freeze dried flour had a little higher sorption capacity than vacuum and hot air dried flours. At the high water activity (≥0.7), moisture will fill up the pores inside the material structure (Van den Berg, 1986). The differences in pores sizes and number of pores therefore resulted in differences in the amount of water entrapped in the pores. The greater total pore volume of durian flour produced by freeze drying (see Table 1) was the reason why freeze dried flour had the higher adsorption potential than the vacuum and air dried flours. Similar trend of the sorption curve was found for the adsorption isotherm at 60°C.

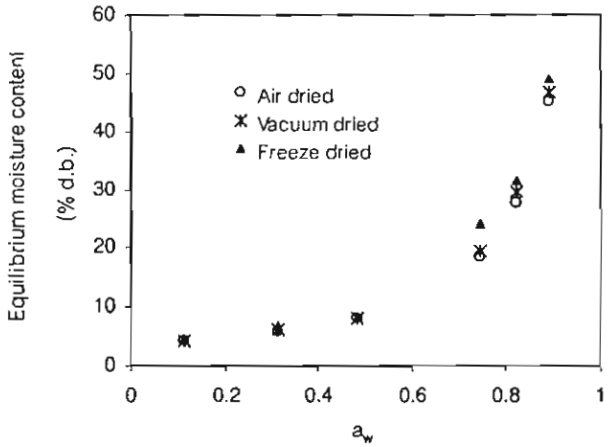


Fig. 1 Adsorption isotherms at 40°C of durian flours processed by different drying methods

Effect of temperature on adsorption isotherm of air dried durian flour is shown in Fig. 2. It was found that the equilibrium moisture content decreased as temperature increased. This can be explained by the fact that at elevated temperature, water molecules are activated to the higher energy levels, causing them to become less stable and break away from the water binding sites of the food material, thus decreasing the equilibrium moisture content (Palinpane, & Driscoll, 1992; Mazza & Lemaguer, 1980; Mohsenin, 1986; Medeiros et al., 2005; McLaughlin & Magee, 1998). Influence of temperature on adsorption isotherms of vacuum and freeze dried durian flours were as the same as that of air dried flour.

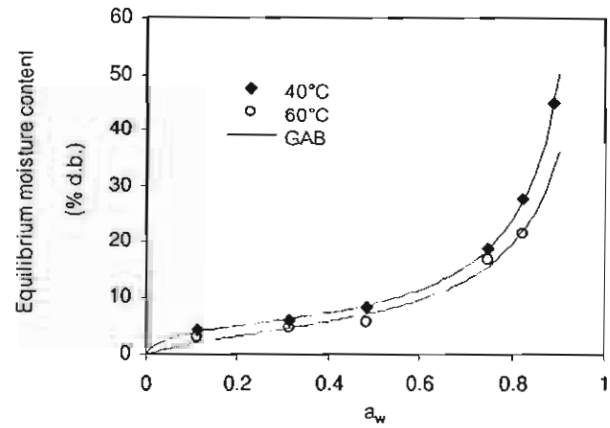


Fig. 2 Adsorption isotherms at temperatures of 40 and 60°C of air dried durian powder.

2. Model

Comparison performances of the two models (see Table 1), the GAB model was observed to provide the better description of the flour isotherms as expressed by higher values of R^2 and lower values RMSE and χ^2.

Table 1 Estimated parameters and statistical data of the BET and GAB models fitted to the adsorption sorption data for durian flours

Model	Constant	Freeze dried flour		Vacuum dried flour		Air dried flour	
		40°C	60°C	40°C	60°C	40°C	60°C
BET	X_m	5.530	4.768	5.184	4.223	4.964	3.983
	C	17.439	8.377	12.946	8.603	13.140	9.215
	R^2	0.993	0.958	0.999	0.977	0.999	0.984
	RMSE	1.370	1.821	0.584	1.184	0.558	1.487
	χ^2	0.062	0.019	-0.112	-0.007	-0.157	0.714
GAB	X_m	6.244	5.976	5.047	5.639	4.611	4.437
	C	7.965	1.329	15.757	3.136	24.054	5.905
	K	0.983	0.922	1.004	0.941	1.010	0.978
	R^2	0.995	0.969	0.999	0.979	0.999	0.985
	RMSE	1.168	1.562	0.560	1.127	0.322	0.900
	χ^2	-0.041	0.905	-0.113	0.290	-0.089	0.036

3. Pore characteristics

The variation in pore characteristics i.e., porosity, average pore size, pore size distribution, and specific surface area has significant effects on the mechanical, textural, and other quality characteristics of the dried foods (Karathanos, Anglea, & Karel, 1993). Influence of drying process on pore characteristics of durian powder is presented in Table 2. The freeze dried sample showed the highest specific surface area and pore volume followed by vacuum and then air dried flours. This may be the explanation of the higher hygroscopic behavior of freeze dried flour than vacuum and air dried flour as earlier reported. However, it was found from Table 2 that the average pore size of freeze dried flour was smaller than those of vacuum and hot air dried flours. Due to possessing greater pore volume but smaller pore size, freeze dried sample was likely to have more number of pore than the other two dried samples. This is probably because for freeze drying, with the drying temperature below or close to T_g, the material is in the glassy state. Shrinkage is thus negligible resulting in porous structure. In hot air drying, on the other hand, with drying temperature above T_g, the material is in the rubbery state, and substantial shrinkage occurs causing lower level of pore formation. In the case of vacuum drying, a puffing effect is provided due to lower environmental pressure, which counterbalances the pore pressure, thus allowing the formation of more pores, when compared to hot air drying (Rahman, 2001).

Table 2 Pore characteristics of durian flours dried by various processing

Sample	Specific surface area (m^2/g)	Specific pore volume (cc/g)	Average pore size (Å)
Freeze dried	5.593	17.63×10^{-3}	1.261×10^{2}
Vacuum dried	2.249	9.986×10^{-3}	1.776×10^{2}
Air dried	1.379	8.065×10^{-3}	2.340×10^{2}

Pore size distribution curves of durian flours prepared by the three drying methods are shown in Figs. 3-5.

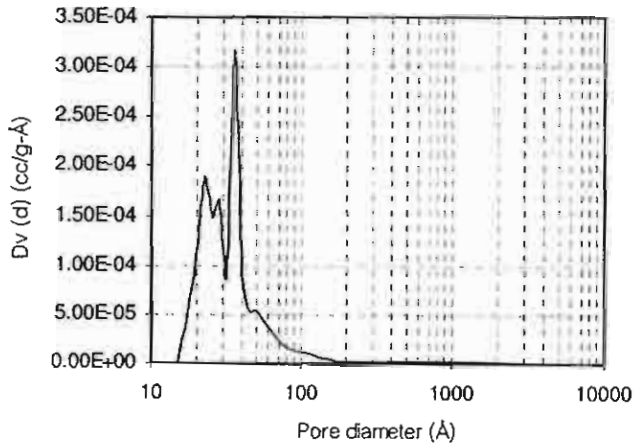


Fig 3. Pore size distribution of durian flours obtained by freeze drying

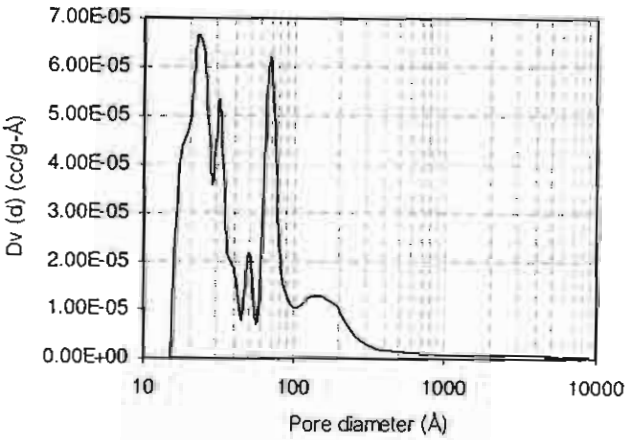


Fig 4. Pore size distribution of durian flours obtained by vacuum drying

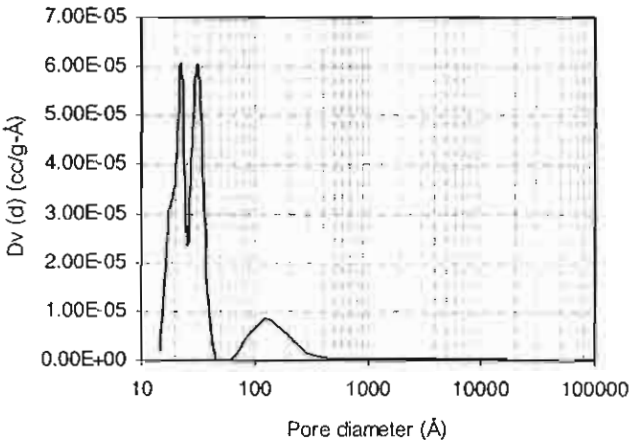


Fig 5. Pore size distribution of durian flours obtained by air drying

Completely different pore size distribution curves were observed for dried flour produced by different drying methods. Compared to vacuum and air drying, freeze drying provided the greater number of both micropore volume and mesopore volume of the product. Replacing air drying by vacuum drying resulted in significant increase of mesopore volume, while the micropore volume remained nearly the same.

Conclusions

Adsorption isotherms of durian flours obtained by freeze, vacuum and air drying were investigated. The isotherms can be adequately described by the GAB model. At high relative humidity, freeze dried sample was found to adsorb greater amount of moisture content than vacuum and air dried samples. The study of pores developed in the flour indicated that flour prepared by freeze drying had higher specific surface area and pore volume than the flour prepared by vacuum and air drying.

Acknowledgements

Acknowledgements are given to the Thailand Research Fund for financial support.

References

Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M. & Magee, T. R. A. (2004). Water sorption isotherms of starch powders part 1: mathematical description of experimental data. Journal of Food Engineering, 61, 297-307.

Brunauer, S., Emmett, P.H. & Teller, E. (1983). Adsorption of gases in mulitmolecular layers. Journal of the American Chemical Society seed, 60, 309-319.

Foster, K. D., Bronlund, J. E. & Paterson, A. H. J. (2005). The prediction of moisture sorption isotherms for dairy powders. International Dairy Journal, 15, 411-418.

Karathanos, V. T., Anglea, S. A. & Karel, M. (1993). Collapse of structure during drying of celery. Drying Technology, 11, 1005-1023.

Labuza, T. P. (1968). Sorption phenomena in foods. Journal of Food Technology, 22, 15-24.

Mazza, G. & Lemaguer, M. (1980). Dehydration of onion: some theoretical and practical consideration. Journal of Food Technology, 15, 181-194.

Medeiros, M. L., Bartolomeu Ayrosa, A. M. I., Moraes Pitombo, R. N. D. & Silva Lannes, S. C. D. (2006). Sorption isotherms of cocoa and cupuassu products. Journal of Food Engineering, 73, 402-406.

McLaughlin, C. P. & Magee, T. R. A. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. Journal of Food Engineering, 35, 267-280.

Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials, Gordon & Breach, New York.

Palipane, K. B. & Driscoll, R. H. (1992). Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. Journal of Food Engineering, 18, 63-76.

Rahman, M. S. (2001). Towards prediction of porosity in foods during drying: a brief review. Drying Technology, 19, 3-15.

Spiess, W. E. L and Wolf, W. (1983). The results of the COST 90 project on water activity. In Physical properties of foods, Jowitt, R. et al. (Eds.), Applied Science Publishers, London, 65-91.

Teunou, E., & Vasseur, J. (1996). Time flow function: means to estimate water effect on dissoluble bulk materials flow. Powder Handing and Processing, 8, 111-116.

Tsami, E., Maroulis, Z. B., Marinos-Kouris, D. & Saravacos, G. D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. International Journal of Food Science and Technology, 25, 350-359.

van den Berg, C. and Bruin, S. (1981). Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In Water activity: influences on food quality, Rockland, L. B. and Stewart, G. F. (Eds.), Academic Press, New York, 1-61.

van den Berg, C. (1986). Water activity. In concentration and drying of foods, MacCarthy, D. (Ed.), Elsevier Applied Science Publishers, New York, 11-36.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

การอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

Superheated Steam Pork Meat Drying

พลสันต์ วงษ์ศรี[1]*, ธนิต สวัสดิ์เสวี[2], สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[3] และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2]
Pholsan Wongsri[1], Thanit Swasdsevi[2], Somkiat Prachayawarakon[3] and Somchart Soponronnarit[2]

ABSTRACT

Nowsday, instant food was very popular sine it was easy to consume but instant food in the local market was not enough nutrient especially the protein from meat. Since the objective of this research were to investigate drying kinetics and physical properties of pork meat with superheated steam at temperatures of 130-150°C. The sirloin pork meat was a malerial used for drying. It was cut parallel (longitudinal section) to the fiber direction. The physical properties of pork meat in case of untreated pork meat and salt treated pork meat (20g/kg NaCl) were also investigated. The initial moisture content of untreated pork meat was approximately 270-284% d.b. and that of salt treated pork meat (20g/kg NaCl) was approximately 245-257% d.b. The samples were dried until the final moisture content reached 11% d.b. was reached. The experimental results revealed that higher drying temperatures resulted in the faster decrease of moisture content and higher degree of shrinkage. Considering effect of salt treatment, it was observed that the treated samples were more reddish and shrinking than the untreated samples. However, the treated samples possessed the higher rehydration potential and hardness value than the untreated samples.

Key words: Hardness, Pork Meat, Rehydration, Shrinkage, Superheated Steam

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันอาหารกึ่งสำเร็จรูปได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีความสะดวกในการบริโภค แต่อาหารกึ่งสำเร็จรูปที่มีขายในท้องตลาดยังมีคุณค่าทางอาหารไม่เพียงพอโดยเฉพาะโปรตีนจากเนื้อสัตว์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งและสมบัติทางกายภาพของเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130-150°C เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับอาหารกึ่งสำเร็จรูป โดยใช้เนื้อหมูสันนอก (Sirloin) ที่ทำการหั่นในทิศทางตามเส้นใย (Longitudinal Section)โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของเนื้อหมูในกรณีที่ไม่หมักเกลือและกรณีเนื้อหมูที่หมักเกลือ โดยเนื้อหมูในกรณีที่ไม่หมักเกลือมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 270-284% d.b. และเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 245-257% d.b. ทำการอบแห้งเนื้อหมูจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 11% d.b. จากผลการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่า, เกิดการหดตัวมากกว่า และคืนตัวได้น้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ

[1]นักศึกษา, [2]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ, [3]อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[1]Graduate student, [2]School of Energy and Materials, [3]Faculty of Engineering,King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140 *Corresponding author. Tel.: 0-24708695 ext. 112; fax: 0-24708663; E-mail address: Pholsan_w@hotmail.com

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเนื้อหมูกรณีหมักเกลือกับกรณีไม่หมักเกลือพบว่า เนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าเนื้อหมูที่หมักเกลือ ส่วนด้านคุณภาพพบว่าเนื้อหมูที่หมักเกลือจะมีสีแดงเข้มกว่า, มีการหดตัวมากกว่า, คืนตัวน้อยกว่า และมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือ
คำสำคัญ การหดตัว การคืนตัว ความแข็ง เนื้อหมู ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการเลี้ยงสุกร โดยในแต่ละปีจะเลี้ยงสุกรได้ประมาณ 7-8 ล้านตัว โดยแหล่งที่เลี้ยงสุกรหลักของประเทศอยู่ในเขตภาคกลางและภาคตะวันออก แถบราชบุรีนครปฐม ฉะเชิงเทรา และชลบุรี การเลี้ยงสุกรส่วนใหญ่เป็นการเลี้ยงเพื่อบริโภคภายในประเทศประมาณ 98-99% การส่งออกยังมีน้อยมาก และจำกัดอยู่ในแถบเอเชีย เช่น ฮ่องกง ทั้งที่ยังมีประเทศผู้นำเข้าที่สำคัญอีกหลายประเทศ เช่น ญี่ปุ่น รัสเซีย และสิงคโปร์ (กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์, 2547) ในบางครั้งเนื้อสุกรที่ได้จากการผลิตอาจมีมากเกินความต้องการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแปรรูปเนื้อสุกรเพื่อเก็บรักษาด้วยวิธีการต่างๆ โดยการถนอมอาหารด้วยวิธีการอบแห้งเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาอาหาร ซึ่งในปัจจุบันความนิยมในการบริโภคอาหารแห้ง, อาหารกึ่งสำเร็จรูปภายในประเทศมีมากขึ้น การนำเนื้อสุกรมาแปรรูปโดยวิธีการอบแห้ง เพื่อนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารทานเล่นหรืออาหารกึ่งสำเร็จรูป จึงสามารถเพิ่มคุณค่าให้กับเนื้อสุกรได้ อีกทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้

โปรตีนเป็นองค์ประกอบหลักของเนื้อสัตว์โดยส่วนประกอบทางเคมีของเนื้อสัตว์จะคล้ายคลึงกันกับส่วนประกอบของเนื้อเยื่อในร่างกายมนุษย์ ดังนั้นโปรตีนจากเนื้อสัตว์จึงถูกย่อยและถูกดูดซึมเอาไปใช้ในร่างกายได้ง่าย นอกจากเนื้อสัตว์จะมีโปรตีนที่มีคุณภาพสูงแล้วยังมีแร่ธาตุที่จำเป็นอยู่จำนวนมาก โปรตีนคุณภาพสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมนุษย์ และต้องการเพื่อให้ร่างกายเจริญเติบโตได้อย่างเต็มศักยภาพ มีการพัฒนาสมองอย่างสมบูรณ์ (ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2546) โดยโปรตีนส่วนใหญ่ที่มนุษย์ได้รับจะมาจากเนื้อสัตว์ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 70-75 % ดังนั้นการจะเก็บรักษาเนื้อสัตว์ไว้ให้ได้ระยะเวลานานๆ จึงต้องทำการแปรรูป ซึ่งทำได้หลายวิธีและหนึ่งในนั้นได้แก่การให้ทำแห้งซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อถนอมอาหารโดยคุณค่าทางอาหารยังคงเดิม อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์โดยการทำแห้งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตากแห้งโดยใช้แสงแดดซึ่งต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก และยังมีปัญหาทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากฝุ่นและแมลง การทำให้แห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อนซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนสูงๆ จะทำให้คุณภาพบางประการของผลิตภัณฑ์สูญเสียไป ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำเอาไอน้ำร้อนยวดยิ่งมาใช้เป็นตัวกลางอบแห้งแทนอากาศร้อน (Mujumdar, 1995) และการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนหลายประการ (Wimmerstedt, 1994) เช่น ประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงเนื่องจากมีการนำความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอกลับมาใช้ใหม่ ไม่มีออกซิเจนในระบบทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงทำให้ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยลง จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและสมบัติทางกายภาพของเนื้อหมูที่อบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. อุปกรณ์การทดลอง

Figure 1 แสดงระบบอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ 1) เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) เพื่อผลิตไอน้ำที่ใช้เป็นตัวกลางในการอบแห้ง 2) อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater) เพื่อทำให้ไออิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีขนาด 13.5 kW โดยควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID ที่มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$ 3) ห้องอบแห้งแบบงวด

(Batch Dryer) ขนาด 30 x 30 x 10 cm^3 4) พัดลม (Blower) ชนิดแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลังขนาด 2.2 kW อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม โดยในการทดลอง ได้วัดอุณหภูมิภายในระบบและอุณหภูมิของเนื้อหมูโดยใช้ Thermocoupple Type K ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ Yokogawa รุ่น 437012 μR 1800 Recorder มีความถูกต้อง $\pm$ 1.5°C และการชั่งน้ำหนักตัวอย่างจะใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP 3202 S มีค่าความถูกต้อง $\pm$ 0.01 กรัม

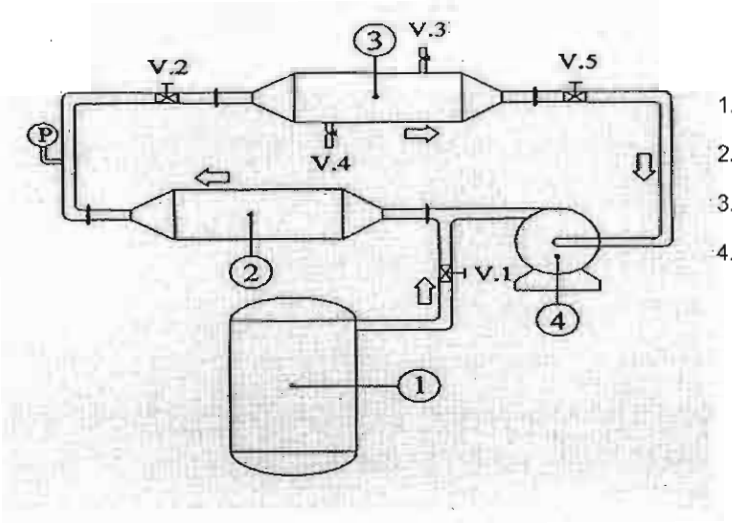


Figure 1 Schematics of superheated steam dryer system

2. การเตรียมตัวอย่าง

เนื้อหมูที่ใช้ทำการศึกษาจะใช้เฉพาะส่วนเนื้อสันนอก (Sirloin) โดยทำการแช่แข็งเนื้อหมูที่อุณหภูมิ -10°C เพื่อให้เนื้อหมูสามารถที่จะนำมาหั่นให้เป็นแผ่นได้ จากนั้นนำเนื้อหมูไปหั่นให้มีความหนาประมาณ 3 mm (หั่นเนื้อหมูตามเส้นใยกล้ามเนื้อ)โดยใช้เครื่องสไลด์เนื้อ SAVIOLI ประเทศอิตาลี Model 250 S หลังจากนั้นตัดตัวอย่างให้มีขนาด 3 x 3 cm แล้วนำเนื้อหมูไปหมักเกลือ โดยใช้สัดส่วนของเกลือ 2% โดยมวลของเนื้อหมู จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 20 นาที ก่อนทำการอบแห้งสำหรับความชื้นของตัวอย่างหาได้จากการนำตัวอย่างอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C จนน้ำหนักคงที่

3. กระบวนการอบแห้ง

ทำการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งในกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C โดยใช้เนื้อหมูสันนอก (Sirloin) ที่ทำการหั่นในทิศทางตามเส้นใย (Longitudinal Section) โดยเนื้อหมูในกรณีที่ไม่หมักเกลือมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 270-284% d.b. และเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 245-257% d.b. อบแห้งจนเหลือความความชื้นสุดประมาณ 11% d.b. ในทั้ง 2 กรณี หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งไปทดสอบคุณภาพดังนี้ คุณภาพด้านสี, การหดตัว, การคืนตัว และความแข็ง

4. การทดสอบคุณภาพด้านสี

คุณภาพด้านสีของเนื้อหมูหลังการอบแห้งทำการวัดโดยเครื่องวัดสีอาหาร MINOLTA รุ่น CR 400 และวัดค่าสีของตัวอย่างโดยใช้ระบบ Hunter ซึ่งแสดงในเทอมของตัวแปร L, a และ b โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยเครื่องวัดสีจะปรับความถูกต้องก่อนการวัดด้วยแผ่นสีขาวมาตรฐานก่อนทำการทดลองทุกครั้ง

5. การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อหมู จะใช้วิธีการแทนที่ปริมาตรของเนื้อหมูในของเหลว โดยของเหลวที่ใช้ทดสอบคือ n-heptane [$CH_3(CH_2)_5CH_3$] โดยคำนวณหาค่าจากสมการ (Maskan, 2001)

$$\%\,\text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ V_0, V คือ ปริมาตรของเนื้อหมูก่อนและหลังการอบแห้ง ตามลำดับ (m^3)

6. การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว

การทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัว ใช้วิธีการคืนตัวในน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 90°C เป็นเวลา 15 นาที และใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP3202s ค่าความถูกต้อง ±0.01 กรัม โดยคำนวณหาค่าจากสมการดังนี้ (Maskan, 2001)

$$\text{Rehydration} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_d, W_t คือ มวลเนื้อหมูแห้งและมวลเนื้อหมูที่คืนตัวที่เวลาใดๆ ตามลำดับ (g)

7. การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์

การทดสอบเนื้อสัมผัสของเนื้อหมูหลังการอบแห้งจะทำการวัดโดยใช้ Texture Analyser รุ่น TA.XT 2 Verion 5.15 ค่าความถูกต้อง ± 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความเร็วในการกด 1 mm/s ใช้ร่วมกับชุดโปรแกรม XT.RA Dimension Version ซึ่งจะอ่านค่าเป็นค่าของยอด peak หน่วยเป็นนิวตัน

ผลและวิจารณ์

1. ผลของอุณหภูมิตัวกลางต่ออัตราการลดความชื้น

ผลการอบแห้งเนื้อหมูทั้งในกรณีไม่หมักเกลือและกรณีหมักเกลือด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130,140 และ 150°C แสดงใน Figure 2 จากการทดลองพบว่าการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกรณีไม่หมักเกลือที่อุณหภูมิ 130,140 และ 150°C จากความชื้นเริ่มต้น 270-284% d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 11% d.b. จะใช้เวลาในการอบแห้ง 52,

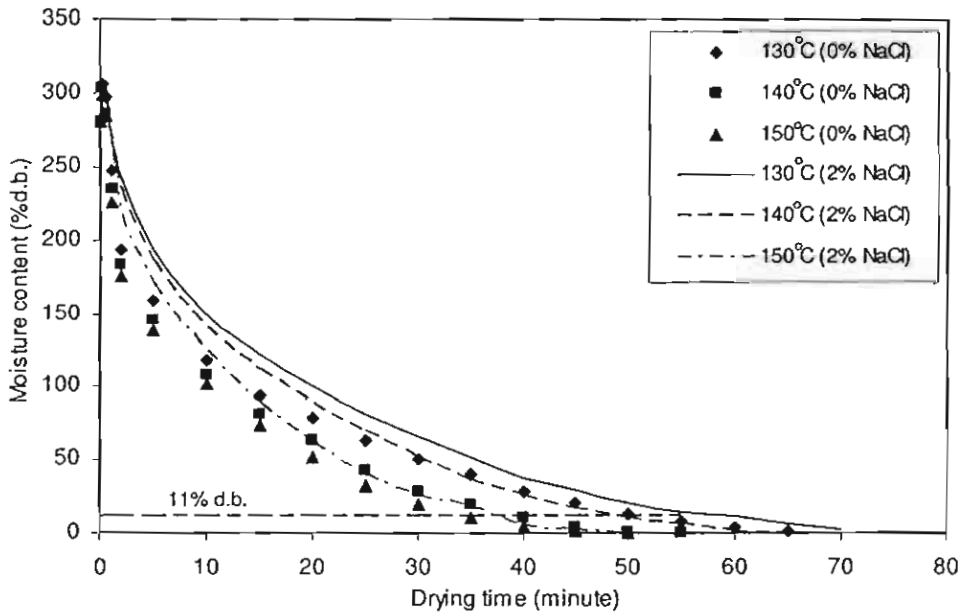


Figure 2 Comparison the effect of medium temperature and decreased moisture content of salt treated pork and untreated pork

40 และ 34 นาที ตามลำดับ และการอบแห้งเนื้อหมูกรณีหมักเกลือที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C จากความชื้นเริ่มต้น 245-257% d.b. จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 11% d.b. จะใช้เวลาในการอบแห้ง 62, 50 และ 38 นาที ตามลำดับ สังเกตได้ว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของเนื้อหมูในการอบแห้งได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงมีผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่า ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนจากตัวกลางไปยังผลิตภัณฑ์ได้มากกว่าจึงสามารถระเหยน้ำได้ดีกว่า ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิสูงใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่ำ จากผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการอบแห้งเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือกับเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังแสดงใน Figure 2 พบว่าการอบแห้งเนื้อหมูที่ไม่ได้หมักเกลือสามารถลดความชื้นได้รวดเร็วกว่าเนื้อหมูที่หมักเกลืออย่างเห็นได้ชัดในการอบแห้งที่ทุกอุณหภูมิ โดยที่ความชื้นเริ่มต้นของเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือสูงกว่าความชื้นเริ่มต้นของเนื้อหมูกรณีหมักเกลือ ซึ่งสาเหตุที่ความชื้นเริ่มต้นของเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือมีค่าน้อยกว่าเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือนั้น เนื่องจากเมื่อทำการหมักเกลือแล้วเกลือจะแทรกซึมเข้าไปในเนื้อหมูและทำให้เกิดการดึงน้ำออกมาที่บริเวณผิวของเนื้อหมูได้ตามหลักการของ Osmosis Pressure และเกลือก็ยังไปละลายโปรตีนเส้นใยย่อย (Myofibrilar protein) (Verbeken, et al. 2005) ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในน้ำเกลือ (Salt-Soluble Meat Proteins) และเมื่อโปรตีนถูกทำละลายโดยน้ำเกลือโปรตีนก็จะแปลงสภาพ (Denature) กลายเป็นเจลและไปเคลือบอยู่รอบๆ เส้นใยกล้ามเนื้อ ซึ่งจะทำให้น้ำระเหยได้ยากขึ้นเป็นผลให้เมื่อทำการอบแห้งเนื้อหมูที่หมักเกลือจะมีอัตราการลดความชื้นที่น้อยกว่าการอบแห้งเนื้อหมูที่ไม่ได้หมักเกลือ

2. ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อหมู

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C เมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อหมู ดังแสดงใน Figure 3 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นอุณหภูมิของเนื้อหมูจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องเกิดการควบแน่นของไอน้ำ และไอน้ำจะคายความร้อนให้กับเนื้อหมู ทำให้อุณหภูมิของเนื้อหมูสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกของการอบแห้งลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อหมูจะมีอัตราการเพิ่มที่ลดลง เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในเนื้อหมูได้รับความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็นไอ และหลังจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อหมูจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนกระทั่งอุณหภูมิในเนื้อหมูมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้งและจาก Figure 3

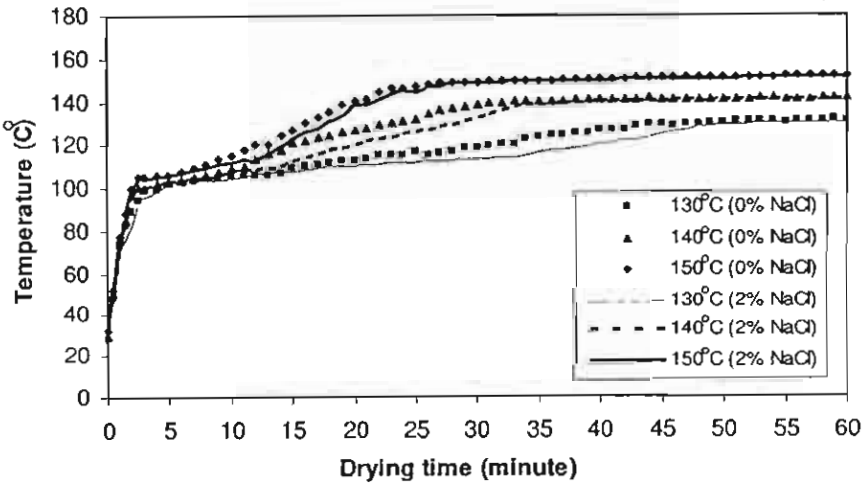


Figure 3 Effect of salt on pork temperature at various temperatures (initial moisture content 270-284% d.b. for untreated and 245-257% d.b. for salt treated pork)

ก็จะสังเกตได้ว่าช่วงต้นของการอบแห้งทั้งที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C อุณหภูมิของเนื้อหมูจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใกล้เคียงกันและจะคงที่อยู่ช่วงเวลาหนึ่งแต่ที่อุณหภูมิ 150°C อุณหภูมิของเนื้อหมูจะเพิ่มขึ้นเร็วกว่า เนื่องจากเกิดการควบแน่นที่ผิวของเนื้อหมูน้อยกว่าจึงทำให้ระเหยน้ำที่บริเวณผิวได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C และอุณหภูมิของเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าเนื้อหมูกรณีที่ไม่หมักเกลือ

3. สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อหมูด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ดังแสดงใน Figure 2 สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยการนำค่าอัตราส่วนความชื้น, อุณหภูมิและเวลาในทุกกรณีมาฟิตสมการ โดยสมการที่ใช้จะเป็นการแทนสมการที่ 3 (สมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในรูปแบบของ Arrhenius) ลงในสมการที่ 4 (สมการอัตราส่วนความชื้นแบบแผ่นกว้างมาก (1-D Slab Model)) จากนั้นทำการฟิตสมการโดยใช้วิธี Quasi – Newton จะได้ค่าคงที่ D_0 และE_a ดัง Table 1

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลในรูปแบบของ Arrhenius

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \tag{3}$$

สมการอัตราส่วนความชื้นแบบแผ่นกว้างมาก (1-D Slab Model)

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{m=0}^{\infty}\left(\frac{1}{(2m+1)^2}\exp\left[-(2m+1)^2\pi^2\frac{Dt}{L^2}\right]\right) \tag{4}$$

Table 1 The constant of diffusion coefficient for pork drying

Medium	Treatment	D_0 ($\times 10^{-5}$ m^2/min)	E_a (kJ/kmol)	R^2 (%)
Superheated steam	Untreated pork	2.6	25,449.91	99.31
	Salt treated pork	7.5	30,218.42	99.78

จากนั้นนำค่าคงที่ D_0 และ E_a กับค่าอุณหภูมิอบแห้งแทนลงในสมการในรูปแบบของ Arrhenius (Crank, 1975) ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล ดัง Table 2

Table 2 The effective diffusion coefficient of pork drying at various temperatures

Medium	Treatment	Temperature (°C)	D_{eff} ($\times 10^{-9}$ m^2/min), (Exp)	D_{eff} ($\times 10^{-9}$ m^2/min), (Arrhenius)
Superheated steam	Untreated pork	130	12.31	13.06
		140	16.42	15.70
		150	18.44	18.71
	Salt treated pork	130	9.23	9.08
		140	10.74	11.29
		150	14.28	13.91

จาก Table 2 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูมีค่ามากขึ้นตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ณรงค์ อึ้งกิมบ้วน, 2544) เมื่อเปรียบเทียบผลของการหมักเกลือต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่ง จะ

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือมีค่ามากกว่าเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราการลดความชื้นของการอบแห้งเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือและหมักเกลือที่อุณหภูมิต่างๆ

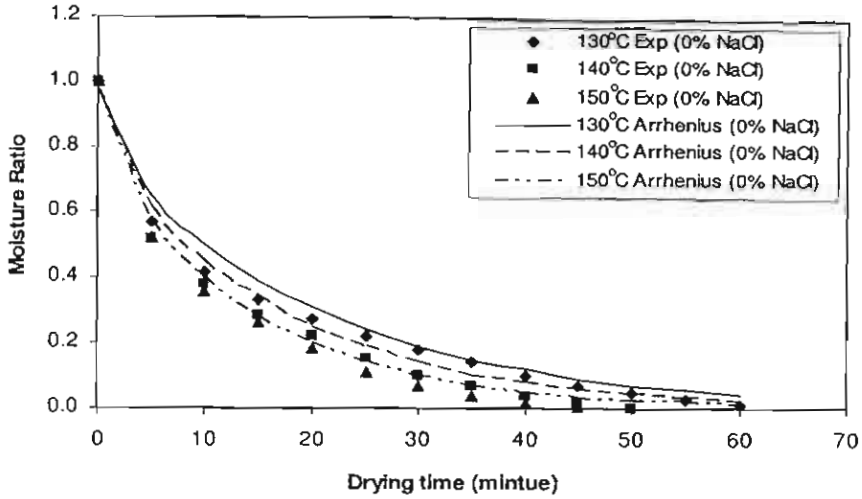


Figure 4 Comparison of decreased moisture ratio for salt treated pork and untreated pork at various temperatures

โดยเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือจะมีอัตราการลดความชื้นมากกว่าเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือ ดังแสดงใน Figure 1 นอกจากนี้จาก Figure 4 จะเห็นได้ว่าสมการของ Arrhenius สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนการลดความชื้นเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือได้ค่อนข้างดี ซึ่งในกรณีของเนื้อหมูหมักเกลือกราฟที่ได้จากสมการ Arrhenius จะสอดคล้องกับผลการทดลองและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

4. คุณภาพด้านสี

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านสี ดัง Table 3 พบว่าเมื่ออบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิต่ำทั้งในกรณีเนื้อหมูหมักเกลือและไม่หมักเกลือ จะให้ค่า Lightness (L) ซึ่งแสดงค่าความสว่างเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงอยู่เล็กน้อย ทั้งนี้สาเหตุที่ทำการอบที่อุณหภูมิต่ำกว่าให้ค่าความสว่าง (Lightness) มากกว่าเนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Maillard Browning) มากกว่าทำให้สีของเนื้อหมูมีสีน้ำตาลคล้ำมากกว่า ส่วนค่าสีแดง Redness (a) จะมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งที่อุณหภูมิสูงซึ่งเมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าค่าสีแดง Redness (a) มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ ส่วนค่าสีเหลือง Yellowness (b) พบว่าในกรณีที่อุณหภูมิตัวกลางสูงขึ้นจะมีค่า

Table 3 The results color test for drying pork

Drying Temperature (°C)	Colour		
	L	a	b
130°C Untreated pork	35.71 ± 0.59^{c}	9.58 ± 0.67^{a}	19.45 ± 0.90^{a}
140°C Untreated pork	35.42 ± 1.04^{bc}	10.29 ± 0.78^{a}	19.52 ± 1.81^{a}
150°C Untreated pork	34.93 ± 1.10^{b}	12.40 ± 0.79^{c}	19.55 ± 1.27^{a}
130°C Salt treated pork	33.07 ± 0.81^{a}	11.47 ± 1.22^{b}	18.72 ± 1.19^{a}
140°C Salt treated pork	32.83 ± 1.16^{a}	12.98 ± 1.77^{c}	18.70 ± 1.03^{a}
150°C Salt treated pork	32.78 ± 0.84^{a}	14.21 ± 1.01^{d}	18.78 ± 2.24^{a}

Different letters (a,b,c,d) following number in the same column indicate significant differences between means $p<0.05$)

แตกต่างกับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำน้อยมาก ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่าง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง Lightness (L), ค่าสีแดง Redness (a) และค่าสีเหลือง Yellowness (b) ระหว่างการอบแห้งเนื้อหมูที่หมักเกลือกับเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือ พบว่าเนื้อหมูกรณีหมักเกลือจะมีค่าความสว่าง Lightness (L) น้อยกว่า และมีค่าสีแดงมากกว่าเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือในทุกอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้สาเหตุหนึ่งเนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูกรณีหมักเกลือจะใช้เวลาอบแห้งมากกว่าจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (Maillard Browning) มากกว่าเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือ ส่วนค่าสีเหลือง Yellowness (b) พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน

5. คุณภาพด้านการหดตัว

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อหมูหลังการอบแห้งทั้งกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือ ดัง Table 4 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะมีแนวโน้มเหมือนกันคือ ผลของอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้เนื้อหมูหลังการอบแห้งจะเกิดการหดตัวมากกว่าเนื้อหมูหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเล็กน้อย เนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โปรตีนเกิดการจับตัวกันแน่นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าทางสถิติพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จะเกิดการหดตัวมากกว่า 130 และ 140°C อย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 กับ 140°C พบว่าการหดตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากการเปรียบเทียบการหดตัวของเนื้อหมูหลังการอบแห้งระหว่างเนื้อหมูที่หมักเกลือกับเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือ พบว่าเนื้อหมูที่หมักเกลือจะเกิดการหดตัวมากกว่าเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือในทุกอุณหภูมิอบแห้ง สาเหตุที่เนื้อหมูหมักเกลือเกิดการหดตัวมากกว่าอาจเป็นเพราะใช้เวลาอบแห้งมากกว่า

Table 4 The results of Shrinkage for drying pork at various temperatures

Drying Temperature (°C)	% Shrinkage
130°C Untreated pork	61.40± 0.55 ^{a}
140°C Untreated pork	61.96± 0.46 ^{ab}
150°C Untreated pork	63.11± 0.68 ^{c}
130°C Salt treated pork	62.53± 0.84 ^{bc}
140°C Salt treated pork	63.39± 1.7 ^{c}
150°C Salt treated pork	65.06± 0.91 ^{d}

Different letters (a,b,c,d) following number in the same column indicate significant differences between means $p<0.05$)

6. คุณภาพด้านการคืนตัว

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านการคืนตัวของเนื้อหมูหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทั้งกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือ ดัง Table 5 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะมีแนวโน้มเหมือนกันคือเนื้อหมูหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถคืนตัวได้มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โปรตีนจับตัวกันแน่นกว่า (ชัยณรงค์ คันธพนิต, 2546) และหดตัวมากกว่าการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยกล้ามเนื้อน้อยจึงทำให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในเนื้อหมูได้ยากกว่าการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิต่ำ จึงเป็นเหตุให้ค่าการคืนตัวของการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงมีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อนำค่าการคืนตัวที่ได้ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบทางสถิติพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จะเกิดการคืนตัวน้อยกว่า 130 และ 140°C อย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 กับ 140°C พบว่าการคืนตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ และจากการเปรียบเทียบค่าการคืนตัวของเนื้อหมูหลังการอบแห้งระหว่างเนื้อหมูที่หมักเกลือกับเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือ พบว่าที่

อุณหภูมิ 130 และ 140°C เนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือจะสามารถคืนตัวได้มากกว่าเนื้อหมูที่หมักเกลืออย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ เนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูที่หมักเกลือจะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งมากกว่า จึงเกิดการหดตัวมากกว่าทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยที่จะสามารถให้น้ำแทรกซึมเข้าไปได้น้อย จึงทำให้สามารถคืนตัวได้น้อย แต่ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าเนื้อหมูในกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือการคืนตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นเพราะว่าโปรตีนเสียสภาพ (Denature) ค่อนข้างมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนมีค่าน้อย

Table 5 The results of Rehydration for drying pork at various temperatures

Drying Temperature (°C)	% Rehydration
130°C Untreated pork	64.24 ± 0.76^{d}
140°C Untreated pork	63.04 ± 0.66^{cd}
150°C Untreated pork	57.46 ± 0.73^{a}
130°C Salt treated pork	62.04 ± 0.82^{b}
140°C Salt treated pork	61.52 ± 0.57^{b}
150°C Salt treated pork	56.79 ± 0.48^{a}

Different letters (a,b,c,d) following number in the same column indicate significant differences between means $p<0.05$)

7. คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

ผลการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อหมูหลังการอบแห้งทั้งกรณีหมักเกลือและไม่หมักเกลือ ดัง Table 6 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เนื้อหมูหลังการอบแห้งจะมีความแข็งมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งเนื้อหมูที่อุณหภูมิสูงจะทำให้โปรตีนเกิดการจับตัวกันแน่นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าทางสถิติของการอบแห้งเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือปรากฏว่า ที่อุณหภูมิ 150°C จะมีค่าความแข็งมากกว่า 130°C อย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของตัวกลาง 130 กับ 140°C และ 140 กับ 150°C ค่าความแข็งของเนื้อหมูหลังการอบแห้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งแตกต่างกันน้อยเกินไป และเมื่อเปรียบเทียบผลของเกลือต่อความแข็งของเนื้อหมูพบว่าเนื้อหมูกรณีหมักเกลือจะมีความแข็งน้อยกว่า เนื่องจากเนื้อหมูที่หมักเกลือนั้นเกลือจะไปละลายโปรตีนเส้นใยย่อย (Myofibrilar protein) ซึ่งทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของโปรตีนลดน้อยลง

Table 6 The results of texture test of pork

Drying Temperature (°C)	Hardness (N)
130°C Untreated pork	47.33 ± 11.11^{ab}
140°C Untreated pork	59.4 ± 12.61^{bc}
150°C Untreated pork	68.26 ± 7.23^{c}
130°C Salt treated pork	30.1 ± 13.53^{a}
140°C Salt treated pork	30.7 ± 5.82^{a}
150°C Salt treated pork	38.3 ± 7.44^{a}

Different letters (a,b,c,d) following number in the same column indicate significant differences between means $p<0.05$)

สรุป

จากผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ130, 140 และ150°C พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่า, มีสีแดงเข้มกว่า, เกิดการหดตัวมากกว่า, คืนตัวได้น้อยกว่า และมีค่าความแข็งที่มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเนื้อหมูกรณีหมักเกลือกับกรณีไม่หมักเกลือพบว่า เนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่า ส่วนคุณภาพด้านต่าง ๆ นั้นพบว่าเนื้อหมูที่หมักเกลือจะมีสีแดงเข้มกว่า, มีการหดตัวมากกว่า, คืนตัวได้น้อยกว่า และมีค่าความแข็งที่น้อยกว่าเนื้อหมูกรณีไม่หมักเกลือ และพบว่าเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบผลของการหมักเกลือต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่ง จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อหมูที่ไม่หมักเกลือมีค่ามากกว่าเนื้อหมูกรณีที่หมักเกลือ

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดสีและเครื่องทดสอบความแข็งจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ. ศูนย์สารสนเทศ. กรมปศุสัตว์. 2547.

ชัยณรงค์ คันธพนิต. 2546. วิทยาศาสตร์เนื้อสัตว์. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 544 น.

ณรงค์ อึ้งกิมป้วน. 2544. การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน. คณะพลังงานและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 42 น.

Crank, J., 1975, The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., J. W. Arrowsmith LTD. Bristol, England, 44-68.

Maskan, M. (2001) Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying, *Journal of Food Engineering*, Vol. 48,177-182.

Mujumdar, A.S. (1995) Superheated steam drying. Handbook of industrial. 2nd edition Vol. 2. Macel Dekker Inc.

Verbeken, D., Neirinck, N., Ven Der Meeren, P., Dewettinck K. (2005) Influence of K-carrageenan on the thermal gelation of salt-soluble meat proteins, *Meat Science*, Vol 70, 161-166.

Wimmerstedt, R. (1994) steam drying history and future, Drying'94, Proceedings of the 9th International Drying Symposium (IDS'94) Vol. A. Australia, 191-213.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

ผลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น

Effect of Pretreatment on Drying Kinetics and Quality of Banana Slices

นภาภรณ์ พลายโถ[1],สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2],วารุณี เตีย[3], สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
Napaporn Plytho[1], Somkiat Prachayawarakorn[2] , Warunee Tia[3] and Somchart Soponronnarit[4]

ABSTRACT

Banana when exposed to the air is very sensitive to the enzymatic browning reaction. This browning can be limited by physical or chemical treatments. The objective of this research is to study the effect of pretreatment methods i.e. blanching, dipping in sodium metabisulfite solution and ascorbic solution, on drying kinetics and quality attributes of dried banana slices. Cavendish with a mature ripe stage of 5 containing 20-25%brix was peeled and sliced into approximately 3 mm thickness with the initial moisture content, before pretreatment, 250-300 %d.b. The treated banana samples were dried to the final moisture content was 4 %d.b. using the temperatures of 110 – 140^{o}C. The experiment revealed that the sulfite treated slices dried at lower temperature of 120^{o}C had the lowest drying rate, as compared to the other treatments. At elevated temperature, on the contrary, drying rate of the blanched slices became lowest. Crust formation resulted in relatively less shrinkage of banana slices dried at high temperature than that dried at the low temperature. The blanched sample after drying was the thinnest size. The pretreatment and drying temperature were insignificantly affected on the hardness and number of peaks ($p<0.05$). To avoid the brown pigment formation, two-stage drying, high drying temperature at the first stage followed with low temperature drying, should be applied.
Key words: Banana slices, Enzymatic browning reaction, Pretreatment, Quality

บทคัดย่อ

กล้วยเมื่อสัมผัสอากาศจะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็ว ปฏิกิริยานี้สามารถควบคุมได้ด้วยการพรีทรีทเมนต์ทางกายภาพและทางเคมี วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อทำการศึกษาผลของการพรีทรีทเมนต์ เช่น การลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่นโดยใช้กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 ความหวาน 20-25 %brix หั่นตามขวางหนา 3 mm ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีทเมนต์มีค่า 250-300 %d.b. ทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110-140 ^{o}C จนได้ความชื้นสุดท้ายประมาณ 4 %d.b. จากการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120^{o}C กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์มีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น และการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยการลวกมีอัตราการอบแห้งต่ำที่สุด กล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงเกิดการหดตัวน้อยกว่าที่อุณหภูมิต่ำ กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกหลังการอบแห้งมีความบางมากที่สุด การพรีทรีทเมนต์และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งส่งผลต่อความแข็งและจำนวนยอดอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดสีน้ำตาลสามารถใช้วิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยช่วงแรกอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง
คำสำคัญ : กล้วยแผ่น, การพรีทรีทเมนต์, คุณภาพ, ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์

[1]นักศึกษา [2]รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ [3]รองศาสตราจารย์ [4]ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[1]Graduated student, [2]Associate Professor, Faculty of Engineering, [3]Assistant Professor, [4]Professor, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

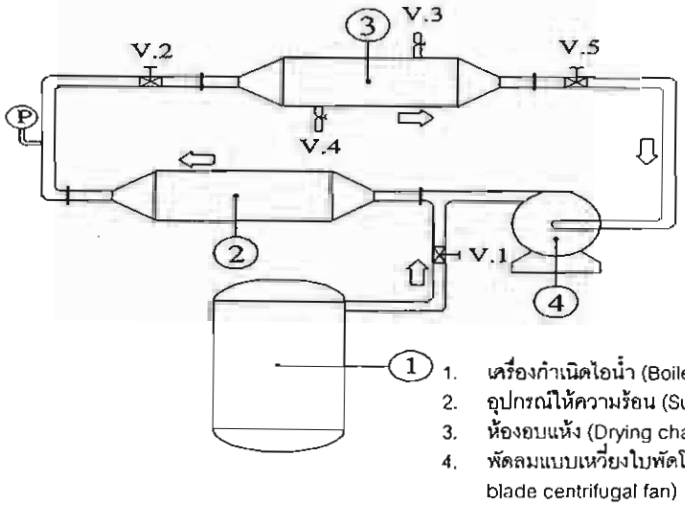
คำนำ

กล้วยเป็นพืชที่เน่าเสียได้ง่ายจึงควรนำกล้วยมาแปรรูปเพื่อให้สามารถเก็บรักษาได้นานขึ้นนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกล้วยได้อีกด้วย การแปรรูปกล้วยที่สำคัญได้แก่ การทำเป็นอาหารเหลวหรือพิวรี (puree) กล้วยอบ กล้วยตาก กล้วยฉาบ กล้วยกวนและกล้วยแผ่น กล้วยแผ่นที่มีขายตามท้องตลาดในปัจจุบันนี้นิยมใช้กล้วยดิบมาทำการแปรรูปโดยการทอดในน้ำมัน กล้วยแผ่นที่ได้จะไม่มีกลิ่นหอมและรสหวานของกล้วย มักจะมีสีเข้ม สีไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเก็บไว้นาน ๆ กล้วยแผ่นอาจเกิดกลิ่นหืนเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันกับออกซิเจน ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดกลิ่นหืนของกล้วยแผ่นได้ด้วยการเปลี่ยนวิธีการแปรรูปเป็นการอบแห้งและเนื่องจากกล้วยเป็นผลไม้ที่ไวต่อปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเนื้อเยื่อสัมผัสกับอากาศ ปฏิกิริยานี้สามารถควบคุมหรือยับยั้งได้ด้วยการพรีทรีทเมนต์ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การให้ความร้อนเพื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ PPO (Martinez และ Whitaker,1995) การลวกด้วยน้ำร้อนหรือไอน้ำ (Levi และคณะ,1980 , Beveridge และ Weintraub ,1995) การใช้สารเคมีต่างๆ เช่น กรดซิตริก กรดแอสคอร์บิค อิริทอร์บิก ฟูมาริกเพื่อปรับ pH ให้เป็น 4 หรือต่ำกว่า การใช้สารประกอบซัลไฟต์ (Demirel และ Turhan ,2003 , Torsresakul และ Siriwongwilaichat ,1997, Chan และ Cavaletto,1978) การพรีทรีทเมนต์ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมแปรรูปผักและผลไม้คือการใช้สารประกอบซัลไฟต์ แต่การบริโภคสารประกอบซัลไฟต์ในปริมาณที่มากเกินไปก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภคจึงควรที่จะหลีกเลี่ยงการใช้สารนี้ จากงานวิจัยมากมายที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมหรือยับยั้งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ด้วยการพรีทรีทเมนต์ก่อนการอบแห้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการพรีทรีทเมนต์โดยการลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น เช่น สี การหดตัว และเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการแปรรูปผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1.อุปกรณ์การทดลอง

การอบแห้งด้วยอากาศร้อนในการทดลองใช้เครื่องอบแห้งแบบไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่เป็นห้องอบแห้งแบบงวด ซึ่งสามารถอบแห้งได้ทั้งอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่ง โดยลักษณะของระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง มีอุปกรณ์หลักแสดงไว้ดังรูปที่ 1 ดังนี้



1. เครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler)
2. อุปกรณ์ให้ความร้อน (Superheater)
3. ห้องอบแห้ง (Drying chamber)
4. พัดลมแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง (Backward curved blade centrifugal fan)

Figure 1 Schematic diagram of the dryer:

เครื่องกำเนิดไอน้ำ (boiler) เพื่อผลิตไอน้ำความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย อุปกรณ์ให้ความร้อน (superheater) เพื่อทำให้ไออิ่มตัวกลายเป็นไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีขนาด 13.5 kW และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID มีค่าความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$ ห้องอบแห้งแบบงวด (Drying chamber) ขนาด 30x30x10 cm^3 พัดลม (Backward curved blade centrifugal fan) เป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง อัตราการไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของพัดลม

และอุปกรณ์อื่นๆ เช่น วาล์วควบคุมและมาตรวัดความดัน ในการอบแห้งจะทำการปิดวาล์วตัวที่ 1 (V.1) เพื่อใช้อากาศร้อนสำหรับอบแห้งกล้วยแผ่น การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยการปล่อยอากาศร้อนไหลเวียนภายในระบบจนกระทั่งส่วนต่าง ๆ ของระบบอบแห้งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการทำการอบแห้ง อากาศร้อนจะไหลผ่านห้องอบแห้งในแนวขนานกับวัสดุด้วยความเร็ว 0.87 m/s และทำการวัดอุณหภูมิภายในระบบที่บริเวณทางเข้าห้องอบแห้งโดยใช้ Thermocouple Type K ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิ Yokogawa รุ่น 437012 μR 1800 Recorder มีค่าความถูกต้อง $\pm$ 1.5°C และการชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นจะใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น CP 3202 S มีค่าความถูกต้อง $\pm$ 0.01 กรัม

2.การเตรียมวัสดุ

กล้วยหอมทองระยะสุกที่ 5 (CSIRO,1972) ซึ่งพิจารณาได้จากสีของเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียวโดยความหวานของเนื้อกล้วยมีค่าประมาณ 23 – 25 %brix ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 mm ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยแผ่นก่อนการพรีทรีทเมนต์ประมาณ 250-300 %d.b. ปอกเปลือกและหั่นตามขวางด้วยเครื่องหั่นกำหนดความหนาของชิ้นตัวอย่างมีขนาด 3 mm แบ่งกล้วยแผ่นที่ได้เป็น 4 กลุ่มดังนี้ กลุ่มที่ 1 ไม่พรีทรีทเมนต์ กลุ่มที่ 2 นำมาลวกด้วยน้ำร้อนนาน 5 นาที (Levi และคณะ,1980) กลุ่มที่ 3 แช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที และกลุ่มที่ 4 แช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคความเข้มข้น 0.1% (w/w) นาน 1 นาที (Demirel และ Turhan ,2003) หลังจากนั้นนำตัวอย่างของแต่ละกลุ่มมาล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที ซับน้ำให้แห้งทิ้งไว้ 5 นาทีแล้วนำไปจัดเรียงบนตะแกรงที่รองด้วยอะลูมิเนียมฟอยล์ก่อนเข้าเครื่องอบแห้ง (หาน้ำหนักแห้งของกล้วยแผ่นแต่ละกลุ่มก่อนการอบแห้งโดยนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง)

3.วิธีการทดลอง

ทำการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 110, 120, 130 และ 140°C โดยชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที จนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้าย 4 % d.b. หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ได้ไปทดสอบคุณภาพในด้านสี การหดตัวและเนื้อสัมผัส

4.การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์

นำตัวอย่างหลังอบแห้งมาบดให้เป็นผงแล้ววัดสีด้วยเครื่องวัดสีอาหาร MINOLTA รุ่น CR-300 โดยวัดค่าสีของกล้วยแผ่นในเทอมของตัวแปร L, a และ b หรือค่าสีระบบ Hunter Lab โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงหรือสีเขียว และค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ซึ่งทำการสอบเทียบ (Calibrate) เครื่องวัดสีอาหารก่อนทำการวัดสีของกล้วยแผ่นหลังอบแห้งด้วยแผ่นสีมาตรฐานที่มีลักษณะเป็นแผ่นสีขาว(L=96.98, a=0.03 ,b=1.84) ทำการวัดสีตัวอย่างละ 10 ครั้ง

5.การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของผลิตภัณฑ์

การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของกล้วยแผ่น จะใช้วิธีการแทนที่ปริมาตรของกล้วยแผ่นในของเหลวทั้งก่อนและหลังอบแห้งตัวอย่างละ 10 ชิ้น โดยของเหลวที่ใช้ทดสอบคือ n-heptane [$CH_3(CH_2)_5CH_3$] โดยคำนวณหาค่าจากสมการ

$$\%\,\text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \qquad (1)$$

โดย V_0 คือ ปริมาตรของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้ง, m^3

V คือ ปริมาตรของเนื้อกล้วยแผ่นจากการอบแห้ง, m^3

6.การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสหลังการอบแห้งจะทดสอบโดยใช้เครื่อง Taxture Analyser รุ่น TA-XT2i ค่าความถูกต้อง $\pm$ 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด โดยใช้หัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความเร็วในการกด 1 mm/s โดยกดจนกระทั่งกล้วยแผ่นแตกออกจากกัน พิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจากค่าความแข็ง (Hardness) และจำนวนยอด (Number of Peaks) ที่มีค่า Threshold force ตั้งแต่ 30 กรัมขึ้นไป

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. ลักษณะทางกายภาพของกล้วยแผ่นก่อนการอบแห้ง

วิธีการพรีทรีทเมนต์ที่ต่างกันส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งแตกต่างกัน ตารางที่ 1 แสดงคุณภาพสีของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งในเทอมของตัวแปร L, a และ b ซึ่งทำการวัดสีของกล้วยแผ่นที่ไม่พรีทรีทเมนต์ทันทีหลังการหั่น สำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะทำการวัดหลังจากพรีทรีทเมนต์และซับให้แห้งแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จะเห็นว่าเริ่มต้นกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะมีความสว่างมาก (มีค่า L มาก) มีสีขาวอมเหลือง (L=81.09 a=-2.85 และ b=25.6) จากการสังเกตพบว่ากล้วยที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์เมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากขาวอมเหลืองไปเป็นสีดำคล้ำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลที่เร่งด้วยเอนไซม์ กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์โดยการลวกจะมีลักษณะอ่อนนิ่ม มีการยุบตัวลง เนื้อกล้วยมีสีขาวอมเหลืองแต่ใสซึ่งค่า L ลดลงจากเดิมเหลือเพียง 66.7 และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีดำคล้ำเมื่อสัมผัสกับอากาศ หากทิ้งไว้ให้สัมผัสกับอากาศนานขึ้นจะเกิดสีดำคล้ำมากขึ้น ณ บริเวณรอบจุดศูนย์กลางของกล้วยแผ่นเนื่องจากบริเวณนี้มีน้ำตาลมากกว่าบริเวณอื่น ความชื้นหลังการพรีทรีทเมนต์จะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากประมาณ 50 -100 %d.b. กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ บริเวณผิวกล้วยจะมีลักษณะเสมือนมีเจลใส ๆ เคลือบอยู่ เนื้อกล้วยมีสีขาวมากขึ้นกว่าก่อนพรีทรีทเมนต์ (L=78.75) และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีดำคล้ำน้อยมากแม้จะสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานานก็ตาม สำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคนั้น สีของเนื้อกล้วยจะใกล้เคียงกับกล้วยที่ไม่พรีทรีทเมนต์ที่ทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาทีมากที่สุด ไม่มีความมันวาวที่ผิวกล้วย โดยมีค่า Lประมาณ 77.8 และยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีดำคล้ำได้อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยความชื้นก่อนการอบแห้งของกล้วยแผ่นทั้งสองกรณีนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 20-50 %d.b. สำหรับค่าความเหลือง (b) ของกล้วยแผ่นก่อนอบแห้งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง 23.47-25.60

Table 1 Color for banana slices before drying.

Pretreatment	L- value	a - value	b - value
Untreated sample	81.09±2.85	-2.85±0.20	25.60±1.50
Sulfite treated sample	78.75±2.33	-2.86±0.27	23.56±1.40
Ascorbic acid treated sample	77.76±2.20	-1.72±0.60	23.47±1.50
Blanched sample	66.71±3.53	-4.98±1.70	25.60±1.50

2. จลนพลศาสตร์การอบแห้ง

2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

อัตราการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์สามารถหาได้จากน้ำหนักที่ลดลงโดยการชั่งน้ำหนักกล้วยแผ่นทุก ๆ 5 นาที ตลอดช่วงการอบแห้ง ซึ่งแสดงด้วยสัดส่วนความชื้น จากการทดลองพบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของกล้วยแผ่นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอากาศร้อนกับกล้วยแผ่นในกรณีที่ใช้อุณหภูมิสูงในการอบแห้งมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่าสูงกว่า ทำให้ความร้อนสามารถถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังกล้วยแผ่นเพื่อใช้ในการระเหยน้ำได้มากกว่า ส่งผลให้การระเหยน้ำในการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ จากการทดลอง การอบแห้งเพื่อให้ได้กล้วยแผ่นที่มีความชื้นสุดท้าย 4 %d.b. นั้นที่อุณหภูมิ 110,120,130 และ 140 ^{o}C จะใช้เวลาในการอบแห้ง 100, 75, 47.5 และ 32.5 นาที ตามลำดับ

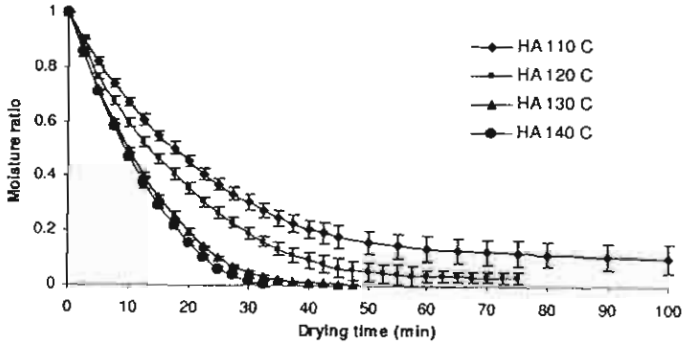


Figure 2 Moisture ratio of sulfite treated slices dried using the temperatures of 110 -140 ^{o}C.

2.2 ผลของการพรีทรีทเมนต์ที่มีต่ออัตราการลดความชื้น

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของการพรีทรีทเมนต์ต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการลดความชื้นของกล้วยแผ่น พบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานที่สุด เวลาที่ใช้ในการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ไม่พรีทรีทเมนต์ และพรีทรีทเมนต์ด้วยการลวกและการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 ^{o}C นั้นจะให้ผลเช่นเดียวกับอุณหภูมิ 110 ^{o}C ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 ก่อนการอบแห้งกล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกจะมีลักษณะอ่อนนิ่มและมีการยุบตัวลงเนื่องจากการลวกด้วยน้ำร้อนทำให้ผนังเซลล์แตกและเสียสภาพไป ภายในผนังเซลล์ของเนื้อกล้วยประกอบด้วยสารเพคตินที่ทำหน้าที่เชื่อมเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงและให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ (Leshem และคณะ, 1986 ; Seymour และคณะ, 1989, Knee และ Bartley, 1981) สารเพคตินนี้เป็นสารที่ไวต่อความร้อนเมื่อผ่านการลวกจึงเกิดการสูญเสียสารเพคตินที่ละลายน้ำได้ และจากการที่ผนังเซลล์แตกและเสียสภาพไปนั้นส่งผลให้น้ำภายในเนื้อกล้วยแผ่นเคลื่อนที่ออกมาได้เร็วกว่ากรณีอื่น กล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคและกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์จะมีอัตราการลดความชื้นใกล้เคียงกับการลวกโดยมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย และกล้วยแผ่นที่ พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะมีอัตราการลดความชื้นต่ำที่สุด

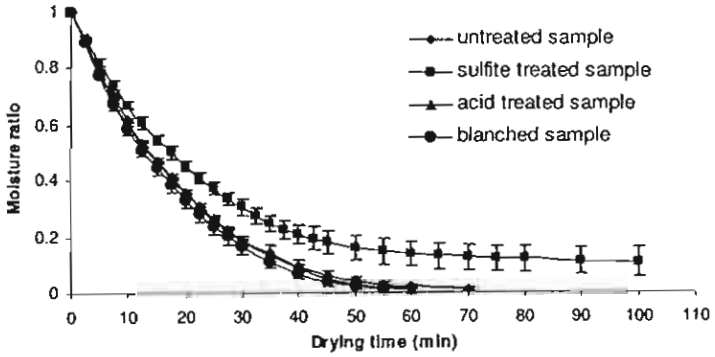


Figure 3 Moisture ratio of banana slices dried using the temperatures of 110 ^{o}C.

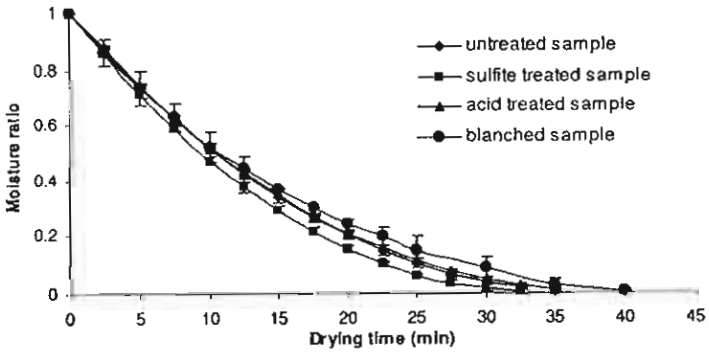


Figure 4 Moisture ratio of banana slices dried using the temperatures of 140 ^{o}C.

สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C จะให้ผลตรงข้ามกับกรณีอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำซึ่งแสดงดังรูปที่ 4 กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด เนื่องมาจากวิธีการ พรีทรีทเมนต์ที่แตกต่างกันส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของกล้วยแผ่นหลังอบแห้งแตกต่างกันซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่า 130 °C ในกรณีนี้อาจเป็นเพราะน้ำภายในกล้วยแผ่นจะระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ผิวหน้าของกล้วยแผ่นมีลักษณะขรุขระ จากการสังเกตกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะมีความขรุขระมากที่สุด รองลงมาคือกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคและกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ และสำหรับกล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกนั้นผิวหน้าจะมีลักษณะที่ราบเรียบสม่ำเสมอ กล้วยแผ่นที่มีผิวหน้าขรุขระนั้นจะมีพื้นที่ในการระเหยน้ำมากกว่ากรณีผิวหน้าที่ราบเรียบ ความขรุขระยิ่งเพิ่มมากขึ้นพื้นที่ในการระเหยน้ำก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จึงมีอัตราการลดความชื้นที่สูงที่สุด

3.คุณภาพของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง

3.1 สี

กล้วยแผ่นที่ได้หลังการอบแห้งโดยรวมแล้วมีสีน้ำตาลค่อนข้างแดง แต่จะมีความอ่อน-แก่แตกต่างกันเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า จากตารางที่ 2 แสดงผลของการวัดคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิและการพรีทรีทเมนต์แตกต่างกัน ซึ่งสีของกล้วยแผ่นแสดงในเทอมของตัวแปร L, a และ b จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการพรีทรีทเมนต์มีผลต่อคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบแห้งสูงขึ้นจะทำให้กล้วยแผ่นมีสีน้ำตาลเข้มมากขึ้นซึ่งสังเกตได้จากค่า L , b ที่ลดลง และค่า a ที่เพิ่มขึ้น โดยสีของกล้วยแผ่นที่อบด้วยอุณหภูมิ 110 °C มีสีน้ำตาลเข้มน้อยที่สุด ระดับความเข้มค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีสีน้ำตาลเข้มมากที่สุดเมื่ออบแห้งด้วยอุณหภูมิ 140 °C ทั้งนี้เนื่องมาจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นอิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลได้สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แม้ ว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่าก็ตาม สำหรับผลของการพรีทรีทเมนต์นั้นพบว่า กล้วยแผ่นที่พรี ทรีทเมนต์ต่างกันจะให้คุณภาพทางด้านสีหลังการอบแห้งที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากระยะเวลาในการอบ แห้งที่แตกต่างกัน กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกให้ค่าความสว่างน้อยที่สุดทุกอุณหภูมิของการอบแห้ง กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคจะให้ค่าความสว่างมากกว่าสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์กับกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์หลังการอบแห้งพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบแห้ง การ พรีทรีทเมนต์จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาลเข้มได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการพรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคจะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีได้มากที่สุดที่สภาวะการอบแห้งเดียวกันโดยเฉพาะการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และไม่จำเป็นต้องทำการพรีทรีทเมนต์กล้วยแผ่นก่อนอบแห้งหากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 110 °C ขึ้นไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสีของกล้วยแผ่นที่ได้หลังอบแห้งนั้นไม่ได้เกิดมาจากกิจกรรมของเอนไซม์แต่เป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการอบแห้ง โดยค่า L, a และ b ของกล้วยแผ่นทุกการพรีทรีทเมนต์เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 -140 °C มีค่าอยู่ในช่วง 35.2±0.7-51.2±1.7, 12.8±0.4 - 16.9±0.7 และ 21.5±0.8 - 31.3±0.6 ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$

Table 2 Color for banana slices dried.

temperature (°C)	Pretreatment	L- value	a - value	b - value
110	Untreated	47.0 ± 2.0^{h}	13.4 ± 0.4^{bc}	29.7 ± 0.7^{g}
	Sulfite	50.7 ± 1.0^{i}	13.8 ± 0.5^{de}	31.3 ± 0.6^{i}
	Ascorbic acid	51.0 ± 1.3^{i}	12.8 ± 0.4^{a}	30.6 ± 0.6^{h}
	Blanched	45.8 ± 2.1^{g}	16.9 ± 0.7^{i}	29.4 ± 0.5^{fg}
120	Untreated	41.5 ± 1.5^{e}	13.6 ± 0.4^{bc}	28.9 ± 0.6^{ef}
	Sulfite	39.5 ± 1.1^{d}	14.0 ± 0.4^{ef}	28.6 ± 0.7^{e}
	Ascorbic acid	43.9 ± 1.2^{f}	13.3 ± 0.2^{b}	29.3 ± 0.7^{fg}
	Blanched	40.9 ± 0.6^{e}	14.8 ± 0.3^{g}	27.0 ± 0.5^{c}
130	Untreated	39.8 ± 0.9^{d}	14.1 ± 0.3^{f}	26.9 ± 0.5^{c}
	Sulfite	38.7 ± 0.8^{cd}	14.2 ± 0.2^{f}	26.6 ± 0.3^{c}
	Ascorbic acid	39.1 ± 0.9^{cd}	14.7 ± 0.3^{g}	27.9 ± 0.5^{d}
	Blanched	37.0 ± 0.6^{b}	15.5 ± 0.2^{h}	25.3 ± 0.8^{b}
140	Untreated	38.1 ± 0.8^{bc}	13.7 ± 0.5^{cde}	26.7 ± 0.9^{c}
	Sulfite	51.2 ± 1.7^{i}	12.9 ± 0.3^{a}	29.8 ± 1.2^{g}
	Ascorbic acid	43.3 ± 1.5^{f}	13.8 ± 0.3^{de}	27.9 ± 0.9^{d}
	Blanched	35.2 ± 0.7^{a}	13.7 ± 0.3^{cde}	21.5 ± 0.8^{a}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

3.2 การหดตัว

ตารางที่ 3 แสดงผลของการวัดการหดตัวของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง พบว่ากล้วยแผ่นเกิดการหดตัวมาก เมื่อทำการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำซึ่งใช้เวลาในการอบแห้งนานกว่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูง และจะมีการหดตัวน้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากกล้วยแผ่นที่อบแห้งภายใต้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดอัตราการอบแห้งที่รวดเร็วนั้น น้ำที่อยู่ที่ผิวของกล้วยแผ่นจะระเหยไปอย่างรวดเร็วทำให้ผิวที่อยู่ข้างนอกแห้งเกิดการแข็งตัวที่ผิว ซึ่งการแข็งตัวที่ผิวนี้จะช่วยรักษาสภาพรูปทรงและปริมาตรของกล้วยแผ่นไม่ให้มีการหดตัวมาก ดังนั้นกล้วยแผ่นที่ใช้เวลาในการอบแห้งน้อยจึงมีการหดตัวน้อยกว่ากล้วยแผ่นที่ต้องใช้เวลาในการอบแห้งนาน นอกจากนี้การพรีทรีทเมนต์ส่งผลต่อการหดตัวของผลิตภัณฑ์อีกด้วย กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกจะมีการหดตัวมากที่สุด เนื่องจากมีการสูญเสียสารเพคตินและการเสื่อมสภาพของเซลล์ซึ่งเป็นผลจาก cooking effect (Levi และคณะ,1980,Leshem และคณะ, 1986 ; Seymourและคณะ, 1989 ,Knee และ Bartley, 1981) รองลงมาคือกล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคและสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C มีการหดตัวมากที่สุดถึงร้อยละ 72.4

Table 3 Shrinkage for banana slices dried.

temperature (^{o}C)	Pretreatment	%Shrinkage
110	Untreated	42.9 ± 4.4^{e}
	Sulfite	52.2 ± 5.6^{g}
	Ascorbic acid	56.5 ± 2.9^{h}
	Blanched	72.4 ± 2.5^{i}
120	Untreated	37.2 ± 6.0^{d}
	Sulfite	32.8 ± 4.7^{c}
	Ascorbic acid	39.6 ± 6.9^{de}
	Blanched	55.3 ± 4.4^{gh}
130	Untreated	29.1 ± 2.4^{bc}
	Sulfite	23.9 ± 7.9^{a}
	Ascorbic acid	29.4 ± 3.3^{bc}
	Blanched	47.2 ± 6.4^{f}
140	Untreated	23.9 ± 1.5^{a}
	Sulfite	25.2 ± 2.2^{ab}
	Ascorbic acid	31.0 ± 2.0^{c}
	Blanched	37.1 ± 5.8^{d}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

Table 4 Hardness and number of peaks for banana slices dried.

temperature (^{o}C)	Pretreatment	Hardness (N)	Number of peaks
110	Untreated	5.8 ± 0.8^{ab}	3.6 ± 0.6^{ab}
	Sulfite	9.0 ± 2.4^{c}	4.3 ± 1.5^{abc}
	Ascorbic acid	6.0 ± 1.0^{ab}	4.0 ± 1.1^{abc}
	Blanched	6.1 ± 1.2^{ab}	4.3 ± 1.5^{abc}
120	Untreated	9.3 ± 2.8^{c}	3.5 ± 1.1^{ab}
	Sulfite	9.5 ± 1.4^{c}	3.7 ± 1.7^{ab}
	Ascorbic acid	6.1 ± 1.3^{ab}	4.5 ± 2.1^{abc}
	Blanched	5.6 ± 1.6^{ab}	3.5 ± 1.5^{ab}
130	Untreated	6.6 ± 1.5^{b}	2.8 ± 1.3^{a}
	Sulfite	7.3 ± 1.7^{b}	4.5 ± 1.6^{ab}
	Ascorbic acid	6.3 ± 0.2^{ab}	3.2 ± 1.3^{ab}
	Blanched	4.6 ± 1.2^{a}	3.9 ± 1.3^{abc}
140	Untreated	9.9 ± 0.7^{c}	4.9 ± 2.1^{abc}
	Sulfite	12.5 ± 1.5^{d}	6.1 ± 2.8^{cd}
	Ascorbic acid	9.1 ± 1.9^{c}	4.5 ± 2.7^{d}
	Blanched	9.1 ± 2.5^{c}	5.2 ± 1.9^{bcd}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

3.3 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยแผ่นจะพิจารณาค่าความแข็ง (Hardness) และจำนวนยอด (Number of Peaks) ซึ่งจำนวนยอดนั้นแสดงถึงความกรอบของอาหาร หากมีจำนวนยอดมากก็แสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะทางซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชันที่เกิดขึ้นเกิดจากผลิตภัณฑ์มีช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในที่ค่อนข้างเปราะและแตกง่าย (Vickers,1979) ผลิตภัณฑ์ที่มีความกรอบมากจะมีค่าความแข็งน้อยและมีจำนวนยอดมาก จากตารางที่ 4 แสดงความแข็งและจำนวนยอดหลังการอบแห้ง จากข้อมูลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มว่าอุณหภูมิในการอบแห้งและวิธีของการพรีทรีทเมนต์ไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและจำนวนยอด ความแข็งที่ได้โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 6 – 9 N และจำนวนยอดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 3 – 5 นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับกล้วยแผ่นที่ได้จากทอดซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไป พบว่าค่าความแข็งและจำนวนยอดประมาณ 14 N และ 5 ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอดมีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลอง

สรุป

จากการศึกษาผลของการพรีทรีทเมนต์กล้วยแผ่นโดยการลวก การแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์และการแช่ในสารละลายกรดแอสคอร์บิคที่มีต่ออัตราการอบแห้งและคุณภาพของกล้วยแผ่น สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการพรีทรีทเมนต์มีผลต่ออัตราการลดความชื้น เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งระหว่างกล้วยแผ่นที่ผ่านและไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ พบว่ากล้วยแผ่นที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มีอัตราการอบแห้งสูงกว่าภายใต้สภาวะการอบแห้งเดียวกัน การอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 และ 120°C กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้เวลาในการอบแห้งนานที่สุด และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C กล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์จะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยที่สุด สำหรับคุณภาพทางด้านสีนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งและการพรีทรีทเมนต์มีผลต่อคุณภาพสีของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง กล้วยแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวอมเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้มหลังการอบแห้งซึ่งสังเกตได้จากค่าความสว่าง (L) และค่าความเหลือง (b) ที่ลดลง การพรีทรีทเมนต์จะช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีน้ำตาลเข้มได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกล้วยแผ่นที่ไม่ผ่านการพรีทรีทเมนต์ และพบว่ากล้วยแผ่นที่พรีทรีทเมนต์ด้วยสารละลายกรดแอสคอร์บิคและอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 °C ให้สีที่น้ำตาลเข้มน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสพบว่าอุณหภูมิและวิธีการทรีทเมนต์ไม่มีผลต่อค่าความแข็งและจำนวนยอดของกล้วยแผ่นหลังการอบแห้ง กล้วยแผ่นที่ผ่านการลวกมีหดตัวมากที่สุด การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงทำให้กล้วยแผ่นมีการหดตัวน้อยกว่ากล้วยแผ่นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ จากงานวิจัยที่ได้แนะว่าไม่จำเป็นต้องทำการพรีทรีทเมนต์กล้วยแผ่นก่อนอบแห้งหากทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 110 °C ขึ้นไปถ้าขั้นตอนการเตรียมไม่ใช้ระยะเวลานานเกินไป นอกจากนี้เพื่อลดความเป็นสีน้ำตาลลงและให้ได้กล้วยแผ่นที่มีคุณภาพดีอาจใช้วิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนโดยทำการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงในช่วงแรกแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำในช่วงที่สอง

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ นางพัชรี ตั้งตระกูล สถาบันค้นคว้าและพัฒนาคุณภาพอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ นายอาภาพงศ์ ชั่งจันทร์ และนายจตุพล คงสอน ภาควิชาศึกษาทั่วไป สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่ให้คำปรึกษาต่าง ๆ และขอขอบคุณสายวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทดสอบทางอาหาร จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

Beveridge, T. and Weintraub, S.E. (1995). Effect of Blanching Pretreatment on Color and Texture of Apple Slices at Various Water Activities.*Food Research International*, 28(1), 83-86.

Chan, H.T. and C.G. Cavaletto (1978). Dehydration and Storage Stability of Papaya Leather. *Journal of Food Science*, 43, 1723-1725.

Demirel, D. and Turhan, M. (2003). Air-Drying Behavior of Dawrf Cavendish and Gros Michel Banana Slices. *Journal of Food Engineering*, 59, 1- 11.

Knee,M. and Bartley, (1981). Composition and Metabolism of Cell Wall Polysaccharides in Ripening Fruits.131-145.

Leshem,Y.A.,Halevy & C.Frenkel (1986) Process and Control of Plant Senescence. Elsevier,Amsterdum. 215

Levi, A., J.R. Ramirez-Martinez & H. Padua. (1980). Influence of Heat and Sulfurdioxide Treatments on some Quality Characteristic of Intermediate Moisture Banana. *Journal of Food Technology*, 15, 557-566.

Seymour, G.B.,H Wainwright & G.A. Tucker (1989). *Cell Wall Change in Ripening Mangoes*. Hort.Abstr, 59.1002.

Torsresakul, L. and P. Siriwongwilaichat. (1997). The Effect of Citric Acid and Sodiummetabisulfite on Inhibition of Non - Enzymatic Browning Reaction in Osmotic Dehydrated Guava. In FoSTAT/Propak Asia'97 Food Conference : Challennges in Food Processing and Packaging, 22-24 May 1997. Queen Sirikit Nat. Convention Center, Bangkok , 1-6.

การอบแห้งแครอทด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ

Drying of Carrot by Far-Infrared Radiation under Vacuum Condition

ฉัตรชัย นิมมล[1] สักกมน เทพหัสดิน ณ อยุธยา[2] ธนิต สวัสดิ์เสวี[1] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1]
Chatchai Nimmol[1], Sakamon Devahastin[2], Thanit Swasdisevi[1] and Somchart Soponronnarit[1]

ABSTRACT

Drying of carrot cube by far-infrared radiation (FIR) under vacuum was carried out to investigate the effects of various parameters on the drying kinetics and quality of the dried product. Drying experiments were conducted at the controlled surface temperatures of carrot of 60, 70, and 80°C and absolute pressures of 7 and 10 kPa. The quality of the dried carrot was evaluated in terms of shrinkage, rehydration ability and color. The results showed that the time required for drying decreased with an increase of the controlled surface temperature and a decrease of the drying chamber pressure. A decrease in the controlled surface temperature and an increase in the drying pressure led to an increase in shrinkage and rehydration ability of the dried carrot. However, the influences of the controlled surface temperature and the drying pressure on the redness and lightness of the product were not significant ($p>0.05$).

Keywords: drying, far-infrared, surface temperature, vacuum

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้งแครอทด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (FIR) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อทำความเข้าใจถึงจลนพลศาสตร์การอบแห้ง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงคุณภาพของแครอทที่ได้หลังการอบแห้ง เช่น การหดตัว ความสามารถในการดูดน้ำกลับคืน และ สีที่เปลี่ยนแปลง การทดลองอบแห้งกระทำที่อุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอท 60 70 และ 80°C และความดันในห้องอบแห้ง 7 และ 10 kPa การอบแห้งแครอทจะดำเนินการจนกระทั่งความชื้นลดลงเหลือ 0.07 kg/kg (d.b.) ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า เวลาที่ใช้อบแห้งจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอท รวมถึงลดความดันภายในห้องอบแห้ง ในด้านคุณภาพของแครอทพบว่า แครอทซึ่งอบแห้งโดยใช้เวลานานจะมีการหดตัวเพิ่มขึ้นและมีความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนสูง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงสีของแครอทจะไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ การอบแห้ง รังสีอินฟราเรดไกล อุณหภูมิควบคุมที่ผิว สุญญากาศ

คำนำ

แครอท (Carrot) นับได้ว่าเป็นหนึ่งในผักที่ได้รับความนิยมบริโภคเนื่องจากมีปริมาณวิตามินสูงและมีเส้นใย (Fiber) มาก การบริโภคแครอทสามารถทำได้หลายรูปแบบรวมถึงแครอทอบแห้ง การอบแห้งแครอทด้วยลมร้อนถือเป็นวิธีที่กระทำกันมาตั้งแต่อดีต การอบแห้งวิธีนี้ต้องใช้พลังงานมาก ใช้เวลานาน รวมถึงทำให้คุณภาพของแครอทเปลี่ยนแปลงไปในทางที่แย่ลง ปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาวิธีการอบแห้งลักษณะอื่นขึ้นมามากมายเพื่อลดข้อพกพร่องที่เกิดจากการอบแห้งด้วยลมร้อน หนึ่งในบรรดาวิธีการอบแห้งดังกล่าวก็คือ การอบแห้งโดยการแผ่รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation drying) ในการอบแห้งแบบนี้พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกวัสดุที่ต้องการอบแห้งดูดกลืนไว้โดยตรง อัตราการอบแห้งจึงสูง ส่งผลให้ใช้พลังงานในการอบแห้งน้อย (Ginzburg, 1969; Sandu, 1986; Ratti and Mujumdar, 1995; Afzal, 1999)

เนื่องจากผลิตภัณฑ์อาหารส่วนใหญ่มักได้รับความเสียหายหรือสูญเสียคุณภาพเมื่อได้รับความร้อนสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอบแห้งผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยวิธีการที่นิยมใช้กันก็คือการอบแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ

[1]คณะพลังงานและวัสดุ [2]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[1]School of Energy and Materials, [2]Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid, Tungkru, Bangkok 10140

(Jaya and Das, 2003; Droumas and Schubert; 1996) การอบแห้งวิธีนี้จะทำให้น้ำในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งที่มีคุณภาพดีขึ้น รวมถึงใช้เวลาในการอบแห้งสั้นลง

เพื่อรวมเอาข้อดีของการอบแห้งทั้งสองวิธีที่กล่าวข้างต้นเข้าด้วยกัน Mongpraneet, et al. (2002a,b) ได้เสนอแนวทางการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล (Far-Infarred radiation drying: FIR) ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ในการศึกษาได้กระทำที่ความดันในห้องอบแห้งและความเข้มในการแผ่รังสีหลายระดับ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (ใบหอมสด) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มในการแผ่รังสีเพิ่มขึ้น ลักษณะเช่นนี้อาจทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงเกินไป ส่งผลให้เกิดการไหม้เกรียมที่ผิว เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรใช้อุณหภูมิที่ผิวของผลิตภัณฑ์เป็นตัวควบคุมความเข้มในการแผ่รังสี

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือหาผลกระทบของอุณหภูมิควบคุมที่ผิวของผลิตภัณฑ์ (Controlled surface temperature) และความดันในห้องอบแห้งที่มีต่อจลนพลศาสตร์การอบแห้งและคุณภาพของแครอททรงลูกบาศก์ (Carrot cube) ที่อบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ (FIR-vacuum drying) ในการศึกษานี้จะใช้อุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทเป็นตัวควบคุมการทำงานของหลอดรังสีอินฟราเรด ผลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการ อบแห้งแครอททรงลูกบาศก์ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำ (Low-pressure superheated steam drying: LPSSD) และการอบแห้งแบบสุญญากาศซึ่งเกิดขึ้นภายในห้องอบแห้งที่มีลักษณะเหมือนกัน (Devahastin et al., 2004)

อุปกรณ์และวิธีการ

Figure 1 แสดงลักษณะของเครื่องอบแห้งที่ใช้ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ห้องอบแห้ง (Drying chamber) ที่ทำจากเหล็กสเตนเลสขนาดภายใน $45 \times 45 \times 45$ cm^3 โดยมีการหุ้มด้วยฉนวนความร้อน (Insulator) ที่ผนังด้านนอกทั้งหมด ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ Nash รุ่น ET32030 (Germany) ซึ่งใช้สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศภายในห้องอบแห้ง หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกล (Far-infrared heater) ยี่ห้อ INFAPARA ขนาด 220V/250W ซึ่งถูกควบคุมการทำงานด้วยชุดควบคุม (Temperature controller)

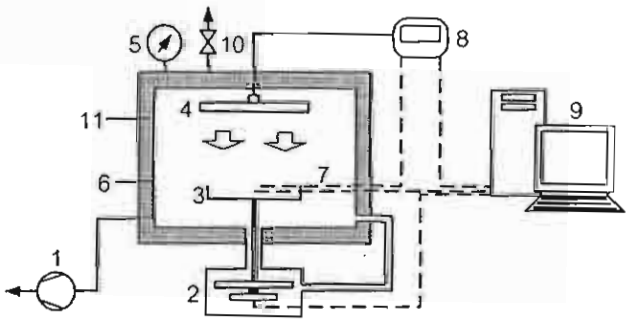


Figure 1 A schematic sketch of FIR-Vacuum dryer. 1) Vacuum pump; 2) Load cell; 3) Sample tray; 4) far-infrared heater; 5) Pressure gauge; 6) Drying chamber; 7) Thermocouples; 8) Temperature controller; 9) PC with data acquisition card; 10) Vacuum break-up valve; 11) Insulator

ถาดสำหรับวางวัสดุที่นำมาอบแห้ง (Sample holder) มีขนาด 12×12 cm^2 ทำจากเหล็กสเตนเลส มวลของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุก 1 นาที) โดยอาศัยอุปกรณ์วัดน้ำหนัก (Load Cell) ที่มีความละเอียดในการวัด 0.1 g ยี่ห้อ Minebea รุ่น Ucg-3 kg (Japan) ซึ่งติดตั้งภายในห้องขนาดเล็กที่ด้านล่างของห้องอบแห้งและต่อถึงกันด้วยท่ออ่อนเพื่อทำให้เกิดความสมดุลกับความดันในห้องอบแห้ง มวลของวัสดุที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องแสดงผลและอุปกรณ์บันทึกข้อมูลยี่ห้อ AND A&D Co. รุ่น AD 4329 (Japan) ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุที่นำมาอบแห้งจะถูกวัดอย่างต่อเนื่อง (ทุก 30 วินาที) โดยอาศัยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouples) ซึ่งมีความแม่นยำในการวัด $\pm$ 1°C โดยเทอร์โมคัปเปิลจะต่อกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณยี่ห้อ Omega Engineering รุ่น EXP-32 (USA) อุณหภูมิที่วัดได้จะถูกส่งผ่านอุปกรณ์ขยายสัญญาณไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ซึ่งติดตั้งการ์ดบันทึกข้อมูล (Data acquisition card) ยี่ห้อ Omega Engineering รุ่น CIO-DAS16Jr (USA) เอาไว้ ข้อมูลที่ได้จะถูกอ่านและบันทึกโดยอาศัยโปรแกรม LABTECH NOTEBOOK เวอร์ชัน 12.1 ของ Laboratory Technology Corp. (USA)

การอบแห้งแต่ละครั้งจะใช้แครอททรงลูกบาศก์ขนาด 1 X 1 X 1 cm^3 ประมาณ 40 g (ประมาณ 35 ชิ้น) ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้น 9 kg/kg (d.b.) หรือประมาณ 90% (w.b.) การทดลองอบแห้งจะกระทำที่อุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอท 60 70 และ 80°C โดยใช้ความดันในห้องอบแห้ง 7 และ 10 kPa การอบแห้งจะดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของแครอทลดลงเหลือ 0.07 kg/kg (d.b.)

ปริมาตรของแครอทที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการอบแห้ง สามารถแสดงได้ด้วยเปอร์เซ็นต์การหดตัว (%Shrinkage) ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\%\text{Shrinkage} = \left(\frac{V_i - V}{V_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ V_i และ V คือ ปริมาตรของแครอทก่อนและหลังอบแห้ง ตามลำดับ

ความสามารถในการดูดน้ำกลับคืน (Rehydration ability: R) ของแครอทอบแห้งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{V_{after}}{V} \quad (2)$$

เมื่อ V และ V_{after} คือ ปริมาตรของแครอทก่อนและหลังการทดสอบการดูดน้ำกลับคืน ตามลำดับ

สีของแครอทที่เปลี่ยนแปลงหลังการอบแห้งซึ่งพิจารณาเฉพาะความเป็นสีแดง (a) และความสว่าง (L) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta a = \frac{a - a_i}{a_i} \quad (3)$$

$$\Delta L = \frac{L - L_i}{L_i} \quad (4)$$

เมื่อ a_i และ a คือ ความเป็นสีแดงของแครอทก่อนและหลังการอบแห้ง ตามลำดับ

L_i และ L คือ ความสว่างของแครอทก่อนและหลังการอบแห้ง ตามลำดับ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดจะถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลการทดสอบคุณภาพของแครอทที่ได้หลังการอบแห้งในแต่ละเงื่อนไขการทดลองจะแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างโดยใช้ Duncan's Test ซึ่งค่าเฉลี่ยจะถูกพิจารณาให้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ p=0.05 การทดสอบทางสถิตินี้จะกระทำโดยใช้โปรแกรม SPSS

ผลและวิจารณ์

1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งแครอท

Table 1 และ Figure 2 แสดงเวลาที่ใช้ในการอบแห้งและการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ ตามลำดับ จะเห็นว่า เวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะลดลง หากเพิ่มอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทและลดความดันในห้องอบแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่า การอบแห้งแครอทด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศจะใช้เวลาน้อยกว่าการอบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำ และการอบแห้งแบบสุญญากาศในทุกเงื่อนไขการทดลอง แม้ว่าในบางเงื่อนไขการทดลองจะเห็นความแตกต่างของเวลาที่ใช้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอบแห้งแบบสุญญากาศ โดยอาจเป็นผลมาจากแครอทที่นำมาอบแห้งมีความหนาค่อนข้างมากด้วยเหตุที่รังสีอินฟราเรดไกลไม่สามารถทะลุทะลวงเข้าในเนื้อแครอทได้มากนัก ดังนั้นจึงไม่อาจเห็นความแตกต่างของการนำรังสีอินฟราเรดไกลมาใช้ในการอบแห้งได้อย่างชัดเจน เมื่ออบแห้งวัสดุที่มีความหนามาก ๆ

Figure 2 ยังแสดงให้เห็นว่า แครอทที่อบแห้งภายใต้ความดันเท่ากันจะสูญเสียความชื้นในอัตราใกล้เคียงกันในระหว่าง 70 นาทีแรกของการอบแห้ง แม้ว่าอุณหภูมิควบคุมที่ผิวจะแตกต่างกันก็ตาม เนื่องจากการอบแห้งในช่วงดังกล่าวอยู่ในช่วงการอบแห้งคงที่ และอุณหภูมิที่ผิวของแครอทจะมีค่าคงที่ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิอิ่มตัว ณ ความดันในห้องอบแห้ง (ไม่ใช่อุณหภูมิอิ่มตัว เนื่องจากแครอทได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลด้วย) เมื่อผิวของแครอทเริ่มแห้ง อุณหภูมิก็จะเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อิทธิพลของอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทมีมากขึ้น ในช่วงท้ายของการอบแห้ง แครอทที่อบแห้งโดยใช้อุณหภูมิควบคุมที่ผิวสูงกว่าจะมีการลดลงของความชื้นเร็วกว่า

Table 1 Drying time of carrot cube at different drying methods and drying conditions

Temperature, °C	Pressure, kPa	Drying time, min		
		FIR-vacuum drying	LPSSD[1]	Vacuum drying[1]
60	10	238	N/A	241
	7	202	389	235
70	10	193	290	223
	7	171	280	205
80	10	154	210	175
	7	130	198	159

[1]Devahastin et al. (2004)

N/A implies that the final moisture of carrot of 0.07 kg/kg (d.b.) was not obtainable at this condition

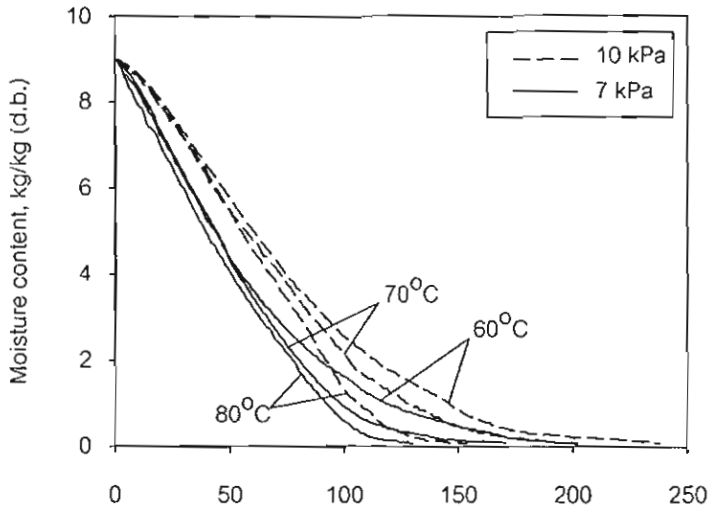


Figure 2 Drying curves of carrot cube undergoing FIR-vacuum drying at different drying conditions

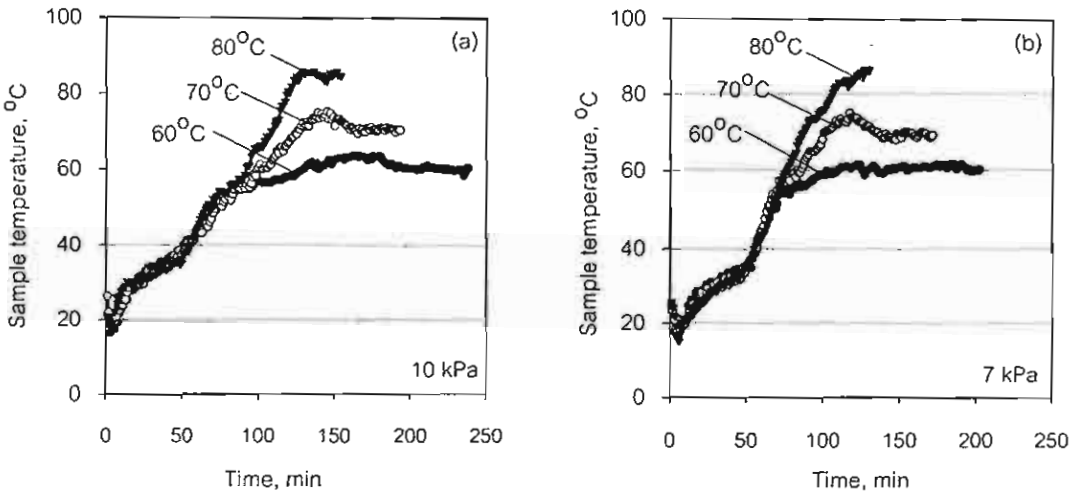


Figure 3 Temperature evolution of carrot cube undergoing FIR-vacuum drying at different drying conditions

Figure 3 แสดงการเปลี่ยนแปลอุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ จะเห็นว่า อุณหภูมิของแครอท (วัดที่กึ่งกลางของแครอท) ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกของการอบแห้ง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของความดันในห้องอบแห้ง ส่งผลให้ความชื้นที่ผิวแรอทบางส่วนระเหย หลังจากนั้นอุณหภูมิของแครอทจะเพิ่มขึ้นช้า ๆ จนถึงอุณหภูมิควบคุมที่ผิวที่กำหนดไว้

Figure 3 (a) และ (b) แสดงให้เห็นว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอทในช่วง 90 นาทีแรก (กรณีอบแห้งที่ 10 kPa) และในช่วง 75 นาทีแรก (กรณีอบแห้งที่ 7 kPa) มีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะใช้อุณหภูมิควบคุมที่ผิวเท่าไร หลังจากนั้นอุณหภูมิของแครอทจะเพิ่มขึ้นสู่อุณหภูมิควบคุมที่ผิวที่กำหนดไว้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความจริงที่ว่า หลอดกำเนิดรังสีอินฟราเรดไกลจะทำงานอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งผิวของแครอทมีอุณหภูมิเท่ากับที่กำหนด ดังนั้น ปริมาณของรังสีอินฟราเรดที่แครอทได้รับจึงมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงเวลาดังกล่าว

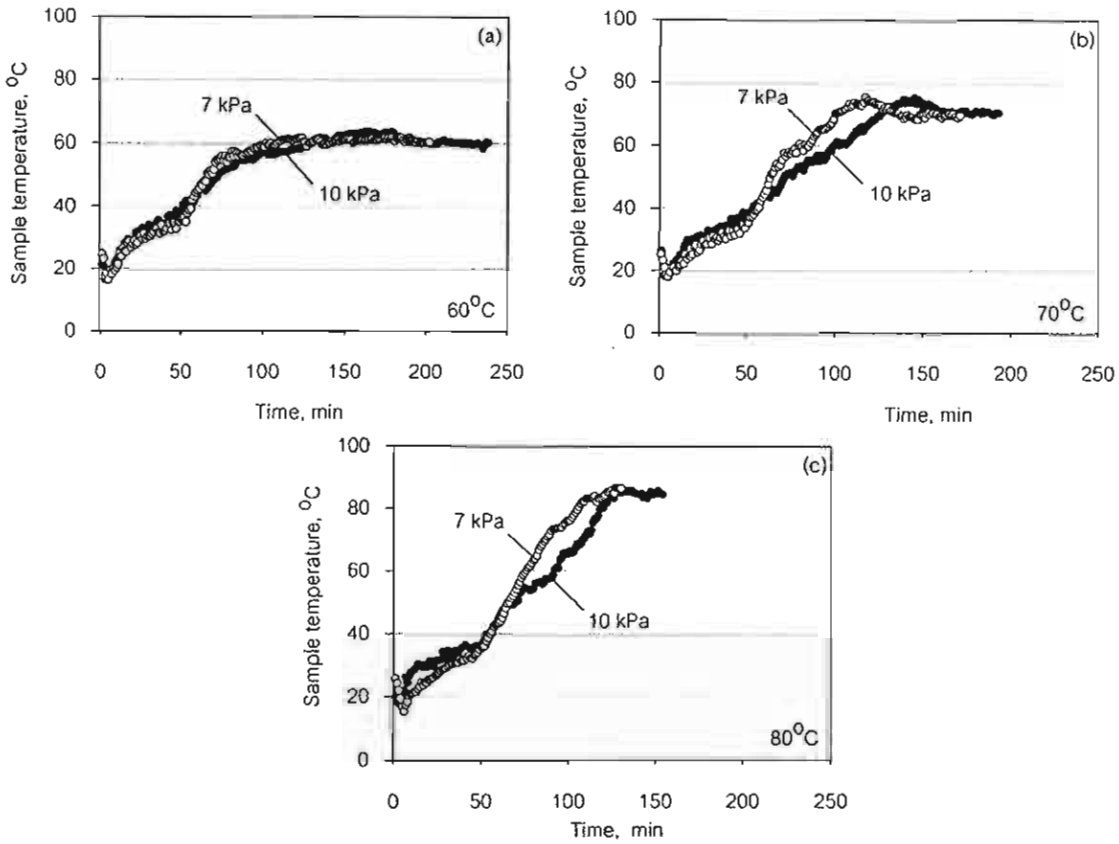


Figure 4 Temperature evolution of carrot cube undergoing FIR-vacuum drying at different drying chamber pressure

Figure 4 (a) ถึง (c) แสดงผลกระทบของความดันในห้องอบแห้งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอท จะเห็นว่า อุณหภูมิของแครอทซึ่งอบแห้งที่ความดันต่ำกว่า (7 kPa) จะมีค่าต่ำกว่ากรณีอบแห้งที่ความดันสูง (10 kPa) เล็กน้อยในช่วง 60 นาทีแรกของการอบแห้ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ความดันในห้องอบแห้งมีบทบาทมากต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของแครอท หลังจากที่ปริมาณความชื้นในแครอทลดลงไปมากแล้ว (หลังจาก 60 นาทีผ่านไป) อิทธิพลของความดันในห้องอบแห้งจะมีไม่มาก ความร้อนในรูปของความร้อนสัมผัสที่แครอทได้รับจากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดจะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแครอท ลักษณะดังกล่าวนี้จะส่งผลให้อุณหภูมิของแครอทที่อบแห้งภายใต้ความดันที่ต่ำกว่ามีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่ากรณีอบแห้งภายใต้ความดันที่สูงกว่า

2. การหดตัวของแครอท

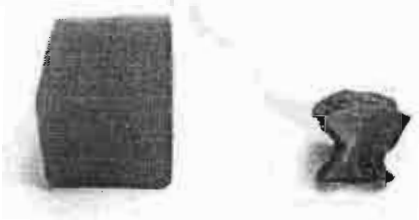
Table 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การหดตัวของแครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ จะเห็นว่า แครอทซึ่งอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ใช้เวลามาก เช่น อบแห้งภายใต้ความดันสูง (เช่นที่ 10 kPa) หรืออบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวให้มีค่าต่ำมีแนวโน้มที่จะหดตัวมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้อุณหภูมิภายในแครอทเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในระหว่างการอบแห้ง ดังนั้นความชื้นจึงระเหยออกจากแครอทอย่างค่อยเป็นค่อยไป ส่งผลให้โครงสร้างภายในของแครอทเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ แต่การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องกว่ากรณีที่อบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ใช้เวลาน้อยซึ่งการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นไปอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม หากอบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวให้มีค่าสูง การหนใบหัวหอมสดซึ่งกระทำโดย Mongpraneet et al. (2002b) ซึ่งพบว่าการหดตัวของใบหอมสดจะมีมากหากอบแห้งที่ระดับความเข้มในการแผ่รังสีต่ำ

Table 2 Shrinkage and rehydration ratio of dried carrot at different drying conditions[1]

Temperature, °C	Pressure, kPa	Shrinkage, %	Rehydration ability
60	10	92.14 ± 0.22^{d}	4.19 ± 0.08^{d}
	7	91.87 ± 0.57^{d}	4.07 ± 0.14^{c}
70	10	91.40 ± 0.27^{c}	4.00 ± 0.11^{bc}
	7	91.12 ± 0.17^{b}	3.93 ± 0.09^{ab}
80	10	90.75 ± 0.23^{ab}	3.88 ± 0.06^{a}
	7	90.61 ± 0.60^{a}	3.87 ± 0.05^{a}

[1]Values in the same column with different superscripts means that the values are significantly different ($p<0.05$)

เมื่อพิจารณาถึงวิธีที่ใช้ในการอบแห้ง จะพบว่าการหดตัวของแครอทที่ได้จะไม่แตกต่างจากแครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำและการอบแห้งแบบสุญญากาศ อย่างไรก็ตามรูปแบบการหดตัวของแครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศจะมีความสม่ำเสมอน้อยกว่ากรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำ (Devahastin et al., 2004) Figure 5 แสดงลักษณะของแครอทที่ได้จากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ



(a) before (b) after

Figure 5 Photographs of FIR-vacuum dried carrot cube both before and after drying

3. ความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนของแครอท

จาก Table 2 จะเห็นว่าความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนของแครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม หากอบแห้งด้วยเงื่อนไขที่ใช้เวลาต่างกันมาก ๆ ก็จะทำให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยแครอทซึ่งอบแห้งภายใต้เงื่อนไขที่ใช้เวลาน้อย (อบแห้งภายใต้ความดันต่ำหรืออบแห้งโดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวให้มีค่าสูง) จะมีความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนต่ำกว่า (คืนตัวได้น้อยกว่า) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการอบแห้งภายใต้เงื่อนไขดังกล่าวทำให้อุณหภูมิภายในแครอทเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงในช่วงท้ายของการอบแห้ง ส่งผลให้เกิดชั้นแข็งภายในเนื้อแครอทซึ่งเป็นตัวกีดขวางหรือต้านทานการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่เนื้อแครอท ลักษณะของแครอทก่อนและหลังการดูดน้ำกลับคืนแสดงให้เห็นดัง Figure 6

(a) before (b) after

Figure 6 Photographs of FIR-vacuum dried carrot cube both before and after rehydration

เมื่อเปรียบเทียบกับแครอทที่อบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำและการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Devahastin et al., 2004) จะพบว่า แครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟาเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศมีความสามารถในการดูดน้ำกลับคืนน้อยกว่า โดยอาจมีสาเหตุมาจากการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลจะทำให้โครงสร้างภายในเนื้อแครอทเสียหายเร็วกว่า รวมถึงทำให้เกิดชั้นแข็งในเนื้อแครอทอย่างรวดเร็วซึ่งกีดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่ภายในเนื้อแครอท

4. สีของแครอท

Table 3 แสดงสีของแครอทที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการอบแห้งทั้งในส่วนของความเป็นสีแดงและความสว่าง จะเห็นได้ว่า แครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศจะให้สีแครอทที่แดงกว่าและคล้ำกว่าแครอทสด สังเกตได้จาก $\Delta L/L_i$ ที่มีค่าเป็นลบและ $\Delta a/a_i$ ที่มีค่าเป็นบวก อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาโดยรวมแล้วจะพบว่าสีของแครอทที่อบแห้งภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ในที่นี้ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากช่วงความดันและอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทที่ใช้ในการทดลองมีค่าไม่กว้างพอ

เมื่อเปรียบเทียบกับแครอทที่อบแห้งแครอทด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำและการอบแห้งแบบสุญญากาศ (Devahastin et al., 2004) จะพบว่า แครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศมีสีคล้ำกว่าแครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ แต่มีสีสว่างกว่าแครอทที่อบแห้งด้วยสุญญากาศ ในส่วนของความเป็นสีแดงของแครอท จะพบว่า แครอทที่อบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศมีสีแดงกว่าแครอทรอทที่อบแห้งด้วยสุญญากาศ แต่แดงน้อยกว่าแครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ความดันต่ำ

Table 3 Redness and lightness of dried carrot at different drying conditions[1]

Temperature, °C	Pressure, kPa	Δa	ΔL
60	10	0.084 ± 0.008^{a}	-0.088 ± 0.005^{b}
	7	0.087 ± 0.007^{a}	-0.087 ± 0.005^{ab}
70	10	0.080 ± 0.008^{a}	-0.090 ± 0.006^{a}
	7	0.081 ± 0.007^{a}	-0.090 ± 0.007^{a}
80	10	0.080 ± 0.008^{a}	-0.091 ± 0.004^{a}
	7	0.080 ± 0.006^{a}	-0.089 ± 0.008^{a}

[1]Values in the same column with different superscripts means that the values are significantly different ($p<0.05$)

สรุป

ผลการทดลองอบแห้งแครอทด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศแสดงให้เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการ อบแห้งจะลดลง หากเพิ่มอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทและลดความดันในห้องอบแห้ง อิทธิพลของอุณหภูมิควบคุมที่ผิวแครอทและความดันในห้องอบแห้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแครอท การอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศจะใช้เวลาในการอบแห้งน้อยกว่ากรณีการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้สภาวะความดันต่ำและการอบแห้งแบบสุญญากาศ อย่างไรก็ตาม แครอทที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายได้สภาวะความดันต่ำจะมีความสามารถในการคืนตัวสูงกว่า และมีสีที่แดงกว่าแครอทที่ได้จากการอบแห้งด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลภายใต้สภาวะสุญญากาศ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ให้การสนับสนุนด้านการเงินสำหรับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

Afzal, T.M., Abe, T. and Hikida, Y., 1999, "Energy and Quality Aspects During Combined FIR-Convection Drying of Barley", *Journal of Food Engineering*, Vol. 42, pp. 117-182.

Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S. and Mujumdar, A.S., 2004, "A Comparative Study of Low-Pressure Superheated Steam and Vacuum Drying of a Heat-Sensitive Material", *Drying Technology*, Vol. 22, pp. 1845-1867.

Droumas, A.E. and Schubert, H., 1996, "Microwave Application in Vacuum Drying of Fruits", *Journal of Food Engineering*, Vol. 28, pp. 203-209.

Ginzburg, A.S., 1969, "Application of Infrared Radiation in Food Processing", Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London.

Jaya, S. and Das, H., 2003, "A Vacuum Drying Model for Mango Pulp", *Drying Technology*, Vol. 21, pp. 1215-1234.

Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T., 2002a, "Accelerated Drying of Welsh Onion by Far Infrared Radiation under Vacuum Conditions", *Journal of Food Engineering*, Vol. 55, pp. 147-156.

Mongpraneet, S., Abe, T. and Tsurusaki, T., 2002b, "Far Infrared-Vacuum and Convection Drying of Welsh Onion", *Transactions of the ASAE*, Vol. 45, pp. 1529-2535.

Ratti, C. and Mujumdar, A.S., 1995, "Infrared Drying", pp. 567-588, in A.S. Mujumdar (Ed.) Handbook of Industrial Drying: Volume 1, 2nd edition, Marcel Dekker, New York.

Sandu, C., 1986, "Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis", *Biotechnology Progress*, Vol. 2, pp. 109-119.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

การอบแห้งแผ่นโฟมที่ทำจากกล้วยสุก

Drying of Foam-Mat Ripe Bananas

รติยา ธุวพาณิชยานันท์[1] สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1]
Ratiya Thuwapanichayanan[1], Somkiat Prachayawarakorn[2] and Somchart Soponronnarit[1]

Abstract

Crisp bananas can be produced by several processes i.e. frying and high temperature drying. In this work, the approach proposed is to change its physical structure to make it more porous before drying. Foaming and drying of ripe bananas were investigated. The influences of hot air temperatures and densities of banana foam mats on drying rates and qualities (e.g. color and texture) were studied. Banana puree was foamed to lower density (0.5-0.8 g/ml) after whipping in the Kitchen Aid Mixer, Model 5K5SS (set at its maximum speed) by adding 10% of isolated soy protein as foam inducer. 3 mm thick banana foam mats were dried at temperatures 60, 70 and 80 ^{o}C and at air velocity 0.3 m/s in cabinet dryer. When the foam mats were dried, the internal structure of the mat appeared to get more porous to facilitate rapid drying. Drying rate was higher when drying temperature was increased and density of banana foam mats was decreased but quality of the dried banana foam mats in terms of color had a slight difference. Drying temperature and density of banana foam mats had a significant effect on hardness of which the value was decreased with increasing drying temperature and decreasing density of banana foam mats.

KEYWORDS: Crispness, Foam, Hardness, Hot air, Isolated soy protein, Nutrition food, Quality

บทคัดย่อ

เนื่องจากการอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นที่อุณหภูมิต่ำจะใช้เวลาค่อนข้างนานในการลดความชื้นจนกระทั่งได้เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบ ดังนั้นแนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งคือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อกล้วย โดยนำกล้วยไปผ่านกระบวนการโฟมมิ่ง เพื่อเพิ่มความมีรูพรุนให้กับเนื้อกล้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการอบแห้งกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งด้วยอากาศร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อน และความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วย เช่น สี และเนื้อสัมผัสของกล้วยหลังการอบแห้ง สำหรับกระบวนการโฟมมิ่งนั้นจะใช้ Isolated soy protein ปริมาณ 10% เป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดฟองอากาศในเนื้อกล้วย โดยผสมลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น แล้วนำไปผ่านการกวนด้วยเครื่องผสมยี่ห้อ Kitchen Aid รุ่น 5K5SS ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของกล้วย โดยความหนาแน่นของกล้วยที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.50-0.80 g/ml และความหนาของกล้วย 3 มิลลิเมตร ในส่วนของกระบวนการอบแห้งนั้นจะทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 60, 70 และ 80 ^{o}C และความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งต่ำจะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ขณะที่คุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสนั้นพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งต่ำจะให้ค่าความแข็งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิของตัวกลางต่ำและความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งสูง

คำสำคัญ ความกรอบ ความแข็ง คุณภาพ โปรตีนถั่วเหลือง โฟม อากาศร้อน อาหารโภชนาการ

---

[1] คณะพลังงานและวัสดุ [2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[1] School of Energy and Matenals [2] Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand

คำนำ

กล้วยหอมเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศ ในบางฤดูกาลจะมีกล้วยหอมมากเกินความต้องการ ซึ่งถ้าปล่อยทิ้งไว้จะก่อให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจ ดังนั้นการแปรรูปกล้วยเป็นกล้วยอบแห้งจึงเป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งทำให้สามารถเก็บไว้ได้นาน และส่งออกขายต่างประเทศได้อีกด้วย ซึ่งกระบวนการอบแห้งกล้วยมีหลายวิธี เช่น การอบแห้งแบบถาดด้วยอากาศร้อน การอบแห้งแบบถาดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง การอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกล เป็นต้น การอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นด้วยอากาศร้อนเป็นวิธีที่ประหยัดที่สุด ถ้าอบแห้งที่อุณหภูมิไม่สูงมากจะช่วยลดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลซึ่งถือว่าเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งในอุตสาหกรรมการแปรรูปกล้วยได้ แต่ค่อนข้างใช้เวลานาน เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกล้วยอันประกอบด้วยน้ำตาล และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ทำให้ความชื้นเคลื่อนที่ออกสู่ผิวนอกได้ยาก แนวทางหนึ่งซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งคือ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อกล้วย โดยนำกล้วยไปผ่านกระบวนการโฟมมิ่งก่อนนำไปอบแห้ง เพื่อเพิ่มความมีรูพรุนให้กับเนื้อกล้วย และลดความหนาแน่นของกล้วยลง ซึ่งการลดระยะเวลาในการอบแห้งยังช่วยเพิ่มคุณภาพของกล้วยได้อีกด้วย เช่น กล้วยจะมีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยลง

การโฟมมิ่งเป็นกระบวนการทำให้อาหารอยู่ในสภาพคอลลอยด์ (ปาริฉัตร, 2545) สำหรับอาหารบางชนิด เช่น ไข่ขาว นม สามารถทำให้เกิดฟองและอยู่ในสภาพคอลลอยด์ได้ด้วยการตีอัดอากาศ โดยคอลลอยด์ที่ได้มีความคงตัว เนื่องจากอาหารดังกล่าวประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายน้ำได้ และ monoglycerides ซึ่งมีสมบัติในการทำให้เกิดฟองและฟองมีความเสถียร (Foam Stability) โดยโปรตีนที่ละลายน้ำได้จะเกิดการเสียสภาพหรือคลายเกลียว (Denaturation) ดังนั้นที่ผิวร่วมระหว่างน้ำกับฟองอากาศ (air-water interface) จึงเกิดโครงสร้างซึ่งสามารถทำหน้าที่กีดขวางการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์ (ฟองอากาศ) เพราะโปรตีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่พอที่จะทำหน้าที่เป็นเครื่องกีดขวางไม่ให้ฟองอากาศเกาะกลุ่มกันได้ และทำหน้าที่หน่วงให้การเคลื่อนที่ของฟองอากาศช้าลง ทำให้ฟองอากาศรวมตัวกันได้ยากขึ้น นอกจากนี้โปรตีนยังมีสมบัติในการยืดหยุ่นที่ดี ดังนั้นที่บริเวณผิวร่วม โปรตีนจะทำหน้าที่ในการเป็นตัวต้านทานต่อแรงเฉือนและแรงกดที่จะกระทำต่อฟองอากาศ และช่วยลดแรงตึงผิวของฟองอากาศ ซึ่งส่งผลให้ฟองอากาศมีความเสถียร (Cherry and Mcwatters, 1981) แต่สำหรับอาหารบางประเภทที่ไม่สามารถทำให้ฟองที่เกิดมีความเสถียร ก็จำเป็นต้องเติมสารผสมอาหารที่มีสมบัติในการทำให้ฟองเสถียรลงไป สารผสมอาหารดังกล่าว ได้แก่ Soy Protein Isolate, Glycerol Monostearate และ Tapioca starch เป็นต้น (Hart *et al.*, 1963) ซึ่งการทำให้อาหารเกิดฟองและฟองอากาศมีความเสถียร จะช่วยเพิ่มความมีรูพรุนให้กับอาหาร และลดความหนาแน่นของอาหารลง ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการอบแห้งกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งด้วยอากาศร้อน โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อน และความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง และคุณภาพของกล้วย เช่น สี และเนื้อสัมผัสของกล้วยหลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การโฟมมิ่ง

นำกล้วยหอมระยะสุกที่ 5 ซึ่งเปลือกเป็นสีเหลืองแต่ปลายยังเป็นสีเขียว (ความหวานของน้ำตาลประมาณ 21-23°BRIX) มาปอกเปลือกและหั่นเป็นแผ่น จากนั้นทำการพรีทรีทเมนต์ด้วยการแช่ในสารละลายโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ความเข้มข้น 1% (w/w) นาน 2 นาที (Krokida *et al.*, 2000) และล้างด้วยน้ำกลั่นนาน 30 วินาที นำกล้วยที่ผ่านการพรีทรีทเมนต์มาสับให้ละเอียด และปั่นด้วยเครื่องปั่น (Waring blending) เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นใส่ Soy Protein Isolated (SPI) ลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น ปริมาณ 10% ใช้ช้อนกวนให้เข้ากัน แล้วนำไปผ่านการกวนด้วยเครื่องผสมยี่ห้อ Kitchen Aid รุ่น 5K5SS โดยใช้ใบกวนคือ Beater (แสดงดังรูปที่ 1) ด้วยอัตราเร็วสูงสุด เพื่อลดความหนาแน่นของกล้วย ในการกวนแต่ละครั้งจะใช้กล้วยประมาณ 800-900 กรัม เพื่อให้ใบกวนสามารถสัมผัสกับเนื้อกล้วยได้อย่างทั่วถึง สำหรับการวัดความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านการกวนแล้ว (โฟมกล้วย) ทำโดยตวงโฟมกล้วยใส่บีกเกอร์ปริมาณ 20 ml แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก ดังนั้นจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของโฟมกล้วยได้ โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 0.50-0.80 g/ml

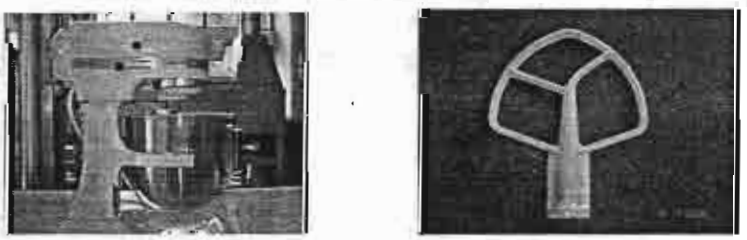


Figure 1 (a) Kitchen Aid Mixer Model 5K5SS, (b) Beater

2. การอบแห้งด้วยอากาศร้อน

เครื่องอบแห้งที่ใช้เป็นเครื่องอบแห้งแบบตู้ ซึ่งประกอบด้วยระบบอบแห้งแบบปั๊มความร้อน และระบบอบแห้งแบบใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบอบแห้งที่ใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้งเท่านั้น (รายละเอียดของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 2) มีลักษณะการทำงานคือ อากาศภายในระบบจะถูกหมุนเวียนโดยพัดลม (Blower) ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ โดยความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองคือ 0.3 เมตรต่อวินาที และอากาศจะถูกทำให้ร้อนด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อน (Heater) โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 60, 70 และ 80 °C จากนั้นชั่งน้ำหนักตะแกรงขณะไม่มีแผ่นโฟมกล้วย (หรือกล้วยหั่นชิ้น) และชั่งน้ำหนักตะแกรงขณะมีแผ่นโฟมกล้วย (หรือกล้วยหั่นชิ้น) ก่อนนำเข้าห้องอบแห้ง และนำออกมาชั่งน้ำหนักทุก 10 นาที และอบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง)

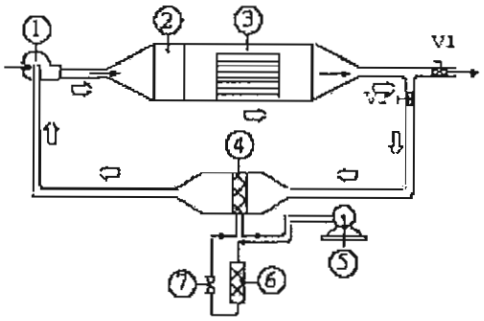


Figure 2 Drying system: (1) air blower, (2) heater, (3) drying chamber, (4) evaporator (5) compressor, (6) condenser, and (7) expansion valve

3. การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของกล้วยหลังการอบแห้ง จะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TAXTi 2 ค่าความถูกต้อง ±0.001N ทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดสอบเป็นหัวกดทรงกระบอกตัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ความเร็วของหัวกด 1 mm/s ใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 10 ตัวอย่าง

ผลและวิจารณ์

1 ความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่ง

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมกล้วยเมื่อใช้เวลาในการกวนแตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้เวลาในการกวนนานขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลง โดยความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลงเหลือ 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml เมื่อใช้เวลาในการกวน 50, 27 และ 5 นาที ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้เวลาในการกวนมากกว่า 50 นาที เนื่องจากจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเพิ่มขึ้น (Hart *et al.*, 1963) ทำการทดลองกวนมะเขือเทศที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Soluble Solids) 34% โดยใช้ Glyceryl Monostearate เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดฟองและทำให้ฟองมีความเสถียร พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกวนนานเกินไป (มากกว่า 12 นาที) จะทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นเกิดการยุบตัว (Collapse) หรืออาจเกิดการรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ซึ่งไม่มีเสถียร

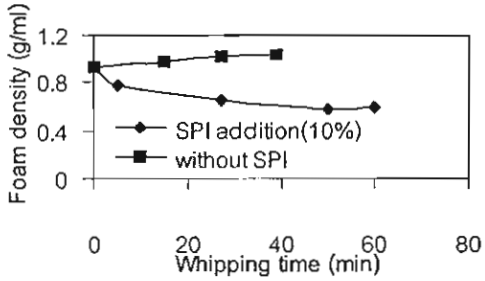


Figure 3 Density of banana foams as a function of whipping time (Soy Protein Isolate addition 10%)

2 ผลการอบแห้งแผ่นโฟมกล้วยด้วยอากาศร้อน

เนื่องจากความชื้นเริ่มต้นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่ง กล้วยหั่นชิ้น และกล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้น โดยไม่ใส่ SPI มีค่าต่างกัน โดยความชื้นเริ่มต้นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งอยู่ในช่วง 2.3-2.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ในขณะที่ความชื้นเริ่มต้นของกล้วยหั่นชิ้น และกล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้นโดยไม่ใส่ SPI อยู่ในช่วง 3-3.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจึงอธิบายการเปลี่ยนแปลงความชื้นในรูปของอัตราส่วนความชื้น (Moisture Ratio) แสดงดังรูปที่ 4 จากผลการทดลองที่ได้พบว่า การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของกล้วยโดยการนำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้น (ไม่ใส่ SPI) จะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งกล้วยหั่นชิ้น แต่ทั้งในกรณีอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นและกล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้น สามารถลดความชื้นลงได้สูงสุดเหลือประมาณ 0.07 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เท่านั้น โดยกล้วยหั่นชิ้นใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง ในขณะที่กล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้นจะใช้เวลาประมาณ 7 ชั่วโมง ในขณะที่การอบแห้งกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.57±0.01 g/ml และ 0.77±0.01 g/ml สามารถลดความชื้นให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ได้

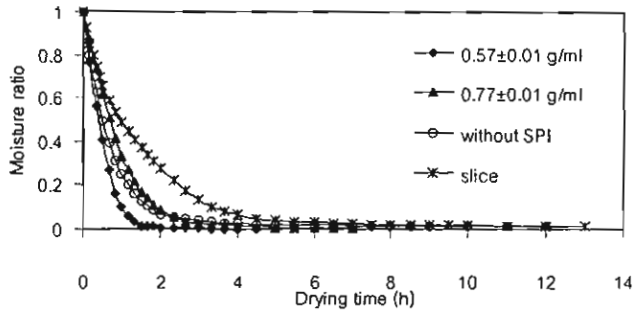


Figure 4 Drying rate curves for banana foam mats, banana slice and banana puree without Soy Protein Isolate (Hot air temperature 60°C, Air velocity 0.3 m/s)

2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีผลต่อการลดความชื้น

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศร้อนในการอบแห้งแตกต่างกัน โดยใช้ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วยอยู่ในช่วง 2.3-2.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการอบแห้ง และค่อยๆ ช้าลง ซึ่งแสดงถึงการมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราการลดลงของความชื้น (อัตราการอบแห้ง) ถ้าพิจารณาจากกราฟแสดงอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วย (รูปที่ 5 (b)) จะสามารถแบ่งอัตราการอบแห้งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลง โดยอัตราการอบแห้งเกือบจะคงที่ในช่วงความชื้น 1.6-2.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ที่ทุกเงื่อนไขการอบแห้ง (ที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C) ซึ่งช่วงนี้เป็นช่วงที่แผ่นโฟมกล้วยมีความชื้นสูงโดยเฉพาะที่บริเวณผิวจะมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นการถ่ายเทความชื้นในช่วงนี้จะเป็นการระเหยน้ำที่บริเวณผิว ซึ่งเกิดจากการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวและที่อากาศรอบนอก และที่ความชื้นต่ำกว่า 1.6 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เป็นช่วงของอัตราการอบแห้งลดลง เมื่อพิจารณาจากความชันของเส้นกราฟของอัตราการอบแห้ง (รูปที่ 5 b) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟที่ความชื้นประมาณ 0.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) แสดงว่าอัตราการอบแห้งลดลงที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 1 ช่วง นั่นคือ ช่วงที่ความชื้นมีค่า 0.5-1.6 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (First Falling Rate Drying Period) และช่วงที่ความชื้นต่ำกว่า 0.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เป็นช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง (Second Falling Rate Drying Period) โดยช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรกจะเป็นช่วงที่แผ่นโฟมกล้วยยังมีความชื้นสูงอยู่แต่ที่บริเวณผิวของแผ่นโฟมกล้วยเริ่มมีบางส่วนที่แห้ง (ยังมีบางส่วนที่เปียก) ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำอาจถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุหรือความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุและที่อากาศรอบนอกหรือทั้งสองอย่าง แต่ในช่วงที่สองที่บริเวณผิวจะไม่มีส่วนที่เปียกอยู่แล้ว ดังนั้นอัตราการระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุเท่านั้น ซึ่งการถ่ายเทความชื้นจากภายในเนื้อวัสดุมาที่ผิวจะยากและช้ากว่าการระเหยน้ำจากผิวไปยังอากาศรอบนอก ส่งผลให้อัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สองต่ำกว่าอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก (Karim and Wai, 1999) ศึกษาลักษณะเฉพาะของการอบแห้งมะเฟือง (starfruit) ที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 70 และ 90°C ความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมมะเฟืองประมาณ 0.9 (เศษส่วนมาตรฐานเปียก) พบว่า กระบวนการอบแห้งที่เกิดขึ้นจะไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ จะมีเพียงช่วงอัตราการอบแห้งลดลง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงย่อย

คือ ช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงแรก ซึ่งเป็นช่วงของการระเหยน้ำที่บริเวณชั้นผิว และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่น้ำบริเวณชั้นผิวลดลงอย่างมาก ดังนั้นในช่วงนี้จึงเป็นการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในวัสดุมายังผิวนั่นเอง ดังนั้นการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งจะมีหรือไม่มีช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่นำมาอบแห้ง

นอกจากนี้จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ จากรูปที่ 5 (a) จะเห็นได้ว่า เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 2 ชั่วโมง ในขณะที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C และ 70°C จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 6 ชั่วโมง และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตัวกลางและแผ่นโฟมกล้วยมาก ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูง ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกจากแผ่นโฟมกล้วยได้ดี

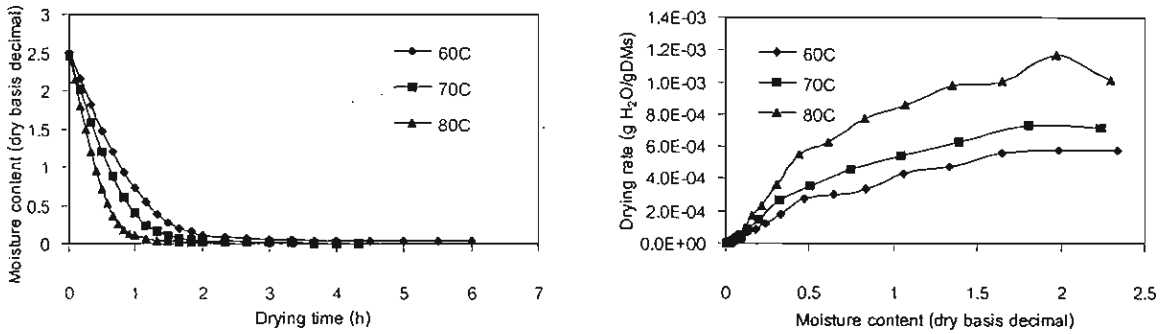


Figure 5 (a) Drying curves for banana foam mats at 60, 70 and 80°C, (b) Drying rate curves for banana foam mats at 60, 70 and 80°C (Density of banana foams 0.66±0.01 g/ml)

2.2 อิทธิพลของความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งที่มีผลต่อการลดความชื้น

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ความเร็วลม 0.3 เมตรต่อวินาที ความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วยอยู่ในช่วง 2.3-2.5 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) อบแห้งให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) จากผลการทดลองพบว่า เมื่อความหนาแน่นของโฟมกล้วยมีค่าน้อย จะให้อัตราการอบแห้งสูง และใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่ากรณีความหนาแน่นของโฟมกล้วยมีค่ามาก ดังแสดงในรูปที่ 6 (a) เมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.57±0.01 g/ml ใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 3 ชั่วโมง ในขณะที่อบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml จะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 6 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งการลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยจาก 0.77±0.01 g/ml เป็น 0.57±0.01 g/ml จะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งได้ถึง 50% เนื่องจากการทำให้โฟม กล้วยมีความหนาแน่นน้อย คือการทำให้เนื้อโฟมกล้วยมีรูพรุนมาก ส่งผลให้น้ำสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ตัวกลางได้ง่ายกว่ากรณีที่โฟมกล้วยมีความหนาแน่นสูง

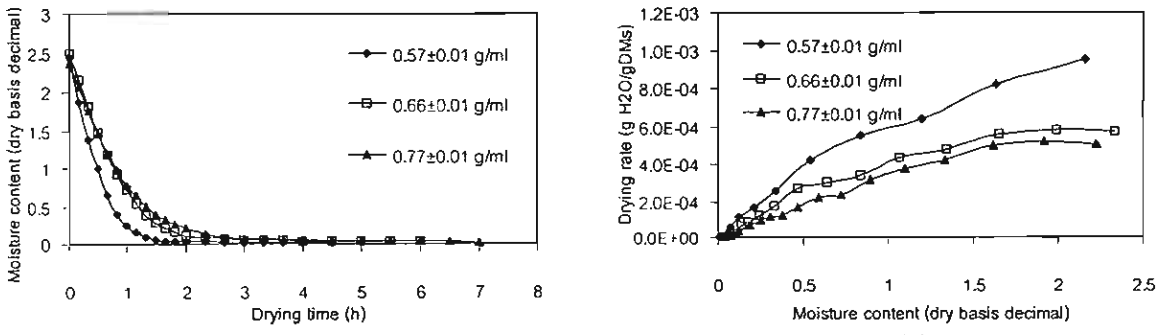


Figure 6 (a) Drying curves for banana foam mats at densities 0.57±0.01, 0.66±0.01 and 0.77±0.01 g/ml,
(b) Drying rate curves for banana foam mats at densities 0.57±0.01, 0.66±0.01 and 0.77±0.01 g/ml
(Hot air temperature 60°C, Air velocity 0.3 m/s)

สำหรับอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 6 (b) พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับอัตราการอบแห้งของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อใช้อุณหภูมิอากาศร้อนในการอบแห้งแตกต่างกัน (รูปที่ 6 b)

3 สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น

ผลจากการระเหยของน้ำทำให้ความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยมีค่าลดลง โดยความชื้นที่ลดลงนี้สามารถคำนวณได้จากสมการการแพร่ของ Fick (สมการที่ 1)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}\right] \quad (1)$$

โดยมีภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขตดังนี้

$$M(x,0) = Min\ ,\ t = 0 \quad (2)$$

$$D\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)_{x=0} = 0\ ,\ t > 0 \quad (3)$$

$$-D\left(\rho\frac{\partial M}{\partial x}\right)_{x=x_O} = h'_D\left(C_p - C_a\right)\ ,\ t > 0 \quad \left(\text{โดยที่ } C = \frac{m_v}{V_v} = \frac{P_v M_{H_2O}}{RT}\right) \quad (4)$$

ดังนั้น

$$-D\left(\rho\frac{\partial M}{\partial x}\right)_{x=x_O} = \frac{h'_D M_{H_2O}}{R}\left(\frac{P_{v,p}}{T_p} - \frac{P_{v,a}}{T_a}\right)\ ,\ t > 0 \quad (5)$$

เมื่อ a คือ อากาศร้อน, D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้น (m^2/min), h'_D คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (m/min), M_m คือความชื้นเริ่มต้นของแผ่นโฟมกล้วย (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง), M_{H_2O} คือ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำ (kg/kmol), P คือ ความดัน (kPa), p คือ แผ่นโฟมกล้วย, R คือ ค่าคงที่ของก๊าซสากล (kJ/kmol.K), T คือ อุณหภูมิ (K), t คือ เวลา (min), v คือ ไอน้ำ, x คือ ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย (m), ρ คือ ความหนาแน่นของแผ่นโฟมกล้วย (kg/m^3)

ภาวะขอบเขตในสมการ (3) และ (4) แสดงถึงอัตราการระเหยน้ำที่เป็นผลเนื่องมาจากการถ่ายเทความชื้นที่ผิวที่เกิดจากการแพร่อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวแผ่นโฟมกล้วยและที่อากาศรอบนอก ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการแพร่ของความชื้นที่ออกจากแผ่นโฟมกล้วย สำหรับวิธีการหาความดันไอในตัวกลาง ($P_{v,a}$) และที่ผิว ($P_{v,p}$) คำนวณได้จากสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$P_{v,a} = P_{sat\ at\ T_{bed}} \times RH_a \quad (6)$$

$$P_{v,p} = P_{sat\ at\ T_p} \times RH_p\ (\text{at surface}) \quad (7)$$

สำหรับค่า RH_p นั้นหาได้โดยนำสมการที่ใช้ทำนายความชื้นสมดุลของกล้วย (Garcia *et al.*, 1988) มาประยุกต์ใช้โดยแทนความชื้นสมดุลด้วยความชื้นที่ผิวของแผ่นโฟมกล้วยก็จะสามารถหาความชื้นสัมพัทธ์ที่ผิวของแผ่นโฟมกล้วยได้

Table 1 Effect of drying variables on diffusion coefficients (D) of banana foam mats, banana slices and banana puree

Variable	D(m^2/min)	R^2
Banana foam mats		
- Hot air temperature (at foam density 0.66±0.01 g/ml)		
60°C	1.7×10^{-8}	0.95
70°C	2.3×10^{-8}	0.96
80°C	3.4×10^{-8}	0.94
- Foam density (at hot air temperature 60°C)		
0.57±0.01 g/ml	2.9×10^{-8}	0.98
0.66±0.01 g/ml	1.7×10^{-8}	0.95
0.77±0.01 g/ml	1.5×10^{-8}	0.97
banana slices (at hot air temperature 60°C)	1×10^{-8}	0.99
banana puree (at hot air temperature 60°C)	2×10^{-8}	0.99

แต่จากสมการ (1), (3) และ (5) จะเห็นได้ว่าติดตัวแปร D ดังนั้นในการคำนวณความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยจึงต้องทำการสมมติค่า D เมื่อสมมติค่า D แล้ว จะสามารถคำนวณความชื้นของแผ่นโฟมกล้วยได้ และนำผลความชื้นที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง จากการสมมุติค่า D เพื่อให้ความชื้นที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ได้พิจารณาจากค่า R^2 พบว่าค่า D เพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งแผ่นโฟมกล้วยที่อุณหภูมิสูงขึ้น และที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยลดลง แสดงดังตารางที่ 1

4 การเปลี่ยนแปลงสีของโฟมกล้วย

4.1 อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นโฟมกล้วย

เมื่อพิจารณาสีของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อสิ้นสุดการอบแห้งโดยทำการเปรียบเทียบกับ Color Chart พบว่าสีที่ได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยดังนี้ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C สีของแผ่นโฟมกล้วยที่ได้อยู่ในกลุ่ม GREYED-BROWN 199 C, GREYED-BROWN 199 C และ GREYED-BROWN 199 B ตามลำดับ นั่นคือเมื่อใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงแผ่นโฟมกล้วยจะมีสีอ่อนกว่าเมื่อใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งต่ำกว่า ซึ่งสามารถแสดงผลออกมาได้ในรูปของค่า L,a และ b คือ เมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูง ค่า L จะสูงกว่ากรณีอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคือแผ่นโฟมกล้วยจะมีความสว่างมากกว่า โดยค่า L เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีค่า 71.23±1.66, 72.60±1.38 และ 72.66±1.14 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีน้อยกว่า (ค่า L ที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ) สำหรับค่า b จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูง ค่า b จะสูงกว่ากรณีใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งต่ำ นั่นคือแผ่นโฟมกล้วยจะมีสีเหลืองมากกว่า โดยค่า b เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีค่า 16.53±0.71, 18.69±0.67 และ 19.21±0.64 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้น อิทธิพลของอุณหภูมิจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้ว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า (ค่า b ที่อุณหภูมิ 70°C และ 80°C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ) สำหรับค่า a จากผลการทดลองพบว่า ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งกับค่า a ได้ เนื่องจากมีลักษณะแปรปรวน โดยค่า a เมื่อสิ้นสุดการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีค่า 1.63±0.17, 0.40±0.15 และ 1.07±0.10 ตามลำดับ

4.2 อิทธิพลของหนาแน่นของโฟมกล้วยที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแผ่นโฟมกล้วย

สำหรับการอบแห้งที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วย 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml ที่อุณหภูมิ 60°C สีของแผ่นโฟมกล้วยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ Color Chart พบว่าสีที่ได้อยู่ในกลุ่ม GREYED-BROWN 199 B, GREYED-BROWN 199 C และ GREYED-BROWN 199 D ตามลำดับ นั่นคือที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำ แผ่นโฟมกล้วยจะมีสีเข้มกว่าที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยสูง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุเนื่องมาจากการลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยในระหว่างขั้นตอนของการโฟมมิ่งนั้นจะมีความร้อนเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการกวน (Whipping) ดังนั้นหากต้องการลดความหนาแน่นของโฟมกล้วยให้มีค่าต่ำมาก จะต้องใช้เวลาในการกวนมาก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีมาก (สีเข้มขึ้น)

5 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

การวัดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งนั้น จะใช้เครื่องวัดค่าเนื้อสัมผัส (Texture Analyser) โดยทำการวัดแรงในลักษณะของแรงกล ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาของอาหารที่มีต่อแรงที่กระทำ เพื่อใช้บ่งบอกลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร เช่น ความแข็ง (hardness) และความกรอบ (crispness) เป็นต้น

สำหรับการวัดความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนนั้น จะใช้วิธีการนับจำนวนยอด (Number of peak) ของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง ซึ่งจำนวนยอดแสดงถึงความกรอบของแผ่นโฟมกล้วยได้ ถ้าหากมีจำนวนยอดมากแสดงว่าผลิตภัณฑ์มีความกรอบมาก เนื่องจากยอดเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟแรง-ระยะทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากหัวกดกดไปเจอในส่วนของช่องว่าง (รูพรุน) ถ้าหากผลิตภัณฑ์มีรูพรุนมาก (กรอบมาก) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟหลายครั้ง (เกิดยอดหลายยอด)

5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่มีต่อความแข็งและความกรอบ

รูปที่ 7 (a) แสดงค่าแรงต้านทานสูงสุด (ความแข็ง) ของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 0.66±0.01 g/ml หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C โดยให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) จากผลการทดลองที่ได้พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อค่าแรงต้านทานสูงสุด (ความแข็ง) โดยอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูง แรงต้านทานสูงสุดที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วยต่ำกว่ากรณีใช้อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งต่ำ นั่นคือแผ่นโฟ

มกล้วยจะมีความแข็งน้อยกว่า โดยค่าแรงต้านทานสูงสุดเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีค่า 8.73±2.51, 6.69±2.57 และ 5.07±1.99 N ตามลำดับเนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะใช้เวลาในการอบแห้งสั้น ส่งผลให้แผ่นโฟมกล้วยเกิดการหดตัวน้อย และเมื่อพิจารณาความกรอบจากจำนวนยอด (Number of peak) ของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วย พบว่าจำนวนยอดของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60, 70 และ 80°C มีค่า 9±4, 13±8 และ 14±7 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังรูปที่ 7 (b)

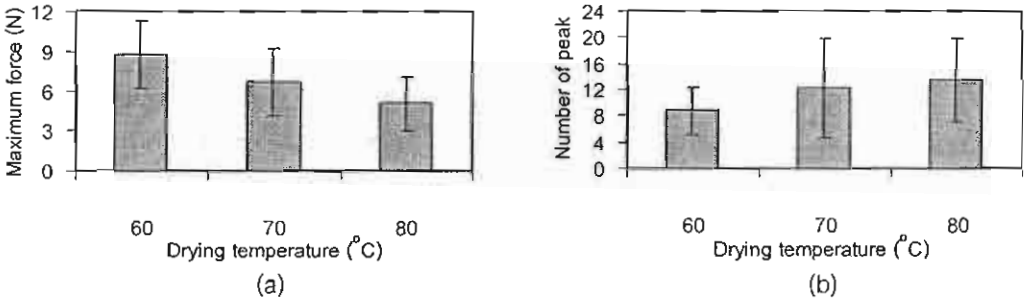


Figure 7 (a) Hardness for banana foam mats at 60, 70 and 80°C, (b) Number of peak for banana foam mats at 60, 70 and 80°C (Density of banana foams 0.66±0.01 g/ml)

5.2 อิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมกล้วยที่มีต่อความแข็งและความกรอบ

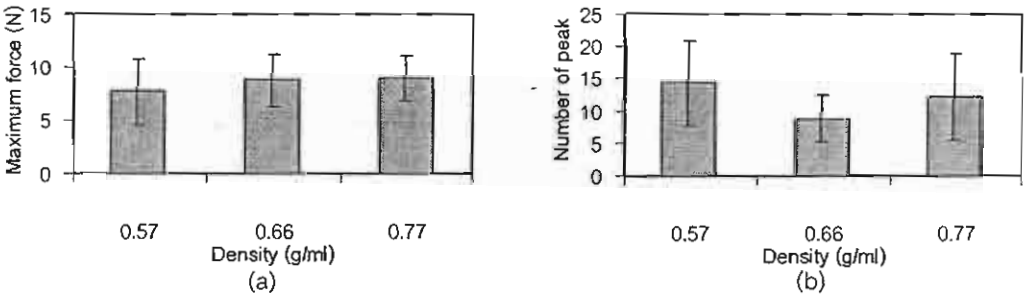


Figure 8 (a) Hardness for banana foam mats at densities 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml
(b) Number of peak for banana foam mats at densities 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml (Hot air temperature 60°C, Air velocity 0.3 m/s)

รูปที่ 8 (a) แสดงค่าแรงต้านทานสูงสุดของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C ให้เหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) โดยค่าแรงต้านทานสูงสุดเมื่ออบแห้งที่ความหนาแน่นเริ่มต้นของโฟมกล้วย 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml มีค่า 7.67±3.13, 8.73±2.51 และ 8.98±2.11 N ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับความกรอบซึ่งพิจารณาจากจำนวนยอดของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วย พบว่าจำนวนยอดของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งที่ความหนาแน่นเริ่มต้นของโฟมกล้วย 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml มีค่า 15±7, 9±4 และ 13±7 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 8 (b)

6 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้ง

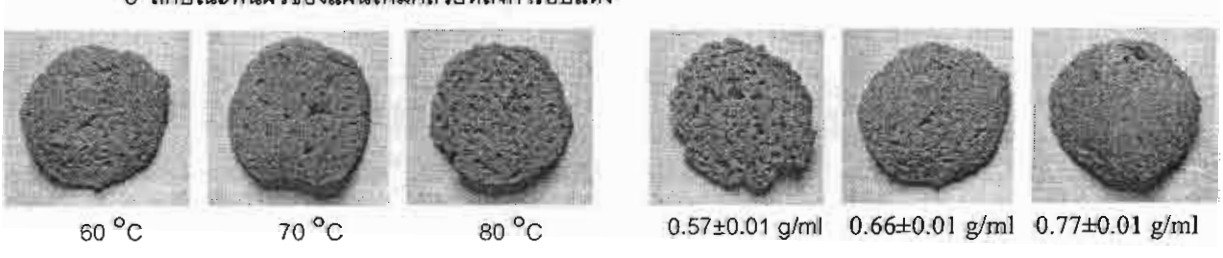


Figure 9 (a) surface of banana foam mat at 60, 70 and 80°C (Density of banana foams 0.66±0.01 g/ml)
(b) surface of banana foam mat at densities 0.57±0.01, 0.66±0.01 และ 0.77±0.01 g/ml (60°C)

รูปที่ 9 (a) แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้น 0.66±0.01 g/ml หลังการอบแห้งที่อุณหภูมิของตัวกลางแตกต่างกัน จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นโฟมกล้วยที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีรูพรุนมากกว่าแผ่นโฟมกล้วยที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นกว่า ส่งผลให้ฟองอากาศเกิดการยุบตัว (Collapse) ได้น้อยกว่า และยังคงความมีรูพรุนอยู่ รูปที่ 9 (b) แสดงลักษณะพื้นผิวของแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งกรณีที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C จากรูปจะเห็นได้ว่า แผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นต่ำ จะมีรูพรุนมากกว่าแผ่นโฟมกล้วยที่มีความหนาแน่นเริ่มต้นสูง เนื่องจากการทำให้โฟมกล้วยมีความหนาแน่นน้อย คือการทำให้เนื้อโฟมกล้วยมีรูพรุนมากนั่นเอง

สรุป

เมื่อใส่ Soy Protein Isolate ปริมาณ 10g/100g ลงในกล้วยปั่นซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น แล้วนำไปกวนที่เวลาต่างๆ พบว่า สามารถลดความหนาแน่นของกล้วยลงได้ เมื่อใช้เวลาในการกวนนานขึ้น แต่ทั้งนี้ไม่ควรใช้เวลาในการกวนมากกว่า 50 นาที เนื่องจากจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเพิ่มขึ้น และเมื่อนำกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งไปอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 60°C, 70°C และ 80°C โดยใช้ความหนาของแผ่นโฟมกล้วย 3 mm และความหนาแน่นของโฟมกล้วยอยู่ในช่วง 0.5 - 1 g/ml จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของโฟมกล้วยต่ำจะให้อัตราการอบแห้งสูง และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งกับกล้วยหั่นชิ้นและกล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้น โดยไม่ใส่ Soy Protein Isolate (SPI) พบว่าการอบแห้งกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้อย่างมาก และสามารถลดความชื้นลงได้ถึง 0.03 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) ในขณะที่การอบแห้งกล้วยหั่นชิ้นและกล้วยที่นำไปปั่นให้เป็นของเหลวข้น สามารถลดความชื้นลงได้สูงสุดเหลือประมาณ 0.07 (เศษส่วนมาตรฐานแห้ง) เท่านั้น

เมื่อพิจารณาคุณภาพด้านสีของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งเมื่อสิ้นสุดการอบแห้งพบว่า สีที่ได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งในกรณีที่ใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนในการอบแห้งแตกต่างกัน และในกรณีที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเริ่มต้นแตกต่างกัน สำหรับคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสนั้นพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิของตัวกลางสูงและความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งต่ำจะให้ค่าความแข็งต่ำกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิของตัวกลางต่ำและความหนาแน่นของกล้วยที่ผ่านกระบวนการโฟมมิ่งสูง เมื่อพิจารณาความกรอบจากจำนวนยอดของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วย พบว่าจำนวนยอดของค่าแรงที่กระทำต่อแผ่นโฟมกล้วยหลังการอบแห้งทั้งในกรณีที่ใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนในการอบแห้งแตกต่างกันและในกรณีที่ความหนาแน่นของโฟมกล้วยเริ่มต้นแตกต่างกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัยของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

ปาริฉัตร หงสประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. หน้า 6.

Cherry, J.P. and Mcwatters, K.H. 1981. Protein Functionality in Foods. American Chemistry Society. 149-175.

Garcia, R., Leal, F. and Rolz, C. 1988. Drying of Bananas Using Microwave and Air Ovens. *International Journal of Food Science and Technology*, 23, 78-80.

Hart, M.R., Graham, R.P., Ginnette, L.F. and Morgan, A.I. (1963). Foams For Foam-Mat Drying. *Food Technology*, 17, 1302-1304.

Karim, A.A. and Wai, C.C. (1999). Foam-Mat Drying of Starfruit (*Averrhoa carambola L.*) Puree Stability and Air Drying Characteristics. *Food Chemistry*, 64, 337-343.

Krokida, M.K., Kiranoudis, C.T., Maroulis, Z.B. and Marinos, D. (2000). Effect of Pretreatment on Color of Dehydrated Products. *Drying Technology*, 18(6), 1239-1250.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน

Investigation of Drying Kinetics of Beef Dried Using Superheated Steam and Hot Air

ศิริวัฒ สินประเสริฐ[1]*, ชัยยงค์ เตชะไพโรจน์[2] และสมเกียรติ ปรัชญาวรากร[3], สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
Siriwat Sinprasert[1], Chaiyong Taechapairoj[2] and Somkiat Prachayawarakorn[3], Somchart Soponronnarit[4]

ABSTRACT

Drying method greatly affects drying kinetics and food quality. To obtain desired quality of meat product used for producing snack food. The purpose of this work is to study drying kinetics of beef undergoing superheated steam and hot air drying processes. The drying samples were cutting perpendicular (transverse section) of the fiber direction. Quality attributes of dried products in terms of color, shrinkage and texture were investigated. The experiments were set up at drying temperatures of 130-150°C. Beef with the initial moisture contents of 245-255% d.b. was dried until the moisture content of 11% d.b. was reached. The experimental results showed that an increase in drying temperature significantly reduced drying time. However, qualities in terms of color (L, a, b), shrinkage and hardness were not significantly different. Considering drying medium, it was found that effective diffusion coefficient of beef dried by superheated steam was higher than that dried by hot air. The final product obtained form superheated steam drying had more uniform-color and higher degree of shrinkage than that obtained from hot air drying. However, hardness potential of the samples dried by the two methods were insignificantly different ($p>0.05$).

Key words: Cow Meat, Drying, Shrinkage, Superheated Steam, Texture

บทคัดย่อ

วิธีการอบแห้งมีผลกระทบอย่างมากต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของอาหาร เพื่อให้ได้คุณภาพตามที่ต้องการของเนื้ออบแห้งสำหรับเป็นของกินเล่น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งของเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยชิ้นตัวอย่างของการอบแห้งเป็นแบบตัดขวางเส้นใย พร้อมทั้งเปรียบเทียบคุณภาพทางด้านสี, การหดตัวและเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้ง เงื่อนไขการทดลองมีดังนี้ อบแห้งเนื้อวัวที่มีความชื้นเริ่มต้น 245-255% d.b. จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 11% d.b. อุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่ใช้อยู่ในช่วง 130-150°C จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิสูง สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่คุณภาพด้านสีโดยวัดในเทอมการเปลี่ยนแปลงสีของตัวแปร L, a และ b การหดตัว และความแข็ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ $p<0.05$ เมื่อพิจารณาชนิดของตัวกลางในการอบแห้ง พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่าสูงกว่ากรณีอบแห้งด้วยอากาศร้อน และสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความสม่ำเสมอกว่าการหดตัวมากกว่า ส่วนความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

คำสำคัญ การหดตัว การอบแห้ง เนื้อวัว เนื้อสัมผัส ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

[1, 4] คณะพลังงานและวัสดุ [3]คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[1,4]School of Energy and Materials, [3]Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Pracha-utid, Tungkru, Bangkok 10140
[2]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สนามจันทร์, นครปฐม 73000
[2]Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom 73000

บทนำ

การถนอมอาหารโดยวิธีการทำให้แห้งเป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีดังกล่าวสามารถเก็บรักษาคุณภาพอาหารได้เป็นเวลานาน การอบแห้งมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน เช่น วิธีการอบแห้งโดยวิธีตากแห้งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดพลังงานแต่ใช้เวลาในการอบแห้งนาน การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำได้ยากเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมทางธรรมชาติ สำหรับการอบแห้งโดยการเป่าอากาศผ่านวัสดุชื้นซึ่งในกรณีนี้พื้นที่ในการอบแห้งอยู่ในขอบเขตจำกัด การควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์สามารถทำได้ง่าย และให้คุณภาพในด้านความสะอาดมากกว่า

เนื้อสัตว์เป็นแหล่งอาหารที่มีปริมาณโปรตีนสูง ดังนั้นการแปรรูปเนื้อสัตว์เพื่อให้สามารถเก็บรักษาคุณค่าทางอาหารไว้ได้นานและการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์มีได้หลายวิธี เช่น การตากแห้งโดยใช้แสงแดดจะต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างมาก เนื่องจากการระเหยของน้ำจากเนื้อเยื่อของสัตว์ทำได้ยากกว่าระเหยน้ำจากเซลล์พืช และยังมีปัญหาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากฝุ่นและแมลง การแปรรูปอาหารจึงมักจะใช้เครื่องอบแห้งด้วยอากาศร้อน ซึ่งสามารถทำให้ระยะเวลาในการอบแห้งลดลง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิของอากาศร้อนสูงเกินไป จะทำให้คุณภาพและคุณค่าทางอาหารของเนื้อสัตว์สูญเสียไป เช่น สีของเนื้อสัตว์อาจมีการเปลี่ยนแปลงจนไม่น่ารับประทาน การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถจะอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว และอาจจะทำให้เนื้อสัตว์มีสภาพกรอบขึ้น ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ได้

เนื้อวัวนับว่าเป็นเนื้อสัตว์ที่มีการนิยมนำมาบริโภคกันอย่างกว้างขวาง พบว่ามีจำนวนโคเนื้อที่เลี้ยงไว้ในประเทศไทยเพื่อเตรียมจำหน่ายมีมากกว่า 6 ล้านตัว (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2543) อีกทั้งยังมีการส่งออกไปขายยังต่างประเทศ เช่น ญี่ปุ่น ลาว กัมพูชา และเวียดนาม (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2536) ในรูปของเนื้อวัวสด หรือเนื้อวัวแช่แข็ง เนื้อวัวยังเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง คณะอนุกรรมการสาขาโภชนศาสตร์ฯ (รัชนี, 2535) ได้ทำการวิเคราะห์คุณค่าอาหารของเนื้อวัว โดยวิเคราะห์จากส่วนที่รับประทานได้ 100 กรัม จะมีคุณค่าทางอาหารด้านโปรตีนสูง และจะเห็นว่าเนื้อวัวแห้งมีคุณค่าทางอาหารสูงมากคือ มีปริมาณโปรตีนสูง และไขมันต่ำ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาจลนศาสตร์ของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน โดยคุณภาพของเนื้อวัวที่ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบได้แก่ สี การหดตัว และเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การเตรียมวัสดุ

นำเนื้อสันนอก (Sirloin) ของเนื้อวัวมาหั่นให้มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีขนาด 3 × 3 cm^2 และหนา 0.3 cm โดยหั่นเนื้อวัวแบบตัดขวางเส้นใย (Transverse section) แล้วนำไปคลุกเกลือด้วยอัตราส่วน 2%โดยมวล แล้วไปแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4°C แล้วนำออกมาคลุกใหม่ทุกๆ 5 นาที เพื่อให้เกลือแทรกซึมเข้าไปในเนื้อวัวอย่างสม่ำเสมอ จนครบ 20 นาที โดยเนื้อวัวมีค่าความชื้นเริ่มต้นประมาณ 245-255% d.b. (นำเนื้อวัวก่อนการอบแห้งไปหาน้ำหนักแห้งโดยการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103°C เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง)

2. อุปกรณ์การทดลอง

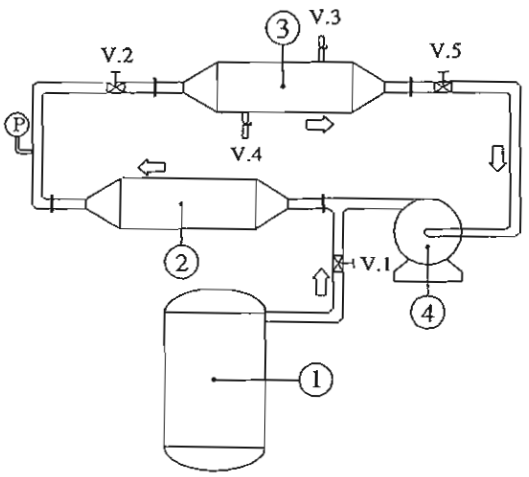


Figure 1 Schematic diagram of the dryer: (1) boiler, (2) electric heater, (3) drying chamber, (4) electric fan, V= valve, P= pressure gauge.

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องอบแห้งแบบถาดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นตัวกลาง แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยห้องอบแห้งขนาด 30×30×10 cm^3 อุปกรณ์ให้ความร้อน ขนาด 13.5 กิโลวัตต์ โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$ พัดลมเป็นแบบเหวี่ยงใบพัดโค้งหลังมีมอเตอร์ขนาด 2.2 กิโลวัตต์ สามารถปรับความเร็วรอบของพัดลมได้ เครื่องกำเนิดไอน้ำออกแบบความดันใช้งานสูงสุด 3.5 บาร์ สามารถผลิตไอน้ำได้ 31 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3. วิธีการอบแห้งเนื้อ

นำเนื้อวัวที่เตรียมไว้มาปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อนจะนำไปทดลองอบแห้ง ในการอบแห้งได้ใช้อุณหภูมิไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ 130, 140 และ $150^{\circ}C$ และความเร็วของไอน้ำร้อนยวดยิ่งเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที ความดันของระบบเหนือบรรยากาศเล็กน้อย โดยในการอบแห้งจะนำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง Sartorius CP-3202 ซึ่งมีค่าความถูกต้องของการอ่าน $\pm$ 0.01 กรัม ทุก ๆ 5 นาที อบแห้งจนกระทั่งเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 11% d.b. และทำการเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่สภาวะเดียวกัน จากนั้นนำเนื้อวัวที่ผ่านการอบแห้งมาปล่อยให้เย็นตัวลง แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพต่อไป

4. การทดสอบคุณภาพ

4.1 การทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ ด้วยเครื่องวัดสีอาหาร KONICA MINOLTA รุ่น CR-400 โดยมีค่าความคาดเคลื่อนในการวัดซ้ำ (Repeat Quality) ของเครื่องวัดสีอยู่ที่ ΔE 0.07 โดยวัดค่าสีของเนื้อวัวในเทอมของตัวแปร L, a และ b หรือค่าสีระบบ Hunter Lab โดยค่า L (lightness Parameter) แสดงค่าความสว่าง ส่วนค่า a (Redness Parameter) แสดงค่าสีแดงและสีเขียว และค่า b (Yellowness Parameter) แสดงค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน

4.2 การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของผลิตภัณฑ์ การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อวัว จะใช้วิธีการแทนที่ปริมาตรของเนื้อวัวในของเหลว โดยของเหลวที่ใช้ทดสอบคือ n-heptane [$CH_3(CH_2)_5CH_3$] โดยคำนวณหาค่าจากสมการ (Maskan, 2001)

$$\%\,\text{Shrinkage} = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ V_0, V คือ ปริมาตรของเนื้อวัวก่อนและหลังการอบแห้ง ตามลำดับ (m^3)

4.3 การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ การทดสอบคุณภาพทางเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้ง จะทดสอบโดยใช้เครื่อง Texture Analyser รุ่น TA-XT 2 ค่าความถูกต้อง $\pm$ 0.001 N โดยจะทำการทดสอบในลักษณะของแรงกด ซึ่งหัวกดที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm และความเร็วในการกด 1 mm/s โดยกดจนกระทั่งเนื้อวัวแตกออกจากกัน แล้วจึงอ่านค่า Peak Load ที่ได้จากหน้าจอคอมพิวเตอร์เป็นค่าความแข็งของเนื้อวัว

ผลและวิจารณ์

1. ผลของอุณหภูมิตัวกลางต่ออัตราการลดความชื้น

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 140 และ $150^{\circ}C$ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่บริเวณผิวของเนื้อวัวขึ้น ทำให้อุณหภูมิของเนื้อวัวสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่เป็นจุดเดือดของน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงประมาณ 2-3 นาทีแรกของการอบแห้งเท่านั้น และหลังจากนั้นอัตราส่วนความชื้นจะลดช้าลงกว่าเดิมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของเนื้อวัวได้เร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิระหว่างไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับผลิตภัณฑ์มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีค่ามากกว่า ส่งผลให้ระยะเวลาในการอบแห้งของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิ $150^{\circ}C$ จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งรวดเร็วกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ $140^{\circ}C$ เช่นเดียวกันกับกรณีที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะไม่เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวของเนื้อวัว ในช่วงแรกของการอบแห้ง ทำให้ในช่วงแรก ๆ ของการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะสามารถลดความชื้นของเนื้อวัวได้รวดเร็วกว่าอากาศร้อน แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 20-25 นาที การอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะสามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

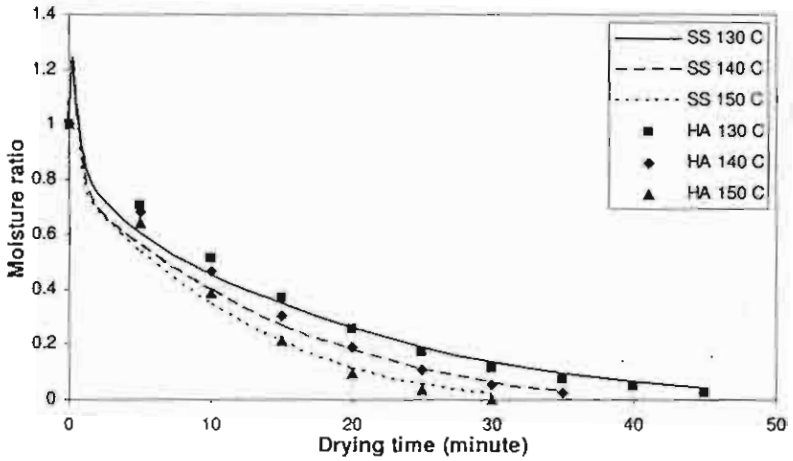


Figure 2 Drying curves of beef undergoing different drying conditions.

2. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเนื้อวัวระหว่างการอบแห้ง

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการอบแห้งกับอุณหภูมิของเนื้อวัว ที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้นซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำ อุณหภูมิของเนื้อวัวสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ ส่งผลให้อัตราส่วนความชื้นในช่วงแรกของการอบแห้งนี้ลดลงอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับรูปที่ 2 ต่อจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะคงที่ที่อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัวได้รับความร้อนแฝงในการเปลี่ยนสถานะให้กลายเป็นไอ และหลังจากนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้ง จนกระทั่งอุณหภูมิในเนื้อวัวมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่ใช้ในการอบแห้ง

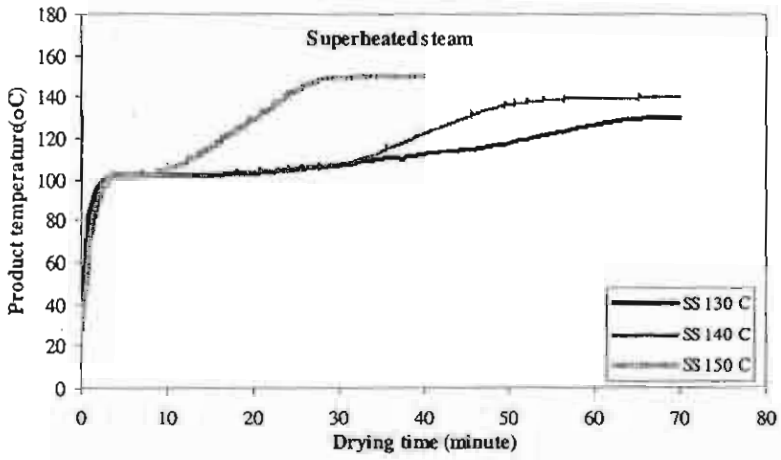


Figure 3 Comparison of product temperature of beef dried under superheated steam at different temperatures.

ส่วนผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อน ที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้งนั้น อุณหภูมิของเนื้อวัวจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่จะใช้ระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิของเนื้อวัวในช่วงแรกช้ากว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งอย่างมาก ความแตกต่างดังกล่าวเป็นผลเนื่องจากสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการควบแน่นของไอน้ำมีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาของอากาศมากจึงทำให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเร็วกว่าในกรณีของไอน้ำร้อน อย่างไรก็ตามในตอนท้ายของการอบแห้ง อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ของการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองไม่มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

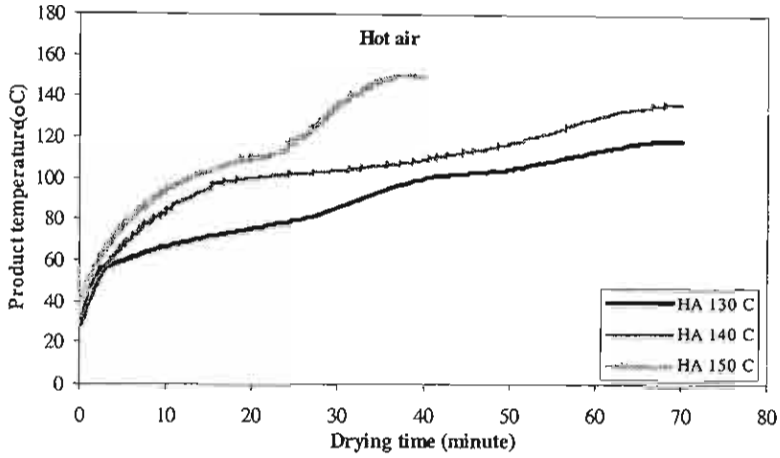


Figure 4 Comparison of product temperature of beef dried under hot air at different temperatures.

3. อัตราการอบแห้ง

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถนำมาคำนวณหาอัตราการอบแห้ง (Drying Rate) ของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C ได้โดยนำค่าความชื้น (Moisture Content, %d.b.) กับระยะเวลาในการอบแห้งที่ได้จากการทดลองมาฟิตกับสมการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด เพื่อหาสมการอบแห้งเอมไพริคเคิลทำนายอัตราการลดความชื้นของเนื้อวัว โดยที่สมการอบแห้งเอมไพริคเคิลที่ทำนายอัตราการลดความชื้นของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำนายโดยเริ่มจากจุดที่มีการควบแน่นของไอน้ำมากที่สุด (Tang *et al.*, 2004) จากนั้นหาอนุพันธ์ของสมการดังกล่าวเทียบกับเวลา ก็จะสามารถทราบอัตราการอบแห้ง ณ ขณะใดขณะหนึ่งได้ ในการคำนวณหาอัตราการอบแห้งเริ่มจากจุดที่มีการความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงสุดซึ่งเป็นจุดที่การควบแน่นของไอน้ำสิ้นสุดลง

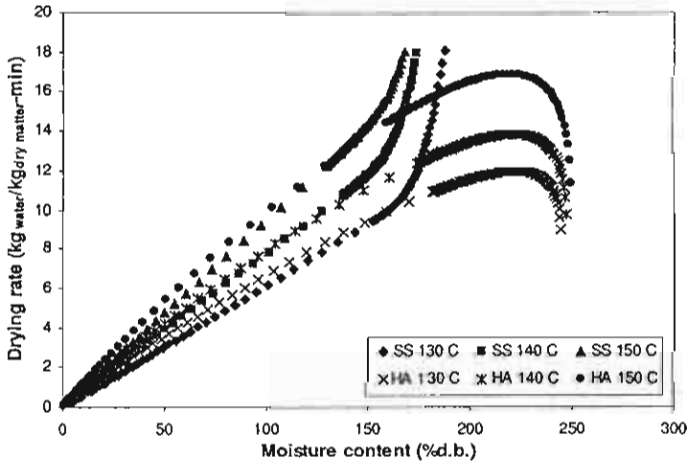


Figure 5 Comparison of drying rates of beef dried under superheated steam and hot air.

จากผลการเปรียบเทียบอัตราการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 150°C จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิ 130 และ 140°C ในทุกๆ ช่วงของความชื้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำร้อนยวดยิ่งหรืออุณหภูมิของอากาศร้อนสูงขึ้น จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อวัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่วนค่าอัตราการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนจะแตกต่างกันในช่วงแรกของการอบแห้ง โดยที่เนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีอัตราการ

อบแห้งสูงกว่าอากาศร้อนอย่างมาก เนื่องจากในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะระเหยน้ำที่ผิวของเนื้อวัวที่เกิดจากการควบแน่นได้อย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นเมื่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งระเหยน้ำที่เกิดจากการควบแน่นของไอน้ำที่อยู่บริเวณผิวของเนื้อวัวจนหมด อัตราการอบแห้งก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งอัตราการอบแห้งของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อนจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังที่แสดงในรูปที่ 2

4. สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล

จากผลการทดลองการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ โดยพิจารณาจากสมการกรณีการแพร่ความชื้นในวัสดุแผ่นราบและยาวมาก (Infinite slab) (Crank, 1975) ดังสมการ

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\sum_{m=0}^{\infty}\left(\frac{1}{(2m+1)^2}\exp\left[-(2m+1)^2\pi^2\frac{Dt}{L^2}\right]\right) \quad (2)$$

จากสมการดังกล่าว เราสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลได้เมื่อทราบอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วยที่เวลาต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขของการอบแห้งที่อุณหภูมิคงที่อันหนึ่ง จากผลการทดลองที่ได้เป็นที่ทราบดีว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการอบแห้งก็จะเร็วขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสามารถอธิบายด้วยสมการของ Arrhenius (Crank, 1975)

$$D_{eff} = D_0\exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

ค่าคงที่ D_0 และ E_a สามารถทราบได้โดยการใช้เทคนิคของสมการถดถอยแบบเชิงเส้นในการประมาณค่าคงที่ดังกล่าว ค่าคงที่ต่างๆ ที่ได้จากการทดลองในกรณีต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 1 จากที่ค่าของ R^2 เข้าใกล้หนึ่งและ SSE มีค่าน้อยแสดงให้เห็นว่าสมการของ Arrhenius สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิได้สอดคล้องกัน อนึ่งในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นภายในเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนี้จะไม่รวมช่วงที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของเนื้อวัว

Table 1 The effective diffusivity of beef dried under superheated steam and hot air drying

ตัวกลางอบแห้ง	D_0 ($\times 10^{-3}$ m^2/h)	E_a (kJ/kmol)	R^2 (%)	SSE
ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง	13.74	32613.15	99.59	0.01
อากาศร้อน	3.78	28446.75	97.54	0.0634

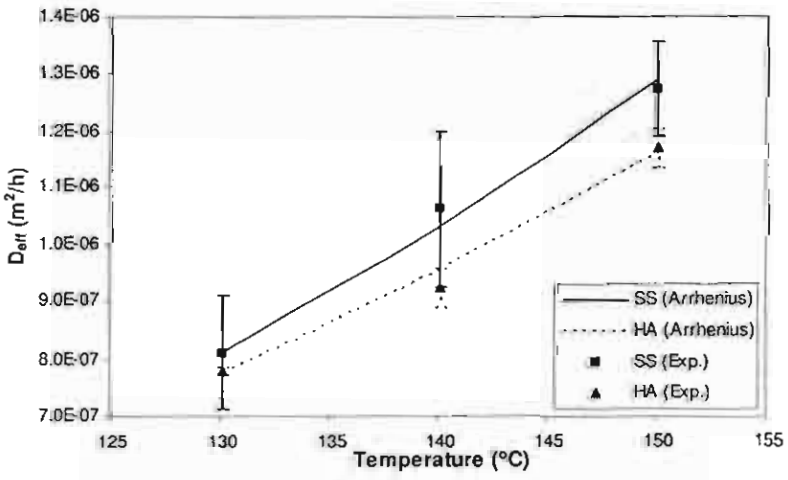


Figure 6 Relationship between effective diffusion coefficient and drying temperature.

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลกับอุณหภูมิในการอบแห้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของความชื้นของเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าสูงกว่าที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนตลอดช่วงของอุณหภูมิการอบแห้งที่ศึกษา แม้ว่าเวลาในการอบแห้งด้วยอากาศร้อนโดยรวมแล้วจะน้อยกว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลเนื่องจากช่วงแรกของการระเหยความชื้นของชิ้นตัวอย่างที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีผลกระทบค่อนข้างสูงต่อการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

5. การทดสอบคุณภาพด้านสี

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านสี ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยสีเนื้อวัวเริ่มต้นก่อนการอบแห้งมีค่า L, a และ b คือ 34.43, 9.55 และ 7.97 ตามลำดับ พบว่าไม่ว่าจะทำการอบแห้งเนื้อวัวด้วยวิธีใด ผลของอุณหภูมิตัวกลางในการอบแห้งจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้ง โดยที่ค่าการเปลี่ยนแปลงสี ΔL, Δa และ Δb ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

Table 2 Value of "ΔL", "Δa" and "Δb" of dried beef under different drying conditions.

Drying process	Color		
	ΔL	Δa	Δb
SS 130 °C	10.51 ± 0.92^{a}	5.33 ± 0.68^{b}	1.97 ± 0.59^{a}
SS 140 °C	11.52 ± 0.76^{b}	5.03 ± 0.83^{ab}	1.99 ± 0.74^{a}
SS 150 °C	11.56 ± 0.67^{b}	5.05 ± 0.65^{ab}	1.67 ± 0.48^{a}
HA 130 °C	10.50 ± 1.43^{a}	4.87 ± 0.66^{a}	2.77 ± 0.60^{b}
HA 140 °C	10.74 ± 1.23^{a}	5.14 ± 0.48^{ab}	2.82 ± 0.66^{b}
HA 150 °C	10.89 ± 1.02^{a}	4.95 ± 0.42^{ab}	2.63 ± 0.51^{b}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

จากตารางที่ 2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับอากาศร้อน พบว่าค่า Δa ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีแดง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่า ΔL ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความสว่าง และ Δb ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสีเหลืองต่างกัน โดยการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีค่า ΔL สูงกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอยู่เล็กน้อย และจะมีค่า Δb ต่ำกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อนอยู่เล็กน้อย และจากการสังเกตด้วยสายตาจะพบว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะได้เนื้อวัวหลังการอบแห้งที่มีสีสม่ำเสมอกว่า ทำให้แลดูสวยกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน

6. การทดสอบคุณภาพด้านการหดตัว

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านการหดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ พบว่าผลของอุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งจะมีการหดตัวแตกต่างกันเล็กน้อยโดยที่อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งสูงกว่าจะมีแนวโน้มว่าเนื้อวัวจะหดตัวมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการอบแห้งเนื้อวัวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ไมโอไฟบริลลา โปรตีน คือโปรตีนแอคตินและไมโอซินเกิดการจับตัวกันแน่นกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติแล้วปรากฏว่าผลของอุณหภูมิตัวกลางในการอบแห้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ การหดตัวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจจะเป็นเพราะว่าอุณหภูมิตัวกลางในการอบแห้งต่างกันน้อยเกินไปที่จะเห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน และเมื่อเปรียบเทียบการหดตัวของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อน พบว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีการหดตัวมากกว่าการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อน เนื่องจากการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง จะเกิดการแปรสภาพของคอลลาเจน (Collagen) เป็นเจลลาติน (Gelatin) ซึ่งในช่วงแรกของการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีลักษณะเป็นความร้อนเปียก (Moist Heat) อีกทั้งอุณหภูมิของเนื้อวัวยังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งในขณะนั้นความชื้นที่อยู่ในเนื้อวัวก็ยังเหลืออยู่มาก จึงทำให้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการเกิดการละลายของคอลลาเจนและแปรสภาพเป็นเจลลาติน ซึ่งเริ่มต้นที่อุณหภูมิของเนื้อวัวอยู่ที่ประมาณ 60-70°C และจะเพิ่มขึ้นไปเป็นลำดับเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Faustman, 1994) ดังนั้นในการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะทำให้เหลือคอลลาเจนที่อยู่ในเนื้อวัวหลังจากการอบแห้งน้อยมาก ซึ่งต่างกับการอบแห้งเนื้อวัวด้วยอากาศร้อนที่

เป็นความร้อนแห้ง (Dry Heat) จึงทำให้คอลลาเจนแปรสภาพเป็นเจลลาตินได้ยาก จึงเป็นเหตุให้เนื้อวัวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนเหลือคอลลาเจนอยู่ในเนื้อวัวเป็นจำนวนมาก

Table 3 Value of shrinkage of dried beef under different drying conditions

Drying process	% Shrinkage
SS 130 °C	70.80 ± 0.42^{b}
SS 140 °C	70.62 ± 0.19^{b}
SS 150 °C	72.10 ± 1.06^{b}
HA 130 °C	63.58 ± 1.51^{a}
HA 140 °C	64.07 ± 2.08^{a}
HA 150 °C	64.32 ± 1.57^{a}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

7. การทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส

จากผลการทดสอบคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4 ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ พบว่าเนื้อวัวที่ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ จะให้เนื้อวัวหลังการอบแห้งจะมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าทางสถิติแล้วปรากฏว่า อุณหภูมิของตัวกลางในการอบแห้งนั้น ไม่ทำให้ค่าความแข็งของเนื้อวัวหลังการอบแห้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของเนื้อวัวหลังการอบแห้งระหว่างเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน พบว่าเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีแนวโน้มว่าจะมีค่าความแข็งมากกว่าเนื้อวัวที่อบแห้งด้วยอากาศร้อน เนื่องจากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นอุณหภูมิของเนื้อวัวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ไมโอไฟบริลลา โปรตีนเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วกว่ากับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน จึงทำให้เนื้อวัวมีค่าความแข็งมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่าความแข็งที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งการอบแห้งเนื้อวัวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีผลทำให้คอลลาเจนซึ่งทำให้เกิดความเหนียวขณะที่เคี้ยวนั้นจะหลงเหลืออยู่น้อยมาก ทำให้เนื้อวัวมีลักษณะที่กรอบและเนื้อวัวจะแตกละเอียดขณะเคี้ยว ซึ่งแตกต่างกับการอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิของเนื้อวัวจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ทำให้ไมโอไฟบริลลาโปรตีนค่อย ๆ เกิดการแข็งตัวอย่างช้า ๆ ทำให้เนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีค่าความแข็งน้อย หรือไม่ค่อยกรอบเท่าที่ควร อีกทั้งคอลลาเจนก็ยังคงหลงเหลืออยู่มากจึงรู้สึกเหนียวเล็กน้อยและเนื้อวัวไม่แตกละเอียดขณะเคี้ยว

Table 4 The hardness of dried beef under different drying conditions

Drying process	Hardness (N)
SS 130 °C	59.62 ± 17.24^{ab}
SS 140 °C	59.57 ± 14.90^{ab}
SS 150 °C	67.65 ± 12.82^{b}
HA 130 °C	47.85 ± 12.15^{a}
HA 140 °C	48.67 ± 14.12^{a}
HA 150 °C	47.82 ± 9.72^{a}

Different superscripts in the same column mean that the values are significantly different as 95%

สรุป

จากผลการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิ 130, 140 และ 150°C พบว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่คุณภาพด้านสีโดยวัดในเทอมการเปลี่ยนแปลงสีของตัวแปร L, a และ b การหดตัว และความแข็ง มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (ไม่รวมช่วงที่เกิดการควบแน่น) กับการอบแห้งด้วยอากาศร้อน พบว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งจะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง แล้วหลังจากนั้นอัตราการอบแห้งจะใกล้เคียงกัน ขณะที่คุณภาพด้านสีของเนื้อวัวหลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีความสม่ำเสมอกว่า การหดตัวมีค่ามากกว่า ส่วนความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

รัชนี ตัณฑะพานิชกุล. 2535. เคมีอาหาร. มหาวิทยาลัยรามคำแหง. หน้า 212-216.

สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร. 2543. ข้อมูลด้านการผลิตและการตลาดสินค้าเกษตรที่สำคัญ. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพ. หน้า 235-238.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศูนย์สถิติการเกษตร. 2536. เอกสารเผยแพร่: ปริมาณการส่งออกเนื้อวัว. 20 หน้า.

Maskan, M. (2001). Drying, Shrinkage and Rehydration Characteristics of Kiwifruits during Hot Air and Microwave Drying. Journal of Food Engineering, 48, 177-182.

Tang, Z., Cenkowski, S. and Izydorczyk, M. (2004). Thin-layer Drying of Spent Grains in Superheated Steam. Journal of Food Engineering, 67, 457-465.

Crank, J. 1975. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed., J. W. Arrowsmith LTD. Bristol, England, 44-68.

Faustman, C. Postmortem Changes in Muscle Foods, In: Muscle Foods Meat Poultry and Seafood Technology, Kinsman, DM, Kotula, AW, Breidenstein, BC, eds., Chapman & Hall, New York, USA, 1994: 63-78.

การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกโดยใช้เทคนิคในการอบแบบฟลูอิไดซ์เบดร่วมกับการเทมเปอร์

Accelerating Aging of Paddy Using Fluidized Bed Drying Followed by Tempering

มัทนียา เชี่ยวเวช[1]*, สมเกียรติ ปรัชญาวรากร [2], พัชรี ตั้งตระกูล[3] และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
Mattaneeya Chiawwet[1], Somkiat Prachayawarakorn [2], Patcharee Tungtrakul[3] and Somchart Soponronarit[4]

ABSTRACT

The objective of this study is to accelerate aging of "Thai jasmine" paddy using thermal process which consists of high-temperature drying with fluidized bed followed with tempering and ventilation in the last stage. Two initial moisture contents of paddy, 22 and 25% w.b., were dried at the temperature of 130 and 150 °C. The experimental results indicated that the changes of rice properties after thermal process i.e. elongation ratio, whiteness and pasting properties were similar to those of the natural ageing of paddy which was stored at the ambient temperature, but their changes were larger. The head rice yield obtained from the thermal process was relatively less than the reference sample, which was dried in the shade, although the tempering time was extended longer. On the contrary, the head rice yield after storage was slightly higher than before storage. Drying temperature of 150 °C and tempering of 30 minutes were reasonable for accelerate aging.

KEYWORDS: Accelerating Aging, Storage, Rice, Rice Quality

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า โดยใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) และเป่าด้วยอากาศแวดล้อม (ventilation) ในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งทำการศึกษาข้าวหอมมะลิที่ความชื้นเริ่มต้น 22 และ 25 % w.b. ที่อุณหภูมิ 130 และ 150 °C ผลการทดลองพบว่าสมบัติภายในเมล็ดข้าวภายหลังการอบแห้งได้แก่ อัตราการยืดตัว ความขาว และความหนืดของน้ำแป้งมีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับข้าวที่เก็บตามธรรมชาติ แต่มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่มากกว่าในขณะที่เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ถึงแม้จะเพิ่มเวลาในการเก็บในที่อับอากาศให้นานขึ้น แต่ในทางตรงข้ามเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว หลังการเก็บในที่สภาวะแวดล้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อุณหภูมิในการอบแห้งที่150°C และการเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา 30 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า

คำสำคัญ การเร่งความเก่า เก็บรักษา ข้าว คุณภาพข้าว

---

[1]นักศึกษา, [2]อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, [4]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[3]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตร, กรุงเทพฯ
[1]Postgraduated student, [2]Lacturer, Faculty of Engineering , [4] Lacturer, School of Energy and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid , Tungkru, Bangkok 10140
[3] Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok.

คำนำ

คุณภาพของข้าวสุกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้บริโภคใช้ในการเลือกซื้อข้าว ซึ่งลักษณะของข้าวที่คนทั่วไปนิยมนำมาบริโภคคือ ข้าวที่หุงขึ้นหม้อ เมล็ดข้าวสุกร่วนไม่ติดกันเป็นก้อน ลักษณะดังกล่าวเป็นสมบัติของ "ข้าวเก่า" โดยปกติทั่วไปข้าวที่เก็บไว้ในที่เก็บเป็นระยะ 4 ถึง 6 เดือน จะมีลักษณะดังที่กล่าวมา ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากข้าว เช่น ก๋วยเตี๋ยว ขนมจีน นิยมใช้ข้าวเก่าจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี (อัมมาร สยามวาลา และ วิโรจน์ ณ ระนอง, 2533 และ กัมปนาท มุขดี, 2533) แต่เนื่องจากการรอคอยให้ข้าวใหม่กลายเป็นข้าวเก่าต้องใช้เวลานาน ส่งผลให้แผนในการจัดเก็บต้องกระทำอย่างรัดกุมไม่ว่าจะเป็นการเตรียมสถานที่จัดเก็บ การป้องกันการสูญเสียของข้าวจากการทำลายของ พวกแมลง และเชื้อรา ซึ่งทำให้ข้าวเก่ามีราคาสูงขึ้นตามมา ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนการเก็บรักษา และควบคุมคุณภาพข้าวหลังการเก็บเกี่ยวจึงได้ทำการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่าโดยกระบวนการทางความร้อน จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการกระบวนการเก็บรักษาข้าวเปลือกในที่อับอากาศ (Tempering) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้เวลามากกว่า 12 ชั่วโมง ภายหลังการอบลดความชื้นด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด มีแนวโน้มทำให้ลักษณะบางประการของข้าว เช่น เปอร์เซ็นต์ข้าวเต็มเมล็ด ความเกาะตัว ความเลื่อมมันของผิวเมล็ด และเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวสุก มีลักษณะเปลี่ยนเป็นข้าวเก่ามากขึ้น (สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ และคณะ, 2541) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่าโดยใช้การอบแบบฟลูอิไดซ์เบดร่วมกับการเทมเปอร์และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม

อุปกรณ์และวิธีการ

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด โดยใช้ตัวกลางเป็นอากาศร้อน ไดอะแกรมของอุปกรณ์ชุดนี้ได้แสดงดังรูปที่ 1

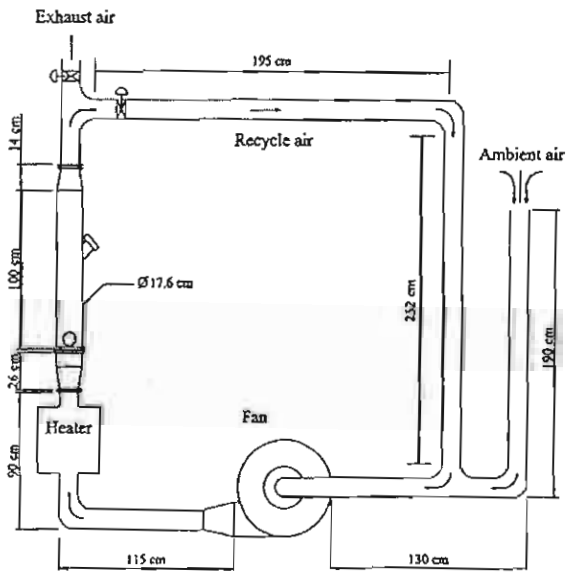


Figure 1 A schematic sketch of Fluidized bed dryer

ซึ่งประกอบด้วยส่วนหลัก ๆ ดังนี้ ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.6 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร มีตัวให้ความร้อนไฟฟ้าที่ควบคุมแยกจากกันจำนวน 3 ตัว ตัวละ 3 kW และพัดลมแบบเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งหลัง (Backward curve blade centrifugal fan) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW มีตัวปรับความเร็วรอบ

เพื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ ระบบอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน อากาศบางส่วนที่ผ่านห้องอบแห้งแล้วจะถูกนำกลับมาผสมกับอากาศใหม่ที่เข้ามา และทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป อากาศร้อนที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID Controller มีความถูกต้อง ±1°C

ในการทดลองจะใช้ความสูงเบด 9.5 cm ความเร็วของอากาศในห้องอบแห้งประมาณ 2.5 m/s อากาศเวียนกลับประมาณ 80 % เมื่ออบเสร็จแล้วนำข้าวเปลือกมาเก็บในที่อับอากาศตามเงื่อนไข จากนั้นนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนมีความชื้นเหลือ 16% d.b. สุดท้ายนำข้าวไปทดสอบคุณภาพต่อไปซึ่งการทดสอบคุณภาพต่างๆ จากการทดลองทำการทดสอบ 3 ซ้ำ

1. วิธีการทดลอง

เงื่อนไขการทดลองในงานวิจัยนี้คือนำข้าวเปลือกมาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณภาพข้าวเปลือกหลังการเก็บเกี่ยวและหลังการเก็บรักษาตลอดระยะเวลา 6 เดือน และส่วนที่ 2 คือ ศึกษาวิธีการเร่งข้าวให้เป็นข้าวเก่าโดยศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบและระยะเวลาในการ Tempering ที่มีผลทำให้สมบัติต่างๆ ของข้าวเปลี่ยนจากข้าวใหม่เป็นข้าวเก่า โดยทำการนำข้าวเปลือกมา rewet ให้ได้ความชื้นเริ่มต้น 22 และ25% w.b. หรือ 28.2 และ 33.3 % d.b. ตามลำดับ แล้วนำมาอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบด ที่อุณหภูมิ 130 และ150 °C ให้ความชื้นสุดท้ายเหลือ 22-23%d.b ตามลำดับ จากนั้นนำข้าวเปลือกมาเก็บในที่อับอากาศที่ระยะเวลา 0, 30, 60, 90, 120 นาที แล้วนำข้าวมาเป่าด้วยอากาศแวดล้อมที่ความเร็วของอากาศ 0.15 m/s จนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 16.5%d.b. นำตัวอย่างข้าวมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้ ความหนืดของน้ำแป้ง โดยใช้ RVA เป็นตัววัดความหนืดของน้ำแป้ง, อัตราการยืดตัว (elongation ratio), ความขาว (whiteness), เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (head rice yield)

2. การตรวจสอบคุณภาพของข้าว

2.1 ความชื้น

การหาความชื้นของข้าวเปลือก สามารถทำการทดลองได้ดังนี้ คือ ชั่งภาชนะที่ใช้บรรจุข้าวเปลือก พร้อมฝาปิดให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน นำข้าวเปลือกประมาณ 50 กรัม ใส่ลงในภาชนะที่เตรียมไว้ และชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเข้าตู้อบโดยตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 103°C ทำการอบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง (AOAC, 1990) เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำภาชนะพร้อมข้าวเปลือกมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง จะได้ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในข้าวเปลือก โดยแสดงอยู่ในรูป % Dry Basis โดยสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหารด้วยน้ำหนักตัวอย่างแห้ง

2.2 เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว

ทำความสะอาดข้าวเปลือก โดยผ่านเครื่องคัดแยก (Aspirator) เพื่อดูดเอาเมล็ดลีบและสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับหิน กรวด ทราย หรือเหล็กคัดแยกด้วยมือจากนั้นชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่ทำความสะอาดแล้วตัวอย่างละ 100 กรัมแล้วนำไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก Satake จนเปลือกหลุดออกหมดชั่งน้ำหนักข้าวกล้องที่ได้จากการกะเทาะเปลือกออกแล้วบันทึกค่าแล้วนำมาขัดขาวด้วยเครื่อง McGill Miller เป็นเวลา 30 วินาที ทิ้งข้าวสารไว้ให้เย็น จากนั้นนำไปชั่งแล้วบันทึกค่านำข้าวสารทั้งหมดไปแยกส่วนที่เป็นต้นข้าว และ ข้าวหักออกจากกันด้วยเครื่องคัดขนาดเมล็ดข้าว (Sizing device) จากนั้นชั่งน้ำหนักต้นข้าวแล้วบันทึกค่านำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวโดยคิดเทียบกับน้ำหนักข้าวเปลือก

2.3 ความขาวของข้าว

วัดความขาวของข้าวสารด้วยเครื่อง Kett C-300 มีขั้นตอนการวัดดังนี้ ขั้นแรกใส่แผ่น มาตรฐานเพื่อทำการปรับเทียบค่าของเครื่องวัดโดยแผ่นทดสอบมาตรฐานดังกล่าวมีความขาว 87.1 จากนั้นใส่ตัวอย่างข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้ว จากนั้นก็ทำการวัดความขาว ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลองทำการวัดตัวอย่างๆละ 3 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

2.4 อัตราการยืดตัวของข้าวเปลือก

ชั่งข้าวเต็มเมล็ด 8 กรัม ใส่ใน wire cage แล้วนำไปแขวนใน bigger ทรงสูงพร้อมน้ำกลั่น 160 ml แล้วนำ bigger วางในหม้อหุงข้าว 30 นาที แล้วนำมาหุง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น 20 นาที จากนั้นสุ่มออกมา 20 เมล็ดเพื่อวัดหาความยาวของข้าวหุงสุก ในการศึกษานี้วัดความเก่าของข้าวโดยพิจารณาจากอัตราการยืดตัวของข้าวหุงสุกเมื่อเทียบกับข้าวสารดังเขียนในสมการ (1)

$$\text{อัตราการยืดของเมล็ดข้าวสุก} = \frac{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าวสุก 20 เมล็ด}}{\text{ความยาวเฉลี่ยของเมล็ดข้าวสาร 20 เมล็ด}} \qquad (1)$$

2.5 ความหนืดของน้ำแป้ง

นำตัวอย่างมาทำการบดให้ละเอียดด้วยเครื่อง Ultacentrifugal Mill จากนั้นนำมาร่อนด้วยตระแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร นำตัวอย่างที่บดแล้วมาทดสอบด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) โดยการตวงน้ำกลั่นปริมาตร 25.0 ± 0.1 มิลลิเมตร ใส่ในกระป๋องที่ใช้สำหรับเครื่อง RVAแล้วชั่งตัวอย่างแป้ง 3 กรัม ที่ความชื้น 14 %w.b. ใส่ตัวอย่างแป้งข้าวที่ถูกต้องลงในกระป๋องที่มีน้ำอยู่ใส่พายลงในกระป๋องดึงพายขึ้นลงเพื่อกวนตัวอย่างไม่ให้จับกันที่ผิวน้ำหรือติดอยู่ที่พาย นำกระป๋องที่ใส่พายเข้าเครื่อง RVA จากนั้นทำการกวนน้ำแป้งที่ความเร็วของใบกวนช่วง 10 วินาทีแรกเท่ากับ 960 rpm หลังจากนั้นความเร็วรอบลดลงเป็น 160 rpm จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง อุณหภูมิของ เครื่อง RVA เปลี่ยนแปลงดังนี้ คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็น 95 องศาเซลเซียส (อัตรา 12 องศาเซลเซียส/นาที) เป็นเวลา 2 นาที อุณหภูมิคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.5 นาที จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงด้วยอัตรา 12 องศาเซลเซียส / นาทีไปที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในนาทีที่ 11 และคงที่ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที

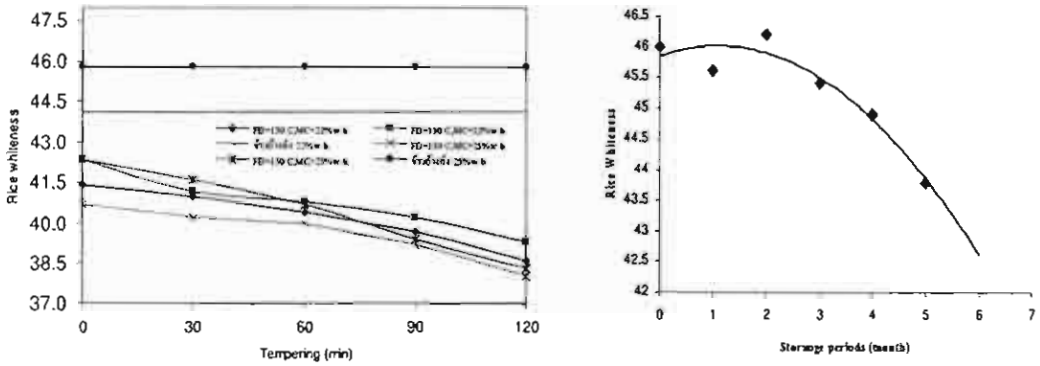
ผลและวิจารณ์

1. คุณภาพทางกายภาพ

1.1 การเปลี่ยนแปลงความขาว

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความขาวของข้าวสารที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนและที่ผ่านการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 6 เดือน จากผลการทดลองที่ได้พบว่าความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการ Tempering มีผลต่อความขาวของข้าวสาร ซึ่งที่ความชื้นสูงและเมื่อใช้เวลาในการ Tempering นานขึ้นค่าความขาวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวข้างอิงดังรูปที่ 2 (a) ข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมีสีคล้ำกว่าข้าวเปลือกที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะ 6 เดือน จากรูปที่ 2(b) ความขาวของข้าวสาร ลดลงจาก 46 เป็น 44 ขณะที่ความขาวของข้าวสารจากรูปที่ 2 (a)อยู่ในช่วง 38 ถึง 42 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของกระบวนการให้ความร้อน การที่ความความขาวของข้าวสารมีค่าน้อยกว่าเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลโดยน้ำตาลที่มีอยู่ในข้าวได้รับความร้อนซึ่งความร้อนดังกล่าวไปทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลหลุดออกจากกัน

กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำ และเมื่อให้ความร้อนต่อไปพันธะภายในโมเลกุลต่ำจะหลุดออกจากกัน และเกิดเป็นสารประกอบคีโตนขึ้นมา ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่ทำให้เกิดสีคล้ำในเมล็ดข้าว (สุทธินี วานิชสำราญ,2545 :ภูมิสิทธิ์วรรณชารี,2545)

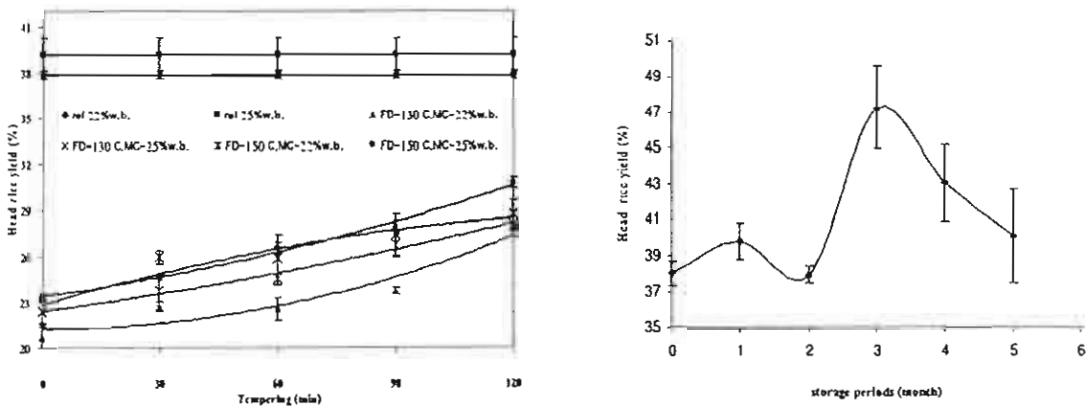


a) Thermal process b) Storage

Figure 2 Change of rice whiteness obtained from the thermal process at different tempering time and from storage at ambient condition.

1.2 การเปลี่ยนแปลงต้นข้าว

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวกับระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศต่างๆ กันที่ความชื้น 33.3%d.b และความชื้น 28.2%d.b. และระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวกับระยะเวลาในการเก็บรักษาข้าวเปลือก 6 เดือน จากการทดลองพบว่าที่ความชื้นเดียวกันเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงขึ้นดังรูปที่ 3(a) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงนั้นสันนิฐานว่าน่าจะมาจากการเกิด Gelatinization ในเมล็ดข้าวเปลือก โดย Gelatinization ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบบางส่วน (สุทธินี วานิชสำราญ,2545) อย่างไรก็ตามข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณต้นข้าวต่ำกว่าข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการอบแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากขณะอบแห้งเกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดแรงเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยร้าวภายในเมล็ดเกิดขึ้น เมื่อนำไปสีจึงได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลง จากรูปที่ 3(a) ระยะเวลาในการเก็บในที่เก็บอากาศนานขึ้นช่วยให้ได้ข้าวต้นมากขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้าวต้นที่ได้จากการเก็บในที่เก็บรักษาเป็นระยะ 6 เดือน ดังรูปที่ 3(b) พบในลักษณะทำนองเดียวกันคือเมื่อทำการเก็บรักษานานขึ้นจะได้ข้าวต้นมากขึ้น โดยข้าวที่เก็บรักษา 3 เดือนมีเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูงสุดเนื่องจากการเก็บรักษานานขึ้นทำให้เม็ดแป้งที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวมีการจับตัวแข็งมากขึ้น ทำให้เมล็ดข้าวทนต่อแรงกระแทกได้มากขึ้น (Juliano,1985) แต่และหลังจากนั้นจะเริ่มลดลง



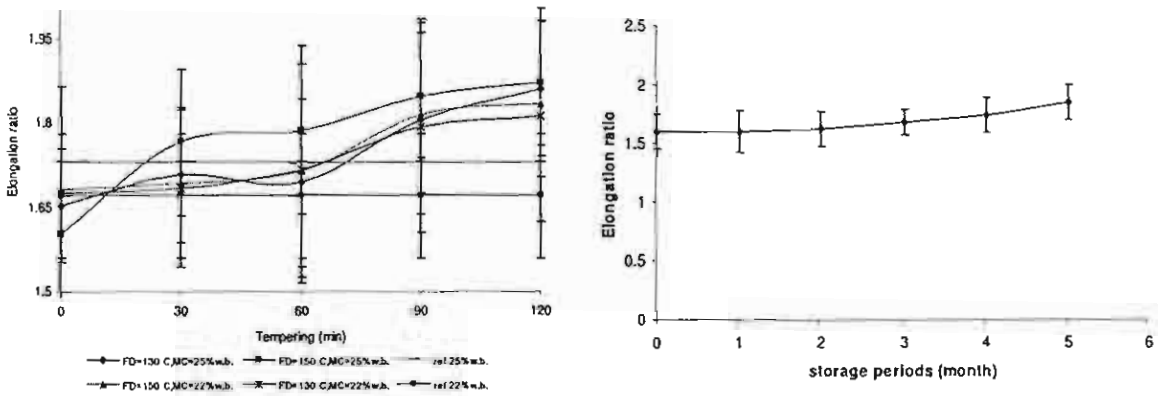
a) Thermal process b) Storage

Figure 3 Change of head rice yield obtained from the thermal process at different tempering time and from storage at ambient condition.

2. คุณภาพทางการหุงต้ม

2.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราการยืดตัวของเมล็ดข้าว

รูปที่5 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยืดตัวของข้าวสุกที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาต่างๆ จากผลที่ได้มีพบว่าเมื่อระยะเวลานานในเก็บไว้ในเก็บอากาศนานขึ้น การใช้ความชื้นเริ่มต้นสูงในการอบแห้ง พร้อมกับอุณหภูมิสูง จะให้อัตราการยืดตัวของข้าวมากกว่าระยะเวลาในการเก็บสั้น และใช้อุณหภูมิในการอบแห้งต่ำ อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ที่ได้พบว่าอัตราการยืดตัวที่ได้ได้จากเงื่อนไขต่างๆ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับการเก็บไว้ในที่เก็บพบในทำนองเดียวกับข้าวที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนกล่าวคือเมื่อข้าวเก็บไว้นานขึ้นอัตราการยืดตัวสูงขึ้น ดังรูปที่ 5b แต่อย่างไรก็ตามข้าวที่ได้จากกระบวนการทางความร้อนมีแนวโน้มที่จะให้อัตราการยืดตัวมากกว่าข้าวที่เก็บไว้ในที่เก็บ จากข้อมูลการทดลองที่ได้พบว่าข้าวเปลือกความชื้น 33.3%d.b. เมื่อนำมาอบแห้งและเก็บไว้ในที่เก็บอากาศเป็นเวลา 30 นาที มีอัตราการยืดตัวของข้าวสุกคล้ายกับข้าวที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง การที่อัตราการยืดตัวของข้าวสูงขึ้นเป็นเพราะ โครงสร้างของข้าวมีอมิโลเพคตินประกอบอยู่จำนวนมากเมื่อได้รับความร้อนอาจทำให้โครงสร้างของข้าวเปลี่ยนจากการรวมตัวของโมเลกุลของกลูโคสและโครงสร้างเชื่อมต่อกันแบบแยกเป็นกิ่งก้านสาขา (Branched chain) ไปเป็นอมิโลสซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลต่อกันแบบเส้นยาว (Linear chain) (ศศิเกษม และ พรรณี, 2530) จึงทำให้ข้าวสุกมีอัตราการยืดสูงขึ้นเมื่อนำมาหุงต้ม



a) Thermal process b) Storage

Figure 4 Change of elongation ratio obtained from the thermal process at different tempering time and from storage at ambient condition.

3. คุณภาพทางเคมีกายภาพ

3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของน้ำแป้ง

จากการศึกษาความหนืดของน้ำแป้งโดยเครื่อง RVA ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดจะให้ค่า Peak viscosity , Final viscosity, pasting temperature และ Setback แตกต่างกันดังตารางที่ 2 จากการทดลองพบว่าความชื้น อุณหภูมิในการอบแห้ง และระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศ มีผลต่อสมบัติทางด้านความหนืด โดย

ที่ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงและผ่านการอบแห้งที่สูงพร้อมกับเก็บไว้ในที่อับอากาศเป็นระยะนานขึ้นจะให้ค่า Peak viscosity ต่ำกว่ากว่ากรณีที่ข้าวเปลือกที่มีความชื้นต่ำผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ และระยะในการเก็บไว้ในที่อับอากาศสั้น สำหรับค่า

Table 1 Pasting properties of Khao Dawk Mali 105 after for stored naturally 6 months

ระยะเวลา (เดือน)	Peak viscosity (RVU)	Pasting temperature (°C)	Setback (RVU)	Final viscosity (RVU)
เริ่มทำการทดลอง	528.25±2.06^{mn}	70.43±2.07 ^{a}	-218.03±3.43^{a}	310.22±5.43^{a}
1	528.58±7.75^{mn}	71.48±0.45 ^{ab}	-215.75±6.4 ^{a}	312.83±1.81^{ab}
2	543.84±6.52^{n}	72.90±0^{b}	-211.50±8.79^{ab}	332.34±8.61 ^{def}
3	473.28±4.40 ^{fgh}	77.10±0.43 ^{fgh}	-131.86±3.42^{gh}	341.47±0.98 ^{fgh}
4	472.14±11.08 ^{fgh}	74.87±0.53^{c}	-149.14±12.63 ^{c}	323±1.74^{cde}
5	496.58±2.48^{ijk}	74.9±0.52^{c}	-170.61±4.66 ^{c}	325.97±7.00^{cde}

หมายเหตุ : อักขระภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

Table 2 Pasting properties of Khao Dawk Mali 105 after processing under different conditions.

Temperature (°C)	Moisture initial (%d.b.)	Tempering (min)	Peak viscosity (RVU)	Pasting temperature (°C)	Setback (RVU)	Final viscosity (RVU)
130	28.2	Drying without tempering	479.67±4.23^{ghi}	75.48±1.14^{cdef}	-125.75±6.04^{fgh}	353.92±2.26^{ijk}
		30	462.50±6.83^{efg}	76.33±0.53^{cdefg}	-120.96 ±3.36^{ghi}	342.04±4.19^{fgh}
		60	467.67±4.21^{efgh}	76.50±0.39 ^{cdefg}	-107.22±2.94^{ij}	360.44±6.56^{kl}
		90	444.50±5.13^{cd}	76.55±0.39 ^{cdefg}	-87.36 ±6.97^{kl}	357.14±7.15^{jkl}
		120	409.94±7.53^{b}	78.63±0.54^{h}	-49.00±9.97^{n}	360.94±3.62^{kl}
	33.3	Drying without tempering	480.75±2.84 ^{hij}	72.03±0.08^{b}	-156.61±1.09^{d}	324.14±3.22^{cd}
		30	473.96±16.67 ^{fgh}	72.85±0.07^{b}	-149.67±0.23^{de}	327.36±0.23^{a}
		60	475.42±2.24 ^{gh}	72.85±0^{b}	-126.84±12.61^{fgh}	335.31 ±3.3^{de}
		90	473.67±2.77^{fgh}	75.00±0.48^{cd}	-80.92±6.37^{l}	347.13±4.07^{hij}
		120	434.94±3.64^{c}	78.58±0.45^{h}	-12.33±6.00^{p}	422.61±2.43^{n}
150	28.2	Drying without tempering	477.11±16.64^{ghl}	75.75±0.48^{cdefg}	-118.14±11.34^{ghl}	358.97±11.25^{kl}
		30	502.42±1.92 ^{kl}	75.73±0.46^{cdefg}	-107.42±2.94^{ij}	395.00±1.97^{m}
		60	493.46±0.76^{ijk}	77.17±0.67^{fgh}	-97.83±1.77^{jk}	395.62±2.54^{m}
		90	416.22±9.55^{b}	77.30±0.52^{gh}	-55.80±2.13^{mn}	417.86±3.23^{n}
		120	452.33±11.77^{bcdefg}	78.63±0.49^{h}	-33.14±12.65^{o}	419.19±1.79^{n}
		Ref 28.2%d.b.	516.33±9.64^{lm}	75.73±0.88 ^{cdefg}	-200.81±7.35 ^{b}	315.50±4.30^{abc}
	33.3	Drying without tempering	457.47±6.49^{cdefg}	75.23±0.10^{cde}	-112.75±3.48^{hi}	344.72±6.08^{ghi}
		30	442.09±12.96^{cd}	76.85±2.26 ^{efg}	-79.67±5.42^{l}	362.42±7.54^{kl}
		60	417.42±11.31^{b}	76.45±2.79 ^{cdefg}	-65.38±3.60^{m}	352.04±14.91^{hijk}
		90	414.05 ±1.94^{b}	76.78±1.58 ^{defg}	-51.61±5.86^{n}	362.44±4.22^{kl}
		120	381.08±23.38^{a}	78.68±0.49^{h}	-14.86±15.45^{p}	366.22±11.68^{l}

		Ref 33.3%d.b.	499.19±2.79 ^{k}	76.20±0.39 ^{cdefg}	-138.78±3.68 ^{ef}	360.22±2.67 ^{kl}

หมายเหตุ : อักขระภายในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ $p \leq 0.05$

Setback ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำ final viscosity ลบด้วย peak viscosity ค่าของ setback แสดงถึงเป็นตัวบ่งชี้ความแข็งของแป้ง จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิอบแห้งและความชื้นเดียวกัน ค่า Setback สูงขึ้นเมื่อเก็บในที่อับอากาศนานขึ้น เมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง หรือกล่าวอักนัยหนึ่งความแตกต่างระหว่าง peak กับ final viscosity ลดลง นั่นแสดงว่าลักษณะของแป้งข้าวมีความเสถียรมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ข้าวไม่ได้กระบวนการทางความร้อนพบว่าข้าวที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมีความแข็งและกระด้างมากกว่าเมื่อเทียบกับข้าวที่มีการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 6 เดือน

ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) เป็นความหนืดเมื่อแป้งถูกทำให้เย็นหลังจากการเกิดเจลาทิไนท์ ส่วนของอะมิโลสจะเกิดโครงสร้างขึ้นใหม่ในลักษณะโครงร่างสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นเจลแข็งขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Juliano (1985) และการทดลองของ ภูมิสิทธิ์ วรรณชารี (2545) ซึ่งถ้ามีการเก็บรักษานานขึ้นค่า Final viscosity จะเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่า Final viscosity, pasting temperature และ Setback เพิ่มขึ้นใน 3 เดือนแรก และหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงส่วน Peak viscosity จะลดลง 3 เดือนแรก และหลังจากนั้นจะเริ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่เพิ่มขึ้นใน 3 เดือนแรก และหลังจากนั้นจะเริ่มลดลงดังรูปที่ 4(b) สำหรับผลของข้าวที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนให้ผลในลักษณะเดียวกับกรณีข้างต้นกล่าวคือเมื่อระยะในการเก็บไว้ในที่เก็บอากาศนานขึ้นจะให้ค่าความหนืดสุดท้ายมากขึ้น

สรุป

จากการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเร่งข้าวใหม่ให้เป็นข้าวเก่า คือ ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือก อุณหภูมิในการอบแห้งและระยะเวลาในการเก็บไว้ในที่เก็บอากาศ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงเมื่อผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว , elongation ratio และ whiteness สูงกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งที่อุณหภูมิและมีความชื้นเริ่มต่ำ และเมื่อนำมาเก็บในที่อับอากาศนานขึ้นพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวเพิ่มสูงขึ้น ความขาวมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการยืดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนสมบัติด้านความหนืดของน้ำแป้ง ค่า Peak viscosity ลดลง สำหรับค่า Final viscosity และ Setback มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับข้าวที่ผ่านเก็บรักษาไว้เป็นระยะ 3 เดือน ข้าวที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจะมีแนวโน้มเหมือนข้าวเก่าแต่ลักษณะข้าวที่ได้จะมีความแข็งกระด้างมากกว่าข้าวที่มีการเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 6 เดือน เพื่อลดความแข็งกระด้างลง หลังจากการการอบแห้งควรมีการเก็บข้าวไว้ในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา 30 นาทีก็เพียงพอที่จะได้ข้าวมีลักษณะคล้ายข้าวเก่าที่เก็บไว้ตามธรรมชาติ

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาคุณภาพอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือทดสอบคุณภาพ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กัมปนาท มุขดี 2533 การวิจัยและพัฒนาข้าวในเขตพื้นที่ความรับผิดชอบของศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กรุงเทพฯ

จารนัย พาณิชยกุล 2537 แป้ง (starch) – การเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำให้แป้งสุก วารสารจาร์พา ฉบับที่ 11 หน้า 22 – 24.

สุทธินี วานิชสำราญ 2545 การเพิ่มปริมาณต้นข้าวคุณภาพต่ำโดยการแช่ร่วมกับการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

วินิต ชินสุวรรณ และ ภูสิทธิ์ วรรณซารี 2545 การเร่งความเก่าของข้าวเปลือกหอมมะลิโดยการอบในภาชนะปิด วิศวกรรมสาร ม.ข. ปีที่ 29 ฉบับที่ 1-2 หน้า 131-146.

ศศิเกสร ทองยงค์ และ พรรณี เดชคำแหง 2530 เคมีอาหารเบื้องต้น สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ หน้า 74-74.

สมชาติ โสภณรณฤทธิ์ อดิเทพ ทวีรัตนพาณิชย์ สมบูรณ์ เวชกามา งามชื่น คงเสรี และ สุนันทา วงค์ปิยชน 2541 ผลพลอยได้จากการอบข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิไดเซชัน เอกสารประกอบคำบรรยายในการประชุมราชบัณฑิต สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสถาน

อัมมาร สยามวาลา และ วิโรจน์ ณ ระนอง 2533 ประมวลความรู้เรื่องข้าว มูลนิธิสถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย พิมพ์ครั้งที่ 1 สถาบันเพื่อการพัฒนาประเทศไทย กรุงเทพฯ

Association Official Analyical Chemist,1990,Official Method of Analysis Virginia,A.O.A.C.,1289 p.

Indudhara S.,Sowbhagya Y.,Bhattacharya K.(1978) .Changes in the physicochemical properties of rice with aging, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Vol.29, pp. 627-639.

Juliano, B.O., (1985).Rice: Chemical and technology, 2nd ed.,Minnesota,American Association of Cereal Chemists, 774.

Perez,C.M. and Juliano, B.O. (1981). Texture change and storage of rice. *Journal of Texture Studies*, 12, 321-393

Villareal, R.M., Resurreccion, A.P., Suzuki, I. and Juliano, B.O. (1976). Change in physicochemical properties of rice during storage. *Starch*, 28, 88-94.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

การผลิตข้าวกล้องคุณภาพโดยใช้เทคนิคฟลูอิไดซ์เซชัน

Producing High Quality Brown Rice Using Fluidization Technique

ดลฤดี ใจสุทธิ์[1] สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2] วารุณี วารัญญานนท์[3] พัชรี ตั้งตระกูล[3] และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์[1]
Donludee Jaisut[1], Somkiat Prachayawarakorn[2], Warunee Varanyanond[3], Patcharee Tungtrakul[3] and Somchart Soponronnarit[1]

Abstract

An important problem of brown rice is rancidity. Therefore, the purpose of this research is to reduce brown rice rancid whereas the other qualities which are head rice yield, whiteness, rice germ, white belly and pasting properties, still accepted. Fluidized bed drying was used to reduce moisture content of paddy cv. Khao Dawk Mali 105 from 28.2 % dry basis and 33.3 % dry basis to 21.9 % dry basis. After that, grain was tempered and ventilated with ambient air to reduce moisture content to 16.5% dry basis. The operating conditions used in the experiments were the drying temperatures of 130°C and 150°C and the tempering times of 30, 60 and 120 min. The results showed that the average drying rate was increased with increasing temperature. Regarding to the head rice yield and the rate of moisture reduction during ventilation, paddy after fluidized bed drying should be tempered for 30 min. Moreover, the percentage of head rice yield was affected by the drying temperature and initial moisture contents whereas the whiteness and the fat acidity were decreased. However, the white belly was slightly different. Further, peak viscosity and final viscosity were decreased whereas setback was increased.
Key words: Brown rice, Drying, Fat acidity, Fluidized bed, Paddy, Rancidity

บทคัดย่อ

กลิ่นเหม็นหืนในข้าวกล้องเป็นอุปสรรคหนึ่งของการตัดสินใจของผู้บริโภคซึ่งคุ้นเคยกับการบริโภคข้าวขาว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการอบแห้งที่เหมาะสมในการลดการเกิดกลิ่นเหม็นหืนในข้าวกล้อง ในขณะที่คุณภาพด้านร้อยละต้นข้าว ความขาวของข้าวสาร จมูกข้าว เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ และความหนืดของน้ำแป้ง ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการอบแห้ง ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 28.2 และ 33.3%d.b. ด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด ที่อุณหภูมิอากาศร้อน 130°C และ 150°C ให้ได้ความชื้นหลังอบแห้งประมาณ 21.9%d.b. หลังจากนั้นจึงเก็บข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วไว้ในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 60 และ 120 นาที แล้วนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมต่อจนเหลือความชื้นสุดท้ายประมาณ 16.5%d.b. จากผลการทดลองพบว่า อัตราการอบแห้งโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มขึ้น สำหรับอิทธิพลของการเก็บในที่อับอากาศต่อคุณภาพข้าวพบว่า การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 นาทีนั้นเพียงพอในการรักษาคุณภาพทางด้านร้อยละข้าวต้น นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ร้อยละข้าวต้นเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ค่าความขาวของข้าวสาร และปริมาณกรดไขมันอิสระ จะลดลง ส่วนปริมาณข้าวท้องไข่แตกต่างกันเล็กน้อย สำหรับคุณภาพทางด้านความหนืดพบว่าค่า Peak viscosity และ Final viscosity มีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลานานขึ้น ในขณะที่ค่า Setback เพิ่มขึ้น ซึ่งเชื่อว่าน่าจะทำให้ข้าวมีความแข็งกระด้างและร่วนมากขึ้น
คำสำคัญ การอบแห้ง กลิ่นเหม็นหืน ข้าวกล้อง ข้าวเปลือก ปริมาณกรดไขมันอิสระ ฟลูอิไดซ์เบด

[1] คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[1] School of Energy and Materials, King Mongkut University of Technology Thonburi, Bangkok 10140
[2] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
[2] Faculty of Engineering, King Mongkut University of Technology Thonburi, Bangkok 10140
[3] สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร
[3] Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok 10903

คำนำ

ข้าวกล้องประกอบด้วยวิตามินและแร่ธาตุจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวขาว และข้าวนึ่งเนื่องจากส่วนที่เป็นรำไม่ได้ถูกขัดสีออกไป (www.woltonfeed.com) อีกทั้งยังช่วยป้องกันโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง เบาหวาน และช่วยในการควบคุมน้ำหนักด้วย เนื่องจากข้าวกล้องมีปริมาณของ insoluble fiber ซึ่งนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่าช่วยป้องกันมะเร็งในปริมาณสูง อีกทั้งถ้าบริโภคอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรต เช่น ข้าวขาว จะส่งผลทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดและปริมาณอินซูลินเพิ่มขึ้น เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแป้งหรือน้ำตาล ทั้งนี้ปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากอาหาร สามารถบ่งบอกได้ด้วยดัชนีที่เรียกว่า Glycemic index โดยค่าดัชนีนี้จะสูงหรือต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ร่างกายดูดกลืนว่าจะถูกดูดกลืนได้เร็วเพียงใด ค่า Glycemic index สูงแสดงว่าร่างกายสามารถดูดกลืนคาร์โบไฮเดรตได้ดี จากรายงานวิจัยที่ผ่านทาพบว่า ข้าวขาวมี Glycemic index สูงกว่าข้าวกล้อง (www.Healthnotes.com) ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ผู้บริโภคหันมาบริโภคข้าวกล้องเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าข้าวกล้องจะมีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าข้าวขาวและข้าวนึ่งก็ตาม แต่ข้าวกล้องมีระยะเวลาในการเก็บรักษาสั้น คือประมาณ 6-12 เดือน เนื่องจากการเสื่อมสภาพของไขมันในข้าวกล้อง ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนในเมล็ดข้าว ซึ่งกลิ่นเหม็นหืนนี้ไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภคที่คุ้นเคยกับการบริโภคข้าวขาว จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเทคโนโลยีการอบแห้งสามารถหยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์ lipaseได้ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ Champagne (1994) ที่ทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นในข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน กับข้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้ง พบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นระยะเวลา 50 วัน ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวที่ผ่านการอบแห้ง เพิ่มขึ้นช้ากว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบแห้งประมาณ 70% แต่ทั้งนี้ถ้านำเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด ด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งให้อัตราการอบแห้งสูง และคุณภาพของข้าวเปลือกอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Soponronnarit et. al.,1999) มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ น่าจะช่วยทำให้คุณภาพของข้าวกล้องสูงขึ้น และระยะเวลาในการอบแห้งสั้นลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษา การผลิตข้าวกล้องคุณภาพสูงที่สามารถเก็บรักษาในลักษณะของข้าวเปลือกได้เป็นระยะเวลานาน โดยที่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการสีแล้วจะยังคงมีจมูกข้าว (Rice germ) ซึ่งมีคุณค่าทางสารอาหารส่วนใหญ่อยู่ และเมื่อนำไปรับประทานจะไม่เกิดกลิ่นเหม็นหืนอันไม่เป็นที่พึงประสงค์ของผู้บริโภค โดยใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นวัตถุดิบในการอบแห้งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิไดเซชันที่อุณหภูมิสูงร่วมกับการเก็บในที่อับอากาศและการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม นอกจากวิธีการอบแห้งแล้วในงานวิจัยนี้ยังศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศเพื่อที่จะดูแนวโน้มในการเร่งความเป็นข้าวเก่าของข้าวกล้อง โดยศึกษาเปรียบเทียบผลของข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้ง คุณภาพทางด้านกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. อุปกรณ์การทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยนี้ เป็นเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด โดยใช้ตัวกลางเป็นอากาศร้อน ไดอะแกรมของอุปกรณ์ชุดนี้ได้แสดงดังรูปที่ 1

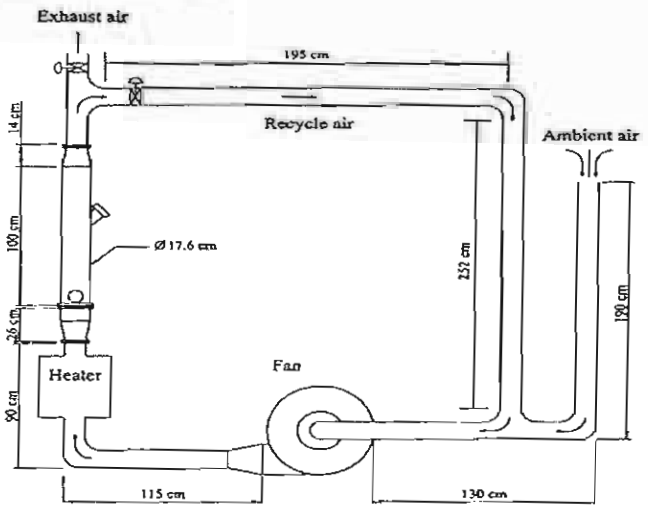


Figure 1 A schematic sketch of Fluidized bed dryer

ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 140 เซนติเมตร มีตัวให้ความร้อนจำนวน 3 ตัว ตัวละ 3 kW และพัดลมแบบเหวี่ยงชนิดใบพัดโค้งหลัง (Backward curved blade centrifugal fan) ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1.5 kW มีตัวปรับความเร็วรอบเพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศ ระบบอบแห้งหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วเพื่อลดการสูญเสียความร้อน อากาศบางส่วนที่ผ่านห้องอบแห้งแล้วจะถูกนำกลับมาผสมกับอากาศใหม่ที่เข้ามา และทำให้ร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อใช้ในการอบแห้งต่อไป อุณหภูมิของระบบอบแห้งควบคุมด้วยระบบ PID Controller มีความถูกต้อง $\pm 1^{\circ}C$

2. วิธีการทดลอง

เพิ่มความชื้นข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ให้ได้ความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกับความชื้นหลังการเก็บเกี่ยว คือ ประมาณ 28.2 และ 33.3%d.b. ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความชื้นเริ่มต้นสูงจะทำให้เมล็ดข้าวเกิดความเก่าได้เร็วขึ้น (Juliano, 1985) โดยทำการพรมน้ำทั้งหมดลงในเมล็ดข้าวเปลือก จากนั้นนำไปเก็บไว้ในถังที่ปิดสนิท เก็บไว้ที่ห้องเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ $4^{\circ}C$ ในช่วงประมาณ 3-4 วันแรก นำข้าวเปลือกออกมาคลุกให้ความชื้นกระจายตัว แล้วนำกลับไปเก็บดังเดิมจนครบ 7 วัน ควรปล่อยให้ข้าวเปลือกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม ก่อนที่จะนำไปอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิ 130 และ $150^{\circ}C$ โดยใช้ความเร็วอากาศ 2.6 เมตรต่อวินาที และอากาศหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ 80% จากนั้นนำไปเทมเปอริงเป็นเวลา 0.5 1 และ 2 ชั่วโมง โดยจะเก็บไว้ในขวดแก้วที่ปิดสนิทที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิของเมล็ดหลังการอบแห้งด้วยฟลูอิไดซ์เบด แล้วจึงนำไปเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนความชื้นลดลงเหลือประมาณ 16.5%d.b. จากนั้นนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ ต่อไป สำหรับการหาความชื้นของข้าวเปลือกจะเก็บตัวอย่าง ครั้งละประมาณ 50 กรัม ไปอบแห้งในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $103^{\circ}C$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง [5] การวัดอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกผล(รุ่น C8510 ช่วงวัดอุณหภูมิ -100 ถึง $1300^{\circ}C$ ความละเอียด $\pm 0.2\%$) และการวัดความเร็วลมใช้ Hot-wire anemometer มีความละเอียด ± 0.1 m/s

3. การวิเคราะห์คุณภาพ

ในการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเคมีกายภาพ จะทำซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านกายภาพประกอบไปด้วย การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (Head rice yield) โดยชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกที่สะอาดแล้ว 250 กรัม หลังจากนั้นกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก Satake จากนั้นทำการแยกข้าวกล้องเต็มเมล็ด ด้วยเครื่องคัดแยกแบบตะแกรงกลม (Aspirator) แล้วจึงทำการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ทั้งนี้ต้นข้าวอ้างอิงได้จากการนำข้าวเปลือกที่มีความชื้นเริ่มต้นเดียวกันกับที่อบแห้งด้วยอากาศร้อนมาอบแห้งโดยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมจนเหลือความชื้น 16.5%d.b. การวิเคราะห์ความขาวของข้าวสาร (Whiteness) โดยใช้อุปกรณ์วัดความขาวแบบอิเลคทรอนิคส์ Kett C-300 การวิเคราะห์ (Rice germ) โดยนำต้นข้าวของข้าวสารมาจำนวน 100 เมล็ด แยกจำนวนข้าวที่มีจมูกข้าว (Rice germ) ออกจากต้นข้าวของข้าวสารโดยใช้ไฟส่อง และทำการบันทึกจำนวนข้าวที่มีจมูกข้าวที่นับได้ ทำซ้ำกันตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วนำไปเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์จมูกข้าว และการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ White belly นำต้นข้าวของข้าวสารมาจำนวน 100 เมล็ด แล้วแยกจำนวนข้าวที่เป็น White belly ออกจากต้นข้าวของข้าวสารโดยใช้ไฟส่อง โดยเลือกเฉพาะเมล็ดที่มีจุดขุ่นทึบแสงเกิน 50% ขึ้นไป และทำการบันทึกจำนวนข้าวที่เป็น White belly ที่นับได้ ทำซ้ำกันตัวอย่างละ 3 ครั้ง แล้วนำไปเฉลี่ยเป็นเปอร์เซ็นต์ White belly

สำหรับการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง งานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยดัดแปลงวิธีวิเคราะห์มาจาก Fat Acidity-General Method by AACC Method 02-01 (AACC Method, 1995) โดยวิธีการดังนี้คือ นำข้าวกล้องไปขัดรำออกด้วยเครื่อง Satake Miller โดยในการทดลองครั้งนี้ขัด 3 ครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักรำที่ได้ ประมาณ 2 กรัม ใส่ใน Filter No. 1 ที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นบรรจุ Filter ลงในขวดแก้ว แล้วเติมสารละลาย Petroleum Ether 200 ml. และนำไป Centrifuge เป็นเวลา ประมาณ 2 วัน จากนั้นนำไปแยก Petroleum Ether ออก ด้วยวิธีการระเหย จนเหลือแต่ปริมาณไขมัน และเตรียมสารละลาย Toluene ด้วย Toluene 1 L., Alcohol 1 L. และ Phenolphthalein 0.8 g แล้วจึงนำสารละลาย Toluene ที่เตรียมไว้เติมลงในขวด ปริมาณ 50 ml. จากนั้นนำไปไตรเตรด ด้วย 0.0178 M KOH จนสารละลายเปลี่ยนเป็นเป็นสีชมพู อ่านปริมาณ 0.0178 M KOH ที่ใช้ไป บันทึกค่าไว้ แล้วนำมาคำนวณ หาเปอร์เซ็นต์กรดไขมัน ดังนี้

ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์) = [ปริมาณ 0.0178N KOH ที่ใช้ในการไตเตรตตัวอย่าง (มิลลิลิตร) - ปริมาณ 0.0178N KOH ที่ใช้ในการไตเตรต blank (มิลลิลิตร)] x 10 / [100 –ปริมาณน้ำหนักของน้ำใน 100 กรัม ตัวอย่าง (กรัม)] (1)

ส่วนการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์ค่าความหนืดของแป้ง ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการวัดค่าความหนืดของน้ำแป้ง ตัวอย่างข้าวสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้องบดให้ละเอียดก่อน โดยใช้เครื่อง Ultracentrifugal mill จากนั้นนำผงแป้งมาร่อนในตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร จากนั้นแบ่งแป้งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งนำไปหาความชื้นมาตรฐานเปียก โดยชั่งน้ำหนักแป้งให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 5 กรัมแล้ว นำมาอบที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 2.30 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำอีกส่วนหนึ่งไปทดสอบด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) และนำผลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรม SPSS วิเคราะห์สถิติ ANOVA (Analysis of Variance) โดยวิธี DMRT(Duncan's New Multiple Range Test) (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

ผลและวิจารณ์

1. การลดความชื้นของข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยอากาศร้อน

จากการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้น 28.2 และ 33.3%d.b. ที่อุณหภูมิ 130 และ 150°C มาทำการเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลาต่างๆ และนำมาลดความชื้นต่อด้วยการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าจากการอบแห้งที่เงื่อนไขความชื้นเริ่มต้น 28.2%d.b. อุณหภูมิ 150°C เก็บในที่อับอากาศ 60 นาที ความชื้นหลังการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดประมาณ 22.7%d.b. จะมีอัตราการลดความชื้นโดยเฉลี่ยในช่วงการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมประมาณ 3.9%d.b. ในขณะที่ถ้าเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 120 นาที ความชื้นที่ออกจากเครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดลดลงเป็น 21.8%d.b. ความชื้นโดยเฉลี่ยในช่วงการเป่าด้วยอากาศร้อนจะลดลงแค่ประมาณ 3%d.b. ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามหลักการเก็บในที่อับอากาศที่ต้องการให้ความชื้นกระจายตัวออกมาที่ผิวของเมล็ดเพื่อที่จะสามารถเป่าลมลดความชื้นได้ง่าย โดยระยะเวลาในการเก็บในที่อับอากาศจะมีผลต่อการลดความชื้นที่ลดลงในช่วงการเป่าด้วยอากาศแวดล้อมในช่วงที่ความชื้นยังกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และถ้าข้าวเปลือกที่มีความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งด้วยเครื่องฟลูอิไดซ์เบดสูง เมื่อความชื้นกระจายตัวไปที่ผิวของข้าวเปลือกแล้ว ที่ผิวของข้าวเปลือกก็จะมีความชื้นสูง ทำให้การเป่าด้วยอากาศแวดล้อมสามารถลดความชื้นลงได้ง่ายกว่าข้าวเปลือกที่อบแห้งมามากกว่าอีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการเก็บในที่อับอากาศต่อการลดลงของความชื้นในช่วงการเป่าลมเย็นในทุกกรณี พบว่าการเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้นไม่ส่งผลให้การลดลงของความชื้นในช่วงของการเป่าลมเย็นเร็วขึ้นมากนัก นั่นแสดงว่าเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 นาทีก็น่าจะเพียงพอ

2. ร้อยละต้นข้าว

รูปที่ 4 และ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว กับระยะเวลาในการ Tempering ที่อุณหภูมิอบแห้ง 130 และ 150°C และความชื้นเริ่มต้น 28.2 และ 33.3%d.b. ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ทั้งนี้ยังมีปริมาณที่ต่ำกว่าข้าวอ้างอิง ซึ่งเปอร์เซ็นต์ต้นข้าวที่เพิ่มขึ้นเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิสูงขึ้นนั้น เชื่อว่าน่าจะมาจากปรากฏการณ์ Gelatinization ในเมล็ดข้าวเปลือก โดยข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งแล้วมีอุณหภูมิของเมล็ดสูงกว่า จะเกิดปรากฏการณ์นี้ได้ดี ทำให้ได้ปริมาณต้นข้าวมากกว่า (ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540) เนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อน ส่วนที่เป็นอะมิโลส จะละลายและดูดซับน้ำได้มาก ทำให้เกิดการพองตัวได้มากขึ้น โมเลกุลจะเข้ามาใกล้ชิดกันและยึดเข้าด้วยกันทำให้โครงสร้างโมเลกุลแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้รอยร้าวหรือรอยแตกภายในเมล็ดข้าวสามารถประสานกันอย่างสนิท (จารนัย พานิชยกุล, 2537) แต่ในกรณีที่ปริมาณต้นข้าวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่าปริมาณต้นข้าวของข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง อาจจะเนื่องมาจากปริมาณความร้อนส่วนใหญ่ที่ใช้ในการระเหยน้ำ ถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิแก่ข้าวเปลือก ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึงอุณหภูมิ Gelatinization ของแป้งแล้ว แต่ความชื้นภายในเมล็ดข้าวเปลือกเหลืออยู่น้อยจึงส่งผลให้ระยะเวลาการเกิด Gelatinization สั้น และในขณะที่อัตราการอบแห้งลดลง จึงเกิดความแตกต่างของความชื้นที่บริเวณผิวและแกนกลางของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในเมล็ดข้าวเปลือก ซึ่งนำไปสู่การเกิดรอยแตกร้าวและหัก เมื่อนำไปสีจึงได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวลดลง สำหรับการเก็บในที่อับอากาศจะเห็นได้ว่าการเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์ต้นข้าว ดังนั้นการเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลา 30 นาที จึงน่าจะเพียงพอ

3. ความขาวของข้าว

รูปที่ 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวกับระยะเวลาในการ Tempering ของข้าวเปลือกหลังการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิ ความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการ Tempering มีผลต่อความขาวของข้าวกล้อง โดยที่ความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้นและTempering เป็นเวลานานขึ้นจะทำให้ข้าวกล้องมีสีเหลืองขึ้น และเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ข้าวที่ผ่านการอบแห้งมีสีเหลืองกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากกระบวนการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อ

น้ำตาลที่มีอยู่ในข้าวได้รับความร้อน พันธะระหว่างโมเลกุลภายในน้ำตาลจะหลุดออกจากกันกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลต่ำ และเมื่อให้ความร้อนต่อไปพันธะภายในน้ำตาลโมเลกุลต่ำจะหลุดออกจากกัน เกิดเป็นสารประกอบคีโตน ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารที่ทำให้เกิดสีเหลืองในเมล็ดข้าว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวกล้องมีค่าความขาวลดต่ำลง

4. จมูกข้าว

จมูกข้าว (Rice germ) เป็นส่วนเล็กๆ อยู่ที่มุมล่างของเมล็ดข้าว และจากการนำข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้ง ไปกะเทาะเปลือกออกด้วยเครื่องกะเทาะเปลือก Satake พบว่าอุณหภูมิอบแห้ง ความชื้นเริ่มต้น และระยะเวลาในการ Tempering ไม่มีผลต่อร้อยละของจมูกข้าว ทั้งนี้จะเห็นได้จากปริมาณของจมูกข้าวยังคงเหลืออยู่ทั้งหมดทุกกรณี ซึ่งมีค่าเท่ากับข้าวอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9

5. ร้อยละข้าวท้องไข่ (White belly)

ร้อยละข้าวท้องไข่ (White belly) เป็นลักษณะของข้าวที่มีจุดขุ่นขาวทึบแสง เป็นส่วนที่กลุ่มแป้งและโปรตีนมีการเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ จึงมีส่วนที่เป็นช่องว่างอยู่มากและภายในช่องว่างนี้จะมีอากาศแทรกอยู่ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อข้าวเกิดการเจลาทิไนซ์เซชัน ไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งเมล็ด จากรูปที่ 10 และ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ข้าวท้องไข่ กับระยะเวลาที่ใช้ในการ Tempering จะเห็นว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งจะมีปริมาณข้าวท้องไข่ต่ำกว่าข้าวอ้างอิง โดยข้าวที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน ปริมาณข้าวท้องไข่จะลดต่ำลงเมื่อความชื้นที่เริ่มต้นที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อความชื้นเริ่มต้นสูงขึ้น จะใช้ระยะเวลาในการอบแห้งนานขึ้น ส่งผลให้โอกาสการเกิดเจลาทิไนซ์เพิ่มขึ้น แต่ยังคงเป็นการเกิดเจลาทิไนซ์เพียงบางส่วน เพราะการเกิดเจลาทิไนซ์ที่สมบูรณ์จะพบปริมาณข้าวท้องไข่น้อยมาก หรือไม่เหลือเลย ในขณะที่เวลาในการ Tempering มีผลต่อปริมาณการเกิด White belly น้อยมาก

6. ปริมาณกรดไขมันอิสระ

จากการทดสอบปริมาณกรดไขมันอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งของการเกิดกลิ่นเหม็นหืนของข้าวกล้อง (www.ars.usda.gov) จากการทดลองอบแห้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เซชัน ที่มีความชื้นเริ่มต้น 28.2 และ 33.3%d.b. โดยใช้อุณหภูมิอบแห้ง 130 และ 150°C พบว่า เมื่ออุณหภูมิอบแห้งสูงขึ้นปริมาณกรดไขมันอิสระทั้งหมดในข้าวกล้องจะลดลง และเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิงซึ่งไม่ได้ผ่านการอบแห้ง จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องที่ผ่านการอบแห้งมีค่าต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ทั้งนี้เนื่องมาจากความร้อนสามารถหยุดยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เปลี่ยนไขมันในรำข้าวให้กลายเป็นกรดไขมันอิสระ (Champagne, 1994) ในขณะที่เมื่อ Tempering นานขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระ เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ทั้งนี้น่าจะมาจากการที่เอนไซม์ไลเปสน่าจะถูกยับยั้งการทำงานทั้งหมดตั้งแต่กระบวนการอบแห้งด้วยฟลูอิไดซ์เบดแล้ว

7. สมบัติทางด้านความหนืด

จากการศึกษาความหนืดของน้ำแป้งโดยเครื่อง RVA ของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด จะให้ค่า Pasting temperature, Peak viscosity และ Final viscosity แตกต่างกันดังตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด ร่วมกับการ Tempering และ การ Ventilation มีผลทำให้อุณหภูมิที่เม็ดแป้งเริ่มพองตัว (Pasting temperature) สูงขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง(ข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง) ทุกเงื่อนไขการทดลอง ทั้งนี้เชื่อว่าไขมันที่อยู่ในรำของข้าวกล้องมีส่วนขัดขวางการซึมผ่านของน้ำเข้าสู่เม็ดแป้ง ดังนั้นอุณหภูมิที่เม็ดแป้งต้องใช้ในการพองตัวอีกครั้งจึงสูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ใช้ในการ Tempering พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างเป็นนัยสำคัญในเกือบทุกกรณี

ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการพองตัวของแป้งเมื่อสุก จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการ Tempering นานขึ้น ค่าความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มลดลง ในเกือบทุกกรณี นั่นแสดงว่า ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดแป้งข้าวกล้องมีค่าลดลง

ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ที่เกิดขึ้นคือความหนืด เมื่อน้ำแป้งถูกทำให้เย็นหลังการเกิดเจลาทิไนซ์ ส่วนของอะมิโลสจะเกิดโครงสร้างขึ้นใหม่ในลักษณะโครงร่างสามมิติ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เจลแข็งขึ้น ซึ่งความหนืดของน้ำแป้งที่เพิ่มขึ้นอีกครั้งเรียกว่า การคืนสภาพของของน้ำแป้งสุก (Retro gradation) (จารนัย พาณิชยกุล, 2537) จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ และความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน เมื่อ Tempering ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด จะมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าข้าวอ้างอิงในทุกกรณี แสดงให้เห็นว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด มีผลต่อการคืนตัวของน้ำแป้งสุกดีกว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง อาจเนื่องมาจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งในข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดมีการจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งของข้าวในระหว่างการคืนตัวของน้ำแป้งสุกดีกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการอบแห้ง (Hoover, et. al.,1996)

ค่า Setback เป็นผลต่างของความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) กับความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิและความชื้นเริ่มต้นเดียวกัน เมื่อทำการ Tempering นานขึ้น ค่า Setback ที่ได้จะเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ยังคงมีค่าสูงกว่าข้าวอ้างอิง ทั้งนี้เชื่อว่าน่าจะมาจากการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้ง ซึ่งอาจจะส่งผลให้คุณภาพข้าวที่ได้จะแข็งกระด้างมากขึ้น เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาของละมุน วิเศษ (2541) กล่าวว่าเมื่อเก็บรักษาข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เป็นเวลานานขึ้น ค่า Setback ที่ได้จะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการปรับสภาพการละลายและการเกิดเจลของแป้งและโปรตีนในเมล็ดที่ผ่านการเก็บรักษาให้กลายเป็นสารที่คงตัวขึ้น และละลายน้ำได้น้อยลง มีผลให้เมล็ดข้าวแข็งขึ้นเมื่อนำข้าวสารที่เก็บรักษาไว้ระยะหนึ่งมาหุงต้ม

Table 1 Pasting properties of Khao Dawk Mali 105 after processing under different conditions

	Peak viscosity (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Pasting temp (°C)
T=130 C,Mi=28.2 %db,Temper 30 min	303.11±7.5^{de}	334.64±20.7^{bcdef}	31.53±14.4^{b}	81.58±1.3^{c}
T=130 C,Mi=28.2 %db,Temper 60 min	279.14±22.7^{cde}	331.74±22.9^{bcdef}	52.60±0.6^{cd}	81.85±0.4^{cd}
T=130 C,Mi=28.2 %db,Temper 120 min	242.68±6.7^{bc}	308.85±9.3^{abcde}	66.17±2.7^{cdef}	83.26±0.5^{ef}
T=130 C,Mi=33.3 %db,Temper 30 min	318.96±51.7^{de}	370.09±54.2^{f}	51.12±2.5^{c}	82.46±0.2^{cdef}
T=130 C,Mi=33.3 %db,Temper 60 min	242.11±5^{bc}	314.60±7.1^{abcdef}	72.49±2.2^{def}	82.95±0.7^{def}
T=130 C,Mi=33.3%db,Temper 120 min	298.61±69.5^{de}	385.31±71.5^{ef}	86.70±2.1^{cdef}	83.46±0.3^{b}
T=150 C,Mi=28.2 %db,Temper 30 min	265.00±4.7^{bcde}	330.59±5.3^{bcdef}	65.59±0.6^{cde}	83.46±0.8^{f}
T=150 C,Mi=28.2 %db,Temper 60 min	259.62±36.1^{bcd}	340.26±27.3^{cdef}	80.63±9.2^{efg}	83.13±0.2^{ef}
T=150 C,Mi=28.2 %db,Temper 120 min	184.16±9.2^{a}	280.56±12^{abc}	96.40±13.1^{g}	82.80±1^{def}
T=150 C,Mi=33.3 %db,Temper 30 min	299.04±26.5^{de}	357.79±34^{def}	58.75±7.7^{cd}	82.11±0.2^{cde}
T=150 C,Mi=33.3 %db,Temper 60 min	211.15±24.6^{ab}	297.19±20.2^{abcd}	86.04±8.1^{fg}	84.63±0.1^{g}
T=150 C,Mi=33.3 %db,Temper 120 min	251.78±30.5^{bcd}	322.66±34.6^{bcdef}	70.88±4.2^{cdef}	82.51±0.5^{cdef}
Reference Mi=28.2%d.b.	279.26±1.7^{cde}	257.23±1.2^{a}	(-22.03)±0.5^{a}	78.10±0.3^{a}
Reference Mi=33.3%d.b.	288.73±2.4^{cde}	261.62±1.5^{ab}	(-27.10)±1.6^{a}	77.61±0.1^{a}

หมายเหตุ: ตัวเลขที่ตามด้วยตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

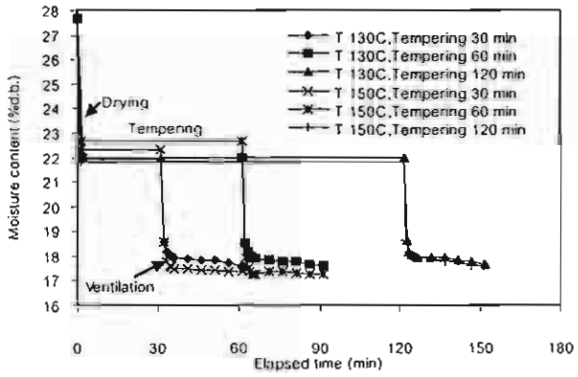


Figure 2 Drying characteristics of paddy at initial moisture 28.2%d.b.

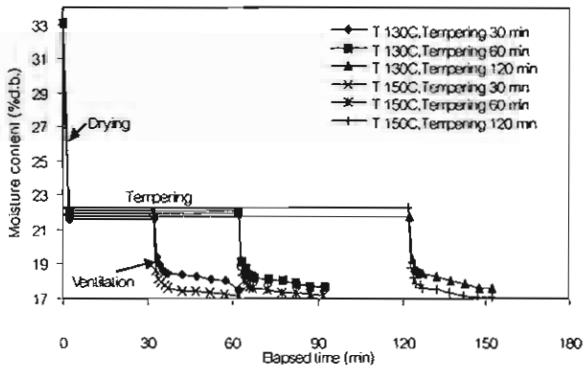


Figure 3 Drying characteristics of paddy at initial moisture 33.3%d.b.

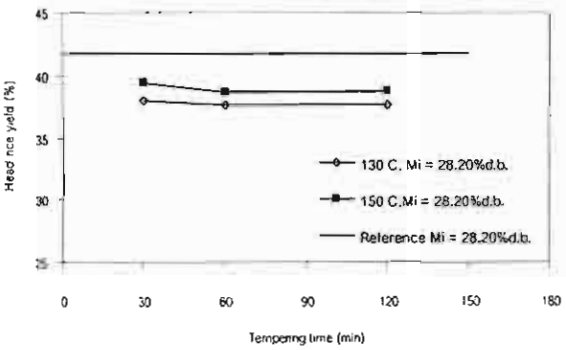


Figure 4 Change of head rice yield with tempering time at initial moisture 28.2%d.b.

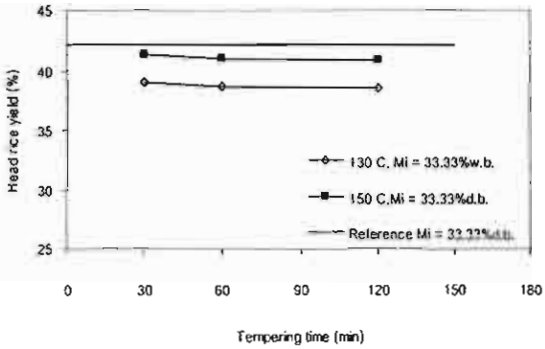


Figure 5 Change of head rice yield with tempering time at initial moisture 33.3%d.b.

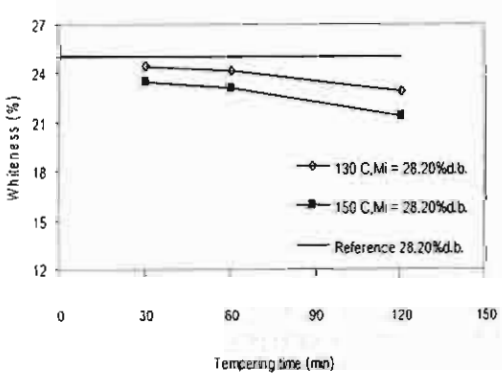


Figure 6 Change of whiteness with tempering time at initial moisture 28.2%d.b.

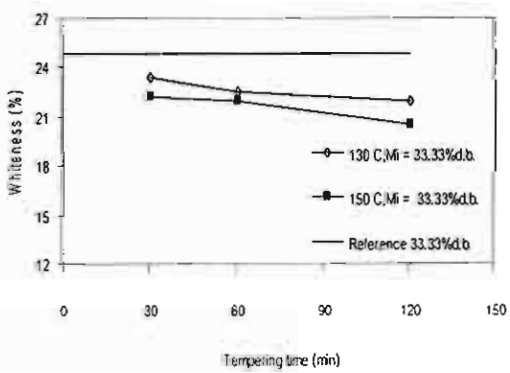


Figure 7 Change of whiteness with tempering time at initial moisture 33.3%d.b.

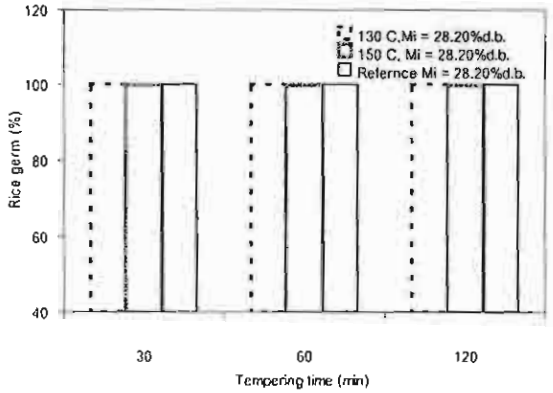


Figure 8 Change of rice germ with tempering time at initial moisture 28.2%d.b.

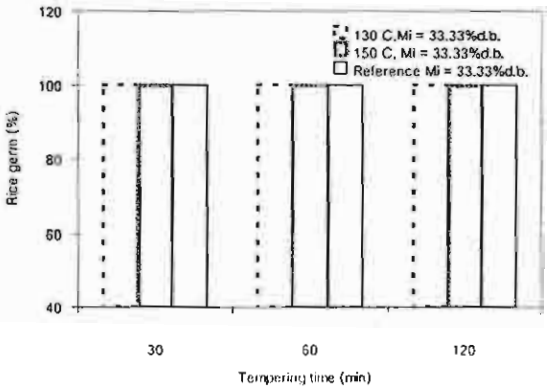


Figure 9 Change of rice germ with tempering time at initial moisture 33.3%d.b.

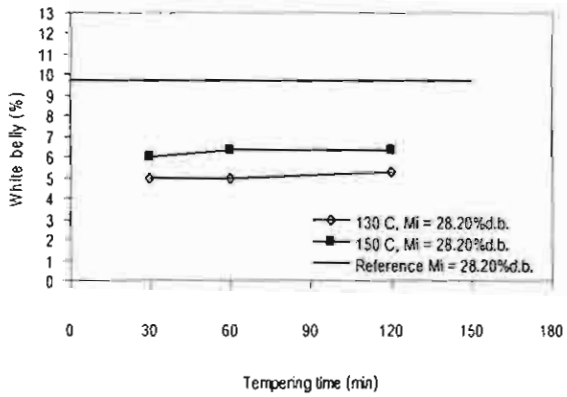


Figure 10 Change of white belly with tempering time at initial moisture 28.2%d.b.

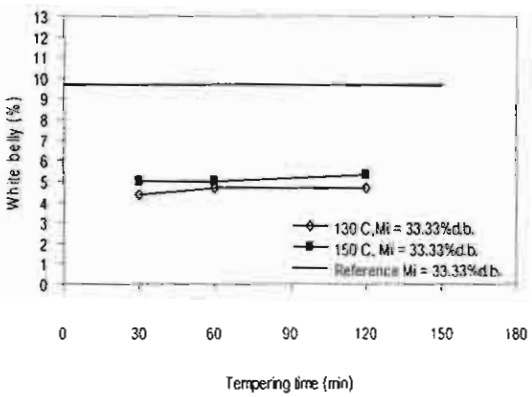


Figure 11 Change of white belly with tempering time at initial moisture 33.3%d.b.

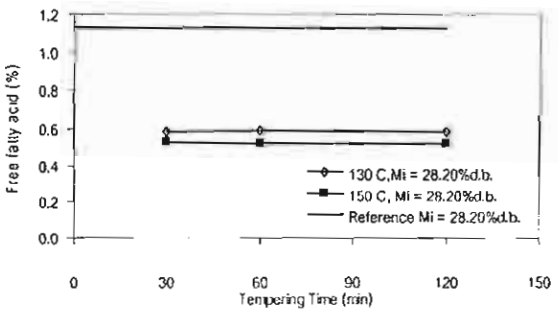


Figure 12 Change of free fatty acid with tempering time at initial moisture 28.2%d.b.

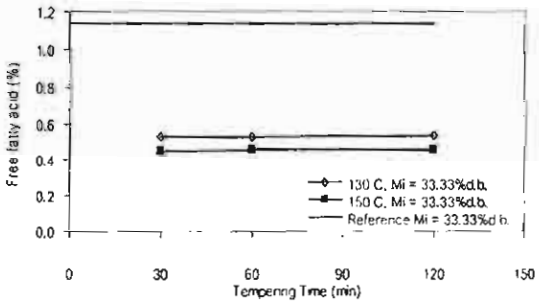


Figure 13 Change of free fatty acid with tempering time at initial moisture 33.3%d.b.

สรุป

จากผลการทดลอง ที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการลดความชื้นของข้าวเปลือก ที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดมากที่สุดคือ อุณหภูมิของอากาศร้อน โดยถ้าอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้อบแห้งเพิ่มขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการอบแห้งจะสั้นลง ทั้งนี้การเก็บในที่อับอากาศ (Tempering) เป็นเวลานานขึ้น ไม่ส่งผลให้คุณภาพทางด้าน เปอร์เซ็นต์ต้นข้าว (Head rice yield) ปริมาณจมูกข้าว (Rice germ) ปริมาณข้าวท้องไข่ (White belly) และปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่การเก็บในที่อับอากาศเป็นเวลานานขึ้น ทำให้ความขาวของข้าวกล้อง (Whiteness) ลดลง ดังนั้น การเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลา 30 นาที จึงเพียงพอ จากผลการทดสอบคุณภาพทางด้านปริมาณกรดไขมันอิสระ พบว่า อุณหภูมิสูงน่าจะสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระได้มากกว่ากว่าข้าวที่ไม่ได้ผ่านการอบแห้ง อีกทั้งปริมาณจมูกข้าวหลังจากผ่านกระบวนการสี ยังมีอยู่ครบทั้ง 100 เปอร์เซ็นต์ จากผลการทดสอบความหนืดของน้ำแป้ง พบว่า ค่า Peak viscosity และ Final viscosity มีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลานานขึ้น ส่วนค่า Setback จะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บในที่อับอากาศเป็นระยะเวลานานขึ้น ซึ่งเชื่อว่าน่าจะทำให้ข้าวมีความแข็งกระด้างและร่วนมากขึ้น

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนเงินทุน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

จารนัย พาณิชยกุล,2537, "แป้ง (starch) – การเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำให้แป้งสุก," **วารสารจาร์พา**, ฉบับที่ 11, หน้า 22 – 24.

ณัฐพล ภูมิสะอาด, 2540, **การจัดการข้าวเปลือกชื้นโดยการอบแห้งแบบเทคนิคฟลูอิไดเซชัน การเก็บในที่อับอากาศ และการเป่าด้วยอากาศแวดล้อม**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอุตสาหภาพ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี-พระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 36-42.

American Association of Cereal Chemists Approved Methods 02-01 (AACC Method), 1995, Approved Methods Committee, 9th edition, St. Paul, Minn.

Champagne, E., 1994, "Brown rice stabilization," In Rice Science and Technology, Marcel Dekker, New York, pp. 17-35.

Health Benefits & Concerns for rice [Online], Available: http://www.healthnotes.com [2005, September 29].

Hoover, R., Sailaja, Y. and Sosulski, F. W., 1996, "Characterization of starches from wild and long grain brown rice", Food Research Internatinal, Vol. 29, No. 2, pp. 99-107.

Juliano, B.O., 1985, Rice: Chemical and technology, 2nd ed.,Minnesota,American Association of Cereal Chemists, 774 p.

Rice [Online], Available: http://woltonfeed.com/self/rice.html [2005, September 29].

Rice Quality Categories [Online], Available: http://www.ars.usda.gov/research/docs.htm?docid=7060 [2005, September 29].

Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Swasdisevi, T. and Poomsa-ad, N.,1999, "Managing moist paddy by drying tempering and ambient air ventilation", Drying Technology, Vol.17, No.1&2, pp 335-344.

FEASIBILITY OF COMBINED FIR AND HOT-AIR CONVECTION IN FLUIDIZED BED PADDY DRYING

Naret Meeso[1], Adisak Nathakaranakule[2],Thanid Madhiyanon[3] and Somchart Soponronnari[4]

Abstract

The combination of far-infrared radiation (FIR) and hot-air convection in fluidized bed paddy dryer is the feasible study of the combined drying method in order to solve the limitation of fluidized bed drying. The combined drying methods are compared to the individual hot-air convective drying methods at the same drying temperature. The experimental results found that the combined far-infrared radiative and hot-air convective method was inefficient for applying in fluidized bed drying due to the dominant effect of the hot-air convection over the far-infrared radiation. Furthermore, the reduction of FIR intensity of lamp heater was attributed by the setup position of lamp heater and air velocity in the drying chamber of fluidized bed dryer.

Keywords: Combined Drying Method, Far-infrared Radiation, Fluidized bed

Introduction

The fluidized bed paddy dryer has been continuously developed during the past several years. At present, a number of fluidized bed dryers are widely used for paddy drying process in Thai rice mills; moreover, it is exported to many countries (Soponronnarit, 1996). Fluidized bed drying provide uniform moisture content of the product; as a result, high drying air temperature can be employed due to overdried grain, high drying capacity due to better heat and mass transfer, much smaller drying chamber and thus a significantly lower initial cost, and significant spin-off in terms of increasing head rice yield and potential for producing aging rice.

Most paddy drying processes in Thai rice mills are divided into two stages; the fast drying in the first stage and the slow drying in the second stage with tempering between both stages (Soponronnarit, 1995; Meeso, *et al.* 1999). Fluidized bed dryer is usually installed in this first drying stage because its potential is great especially for drying high moisture paddy. Additionally, Poomsa-ad, *et al.* (2001) suggested that the moisture reduction of paddy in the first drying stage by fluidized bed dryer should not be less than 22.5% dry basis in order to maintain the head rice yield. This is the limitation of fluidized bed drying in paddy drying process.

Recently, infrared radiation becomes an important source of heat treatment, and is interesting in the application of the food drying technology because of some specific features, i.e. versatility of heat infrared, simplicity of the required equipment, easy accommodation of the infrared heating with convective and conductive

[1]Department of Mechanical Engineering, North Eastern University, Khon Kaen 40000

[2,4]School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140

[3]Department of Mechanical Engineering, Mahanakorn University of Technology, Bangkok 10530, Thailand

heating and also significant energy savings. (Sandu, 1986; Hashimoto, *et al.* 1994; Ratti and Mujumdar, 1995). Infrared radiation is mostly generated from the electrical and the gas-fired heaters. Infrared heaters made from fine ceramics with high emissivity in the far-infrared (FIR) region have been commercially manufactured during the recent years, and it has been applied diversity (Sakai and Hanazawa, 1994; Hashimoto and Kameoka, 1999).

In far-infrared drying, energy in the form of electromagnetic wave directly penetrates into the product, and is absorbed by the molecules of product. This absorbed energy vibrates the molecules inside the product causing interaction between them and, as a result, heat is generated inside the product. (Ginzburg, 1969; Sandu, 1986; Sakai and Hanazawa, 1994).

According to the features of far-infrared radiation, it is expected to be used in combination with hot-air convection to solve the limitation of fluidized bed drying. Therefore, this attention will focus on the feasibility of the combination of far-infrared radiation and hot-air convection in fluidized bed drying of paddy.

Materials and methods

1. Experimental apparatus

The experimental batch fluidized bed dryers used in this study were shown in Figures 1 and 2. Both main systems comprised a cylindrical drying chamber, a 12 kW electrical heater, a 400 W ceramic FIR lamp heater (D-model INFRAPARA) and backward curved-blade centrifugal fan driven by 1.5 kW motor. The drying air temperature was controlled by a PID controller (accuracy of ±1°C). The surface temperatures of FIR lamp heater were varied by regulating the voltage. And, a mechanical variable speed unit could regulate precisely airflow rate.

The difference between the two systems was the setup position of the FIR lamp heater in the drying chamber. System 1 : FIR lamp heater was placed at the top of the drying chamber, and it was elevated approximately 15 cm. from the fixed paddy bed, whereas System 2 : FIR lamp heater was sloped about 60° at the side of the drying chamber, and the distance between the FIR lamp heater and the fixed bed was 30 cm.

The temperatures of drying air, FIR lamp heater and paddy grain were measured by type-K thermocouples connected to data logger (accuracy of ±0.1 °C); besides, air velocity was measured by hot-wire anemometer (accuracy of ±0.1 m/s).

2. Experimental procedure

Fresh harvested paddy from a farm in Pathumtani Rice Research Center was rewetted to moisture contents about 33.0-35.0 %d.b. and kept in a cooling room at the temperature of 3-5 °C. Before starting the drying experiments, paddy was left in ambient air until its temperature was closed to ambient air temperature.

The experimental conditions of combined far-infrared radiative and hot-air convective fluidized bed drying were indicated in Table 1., and all conditions in this table were compared to the individual hot-air convective fluidized bed drying at the same air temperature. During the drying experiments, paddy samples were taken before and after drying for determining moisture content. The moisture contents of paddy were determined by drying triplicate samples of 40 g in a hot-air oven at a temperature of 103°C for 72 h (AACC, 1995), and average values were calculated on a dry basis.

The FIR intensities emitted by heater surface are calculated from the Stefan-Boltzmann law as the following equation:

$$\dot{q}_{emitt} = \varepsilon\sigma T_s^4$$

where ε is the emissivity (0.9) of the FIR heater surface made from fine ceramic (Sang Chai Meter Co., LtD.). σ is the Stefan-Boltzmann constant (5.67×10^{-8} W/m^2 K^4), and T_s is the absolute temperature (K) of the FIR lamp heater surface.

Table 1. The experimental conditions of combined FIR and hot-air convective fluidized bed drying.

	Conditional numbers		
Drying conditions	1	2	3
Drying air temperature (^{o}C)	150	100	100
Bed depth (cm)	9.5	9.5	9.5
Air velocity (m/s)	2.6	2.6	2.5
Average FIR intensity (W/cm^2)	0.3-0.9	0.3-0.9	0.3-0.9

Note: All conditions were compared to the individual hot-air convective fluidized bed drying

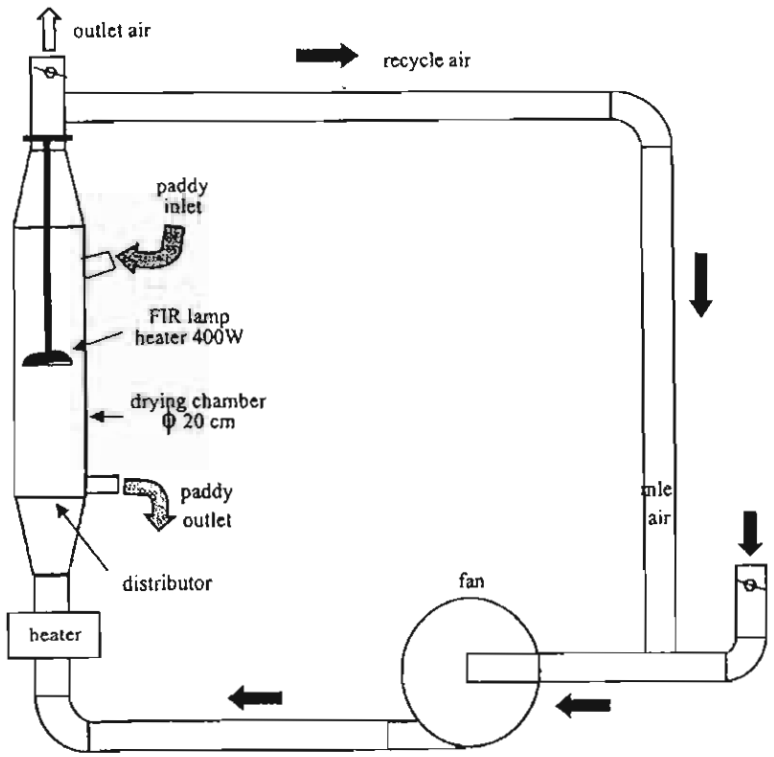


Figure 1 Schematic diagram of a batch-type fluidized bed dryer: System 1.

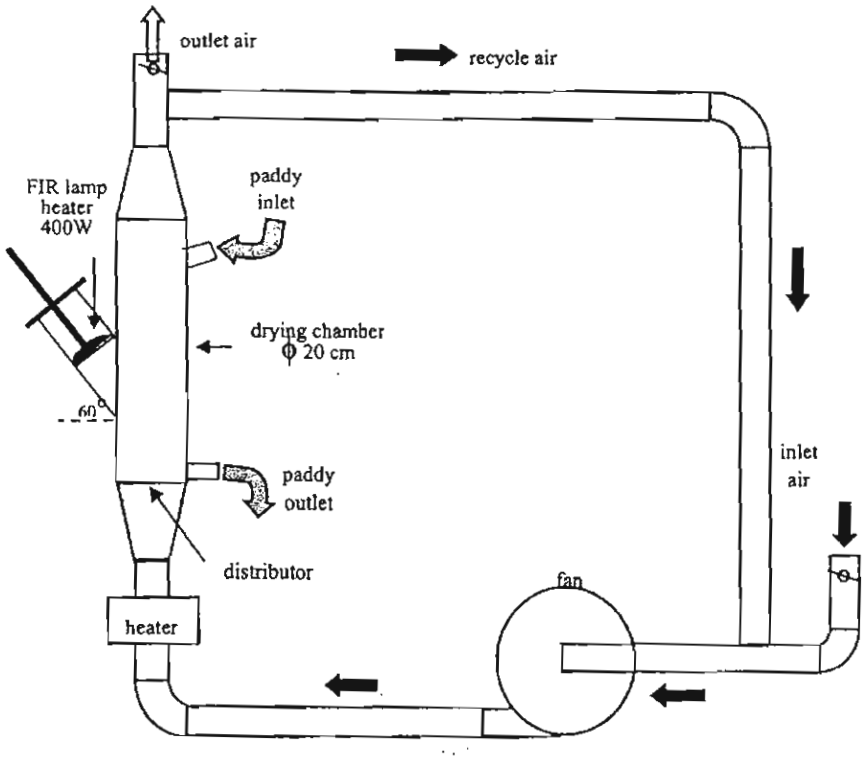


Figure 2. Schematic diagram of a batch-type fluidized bed dryer: System 2.

Results and discussions

Prior to the study of the combined far-infrared radiative and hot-air convective method of paddy drying, the setup positions of a FIR lamp heater in the drying chamber of fluidized bed dryer were investigated for determining the optimum position in the combination of far-infrared radiation and hot-air convection.

1. FIR setup aspects

The FIR lamp heater of both systems was installed in the different position within the drying chamber of fluidized bed dryer, as shown in Figures 1 and 2. The relationship between the intensities of FIR lamp heater and the electrical currents of Systems 1 (line 2) and 2 (line 3) is shown in Figure 5.3 compared with the combination of far-infrared radiation and natural convection within the drying chamber (line 1). It was seen that the intensities of FIR lamp heater in System 1 were substantially reduced; however, when the position of FIR lamp heater in System 1 was changed to System 2, FIR intensities were increased significantly. This was because the FIR lamp heater of System 1 was directly impinged from the hot-air stream at high velocity (2.6 m/s), resulting in the cooling effect on the surface temperature of FIR lamp heater. Consequently, it may be believed that the setup position of FIR lamp heater had a marked effect on an amount of far-infrared irradiation to paddy in fluidized bed drying. Moreover, the drying air velocity of fluidization technique should be an important effect on the surface temperature of FIR lamp heater as mentioned in the works of Ginzburg, 1969; Afzal, *et al.* 1999.

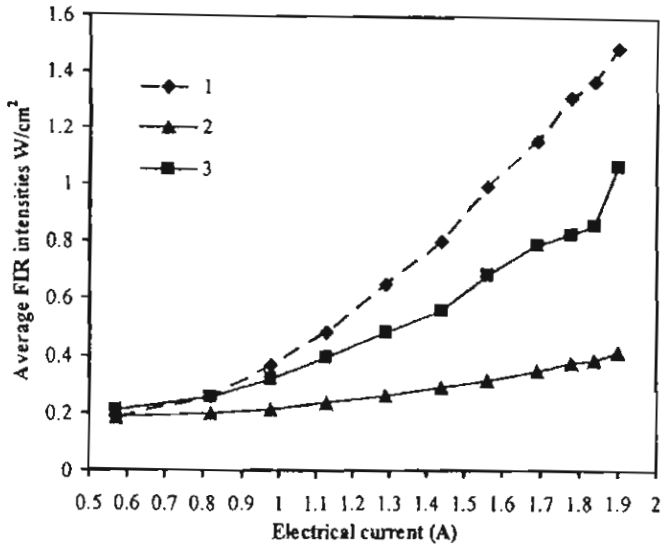


Figure 3. The relationship between FIR intensities and electrical currents.

1 : combination of FIR and natural convection (30°C)

2 : combination of FIR and forced convection (150°C,2.6 m/s) in System 1

3 : combination of FIR and forced convection(150°C, 2.6 m/s) in System 2

2. Drying characteristic aspects

To avoid the cooling effect on the irradiation of FIR lamp heater, System 2 was used for the drying experiments. The curves of drying and grain temperature as shown in Figures 4 to 6 exhibited the changes of the moisture content and the grain temperature of paddy with time during the combined far-infrared radiation and hot-air convection and the individual hot-air convection in fluidized bed drying.

Figure 4 compares the combined far-infrared radiative and hot-air convective drying at three different FIR intensities and a constant drying air temperature of 150°C to the individual hot-air convective drying at the same temperature. It was seen that the slopes of the drying curves under combined far-infrared radiative and hot-air convective drying were almost the same as the individual hot-air convective drying. In order to clarify these phenomena, the hot-air temperature and the air velocity of fluidization were reduced to examine the effect of far-infrared irradiation on paddy drying. In Figures 5 and 6 the hot-air temperature and the air velocity were reduced from 150°C and 2.6 m/s to 100°C and 2.1 m/s, respectively. The trends of drying curves of each figure were still similar. These results were probably due to the dominant effect of forced convective heat transfer over than FIR radiative transfer during the combination of far-infrared radiation and hot-air convection in fluidized bed drying of paddy.

Furthermore, the grain temperatures under combined far-infrared radiative and hot-air convective drying were investigated to confirm the above phenomena. As shown in Figures 4 to 6, the temperature curves of paddy grain were not different as compared to the individual hot-air convective drying in each drying condition. These results

confirmed the dominant effect of forced convective heat transfer in this combined drying technique. Therefore, it was clearly observed that the combination of far-infrared radiation and hot-air convection in fluidized bed dryer did not affect the paddy drying.

Conclusions

The combined method of far-infrared radiation and hot-air convection was unworkable to apply in fluidized bed dryer for paddy drying. This was mainly because of the dominant effect of forced convection heat transfer over the FIR radiative heat transfer; as a result, the curves of drying and grain temperature under the combined far-infrared radiative and hot-air convective fluidized bed drying were almost identical. Additionally, the setup position of FIR lamp heater and the air velocity in the drying chamber of fluidized bed dryer should have a marked effect on the reduction of FIR intensity at the surface of FIR lamp heater.

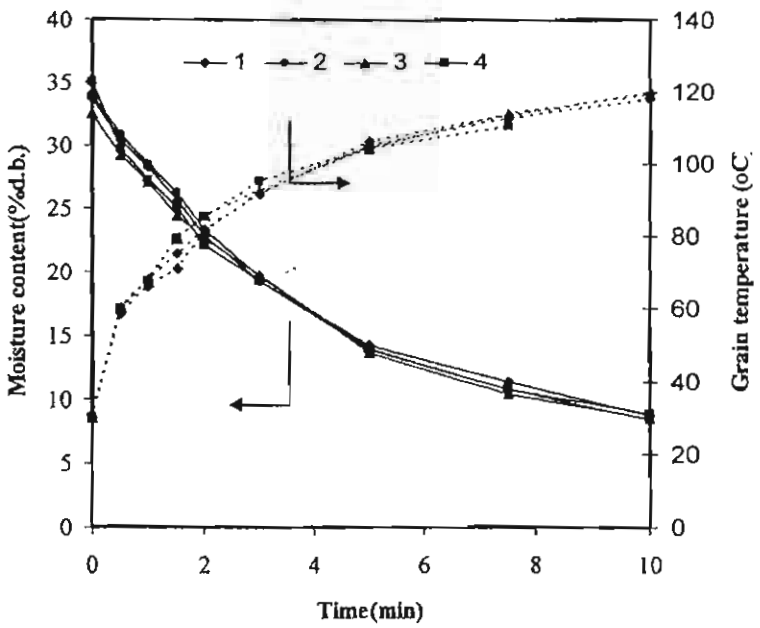


Figure 4. Curves of drying and grain temperature for drying condition 1.

1 : combined FIR (0.320 W/cm^2) and hot-air convective (150°C, 2.6 m/s) drying

2 : combined FIR (0.677 W/cm^2) and hot-air convective (150°C, 2.6 m/s) drying

3 : combined FIR (0.860 W/cm^2) and hot-air convective (150°C, 2.6 m/s) drying

4 : individual hot-air convective (150°C, 2.6 m/s) drying

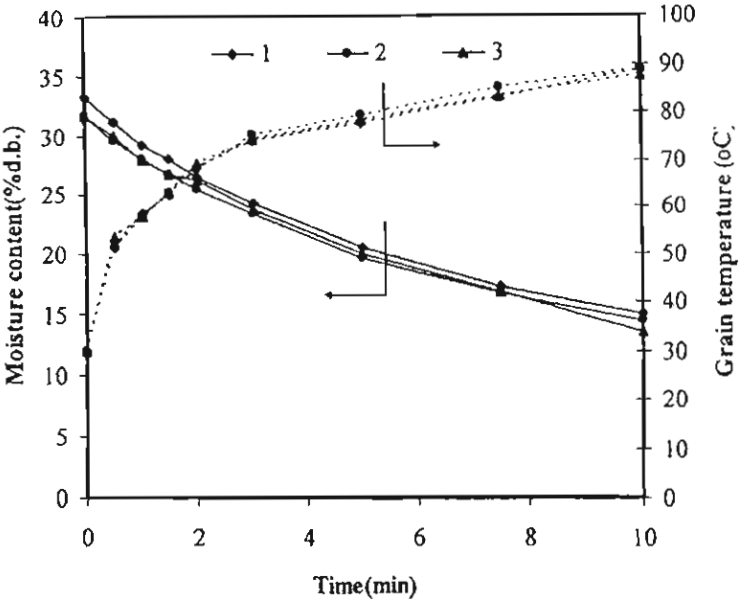


Figure 5 Curves of drying and grain temperature for drying condition 2.

1 : combined FIR (0.349 W/cm^2) and hot-air convective (100°C, 2.6 m/s) drying

2 : combined FIR (0.636 W/cm^2) and hot-air convective (100°C, 2.6 m/s) drying

3 : individual hot-air convective (100°C, 2.6 m/s) drying

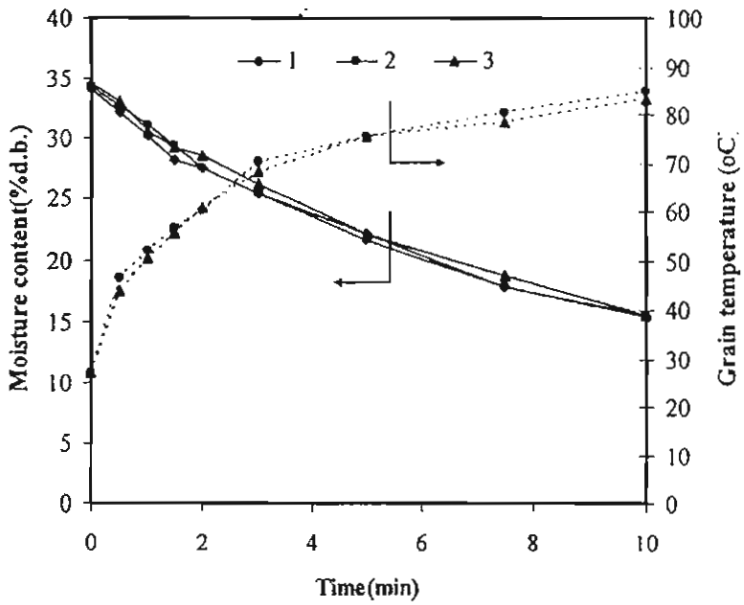


Figure 5.6. Curves of drying and grain temperature for drying condition 3.

1 : combined FIR (0.347 W/cm^2) and hot-air convective (100°C, 2.1m/s) drying

2 : combined FIR (0.649 W/cm^2) and hot-air convective (100°C, 2.1m/s) drying

3 : individual hot-air convective (100°C, 2.1m/s) drying

Acknowledgments

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) for financial support.

References

AACC, 1995, Approved method of the American of Cereal Chemists, 9th ed., St. Paul, MN.

Afzal, T.M., Abe, T., and Hikida, Y., 1999, "Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley", Journal of Food Engineering, Vol.42, pp. 177-182.

Ginzburg, A. S., 1969, "Application of infrared radiation in food processing", Chemical and Process Engineering Series, Leonard Hill, London.

Hasimoto, A., Yamazaki, Y., Shimizu, M., and Oshita, S., 1994, "Drying characteristics of gelatinous materials irradiation", Drying Technology-An International Journal, Vol.12, No. 5, pp. 1029-1052.

Hashimoto, A., and Kameoka, T., 1999, "Effect of infrared irradiation on drying characteristics of wet porous materials", Drying Technology-An International Journal, Vol.17, No. 7&8, pp.1613-1626.

Meeso, N., Soponronnarit, S., and Wetchacama, S., 1999, "Evaluation of drying system performance in rice mills", Proceedings of the 19th ASEAN/1st APEC Seminar on Postharvest Technology," pp. 286-295.

Poomsa-ad, N., Soponronnarit, S., Terdyothin, A., and Prachayawarakron, S.,2001, "Head rice yield after fluidization technique and tempering", Proceedings of ADC 2001, pp. 717-726.

Ratti, C., and Mujumdar, A.S., 1995, "Infrared drying," Handbook of Industrial Drying: Volume 1, A.S. Mujumdar Ed., pp.567-588.

Sandu, C., 1986, "Infrared radiative drying in food engineering : a process analysis", Biotechnology Progress, Vol.2, pp.109-119.

Sakai, N., and Hanzawa, T., 1994, "Applications and advances in far-infrared heating in Japan", Trends in Food Science & Technology, Vol.5, pp.357-362.

Sang Chai Meter Co.,Ltd., Thailand, Infrared ceramic heater, http://www.sangchaimeter.com/

Soponronnarit, S., 1995, "Strategy for managing moist paddy", The Royal Institute Journal, Vol. 20, No.4, pp. 115-125 (in Thai).

Soponronnarit, S., 1996, "Commercial fluidized bed paddy dryer", Proceedings of the 10th International Drying Symposium (IDS'96), Vol. A, pp.638-644.

อิทธิพลของการแช่ข้าวเปลือกและการพ่นไอน้ำก่อนสำหรับการผลิตข้าวนึ่งด้วยการอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้อากาศร้อน

Effects of Soaking Time and Pre-steaming for Production of Parboiled Rice using Hot Air Fluidized Bed

วุฒิกรณ์ จริยตันติเวทย์[1], สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[2], ชัยยงค์ เดชะไพโรจน์[3] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
Wuttikon Jariyatontivait[1], Somkiat Prachayawarakorn[2], Chaiyong Teachapairoj[3] and Somchart Soponronnarit[4]

Abstract

From the previous research, paddy drying using fluidized bed with superheated steam had characteristics of parboiled rice since the condensation of steam at the beginning of drying and subsequent high grain temperature above the gelatinization temperature occurred, both phenomenon favourite to the starch to be gelatinized. Therefore, condensation of steam in the superheated steam drying imitated by pre-steaming paddy was studied in this work. With the proposed method, the equipment cost may possibly be reduced. In this research work, the parboiled rice was thus made by three successive stages, soaking, pre-steaming and drying with hot-air fluidized bed. To compare with the before-mentioned method, the soaked paddy was immediately dried with the fluidized bed without pre-steaming before. The experiments were conducted by soaking paddy with hot water at initial temperatures of 70-80°C for 5–7 hours. After soaking, the moisture content of paddy ranged between 40 and 50 % d.b. It was then dried using inlet temperature of 150°C, superficial velocity of 2.5 m/s and the bed height of 10 cm. It was found from the experiments that poor head rice yield was evident to the paddy soaked in the water longer than 5 hours. When paddy was steamed at 100°C for 10–30 seconds, the head rice quality was improved, with a relatively higher yield than the sample with no steam pre-treatment before drying. However, the longer steaming time caused the lower value of rice whiteness. The lower values of peak viscosity, final viscosity and setback were obtained when the pre-steaming time was increased.

Keywords : drying, fluidized bed, paddy, parboiling rice, quality

[1]นักศึกษาปริญญาเอก, [2]รองศาสตราจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์, [4]ศาสตราจารย์ประจำคณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[3]คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร สนามจันทร์, นครปฐม
[1]Gradualed student, [2]Associate Professor, Faculty of Engineering, [4]Professor, School of Energy and Materials
King Mongkut's University of Technology Thonburi, 91 Prachautid , Tungkru, Bangkok 10140
*Corresponding author. Tel.:0-0-2470-8695 ext.112; E-mail address: koo_num@hotmail.com

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าเกิดการควบแน่นของไอน้ำกับข้าวเปลือกซึ่งทำให้ความชื้นของข้าวเปลือกสูงขึ้นในช่วงเริ่มต้น และการอบแห้งโดยไอน้ำร้อนยวดยิ่งทำให้อุณหภูมิของข้าวเปลือกสูงขึ้นซึ่งความชื้นและอุณหภูมิมีผลทำให้แป้งเกิดเจลาทิไนเซชันได้สมบูรณ์ ในงานวิจัยนี้มีแนวความคิดที่จะเลียนแบบการอบแห้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งในช่วงแรกโดยการพ่นไอน้ำและใช้การอบแห้งโดยใช้อากาศร้อน ซึ่งสามารถลดต้นทุนในการผลิตข้าวนึ่ง ในกระบวนการผลิตข้าวนึ่งที่ใช้เทคนิคของการพ่นไอน้ำและตามด้วยอากาศร้อนโดยใช้เทคนิคของฟลูอิไดซ์เบด ทำการทดลองโดยใช้ข้าวเปลือกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้น 70-80°C เป็นเวลา 5-7 ชั่วโมง ความชื้นข้าวเปลือกหลังแช่อยู่ในช่วงระหว่าง 40 ถึง 50 %d.b. จากนั้นนำมาอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 150°C ความเร็วของอากาศร้อนเท่ากับ 2.5 m/s และความสูงเบด 10 cm พบว่าการแช่ข้าวเปลือกในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง สามารถเพิ่มปริมาณต้นข้าวได้ เมื่อพ่นไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10-30 วินาที พบว่าการแช่ข้าวเปลือกและมีการพ่นไอน้ำสามารถเพิ่มปริมาณต้นข้าวได้มากกว่าการแช่ข้าวเปลือกโดยไม่ได้มีการพ่นไอน้ำ โดยคุณภาพด้านความขาวจะลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการพ่นไอน้ำ ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และ ค่าSetback ของตัวอย่างข้าวที่มีการพ่นไอน้ำร้อนมีค่าต่ำลงเมื่อมีการพ่นไอน้ำเป็นระยะเวลานานขึ้น

คำสำคัญ : การอบแห้ง ข้าวเปลือก ข้าวนึ่ง คุณภาพ ฟลูอิไดซ์เบด

คำนำ

จากรายงานการวิจัยเรื่องการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง (Rordprapat, et al., 2005; อิศเรศ ธุรกัลยา, 2543 และ Teachaphiroj et al., 2004) แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อใช้ความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกที่สูงเพียงพอและผ่านการอบแห้งด้วยตัวกลางดังกล่าว จะได้ข้าวหลังการอบแห้งที่มีลักษณะเป็นข้าวนึ่ง และได้ร้อยละต้นข้าวสูง และ ร้อยละของละ White belly ต่ำ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากในตอนเริ่มต้นของการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเกิดการควบแน่นของไอน้ำขึ้นทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีความชื้นเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิและความชื้นของข้าวเปลือกที่สูงขึ้นนี้ส่งผลให้เมล็ดข้าวเปลือกมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลาทิไนเซชันได้เร็วและสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งในการอบแห้งทำให้ต้นทุนของระบบอบแห้งค่อนข้างสูงและระบบที่ใช้ค่อนข้างซับซ้อน

จากรายงานการวิจัยดังกล่าวดูเหมือนว่าการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งนั้นมีข้อดีเหนือกว่าการอากาศร้อนตรงที่มีการควบแน่นของไอน้ำซึ่งส่งผลให้ได้ข้าวนึ่งที่มีคุณภาพที่ดีกว่าดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในกรณีของการอบแห้งด้วยอากาศร้อนในงานวิจัยนี้จึงพยายามหาแนวทางในผลิตข้าวนึ่งโดยใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง โดยข้าวเปลือกก่อนผ่านกระบวนการอบแห้งต้องผ่านกระบวนการพ่นไอน้ำร้อนก่อน ข้อดีของกระบวนการที่เสนอคือ ต้นทุนของระบบอบแห้งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งเพียงอย่างเดียว และจากรายงานการวิจัยของ(Taweerattanapanish, et al., 1999) พบว่าการอบแห้งข้าวเปลือกที่ความชื้นสูงด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดโดยใช้อากาศร้อนเพียงอย่างเดียว คุณภาพข้าวที่ได้มีลักษณะคล้ายข้าวนึ่ง มีลักษณะร่วนไม่เกาะติดกันเมื่อหุง แข็ง มีกลิ่นอับเล็กน้อย และได้เปอร์เซ็นต์ต้นข้าวสูง ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่น้ำของข้าวเปลือก และระยะเวลาในการพ่นไอน้ำที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการอบแห้ง และคุณภาพของข้าวเปลือก เช่น ร้อยละต้นข้าว สี นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังศึกษาสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการอบแห้งที่นำเสนอ

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

ในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยอากาศร้อนจะใช้เครื่องอบแห้งฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด และมีการพ่นไอน้ำร้อนก่อนการอบแห้ง รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ของระบบอบแห้งเป็นดังนี้

เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบดด้วยอากาศร้อนแบบงวด (แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 1) ประกอบด้วย ห้องอบแห้งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm บริเวณผิวห้องอบแห้งและระบบท่อหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนาประมาณ 2.5 mm อุปกรณ์ให้ความร้อนใช้ขดลวดความร้อนขนาด 12 kW พัดลมเป็นแบบแรงเหวี่ยงใบพัดโค้งหลัง ใช้มอเตอร์ขับขนาด 1.5 kW สามารถปรับความเร็วรอบได้ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทางเข้าห้องอบแห้งใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อเข้ากับ Temperature controller เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิในการอบแห้ง ช่องทางป้อนข้าวเปลือกติดตั้งด้านบนห้องอบแห้งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 cm สำหรับถังพ่นไอน้ำร้อนก่อนการอบแห้ง แสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2 ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm สูง 50 cm หนา 2 mm ภายในมีถังตะแกรงสำหรับใส่ข้าวเปลือก ถังพ่นไอน้ำต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไอน้ำ (Boiler) ซึ่งมีความดันใช้งานสูงสุด 3.5 bars

ในการทดลองใช้ข้าวเปลือกพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ซึ่งมาจากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี โดยนำมาแช่ในถังกลมขนาดประมาณ 50 ลิตร หุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว เพื่อรักษาอุณหภูมิของน้ำในถังแช่ แล้วใส่น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 70°C และ 80°C แช่ข้าวเปลือกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5, 6 และ 7 ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำแช่ทิ้ง และปล่อยข้าวเปลือกทิ้งไว้ในถังแช่ (Tempering) อีก 1 ชั่วโมงก่อนแล้วนำข้าวเปลือกขึ้นไปทดลองอบแห้ง ซึ่งในการทดลองอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเทคนิคฟลูอิไดเซชันโดยใช้อากาศร้อน ดังรายงานวิจัยของ Soponronnarit et al. (1994) ใช้ความเร็ว 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (ความเร็วต่ำสุดของอากาศร้อนเท่ากับ 1.65 m/s) และอุณหภูมิอบแห้ง 150°C ความสูงเบดประมาณ 10 cm ในการศึกษาผลของการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งได้พิจารณาเงื่อนไขที่ ใส่น้ำร้อนที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น 80°C แช่ข้าวเปลือกทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่ออบแห้งแล้วมีค่าร้อยละต้นข้าวสูงกว่าในเงื่อนไขอื่นๆ จากนั้นนำข้าวเปลือกขึ้นไปพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้ง อุณหภูมิของไอน้ำที่ใช้ประมาณ 100°C ระยะเวลาในการพ่นไอน้ำ 10, 20 และ 30 วินาที

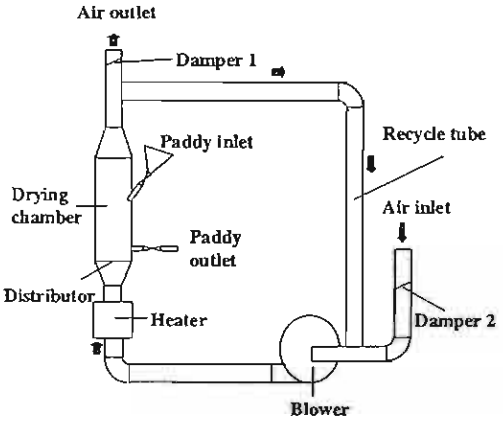


Figure 1 Schematic diagram of hot air fluidized bed dryer

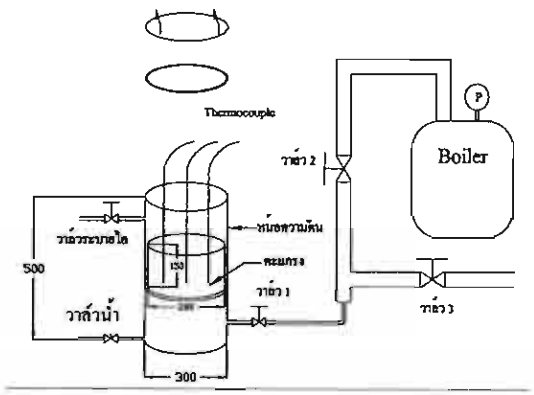


Figure 2 Schematic diagram of pre-steaming stage

คุณภาพข้าวที่ทดสอบ ได้แก่ ความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือก (Moisture content) โดยการหาความชื้นของข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบไฟฟ้า (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งตามเงื่อนไขต่างๆ มาอบแห้งต่อด้วยอากาศแวดล้อมเพื่อให้มีความชื้นเหลือประมาณ 14%w.b. (16%d.b.) แล้วจึงนำไปทดสอบคุณภาพการสี ด้วยเครื่อง Satake โดยเครื่องกะเทาะเปลือกแบบลูกยาง ขัดขาวด้วยลูกหินขัด คัดแยกข้าวหักด้วยตะแกรงกลม และวัดความขาวด้วยเครื่อง Kett C-300 สำหรับความหนืดของแป้ง (Viscosity) วัดโดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer model-4 (Newport Scientific Pty Ltd., Warier wood, Australia) ดำเนินตามวิธีการของ AACC Method 61-02 โดยการนำตัวอย่างแป้งข้าวปริมาณ 3 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 25 mL จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมได้เข้าเครื่อง RVA ตัวอย่างจะถูกทำให้ร้อน

ที่ 50°C คงไว้ ณ อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 1 นาที ต่อจากนั้นให้ความร้อนแก่ของผสมด้วยอัตรา 12 °C/min ไปที่อุณหภูมิ 95°C คงไว้ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 2.5 min จากนั้นจะถูกทำให้เย็นลงกลับมาที่ 50°C ด้วยอัตราการทำให้เย็น 12°C/min แล้วรักษาไว้ที่ 50°C เป็นเวลา 2.1 min ตัวอย่างดังกล่าวทดสอบสองซ้ำ ค่าต่างๆ ที่จากกราฟ pasting properties ได้แก่ peak viscosity (PV), trough, final viscosity (FV), breakdown viscosity (BKV = PV-trough) and setback viscosity (SBV = FV-trough)

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงอัตราการอบแห้งและอุณหภูมิเมล็ดข้าวเปลือก

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือก เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน กรณีแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิเริ่มต้น 80°C เป็นเวลานาน 5 ชั่วโมง และตามด้วยการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 วินาที จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการพ่นไอน้ำร้อนให้กับข้าวเปลือกก่อนการอบแห้งส่งผลให้มีอุณหภูมิของวัสดุสูงขึ้นเร็วกว่ากรณีที่ไม่ได้พ่นไอน้ำร้อนโดยในช่วงแรกของการอบแห้งผ่านไปประมาณ 2นาที อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกสูงกว่าการไม่ได้พ่นไอน้ำประมาณ 7°C ทั้งนี้สันนิษฐานอาจเป็นเพราะการคลายความร้อนแฝงของไอน้ำให้กับเมล็ดข้าวเปลือก แต่เมื่อเวลาอบแห้งนานขึ้นการเปลี่ยนอุณหภูมิของวัสดุระหว่างวัสดุที่พ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งกับไม่ได้พ่นไอน้ำร้อนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากข้อมูลของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการพ่นไอน้ำสำหรับในช่วงที่ศึกษาดังกล่าวไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิวัสดุ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวเปลือกพบว่าการพ่นไอน้ำร้อนให้กับวัสดุก่อนการอบแห้งสามารถลดความชื้นของวัสดุได้เร็วกว่าไม่ได้พ่นไอน้ำร้อนทั้งนี้เป็นเพราะปัจจัยของอุณหภูมิดังได้กล่าวมาก่อนหน้านี้เป็นตัวเร่งการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในวัสดุออกสู่ภายนอก แต่เมื่อมีการพ่นไอน้ำร้อนเป็นระยะเวลานานขึ้นกลับพบว่าการลดความชื้นของข้าวเปลือกในช่วงต้นของการอบแห้งช้าลง สิ่งที่ปรากฏดังกล่าวยังไม่ทราบเป็นที่แน่ชัดว่าเกิดจากสาเหตุอะไรแต่สันนิษฐานว่าอาจเป็นผลมาจากแป้งข้าวเป็นเจลมากขึ้นในช่วงการพ่นไอน้ำร้อนในระยะที่นานขึ้น จึงส่งผลการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในวัสดุเป็นไปได้ยากขึ้นเนื่องจากแป้งข้าวส่วนที่เป็นเจลมีการเกาะยึดกันอย่างแข็งแรงทำให้การแพร่ผ่านของความชื้นเป็นไปได้ยาก

การเปลี่ยนแปลงของร้อยละต้นข้าว

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของร้อยละต้นข้าวกับความชื้นสุดท้ายของเมล็ดข้าวเปลือก สำหรับกรณีที่มีการแช่ข้าวเปลือกที่ระยะเวลา 5, 6 และ 7 ชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 70°C จากข้อมูลเบื้องต้นพบว่าการการแช่ข้าวเป็นระยะเวลานานเกินไปทำให้ความแข็งแกร่งของเมล็ดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้ง่ายจากการขัดสีข้าวโดยนำตัวอย่างข้าวที่ผ่านการแช่ที่ระยะเวลาต่างๆ ไปอบแห้งด้วยวิธีการเป่าด้วยลมธรรมชาติจนกระทั่งได้ความชื้น 16% d.b. พบว่าการแช่ข้าวเปลือกที่ 5 ชั่วโมงมีร้อยละต้นข้าวประมาณ 48 % ซึ่งมีค่าร้อยละต้นข้าวสูงกว่าการแช่ข้าวเปลือกที่ 6 ชั่วโมงมีร้อยละต้นข้าว 45 % และการแช่ข้าวเปลือกที่ 7 ชั่วโมงมีร้อยละต้นข้าว 43 % เหตุที่ร้อยละต้นข้าวลดลงอาจเป็นเพราะข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลานานทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการปริแตกส่งผลให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดข้าวเปลือกได้ง่าย ซึ่งปริมาณน้ำจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวทำให้กลุ่มแป้งและโปรตีนเกาะตัวกันอย่างไม่แข็งแรงและเมื่อนำไปขัดสีก็จะหักง่ายทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวที่ต่ำ และผลดังกล่าวจะปรากฏชัดเจนขึ้นเมื่อนำไปอบแห้งอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงโดยข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่เป็นระยะนานเกินไปมีร้อยละต้นข้าวต่ำกว่าในกรณีที่มีการแช่เป็นระยะเวลาสั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4

เมื่อนำตัวอย่างที่ผ่านการแช่น้ำแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิสูงพบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีเป่าด้วยลมธรรมชาติ (เวลาการอบแห้ง 0 นาที หรือข้าวอ้างอิง) พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวเปลือกที่ไม่ผ่านการอบแห้งหรืออบแห้งด้วยวิธีเป่าด้วยลมธรรมชาติ (เวลาการอบแห้ง 0 นาที หรือข้าวอ้างอิง) โดยร้อยละต้นข้าวจะมีค่าสูงขึ้นในช่วง

ความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งประมาณ 28-30 %d.b. หลังจากนั้นร้อยละต้นข้าวจะลดลงและมีค่าต่ำกว่าข้าวอ้างอิงเมื่อ อบแห้งจนกระทั่งความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 28 %d.b.

สำหรับกรณีทำการแช่ข้าวเปลือกที่ 5 ชั่วโมง อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 80°C และมีการพ่นไอน้ำที่ความดันบรรยากาศเป็น เวลา 10, 20 และ 30 วินาที ก่อนทำการอบแห้งดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการพ่นไอน้ำมีผลทำให้ ช่วงแรกของการอบแห้งมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกรณีไม่ได้มีการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้ง (ในการ ทดลองนี้ข้าวอ้างอิงมีร้อยละต้นข้าวประมาณ 45 %) โดยร้อยละต้นข้าวที่ได้อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 60 สำหรับตัวอย่าง ข้าวเปลือกที่ผ่านการพ่นไอน้ำเป็นระยะเวลา 20-30 วินาที ซึ่งตรงกับความชื้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งอยู่ในช่วงระหว่าง 28 ถึง 30 % d.b. สำหรับในกรณีที่ข้าวเปลือกไม่ได้มีการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งมีร้อยละต้นข้าวในช่วงความชื้นดังกล่าว ประมาณร้อยละ 50 การเพิ่มขึ้นของร้อยละต้นข้าวที่สูงกว่าสำหรับกรณีที่มีการพ่นไอน้ำเนื่องจากสภาวะในการพ่นไอน้ำ ก่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดเจลของแป้งข้าว เมื่อเทียบกับการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งดัง รายงานวิจัยของ Rordprapat et al. (2005) และ Teachaphiroj et al.(2004) พบว่าร้อยละต้นข้าวที่ได้จากงานงานวิจัยนี้เมื่อ เทียบกับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงกับความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งมากกว่าการอบแห้งด้วย ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ในกรณีหลังนี้สามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึง 20% d.b. ก็ยังคงได้ร้อยละต้นข้าวสูง

การเปลี่ยนแปลงความขาวของข้าวสาร

รูปที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความขาวของข้าวสาร เมื่อผ่านการอบแห้งด้วยอากาศร้อน กรณีทำการแช่ ข้าวเปลือกเป็นเวลา 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น 80°C และมีการพ่นไอน้ำที่ความดันบรรยากาศเป็นระยะเวลา 10, 20 และ 30 sec ก่อนทำการอบแห้ง พบว่าข้าวเปลือกที่ผ่านการอบแห้งให้ค่าความขาวของข้าวสารจะลดลงเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง (ความขาวอ้างอิง =42.9) และในช่วงต้นของการอบแห้ง ความขาวของตัวอย่างข้าวที่ผ่านการพ่นไอน้ำเป็นระยะเวลาที่นานกว่า จะมีความขาวลดลงมากกว่าในกรณีที่มีการพ่นไอน้ำเป็นระยะเวลาที่สั้นกว่า แต่เมื่อเวลาอบแห้งนานขึ้นค่าความขาวของ ข้าวสารไม่มีความแตกต่างกันอย่างนัยสำคัญไม่ว่าจะมีการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้งหรือไม่ การเปลี่ยนแปลงของสีที่เกิดขึ้นนี้ เป็นผลเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลในแป้ง

การเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของแป้ง (Viscosity)

รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวที่ผ่านการอบแห้งเป็นระยะเวลา 2 นาที โดยแป้งข้าวที่ ได้นี้มาจากการแช่ข้าวเปลือกเป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมงและตามด้วยการพ่นไอน้ำก่อนทำการอบแห้งที่ระยะเวลา 10, 20 และ 30 วินาที จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการพ่นไอน้ำเป็นระยะเวลานานขึ้นทำให้ค่าของ peak viscosity, final viscosity และ Setback มีค่าลดลง ค่า Setback ในที่นี้สามารถคำนวณได้จากการนำความหนืดสุดท้ายลบด้วยความหนืดสูงสุด จากการที่ค่า Setback มีค่าน้อยลงตามระยะการพ่นไอน้ำร้อนที่เพิ่มขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่าสภาพของแป้งข้าวมีความเสถียรมากขึ้น แสดงให้ เห็นโดยอ้อมว่าแป้งข้าวที่ผ่านการพ่นไอน้ำร้อนและตามด้วยการอบแห้งด้วยอากาศร้อนมีการเกิดเจลาทิไนเซชันมากกว่า ตัวอย่างข้าวที่ไม่ได้มีการพ่นไอน้ำร้อน

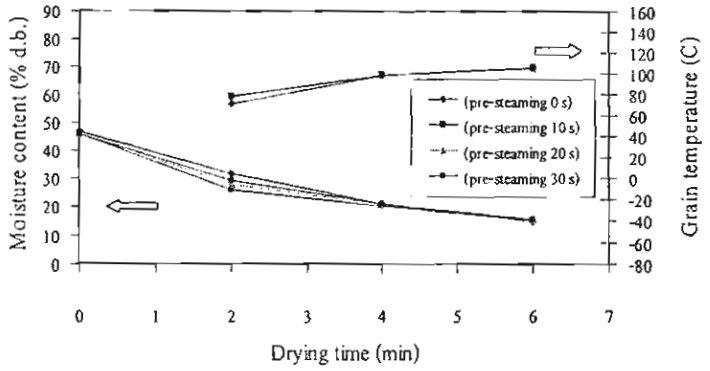


Figure 3 Evolution of moisture content and temperature of paddy within fluidized bed chamber (soaking time with initial temperature of 80 °C followed by steaming it for the periods of 10, 20 and 30 sec)

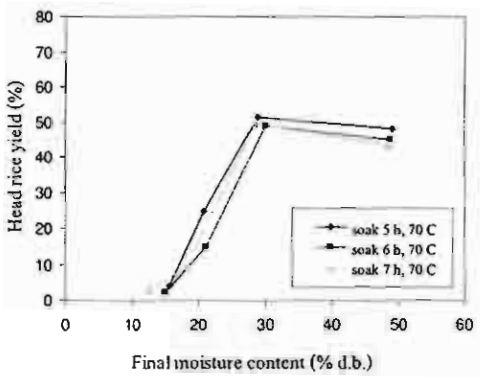


Figure 4 Effect of final moisture content on head rice yield of paddy at different soaking times (reference head rice yields of 48, 45 and 43% for the respective soaking times of 5, 6 and 7 h

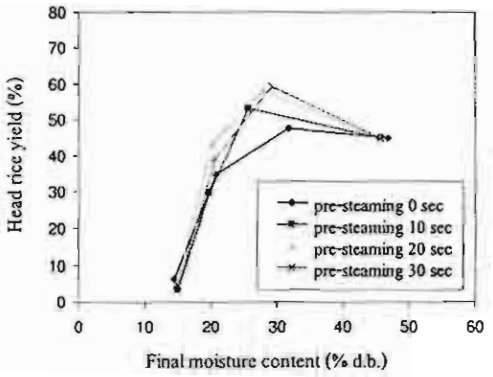


Figure 5 Effect of final moisture content on head rice yield for the drying process including the pre-steaming stage (soaking time of 5 h with initial temperature of 80°C reference head rice yield of 45 %)

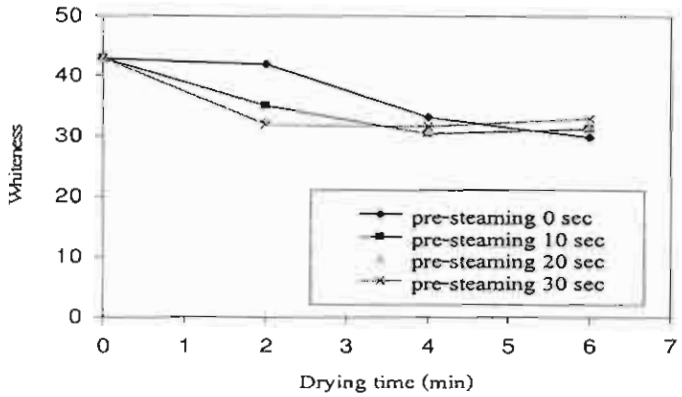


Figure 6 Evolution of rice whiteness obtained from the process including the pre-steaming stage (soaking time of 5 h with initial temperature of 80°C)

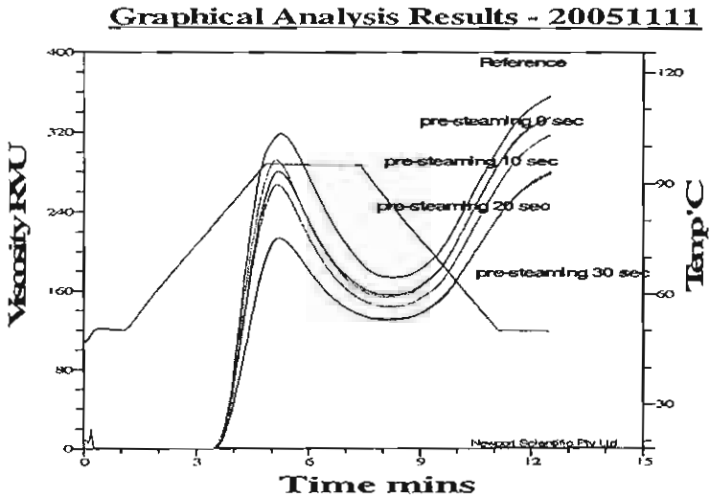


Figure 7 Viscograph of rice flour obtained from the drying process including the pre-steaming stage (soaking time of 5 h with initial temperature of 80 °C followed by steaming it for the periods of 0, 10, 20 and 30 sec and drying time of 2 min)

สรุป

จากการศึกษาผลของการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้ง แล้วนำไปอบแห้งที่เงื่อนไขการอบแห้งดังที่กล่าวมา พบว่าระยะเวลาในการพ่นไอน้ำมีผลต่อการลดลงของความชื้นเร็วกว่าการไม่ได้พ่นไอน้ำ และมีผลทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกสูงกว่าการไม่ได้พ่นไอน้ำ การแช่ข้าวเปลือกที่ 5 ชั่วโมง มีค่าร้อยละต้นข้าวสูงกว่าการแช่ข้าวเปลือกที่ 6 และ 7 ชั่วโมง เนื่องจากข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่ระยะเวลานานทำให้เมล็ดข้าวเปลือกเกิดการปริแตกส่งผลให้น้ำซึมผ่านเข้าไปในเมล็ดข้าวเปลือกได้ง่าย ซึ่งปริมาณน้ำจะเข้าไปอยู่ในช่องว่างที่อยู่ภายในเมล็ดข้าวทำให้กลุ่มแป้งและโปรตีนเกาะตัวกันอย่างไม่แข็งแรงและเมื่อ

นำไปขัดสีก็จะหักง่ายทำให้ได้ร้อยละต้นข้าวที่ต่ำ และการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการพ่นไอน้ำมีผลทำให้ช่วงแรกของการอบแห้งมีร้อยละต้นข้าวเพิ่มขึ้นมากกว่าข้าวอ้างอิงและมากกว่ากรณีไม่ได้มีการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้ง โดยร้อยละต้นข้าวจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงความชื้นสุดท้ายหลังการอบแห้งประมาณ 28-30 %d.b. หลังจากนั้นร้อยละต้นข้าวจะลดลงเมื่อความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 28 %d.b. ส่วนความขาวของข้าวสารเมื่อมีการพ่นไอน้ำก่อนการอบแห้ง จะทำให้เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วกว่ากรณีไม่ได้มีการพ่นไอน้ำ การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวที่ผ่านการแช่ 5 ชั่วโมง นำไปพ่นไอน้ำก่อนทำการอบแห้งด้วยอากาศร้อน ที่เวลาการอบแห้ง 2 และ 4 นาที พบว่าระยะเวลาในการพ่นไอน้ำมีผลต่อค่าความหนืด โดยค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) จะต่ำกว่าข้าวอ้างอิง และค่า Setback from peak มีค่าต่ำลง

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักกองทุนสนับสนุนกองทุนการวิจัยที่ให้เงินทุนสำหรับสนับสนุนการวิจัย และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

อิศเรศ ธุชกัลยา, 2543, **การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 86 หน้า

Rordprapat, W., Soponronarit, S., Nathakaranakule, A., and Tia, W. 2005, Comparative Study of Fluidized Bed Paddy Drying Using Hot Air and Superheated Steam, Journal of Food Engineering, Vol. 71, pp. 28-36.

Soponronnarit, S. and Prachayawarakorn, S., 1994, Optimum Strategy for Fluidized Bed Paddy Drying, Drying Technology, Vol. 12(7), pp. 1667-1686.

Taechapairoj, C., Prachayawarakorn, S., and Soponronnarit., S. 2004, Characteristics of Rice Dried in Superheated-Steam Fluidized-Bed, Drying Technology, Vol. 22, pp. 719-743.

Taweerattanapanish, A., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., Kongseri, N., and Wongpiyachon, S. 1999, Effect of Drying on Rice Yield using Fluidization Technique, Drying Technology, Vol. 17(1&2), pp. 345-353.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

อิทธิพลของวิธีการอบแห้งที่มีต่อคุณภาพของข้าวสุก

Effect of drying methods on quality of cooked rice

ปกรณ์ เหลืองมาลาวัฒน์[1], อดิศักดิ์ นาถกรณกุล[2], สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[3] พัชรี ตั้งตระกูล[4] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[5]
Pakorn Luangmalawat[1],Adisak Natkornkul[2], Somkiat Prachayawarakorn[3] , Patcharee Tungtrakul[4] and Somchart Soponronnarit[5]

Abstract

The current economic climate has made people changing a way of their life and cultural eating style, preferring short cooking time and instant foods. Rice, a main consumption in Asian countries, is aimed at producing instant cooked rice. To obtain a good quality of cooked Thai jasmine rice, this research is thus focused on the study of effect of drying methods i.e. heat pump, hot air, hot air- far infrared drying, heat pump-far infrared drying and two-stage drying on the drying characteristics and the cooked rice quality. Drying temperature was fixed at 55°C for the above-mentioned drying methods, except for the two-stage drying where the first stage was set at a temperature of 110°C followed by the low temperature of 55°C at the later stage. The experimental results showed that the two-stage drying and the hot air-far infrared, as well as heat pump-far infrared provide shorter drying time than the hot air or heat pump alone. The qualities of product i.e. degree of shrinkage and stickiness obtained from the studied drying methods were insignificantly different. The lowest luminosity, but fast rehydration capability of the two-stage-dried product was evident whilst the hardness value was relatively lower.

Key words: Far Infrared, Heat pump, Instant Rice

บทคัดย่อ

ด้วยสภาวะทางเศรษฐกิจปัจจุบันทำให้ผู้คนหันมาบริโภคอาหารกึ่งสำเร็จรูปกันมากขึ้น และข้าวเป็นอาหารหลักที่มีการบริโภคมากในกลุ่มประเทศเอเชีย ด้วยเหตุนี้ข้าวกึ่งสำเร็จรูปจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการอบแห้งที่มีต่อจลศาสตร์ของการอบแห้งและคุณภาพของข้าวสุก โดยทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบการอบแห้งด้วย อากาศร้อน ปั๊มความร้อน อากาศร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งในการอบแห้งแต่ละวิธีจะใช้อุณหภูมิอบแห้ง 55°C ยกเว้นในกรณีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ที่ในช่วงแรกใช้อุณหภูมิ 110°C และในช่วงที่สอง ใช้อุณหภูมิ 55°C จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน, แบบอากาศร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ใช้ระยะเวลาในการอบแห้งที่สั้นกว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน และ ปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียว และจากผลการทดสอบคุณภาพพบว่า การหดตัว และการยึดเกาะ(stickiness) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนมีอัตราการคืนตัวที่ดีที่สุด แต่มีค่าความสว่าง(L)ต่ำ และมีค่าความแข็ง(hardness)ต่ำกว่าวิธีการอบแห้งวิธีอื่น

คำสำคัญ อินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อน ข้าวกึ่งสำเร็จรูป

---

[1]นักศึกษาปริญญาเอก, [2,3,5]อาจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
[4]สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตร, กรุงเทพฯ
[1]PhD student, [2,3,5] Lecturer, School of Energy and Materials King Mongkut's University of Technology, Thonburi Bangkok Thailand
[4] Institute of Food Research and Product Development, Kasetsart University, Bangkok.

คำนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนมากกว่าครึ่งหนึ่งของประชากรโลก(Fresco, 2005) โดยเฉลี่ยแล้วประมาณร้อยละ 90 ของการผลิตและการบริโภคอยู่ในทวีปเอเชีย ประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในประเทศผู้นำในการส่งออกข้าว ซึ่งมีพันธุ์ข้าวหลัก เช่น พันธุ์สุพรรณบุรี1 พันธุ์ชัยนาถ1 และที่สำคัญคือพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าเป็นที่รู้จักกันทั่วไปคือ ข้าวหอมมะลิ(Jasmine Rice) ข้าวหอมมะลิเป็นข้าวที่คนนิยมบริโภคเนื่องจาก ข้าวที่ผ่านการหุงแล้วจะมีกลิ่นหอม และมีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกข้าวพันธุ์นี้มาผลิตเป็นข้าวกึ่งสำเร็จรูป ความสำเร็จหรือความล้มเหลวของการผลิตข้าวกึ่งสำเร็จรูปขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้าวภายหลังการคืนตัว ในการอบแห้งข้าวสุกเพื่อเก็บรักษาลดความชื้นก่อนเก็บโดยปกติแล้วค่าความชื้นควรต่ำกว่าร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง

กรรมวิธีการอบแห้งในแต่ละแบบจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้ง การอบแห้งด้วยเวลานาน หรือการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอาหาร เช่น สี การหดตัว การคืนตัว และสารอาหารที่มีประโยชน์ การอบแห้งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น ลมร้อน ปั๊มความร้อน ลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งการอบแห้งแต่ละวิธีมีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ โดยมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด และให้ผลผลิตที่มากที่สุด งานวิจัยทำการศึกษาการอบแห้ง 4 วิธีคือ ลมร้อน ปั๊มความร้อน ลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีการลดความชื้นที่ง่าย และเป็นวิธีการที่ประหยัด แต่มีข้อเสียคือ มีอัตราการอบแห้งต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งแบบอื่น ๆ และยังมีวิธีการอบแห้งแบบอื่นที่อาจจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายหลังการอบแห้งให้ดีขึ้นได้ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนคล้ายกับการอบแห้งด้วยลมร้อน แต่สามารถที่จะอบแห้งด้วยอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำได้ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนมีคุณภาพด้านสีและกลิ่นที่ดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยลมร้อน(Rukprang et al., 1998) การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนเป็นวิธีการที่ประหยัดมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสม (Teebonma et al.,2001)

รังสีอินฟราเรดไกลไม่เพียงให้ความร้อนที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่ยังสามารถทะลุทะลวงเข้าไปถึงภายในวัสดุได้ ดังนั้นจึงช่วยเร่งให้ความชื้นที่อยู่ภายในออกมาสู่ภายนอกผิวได้ อย่างไรก็ตามการอบแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดไกลเพียงอย่างเดียวไม่ทำให้อัตราการอบแหงสูงขึ้นได้ เนื่องจากปริมาณไอน้ำที่ออกมาจากผลิตภัณฑ์ยังสะสมอยู่ในห้องอบแห้ง การที่จะลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลง จึงต้องใช้รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับการอบแห้งแบบลมร้อน หรือปั๊มความร้อน ดังนั้นรังสีอินฟราเรดไกลจึงได้ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งอาหารหลายชนิด เพื่อที่ปรับปรุงคุณภาพ และลดระยะเวลาการอบแห้ง วิธีการอบแห้งแบบอื่นที่ช่วยลดระยะเวลาในการอบแห้งที่สามารถทำได้ได้คือ การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ซึ่งเป็นวิธีการที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิที่สูงแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำลง

การเลือกวิธีการอบแห้งที่เหมาะสมจะส่งผลถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง และค่าใช้จ่าย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของวิธีการอบแห้ง เช่น ลมร้อน ปั๊มความร้อน ลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ที่มีต่อคุณลักษณะของการอบแห้งข้าวสุก และคุณภาพหลังการคืนรูป สำหรับคุณภาพที่พิจารณา คือ สี การหดตัว ความแข็ง(hardnes) และความเหนียว(stickinss)

อุปกรณ์และวิธีการ

1. วัสดุอบแห้ง

ข้าวหอมมะลิพันธุ์ 105 ซึ่งมีปริมาณอะมิโลสต่ำ จำนวน 800 กรัม นำมาล้างให้สะอาดเพื่อนำสิ่งแปลกปลอมออก เติมน้ำกรอง ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1.5 (ข้าว ต่อ น้ำ) ทำการหุงโดยใช้หม้อหุงข้าวไฟฟ้าจนสุก หลังจากนั้นจึงนำข้าวที่หุงสุกไปล้างในน้ำเย็นเพื่อลดการเกาะตัวกันของข้าว ข้าวสุกที่ผ่านการล้างในน้ำเย็นจะมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 240 ถึง 275 มาตรฐานแห้ง

2. วิธีการทดลอง

เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 1 ห้องอบแห้งมีขนาดกว้าง 0.52 เมตร ยาว 0.52 เมตร และสูง 0.52 เมตร ภายนอกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้ว ถาดที่ใช้ในการอบแห้งมีขนาดกว้าง 0.28 เมตร ยาว 0.28 เมตรและ ถูกวางไว้ตำแหน่งกลางตู้ เครื่องอบแห้งที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบมาให้สามารถอบแห้งได้หลายวิธี เช่น อบแห้งด้วยปั๊มความร้อนอย่างเดียว หรือลมร้อนอย่างเดียว หรืออบแห้งร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล หลอดรังสีอินฟราเรดที่ใช้ มีขนาดกว้าง 0.06 เมตรและยาว 0.12 เมตร ให้กำลังไฟฟ้า 650 วัตต์ ที่แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ระบบปั๊มความร้อนประกอบด้วย เครื่องอัดไอขนาด 650 วัตต์ เครื่องควบแน่น 2 กิโลวัตต์ เครื่องทำระเหย 3.5 กิโลวัตต์ สภาวะของการทดลองควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบ PID 2 ชุด ชุดแรกใช้ควบคุมอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้ง ชุดที่สองใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ทางออกของห้องอบแห้งเพื่อควบคุมการทำงานของหลอดรังสีอินฟราเรดในการทดลองการอบแห้งร่วมกับการรังสีอินฟราเรดโดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 52 องศาเซลเซียส

ในแต่ละการทดลองใช้ความเร็วในการไหลของอากาศคงที่ 0.3 เมตรต่อวินาที ปริมาณข้าว 1.4 กิโลกรัม และอุณหภูมิอบแห้ง 55 องศาเซลเซียส ยกเว้นการทดลองอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนที่มีการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 2 ค่า ในการอบแห้งด้วยลมร้อน และการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลเป็นการอบแห้งระบบเปิด สำหรับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลเป็นการอบแห้งระบบปิด การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน อุณหภูมิของของลมร้อนถูกตั้งไว้ที่ 110 องศาเซลเซียสในการอบแห้งขั้วโมงแรก และลดอุณหภูมิลงเหลือ 55 องศาเซลเซียสในเวลาถัดมา การวัดอุณหภูมิของลมร้อนที่ตำแหน่งทางเข้า และทางออกของห้องอบแห้ง ทำอย่างต่อเนื่องโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อกับเครื่องเก็บข้อมูล (YOKOGAWA, µr1800) บันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุก 2 นาที ตัวอย่างข้าวถูกนำมาชั่งน้ำหนักทุก ๆ 30 นาทีตลอดช่วงการทดลอง การทดลองดำเนินไปจนกระทั่งความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือร้อยละ 10 มาตรฐานแห้ง

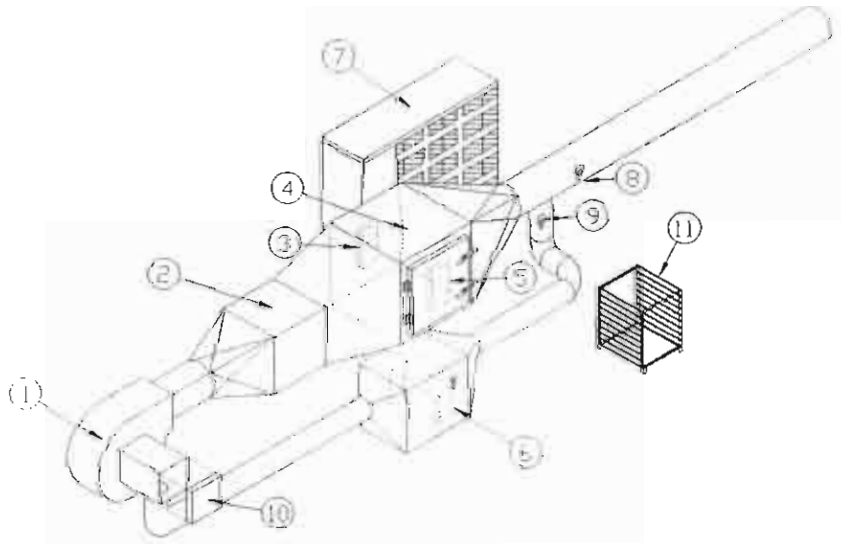


Figure 1 Schematic diagram of laboratory dryer 1-blower, 2-heater chamber, 3- back FIR, 4-drying chamber, 5-front FIR, 6-evaporator,7-condensing unit, 8-valve, 9- valve, 10-cover, 11 tray.

2.1 การทดสอบคุณภาพ

2.1.1ความขาวของข้าวหุงสุก

การวัดสีของข้าวสุกหลังการอบแห้งจะใช้การวัดสีระบบ Hunter ด้วยเครื่องวัดสี Juki,. JP710P ก่อนการวัดสีในแต่ละครั้งต้องปรับเทียบอุปกรณ์วัดกับแผ่นเทียบสีขาวมาตรฐาน (L*=93.55, b*=-0.27, a*=0.06). การรายงานผลของค่าสีของข้าวสุกอบแห้งจะใช้ค่า L, a และ b และในแต่ละการทดลองจะใช้ตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างในการวัดสี

2.1.3 การหดตัว

ในการวัดการหดตัวในแต่ละการทดลองจะทำการวัด 3 ครั้ง การหดตัวรายงานผลเป็นร้อยละเทียบกับปริมาตรของผลิตภัณฑ์เริ่มต้น ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\%\text{Shrinkage} = \frac{V_i - V}{V_i} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ V_i คือ ปริมาตรของข้าวสุกก่อนการอบแห้งและ V คือ ปริมาตรของข้าวสุกหลังการอบแห้ง

2.1.4 เนื้อสัมผัส

การทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าวสุกคืนรูป เช่น ความแข็ง(hardness) และความเหนียว(stickiness) ทำโดยใช้เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analyzer,TA-XT2i) นำตัวอย่างมาทดสอบโดย เติมน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสในตัวอย่างในอัตราส่วนข้าวแห้งต่อน้ำ 1:1.5 ทิ้งให้คืนรูปเป็นเวลา 8 นาที นำข้าวที่คืนรูปแล้วมาผึ่งให้แห้ง 4 นาทีเพื่อลดปริมาณน้ำที่เกาะผิววัสดุ จากนั้น เลือกตัวอย่างข้าวเต็มเมล็ดจำนวน 6 เมล็ด วางใต้หัวกดวัดทรงกระบอกขนาด 50 มิลลิเมตร ตัวอย่างจะถูกกดลงร้อยละ 85 ของความหนาด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีและ หลังจากนั้นหัวกดวัดจะถูกยกขึ้นด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (Sitakalin and Meullenet, 2000) การทดสอบเนื้อสัมผัสทำซ้ำตัวอย่างละ 5 ซ้ำ โดยที่ค่าความแข็ง คือค่าแรงกดมากที่สุดที่กดลงไปที่ตัวอย่าง และค่าความเหนียวคือแรงที่ใช้ในการดึงหัวกดออกจากตัวอย่างภายหลังการกด

2.1.5 การคืนตัว

การคืนตัวทำตามวิธีของ Maskan (2001) โดยนำตัวอย่างแห้งจำนวน 20 กรัม มาวางในภาชนะตะแกรง นำตัวอย่างแช่ลงในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทุก ๆ 2 นาทีตัวอย่างจะถูกนำมาชั่ง โดยซับน้ำด้วยกระดาษ 3-4 ครั้งให้แห้ง นำตัวอย่างแช่น้ำตามเดิมทำซ้ำทุก ๆ 2 นาทีจนครบ 10 นาที อัตราการคืนตัวคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Rehydration Ratio (\%)} = \frac{W_i - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2)$$

โดยที่ Wd คือน้ำหนักของข้าวอบแห้งก่อนการคืนรูป (กรัม) และ Wi คือน้ำหนักของข้าวที่คืนรูปในช่วงเวลาต่าง ๆ(กรัม)

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะเฉพาะการอบแห้งของข้าวสุก

ตารางที่ 1 แสดงความชื้นเริ่มต้น ความชื้นสุดท้าย และสภาวะของการทดลองจากการอบแห้งแบบต่าง ๆ กราฟลักษณะเฉพาะของการอบแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลมีการลดลงของความชื้นที่เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือปั๊มความร้อนเพียงอย่างเดียวภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งที่คล้ายกัน โดยสามารถ

ลดระยะเวลาอบแห้งได้ร้อยละ 12 และ 28 เมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนและลมร้อนตามลำดับ การอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลให้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้น พลังงานที่แผ่ออกมาถูกดูดซับโดยข้าวที่มีความชื้นสูง ทำให้เกิดการเร่งการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในสู่ผิวนอก สำหรับการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน ข้าวที่มีความชื้นสูงถูกอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่ข้าวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองแล้วตามด้วยการอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส การอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนใช้เวลาในการอบแห้งที่สั้นที่สุดโดยใช้เวลา 180 นาที

รูปที่ 3 แสดงกราฟอัตราการอบแห้งข้าวสุกด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ กราฟที่แสดงได้มากจากการฟิตค่าของความชื้นที่ได้จากการทดลองกับสมการเอกโปเนนเชียลที่เหมาะสม แล้วทำการหาอนุพันธ์สมการดังกล่าวเทียบกับเวลา จากกราฟจะพบว่าในการอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดนั้นช่วงอุ่นตัวของผลิตภัณฑ์นั้นสั้นมากจนไม่สามารถสังเกตพบจากการทดลอง ไม่เหมือนกับการอบแห้งด้วยลมร้อนหรือปั๊มความร้อนที่อัตราการอบแห้งจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่มากที่สุดในช่วงแรก ๆของการอบแห้ง หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

การอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนหรือลมร้อนเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความชื้นที่แสดงในรูปที่ 2 และที่ค่าความชื้นของวัสดุที่ต่ำกว่าร้อยละ 30 มาตรฐานแห้งจากกราฟอัตราการอบแห้งพบว่า กราฟอัตราการอบแห้งของการอบแห้งทั้ง 4 แบบทับกันแสดงให้เห็นว่าการอบแห้งลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรดไกลไม่ช่วยเร่งการอบแห้งในช่วงนี้

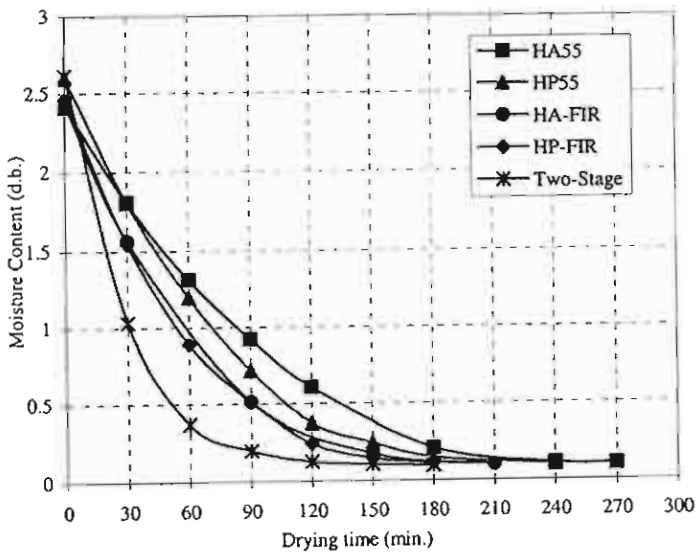


Figure 2 Drying Characteristics of cooked rice determined from different drying methods.

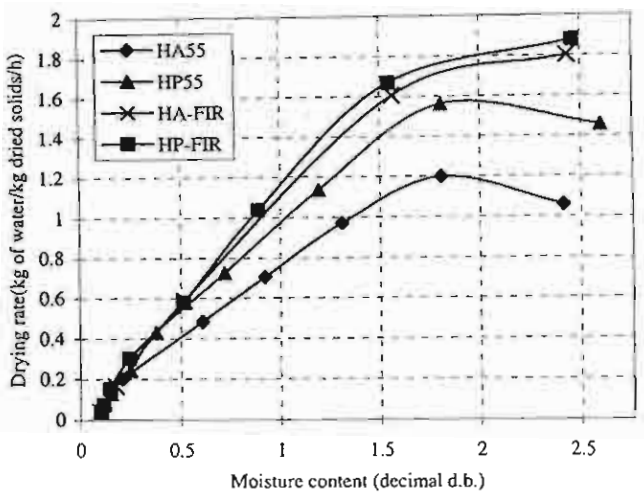


Figure 3 Drying rate curves of cooked rice

Table 1 Operating conditions for different drying methods

	HA 55	HP 55	HA-FIR	HP-FIR	Two-stage
initial moisture content (%d.b.)	241.3	260.0	246.1	243.5	261.5
final moisture content (%d.b.)	10.2	9.8	10.1	9.9	9.5
Inlet-air temperature (°C)	55	55	55	55	110/55
Outlet-air temprature (°C)	51	51	52	53	88/53
Relative humidity within drying chamber (%)	20	18	20	17	2/22
Set point FIR (°C)	-	-	52	52	-
Drying Time (min.)	270	240	210	210	180

2. การหดตัว

ตารางที่ 2 แสดงการหดตัวของข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยเทคนิคต่าง ๆ จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีของ Duncan's multiple range test พบว่าวิธีการอบแห้งไม่มีผลต่อการหดตัวของข้าวสุกอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) การหดตัวของข้าวอบแห้งอยู่ในช่วงร้อยละ 63 ถึงร้อยละ 65

Table 2. Volume shrinkage of dried cooked rice

Drying method	Shrinkage(%)
Hot Air 55	64.91±1.40[a]
Heat Pump 55	63.34±1.77[a]
HA - FIR	65.81±0.84[a]
HP - FIR	63.57±0.70[a]
Two-stage	63.79±1.27[a]

Note : the same letter in the same column means insignificant difference (p>0.05)

3. สีของข้าวสุกอบแห้ง

ผลการวัดสีของตัวอย่างข้าวอบแห้งแสดงค่าของสีเฉพาะค่า L และ b เนื่องจากค่า a มีค่าความแตกต่างน้อยในระหว่างการอบแห้ง ตารางที่ 3 แสดงค่า L และ b ของข้าวสุกหลังการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่าง ๆ โดยค่า L แสดงถึงค่าความสว่าง ค่า b แสดงถึงค่าความเหลืองเมื่อมีค่าเป็นบวก การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลให้ค่า L และ b สูงที่สุด แต่ไม่มีแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p>0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน และปั๊มความร้อน จุดที่น่าสนใจคือ ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนนั้นมีสีไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการอบแห้งด้วยวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้น ยกเว้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งด้วยปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกลมีค่าความสว่างมากกว่าในกรณีการอบแห้งในรูปแบบอื่น

Table 3. Color of dried cooked rice

	L-value	b-value
Hot Air 55	64.33 ± 0.45^{ab}	10.46 ± 0.18^{ab}
Heat Pump 55	64.07 ± 0.39^{a}	10.49 ± 0.13^{ab}
HA - FIR	64.70 ± 0.30^{b}	10.35 ± 0.13^{a}
HP - FIR	66.00 ± 0.52^{c}	10.69 ± 0.25^{b}
Two stage	64.42 ± 0.65^{ab}	10.38 ± 0.32^{a}

Note: the same letter in the same column means insignificant difference (p>0.05)

4. ความสามารถในการคืนตัว

ความสามารถในการคืนตัวของตัวอย่างข้าวคำนวณได้จากสมการที่ 2 ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 3 ข้าวที่อบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนมีอัตราการคืนตัวเร็วที่สุด ในขณะที่การอบแห้งวิธีอื่น ๆ ซึ่งเป็นการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำเหมือนกันความสามารถในการคืนตัวจึงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน การมีอัตราการคืนตัวที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับลักษณะของวัสดุว่ามีความพรุนมากหรือน้อย ถ้ามีความพรุนมากก็จะมีอัตราการคืนตัวที่เร็ว จากผลการทดสอบ มีความเป็นไปได้ว่าข้าวที่ผ่านการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน มีช่องว่างเกิดขึ้นภายในตัวอย่าง ในระหว่างการอบแห้งในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงส่งผลให้การคืนตัวของข้าวสุกหลังการอบแห้งเร็ว

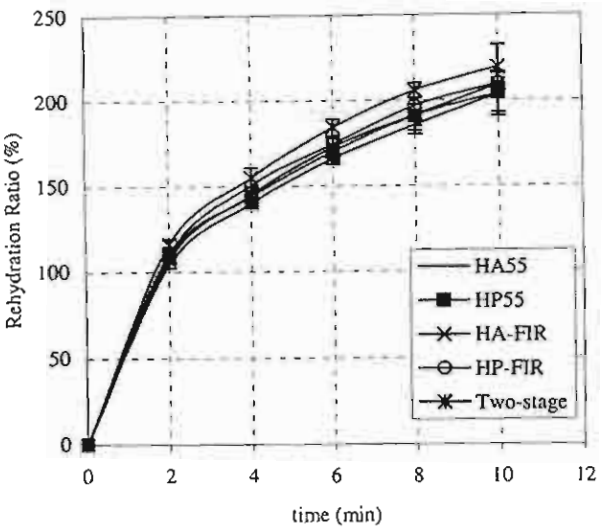


Figure 4 Rehydration behavior of dried cooked rice at 90°C

5. สมบัติของเนื้อสัมผัส

ตารางที่ 4 แสดงค่าความแข็ง(hardness) และความเหนียว(stickiness)ของข้าวอบแห้งภายหลังการคืนตัว ค่าความแข็งและค่าความเหนียวของข้าวที่หุงสุกใหม่มีค่าเท่ากับ 10252±581 กรัม และ -1431±168 กรัมตามลำดับ การลดปริมาณความชื้นของข้าวลงไม่ว่าจะเป็นการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงหรือต่ำก็ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และสมบัติของแป้งและการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปอยู่ในสภาพเดิมเมื่อผ่านการคืนรูป ข้าวที่ผ่านการอบแห้งแล้วจะมีความแตกต่างของค่าความแข็งและความเหนียวที่น้อยกว่าข้าวหุงสุกใหม่ โดยจะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 7892 – 9143 กรัม และค่าความเหนียวอยู่ในช่วง -604 ถึง -442 กรัม

ผลจากการเปรียบเทียบอบแห้งแบบต่างๆ การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ลมร้อน หรือการอบแห้งร่วมกับการแผ่นรังสีอินฟราเรดไกล พบว่าคุณสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอนพบว่าค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการการอบแห้งและคืนตัวจะมีค่าที่ดำกว่า โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยลมร้อน

Table 4. Textural properties of dried cooked rice after rehydration

Dying Methods	Hardness(g)	Stickiness(g)
Freshly cooked rice	10252±581^{c}	-1431±168^{a}
HA 55	9143±592^{b}	-524±112^{b}
HP 55	8163±565^{ab}	-596±288^{b}
HA-FIR	8636±630^{ab}	-428±64^{b}
HP-FIR	8843±620^{ab}	-442±89^{b}
Two-stage	7892±570^{a}	-604±260^{b}

Note: the same letter in the same column means insignificant difference ($p>0.05$)

สรุป

จากการศึกษาการอบแห้งข้าวสุกโดยใช้เทคนิคทั้ง 5 คือ อากาศร้อน ปั๊มความร้อน อากาศร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ปั๊มความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล และการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน โดยการอบแห้ง 4 แบบแรกเป็นการอบแห้งด้วยอุณหภูมิต่ำ การใช้รังสีอินฟราเรดไกลร่วมกับการอบแห้งด้วยลมร้อนจะช่วยเร่งอัตราการอบแห้ง โดยเฉพาะช่วงในช่วงที่ผลิตภัณฑ์ยังมีความชื้นสูงอยู่ ในขณะที่ลักษณะทางกายภาพ และคุณภาพของข้าวสุกอบแห้ง เช่น สี การหดตัว การคืนตัว และเนื้อสัมผัส นั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยลมร้อนและปั๊มความร้อน

การเร่งอัตราการอบแห้งสามารถใช้วิธีการอบแห้งแบบ 2 ขั้นตอน การอบแห้งวิธีการนี้ให้อัตราการอบแห้งสูงที่สุด และข้าวที่ผ่านการอบแห้งด้วยวิธีนี้มีอัตราการคืนตัวที่สูง แต่จะมีค่าความแข็ง(hardness)ของข้าวที่ผ่านการคืนตัวน้อยกว่าการอบแห้งข้าวสุกด้วยอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ ค่าความเหนียว(stickiness) และสีของข้าวสุกอยู่ในเกณฑ์เดียวกัน

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ให้ทุนสนับสนุนในการงานดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทดสอบสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัส และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดสี และอุปกรณ์ต่าง ๆ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

AACC (1995). Approved method of the American Association of Cerial Chemists (9th ed.) St. Paul, MN.

Fresco, L.(2005). Rice is Life. Journal of Food Composition and Analysis. Vol 18. 249-253.

Maskan, M. (2001). Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruit during hot air and microwave drying. Journal of Food Engineering. Vol 48. 177-182.

Sitakalin, C. and Meullenet , J.-F.(2000). Prediction of Cooked Rice Texture Using Extrusion and Compression Tests in Conjunction with Spectral Stress Strain Analysis. Cereal Chem. 77(4). 501-506.

Soponronnarit, S., Nathakaranakule, A., Wetchacama, S., Swasdisevi, T., and Rukprang, P. (1998). Fruit drying using heat pump. RELIC International Energy Journal 20(1). 39-53

Teeboonma, U., Soponronnarit, S., Tiasuwan, J., Tia, W. and Kaewassadom, W.(2001). Heat Pump Dryer Using HFC 22 and HFC 134a as Refrigerants. International Energy Journal 2(2). 67-73

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ.2549 จังหวัดมหาสารคาม

การศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะพร้าวด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด

A Study of Coconut Drying kinetics by fluidized bed Technique

ฐานิตย์ เมธิยานนท์[1*], ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์[2], เสริมพงษ์ อดิเรกรัฐ[3] และ สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[4]
Thanid Madhiyanon[1], Prasan Sathitruangsak[2], Sermpong Adirekrut[3] and Somchart Soponronnarit[4]

Abstract

Large amounts of dried coconut product are presently required for export because it is a traditional component of various foods, e.g., bread, cakes, etc., or even for use in Thai foods abroad. Rapidly drying coconut, while sustaining its quality, is therefore a topic of considerable interest. This research is an experimental study of the kinetics of drying finely chopped coconut in a batch fluidized bed dryer. 250 g of coconut, with approximately 140% d.b. moisture content, was used in each condition investigated. Fluidizing velocity varied from 2.1-2.5 m/s at a constant drying temperature of 55 °C. It was found that velocity had a significant effect on moisture content reduction; no degradation of color was observed when coconut was dried to 5% d.b. moisture content.

KEYWORDS: Coconut, drying, fluidized bed, quality

บทคัดย่อ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์มะพร้าวอบแห้งมีความต้องการเพื่อการส่งออกเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมอาหารได้หลากหลายชนิดเช่น ขนมปัง ขนมเค้ก หรือกระทั่งเป็นการส่งออกเพื่อใช้สำหรับการประกอบอาหารไทยในต่างประเทศ จึงจำเป็นต้องหาวิธีการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลาน้อย แต่สามารถคงคุณภาพผลิตภัณฑ์ไว้ได้ ดังนั้นจึงศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดแบบงวด ซึ่งใช้มะพร้าวขูดน้ำหนักเริ่มต้นที่ 250 g และความชื้นเริ่มต้นประมาณ 140% d.b. โดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 55 °c และปรับเปลี่ยนความเร็วของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งที่ 2.1,2.3 และ 2.5 m/s จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศอบแห้งส่งผลให้การลดลงของความชื้นของมะพร้าวเร็วขึ้น โดยหลังจากการอบแห้งมะพร้าวจนเหลือความชื้นประมาณ 5%d.b. พบว่าคุณภาพสีของเนื้อมะพร้าวยังคงอยู่ในเกณฑ์ดี

คำสำคัญ: คุณภาพ ฟลูอิไดซ์เบด มะพร้าว อบแห้ง

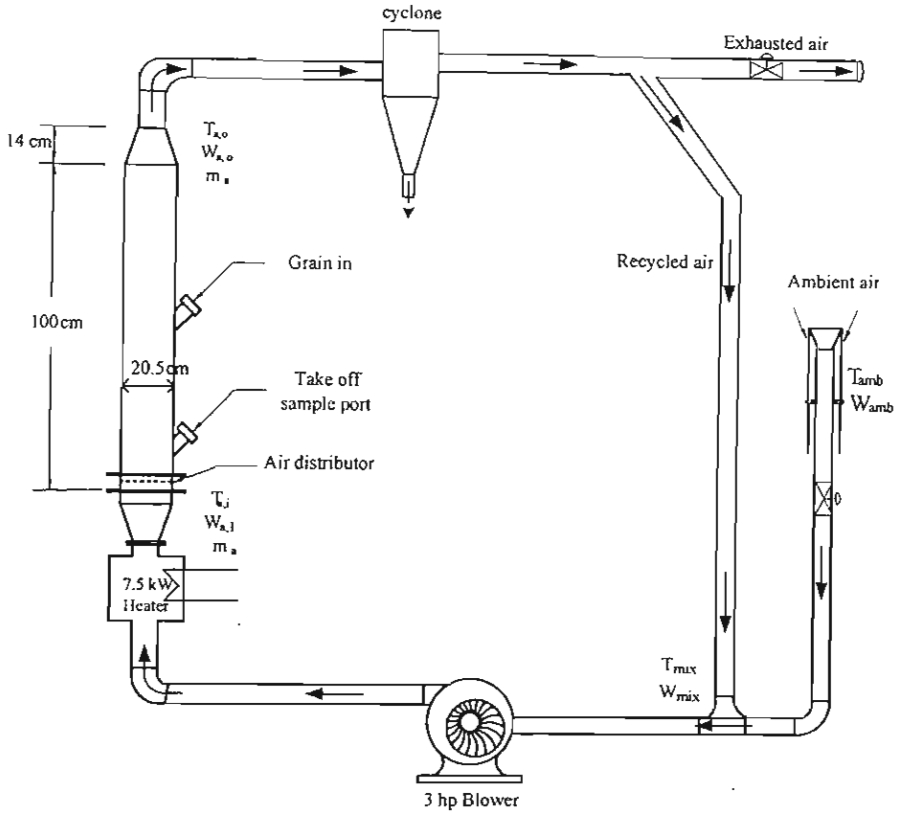
[1]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ [2]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 51 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
[3]นักศึกษา ป.โท [4]ศาสตราจารย์ คณะพลังงานและวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถ.ประชาอุทิศ เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
*Corresponding author. Tel.: 0-2988-3666 per 244 ; fax: 0-2988-3666 ext. 241; E-mail address: Thanid_m@yahoo.com[1]

บทนำ

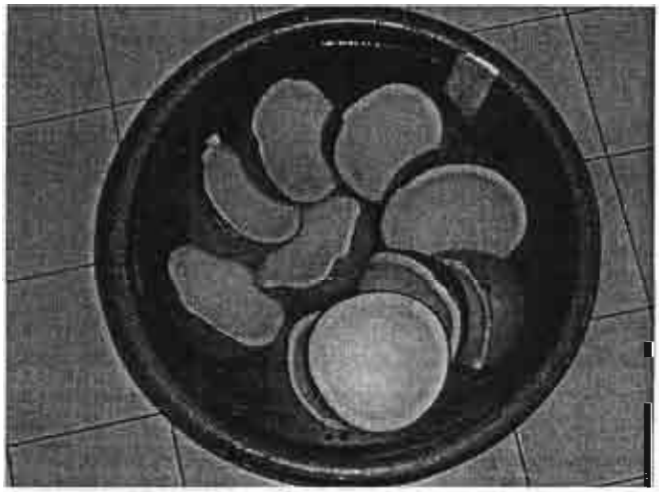
ปัจจุบันความต้องการหรือกระแสนิยมการบริโภคอาหารไทยมีเพิ่มสูงขึ้น ทั้งภายในและต่างประเทศ ไม่ว่าอาหารหรือขนมหวาน ซึ่งส่วนประกอบหนึ่งที่ควบคู่กับอาหารไทยมาตลอดคือ กะทิ โดยมักนิยมใส่ในแกงหรือขนมต่างๆ เพื่อให้อาหารมีความหอม หวาน มัน ซึ่งได้มีการส่งเสริมให้มีการขยายตลาดไปยังต่างประเทศ ในปัจจุบันการส่งออกส่วนมากเป็นลักษณะของน้ำกะทิที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจึงทำให้สูญเสียรสชาติ กลิ่น ของน้ำกะทิไป ต่อมาจึงมีการส่งเนื้อมะพร้าวขูดอบแห้งเพื่อเป็นทางเลือกของผู้บริโภคและเป็นการเพิ่มคุณภาพของกะทิที่ต้องการ ซึ่งในการอบเนื้อมะพร้าวขูดสามารถอบได้หลายวิธี เช่น การอบแห้งด้วยลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น [1] การอบแห้งด้วยปั๊มความร้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบมีคุณภาพดี คือ สี กลิ่น และรสชาติ แต่ทั้งนี้ การอบด้วยเทคนิคดังกล่าวนั้นต้องใช้ระยะเวลาในการอบนาน 2-4 ชั่วโมง จึงจำเป็นต้องหาเทคนิคการอบแห้งอื่นๆ เพื่อลดระยะเวลาในการอบแห้ง โดยเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจและกำลังได้รับความนิยมมากในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร คือเทคนิคฟลูอิไดเซชั่น ซึ่งได้มีการนำไปอบแห้งข้าว [2] , ข้าวโพด [3] , ถั่วเหลือง [4] เป็นต้น โดยพบได้ผลการอบแห้งที่ดีคือสามารถลดความชื้นได้เร็วและคุณภาพผลิตภัณฑ์ในเกณฑ์ที่ดี ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาจนพลศาสตร์การอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด โดยจะพิจารณาถึงผลของความเร็วลมที่มีต่อการลดลงของความชื้นและสีของมะพร้าวที่ผ่านการอบแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

ในการทดลองอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดจะใช้เครื่องอบแห้งดังรูปที่ 1 โดยห้องอบทำจากสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.5 cm และ สูง 100 cm ทางออกของห้องอบติดตั้งไซโคลนเพื่อดักมะพร้าวที่หลุดลอยออกไปนอกห้องอบ สำหรับอากาศที่หมุนเวียนภายในระบบจะใช้พัดลมขนาด 3 hp และให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อนขนาด 7.5 kW โดยจะควบคุมอุณหภูมิของอากาศด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ความละเอียด ±1 °C (Temperature Control) การทดลองทำโดยนำมะพร้าวที่ถูกผ่าออกเป็นสองซีกไปทำการแช่น้ำคลอรีนซึ่งมีความเข้มข้น 50 ppm เป็นเวลา 10 นาที เพื่อฆ่าเชื้อโรค [5] ซึ่งจะมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 140%d.b. ดังรูปที่ 2 หลังจากนั้นทำการวัดความเร็วของอากาศด้วย Vane type anemometer ซึ่งมีความละเอียด ±3 % ของค่าที่อ่านได้แล้วปรับความเร็วของอากาศและอุณหภูมิให้ได้ตามเงื่อนไขการทดลอง ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งและอากาศภายนอก ทำโดยใช้การวัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและกระเปาะเปียก รวมถึงตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีค่าความแม่นยำ ±2 % ของค่าที่อ่านได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในการทดลองอบมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดในงานวิจัยนี้จะใช้มะพร้าวน้ำหนัก 250 g ทำการอบแบบเป็นงวด (batch) โดยจะเพิ่มระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นงวดละ 1 นาที จนครบ 10 นาที ซึ่งมะพร้าวขูดที่ผ่านในแต่ละงวดจะถูกนำไปอบเพื่อหาความชื้นที่เหลืออยู่ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 103°C ความละเอียด ±2 % เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยมีเงื่อนไขการทดลองดังนี้ คือ ความเร็วของอากาศในการอบแห้งที่ 2.1,2.3 และ 2.5 m/s และใช้อุณหภูมิอบแห้ง 55°C โดยไม่มีการเวียนอากาศกลับมาใช้ จากนั้นจะนำมะพร้าวขูดที่ผ่านการอบแห้งไปทดสอบคุณภาพสีด้วยเครื่อง Colorimeter โดยใช้ระบบ Hunter และทำจดบันทึกข้อมูลค่า L-a-b ที่ใช้เป็นดัชนีหนึ่งในการกำหนดคุณภาพของมะพร้าวที่อบแห้งโดยที่ค่า L หมายถึง ค่าความสว่าง (Lightness) ค่า a หมายถึงค่าสีเขียว – แดง ในขณะที่ค่า b หมายถึงค่าสีน้ำเงิน – เหลือง



รูปที่ 1 วงจรเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด



รูปที่ 2 มะพร้าวแช่น้ำคลอรีนความเข้มข้น 50 ppm

ผลและวิจารณ์

จุดประสงค์ของการทดลองเพื่อศึกษาจนพลศาสตร์การอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด โดยจะพิจารณาถึงผลของความเร็วลมที่มีต่อการลดลงของความชื้นและสีของมะพร้าวที่ผ่านการอบแห้ง

1. ผลของความเร็วลมต่อการลดลงของความชื้นมะพร้าว

จากการทดลองการอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดที่อุณหภูมิการอบแห้ง 55°C พบว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศอบแห้งในช่วง 2.1-2.5 m/s ส่งผลให้การลดลงของความชื้นของมะพร้าวเร็วขึ้นดังรูปที่ 3 ทั้งนี้พบว่าการอบแห้งมะพร้าวส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant rate drying) ดังนั้นการลดลงของความชื้นจะถูกควบคุมด้วยปัจจัยภายนอก (อุณหภูมิ , ความเร็วลม และความชื้นสัมพัทธ์) ซึ่งในการทดลองนี้คือ ความเร็วของอากาศอบแห้ง โดยความเร็วของอากาศอบแห้งที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความชื้นในมะพร้าวมีค่าลดลงเร็วขึ้นตามความเร็ว สำหรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบแห้งและอากาศภายนอก แสดงดังรูปที่ 4 โดยพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เข้าห้องอบในแต่ละการทดลองมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก ทำให้เชื่อได้ว่าการลดลงของความชื้นที่แตกต่างกันเป็นผลมาจากความเร็วของอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าความชื้นของมะพร้าวลดลงเหลือประมาณ 5 % d.b. ภายในระยะเวลาในการอบแห้ง 8-10 นาที สำหรับมะพร้าวที่ผ่านการอบแห้งมีลักษณะดังรูปที่ 5

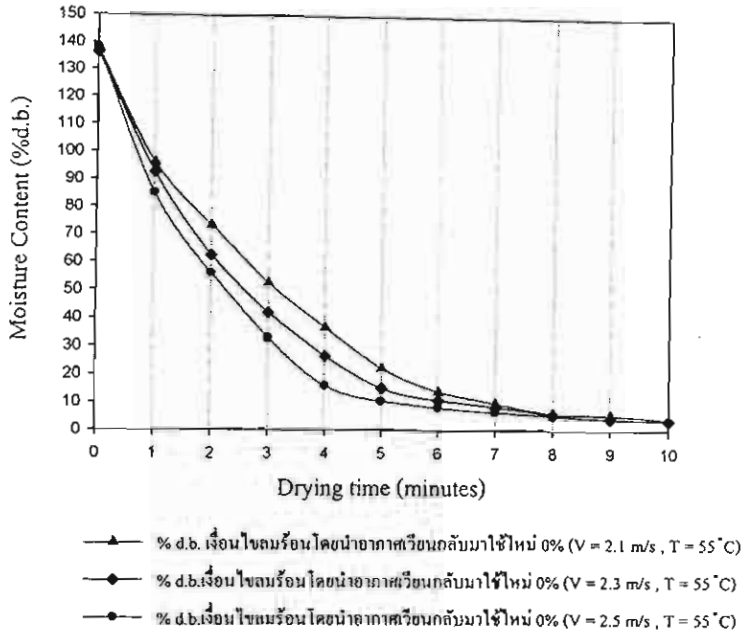
2. ผลการวัดสีของมะพร้าวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

หลังจากทำการอบแห้งมะพร้าวด้วยด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดและนำไปทำการวัดสีของมะพร้าวเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้นซึ่งมีค่าความสว่าง(L) 74.67 , สีเขียว (a) -0.78 และสีเหลือง (b) 3.32 จากผลการทดลองพบว่าการอบด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดจะทำให้ค่าความสว่างของมะพร้าวเพิ่มขึ้นประมาณ 3 % และค่าความเหลือง (b) เพิ่มขึ้นประมาณ 33 % (ไม่สามารถมองเห็นความเหลืองได้ด้วยตาเปล่า) โดยผลการทดลองแต่ละเงื่อนไขไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($\rho>0.05$) สำหรับค่า a จะไม่แตกต่างกันในแต่ละเงื่อนไขการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 5 เป็นมะพร้าวขูดหลังการอบแห้ง

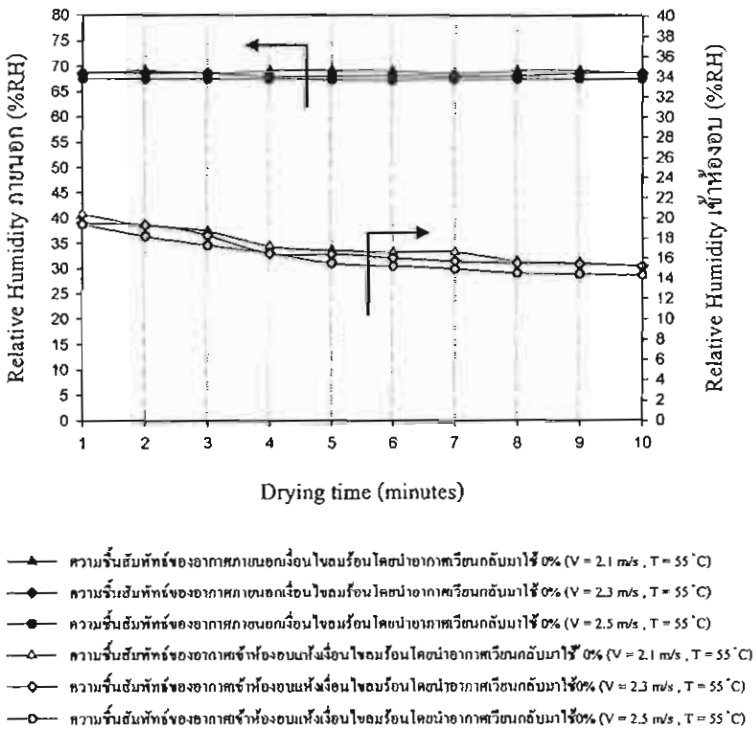
ตารางที่ 1 ผลการวัดสีมะพร้าวหลังการอบแห้งที่เงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ

Test No.	เงื่อนไขการทดลอง	L - value	a - value	b - value
	สีมะพร้าวขูดก่อนอบ	$74.67^{a} \pm 0.30$	$-0.78^{a} \pm 0.02$	$3.32^{a} \pm 0.15$
1	Hot Air โดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 % (V=2.1 m/s, T = 55 °C)	$77.08^{b} \pm 0.06$	$-0.49^{a} \pm 0.06$	$4.72^{b} \pm 0.04$
2	Hot Air โดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 % (V=2.3 m/s, T = 55 °C	$76.82^{b} \pm 0.10$	$-0.45^{a} \pm 0.02$	$4.78^{b} \pm 0.09$
3	Hot Air โดยนำอากาศเวียนกลับมาใช้ใหม่ 0 % (V=2.5 m/s, T = 55 °C	$76.95^{b} \pm 0.06$	$-0.66^{a} \pm 0.07$	$5.17^{b} \pm 0.16$

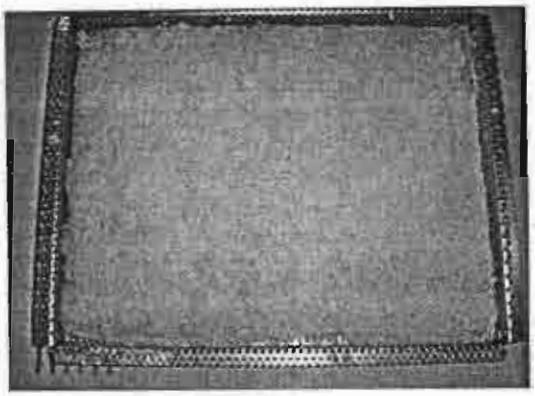
หมายเหตุ: ตัวเลขที่ตามด้วยอักษรที่เหมือนกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นมะพร้าวในแต่ละเงื่อนไขการทดลอง



รูปที่ 4 ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งและอากาศภายนอกห้องอบในแต่ละเงื่อนไข



รูปที่ 5 มะพร้าวขูดหลังการอบแห้ง

สรุป

จากการทดลองศึกษาอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบด โดยมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ140 % d.b. มวล 250 g พบว่าการเพิ่มความเร็วของอากาศอบแห้งส่งผลให้การลดลงของความชื้นของมะพร้าวเร็วขึ้น โดยความชื้นของมะพร้าวลดลงเหลือประมาณ 5 % d.b. ภายในระยะเวลาในการอบแห้ง 8-10 นาที และจากผลการวัดสีมะพร้าวหลังการอบแห้งพบว่ามะพร้าวมีค่าความสว่าง (L) ที่เพิ่มขึ้นประมาณ 3 % และค่าความเหลือง (b) เพิ่มขึ้นประมาณ 33 % ซึ่งยังไม่ส่งผลให้คุณภาพสีเปลี่ยนแปลงในระดับที่สังเกตุได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการอบแห้งมะพร้าวขูดด้วยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดจะใช้ระยะเวลาในการอบสั้น และยังคงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังอบได้ดี

คำขอบคุณ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ช่วยดำเนินการช่วยเก็บผลการทดลอง และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดสีมะพร้าวหลังการอบแห้ง

เอกสารอ้างอิง

1. ฐานิดย์ เมธิยานนท์,เสริมพงษ์ อดิเรกรัฐ,ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2548, การศึกษาการอบแห้งมะพร้าวโดยใช้ลมร้อนร่วมกับสารดูดความชื้น. การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6. 577-586.

2. อิศเรศ ธุชกัลยา,2543, การอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิไดซ์เบดด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

3. คงศักดิ์ ซินนาบุญ,2543, อิทธิพลของการทำเทมเปอริงที่มีต่อคุณภาพของเมล็ดข้าวโพดหลังอบแห้งแบบฟลูอิไดซ์เบด,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

4. อุบลวรรณ ชนะภัย,2547,การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งถั่วเหลืองเมล็ดเดี่ยวด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน,วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

5. Niamnuy,C. and Devahastin,S. 2005, Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. Journal of Food Engineering. 66:267-271.

การประชุมวิชาการครั้งที่ 7 ประจำปี 2549 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
วันที่ 23-24 มกราคม พ.ศ. 2549 จังหวัดมหาสารคาม

คุณสมบัติด้านกายภาพ และความหนืดของแป้งทุเรียนที่ได้จากอบแห้งด้วยวิธีต่าง ๆ

Physical and Pasting Properties of Durian Flour Obtained by Different Drying Methods

จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์[1] สมชาติ โสภณรณฤทธิ์[2] อดิศักดิ์ นาถกรณกุล[2] และ สมเกียรติ ปรัชญาวรากร[3]
Jindaporn Jamradloedluk[1], Somchart Soponronnarit[2], Adisak Nathakaranakule[2] and Somkiat Prachayawarakorn[3]

Abstract

Durian powder can be used as an ingredient for cakes, cookies, biscuits, candies, and beverages. Information of characteristics of durian flour is therefore useful. Effect of drying methods i.e., hot air, freeze, and vacuum drying on color, light transmittance, swelling power, and pasting property of durian flour are proposed in this study. The experimental data showed that freeze dried flour was less reddish and yellowish than vacuum and hot air dried flours. The swelling power of the product processed by freeze drying was greater than that processed by the other drying methods. For pasting behavior, freeze dried flour showed the highest peak viscosity followed by vacuum and air dried flour. However, the transmittances of the products dried by the three techniques were not significantly different.

Key words: Freeze drying, Vacuum drying, RVA, Swelling power

บทคัดย่อ

เนื่องจากผงแป้งทุเรียนสามารถใช้เป็นส่วนผสมสำหรับทำเค้ก คุกกี้ บิสกิต ขนมหวาน และเครื่องดื่มได้ ดังนั้นข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติต่าง ๆ ของแป้งทุเรียนจึงมีประโยชน์ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของวิธีการอบแห้ง ได้แก่ การอบแห้งด้วยอากาศร้อน การอบแห้งแบบสุญญากาศ และการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่มีต่อสี ค่าการส่องผ่านด้วยแสง กำลังการพองตัว และความหนืดของแป้งทุเรียน จากผลการทดลองพบว่า ผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีสีแดงและเหลืองน้อยกว่าผงแป้งที่ได้จากการอบแห้งแบบสุญญากาศและการอบแห้งแบบอากาศร้อน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการอบแห้งทั้งสามกระบวนการแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีกำลังการพองตัวมากที่สุด อย่างไรก็ตามค่าการส่องผ่านด้วยแสงของผงทุเรียนทั้งหมดไม่แตกต่างกัน

คำสำคัญ การอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การอบแห้งแบบสุญญากาศ กำลังการพองตัว ความหนืด

Introduction

Durian (*Durio zibethinus Murray*) is a tropical fruit widely grown in Southeast Asian countries including Thailand, Cambodia, Malaysia, Singapore and Indonesia. During the harvest season (May-August), in Thailand, many tons of durian have been harvested and transported to the market places. Since the climacteric behavior of this fruit shortens the period from harvesting to consumption, approximately 3-4 days, the amount of post harvest losses of durian due to physical damage and over maturation unavoidably occurs. In addition to the physical damage of the fruit during the harvest period, the price of the fruit drops significantly owing to the oversupply. To overcome these problems, fresh durian is processed into various products. One of the durian-based products is durian powder. It can be used as an ingredient for breads, cakes, cookies (Intariya et al., 2001), biscuits, ice-cream, candies, jellies, jam and juice (Subhadrabandhu, 2001). Three main institutes i.e., Department of Science Service (DSS), Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), and Kasetsart University (KU) have been working on technology for durian flour production. KU by Haruthaithaithanasan (1986) studied durian

powder production by a drum dryer. The durian slurry prepared by blending durian CV. Chanee flesh with water in the ratio of 1:2 w/w, was dried in the drum dryer at roller surface temperature of 130°C. The dried durian flakes were further ground. The durian flour obtained was creamy yellow and can be stored for more than 1 year. DSS by Binchai (2003) carried out a research on comparative study of durian powder production by three different dryers viz. cabinet dryer, double drum dryer, and freeze dryer. Two ripeness levels and two varieties of durian (Monthong and Chanee) were investigated. The experimental results showed that drum drying is the most appropriate methods for producing durian flour. This was because it gave the maximum yield with minimum processing time as well as the most suitability for every ripening stage of the raw material. TISTR by Suwanna et al. (1997) conducted drying experiments on unripe Monthong durian. The effect of ripeness levels of the fresh durian on physical properties e.g. color and viscosity of the durian flour produced were reported. It was stated that degree of ripeness of the fresh durian significantly affected the rheological property of the durian power. The higher degree of ripeness resulted in the lower viscosity. Apart from those works, Netharanon et al. (2002) proposed an academic research on production of durian powder by air and vacuum drying at different temperatures. It was found that the flour prepared by air drying was redder and darker than that that prepared by vacuum drying. The water solubility index and water absorption index of durian flour processed by different drying conditions are not significant. Study of pasting property showed that peak viscosity of the product dried in air oven was higher than that dried in vacuum oven.

To determine the suitability of durian flour for specific requirements like in cookie, cake, and bread, etc., knowledge on its physical and pasting property is essential. Although there are several papers in literature concentrating on drying techniques for durian flour production, limited attempts has been done on details in the physicochemical properties of the flour obtained. The present study therefore focuses on the effect of drying method on some physical and physicochemical properties of durian flour. Due to being regarded as the top variety of durian, Monthong was used in this study.

Materials and methods

1. Materials

Unripe peeled durian cv. Monthong was purchased from a local market. The durian flesh was cut into 30×30×2.5 mm. Moisture content of the fresh durian was in the range of 190-212% d.b. (AACC, 1995).

2. Sample preparation

Freeze dried durian was obtained by drying the cut durian in a freeze dryer (EYELA, FD-5N, Hong Kong) for 36 h. Vacuum dried durian was prepared by drying the sliced durian at operating temperature and pressure of 80°C and 3 kPa respectively. For conventional air dried sample, durian slices were placed on mesh trays and dried, in a batch type hot air dryer, at temperature and the air velocity of 50°C and 0.3 m/s respectively. To obtain flour, all dried samples were manually ground by a mortar and sieved through a 140-mesh screen. Moisture content of the durian flour was in the range of 3-5% d.b.

2. Test methods

2.1 Color measurement

Colors of dried durian flour were measured by a colorimeter (JUKI, model JP7100, Tokyo, Japan) with 2° North skylight as the light source. The color system used was Hunter Lab where "L" represents lightness, "a" represents redness (+) or greenness (-), and "b" represents yellowness (+) or blueness (-). The colorimeter was calibrated against a standard white plate (L= 93.55, a = -0.27, L=0.06) before each measurement.

2.2 Swelling power (%)

Swelling power was determined in triplicate by modifying method of Leach, McCowen, and Schoch (1959). Flour sample (3 g dry solid) was weighed into a centrifuge tube and 15 ml distilled water was added. The tube was heated at 50, 60, and 70°C with occasional shaking, in a water bath for 30 min. The tube was then cooled to room temperature and centrifuged (2200×g, 25°C) for 15 min. The supernatant was decanted and dried to the constant weight whereas the precipitates were weighed. % Swelling power was calculated as follows:

$$\text{Swelling power (\%)} = \frac{\text{Mass of precipitate (wet basis)}}{\text{Mass of flour (dry basis)} \times (100 - \text{solubility})} \times 100$$

where

$$\text{Solubility (\%)} = \frac{\text{Mass of soluble (dry basis)}}{\text{Mass of flour (dry basis)}} \times 100$$

2.3 Light transmittance

Light transmittances of flour suspension (1% w/w in water) were measured by the modifying method of Craig et al., (1989). The solutions were prepared in screw capped tubes and heated in water bath at 80°C for 10 min. The tubes were shaken periodically and were then cooled at the room temperature for 30, 60, and 90 min. % light transmittance of the solutions were measured at 650 nm against a water blank using a spectrophotometer (Shimadzu UV – 1601).

2.4 Pasting properties

Pasting behaviors of durian flour were determined using Rapid Visco Analyzer (Newport Scientific Pty Ltd, Warriewood NSW 2102, Australia). The suspension (14% w/w; 25 g total weight) was held at 50°C for 1 min, heated to 95°C at a rate of 12°C min^{-1} and maintained at 95°C for 3.5 min. It was then cooled to 50°C at the same rate and held at 50°C for 2 min. Each sample was analyzed in duplicate.

Results and discussion

1. Color of durian powder

It was generally accepted that the main causes of color changes during drying are pigment degradation and non-enzymatic browning reaction. The browning reaction that can be occurred during durian drying is Maillard reaction, strongly depending on drying temperature. Colors, in terms of L, a, and b, of durian flours prepared by different drying processes were listed in table 1. It was clearly seen that drying techniques significantly affected redness and yellowness of the final products. The flour obtained by air drying was more

reddish and yellowish than that obtained by the other two drying methods ($P<0.05$). However, the drying techniques had no significant effect on whiteness of the end product. Less intense of a- and b- values of the freeze dried sample was probably due to the lower temperature used. Comparison to vacuum drying, though hot air drying operated at lower temperature but it required relatively longer time to finish the process. Redness and yellowness of the air dried flour was therefore greater than those of vacuum dried flour.

Table 1 Color of freeze, vacuum, and air dried durian flour

Sample	Color index		
	L	a	b
Freeze dried	85.35[a]	-2.26[a]	8.54[a]
Vacuum dried	84.76[a]	-2.17[b]	8.93[b]
Air dried	84.30[a]	-2.13[c]	9.07[c]

Data bearing different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$).

2. Light transmittance

Light transmittance can be used to indicate the clarity of starch paste. The variation in light transmittance (%) among the starch pastes could be attributed to the differences in the granule size, granule swelling, granule remnants, leached amylase and amylopectin, amylase and amylopectin chain lengths, intra or intermolecular bonding, lipids, cross-linking and substitution (Jacobson, Obanni, & BeMiller, 1997). Transmittances of durian flour measured at different time intervals are shown in table 2. Two-way ANOVA analysis showed that the effects of both drying method and storage duration on % light transmittance were not significant. RETRO

Table 2 Effect of storage duration on the transmittance (%) of durian flour produced by different drying techniques

Sample	% Light transmittance		
	30 min	60 min	90 min
Freeze dried	33.30	33.30	33.15
Vacuum dried	33.70	33.65	33.45
Air dried	34.80	34.45	34.05

3. Swelling

Swelling powers of durian flours as a function of heating temperatures ranged from 50 to 70°C are illustrated in Fig. 1. Two-way ANOVA analysis showed that the effects of both drying method and heating temperature on swelling power was significant and the effect of the drying method was more pronounced than that of the heating temperature. As revealed by Fig. 1, the swelling power of all dried samples increased with increasing temperature, indicating the occurrence of gelatinization. It was also suggested that the swelling power of freeze dried flour was higher than vacuum dried flour, which in turn was higher than the air dried flour. The

higher swelling power of the flour prepared by freeze drying implies lower degree of associative forces in the granules (Muyonga, Ramteke, & Eipeson, 2001) and the weaker starch granule structure (less dense structure). The loose structure of freeze dried product is probably due to the porous structure occurred during drying.

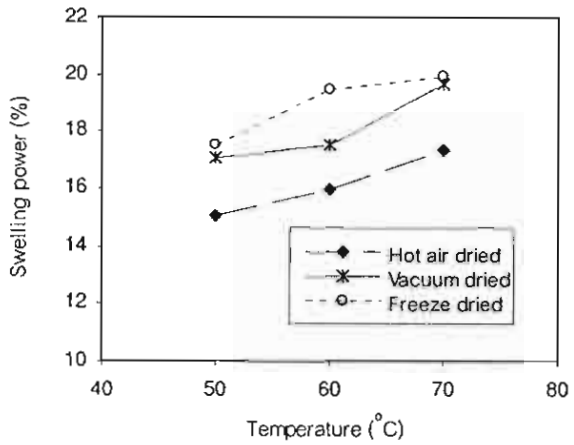


Fig. 1 Swelling power of durian flour processed by different drying techniques

4. Pasting property

The pasting behaviors of starch are dependent on the size, form, coherence, arrangement and swelling degree of starch granules. It is also related to the heat and shear stability of the swelled granule, as well as the structural difference in amylose and amylopectin (Baek, Cha, Park, & Lim, 2000). RVA profiles of durian flour produced by freeze, vacuum, and air drying are depicted in Fig. 2 and the statistical analyses of all pasting parameters were summarized in Table 3. It can be stated that drying method has strong influence on the pasting characteristics of the durian powder.

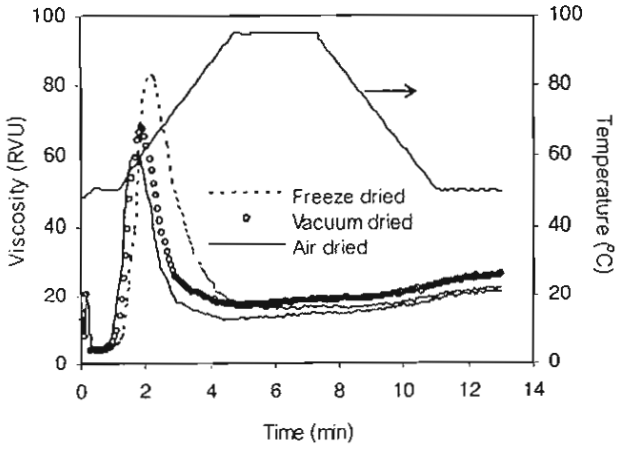


Fig. 2 RVA viscosity profiles of durian powder

Table 3 Pasting parameters derived from the RVA profile

Sample	Pasting temp. (°C)	Peak viscosity (RVU)	Holding strength (RVU)	Final viscosity (RVU)	Break down (RVU)	Set back (RVU)
Freeze dried	56.55	85.79	14.88	21.79	70.92	6.92
Vacuum dried	52.78	67.21	16.96	24.42	50.26	9.46
Air dried	51.73	60.59	12.52	20.81	47.77	8.04

Pasting temperatures of the flours were in the range of 51-57°C high pasting temperature indicates the high resistance to swelling and rupture. As illustrated in Fig. 2, during heating viscosity increased rapidly to the maximum viscosity, peak viscosity. It was found that peak viscosity of freeze dried flour was significantly higher than that of vacuum and air dried flours. This was because freeze dried sample with high swelling power occupied much volume within water suspension, thus the space among the granules became narrower, and frictions among granules were likely to occur (Kim, Lee, & Seok, 1999). This led to the higher peak viscosity. Upon further heating, however, the swollen granule ruptured resulting in a decrease of viscosity to the minimum extent. Differences between the maximum and minimum viscosities named breakdown. The breakdown is regarded as the measure of degree of disintegration of granules or paste stability (Dengate, 1984). At breakdown, the swollen granules disrupt further, and amylose molecules leach out into the solution (Whistler & BeMiller, 1997). Freeze dried flour showed the highest breakdown followed by vacuum and air dried flours (Table 3). This implies that the durian flour prepared by freeze drying is more resistant against heat and shear force (more stable) than that prepared by the other two drying methods. Fig. 2 also reveals that viscosities of all samples gradually increased, to the final viscosity value, until the end of cooling process. The increased viscosity is probably due to the aggregation of the amylose molecules (Miles, Morris, Orford, & Ring, 1985). The final viscosities of all samples were observed to be lower than their peak viscosities. The set back (final viscosity–holding strength) expresses the value that is obtained from the formation of rearrangement of excreted amylose molecules from starch granule after swelling. The set back reveals the gelling ability or retrogradation tendency by amylase (Newport Scientific, 1995). It was suggested that durian flour produced by the three methods posses rather low setback. The non-cohesive pastes obtained can be applied for viscosity reduction in the preparation of weaning and supplementary foods from starchy raw materials (Muyonga, Ramteke, & Eipeson, 2001).

Conclusions

Characterization of durian flours undergoing freeze, vacuum and air drying was proposed in this study. Swelling power and pasting behaviors were strongly affected by the different drying methods. Freeze drying provided durian flour for higher swelling power and peak viscosity than vacuum and air drying. Freeze dried powder was less reddish and yellowish than vacuum and air dried powder. However, the effect of drying process

on the light transmittance was not as pronounced as on the other properties. Transmittance of the powder produced by each drying method was not significantly different. By observation, all durian flours obtained were light cream color and the pastes were non-cohesive.

Acknowledgements

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

References

AACC, 1995, Approved method of the American Association of Cereal Chemists, 9th ed, American Association of Cereal Chemists St, Paul, MN.

Baek, M. H., Cha, D. S., Park, H. J., & Lim, S. T. (2000). Physicochemical properties of commercial sweet potato starches. Korean Journal of Food Science and Technology, 32, 755–762.

Binchai, W. (2003). Durian flour production for industries. Department of Science Service Journal, 51, 1-2.

Craig, S. A. S., Maningat, C. C., Seib, P. A., Hoseney, R. C. (1989). Starch paste clarity. Cereal Chemistry, 66, 173-182.

Dengate, H. N. (1984). Swelling, pasting, and gelling of wheat starch. InY. Pomeranz (Ed.), Advances in cereal science and technology (pp. 49–82). USA: American Association of Cereal Chemists.

Haruthaithaithanasan, V. (1986). The production of durian powder as a raw material for food industries. Proceedings of the 24th Kasetsart University Annual Conference, Kasetsart University 27-29 January 1986, Bangkok, Thailand, 120-134.

Intariya, K., Songjit, W., and Huangrak, K. 2544. Substitution of wheat flour by durian powder in bread, cake and cookie. King Mongkut's agricultural journal, 19, 26-32.

Jacobson, M. R., Obanni, M., & Bemiller, J. N. (1997). Retrogradation of starches from different botanical sources. Cereal Chemistry, 74, 571-578.

Kim, Y. S., Lee, Y. T., & Seok, H. M. (1999). Physicochemical properties of starches from waxy and non-waxy hull-less barleys. Journal of Korean Society Agriculture Chemistry Biotechnology, 42, 240–245.

Leach, H. W., McCowen, L. D., & Schoch, T. J. (1959). Structure of the starch granule. I. Swelling and solubility patterns of various starches. Cereal Chemistry, 36, 534-544.

Miles, M. J., Morris, V. J., Orford, R. D., & Ring, S. G., (1985). The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. Carbohydrate Research, 135, 271-281.

Muyonga, J. H., Ramteke, R. S., & Eipeson, W. E. (2001). Prehydration steaming changes- physico-chemical properties of unripe banana flour. Journal of Food Processing and Preservation, 25, 35-47.

Netharanon, P., Thandham, B., Ampamas, S. 2002. Making of durian powder by drying method. Project, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

Newport Scientific. (1995). Interpretation, In Newport Scientific (Ed.), Operation Manual for the series 3 Rapid ViscoAnalyser (pp. 25–28). Sydney: Newport Scientific Pty. Ltd.

Subhadrabandhu, S. and Ketsa, S. 2001. Durian: King of Tropical Fruit, CABI Publishing.

Suwana Srisawas, Inthrawut Chatket, Panida Bunchongsinsiri, Vanee Sutivatanavet, Pompatra Srinorakutara, Sampam Srisuriyawong, Dumrongchai Sitthisumamg, and Sompong Suksangpleng. 1997. Durian powder form unripe Mon-thong durian. Thailand Institute of Scientific and Technological Research. 88 p.

Whistler, R. L., & BeMiller, J. N. (1997). Carbohydrate chemistry for food scientists (pp. 117–151). St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists.