สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนอุดหนุนวิจัย 2549

การผลิตน้ำลำไยผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย

SPRAY DRYING OF LONGAN DRINK POWDER

โดย

มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เสนอต่อ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรกฎาคม 2549

RCH
TP
562.5
.L6
ม๔๑๗๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....84553
วัน,เดือน,ปี.....13 ต.ค. 2551

b.....11 ค.ค. 60 5.....
i.....

บทคัดย่อ

ลำไยจัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ปัจจุบันผลผลิตลำไยมีปริมาณมากจนเกินความต้องการของตลาด ทำให้เกิดปัญหาการเน่าเสียของลำไยและราคาตกต่ำ การนำลำไยมาแปรรูปเพื่อผลิตเป็นน้ำลำไยผงจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาผลผลิตลำไยที่ล้นตลาดและช่วยเพิ่มมูลค่าของลำไย เนื่องจากสามารถนำไปบริโภคได้สะดวกหรือส่งออกจำหน่ายในรูปแบบของเครื่องดื่มกึ่งสำเร็จรูปซึ่งเป็นที่นิยมในแถบประเทศที่มีภูมิอากาศหนาวเย็น เช่นประเทศจีน การผลิตน้ำลำไยผงให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถละลายน้ำเพื่อดื่มได้ทันทีจึงเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้บริโภค เนื่องจากสะดวกต่อการบริโภคและสามารถเก็บได้นาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตน้ำลำไยผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณการเติมมอลโตเด็กซ์ตริน (0.4, 0.5, 0.6 กรัม / กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้) อัตราไหลของลมร้อน (1.45, 1.68, 1.8 m^3/min) อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง (165°C, 175°C, 185°C) โดยวางแผนการทดลองแบบ Box Behnken method ประกอบด้วย 15 สภาวะการทดลอง ผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Surface Method (RSM) และสร้างสมการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ความชื้น ความหนาแน่น Aw และความสามารถในการละลาย จากการศึกษาพบว่าตัวแปรทั้งสามประการต่างมีผลต่อคุณลักษณะของลำไยผงที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแล้วให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลำไยผงสูงสุด ที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.6 กรัม / กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง 185°C และอัตราการไหลลมร้อน 1.8 m^3/min และให้ค่าเปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์และความสามารถในการละลายที่สูง

Abstract

In this study, a pilot scale spray dryer with cocurrent operation and a two fluid nozzle atomizer was used for drying of *Longan* juice. A three-factor Box Behnken design was adopted to investigate the effect of processing variables including the amount of added maltodextrin (0.4 - 0.6 g/g of total soluble solid), drying air temperature (165-185 ^{o}C), and air velocity (1.45 - 1.80 m^3/min) on product yield, moisture content, bulk density, and solubility. Significant regression models in the form of second order polynomial describing the product characteristics with respect to the independent variables were established, with the coefficient of determinations greater than 0.8. Results showed that product yield increased with increase in the amount of added maltodextrin and drying air temperature, whereas decreased with increase in air velocity. The most important factor affecting solubility was drying air temperature. The optimum condition at ratio of maltodextrin added 0.6 g/g, drying air temperature 185^{o}C, and air velocity at 1.80 m^3/min provided high product yield and solubility

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ii
Abstract	iii
สารบัญ	iv
1. บทนำ	1
2. วัตถุประสงค์	3
3. การตรวจเอกสาร	4
4. การดำเนินการวิจัย	15
4.1 เครื่องแยกกากลำไย	15
4.2 วิธีการทดลอง	17
4.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ	17
4.2.2 การทำแห้งน้ำลำใยด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย	18
4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้	19
4.2.4 การวางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลอง	21
5. ผลการทดลอง	
5.1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สภาวะต่างๆ	22
5.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะต่างๆ ของลำไยผงที่ได้	25
5.2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (% Yields)	25
5.2.2 ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ (% Moisture Content)	28
5.2.3 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (Bulk Density)	30
5.2.4 ค่าความสามารถในการละลาย (Water Solubility)	33
5.2.5 ค่า Water Activity ของผลิตภัณฑ์ (Aw)	35
5.2.6 ค่าสี	38
5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ลำไยผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	40
6. สรุปผล	42
7. เอกสารอ้างอิง	43

1) บทนำ

ลำไย (longan) จัดเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ทำรายได้เข้าประเทศเป็นอันดับต้นของกลุ่มสินค้าเกษตร รูปแบบที่ส่งออกมีทั้งในรูปของลำไยสดและลำไยแปรรูป เช่น ลำไยกระป๋อง ลำไยแช่แข็ง ลำไยอบแห้ง โดยลำไยอบแห้งคิดเป็นร้อยละ 44 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ซึ่งมีปริมาณ 6,770 ตัน และมูลค่า 436,727,000 บาท [1,2] ลำไยเป็นผลไม้ที่มีรสชาติหอมหวาน มีประโยชน์ทางโภชนาการ เป็นที่นิยมบริโภค ลำไยจึงเป็นผลไม้ที่มีราคาสูง แต่เนื่องจากแผนปรับโครงสร้างระบบการเกษตรของรัฐบาลที่เปลี่ยนพื้นที่ปลูกข้าวไม่เหมาะสมเป็นพื้นที่ปลูกผลไม้ เกษตรกรส่วนหนึ่งจึงหันมาทำการปลูกลำไยกันเพิ่มขึ้น และจากการที่ลำไยสามารถออกผลผลิตได้ตลอดทั้งปีและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำให้ผลผลิตลำไยสดมีปริมาณมากเกินความต้องการและเกิดปัญหาลำไยล้นตลาด ราคาตกต่ำ อีกทั้งลำไยเป็นผลไม้ที่สามารถเน่าเสียง่าย โดยปกติลำไยสดที่ผ่านการเก็บเกี่ยวจะอยู่ได้เพียงแค่ 2-3 วันก็จะเกิดการเน่าเสีย ซึ่งสาเหตุเกิดจากเชื้อราและการเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสม การแปรรูปจึงเป็นวิธีที่ช่วยขจัดปัญหาดังกล่าว ทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของสินค้าและสามารถเก็บรักษาเพื่อการบริโภคได้นานขึ้น

ในปัจจุบันการแปรรูปลำไยที่ใช้อยู่มีหลายวิธี อาทิ เช่น การบรรจุกระป๋อง การกวน การอบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งส่วนใหญ่ของลำไยจะถูกนำมาแปรรูปด้วยการอบแห้ง ประเทศที่รับซื้อลำไยอบแห้งแหล่งใหญ่ได้แก่ จีน เกาหลีใต้ ฮ่องกง ซึ่งเป็นประเทศที่นิยมนำลำไยแห้งมาบริโภคโดยนำมาปรุงอาหาร เป็นส่วนผสมของยา หรือนำมาบริโภคในลักษณะเครื่องดื่ม ชาวจีนเชื่อว่าลำไยเป็นผลไม้มงคล มีสรรพคุณเป็นยาบำรุงหัวใจ บำรุงประสาท บำรุงเลือด ช่วยทำให้เจริญอาหาร เป็นสมุนไพร รูปแบบการบริโภคลำไยแห้งที่เป็นที่นิยมมากคือการทำเป็นเครื่องดื่มหรือน้ำลำไย แต่จะพบว่าการทำน้ำลำไยในแต่ละครั้ง ผู้บริโภคจะต้องใช้เวลานานในการเตรียมเพื่อให้เนื้อลำไยคืนตัวและสารในลำไยละลายออกมาซึ่งไม่สะดวกต่อการบริโภค ปัจจุบันแนวโน้มของผลิตภัณฑ์อาหารถูกพัฒนาไปสู่รูปแบบที่สะดวกและง่ายต่อการเก็บรักษาและพร้อมบริโภคได้ทันที ดังนั้นการศึกษาการผลิตน้ำลำไยผงที่สามารถชงละลายเพื่อดื่มได้ทันทีย่อมเป็นสิ่งที่สอดคล้องกับสภาวการณ์ปัจจุบันและในอนาคต

สำหรับการแปรรูปอาหารผงด้วยกรรมวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีหนึ่งที่เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร ตัวแปรการผลิตที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ได้มีหลายประการ[3,4,5] อาทิเช่น สภาพวัตถุดิบเริ่มต้น อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า อุณหภูมิลมขาออก อัตราการไหลของลม อัตราการป้อนอาหารเหลว ความเข้มข้นของอาหารเหลวเริ่มต้น เป็นต้น ส่วนคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผง จะพิจารณาจากค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์

ความหนาแน่น ความสามารถในการละลาย สี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตน้ำลำไยผงด้วยกรรมวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย และศึกษาผลของสภาวะการผลิตที่เหมาะสมต่อการทำแห้งน้ำลำไย เพื่อจะได้ข้อมูลและแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการแปรรูปลำไยต่อไป

2) วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์

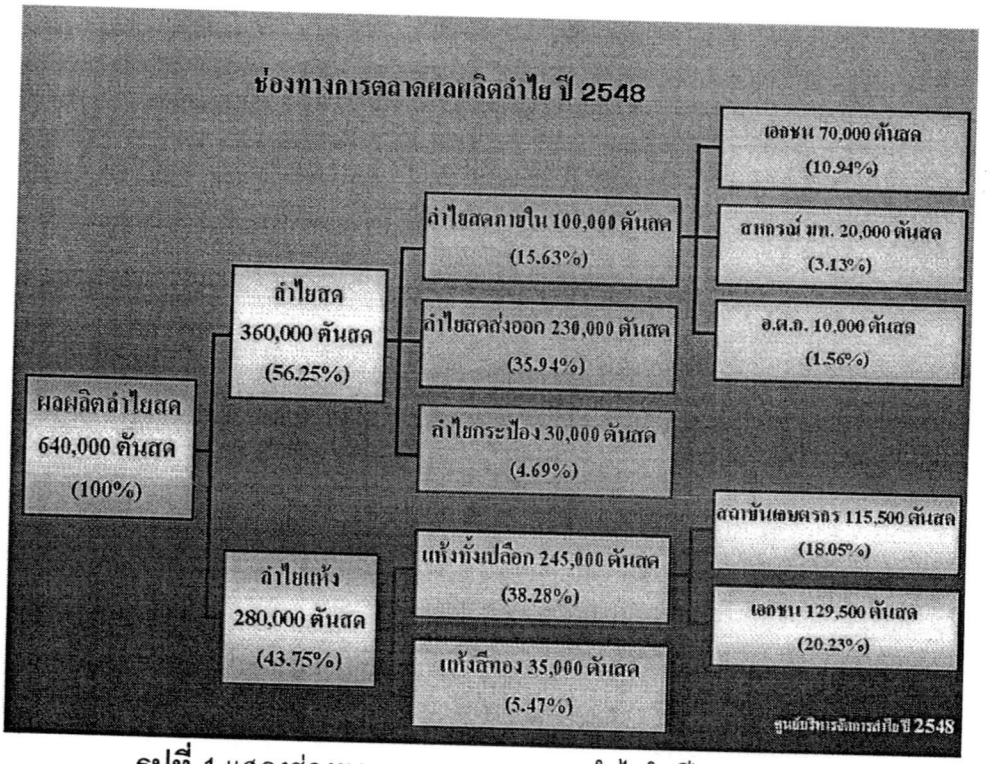
2.1) เพื่อศึกษาการผลิตน้ำลำไยผงด้วยกรรมวิธีการทำแห้งแบบพ่นฝอย

2.2) เพื่อศึกษาผลของสภาวะการผลิตที่เหมาะสมต่อการทำแห้งน้ำลำไย

2) การตรวจเอกสาร

ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับลำไย

ลำไยจัดเป็นเป็นผลไม้เขตร้อนและกึ่งร้อนเป็นผลไม้ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทยมีการปลูกกันแพร่หลายในตอนเหนือของไทย ในปี พ.ศ. 2547 ปริมาณผลผลิตและมูลค่าของลำไยที่ส่งออกมีจำนวนถึง 71,563 ตันคิดเป็นมูลค่า 1,541 ล้านบาทและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากในปีปัจจุบัน (พ.ศ. 2548) ดังภาพที่แสดงถึงช่องทางทางการตลาดผลผลิตลำไยดังรูป



รูปที่ 1 แสดงช่องทางทางการตลาดของลำไยในปี พ.ศ. 2548

ปริมาณผลผลิตของลำไยจะออกสู่ตลาดมากที่สุดในช่วงเดือนกรกฎาคมและสิงหาคมของทุกปี จังหวัดที่มีการเพาะปลูกกันมากทางภาคเหนือ คือ เชียงใหม่ เชียงราย ลำปาง ลำพูน แพร่ น่าน ตาก และพะเยาซึ่งมีปริมาณสูงที่สุดในประเทศ [2]

พันธุ์ลำไยที่มีการปลูกกันในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 5 พวก [3]

1. ลำไยกะโหลก เป็นพันธ์ที่ให้ผลขนาดใหญ่ มีเนื้อหนาและมีรสหวาน ปริมาณน้ำตาล 16 – 24 เปอร์เซ็นต์ มีหลายพันธุ์ คือพันธุ์สีชมพู, พันธุ์ตลับนาค, พันธุ์เขียวเบี้ยว, พันธุ์อีดอ ,พันธุ์แดง, พันธุ์ดำ, พันธุ์เหลือง, พันธุ์แห้ว

2. ลำไยกระดูก เป็นพันธุ์พื้นเมืองออกดอกและเก็บผลพร้อมกับพันธุ์กะโหลก มีผลกลมขนาดเล็ก เปลือกหนาเป็นสีน้ำตาลแดง เนื้อมีน้ำมาก และมีเนื้อน้อย

3. ลำไยธรรมดา หรือเรียกว่าพันธุ์กะโหลกไม่แท้ มีผลขนาดกลางระหว่างลำไยกะโหลกและลำไยกระดูก มีเนื้อหนากว่าลำไยกระดูก เนื้อกรอบบางให้ผลดก

4. ลำไยสายน้ำผึ้ง มีลักษณะเหมือนลำไยธรรมดา มีเนื้อเหลือง เนื้อกรอบ มีกลิ่นหอม เม็ดเล็ก รสหวาน

5. พันธุ์พิเศษ ได้แก่ลำไยเถา หรือลำไยเครือ มีใบดอกและผลคล้ายลำไย ปลูกเพื่อเป็นไม้ประดับมากกว่าที่ใช้เพื่อรับประทาน

แต่อย่างไรก็ตามลำไยพันธุ์อีดอเป็นพันธุ์ที่เกษตรกรนิยมปลูกกันมาก และเป็นพันธุ์ที่มีการนำไปแปรรูปเป็นลำไยแห้งจำนวนมาก ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของลำไย ในการผลิตน้ำลำไยผู้ผลิตมักใช้ลำไยอบแห้งมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นมากกว่าลำไยสดเนื่องจากลำไยอบแห้งจะให้กลิ่นรสของน้ำลำไยที่ดีกว่า

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของลำไย

สารอาหาร	เนื้อลำไยสด	เนื้อลำไยแห้ง
ความชื้น	81.10	17.80
ไขมัน	0.11	0.40
เส้นใย	0.28	1.60
โปรตีน	0.97	4.60
เถ้า	0.56	2.86
คาร์โบไฮเดรต	16.98	72.70
พลังงานความร้อน(กิดลแคลลอรี่/100 กรัม)	72.79	311.80
แคลเซียม(มิลลิกรัม/100กรัม)	5.70	27.70
เหล็ก(มิลลิกรัม/100กรัม)	0.35	2.39
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100กรัม)	35.30	159.50
วิตามินซี (มิลลิกรัม/100กรัม)	69.20	137.80
โซเดียม (มิลลิกรัม/100กรัม)	-	4.50
โพแทสเซี่ยม (มิลลิกรัม/100กรัม)	-	2012.00
ไนอาซีน (มิลลิกรัม/100กรัม)	-	3.03
วิตามินบี (มิลลิกรัม/100กรัม)	-	0.375

การทำแห้งแบบพ่นฝอย [4]

การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการทำแห้งที่เหมาะกับผลิตภัณฑ์เริ่มต้นที่เป็นของเหลวที่เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน(homogeneous solution) หรือสารละลายที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(non-homogeneous solution) เป็นการการอบแห้งแบบรวดเร็ว อาหารจะสัมผัสกับความร้อนในระยะเวลาสั้น การอบแห้งแบบพ่นฝอยจะประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ คือ จะให้ของเหลวหรืออาหารถูกทำเป็นละอองฝอยด้วยหัวอัดฉีด (atomizer) เข้าไปในห้องทำแห้ง ซึ่งมีลมร้อนไหลผ่านเข้ามาทำให้ละอองฝอยของอาหารสัมผัสกับลมร้อนและเกิดการระเหยน้ำในละอองฝอย อนุภาคที่แห้งจะลอยกระจายในลมร้อนแล้วเข้าสู่เครื่องแยกไซโคลน ออกจากเครื่องเป็นผลิตภัณฑ์ผง อาหารที่ป้อนเข้าไปจะถูกควบคุมให้เหมาะสมกับคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ตัวแปรที่ถูกควบคุมเช่น ความหนืด ความเข้มข้น และองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ลักษณะการไหล ตัว Atomizer (หัวอัดฉีด) การส่งผ่านความร้อนและมวล การแยกอาหารแห้งออกจากกระแสลม เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะอาหารผงและประสิทธิภาพการทำแห้ง

โดยทั่วไปเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย สามารถแบ่งได้เป็น 4 แบบ

-เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดสวนทางกัน อาหารเหลวที่ต้องการทำแห้งจะถูกพ่นใกล้กับส่วนบนของห้องอบแห้งและตกลงมา ขณะที่อากาศจะนำเข้าสู่เครื่องใกล้กับด้านล่างของห้องอบแห้ง และเคลื่อนที่สู่ด้านบนผ่านหยดเหลว ผลิตภัณฑ์ที่แห้งจะออกจากด้านล่างของห้อง ขณะที่อากาศจะถูกกำจัดออกใกล้ส่วนบนของห้องอบแห้ง อากาศที่เข้าซึ่งมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง จะสัมผัสโดยตรงกับผลิตภัณฑ์ซึ่งแห้งหรือเกือบแห้ง แต่ข้อเสียของเครื่องอบแห้งชนิดนี้ คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์จะลดลงเนื่องจากความร้อนที่มีต่อผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้อัตราไหลของอากาศต้องค่อนข้างต่ำเพื่อหลีกเลี่ยงผลิตภัณฑ์ติดไปกับอากาศในปริมาณมาก เมื่ออากาศถูกดูดออกจากด้านบนของเครื่อง

-เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยชนิดกระแสตามกัน จะมีการผสมอากาศเข้ากับหยดของเหลวที่เกิดขึ้นใหม่ที่เครื่อง Atomizer หลังจากการผสมตอนต้นแล้ว ผลิตภัณฑ์และอากาศจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับขณะที่กระบวนการทำแห้งดำเนินต่อไปผลิตภัณฑ์และอากาศส่วนใหญ่จะออกจากเรื่องอบแห้งที่ทางออกด้านล่างและเคลื่อนไปยังระบบแยก การจัดตัวเช่นนี้เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อน เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหลวสัมผัสกับอากาศเข้าอุณหภูมิสูงและผลิตภัณฑ์แห้งสัมผัสกับอากาศร้อนหลังจากอุณหภูมิลดลงอย่างมาก

-เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีการไหลผสมกัน การไหลของผลิตภัณฑ์และอากาศผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีการไหลผสมกัน ผลิตภัณฑ์จะเข้าสู่เครื่องด้วยตัว Atomizer ที่อยู่ใกล้กับศูนย์กลางห้องอบแห้ง อากาศที่เข้าส่วนบนจะเคลื่อน ที่ลงมาด้านล่างของห้องอบแห้ง ซึ่งจะ

สัมผัสกับผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนไปยังช่องอากาศภายออก ผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องทางออกใกล้กับส่วนล่างของห้องอบแห้ง ถ้าอุณหภูมิของอากาศที่เข้าเครื่องสูง อาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลง แต่ระบบนี้มีความสามารถในการระเหยต่อหน่วยปริมาตรสูงขึ้น

-เครื่องอบแห้งแบบฝอยที่มีการไหลขนานกัน การไหลของผลิตภัณฑ์และอากาศค่อนข้างจะเป็นเส้นสม่ำเสมอ จากด้านบนสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งที่แคบ ผลิตภัณฑ์และอากาศจะออกจากห้องอบแห้งด้วยกัน แล้วเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่ใช้แยกของระบบ ลักษณะของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะแตกต่างจากชนิดกระแสไหลตามกันคือ ความเร็วลมที่ใช้สูง ทำให้อุณหภูมิอากาศเข้าสูง ความเร็วลมนี้โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 2-3 เมตรต่อวินาที

หัวพ่นฝอย (Atomizer) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย สามารถแบ่งเป็น 4 แบบสำคัญ คือ

- Centrifugal pressure nozzle หัวพ่นแบบนี้ต้องใช้ความดันในการอัดของเหลวผ่านช่องเปิดเล็กๆ แล้วเกิดแผ่นของเหลวขึ้นซึ่งจะแตกออกเป็นหยดเล็กๆ ตามต้องการ สำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอย nozzle จะช่วยให้เกิดแผ่นของเหลวลักษณะเป็นกรวย ซึ่งเกิดจากการบีบของเหลวให้ไหลผ่านช่องเปิดวงแหวนแคบๆ
- Fan-spray nozzle ใช้ทำให้เกิดหยดเหลวโดยกระทบกระแสของเหลวบนช่องเปิดเล็กๆ ซึ่งออกแบบมาเพื่อให้เกิดแผ่นของเหลวในระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบของกระแสของเหลว แผ่นบางๆ ของของเหลวจะเกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นหยดของเหลว Fan-spray nozzle จะทำงานได้ดีที่สุดที่ความดันสูง และมีมุมการพ่นกว้างมาก
- Two-fluid atomizer ใช้กระแสก๊าซความเร็วสูงเพื่อให้กระทบกับกระแสของเหลวความเร็วต่ำ แล้วแตกออกเป็นหยดของเหลวเล็กๆ การกระทบของตัวของของเหลวในกระแสก๊าซจริงๆ อาจจะเกิดขึ้นภายในตัวอะตอมไมเซอร์ โดยทั่วไปตัวอะตอมไมเหล่านี้ มักจะใช้กำลังมากและอาจจะไม่ประหยัดที่ความจุสูง หยดของของเหลวละเอียดเล็กๆ สามารถเกิดขึ้นที่อัตราการไหลต่ำ และใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง
- Rotary atomizers จะใช้แรงเหวี่ยงให้เกิดแผ่นของของเหลว ซึ่งแตกออกเป็นหยดตามต้อง ของเหลวจะส่งเข้าไปยังผิวที่หมุนและเคลื่อนผ่านผิวเพื่อให้เกิดแผ่นบางที่เส้นรอบวง เนื่องจากแรงที่ทำให้เกิดแผ่นของเหลวขึ้นกับความเร็วของการหมุนโดยตรง ตัวอะตอมไมเซอร์ชนิดนี้สามารถใช้กับอัตราการป้อน และคุณสมบัติของเหลวได้ในช่วงกว้างขนาดของหยดเหลว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของจานและอัตราการป้อน

การส่งผ่านความร้อนและมวลในห้องอบแห้ง

ขั้นตอนการส่งผ่านความร้อนและมวลในห้องอบแห้ง สามารถอธิบายดังนี้

1. ในระยะเริ่มต้น อุณหภูมิของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก

2. ในระยะที่สอง เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นภายในอนุภาคเพิ่มขึ้นและค่าปริมาณน้ำอิสระ ที่ผิวหน้ามีค่าลดลง ดังนั้นทำให้อุณหภูมิที่ผิวหน้าสูงถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก

3. ในระยะที่สามการแพร่ภายในจะถูกจำกัดลง

4. ปริมาณความชื้นวิกฤตจะลดต่ำลง จนทำให้ผิวหน้าของอนุภาคไม่ยอมให้สารกลิ่นรสผ่านไปได้ ดังนั้นสามารถป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสได้

การแยกอาหารผง

เมื่อการระเหยนี้ออกจากหยดของเหลวเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์แล้ว อาหารผงจะตกลงสู่ส่วนล่างของถังอบแห้งและถูกดูดออกมาตามท่อลมออก ซึ่งอาหารผงสามารถแยกออกจากอากาศร้อนด้วยระบบไซโคลน (Cyclone separator) โดยอาศัยแรงเหวี่ยงและการถ่ายเทโมเมนตัม สามารถแยกของแข็งได้ถึงร้อยละ 95-98 ของปริมาณของแข็ง

ปัจจัยในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีผลต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ [5]

มีรายงานแสดงผลความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ผง ดังนี้

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้ง

อุณหภูมิอากาศเข้าและอุณหภูมิอากาศออกมีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิอากาศเข้าเป็นการเพิ่มแรงขับ (driving force) ของน้ำในอนุภาคที่จะระเหยออกไป เป็นผลให้ความสามารถในการระเหยน้ำของเครื่องอบแห้งเพิ่มขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal efficiency) ของการอบแห้ง ในสภาพการทำงานจริง ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณความชื้นสุดท้ายค่าหนึ่งเท่านั้น เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามต้องการ ดังนั้นอุณหภูมิอากาศออกต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้แน่นอน ในบางกรณีต้องเลือกสภาวะการทำงานที่อุณหภูมิอากาศออกต่ำซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูง เพื่อป้องกันการรวมตัวหรือดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บ

ผลของความเข้มข้นของอาหารเหลว

ถ้าเพิ่มปริมาณของแข็งในสารละลายป้อน โดยที่สภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่ จะมีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณของแข็งในอนุภาคที่พ่นฝอยจะเพิ่มขึ้นในขณะที่

อัตราการระเหยน้ำยังคงเดิม ดังนั้นอัตราส่วนของความชื้นต่อของแข็งที่เหลืออยู่ในอนุภาคจะน้อยกว่าในกรณีที่ปริมาณของแข็งในสารละลายป้อนต่ำ ผลที่ได้ตามมาคือ ผลิตภัณฑ์มีความชื้นลดลง

ผลของอัตราการป้อน

การเพิ่มอัตราการป้อน โดยที่สภาวะการทำงานของหัวฉีดคงที่ มีผลทำให้อนุภาคที่พ่นฝอยมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดใหญ่ด้วยและความหนาแน่นต่ำ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน โดยที่อัตราการไหลของอากาศร้อนเข้าและปริมาณความร้อนที่ให้ระบบคงที่มีผลให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ผลของการไหลเวียนของลมร้อน

ลมแห้งที่เข้าในห้องอบแห้งจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดยมอเตอร์ สามารถปรับระดับให้อัตราลมร้อนเข้าออกเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ การปรับการไหลเวียนลมร้อนมีผลต่อความดันภายในห้องอบลมร้อน ถ้าความดันเปลี่ยนก็จะมีผลต่อปริมาณการระเหยของไอน้ำ ดังนั้นระดับการหมุนเวียนลมภายในห้องอบแห้งมีผลต่อประสิทธิภาพอุปกรณ์ต่อการทำแห้ง โดยอัตราการไหลเวียนลมร้อนสูงทำให้การแยกในไซโคลนมีประสิทธิ์ภาพสูงและอัตราการไหลเวียนลมร้อนต่ำทำให้ระดับความชื้นคงเหลือในผลิตภัณฑ์ต่ำ

ผลของการทำงานของปั๊มป้อนวัตถุดิบ

ปั๊มที่ใช้อัดของเหลวเข้าสู่หัวฉีด (nozzle) ความเร็วของปั๊มมีผลต่อค่าความแตกต่างของอุณหภูมิขาเข้าและออก อัตราเร็วปั๊มมีผลต่ออัตรามวลเข้า ปริมาณของเหลวผ่านมากก็ต้องใช้พลังงานมากในการระเหยน้ำออก การที่อุณหภูมิทางออกลดลงนี้เป็นข้อจำกัดปั๊มทำให้อนุภาคไม่แห้งพอมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหนียวหนืดหรือผนังห้องอบแห้งเปียก ขนาดปั๊มขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความหนืดของของเหลวที่จะทำแห้ง และขนาดของท่อ

การเพิ่มขนาดปั๊มทำให้อุณหภูมิทางออกลดลงและทำให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิทางเข้าและออกเพิ่มขึ้น การลดขนาดของปั๊มและคงอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลเวียนลมร้อนไว้จะเพิ่มความแห้งให้กับตัวผลิตภัณฑ์

ผลของอัตราการพ่น (spray)

อัตราการพ่นคือปริมาณลมพอเพียงที่ใช้อัดให้ของเหลว(ของผสม สารแขวนลอย) เกิดการกระจาย อาจใช้แก๊สอื่นในการอัดได้ อัตราการพ่นมีผลต่อขนาดผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำให้ขนาดอนุภาค

ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เล็กลง และความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้นทำให้อนุภาคของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มีขนาดใหญ่และความพรุนมาก

การคืนรูปของอาหารแห้ง [6]

การคืนรูปของอาหารแห้งหมายถึง "การดูดกลับคืนของอาหารแห้งเพื่อเข้าสู่สภาพเดิมคล้ายก่อนการทำแห้ง" การคืนรูปของอาหารแห้งจะไม่มีลักษณะเป็นการย้อนกลับของการทำแห้ง เนื่องจากเหตุผลหลายประการ คือ เกิดจากปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ขององค์ประกอบ หรือเกิดจากการพองตัวของผิวด้านนอกเมื่อดูดน้ำเข้าไปก่อน และส่วนนี้จะกดทับอาหารที่หดตัวอยู่ด้านในไม่ให้คืนรูป หรือ จากการที่มีตัวถูกละลายบางส่วนจากอาหารละลายออกมากับน้ำที่ใช้คืนรูปทำให้เกิดการหดตัวของเซล

ปัจจัยที่มีผลต่อการคืนรูปจะมีหลายอย่าง คือ

1. ความสามารถในการเปียกน้ำ (wet ability) หมายถึง " ความสามารถของผงอาหารที่จะดูดน้ำที่ผิวของชิ้น" ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของการคืนรูป สมบัติข้อนี้จะขึ้นกับขนาด อาหารที่มีขนาดเล็กจะมีสัดส่วนของพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง การเปียกนี้มักจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เป็นก้อนใหญ่ๆ ซึ่งภายในยังคงมีอาหารที่แห้งอยู่น้ำจะซึมเข้าไปภายในก้อนได้ยากขึ้นทำให้ผงแห้งที่อยู่ภายในเปียกน้ำได้ยากขึ้น ถ้าผงอาหารมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกาะกันเป็นก้อนเมื่อคืนรูปนี้จะลดลง ลักษณะผิวตามธรรมชาติของผงอาหารก็จะมีผลต่อการเปียกน้ำ ตัวอย่างเช่น ถ้าที่ผิวมีไขมันอิสระ การเปียกน้ำจะลดลง การเลือกใช้สารบางอย่างที่เป็น surface active เช่น เลซิทิน จะช่วยให้อาหารที่มีส่วนประกอบของไขมันเปียกน้ำได้ดีขึ้น

2. ความสามารถในการจม (Sink ability) หมายถึง "ความสามารถที่ผงของอาหารจะจมลงในน้ำอย่างรวดเร็ว" ลักษณะนี้ขึ้นกับขนาดและความหนาแน่นของผงอาหาร อาหารที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมากจะจมน้ำได้เร็วกว่าอาหารที่ละเอียดและมีความหนาแน่นต่ำ อาหารที่มีโครงร่างโปร่ง ภายในมีอากาศอยู่มากจะจมช้า เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ

3. ความสามารถในการกระจายตัว (Disperse ability) หมายถึง "ความสามารถของผงอาหารที่จะกระจายออกไปในน้ำ" ผงอาหารที่จับกันเป็นก้อนได้ง่ายเมื่อละลายน้ำจะมีความสามารถในการกระจายตัวต่ำ และอาหารที่มีความสามารถในการจมมากขึ้นจะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น

4. ความสามารถในการละลาย (Solubility) หมายถึง "อัตราเร็วของผงอาหารที่ละลายน้ำ" ซึ่งจะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีของอาหารและสถานะทางกายภาพ

สมบัติทั้ง 4 ประการนี้ จะมีผลต่อการคืนรูปของอาหารแห้งที่เป็นผง โดยสมบัติเหล่านี้จะต้องสมดุลกัน ถ้าสมบัติประการใดเปลี่ยนแปลงไป พฤติกรรมการคืนรูปของอาหารนั้นจะ

เปลี่ยนไปด้วย สมบัติอย่าง เช่น ขนาดของชิ้น และความหนาแน่น นอกจากจะมีผลต่อกาคืนรูปแล้ว ยังมีผลต่อการขนถ่ายและลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์อีกด้วย การเปลี่ยนแปลงสมบัติของอาหารที่ป้อนเข้าเครื่อง คือ อุณหภูมิ ความหนืด ปริมาณของแข็ง การเปลี่ยนแปลงการฉีดพ่นเป็นฝอย คือ ชนิดของหัวฉีด ความดันหรือความเร็วที่ใช้ การเปลี่ยนแปลงของอากาศร้อนที่ใช้ คือ อุณหภูมิของอากาศที่ใช้ จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นและความหนา การปรับสภาวะเหล่านี้ให้เหมาะสมจะทำให้อาหารแห้งที่ได้มีการคืนรูปที่ดีขึ้น

การปรับปรุงความสามารถในการคืนรูปอีกประการหนึ่ง อาจทำโดยการทำให้อาหารผงที่มีขนาดเล็กเกินกว่าจะมีการคืนรูปได้ดีรวมกันมีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดของชิ้นอาหารที่เหมาะสมจะทำให้อาหารแห้งเกิดการเปียกและการกระจายตัวดียิ่งขึ้น

มอลโตเด็กซ์ตริน (maltodextrin) [6]

มอลโตเด็กซ์ตริน เป็นส่วนผสมของแซคคาไรด์ที่มีคุณค่าทางอาหาร และทำให้บริสุทธิ์แล้วได้จากปฏิกิริยาการไฮโดรไลซ์แป้ง โดยมีค่า Dextrose Equivalent (DE) น้อยกว่า 20

มอลโตเด็กซ์ตรินมีคุณสมบัติค่อนข้างที่จะไม่ดูดความชื้นเมื่อเทียบกับแบะแซ (Corn syrup) โดยเฉพาะที่มีค่า DE ต่ำๆ จะมีความสามารถในการดูดความชื้นได้น้อยที่สุด นอกจากนี้มอลโตเด็กซ์ตรินยังมีคุณสมบัติให้ลักษณะความเป็นเนื้อ (body) แก่ผลิตภัณฑ์

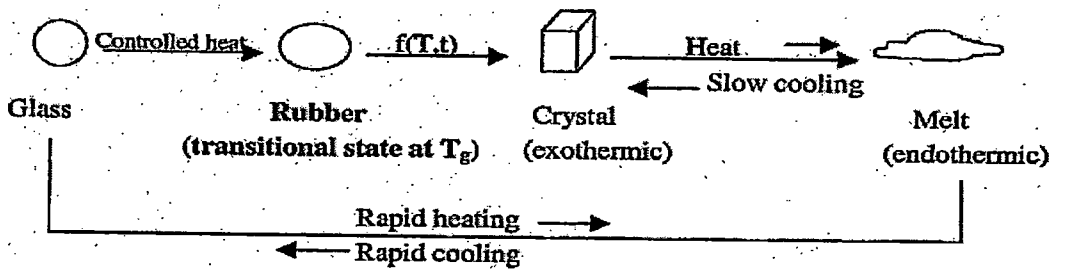
มอลโตเด็กซ์ตรินมักจะผลิตออกมาในรูปผงแห้ง มากกว่าที่จะผลิตในรูปของสารละลาย โดยมีความชื้นน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ลักษณะของมอลโตเด็กซ์ตรินเป็นผงสีขาว ร่อน มี Bulk density อยู่ในช่วง 32 ถึง 36 ปอนด์ต่อตารางฟุต และมีความหวานเล็กน้อยหรืออาจจะไม่หวานเลยขึ้นอยู่กับค่า DE มอลโตเด็กซ์ตริน และมีคุณสมบัติอย่างอื่นที่เป็นประโยชน์อีก คือช่วยในการเก็บรักษากลิ่นได้อีกมีการใช้กระบวนการ encapsulation มีความหนืดลดลงเมื่อค่า DE สูงขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของแข็งด้วย ถ้าหากมีปริมาณของแข็งสูง ความหนืดก็จะสูงขึ้น เมื่อนำมอลโตเด็กตรินไปละลายน้ำอาจได้สารละลายใสหรือขุ่น ขึ้นอยู่กับชนิดของมอลโตเด็กซ์ตรินที่นำมาใช้ นอกจากนี้มอลโตเด็กซ์ตรินยังสามารถละลายในอาหารที่เป็นของเหลว เช่น นม น้ำผลไม้ ซุป และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่เป็นสารละลายน้ำได้ดี โดยอาจจะใส่เป็นผงโดยตรง หรือนำมาละลายในน้ำก่อน ซึ่งความสามารถในการละลายของมอลโตเด็กซ์ตรินจะขึ้นอยู่กับค่า DE และชนิดของอาหารที่จะนำมาใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Master K. [7] ได้รายงานว่า อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลหรือกรดสูงเมื่อนำมาอบแห้งแบบพ่นฝอยพบว่าเกิดปัญหาไม่สามารถให้ผลิตภัณฑ์ผงออกมาจากเครื่องได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มี

ความเหนียวหนืด (sticky) ติดกับบริเวณผนังห้องอบแห้ง (drying chamber) และตามทางผ่านก่อนออกจากเครื่องแยก ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ออกมาจากเครื่อง (recovery product) ต่ำหรือแทบจะไม่ออกเลย

Bhandari และคณะ [8] ศึกษาพบว่าลักษณะเหนียว(sticky)ของผลิตภัณฑ์อาหารที่เกิดขึ้นในการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีความสัมพันธ์กับค่า อุณหภูมิของอาหารค่าหนึ่งที่เรียกว่า Glass transition temperature (T_g) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดส่วนประกอบและความชื้นของอาหาร ของเหลวที่ถูกทำแห้งอย่างรวดเร็วจะมีรูปร่างไม่เป็นผลึก (amorphous) มีลักษณะคล้ายแก้ว (glassy) เมื่อให้อุณหภูมิไปเรื่อยๆ จะเกิดเป็นลักษณะเป็นยางเหนียว (rubber) ที่อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงนี้คือ T_g ซึ่งค่านี้ใช้บ่งชี้อุณหภูมิที่อาหารเริ่มมีเกดลักษณะเหนียวเมื่อถูกทำแห้งอย่างรวดเร็วได้



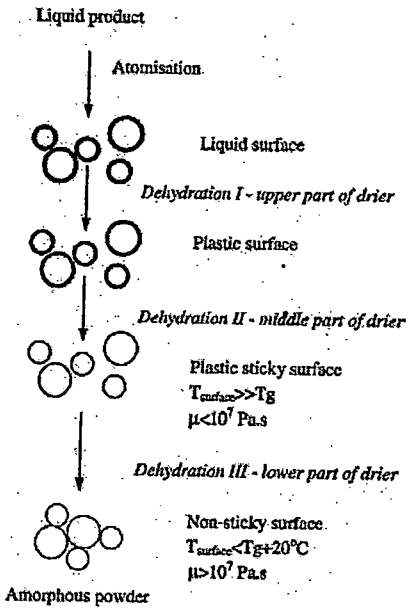
รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างจาก Amorphous glass ผ่าน rubbery เป็น crystal ที่สัมพันธ์กับเวลา

Roos & Karel [9] ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์กับค่าความหนืด (viscosity) ของอาหารในการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าที่ระดับช่วงอุณหภูมิ T_g+ 10 - 20 ^{o}C ลงไปจะมีค่าความหนืดมากกว่า 10^{7} Pa.s ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นจุดที่ผลิตภัณฑ์ไม่เกิด sticky ผลิตภัณฑ์ผงมีการไหลอิสระไม่ติดกัน แต่การใช้อุณหภูมิดังกล่าวในการทำแห้งอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงโดยไม่เติมมอลโตเดกตรินเลยจะทำให้มีการเสียค่าใช้จ่ายสูงไม่คุ้มค่า

Bhandari และคณะ [10] ศึกษาการอบแห้งแบบพ่นฝอยอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลสูงจะเกิดsticky เนื่องจากน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในอาหารมี ค่า T_gต่ำกว่าอุณหภูมิสุดท้ายของอาหารผงที่ออกจากกระบวนการอบแห้ง (ค่า T_g ของน้ำตาลบางชนิดแสดงในตารางที่ ข ในภาคผนวก) จึง ได้มีการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในอาหารเหลวเพื่อช่วยในการทำแห้ง โดยการเติมมอลโตเดกตรินที่มี T_g สูงจะทำให้ ค่า T_g โดยรวมของอาหารเพิ่มขึ้น และสร้างสมการค่าดัชนีการทำแห้งสำเร็จที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงออกจากเครื่องที่ 50% ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างอาหาร น้ำสับประรด และน้ำผึ้งใช้อุณหภูมิลมร้อน ขาเข้า/ขาออก คือ 150/65°C ที่ความเข้มข้น 75°Brix และเติมมอลโตเด็กซ์ตริน DE 6 โดยคำนวณปริมาณการเติมมอลโตเดกซ์ตรินจากสมการดังกล่าว

พบว่าในอาหารทั้ง 2 ชนิดต้องมีการเติม มอลโตเด็กซ์ตรินในปริมาณเกินร้อยละ 40 ของปริมาณของแข็งเพื่อทำแห้งแบบพ่นฝอยได้สำเร็จ

Athanasia M. Goula [11] [12] และคณะได้ทำการทดลองการทำแห้งน้ำมะเขือเทศแบบพ่นฝอย โดยใช้ของเหลวที่มีความเข้มข้น14 % อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าต่ำประมาณ 120-140 °C อัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ทดลองประมาณ17.5 - 22.75 m^3 /h และทำการลดความชื้นลมร้อนก่อนใช้อบแห้งร่วมด้วย พบว่าเมื่ออุณหภูมิลมร้อนขาเข้าสูง อัตราการไหลของลมร้อนมากจะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้มากขึ้น ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อเพิ่ม แรงดันอากาศที่หัวพ่นของเหลว และอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า และลดอัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มเมื่อลดอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและอัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ทำแห้งและเพิ่ม แรงดันอากาศที่หัวพ่นของเหลว การละลายของผลิตภัณฑ์ผงเพิ่มขึ้นเมื่อลด แรงดันอากาศที่หัวพ่นของเหลวและอัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ทำแห้งและเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า



รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหยดผลิตภัณฑ์
ในระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอย

Milton Cano-Chauca และคณะ[13] ได้ทำการศึกษาสารที่ใช้เติมในอาหารเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มะม่วงผงอบแห้งด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย สารช่วยทำแห้งที่ใช้ศึกษา คือมอลโตเด็กซ์ตริน (DE20), Arabic gum และ waxy starch ใช้ความเข้มข้นของเหลวที่ทำแห้ง 12°Brix อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 160°C อุณหภูมิลมร้อนขาออกประมาณ 70 -75°C อัตราการป้อนของเหลว 10 mL/min อัตราการไหลของลมร้อน 0.7 m^3/min คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ศึกษาคือลักษณะโครงร่างของผงแป้ง hygroscopicity stickiness และการละลาย โดยพบว่า ที่

การละลายที่มีเซลลูโลส 9 % ปริมาณการเติม มอลโตเด็กซ์ตริน , Arabic gum และ waxy starch เท่ากับ 72%, 71% และ31% ตามลำดับ

วิธีวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

วิธีวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบในการใช้เทคนิคทางสถิติและคณิตศาสตร์ที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาที่มีผลตอบอยู่หลายตัวแปร(Dependent Variable) และมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าดีที่สุดของผลตอบนี้ โดยจะใช้การออกแบบการทดอง Box –Behnken หรือ Central Composite Design ซึ่งเป็นการออกแบบสำหรับใช้หาพื้นที่ผิวตอบ การออกแบบนี้มีมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนนการทดลองที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนได้อีกด้วย

เมื่อทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบแล้ว จะนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ เนื่องจากวิธีพื้นที่ผิวตอบให้ความสำคัญกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับผลตอบ ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปสมการทั่วไปดังนี้

$$Y = \int(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) + \varepsilon$$

โดยค่า ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ Y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง และ x_n คือตัวแปรอิสระ

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่ผิวตอบส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระดังนั้นจึงต้องหารตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงซึ่งตามปกติจะใช้จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตของตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น จะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่ง แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น [14]

4) การดำเนินการวิจัย

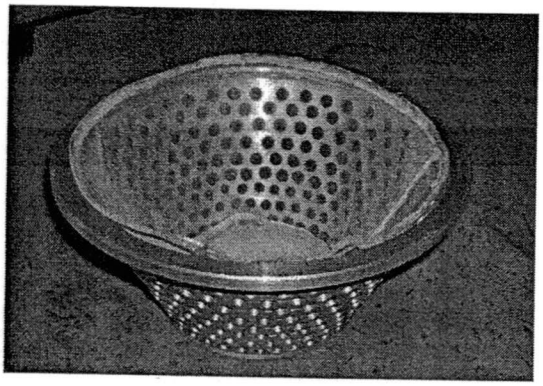
4.1. เครื่องแยกกากลำไย

รายละเอียดของส่วนประกอบสำคัญของเครื่องแยกกากลำไย (แสดงในรูปหน้า16)

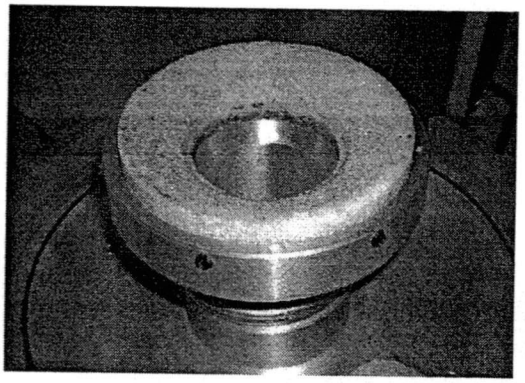
1. โครงสร้างสแตนเลส ขนาด: เส้นผ่าศูนย์กลาง 26 เซนติเมตร
   ความสูง 70 เซนติเมตร
2. แท่นหินขัด 2 แผ่น: หินขัดบน
   หินขัดล่าง
   ขนาด: เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร
   หนา 1.8 เซนติเมตร
3. ตะแกรง รูปกรวย ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง
   (ด้านบน) 21 เซนติเมตร
   (ด้านล่าง) 11 เซนติเมตร
4. มอเตอร์ขนาด 1/2 แรงม้า
5. แกนหมุน
6. กรวยป้อนน้ำลำไยเข้าเครื่อง
7. ช่องแยกกาก ขนาด 12 เซนติเมตร
8. ช่องแยกน้ำลำไย ขนาด 4 เซนติเมตร
9. แท่นยึดเครื่อง
10. ชุดฐานรองเครื่อง

ลักษณะการทำงานของเครื่องแยกกากลำไย

ลำไยกับน้ำที่ใช้สกัดจะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องแยกกาก ขณะทำงานเครื่องแยกกากหมุนด้วยความเร็วรอบ 800 rpm หลังการบดส่วนของน้ำลำไยและกากลำไยจะถูกเหวี่ยงออกโดยผ่านตะแกรงกรองที่ครอบอยู่โดยรอบ น้ำลำไยจะถูกแยกออกผ่านตะแกรงทางด้านล่างของเครื่อง ขณะที่ส่วนของกากจะถูกดักอยู่ภายในสะสมที่บริเวณผนังของตะแกรงและจะถูกดันให้ออกด้านบนของเครื่อง ในการใช้งานเครื่องสามารถแยกน้ำลำไยและกากออกจากกันได้อย่างต่อเนื่อง กากลำไยที่ได้ค่อนข้างแห้ง อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบอยู่ระหว่าง 50 -80 กิโลกรัม/ชั่วโมง

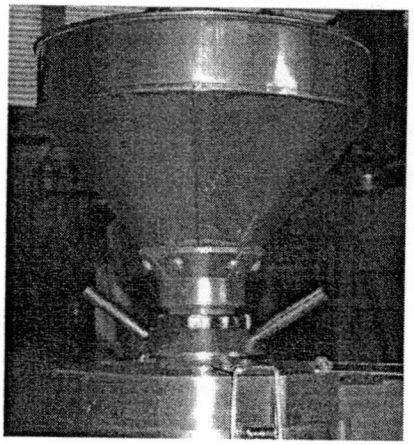


ตะแกรงแยกกาก



แท่นหินบด

โครงฐานเครื่อง



ชุดป้อนวัตถุดิบ

เคื่องแยกกากลำไย

รูป แสดงเครื่องแยกกากลำไย

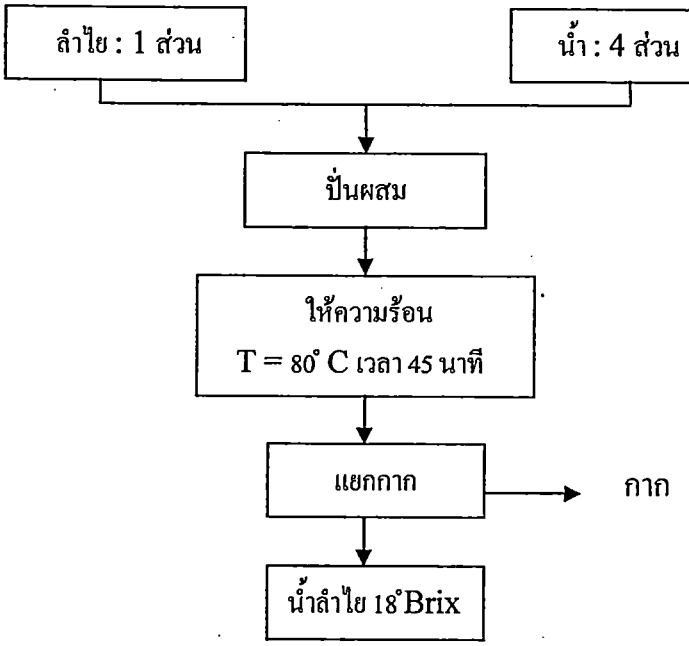
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

4.2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวแปรอิสระ 3 ค่า คือ ปริมาณมอลโตเดกตรินซ์ที่ใช้ อัตราการไหลลมร้อนและอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า ตัวแปรตามคือ ความชื้น ความหนาแน่น ความสามารถในการละลาย และปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้ (% yields)

4.2.1 ตอนที่ 1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำลำไยอบแห้ง จำนวน 1 กิโลกรัม มาบดด้วยเครื่องปั่นและผสมกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน1: 4 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำ มา ต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 45 นาที จนได้น้ำลำไยที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดประมาณ 18°Brix กรองน้ำลำไยที่ได้ ด้วยเครื่องแยกกาก



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมน้ำลำไยเริ่มต้น

นำน้ำลำไยที่เตรียมได้ความเข้มข้น 18° Brix มาผสมกับมอลโตเด็กซ์ตรินที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแข็งในน้ำลำไยต่อมอลโตเดกซ์ตรินต่างๆกัน ตามแผนการทดลอง

สัดส่วนน้ำหนักมอลโตเดกซ์ตริน = M / (M + S)

M = ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่เติมในน้ำลำไย

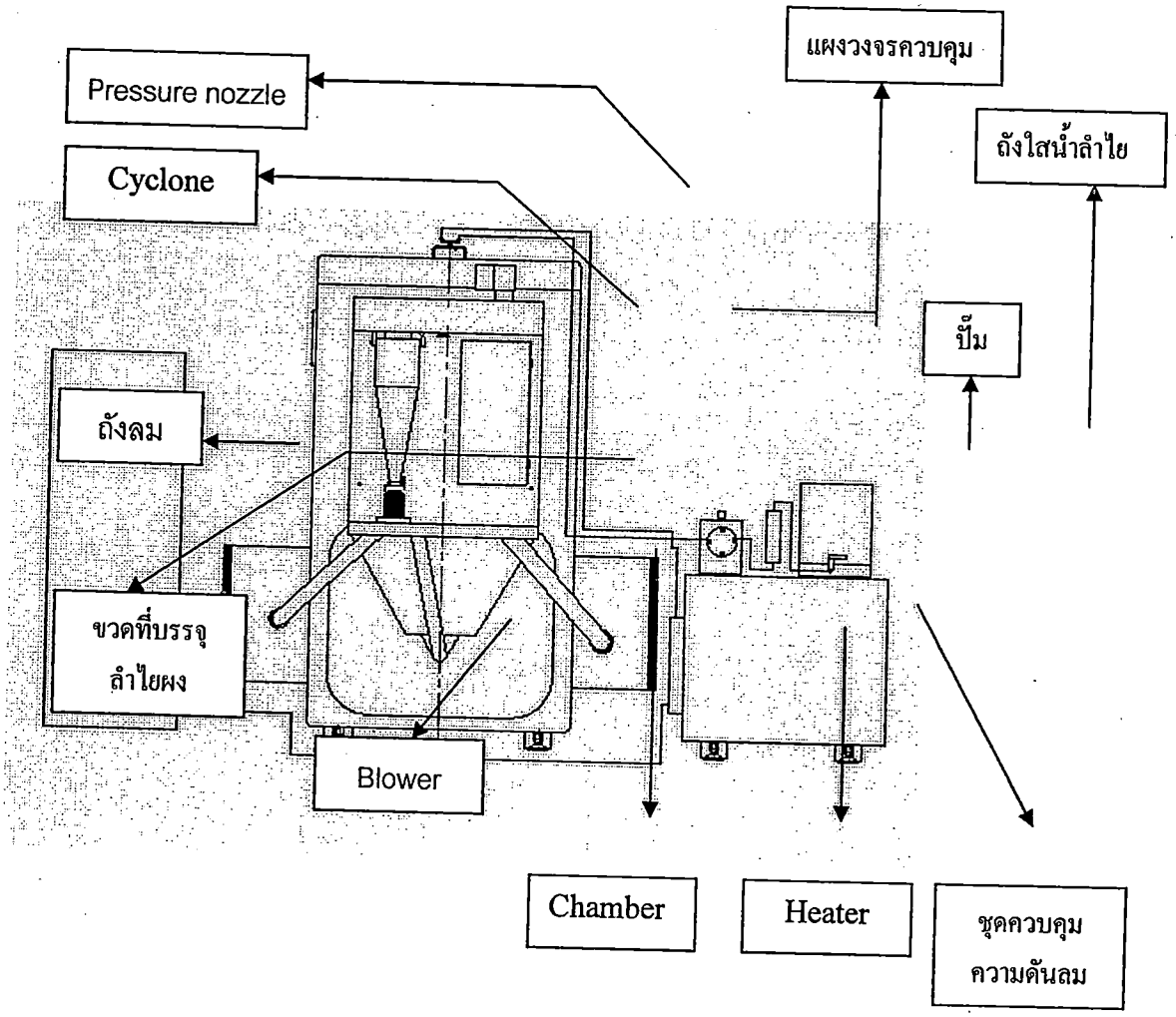
S = ปริมาณของแข็งที่ละลายอยู่น้ำลำไย

6. ปรับอุณหภูมิของน้ำลำไยที่ผสมให้มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40°C

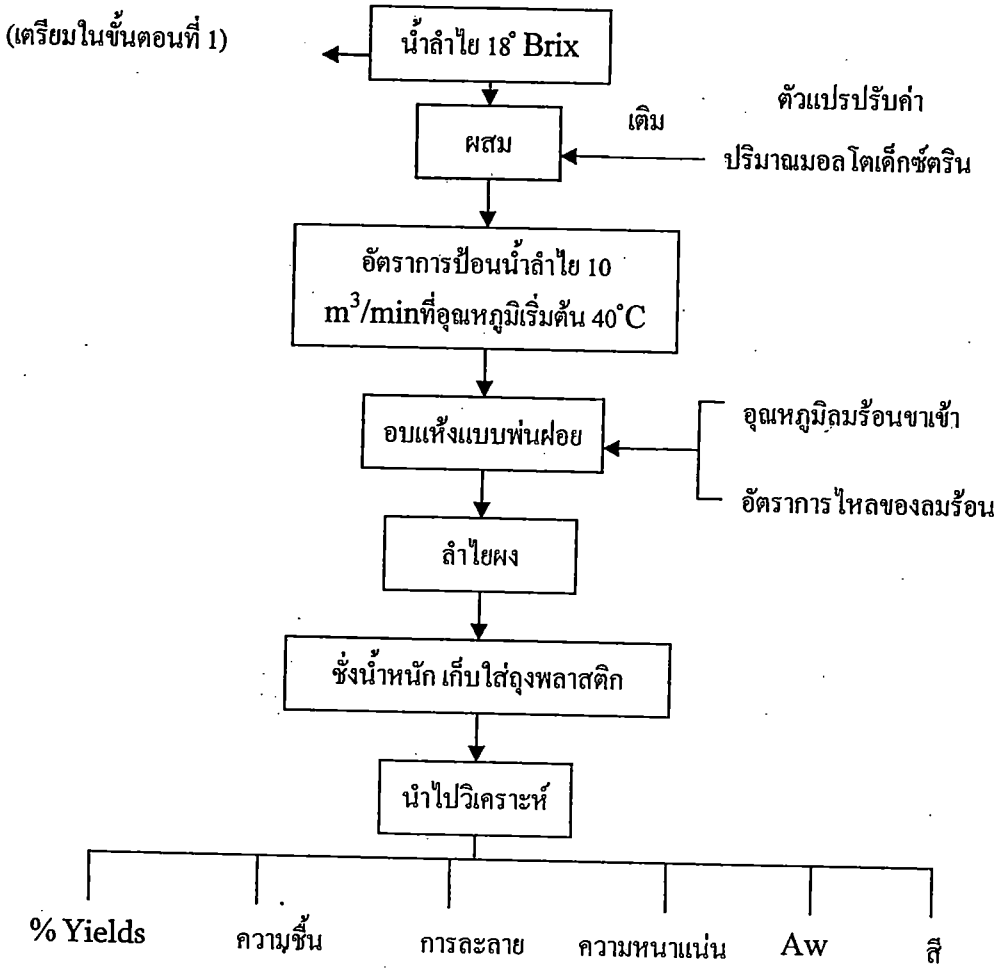
84553

4.2.2 ตอนที่ 2 การทำแห้งน้ำลำไยด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย

น้ำลำไยที่เตรียมจากตอนที่ 1 ถูกนำมาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลของลมร้อนตามกำหนดในแผนการทดลอง ใช้หัวพ่นฝอยแบบ two fluid nozzle โดยปรับความดันลม ที่ 0.2 MPa. เมื่ออุณหภูมิภายในห้องอบแห้งคงที่ตามค่ากำหนด จึงป้อนน้ำลำไยเข้าทำแห้งโดยปรับวาล์วมอเตอร์จ่ายของเหลว ให้ได้อัตราการไหลตามตารางแผนการทดลอง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แห้งทั้งหมดถูกนำมาชั่งน้ำหนัก แล้วบรรจุในถุงฟอยด์ ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ต่อไป



รูปที่ 5 เครื่อง Spray dryer ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง

4.2.3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้

ค่าความชื้น [15]

ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 2 กรัม นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 ± 1 °C เป็นเวลา 16 – 18 ชั่วโมง คำนวณหาปริมาณความชื้นจาก

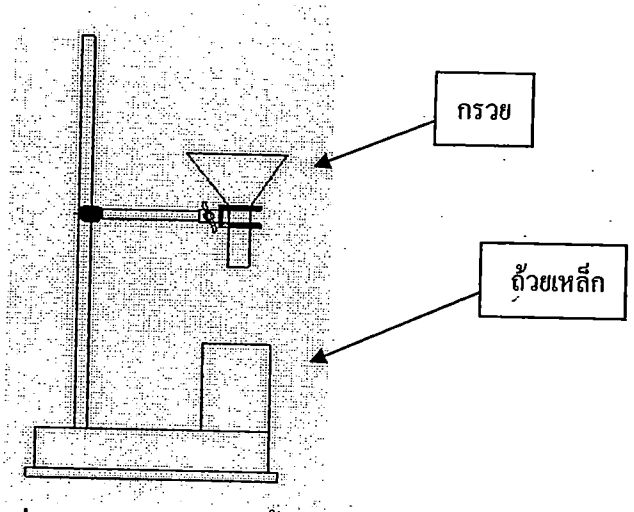
$$\% \text{ ความชื้นมาตรฐานเปียก} = \frac{(\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ})}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

ความสามารถในการละลาย [16]

ชั่งตัวอย่างด้วยน้ำหนักที่แน่นอน 10 กรัม ละลายในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ลงในบิกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร กวนของผสมทั้งหมดด้วย Magnetic stirrer ที่ความเร็วระดับ 5 วัดเวลาที่ใช้ในการละลายของตัวอย่างสมบูรณ์

ค่าความหนาแน่น (Bulk density) [17]

คำนวณจาก $\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ผง}}{\text{ปริมาตรถ้วย}}$



รูปที่ 7 ภาพแสดงการติดตั้งกรวย

ปริมาณของผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้ (% yields)

ในแต่ละการทดลองจะวัดเปอร์เซ็นต์ปริมาณของผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้ คือ อัตราส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมดในผลิตภัณฑ์แห้งต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบที่ป้อน หาโดยการชั่งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ และปริมาณของแข็งในวัตถุดิบเริ่มต้นวัดโดยนำตัวอย่างน้ำลำไย 18 brix หาความชื้นและนำมาคำนวณโดย

$$\%\ \text{ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้} = \frac{\text{น้ำหนักทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้} \times 100}{[(100 - \text{ค่าความชื้นน้ำลำไย 18 brix})/100] \times \text{น้ำหนักของวัตถุดิบเริ่มต้น} + \text{มอลโตเดกซ์ตริน}}$$

ค่า Water activity (Aw)

ใช้เครื่องวัดค่า Aw (AQUA LAB model series 3 TE) โดยทำการวัดค่า Aw ของผลิตภัณฑ์ 2 ซ้ำ แล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย

ค่าสี [16]

ใช้เครื่องวัดสี (Juki) ค่าที่ได้มี 3 ค่า คือ L* a* b* โดยทั้ง 3 ค่านี้เป็นค่าสีที่อยู่ในระบบ C.I.E LAB ความหมายของค่าสีในระบบ C.I.E LAB

ค่า L* (lightness) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสว่างโดยยิ่ง L* มีค่าเข้าใกล้ 0 มากเท่าไหร่ก็จะมีความมืดมากเท่านั้น

ค่า a* เป็นค่าแสดงความเป็นสีแดงหรือสีเขียว

a* เป็นบวก แสดงความเป็นสีแดง

a* เป็นลบ แสดงความเป็นสีเขียว

ค่า b* เป็นค่าแสดงความเป็นสีแดงหรือสีเขียว

b* เป็นบวก แสดงความเป็นสีเหลือง

b* เป็นลบ แสดงความเป็นสีน้ำเงิน

- การคำนวณ

ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสีทั้งหมด หรือ Total Difference (E*)

$$E^* = \left[(\triangle L^*)^2 + (\triangle a^*)^2 + (\triangle b^*)^2\right]^{1/2}$$

4.2.4 การวางแผนและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาการผลิตลำไยผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ตัวแปรที่ศึกษา คือ ตัวแปรสระ 3 ตัวแปร คือ 1) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า 2) ปริมาณลมร้อนที่ใช้ และ 3) อัตราส่วยของมอลโตเด็กซ์ตริน ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์ผลและสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมทางสถิติเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตลำไยผง ด้วยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ (response surface) จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การวางแผนการทดลองอาศัยแบบ Box Behnken ซึ่งประกอบด้วย 15 การทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงค่าระดับของตัวแปรในแผนการทดลอง

การทดลองที่	สัดส่วนน้ำหนักมอลโตเดกซ์ตริน (นน./นน.)	อุณหภูมิลมร้อนทางเข้า (องศาเซลเซียส)	ปริมาณลมร้อน (ลูกาศก์เมตรต่อนาที)
1	0.4	165	1.6
2	0.6	165	1.6
3	0.4	185	1.6
4	0.6	185	1.6
5	0.4	175	1.4
6	0.6	175	1.4
7	0.4	175	1.8
8	0.5	175	1.8
9	0.5	165	1.4
10	0.5	185	1.4
11	0.5	165	1.8
12	0.5	175	1.8
13	0.5	175	1.6
14	0.5	175	1.6
15	0.5	175	1.6

5) ผลการทดลอง

น้ำลำไยที่ได้จากการเตรียมมีความเข้มข้นเริ่มต้น 18 brix ปริมาณของแข็งทั้งหมด 16.12% ถูกนำมาทดลองผลิตตามแผนการทดลอง (ดังแสดงใน ตารางที่ 2) การเตรียมสภาพเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยก่อนเริ่มป้อนน้ำลำไยเข้าสู่เครื่อง แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่. 3 สภาวะเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ในการทดลอง

No.	อุปกรณ์		ค่าที่ปรับ	หมายเหตุ
1	ปั๊มป้อนวัตถุดิบ	ค่าปรับการป้อน	10(สเกลที่ปรับค่า)	2.28 ลิตรต่อชั่วโมง
2	อุณหภูมิลมร้อน	ทางเข้า	165 – 185 °C	คงที่ทุกการทดลอง
		ทางออก	90 °C	
3	เครื่องดูดลม(blower)	ความเร็วรอบ	2800-3200 rpm	1.45 -1.80 m^3/min
4	หัวพ่นวัตถุดิบ	ชนิด	two -fluid nozzle	
		ทิศทางการทำแห้ง	parallel	
		ความดันอากาศที่หัวพ่น	0.2 MPa	
5	เครื่องทำความร้อน	แผงความร้อน 4 ชุด	ใช้ 2 ชุด (3, 3 kW)	ควบคุมอัตโนมัติ 1ตัว

5.1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะที่สภาวะต่าง ๆ ตาม Box Behnken Design

ลำไยผงที่ได้จากการผลิตด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะต่างๆ ถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติผลิตภัณฑ์ผง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงผลการทดลองการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ลำไยผง

การทดลองที่	ปริมาณสัดส่วน maltodextrin* (g / g total soluble solid)	อุณหภูมิลมร้อน (C)	อัตราการไหลลมร้อน (m^3/min)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	สภาพการละลาย (วินาที)	ความชื้น (% wb)	ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (g)	ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด	Water activity	ค่าสีของผลิตภัณฑ์ลำไยผง			
										ระบบ C.I.E. Lab			
										L*	a*	b*	ΔE
1	0.4	165	1.6	0.44849	90	1.5040	291	52.22	0.287	60.24	11.14	33.82	52.22
2	0.6	165	1.6	0.44029	129	1.2454	377	64.00	0.246	74.83	7.1	29.78	64.00
3	0.4	185	1.6	0.54085	278	1.4743	43	62.52	0.253	73.53	7.41	28.94	62.52
4	0.6	185	1.6	0.34850	129	0.2304	370	62.22	0.161	72.99	7.94	29.64	62.22
5	0.4	175	1.4	0.41673	114	2.1322	36	60.76	0.202	71.73	7.32	28.83	60.76
6	0.6	175	1.4	0.43230	158	1.7078	582	59.82	0.223	70.61	7.55	29.19	59.82
7	0.4	175	1.8	0.40910	107	2.2910	70	64.07	0.245	75.19	6.92	28.85	64.07
8	0.5	175	1.8	0.32731	131	2.2762	380	62.84	0.237	73.75	7.03	29.35	62.84
9	0.5	165	1.4	0.32023	80	1.8710	102	65.91	0.146	78.29	5.23	24.2	65.91
10	0.5	185	1.4	0.36873	120	1.7787	50	59.91	0.251	69.05	8.4	31.39	59.91
11	0.5	165	1.8	0.36753	137	1.5518	131	61.16	0.224	72.79	6.78	26.68	61.16
12	0.5	175	1.8	0.47388	146	0.7491	118	63.18	0.151	74.85	6.48	26.82	63.18
13	0.5	175	1.6	0.42440	166	1.1924	150	62.96	0.186	74.5	7.05	27.25	62.96
14	0.5	175	1.6	0.22982	185	0.4200	495	61.99	0.220	73.9	7.18	28.62	61.99
15	0.5	175	1.6	0.41346	84	0.4617	228	50.64	0.239	60.58	8.05	29.8	50.64

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำแห้งและจะได้แนวทางที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต จึงได้ทำการทดลองต้นเพื่อหาขอบเขตของค่าตัวแปรที่ศึกษา ทีมีผลต่อกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำลำไยผง จากผลการทดลองเบื้องต้นพบว่าการทำแห้งแบบพ่นฝอยน้ำลำไยเกิดปัญหาการเหนียวติดทำให้ไม่สามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นผงแห้งได้ ผลิตภัณฑ์เหนียวติดกันภายในผนังห้องอบแห้งและบริเวณท่อลำเลียงเข้าสู่ส่วนแยกผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไปการอบแห้งแบบพ่นฝอยผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของน้ำตาล ซึ่งมีค่า transition temperature (T_g) อยู่ในระดับต่ำไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ในน้ำลำไยมีปริมาณน้ำตาลสูงโดยธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องหาวิธีเพิ่มค่า T_g ของน้ำลำไยที่นำมาทำแห้ง โดยเติมสารช่วยในการทำแห้ง เพื่อเพิ่มค่า T_g โดยรวมของผลิตภัณฑ์ มีรายงานว่ามอลโตเดกตรินซ์ เป็นสารที่นิยมใช้ในการทำแห้งแบบพ่นฝอยในการทำแห้งผลิตภัณฑ์อาหารที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลเป็นหลัก เนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินสามารถเพิ่มค่า T_g โดยรวมของผลิตภัณฑ์ได้ [9] มอลโตเดกตรินซ์ที่มีค่า dextrose equivalent (DE) ต่ำ ๆ จะมีค่า Tg สูงกว่ามอลโตเดกตรินซ์ที่ DE สูง[8] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มอลโตเดกตรินซ์ที่มี DE ต่ำมาช่วยในการทำแห้ง โดยปริมาณที่เติมคำนวณจากปริมาณองค์ประกอบของของแข็งที่ละลายในน้ำลำไย [10] ทำการศึกษาปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินในน้ำลำไยที่ 3 ระดับ คือ ที่อัตราส่วน 0.4 0.5 0.6 กรัม/กรัมของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด

จากผลการทดลองพบว่า การใช้มอลโตเดกซ์ตรินที่อัตราส่วน 0.6 ในการทดลองที่ 2, 4, 6 ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่แยกได้จากส่วนแยกผลิตภัณฑ์มากกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อคิดเป็นปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ พบว่าในการทดลองที่ 6 และ 14 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ อยู่ในระดับสูงประมาณ 50 % ในการทดลองนี้ ส่วนการทดลองที่ 5 พบว่าให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ได้ต่ำที่สุดในการทดลอง เนื่องจากอาจเป็นผลจากการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในอัตราส่วนต่ำและปริมาณลมร้อนที่ใช้ต่ำอีกทั้งความชื้นของอากาศที่ใช้ทำแห้งสูง(ดูสภาพอากาศที่ใช้ทำแห้งได้จากตาราง ง ในภาคผนวก)

อุณหภูมิลมร้อนและปริมาณลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง จากการศึกษาพบว่าปัจจัยทั้ง 2 ตัวนี้มีผลต่อประสิทธิภาพโดยตรงในการทำแห้งแบบพ่นฝอย คืออัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้จะมีผลต่อระยะเวลาที่อนุภาคของเหลวทำการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในห้องอบแห้ง ซึ่งเรียกว่า Residence time [7] และอุณหภูมิลมร้อนนี้มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เมื่อระดับความชื้นต่ำเพียงพอที่จะทำให้อนุภาคของแข็งมีการไหลอิสระไม่ติดกัน อย่างไรก็ตามปริมาณลมร้อนที่ใช้ทำแห้งก็ไม่ควรต่ำเกินไปเนื่องจากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในอุปกรณ์แยกผลิตภัณฑ์ซึ่งในการทดลองนี้เลือกใช้อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 165, 175 และ 185 องศาเซลเซียส และปริมาณลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง 1.45, 1.68 และ 1.80 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการละลายโดยพิจารณาจากเวลาที่ใช้ในการละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ผงกาแฟสำเร็จรูปที่มีจำหน่ายในตลาด พบว่า

ผลิตภัณฑ์ลำไยผงใช้เวลาในการละลายน้อยกว่าหลายเท่า ซึ่งกล่าวได้ว่าผลิตภัณฑ์ลำไยผงมีการละลายที่ดี

สีของผลิตภัณฑ์ลำไยผงวัดโดยใช้ระบบ C.I.E Lab ได้ค่า L* a* b* คำนวณ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสีทั้งหมด พบว่าค่าความแตกต่างระหว่างค่าสีทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ผงแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากที่ค่า 1.3 ส่วนค่าความสว่างของสีพบว่า ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ในการทดลองที่ 1, 3 และ5 มีค่าน้อยกว่าค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ในการทดลองอื่น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสีมากกว่า เนื่องจากการทดลองที่มีค่าความแตกต่างสีมีการใช้ปริมาณการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในอัตราส่วน 0.4 ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดในการทดลอง ทำให้ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้มีสัดส่วนปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินที่ต่ำกว่าจึงมีสีเข้มกว่าการทดลองอื่น ค่าสีของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้มากกว่าปัจจัยอื่น

5.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะต่าง ๆ ของลำไยผงที่ได้

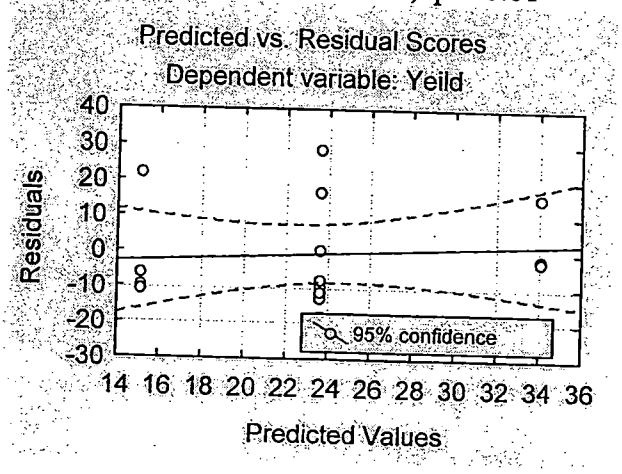
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะต่างๆ ที่ศึกษากับตัวแปรที่ศึกษาโดยใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลัก Mulitiple Regression ในรูปแบบ 2^{nd} order polynomial โดยค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรในสมการและค่าความสัมพันธ์ทางสถิติต่าง ๆ แสดงไว้ดังนี้

5.2.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ (% Yields)

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้กับปริมาณมอลโตเด็กตรินซ์ (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\%\ \text{Yields} = {} & -1232.74\,M - 1.28593\,T_{inlet} + 559.513\,Q_{air} \\ & + 302.585\,M^2 - 0.023254\,T_{inlet}^{\,2} - 249.444\,Q_{air} \\ & + 9.498137\,M\,T_{inlet} + 2.56697\,T_{inlet}\,Q_{air} - 377.233\,X_1\,Q_{air}\end{aligned} \qquad ..(1)$$

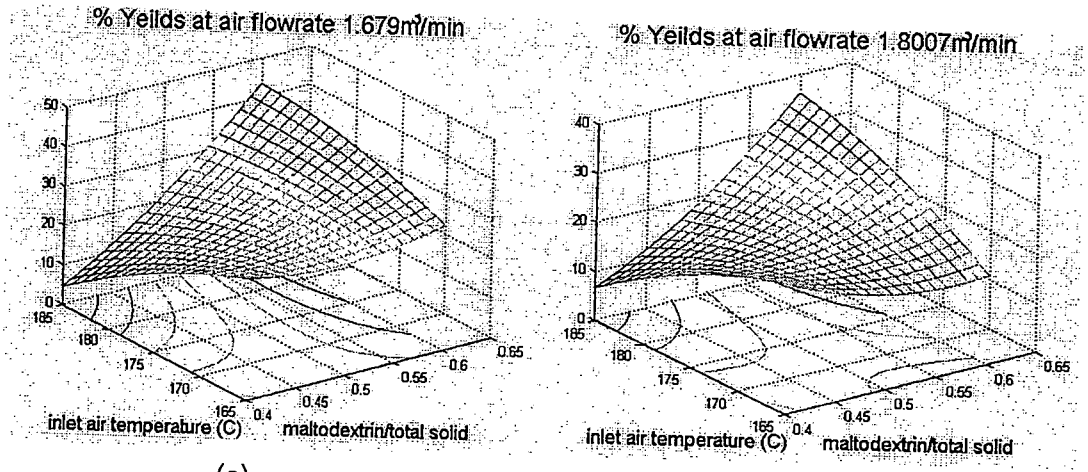
$$R^2 = 0.84243 \ , \ SE. = 17.5649 \ , \ p < 0.01$$



รูปที่ 8. เปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้จากการทดลองกับและจากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่1

ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้ในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 4.47 – 52.38% จากรูปที่ 9 กำหนด ให้ปริมาณสัดส่วนมอลโตเด็กตรินที่ค่าต่ำที่ 0.4 และ อัตราการไหลของลมคงที่ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่า เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้จะลดลง เนื่องจากเมื่อให้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ค่าแตกต่างระหว่างอุณหภูมิลมร้อนกับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทำให้อัตราแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ที่สิ้นสุดการทำแห้ง(T_{pf})สูงขึ้น ซึ่งถ้าผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งอย่างรวดเร็วและมีอุณหภูมิผลิตภัณฑ์สิ้นสุดการทำแห้งมากกว่า ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์ ($T_{pf} > T_g$) จะทำให้เกิดลักษณะเหนียว (sticky) [10] ผลิตภัณฑ์ไหลสัมผัสกันเองหรือสัมผัสกับผนังห้องอบแห้งก็จะไปติดกันอยู่ภายใน ทำให้ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตและแยกออกจากส่วนแยกลดลง

แต่ช่วงที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ที่ค่าสูงคือที่ 0.6 เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ ค่า T_g ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิผลิตภัณฑ์สิ้นสุดการทำแห้ง ($T_{pf} < T_g$) จึงทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่า เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น



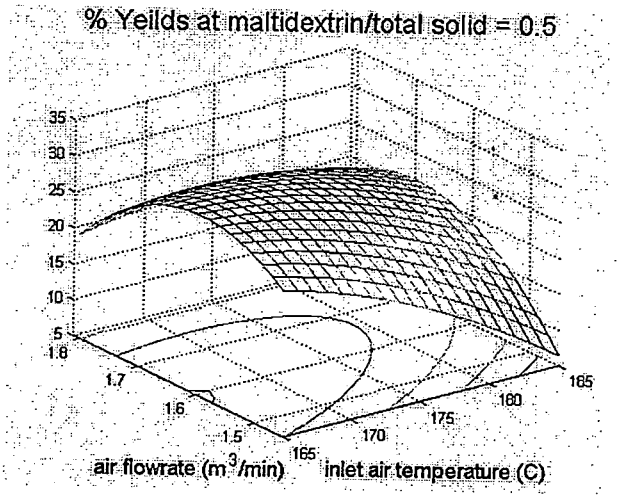
(a) (b)

รูปที่ 9 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้ตามสมการที่ 1 โดยกำหนดอัตราไหลลมร้อนคงที่ที่(a) 1.68 m^3/min (b) 1.80 m^3/min

อัตราการไหลของลมที่ใช้ในการทดลองคือ 1.45 , 1.68 , 1.80 m^3/min จากรูป 9 เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิลมร้อนขาเข้าและปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ พบว่าอัตราการไหลของลมที่ค่าต่ำ 1.68 m^3/min จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ผงมีค่ามากกว่าเมื่อให้อัตราการไหลของลมที่ค่าสูง 1.80 m^3/min แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของลมร้อนทำให้เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้มีค่า

ลดลง เนื่องจากโดยอัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อความชื้นคือ อัตราการไหลลมร้อนเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ซึ่งผ่านบริเวณทำแห้งที่มีการกระจายลมร้อนภายในห้องอบแห้ง ถ้าอัตราการไหลลมร้อนมากก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีช่วงเวลาการทำแห้งสั้นทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สูง นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มีโอกาสปนไปกับลมร้อนขึ้นที่ออกไปจากเครื่องได้มากกว่า ดังนั้นเมื่อใช้อัตราการไหลของลมร้อนที่มีค่าสูงจะทำให้เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้มีค่าลดลง

อีกทั้งเมื่ออัตราการไหลของลมร้อนสูงอาจมีผลต่อรูปแบบการไหลของลมร้อนภายในห้องอบแห้ง มีลักษณะปั่นป่วนมีการไหลหมุนเวียนของลมร้อนภายในทำให้ผลิตภัณฑ์ซึ่งผ่านการระเหยน้ำแห้งแล้วไหลย้อนกลับไปยังส่วนบนที่มีอนุภาคของเหลวที่เริ่มผ่านเข้ามาในห้องอบแห้ง เกิดการจับตัวกันกลายเป็นอนุภาคใหญ่และมีอัตราการแห้งลดลง ความชื้นคงเหลือสูงเกิดติดกับฝาและผนังห้องอบแห้งเช่นเดียวกัน และจากผลของความเร็วลมมีผลต่อประสิทธิภาพของส่วนแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นไซโคลน ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงบางส่วนถูกดูดออกไปพร้อมกับอากาศ ดังนั้นจึงทำให้ที่ค่าอัตราการไหลของลม 1.8007 m^3/min มีเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้ที่ลดลง



รูปที่ 10 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ลำไยงที่ผลิตได้ตามสมการที่ 1 โดยกำหนดปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ที่ 0.5

จากรูปที่ 10 แสดงว่าเมื่อ ปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของลม และอุณหภูมิลมร้อนขาเข้า จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นสูงสุดที่สภาวะหนึ่งเท่านั้น และมีแนวโน้มว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้สูงนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าปริมาณมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น อุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้นและอัตราการไหลลมร้อนมีค่าเท่ากับ 1.68 m^3/min

5.2.2 ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์

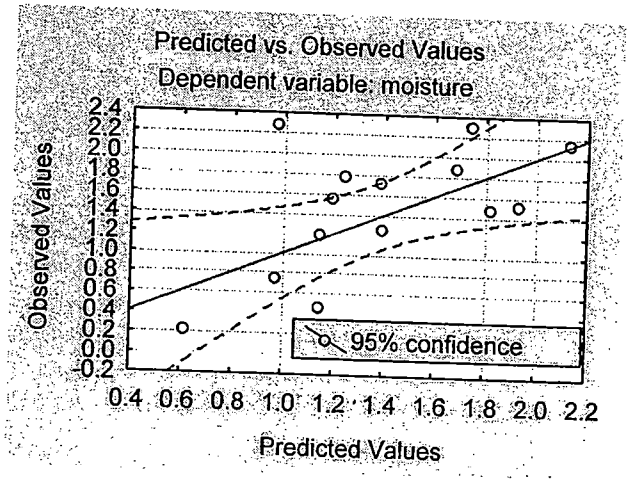
ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์กับปริมาณมอลโตเด็กตรินซ์ (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ = $25.8300\ M + 0.5740\ T_{inlet} - 64.8719\ Q_{air}$

$+ 36.7141\ M^2 + 0.00072\ T_{inlet}^{\ 2} + 27.7204\ Q_{air}$

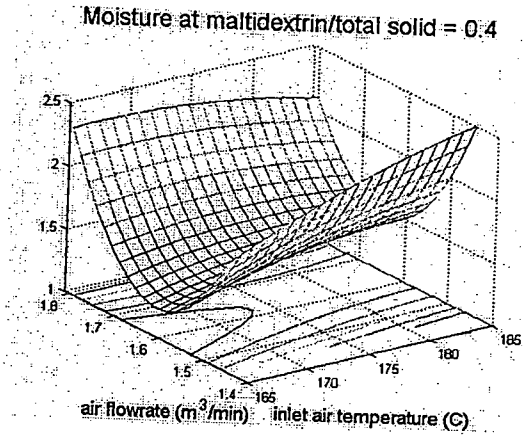
$- 0.2858\ M\ T_{inlet} - 0.1217\ T_{inlet}\ Q_{air} - 9.8302 X_1\ Q_{air}$... (2)

$R^2 = 0.93873566$, SE. = 0.59955 , $p < 0.01$

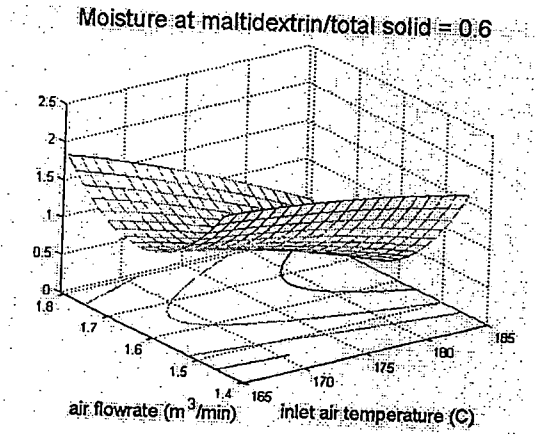


รูปที่ 11 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้ค่า R^2 และ ค่า Std. Error อยู่ในเกณฑ์ดี



(a)

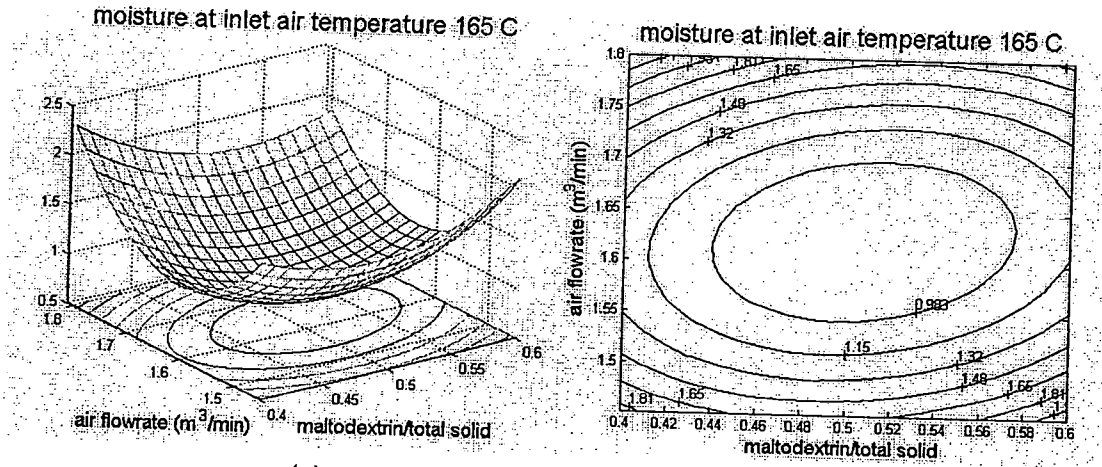


(b)

รูปที่ 12 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 2 โดยกำหนดปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ที่ (a) 0.4 (b) 0.6

ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่วัดได้ในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 0.2304 -2.2911 g/cm^3 จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลำไยผงกับตัวแปรศึกษาที่ศึกษา เมื่อให้อัตราการไหลของลมร้อนคงที่ มีแนวโน้มว่าการเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินจะทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์จะลดลง เนื่องจากลมร้อนที่ใช้ทำแห้งที่อุณหภูมิสูงมีความสามารถในการระเหยน้ำและจับความชื้นได้ปริมาณมากกว่าลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนการเพิ่มปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินทำให้น้ำลำไยมีความเข้มข้นมากขึ้น ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยจึงลดลง ด้วยทำให้ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้มีความชื้นต่ำลง

ผลกระทบของอัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อค่าความชื้น พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลลมร้อน 1.68 m^3/min ให้ค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ลำไยผงต่ำสุด โดยอัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อความชื้นคืออัตราการไหลลมร้อนเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของผลิตภัณฑ์ซึ่งผ่านบริเวณทำแห้งที่มีการกระจายลมร้อนภายในห้องอบแห้ง ถ้าอัตราการไหลลมร้อนมากเกินไปก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีช่วงเวลาการทำแห้งสั้นทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น อัตราการไหลลมร้อนที่สูงขึ้นหรือต่ำลงมีผลให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่ออัตราการไหลลมร้อนมีค่าสูง เกิดลักษณะการไหลที่ปั่นป่วนมากขึ้นภายในห้องอบแห้งแบบพ่นฝอย ผลิตภัณฑ์ที่แห้งเกิดการผสมกับอนุภาคที่มีความชื้นสูง ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ออกมามีค่าความชื้นสูงขึ้น ในขณะที่การใช้อัตราการไหลลมร้อนที่ต่ำทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมร้อนกับน้ำลำไยมีค่าน้อยลง ผลิตภัณฑ์จึงมีปริมาณความชื้นเหลืออยู่มากขึ้น



(a) (b)

รูปที่ 13 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 2 โดยกำหนดอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่ 165 C

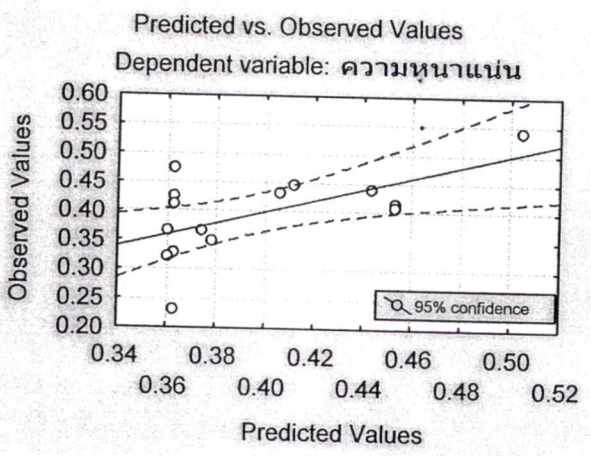
จากรูปที่ 13 สภาวะที่ให้ค่าความชื้นต่ำสุดที่อุณหภูมิลมร้อน 165 C อัตราการไหลลมร้อน 1.6 m^3/min และ ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ค่า 0.5 กรัม / กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และมีแนวโน้มว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้ค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ลดลงอีก จุดสภาวะที่ให้ค่าความชื้นต่ำสุดจะเปลี่ยนไป ที่ตำแหน่งที่มีปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินและปริมาณลมร้อนเพิ่มขึ้น

5.2.3 ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (Bulk Density)

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กับปริมาณมอลโตเด็ก (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\text{Bulk Density } (g/cm^3) = {} & 2.703818\,M - 0.018039\,T_{inlet} + 1.467747\,Q_{air} \\ & + 6.200517\,M^2 + 0.000138\,T_{inlet}^{\,2} - 0.070945\,Q_{air}^{\,2} \\ & - 0.044609\,M\,T_{inlet} - 0.004402\,T_{inlet}\,Q_{air} - 0.817241\,M\,Q_{air}\end{aligned} \quad (3)$$

$R^2 = 0.9817$, SE. = 0.8616 , $p < 0.001$

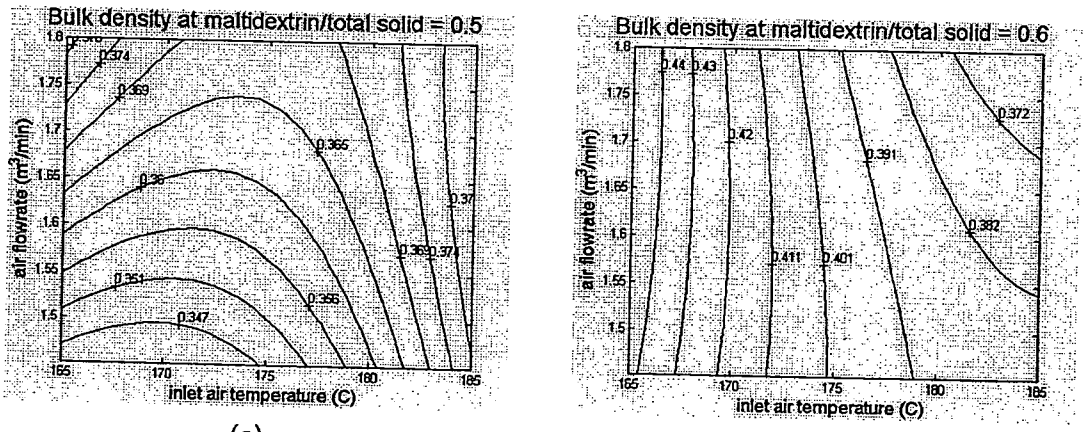


รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3

จากรูปที่ 14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้ค่า R^2 และ ค่า SE. อยู่ในเกณฑ์ดี

ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้ในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 0.2298 – 0.5408 g/cm^3 จากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ที่ 0.6 เมื่ออุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง การเปลี่ยนแปลงค่าเป็นผลเนื่องจากการที่ลม

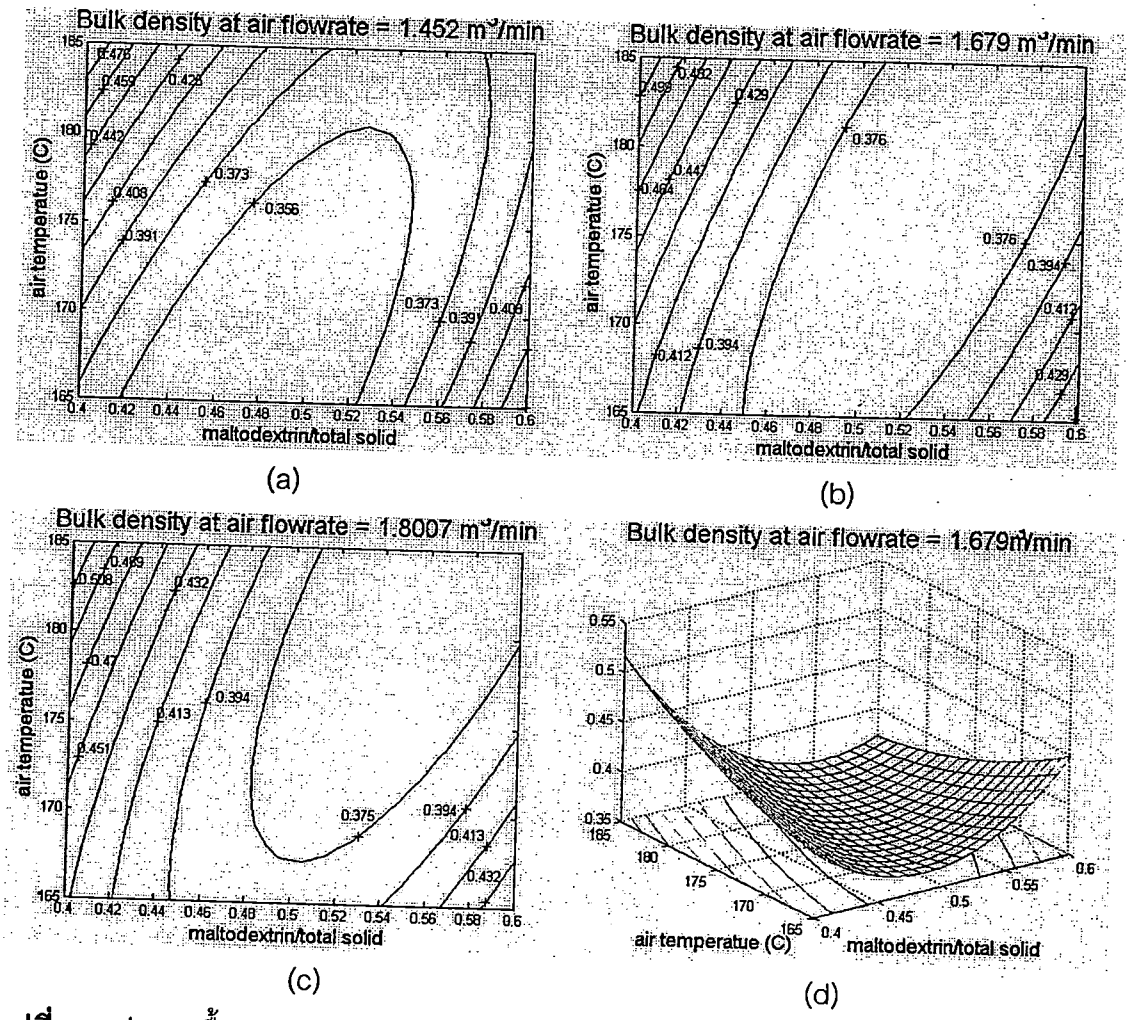
ร้อนมีอุณหภูมิสูงทำให้อัตราการทำแห้งสูงสามารถระเหยน้ำได้เร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งมีความพรุน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความหนาแน่นต่ำ



(a) (b)

รูปที่ 15 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความหนาแน่นผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 3 โดยปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ (a) 0.5 (b) 0.6

ในขณะที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่ำที่ 0.5 และ 0.4 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของลมร้อน มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น อาจเป็นเพราะเนื่องจากลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ลักษณะเหนียวติดกัน(Sticky) เนื่องจากมีปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ต่ำ จึงทำให้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้ง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความชื้นสูง อนุภาคแห้งมีน้ำหนักมาก ส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์มากตามซึ่งตรงกับรายงานของ Master, K. ว่าการเพิ่มความชื้นผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นสูง [7]



รูปที่ 16 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความหนาแน่นผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 3 โดยกำหนดปริมาณการไหลลมร้อนคงที่ที่ (a) 1.452 m^3/min (b),(d)1.679 m^3/min (c)1.8007 m^3/min

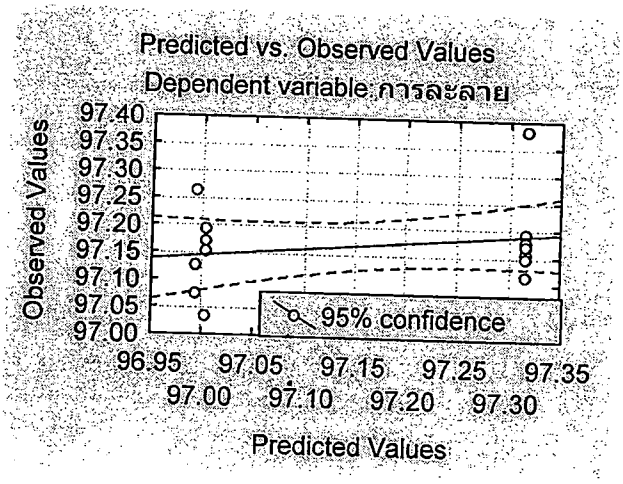
จากรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการอบแห้งที่ค่าปริมาณการไหลของลมร้อนที่ใช้มีค่าคงที่จะมีช่วงอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่เหมาะสมซึ่งให้ ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ลำไยผงต่ำสุด โดยจากรูปที่ 4.9 ที่อัตราการไหลของลมร้อนที่ 1.45 m^3/min สภาวะที่ทำให้มีค่าความแน่นของผลิตภัณฑ์ต่ำสุดอยู่ที่ปริมาณอัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ 0.48 และอุณหภูมิลมร้อนที่ 170 C จุดค่าความหนาแน่นต่ำสุดมีแนวโน้มเคลื่อนที่ไปในจุดที่มีสภาวะ ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินและอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น

5.2.4 ค่าความสามารถในการละลาย (Water Solubility)

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการละลายผลิตภัณฑ์กับปริมาณมอลโตเด็กตรินซ์ (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Solubility(s)} &= 8976.987\,M - 38.91564\,T_{inlet} + 1182.8998\,Q_{air} \\ &\quad + 116.8078\,M^2 + 0.15731\,T_{inlet}^{\ 2} - 552.2852\,Q_{air}^{\ 2} \\ &\quad - 45.21299\,M\,T_{inlet} + 6.054481\,T_{inlet}\,Q_{air} - 757.9136\,X_1\,Q_{ai} \end{aligned} \qquad (4)$$

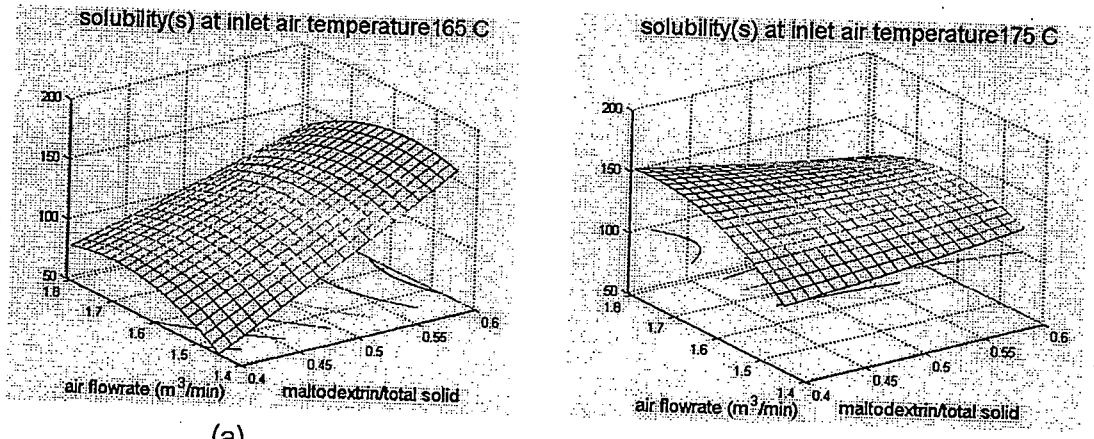
$R^2 = 0.84243$, SE. =17.5649 , $p < 0.005$



รูปที่ 17 เปรียบเทียบค่าเวลาที่ใช้ในการละลาย ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 4

จากรูปที่ 17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้ค่า R^2 และ ค่า SE. อยู่ในเกณฑ์ดี

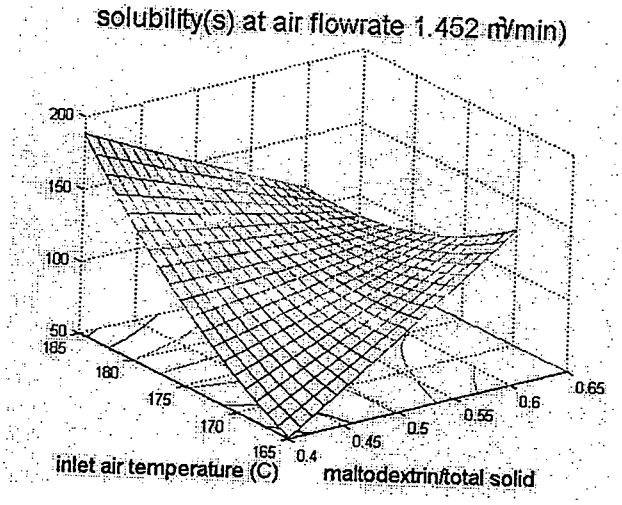
ค่าเวลาที่ใช้ในการละลายของผลิตภัณฑ์ลำไยผงในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 80 – 278 วินาที จากรูปที่ 17 เมื่อให้ค่าปริมาณลมร้อนคงที่ที่ 165°C เวลาที่ใช้ในการละลายลดลงเมื่อใช้ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่ำที่ 0.4



(a) (b)

รูปที่ 18 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าเวลาที่ใช้ละลายผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 4 โดยกำหนดอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่ (a) 165° C (b) 175° C

และเมื่อใช้อุณหภูมิลมร้อนที่ค่าสูงขึ้นที่ 175° C ที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินต่ำ 0.4 มีเปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้ามคือเวลาที่ใช้ในการละลายลดเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่การใช้อุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของน้ำตาลมากกว่ามอลโตเดกซ์ตริน อนุภาคมีการเกาะตัวแน่นเมื่อนำไปละลายจึงต้องใช้เวลานานมากกว่าเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีการแตกตัวกระจาย (disperse ability)



รูปที่ 19 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าเวลาที่ใช้ละลายผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 4 โดยกำหนดอัตราการไหลลมร้อนคงที่ที่ 1.452 m^3/min

จากรูป 19 สามารถแบ่งลักษณะการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการละลาย 2 ลักษณะคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนที่อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินมีค่าต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้น และช่วงอุณหภูมิลมร้อนลดลงเมื่อใช้อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น การเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนทำให้

ผลิตภัณฑ์ใช้เวลาในการละลายลดลง การเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ในลักษณะนี้อาจเกิดจากการที่ความสามารถในการละลายขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของอาหาร โดยที่ปริมาณสัดส่วนการเติมมอลโตเดกซ์ตรินมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์

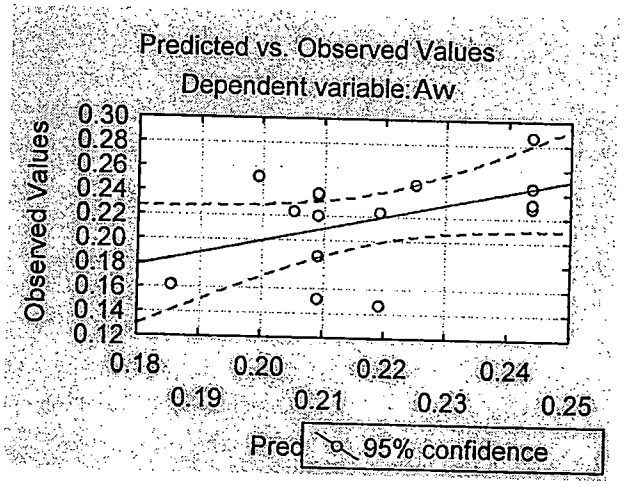
อัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการละลายในการทดลองนี้ คือมีแนวโน้มที่ผลิตภัณฑ์ใช้เวลาในการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลของลมร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของลมร้อนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสูงทำให้มีการกระจายตัวได้ยากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการละลายนานขึ้น

5.2.5 ค่า Water activity ของผลิตภัณฑ์

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง Water activity กับปริมาณมอลโตเด็กตรินซ์ (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

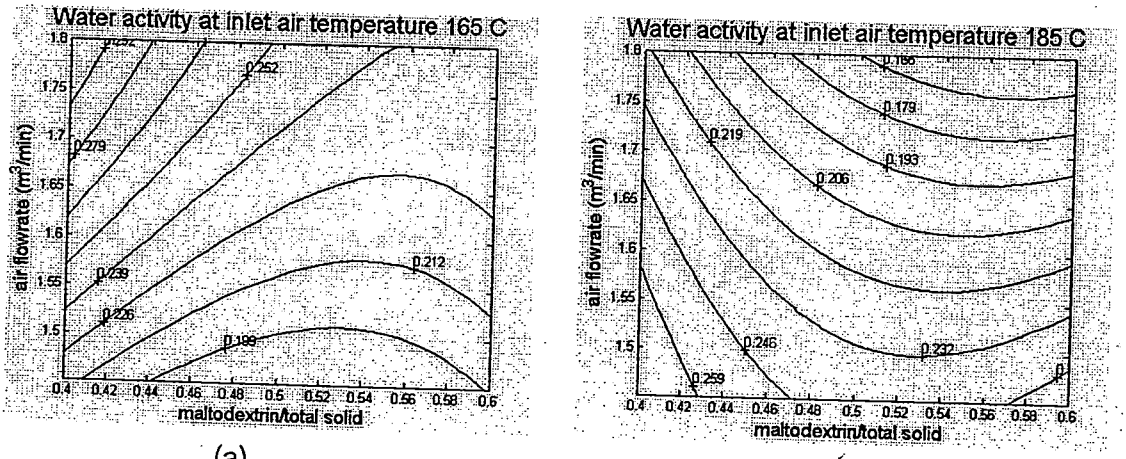
$$Aw = 1.967062\,M - 0.05577T_{inlet} + 5.74905Q_{air} + 1.57164\,M^2 + 000258T_{inlet}^{\ 2} - 0.50379\,Q_{air}^{\ 2} - 0.00744\,M\,T_{inlet} - 0.01919\,T_{inlet}\,Q_{air} - 1.50772\,X_i\,Q_{air} \quad ...(5)$$

$R^2 = 0.84243$, SE. =17.5649 , $p < 0.001$



รูปที่ 20 เปรียบเทียบค่า water activity ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5

จากรูปที่ 20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้ค่า R^2 และ ค่า SE. อยู่ในเกณฑ์ดี



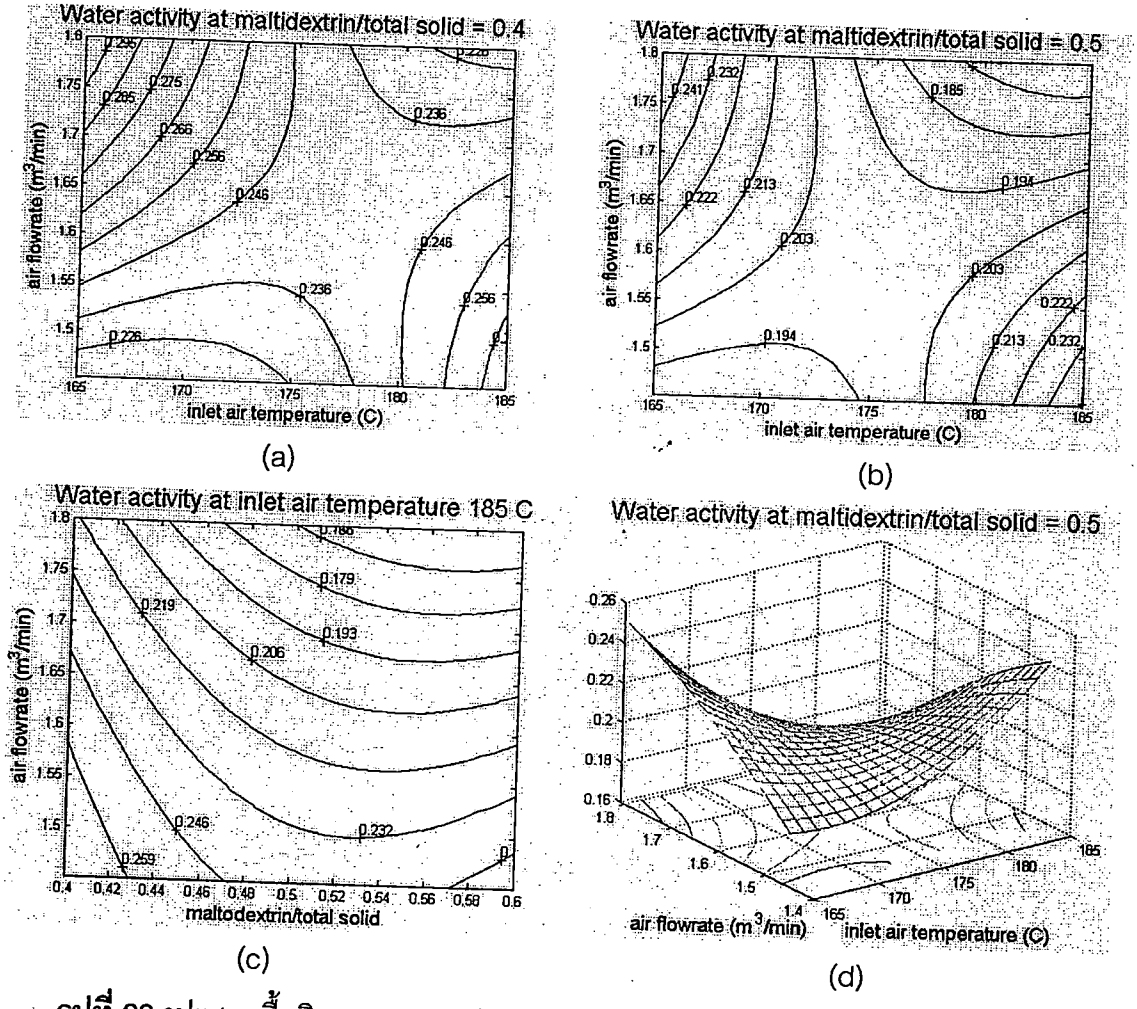
(a) (b)

รูปที่ 21 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่า water activity ผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 5 โดยกำหนดอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่(a) 165° C (b) 185°C

ค่า water activity ที่วัดจากผลิตภัณฑ์ลำไยผงในการทดลองนี้อยู่ในช่วง 0.146 – 0.287 จากรูปที่ 21 เมื่อให้ค่าปริมาณลมร้อนอบแห้งและอุณหภูมิลมร้อนขาเข้าคงที่ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Aw ซึ่งการเปลี่ยนเปลี่ยนแปลงค่า Aw เกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน มี 2 ลักษณะ คือ แบบแรก ในสภาวะที่มีอุณหภูมิลมร้อนคงที่ที่ 165 ° C มีแนวโน้มว่าค่า Aw จะค่อยลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้นจาก 0.4 ถึง 0.56 เป็นเพราะเนื่องจากการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ปริมาณน้ำที่ต้องระเหยออกจากวัตถุดิบเหลวที่จะทำการทำแห้งลดลง เมื่ออัตราการทำแห้งคงที่ที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำ ปริมาณน้ำที่อากาศสามารถระเหยออกสูงขึ้นทำให้ความชื้นลด ส่งผลให้ค่า Aw ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลงตามการเพิ่มสัดส่วนของมอลโตเดกซ์ตรินจึงทำให้ค่า Aw ของผลิตภัณฑ์ลดลง แบบที่สอง ในช่วงที่เริ่มมีการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในอัตราส่วนที่มากขึ้นมากกว่าช่วงแรก มีแนวโน้มว่าค่า Aw จะค่อยเปลี่ยนจากลดลงเป็นเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะเนื่องจาก การที่อนุภาคของวัตถุดิบเหลว ที่ถูกพ่นใน chamber เมื่อมีการเติมมอลโตเดกซ์ตรินที่มากเกินไปทำให้ขณะที่มีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วในกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย บริเวณผิวนอกของอนุภาคเกิดการระเหยน้ำออกเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของน้ำในอนุภาคออกมาที่ผิวนอกทำให้บริเวณผิวนอกแห้งเร็วกว่าเกิดเป็นผิวแข็งเคลือบส่วนในที่ยังมีความชื้นสูงไว้คล้ายกับกระบวน encapsulation เมื่ออนุภาคของผลิตภัณฑ์ถูกแยกออกจากส่วนแยกผลิตภัณฑ์ของเครื่อง และถูกเก็บในบรรจุภัณฑ์ที่อุณหภูมิที่เย็นลงที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลาหนึ่งทำให้ความความชื้นของผลิตภัณฑ์เข้าสู่สภาวะสมดุล มีผลทำให้ความชื้นที่ผิวนอกเพิ่มขึ้น ส่งให้ค่า Aw เพิ่มขึ้นด้วย

อัตราการไหลของลมร้อนมีผลต่อค่า Aw ของผลิตภัณฑ์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบแรก ช่วงค่า Aw มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่สภาวะปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่และอุณหภูมิลมร้อนคงที่

ค่าต่ำที่ 165 °C ที่อัตราการไหลลมร้อนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิลมร้อนต่ำความสามารถในการระเหยน้ำของลมร้อนมีน้อยไม่เพียงพอทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่า Aw เพิ่มมากขึ้น แบบที่สองช่วงค่า Aw มีแนวโน้มลดลงที่สภาวะปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่และอุณหภูมิลมร้อนคงที่ค่าสูงที่ 185 °C เนื่องจาก การเพิ่มอัตราไหลของลมร้อนที่อุณหภูมิลมร้อนสูงมีความสามารถในการระเหยน้ำและพาไอน้ำได้ดีกว่าช่วงที่อุณหภูมิต่ำจึงทำให้ความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง ค่า Aw จึงลดลง



รูปที่ 22 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่า water activity ผลิตภัณฑ์ลำไยผงได้ตามสมการที่ 5 โดยกำหนดปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินคงที่ที่(a) 0.4 (b) 0.5 (c) 0.6 (d) 0.5

จากรูปที่ 22 เมื่อให้อัตราส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้คงที่ ให้ค่าอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณลมร้อนมีการเปลี่ยนแปลง สามารถแบ่งการเปลี่ยนค่า Aw ได้เป็น 2 ช่วง โดยมีจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงค่า Aw คงที่เป็นหลัก จุดดังกล่าวจะมีตำแหน่งเปลี่ยนไปเมื่อ ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้เปลี่ยน ในช่วงที่หนึ่งช่วงที่ค่า Aw มีแนวโน้มลดลง จะมีสภาวะอุณหภูมิลมร้อนและปริมาณลมร้อนลดลง และ

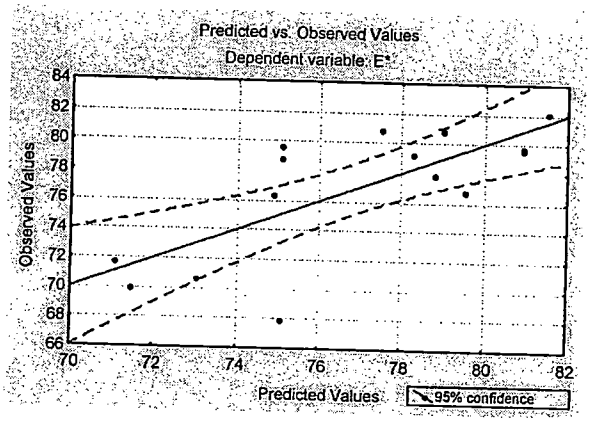
ในช่วงสภาวะที่มีปริมาณลมร้อน และอุณหภูมิลมร้อนสูงขึ้น ส่วนในช่วงที่ Aw มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ปริมาณลมร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิลมร้อนต่ำลง และช่วงที่ปริมาณลมร้อนลดลงอุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น

5.2.6 ค่าสี

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความเปลี่ยนแปลงสีทั้งหมด (ΔE) กับปริมาณมอลโตเด็กตรินซ์ (M) อุณหภูมิลมร้อนขาเข้า (T_{inlet})และอัตราการไหลของลมร้อน (Q_{air}) สามารถแสดงได้ดังนี้

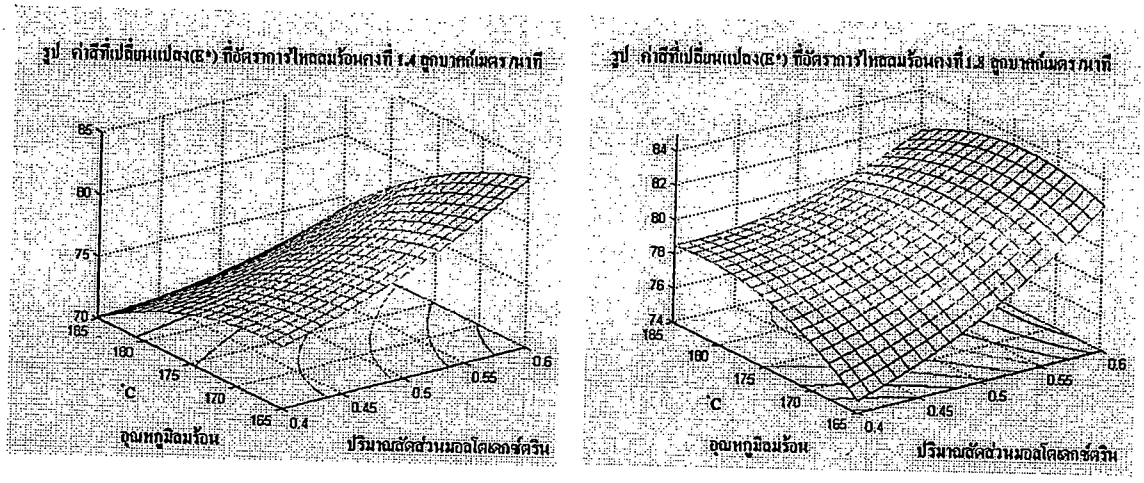
$$\Delta E = 420.3318\,M + 2.158162\,T_{inlet} - 284.519\,Q_{air} - 102.228\,M^2 - 0.00814\,T_{inlet}^{\ 2} - 62.32915\,Q_{air}^{\ 2} - 1.01786\,M\,T_{inlet} + 0.723852\,T_{inlet}\,Q_{air} - 67.8764\,X_1\,Q_{air} \quad ...(6)$$

$R^2 = 0.998352$, SE. = 4.935862 , $p < 0.001$



รูปที่ 22 เปรียบเทียบค่า water activity ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้จากการทดลอง กับค่าที่ได้จากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 5

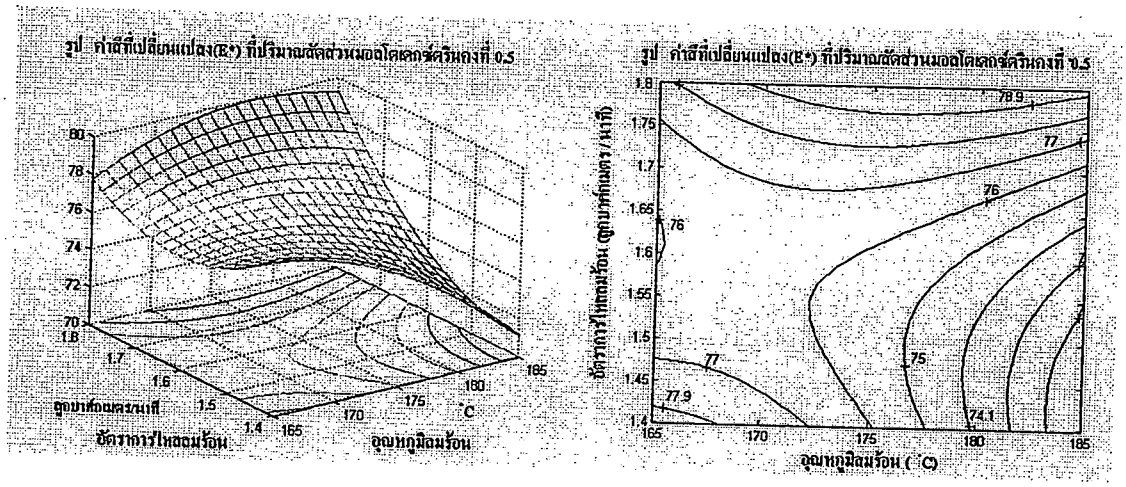
จากรูปที่ 22 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่าที่ได้จากสมการกับค่าที่ได้จากการทดลองจะเห็นว่าลักษณะความสัมพันธ์ที่ได้ค่า R^2 และ ค่า SE. อยู่ในเกณฑ์ดี



รูปที่ 23 รูปแสดงพื้นผิวตอบของเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้ตามสมการที่ 6 โดยกำหนดปริมาณปริมาณลมร้อนที่ใช้คงที่ที (a) 1.45 m^3 / min (b) 1.80 m^3 / min

ปริมาณมอลโตเด็กซ์ตรินที่ใช้ในการทดลอง คือ 0.4 , 0.5 , 0.6 กรัม / กรัมของของแข็งที่ละลายได้หลังการเติมมอลโตเด็กซ์ตรินแล้ว จากรูป 4.17 เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิลมร้อนและอัตราการไหลลมร้อนคงที่ พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณมอลโตเด็กซ์ตริน ค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากมอลโตเด็กซ์ตรินทำให้มีมวลของแข็งที่ละลายได้ในน้ำลำไยสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อยลง ทำให้การมีการเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลไหม้ (caramelization) น้อยลง ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลซึ่งทำให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสีทั้งหมดเพิ่มขึ้น

ผลกระทบของอุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสีทั้งหมด พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิลมร้อนจะเป็นผลให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าสีทั้งหมดลดลง เนื่องจากการการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นผลให้การเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลไหม้ดีขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลซึ่งทำให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสีของน้ำลำไยก่อนทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยมากขึ้น



รูปที่ 24 รูปแสดงพื้นผิวผลตอบของค่าความชื้นผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ได้ตามสมการที่ 6 โดยกำหนดสัดส่วนมอลโตเด็กตรินคงที่ที่ 0.5

จากรูป 24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเราทำการลดอัตราการไหลลมร้อนให้ลดลง จะส่งผลให้ค่าสีที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดมีค่าลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์จะอยู่ในห้องอบแห้งแบบพ่นฝอยนานขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาน้ำตาลไหม้มากขึ้น ทำให้ค่าสีที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำลำไยก่อนการป้อนมากขึ้น

5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ลำไยผงด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ในการผลิตลำไยผง ปัจจัยที่สำคัญในการบ่งชี้ว่าเป็นสภาวะกระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้ ได้ให้ ค่าเปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ค่าสูงสุด และ ระดับค่า water activity ต่ำอยู่ในระดับการเก็บรักษาที่อุณหภูมิบรรยากาศโดยไม่เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เป็นเกณฑ์ตัดสิน จากการศึกษาพบว่าค่า water activity ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้ในการทดลองนี้ อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าค่า water activity ต่ำสุดที่ 0.6 เป็นค่าที่จุลินทรีย์สามารถมีชีวิตอยู่ได้ [20] จึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่ผลิตได้ที่ทุกสภาวะนี้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเสื่อมเสียของจุลินทรีย์

เมื่อพิจารณาเกณฑ์การผลิตจากเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ได้พบว่า การเพิ่มมอลโตเด็กตรินและอุณหภูมิลมร้อนจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มของอัตราการไหลลมร้อน ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง ช่วงสภาวะกระบวนการผลิตที่ให้เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์สูงสุดอยู่ที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.6 กรัม / กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง 185 ^{o}C และช่วงปริมาณอัตราการไหลลมร้อนระหว่าง 1.5 – 1.7 m^3/min ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์มากกว่า 40 % แต่เมื่อพิจารณาข้อมูลจากการทดลองพบว่าที่สภาวะการทดลอง ที่ 6 และ 14 ได้ค่าเปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ 48.9 และ 52.4% ตามลำดับ ในขณะที่สภาวะการ

ทดลองที่ 4 ซึ่งควรจะเป็นสภาวะที่ดีที่สุด แต่ให้ค่าค่าเปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์ต่ำ ซึ่งอาจเป็นเพราะความแปรปรวนของข้อมูลการทดลองและผลกระทบจากปัจจัยอื่น เช่นปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้ครอบคลุม มีรายงานว่าการลดความชื้นสัมพันธ์ของอากาศก่อนทำการอบแห้งจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตแยกได้ออกจากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพิ่มขึ้น[11]

6) สรุปผล

สรุปผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาสามารถสรุปความสัมพันธ์ของปัจจัยการผลิตและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ดังต่อไปนี้

- เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาคือ เปอร์เซนต์ของผลิตภัณฑ์ลำไยผงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อ อุณหภูมิลมร้อนเพิ่มขึ้น ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น และอัตราการไหลของลมร้อนลดลง
- ความชื้นของผลิตภัณฑ์ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาคือ มีค่าลดลงเมื่อ อุณหภูมิลมร้อนและปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของลมร้อนลดลง
- ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาคือ มีค่าลดลง เมื่อ อุณหภูมิลมร้อนและปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน และลดอัตราการไหลของลมร้อน
- การละลาย มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาคือ เวลาที่ผลิตภัณฑ์ใช้ในการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมลมร้อนต่ำ และปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินลดลงที่อุณหภูมลมร้อนสูง
- ค่า water activity ของผลิตภัณฑ์ มีความสัมพันธ์กับปัจจัยที่ศึกษาคือ มีค่าลดลงเมื่อ อุณหภูมิลมร้อนและปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตรินเพิ่มขึ้น อัตราการไหลของลมร้อนลดลง

จากการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ผลิตภัณฑ์ลำไยด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเลือกเงื่อนไขการผลิตให้ได้เปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์สูงสุดอยู่ที่ปริมาณสัดส่วนมอลโตเดกซ์ตริน 0.6 อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ทำแห้ง 185 C และช่วงปริมาณอัตราการไหลลมร้อนระหว่าง 1.5 – 1.7 m^3/min ซึ่งให้ค่าเปอร์เซนต์ผลิตภัณฑ์เกิน 40 %ซึ่งหาจาก สมการ (1) ที่มีนัยสำคัญที่ 0.95

$$\text{เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้} = -1232.74\,M - 1.28593\,T_{inlet} + 559.513\,Q_{air} + 302.585\,M^2 - 0.023254\,T_{inlet}^{\ 2} - 249.444\,Q_{air} + 9.498137\,M\,T_{inlet} + 2.56697\,T_{inlet}\,Q_{air} - 377.233X_1\,Q_{air} \quad (1)$$

ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองผลิต ผลิตภัณฑ์ลำไยผงที่สภาวะต่างๆ ตามการออกแบบการทดลอง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ติดอยู่ภายในผนังของห้องอบแห้งมีอยู่ในปริมาณสูง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากลักษณะการหมุนเวียนของลมร้อนและอาหารภายในห้องอบแห้งยังไม่ดีพอ ควรจะได้มีการศึกษาเกี่ยวกับเรื่องนี้ต่อไป เพื่อเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ผงที่ผลิตได้

7) เอกสารอ้างอิง

[1] กรมการค้าภายใน. 2546. **ปริมาณการแปรรูปลำไยปี 2546**.กรุงเทพ : กรมการค้าภายใน

[2] ศูนย์วิจัยและพัฒนาลำไยและลิ้นจี่. 2543. **การผลิตลำไย**. โครงการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตลำใยและลิ้นจี่ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[3] กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. **"มูลค่าและปริมาณการส่งออกลำไย"**. [Online]. Available : http://www.oae.go.th .2005

[4] วิไล รังสาดทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. กรุงเทพฯ : บริษัทเท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเค ชัน จำกัด.

[5] Buchi labortechnik AG. Training Pepers Spray Dring.1997-2002

[6] โชชิณ ทองสุภานนท์, 2536. **การศึกษาเบื้องต้นในการแปรรูปน้ำว่านหางจระเข้ผงโดยวิธีอบแห้งแบบเยือกแข็ง**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. ภาควิชาอุตสาหกรรมการเกษตร. คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารฯ ลาดกระบัง

[7] Master, K. 1991.Spray Drying Handbook. 5th edit.Longman Scientific and Technical. England

[8] Bhandari, B.R. and Howes, T. 1999. **Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods**. Journal of Food Engineering,40,71-79.

[9] Roos, Y.and Karel, M. 1991b. **Plasticizing effect of water on thermal behaviour and crystallization of amorphous food models**. Journal of food science,56(1), 38-43

[10] Bhandari B.R. ,Datta N. ,Crooks R. ,Howe, T and Rigby, S. 1997b. **A semi-emprirical approach to optimise the quantity required to spray dry sugar rich foods**. Drying Technology,15(10), 2509-2525

[11] Athanasia M. Goula and Konstantinos G. Adamopoulos. 2005. **Spray drying of tomato pulp in dehumidified air:II**. The effecton powder properties. Journal of Food Engineering. 66, 35-42

[12] Athanasia M. Goula and Konstantinos G. Adamopoulos. 2005. **Spray drying of tomato pulp in dehumidified air:I**. The effecton on product recovery. Journal of Food Engineering. 66, 25-34

[13] Milton Cano-Chauca, P.C. Stringheta , A.M. Ramos and J. Cal-Vidal. 2005. **Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization**. Innovative Food Science and Emerging Technologies.

[14] ปารเมศ ชุติมา. 2545. **การรออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[15] A.O.A.C. 1984. **Official Method of Analysis. 17th ed.** Association of Official Analytical, Washington D.C. 1236p

[16] กมลกาญจน์ จิญกาญจน์ และคณะ. 2543. **การผลิตมิลค์เชครสสมุนไพรผงและผลิตภัณฑ์.** ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. ภาควิชาอุตสาหกรรมการเกษตร. คณะเทคโนโลยีการเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารฯ ลาดกระบัง

[17] ดาริกา สิมาพัฒนพงศ์ และคณะ. 2545. **การศึกษาการผลิตข้าวผงด้วยเครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้งหมุนคู่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี. ภาควิศวกรรมอาหาร. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารฯ ลาดกระบัง

[18] G.P. Sharma, Suresh Prasad. 2006. **Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves,** Journal of food Engineering. 75, 441-446

[19] B. Adhikari, T. Howes, D. Lecomete, B. R. Bhandari, 2005 **A glass transition temperature approach for the prediction of surface stickiness of drying droplet during spray drying,** Powder Technology. 49, 168-179

[20] วิไล รังสาดทอง. 2546. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชัน