)

3.1.1 อุณหภูมิการเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน และค่าภาระความร้อนเตา

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าสามารถแบ่งช่วงของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกเป็น 2 ช่วง คือ 1) ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 5 ถึง 60 นาที) พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ทั้ง 4 เงื่อนไข (ดังแสดงในตารางที่ 1) จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 3 เส้นกราฟ a-d 2) ช่วงอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางออกของเตาเข้าสู่สภาวะคงที่ (ช่วงเวลา 65 ถึง 125 นาที) เมื่ออัตราการไหลอากาศส่วนที่สอง (m_2) เท่ากับ 0.61 m^3/min (V_2=1.25 m/s, 117%EA) จากการทดลองพบว่าอากาศส่วนที่สองซึ่งเป็นอากาศที่ถูกจ่ายที่ตำแหน่งด้านล่างของเตาที่มีลักษณะเป็นรูปกรวยหงาย ทำให้เชื้อเพลิงแกลบเกิดพฤติกรรมการเผาไหม้แบบฟลูอิไดซ์เบดซึ่งสังเกตได้จากการมองผ่านช่องมอง (ซึ่งคล้ายคลึงกับกรณีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศ-แกลบภายในเตาเผาจำลอง [13] ซึ่งมีการจ่ายอากาศส่วนที่สองด้านล่างเตาเผาไหม้จำลองทำให้แกลบเกิดโพรงอากาศบริเวณตรงกลางเบดส่งผลให้อนุภาคที่อยู่ล่างสุดจะลอยไปกับอากาศ โดยอนุภาคที่อยู่รอบๆโพรงอากาศจะเคลื่อนตัวลงสู่ด้านล่างของเบดแทนที่แกลบที่ถูกพาไปกับอากาศ ทำให้แกลบจะเคลื่อนที่เป็นอิสระ) ที่ m_2 เท่ากับ 0.61 m^3/min นี้ ไม่สามารถทำให้เกิดการกระจายตัวของแกลบไม่มากพอ ที่ทำให้การแพร่ของออกซิเจนเพื่อไปทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงได้ดี จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์