

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติของน้ำลำไยก่อนการอบแห้ง

จากการเตรียมน้ำลำไยจากลำไยสด ผสมมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE 11 ปริมาณสัดส่วนมอลโทเดกซ์ทริน 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 40 องศาบริกซ์ และวิเคราะห์สมบัติของน้ำลำไยก่อนการอบแห้ง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำลำไยก่อนการอบแห้ง

ค่าดัชนี	ค่าที่วัดได้
ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำ (องศาบริกซ์)	40.67±0.15
ความหนืด (เซนติพอยต์)	15.33±0.21
สี	
L*	29.68±0.18
a*	13.76±0.11
b*	18.50±0.19
Chroma	23.05±0.14
Hue	53.43±0.29
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (กรัม)	46.12±0.09

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตาราง หมายถึง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติของน้ำลำไยก่อนการอบแห้ง พบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำมีค่าเท่ากับ 40.67±0.15 องศาบริกซ์ ความหนืดมีค่าเท่ากับ 15±0.21 เซนติพอยต์ ค่าความสว่าง (L*) มีค่าเท่ากับ 29.68±0.18 ซึ่งการที่ค่าความสว่าง (L*) มีค่าต่ำ เนื่องจากน้ำลำไยผ่านการต้มเพื่อปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ก่อนการอบแห้ง ทำให้มีสีน้ำตาล ค่าสี a* มีค่าเท่ากับ 13.76±0.11

ค่าสี b^* มีค่าเท่ากับ 18.50 ± 0.49 ค่าความเข้มของสี (Chroma) มีค่าเท่ากับ 23.05 ± 0.44 และ ค่าเฉดสี (Hue) มีค่าเท่ากับ 53.43 ± 0.29 ซึ่งพบว่าน้ำตาลไอศกรีมก่อนการอบแห้งมีค่าสีที่แสดงออกในระดับสีน้ำตาลอมแดง ส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 46.12 ± 0.09 กรัม

4.2 การอบแห้งแบบพ่นฝอย

4.2.1 ประสิทธิภาพการอบแห้งและปริมาณผลผลิต (yield)

เมื่อนำน้ำตาลไอศกรีมที่ได้จากการผสมมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE 11 ปริมาณมอลโทเดกซ์ทริน 0.6 กรัม/กรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 40 องศาบริกซ์ มาทำการทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณผลผลิตของกระบวนการอบแห้ง โดยวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวม ค่าประสิทธิภาพการระเหย และปริมาณผลผลิต ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนและปริมาณผลผลิตของกระบวนการอบแห้ง

ประสิทธิภาพการผลิต	ค่าที่วัดได้
ประสิทธิภาพเชิงความร้อน	
-ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวม (ร้อยละ)	63.98 ± 1.20
-ประสิทธิภาพการระเหย (ร้อยละ)	92.13 ± 3.45
ปริมาณผลผลิต (ร้อยละ)	72.72 ± 3.61

หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตารางหมายถึง ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.2 พบว่ากระบวนการอบแห้งน้ำตาลไอศกรีมโดยวิธีพ่นฝอย มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมเท่ากับร้อยละ 63.98 ± 1.20 ซึ่งผลการทดลองนี้ให้ค่าคงที่สูงกว่าค่าที่รายงานโดย Masters (1991) ที่พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิขาออก 85°C ขาเข้า 135°C ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมเท่ากับร้อยละ 43.5 ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองใช้อุณหภูมิขาเข้า $175 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ขาออก $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวม จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการผลิตเพิ่มขึ้น ส่วนค่าประสิทธิภาพการระเหย เท่ากับร้อยละ 92.13 ± 3.45 และปริมาณผลผลิตมีค่าเท่ากับร้อยละ 72.72 ± 3.61 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำตาลไอศกรีมของพิพัฒน์และคณะ (2551) ที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์สูงสุดคือ ร้อยละ 40

4.2.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำลำไยผง

จากการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ค่าสีของน้ำลำไยผงที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการไหล ความหนาแน่นของผง ความหนาแน่นของอนุภาค การกระจายขนาดอนุภาค และอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ได้ผลดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.3

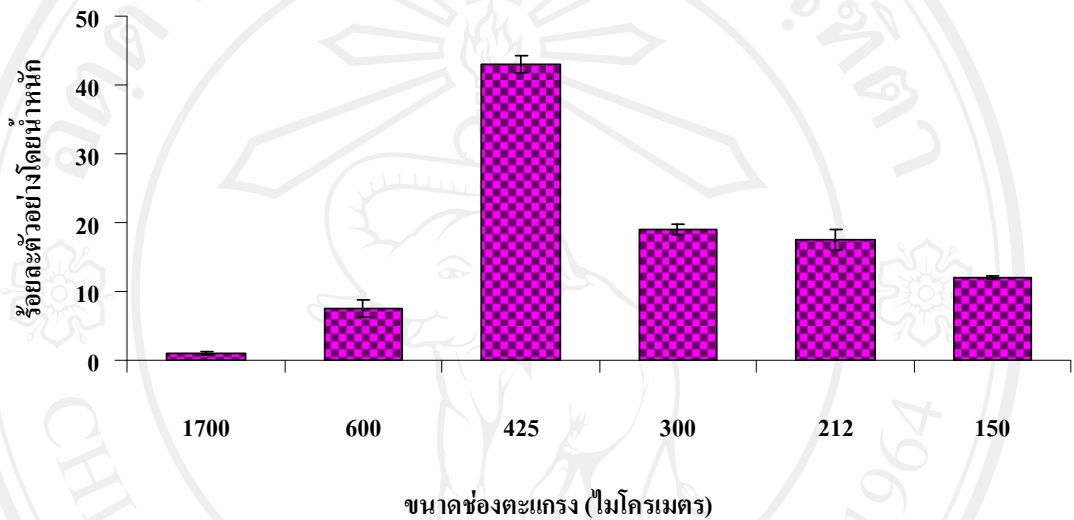
ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพของน้ำลำไยผง

ค่าดัชนี	ค่าที่วัดได้
สี	
L*	80.77±0.23
a*	3.66±0.11
b*	28.07±0.15
Chroma	28.30±0.17
Hue	82.63±0.21
ความสามารถในการละลาย (ร้อยละ)	98.93±0.83
ความสามารถในการไหล (θ)	43.33±2.08
ความหนาแน่นของผง (kg/m^3)	502.92±9.62
ความหนาแน่นของอนุภาค (kg/m^3)	1326.52±3.85

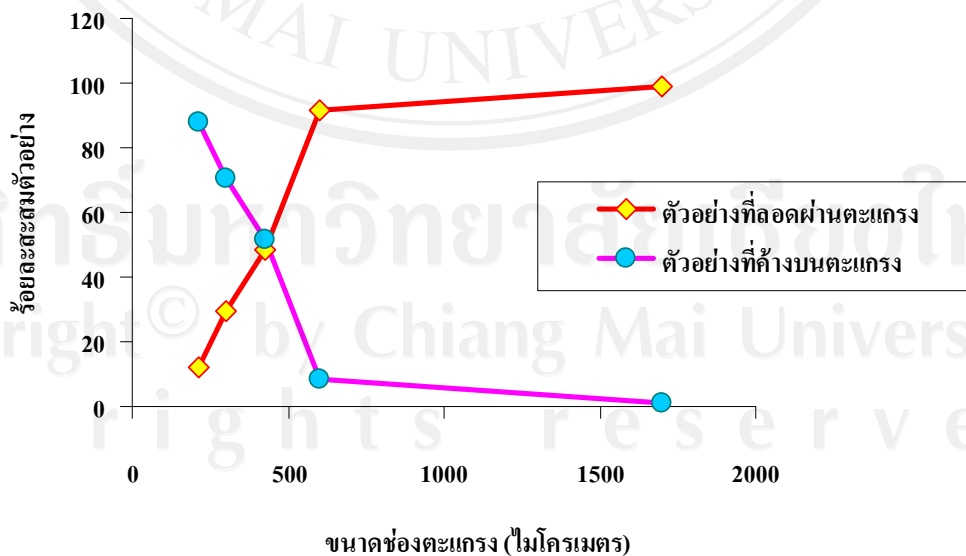
หมายเหตุ: ค่าที่แสดงในตาราง หมายถึง ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 80.77±0.23 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากค่าความสว่าง (L*) ของน้ำลำไยเข้มข้นก่อนการอบแห้ง เนื่องจากสีของมอลโทเด็คซ์ทรินมีสีขาวเมื่อนำมาผสมกับน้ำลำไยผงจะทำให้สีของน้ำลำไยผงอ่อนลง และมีความสว่าง (L*) เพิ่มขึ้น ค่าสี a* มีค่าเท่ากับ 3.66±0.11 ค่าสี b* มีค่าเท่ากับ 28.07±0.15 ค่าความเข้มของสี (Chroma) มีค่าเท่ากับ 28.30±0.17 และค่าเฉดสี (Hue) มีค่าเท่ากับ 82.63±0.21 จากการทดลองของ ชนนท์ (2545) พบว่าน้ำลำไยผงโดยวิธีอบแห้งแบบโพน-แมท มีค่าสีก่อนชงละลายคือ ค่าความสว่าง (L*) มีค่าเท่ากับ 70 ค่าสี a* มีค่าเท่ากับ 4 และค่าสี b* มีค่าเท่ากับ 15 แสดงว่าน้ำลำไยผงจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ได้จากการทดลองมีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองมากกว่า เนื่องจากปริมาณมอลโทเด็คซ์ทรินที่ผสมเข้าไปในน้ำลำไยผงมีปริมาณมากกว่า ความสามารถในการละลายมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.93±0.83

ส่วนความสามารถในการไหล ซึ่งวิเคราะห์เป็นค่ามูมกอง มีค่าเท่ากับ 43.33 ± 2.08 องศา แสดงว่า น้ำลำไยผงมีความสามารถในการไหลได้พอใช้ ถ้าหากค่ามูมกองน้อยกว่า 35 องศา น้ำลำไยผงมีความสามารถในการไหลที่ดี ช่วง 35-45 องศา ไหลพอใช้ ช่วง 45-55 องศา ไหลได้จำกัด และ 55 องศาขึ้นไปจะไม่ไหล (Barbosa-Cánovas *et al.*, 2005) ความหนาแน่นของผงมีค่าเท่ากับ $502.92 \pm 9.62 \text{ kg/m}^3$ และความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าเท่ากับ $1326.52 \pm 3.85 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดของอนุภาคผงน้ำลำไย

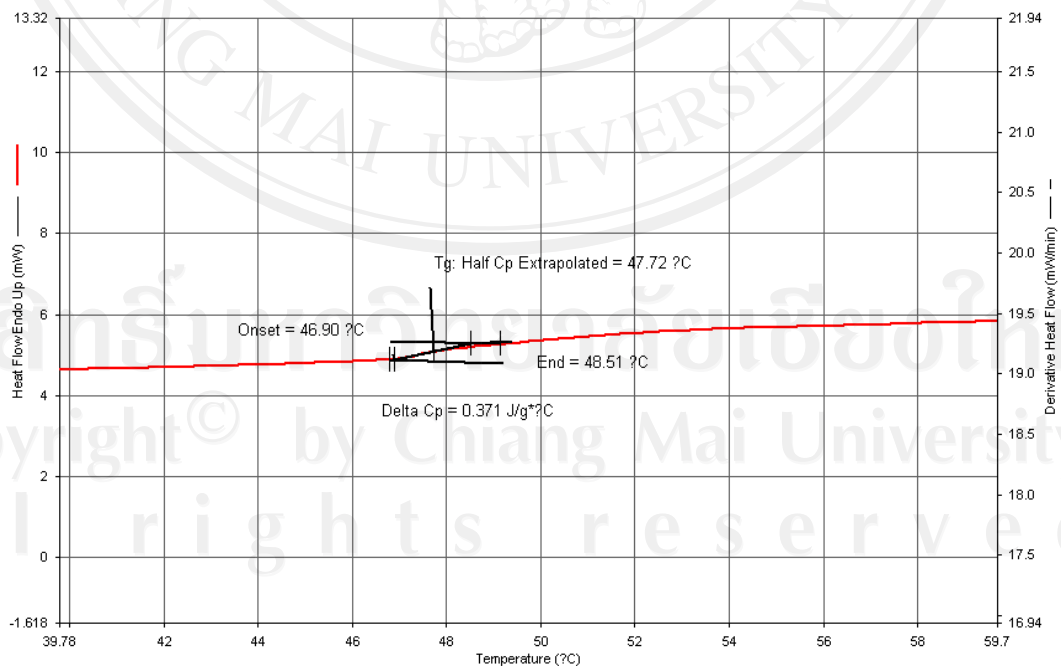


รูปที่ 4.2 ร้อยละการสะสมของอนุภาคผงน้ำลำไย

จากรูปที่ 4.1 แสดงการกระจายขนาดของอนุภาคผงน้ำลำไยโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ ร้อนผ่านช่องตะแกรงขนาด 150-1700 ไมโครเมตร พบว่าผงน้ำลำไยมีการกระจายขนาดอนุภาคอยู่ ช่องของตะแกรงขนาดช่อง 425 ไมโครเมตรมากที่สุด โดยมีน้ำหนักตัวอย่างเท่ากับร้อยละ 43 รูปที่ 4.2 แสดงร้อยละสะสมของผงน้ำลำไย พบว่าร้อยละสะสมของตัวอย่างที่ลอดผ่านตะแกรงมากที่สุดคือขนาดของช่องตะแกรง 1700 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.00 และร้อยละสะสมของ ตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงมากที่สุดคือขนาดของช่องตะแกรง 212 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 88.00 ซึ่งการกระจายของขนาดอนุภาคมีความสำคัญต่อการขนถ่ายและการบรรจุ เนื่องจากความหนาแน่นของผง (bulk density) ความสามารถในการอัด (compressibility) และความสามารถในการ ไหล (flowability) ของอาหารผงจะขึ้นอยู่กับกระจายของขนาดอนุภาค เมื่อบรรจุอาหารผงลง ภาชนะบรรจุ ขนาดอนุภาคผงที่มีขนาดเล็กจะกระจายตัวอยู่ด้านล่างและขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จะซ้อนทับอยู่ด้านบน (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005).

4.2.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผง

วิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผง โดยใช้เครื่อง DSC เพื่อใช้ในการทำนาย ความคงตัวของผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บรักษาได้ ซึ่งการวิเคราะห์อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ของน้ำลำไยผงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผงที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย

จากรูปที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผงที่ผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าน้ำลำไยผงมีค่า T_g อยู่ที่ 47.72°C ซึ่งน้ำลำไยผงที่ผลิตได้ในการศึกษานี้มีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงสามารถเก็บรักษาน้ำลำไยผงไว้ที่อุณหภูมิห้องได้โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แต่อย่างไรก็ตามต้องควบคุมสภาวะการเก็บรักษาน้ำลำไยผงไม่ให้มีการดูดความชื้นเพื่อไม่ให้ค่า T_g ของน้ำลำไยผงลดต่ำลง ซึ่งถ้าค่า T_g ของน้ำลำไยผงลดต่ำลงกว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาจะมีผลทำให้น้ำลำไยผงเหนียวเกาะกันเป็นก้อน ซึ่งค่า T_g ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างเฉพาะของตัวถูกละลาย และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวทำละลาย (ความชื้น) ในอาหาร (Rahman, 1995) ซึ่งน้ำลำไยผงดังกล่าวได้นำไปศึกษาอิทธิพลของระดับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิการเก็บรักษาที่มีต่อคุณภาพ และลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์มของน้ำลำไยผงต่อไป

4.2.4 สมบัติทางเคมีของน้ำลำไยผง

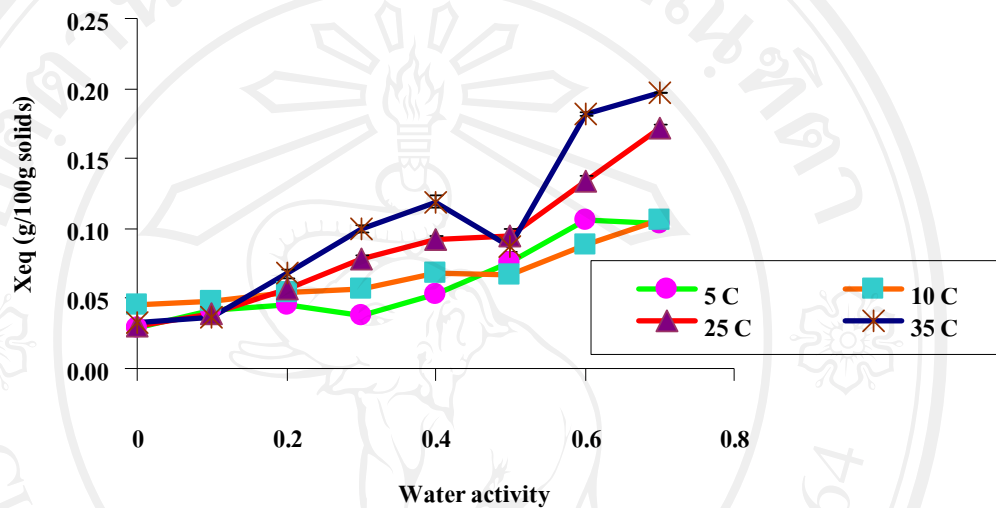
ค่า Water activity (a_w) และปริมาณความชื้นของน้ำลำไยผงมีค่าเท่ากับ 0.21 ± 0.01 และร้อยละ 3.94 ± 0.69 ตามลำดับ ค่า a_w ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับน้ำลำไยผงโดยวิธีอบแห้งแบบโพรม-แมทของชนันท์ (2545) ที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.21 และปริมาณความชื้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.8 ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณความชื้นของน้ำลำไยผงมีค่าต่ำกว่าการอบแห้งแบบโพรม-แมทเนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นการใช้เทคนิคเพื่อระเหยน้ำออกจากของเหลวอย่างรวดเร็ว ซึ่งมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ค่า a_w ของลำไยผงขงดื่มต้องไม่เกิน 0.5 (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2547) ปริมาณความชื้นของอนุภาคอาหารผงที่ปลอดภัยควรมี a_w ต่ำกว่า 0.5 เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ (Fennema *et al.*, 2008) และอาหารที่มีความชื้นต่ำจะต้องมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 5 เช่น นมผง แป้งมัน ไข่ผง และกาแฟสำเร็จรูป เป็นต้น (บุษกร, 2547) ดังนั้นน้ำลำไยผงที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอยที่ได้จากการศึกษามีค่า a_w และปริมาณความชื้นต่ำ จึงส่งผลดีต่อคุณภาพของน้ำลำไยผงเนื่องจากปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ระหว่างการเก็บรักษา และสามารถเก็บรักษาได้โดยที่ไม่เกาะตัวกัน

4.2.5 ลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์มของน้ำลำไยผง

การศึกษาลักษณะซอร์ปชันไอโซเทอร์มของน้ำลำไยผงจากการทำแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อใช้ในการทำนายคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา โดยการศึกษาอิทธิพลของระดับความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิในการเก็บรักษาที่มีต่อคุณภาพของน้ำลำไยผง โดยใช้วิธีของ Bell and Labuza (2000) ที่สภาวะสมดุล ค่า a_w เท่ากับ ค่าความชื้นสัมพัทธ์/100 ควบคุมระดับความชื้นสัมพัทธ์ 7 ระดับ (ร้อยละ 0-77) โดยใช้สารละลายเกลืออิมิตัวดังนี้ potassium penta oxide, lithium chloride,

potassium acetate, magnesium chloride, potassium carbonate, magnesium nitrate และ potassium iodide ศึกษาที่

อุณหภูมิ 5, 10, 25 และ 35°C จนตัวอย่างเข้าสู่ภาวะสมดุลโดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก นำตัวอย่างไปวิเคราะห์ความชื้น สร้างกราฟซอร์ปชัน ไอโซเทอร์ม ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะซอร์ปชันของน้ำลำไยผงที่อุณหภูมิต่างๆ

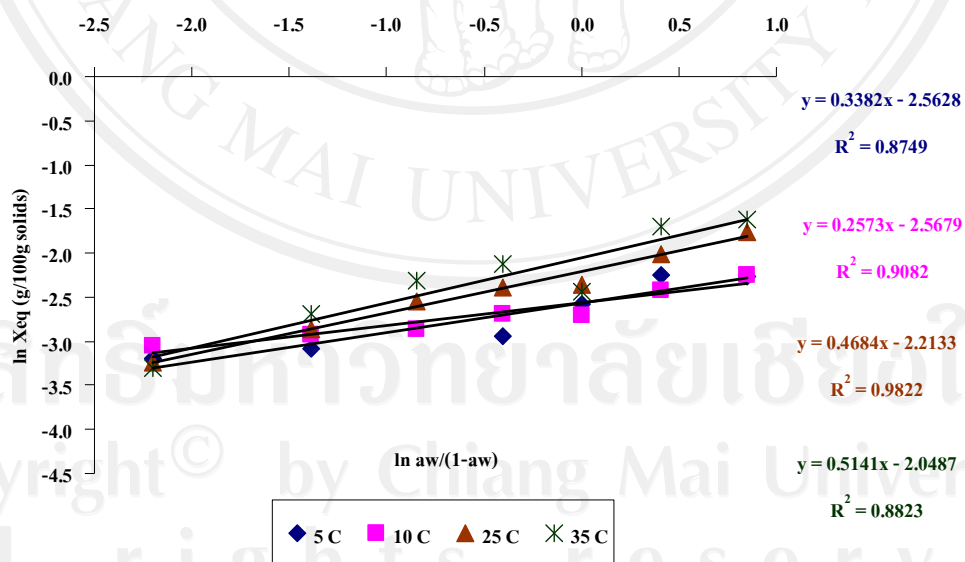
(X_{eq} = Equilibrium Moisture Content)

การวิเคราะห์ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้น (g/100 g dry solids) และ a_w ของน้ำลำไยผงที่ผสมมอลโทเด็คซ์ทริน ที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดยศึกษาที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ช่วงร้อยละ 0-77 จากรูปที่ 4.4 ลักษณะซอร์ปชันของน้ำลำไยผงเป็นกระบวนการ adsorption isotherm เนื่องจากน้ำลำไยผงมีการดูดซับความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0-77 โดยช่วงแรกจะมีค่า equilibrium moisture content ต่ำ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อ a_w เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Farahnaky และคณะ (2009) ในการศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของมะเดื่อ โดยพบว่าที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงๆ ปริมาณความชื้นสมดุลของมะเดื่อจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และสอดคล้องกับงานวิจัยของ โยชิคา (2551) ซึ่งศึกษาซอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลึกน้ำผึ้ง พบว่าเมื่อระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง ความชื้นของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งมีค่าสูงมากขึ้น และความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

น้ำลำไยผงจากการศึกษาเป็นกระบวนการ adsorption isotherm ที่มีลักษณะคล้ายกับซอร์ปชันไอโซเทอร์มของผลไม้ต่างๆ เช่น สตรอเบอร์รี่ แอปเปิ้ล แบล็คเบอร์รี่ กีวี (Moraga *et al.*,

2006) และมะเขือเทศที่ผ่านการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Goula *et al.*, 2008) ซึ่งลักษณะซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มประเภทนี้พบบ่อยที่สุดในอาหาร (Mathlouthi and Roge, 2003) เมื่อพิจารณาถึงผลของอุณหภูมิต่อปริมาณความชื้นจะพบว่าปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น โดยเฉพาะที่ระดับอุณหภูมิ 25 และ 35°C ปริมาณความชื้นของน้ำลำไยผงจะเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของอาหารที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถดูดซับความชื้น (hygroscopicity) ได้มาก โดยในช่วงแรกปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากข้อมูลซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มของน้ำลำไยผง นำมาวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเลือกศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Oswin, Henderson, Halsey, Smith, BET และ GAB เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ในการทำนายลักษณะซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มในช่วงที่ไม่มีภาวะวิกฤตในห้องปฏิบัติการ ได้ค่าคงที่ของแบบจำลอง Oswin, Handerson, Halsey, Smith, BET และ GAB ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.9 ตามลำดับ จากนั้นนำมาหาความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนี่ยสระหว่างอุณหภูมิกับค่าคงที่ของแบบจำลองต่างๆ เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะซอร์ปชัน ไอโซเทอร์ม และนำมาเปรียบเทียบกับค่าซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้ในการทำนายคุณภาพน้ำลำไยผงระหว่างการเก็บรักษา



รูปที่ 4.4 การหาค่าคงที่ซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มของ Oswin

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชัน ไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Oswin

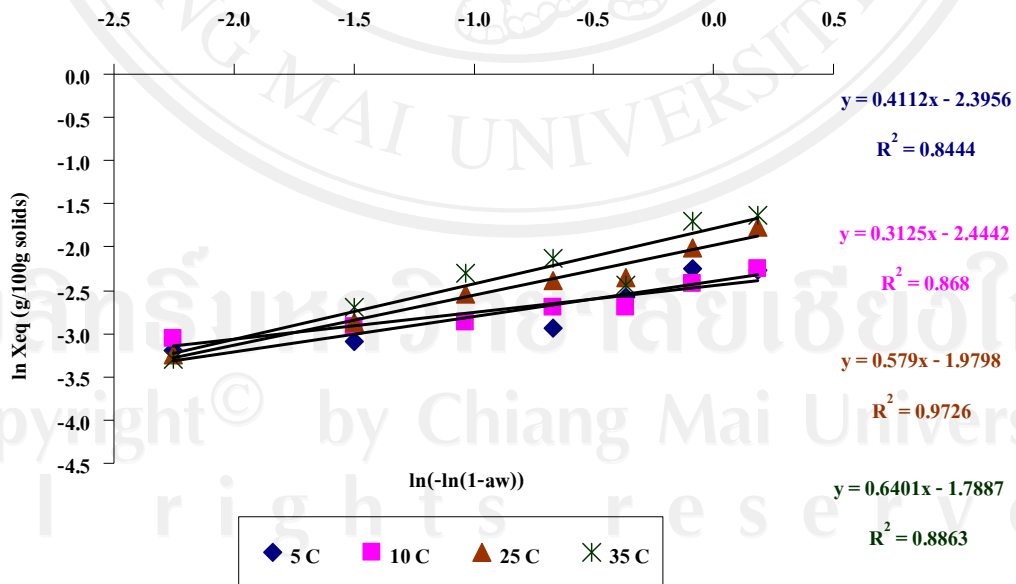
อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม		ช่วงของ a_w
	A	B	
5	0.0708	0.2888	0.0-0.7
10	0.0789	0.3214	
25	0.1069	0.4336	
35	0.1287	0.5207	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ Oswin $M_w = A \left[\frac{a_w}{1-a_w} \right]^B$

จากตารางที่ 4.4 นำค่าคงที่ A และ B หาคความสัมพันธ์แบบอาร์รี่เนียสกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$A = 32.631e^{-1705.6x} \quad (4.1)$$

$$B = 123.02e^{-1683.1x} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.5 การหาค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Henderson

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Henderson

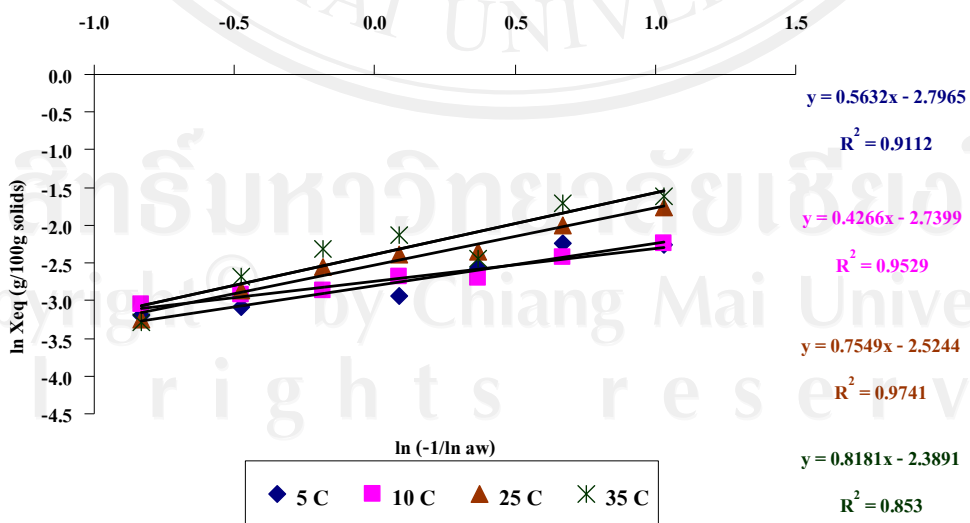
อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม		ช่วงของ a_w
	A	B	
5	1112.7967	2.8451	0.0-0.7
10	510.7337	2.5443	
25	30.5494	57.7602	
35	16.3529	15.1987	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ Henderson $M_w = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-A} \right]^{1/B}$

จากตารางที่ 4.5 นำค่าคงที่ A และ B หาค่าความสัมพันธ์แบบอาร์เรเนียนส์กับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$A = 8 \times 10^{-17} e^{-12254x} \quad (4.3)$$

$$B = 0.0051e^{1758.1x} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.6 การหาค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Halsey

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้
ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Halsey

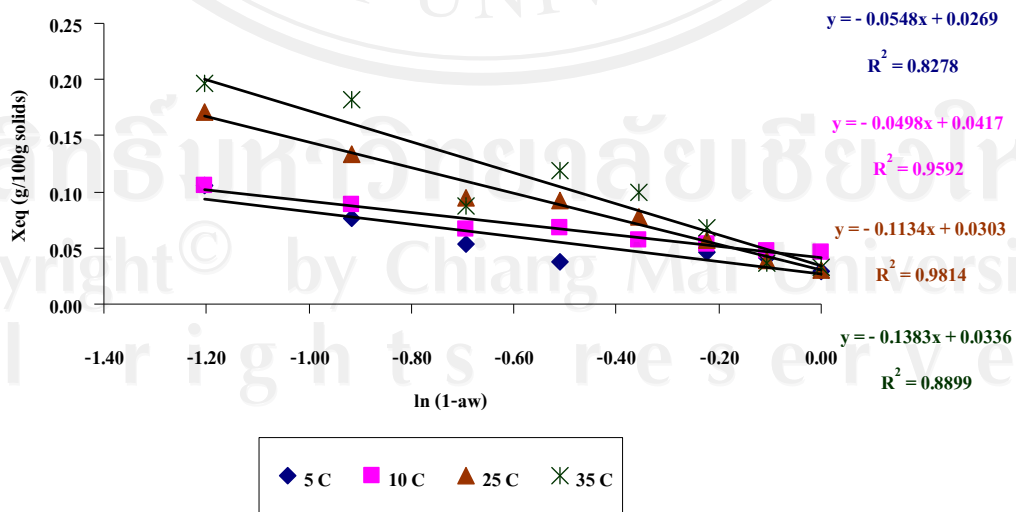
อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม		ช่วงของ a_w
	A	B	
5	0.0029	2.0631	0.0-0.7
10	0.0050	1.8699	
25	0.0223	1.4201	
35	0.0558	1.1998	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ Halsey $M_w = \left[-\frac{A}{\ln a_w} \right]^{1/B}$

จากตารางที่ 4.6 นำค่าคงที่ A และ B หาค่าความสัมพันธ์แบบอรรีเนียสกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$A = 4 \times 10^{10} e^{-8408x} \tag{4.5}$$

$$B = 0.0079e^{1547.1x} \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.7 การหาค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Smith

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Smith

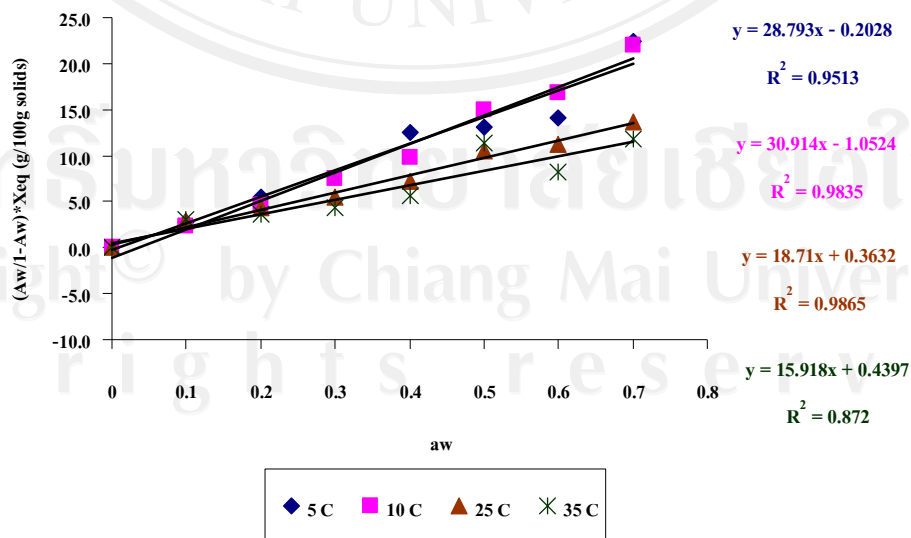
อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม		ช่วงของ a_w
	A	B	
5	0.3223	0.0594	0.0-0.7
10	0.0324	0.0719	
25	0.0329	0.1231	
35	0.0333	0.1710	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ Smith $M_w = A + B \ln(1 - a_w)$

จากตารางที่ 4.7 นำค่าคงที่ A และ B หาค่าความสัมพันธ์แบบอาร์รี่เนียสกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$A = 0.0041e^{-86.964x} \tag{4.7}$$

$$B = 3073.9e^{3071.5x} \tag{4.8}$$



รูปที่ 4.8 การหาค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ BET

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ BET

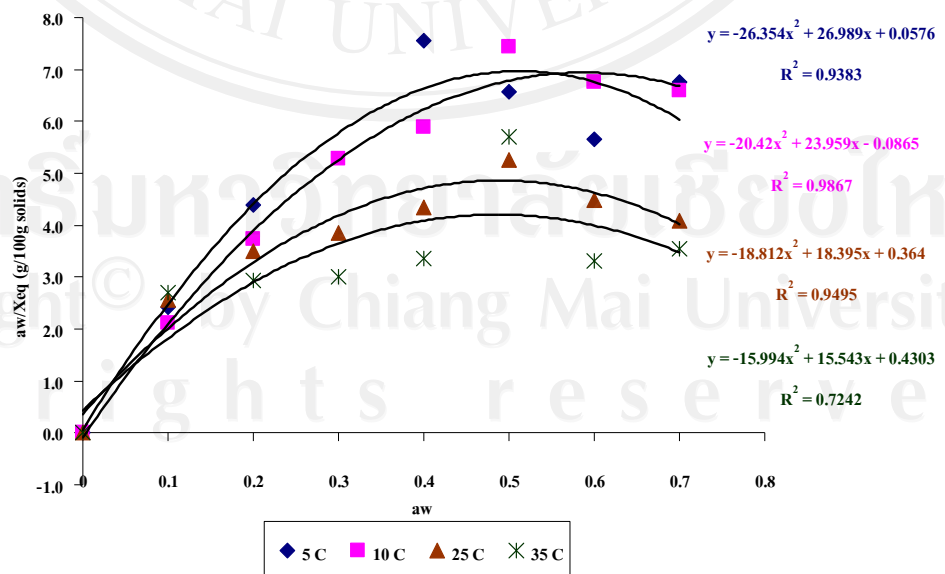
อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม		ช่วงของ a_w
	A	B	
5	0.0328	-97.8115	0.0-0.7
10	0.0367	-67.5887	
25	0.0506	16.9946	
35	68.8065	0.0616	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ BET $M_w = \frac{M_{bm} B_{bt} a_w}{(1 - a_w)[1 + (B_{bt} - 1)a_w]}$

จากตารางที่ 4.8 นำค่าคงที่ M และ B หาค่าความสัมพันธ์แบบอารีเนียสกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$M = 21.295e^{-1800.5x} \quad (4.9)$$

$$B = 0.0013e^{3164x} \quad (4.10)$$



รูปที่ 4.9 การหาค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ GAB

เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลซอร์ปชันไอโซเทอร์มที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายได้
ค่าสัมประสิทธิ์ในการทำนาย ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ GAB

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ซอร์ปชันไอโซเทอร์ม			ช่วงของ a_w
	M0	Y	K	
5	0.0173	3.7290	227.6587	0.0-0.7
10	0.0190	3.7018	172.1911	
25	0.0244	3.6267	45.2155	
35	0.0285	3.5815	19.9325	

หมายเหตุ : แบบจำลองของ GAB $M_w = \frac{M_{gm} Y K a_w}{(1 + K a_w)(1 - K a_w + Y K a_w)}$

จากตารางที่ 4.9 นำค่าคงที่ α , β และ ϵ หาค่าความสัมพันธ์แบบอาร์รี่เนียสกับอุณหภูมิ ได้ดังสมการ

$$M = 2.8224e^{-1415.9x} \quad (4.11)$$

$$Y = 2.464e^{115.19x} \quad (4.12)$$

$$K = 5 \times 10^{-10} e^{7517.9x} \quad (4.13)$$

ตารางที่ 4.10 สัมประสิทธิ์ในการทำนายแบบจำลองคณิตศาสตร์ต่างๆ

แบบจำลอง	สัมประสิทธิ์ในการทำนาย			
	R ²	SEE	RSS	RMSE
Oswin	0.8783	1.69	0.0082	0.0163
Henderson	0.8474	1.79	0.0093	0.0173
Halsey	0.8934	1.36	0.0046	0.0122
Smith	0.9226	1.46	0.0061	0.0141
BET	0.8764	1.72	0.0086	0.0167
GAB	0.8805	1.68	0.0082	0.0163

หมายเหตุ : R² = Coefficient of determination, SEE = Standard error of estimation,
 RSS = Residual sum of squares, RMSE = Root mean squares error

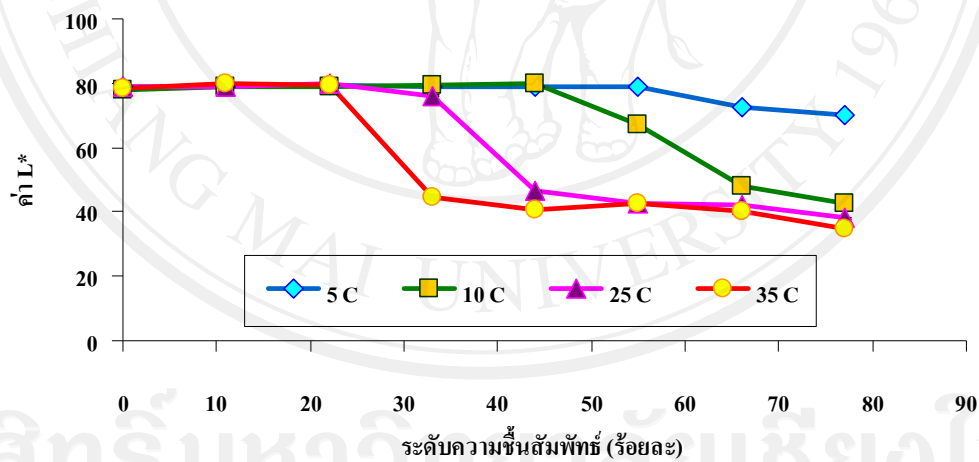
จากตารางแสดงค่าคงที่ของแบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์ม พบว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ Halsey เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับน้ำตาลไผ่ เนื่องจากมีค่า SEE, RSS และ RMSE ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.36, 0.0046 และ 0.0122 ตามลำดับ เนื่องจากสมการเป็นสมการประเภท non-linear และมีค่า R² สูงเท่ากับ 0.8944 ซึ่งแบบจำลองของ Halsey เหมาะกับอาหารที่มีค่า a_w ในช่วง 0.1-0.8 (Rahman, 1995) ซึ่งสอดคล้องกับช่วง a_w ที่ใช้ในการทดลองนี้ แบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Oswin มีค่า R² เท่ากับ 0.8783 ค่า SEE, RSS และ RMSE มีค่าเท่ากับ 1.69, 0.0082 และ 0.0163 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองของ Oswin เหมาะกับอาหารประเภทเนื้อสัตว์ และผักต่างๆ (Rahman, 1995) แบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Henderson มีค่า R² ต่ำสุด และโดยมีค่าเท่ากับ 0.8474 และมีค่า SEE, RSS และ RMSE สูงสุด เท่ากับ 1.79, 0.0093 และ 0.0173 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองของ Henderson ใช้วิเคราะห์อาหารทั่วไป (Rahman, 1995) แบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ Smith มีค่า R² เท่ากับ 0.9226 และมีค่า SEE, RSS และ RMSE เท่ากับ 1.46, 0.0061 และ 0.0141 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองของ Smith ใช้สำหรับอาหารประเภท bio-polymers ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Rahman, 1995) แบบจำลองซอร์ปชันไอโซเทอร์มของ BET มีค่า R² เท่ากับ 0.8764 และมีค่า SEE, RSS และ RMSE เท่ากับ 1.72, 0.0086 และ 0.0163 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองของ BET เหมาะกับอาหารที่มีค่า a_w ช่วง 0.05-0.45 แบบจำลองซอร์ปชัน

ไอโซเทอร์มของ GAB มีค่า R^2 เท่ากับ 0.8805 และมีค่า SEE, RSS และ RMSE เท่ากับ 1.68, 0.0082 และ 0.0163 ตามลำดับ ซึ่งแบบจำลองของ GAB เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับอาหารส่วนใหญ่ และเหมาะสมกับอาหารหลากหลายชนิดและมีค่า a_w อยู่ในช่วงกว้าง (Rahman, 1995)

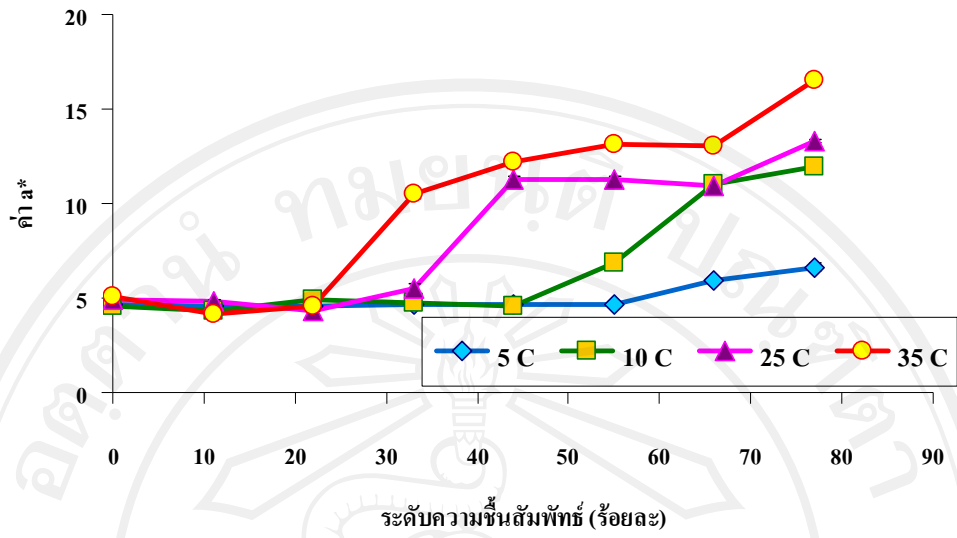
4.3 อิทธิพลของระดับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำลำไยผง

นำตัวอย่างน้ำลำไยผงหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว มาศึกษาอิทธิพลของระดับความชื้นสัมพัทธ์ 7 ระดับ (ร้อยละ 0-77) และอุณหภูมิในการเก็บรักษา 5, 10, 25 และ 35°C ที่มีผลต่อค่าสีของน้ำลำไยผงโดยวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสี a^* ค่าสี b^* ค่า Chroma และค่า Hue ดังรูปที่ 4.10-4.14

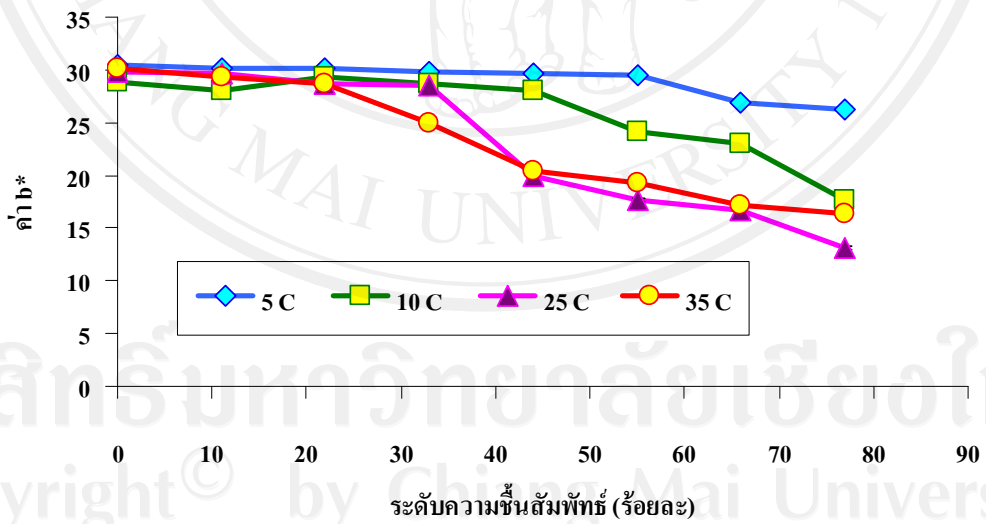
4.3.1 ค่าสี



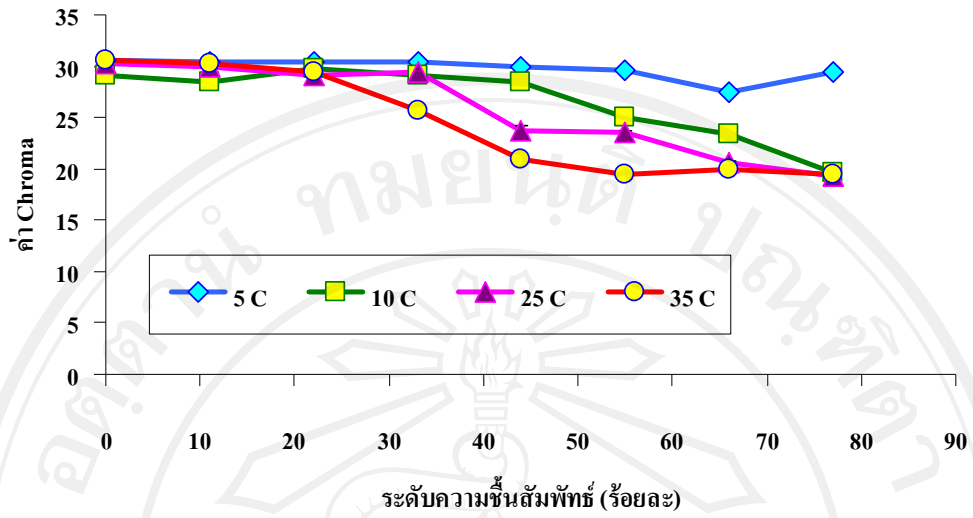
รูปที่ 4.10 แสดงค่าความสว่าง (L^*) ของน้ำลำไยผง



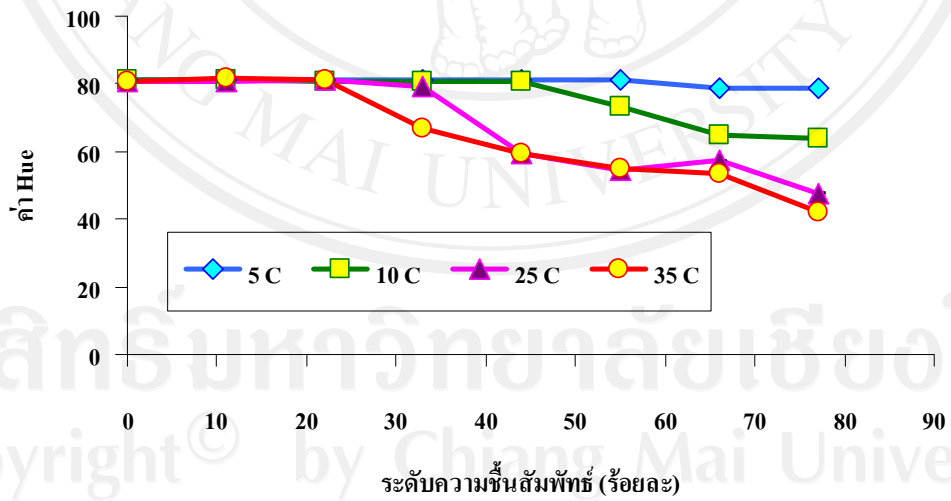
รูปที่ 4.11 แสดงค่าสี a* ของน้ำลำไยผง



รูปที่ 4.12 แสดงค่าสี b* ของน้ำลำไยผง



รูปที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มของสี (Chroma) ของน้ำลำไยผง



รูปที่ 4.14 แสดงค่าเจดสี (Hue) ของน้ำลำไยผง

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความสว่าง (L^*) ของน้ำลำไยผง เป็นการวิเคราะห์ค่าความสว่าง ซึ่งอธิบายถึงความแตกต่างของแสง ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 (มืด) ถึง 100 (สว่าง) ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ โดยค่าความสว่าง (L^*) มีค่ามาก แสดงว่าตัวอย่างมีความสว่างมาก เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่าง (L^*) อุณหภูมิต่างๆ กับระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 25°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 22 ให้ค่าความสว่าง (L^*) สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 80.07 ± 0.13 ซึ่งแสดงว่าน้ำลำไยผงดังกล่าวมีค่าความสว่างสูง และที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง โดยที่อุณหภูมิ 25°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 ให้ค่าความสว่าง (L^*) ต่ำที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 34.12 ± 0.17 ลักษณะของน้ำลำไยผงจึงมีความสว่างน้อยที่สุด เนื่องจากผลของอุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความสว่าง (L^*) จะลดลงอย่างรวดเร็ว และที่อุณหภูมิและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นน้ำลำไยผงเปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery) ทำให้น้ำลำไยผงมีค่าความสว่าง (L^*) จึงลดลง

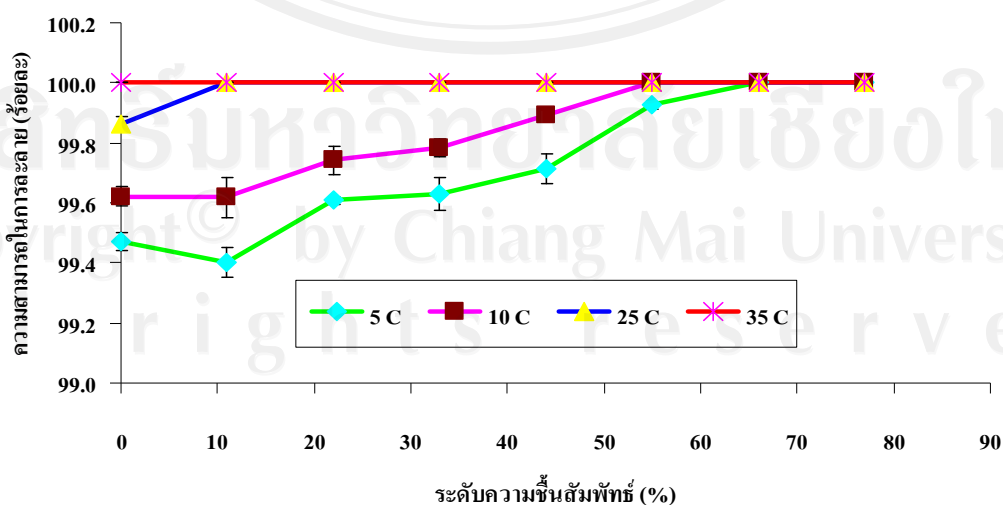
จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าสี a^* ของน้ำลำไยผง การวิเคราะห์ค่าสี a^* ซึ่งอธิบายถึงค่าสีที่อยู่ระหว่างสีเขียว ($-a^*$) ถึง สีแดง ($+a^*$) ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาที่ 35°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 ให้ค่าสี a^* สูงสุด โดยมีค่าสี a^* เท่ากับ 16.55 ± 1.32 เมื่อเปรียบเทียบค่าสี a^* ที่อุณหภูมิต่างๆ กับระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงว่าน้ำลำไยผงดังกล่าวอยู่ในช่วงสีแดง และที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 35°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11 ให้ค่าสี a^* ต่ำที่สุด คือ 4.19 ± 0.12 แสดงว่าน้ำลำไยผงอยู่ในช่วงของสีแดงเล็กน้อย ค่าสี a^* ของน้ำลำไยผงจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น น้ำลำไยผงจะมีการดูดซับความชื้นและมอลโทเดกซ์ทรินจะละลาย ซึ่งมอลโทเดกซ์ทรินเมื่อละลายจะมีสีใส ทำให้สีของน้ำลำไยเด่นชัดขึ้น ส่งผลให้ค่าสี a^* สูงขึ้น โดยเฉพาะที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูง ค่าสี a^* จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าสี b^* ของน้ำลำไยผง การวิเคราะห์ค่าสี b^* ซึ่งอธิบายถึงค่าสีที่อยู่ระหว่างสีน้ำเงิน ($-b^*$) ถึง สีเหลือง ($+b^*$) ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 ให้ค่าสี b^* สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าสี b^* ที่อุณหภูมิต่างๆ กับระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าสี b^* เท่ากับ 30.48 ± 0.26 ซึ่งแสดงว่าน้ำลำไยผงดังกล่าวอยู่ในช่วงสีเหลืองสูง และที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 25°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 มีค่าสี b^* ต่ำที่สุด คือ 13.13 ± 0.97 แสดงว่าน้ำลำไยอยู่ในช่วงสีเหลืองค่อนข้างต่ำ และที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสี b^* ลดลง

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าความเข้มของสี (Chroma) ของน้ำลำไยผง ซึ่งค่าความเข้มของสีถ้ามีค่าใกล้เคียงยี่สิบจะไม่มีสีเทา พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 ให้ค่าความเข้มของสีสูงสุด เท่ากับ 30.56 ± 0.22 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้มของสีที่อุณหภูมิต่างๆ กับระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงว่าน้ำลำไยผงดังกล่าวมีค่าความเข้มของสีค่อนข้างสูง และที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 25°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 ให้ค่าความเข้มของสีต่ำสุด เท่ากับ 19.38 ± 0.30 และที่อุณหภูมิการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเข้มของสีลดลง

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าเฉดสี (Hue) ของน้ำลำไยผง พบว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 35°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11 ให้ค่าเฉดสีสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 81.77 ± 0.17 ซึ่งแสดงว่าน้ำลำไยผงมีสีส้มแดงถึงสีเหลือง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉดสีที่อุณหภูมิต่างกันแต่ระดับความชื้นสัมพัทธ์เดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 35°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 77 มีค่าเฉดสีต่ำที่สุด คือ 42.27 ± 0.15 แสดงว่าน้ำลำไยผงมีสีม่วงแดงถึงส้มแดง ซึ่งหากมีค่าเฉดสี อยู่ในช่วง 45-90 องศา แสดงสีม่วงแดงถึงสีส้มแดง ช่วง 45-90 องศา แสดงสีส้มแดงถึงสีเหลือง 90-135 องศา แสดงสีเหลืองถึงเหลืองเขียว 135-180 องศา แสดงสีเหลืองเขียวถึงเขียว 180-225 องศา แสดงสีเขียวถึงสีน้ำเงิน 225-270 องศา แสดงสีน้ำเงินเขียวถึงน้ำเงิน 270-315 องศา แสดงสีน้ำเงินถึงม่วง 315-360 องศา แสดงสีม่วงถึงม่วงแดง (McGuire, 1992) และถ้าค่าความเข้มของสีเพิ่มขึ้นค่าเฉดสีจะเพิ่มขึ้นด้วย

4.2.2 ความสามารถในการละลาย



รูปที่ 4.15 แสดงความสามารถในการละลายของน้ำลำไยผง

จากรูปที่ 4.15 พบว่าความสามารถในการละลายของน้ำลำไยผงที่ผ่านการอบแห้งโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย ที่อุณหภูมิการเก็บรักษา 5, 10, 25 และ 35°C จะอยู่ในช่วงร้อยละ 99.40-100.00 ซึ่งเป็นค่าการละลายที่สูงมาก ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงสุด คือ 35°C น้ำลำไยผงสามารถละลายได้ สูงสุดคือ ร้อยละ 100 ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ทุกระดับ จะเห็นว่าความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง น้ำลำไยผงจะละลาย ดังนั้นจึงส่งผลทำให้น้ำลำไยผงสามารถละลายในน้ำได้ทั้งหมดจึงทำให้มีค่าการละลายที่สูง เนื่องมาจากองค์ประกอบซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่ และมอลโทเดกซ์ทริน ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตเกือบทั้งหมด ทำให้สามารถละลายในน้ำได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของโยมิตา (2551) พบว่าความสามารถในการละลายของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งที่ผ่านการอบแห้งโดยตู้อบสุญญากาศมีค่าการละลายที่สูงมาก เนื่องมาจากองค์ประกอบของแคปซูลสารสกัดสีในผลึกน้ำผึ้งซึ่งประกอบด้วยผลึกน้ำผึ้ง มอลโทเดกซ์ทรินและสารสกัดจากบิทูทสามารถละลายในน้ำได้ทั้งหมด Cano-Chauca *et al.* (2005) ศึกษาผลของสารตัวกลางต่อโครงสร้างของมะม่วงผงโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่ามะม่วงผงที่มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 9 ผสมมอลโทเดกซ์ทริน มีความสามารถในการละลายมากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้กัมมะรายิบ และ waxy starch เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินสามารถละลายน้ำได้ดี

4.2.3 ความสามารถในการไหลของน้ำลำไยผง

ความสามารถในการไหลของน้ำลำไยผง วัดได้เป็นค่ามุมกอง (Angle of repose) ได้ผลดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการไหล

อุณหภูมิ (°C)	ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)					
	0 ^{ns}	11 ^{ns}	22	33	44 ^{ns}	55
5	45.00 ^A ±1.00	45.67 ^A ±2.52	45.67 ^{Aa} ±1.53	46.67 ^{AB a} ±1.53	47.33 ^{AB} ±1.15	49.67 ^B ±2.08
10	44.67 ^A ±1.53	46.17 ^{AB} ±2.02	48.50 ^{Bb} ±0.87	48.67 ^{Bab} ±1.53	49.00 ^B ±2.65	ND
25	46.33 ^A ±1.53	48.33 ^B ±0.58	49.33 ^{Bb} ±0.58	49.67 ^{Bb} ±1.15	ND	ND
35	45.33 ^A ±1.53	48.33 ^B ±1.53	49.33 ^{Bb} ±0.58	ND	ND	ND

หมายเหตุ : 1) ค่าที่แสดงในตาราง หมายถึง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

: 2) เครื่องหมาย ^{ns} ในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

: 3) ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่กำกับค่าของข้อมูลตามแนวนอนที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

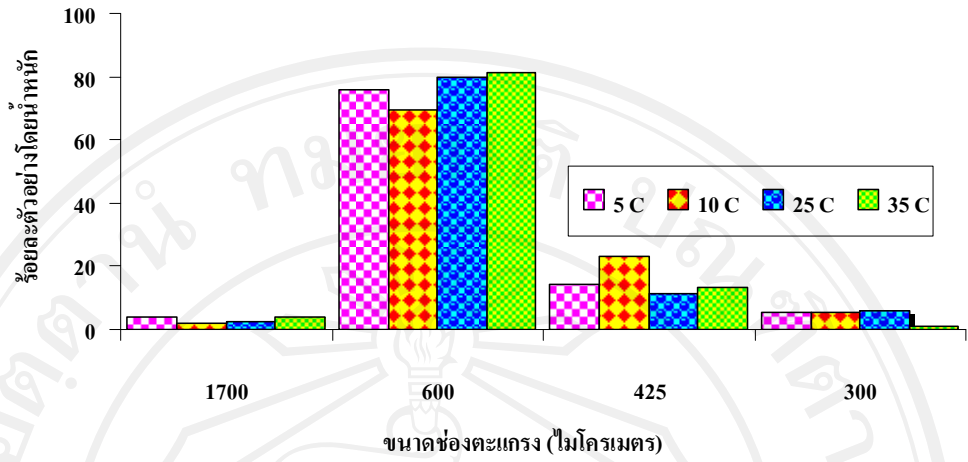
: 4) ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่กำกับค่าของข้อมูลตามแนวตั้งที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

: 5) ND หมายถึงไม่สามารถวัดค่ามุมกองได้เนื่องจากน้ำลำไยผงเปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็น rubbery

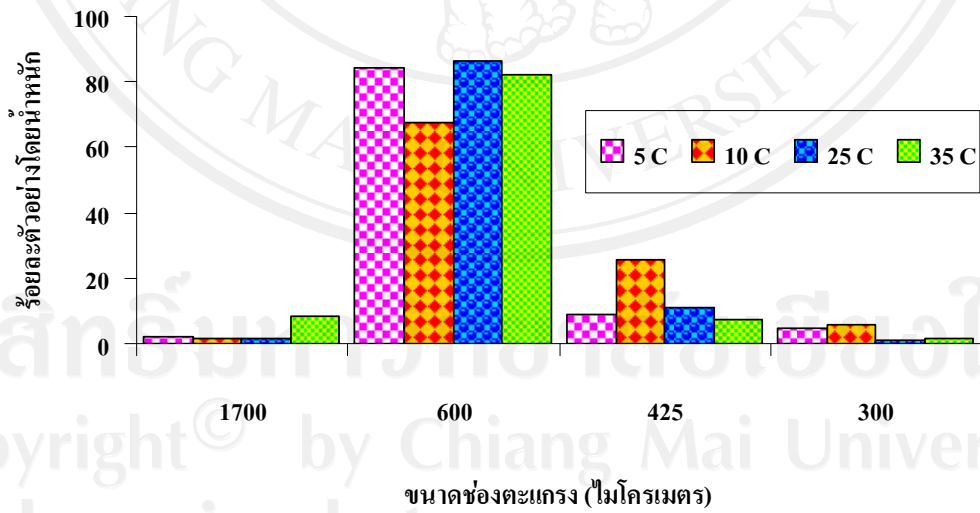
จากตารางที่ 4.11 ความสามารถในการไหลของน้ำลำไผ่ พบว่าอุณหภูมิการเก็บรักษา และระดับความชื้นสัมพัทธ์มีผลต่อความสามารถในการไหลของน้ำลำไผ่ซึ่งแสดงในรูปของค่า มุมกอง โดยค่ามุมกองจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิการเก็บรักษา และระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น น้ำลำไผ่ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5°C ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0 มีค่ามุมกองต่ำที่สุด คือ 44.67±1.53 องศา แสดงว่ามีความสามารถในการไหลได้พอใช้ ซึ่งหากค่ามุมกองน้อยกว่า 35 องศา น้ำลำไผ่มีความสามารถในการไหลที่ดี ช่วง 35-45 องศา ไหลพอใช้ ช่วง 45-55 องศา ไหลได้จำกัด และ 55 องศา ขึ้นไปจะไม่ไหล (Barbosa-Canovas *et al.*, 2005) ส่วนที่อุณหภูมิการเก็บรักษา และระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น มีค่ามุมกองสูงขึ้น แสดงว่าอนุภาคเกาะตัวกัน ทำให้น้ำลำไผ่ ดังกล่าวมีค่ามุมกองสูง จะสังเกตเห็นว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษา และระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น จะไม่สามารถหาความสามารถในการไหลได้ เนื่องจากน้ำลำไผ่จะเปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง (rubbery)

4.3.4 การกระจายตัวขนาดของอนุภาค

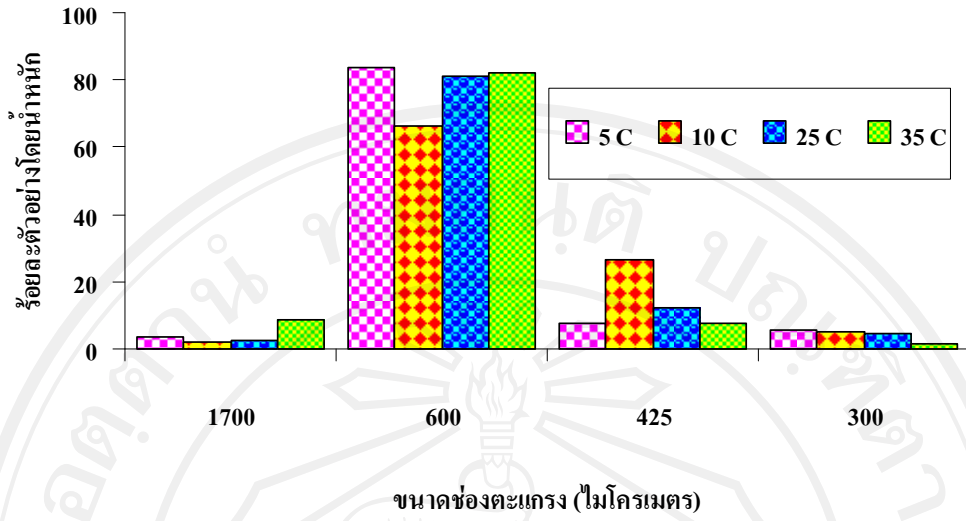
การกระจายของขนาดอนุภาคของผงน้ำลำไผ่ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0-77 โดยการร่อนผ่านช่องตะแกรงขนาด 300-1700 ไมโครเมตร ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคผงน้ำลำไผ่ สูงสุดอยู่ช่องตะแกรงขนาด 600 มิลลิเมตร รองลงมาคือ 425 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของผงน้ำลำไผ่ก่อนศึกษาลักษณะซอร์ชันไอโซเทอร์ม พบว่าการกระจายของขนาด อนุภาคของผงน้ำลำไผ่ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5, 10, 25 และ 35°C และระดับความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 0-77 มีการกระจายตัวต่ำกว่า และการกระจายของขนาดอนุภาคจะลดลงเมื่อระดับความชื้น สัมพัทธ์และอุณหภูมิสูงขึ้น จะไม่สามารถวัดการกระจายของขนาดอนุภาคของผงน้ำลำไผ่ได้ เนื่องจากน้ำลำไผ่เปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็นสถานะของเหลวหนืดคล้ายยาง เมื่อ เปรียบเทียบขนาดของอนุภาคผงกับน้ำลำไผ่ก่อนเก็บรักษา พบว่าขนาดของอนุภาคผงมีขนาดใหญ่ ขึ้น เพราะเกิดการเกาะติดกันระหว่างเก็บรักษาเนื่องจากการดูดซับน้ำ การกระจายตัวขนาดของ อนุภาคของผงน้ำลำไผ่ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.16-4.21



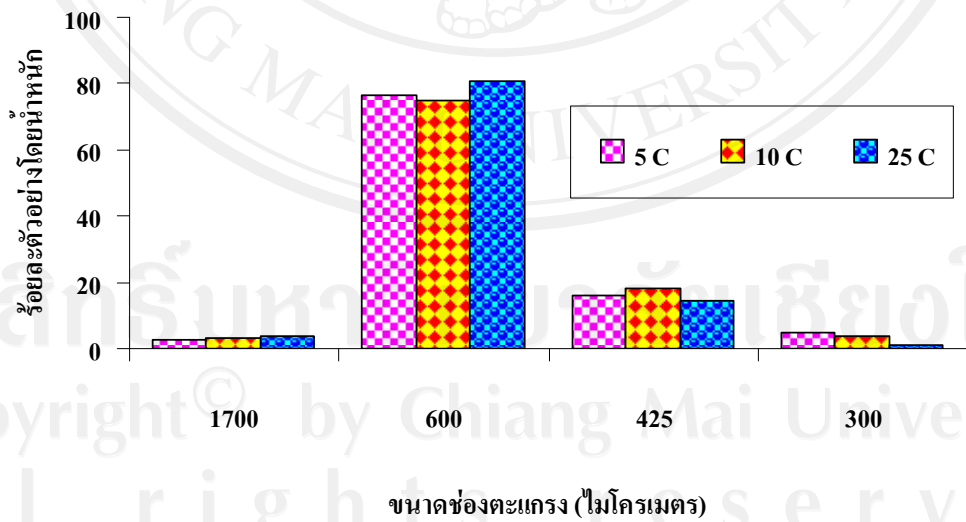
รูปที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคของผงน้ำลำไยที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 0



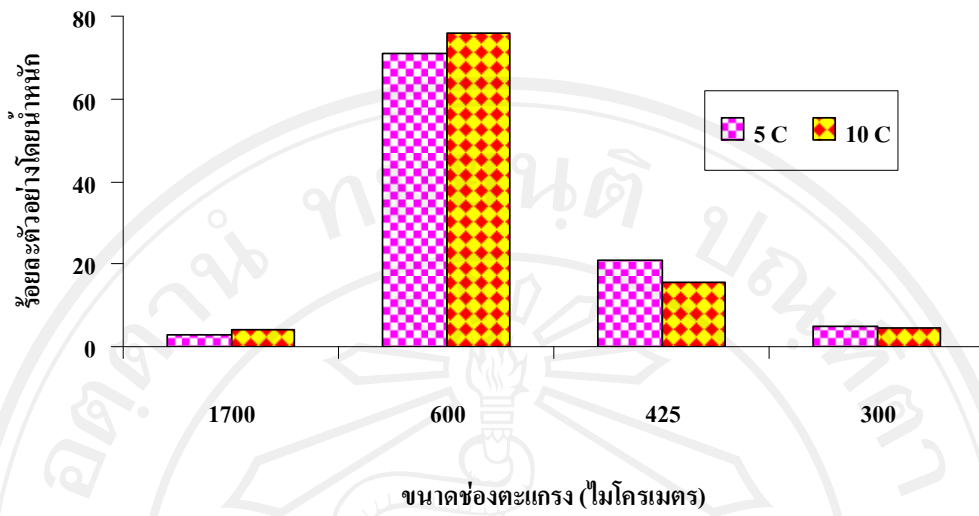
รูปที่ 4.17 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำลำไยผงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 11



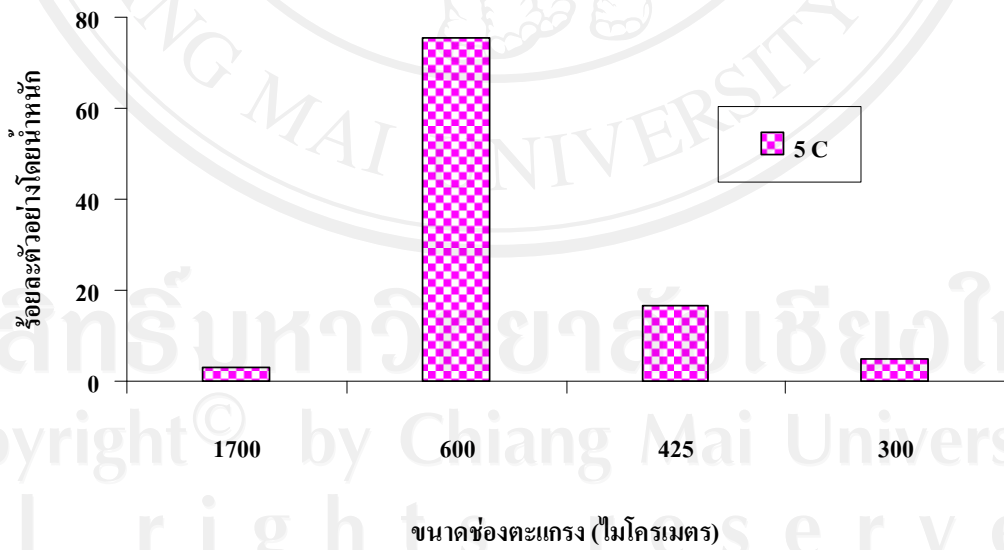
รูปที่ 4.18 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำลำไยผงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 22



รูปที่ 4.19 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำลำไยผงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 33



รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำลำไยฝงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 44



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของน้ำลำไยฝงที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55

4.3.5 ความหนาแน่นรวม

ตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นรวมของน้ำลำไยผง (kg/m³)

อุณหภูมิ (°C)	ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)					
	0 ^{ns}	11 ^{ns}	22 ^{ns}	33 ^{ns}	44 ^{ns}	55
5	500.00±0.00	500.00±0.00	501.40±2.42	501.40±2.42	502.80±2.42	502.80±2.42
10	500.00±0.00	501.40±2.42	502.80±2.42	502.80±2.42	502.80±2.42	ND
25	500.00±0.00	502.80±2.42	502.80±2.42	502.80±2.42	ND	ND
35	501.40±2.42	501.40±2.42	502.80±2.42	ND	ND	ND

หมายเหตุ: 1) ค่าที่แสดงในตาราง หมายถึง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

: 2) เครื่องหมาย ^{ns} ในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

: 3) ND หมายถึง ไม่สามารถวัดค่ามุกองได้เนื่องจากน้ำลำไยผงเปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็น rubbery

จากตารางที่ 4.12 ความหนาแน่นของน้ำลำไยผง (bulk density) พบว่า ความหนาแน่นของผงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นความหนาแน่นรวมของน้ำลำไยผงจะเพิ่มขึ้น ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูง จะมีปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย เนื่องจากการอัดตัวกันแน่นขึ้น ทำให้ความหนาแน่นรวมของผงน้ำลำไยผงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของผงมีผลต่อการไหลของน้ำลำไยผง เมื่อความหนาแน่นของผงสูงขึ้น นั่นคือน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรสูงขึ้น การไหลของน้ำลำไยผงจะเร็วขึ้น (สุทิน และฤดี, 2525) แต่จากผลการทดลองความสามารถในการไหลของน้ำลำไยผงหลังการเก็บรักษา พบว่ามีความสามารถในการไหลได้พอใช้ เนื่องจากเกิดการเกาะติดกันระหว่างการเก็บรักษา แต่ขนาดอนุภาคของน้ำลำไยผงจากการทดลองมีขนาดเล็ก ซึ่งอนุภาคนาเล็กมีปริมาณช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อย ทำให้ความหนาแน่นของผงสูง

4.3.6 ความหนาแน่นของอนุภาค

ตารางที่ 4.13 ความหนาแน่นของอนุภาคน้ำลำไยผง (kg/m³)

อุณหภูมิ (°C)	ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)					
	0	11	22	33	44	55
5	1336.93 ^{Aa} ±3.31	1347.55 ^{Ba} ±4.40	1435.00 ^{Cb} ±4.68	1433.95 ^{Ca} ±3.47	1476.22 ^{Da} ±2.90	1516.69 ^E ±3.97
10	1387.69 ^{Abc} ±3.81	1388.59 ^{Ab} ±4.49	1421.61 ^{Ba} ±2.98	1478.54 ^{Cb} ±2.16	1508.87 ^{Db} ±4.86	ND
25	1384.70 ^{Ab} ±3.93	1455.22 ^{Bc} ±2.45	1527.61 ^{Cc} ±2.63	1553.77 ^{Dc} ±4.35	ND	ND
35	1394.07 ^{Ac} ±3.47	1451.39 ^{Bc} ±4.74	1526.80 ^{Cc} ±3.55	ND	ND	ND

หมายเหตุ: 1) ค่าที่แสดงในตาราง หมายถึง ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ซ้ำ

: 2) เครื่องหมาย ^{ns} ในแต่ละคอลัมน์ หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p≤0.05)

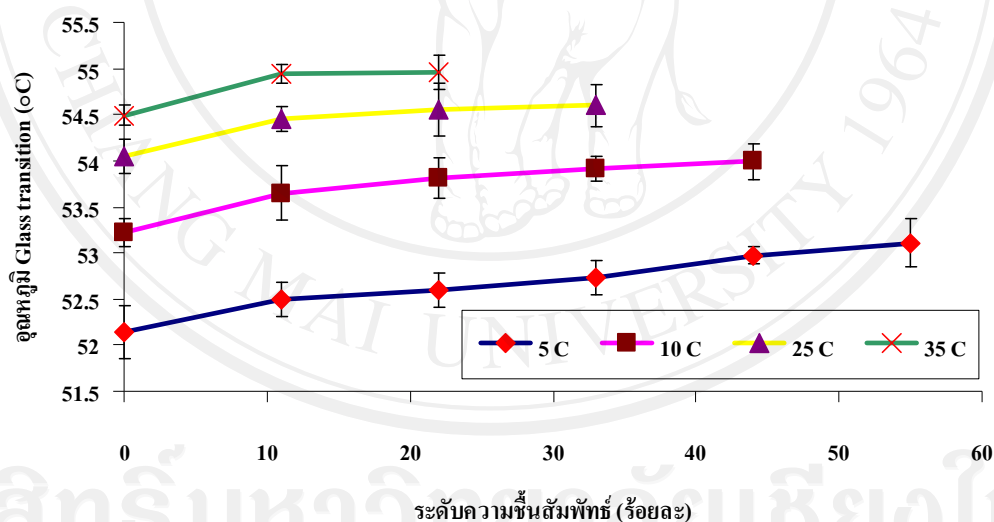
: 3) ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่กำกับค่าของข้อมูลตามแนวนอนที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

: 4) ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่กำกับค่าของข้อมูลตามแนวตั้งที่แตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

: 5) ND หมายถึง ไม่สามารถวัดค่าความชื้นได้เนื่องจากน้ำลำไยผงเปลี่ยนสถานะจาก amorphous ไปเป็น rubbery

จากตารางที่ 4.13 พบว่า ความหนาแน่นของอนุภาคผงทุกระดับความชื้นสัมพัทธ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่ออุณหภูมิและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคผงของน้ำลำไยผงจะเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของอนุภาคผงเป็นปริมาตรที่แท้จริงของอนุภาคผงน้ำลำไยโดยไม่รวมปริมาตรของช่องว่าง ทั้งช่องว่างภายในอนุภาคหรือช่องว่างระหว่างอนุภาค อาศัยหลักการแทนที่ช่องว่างด้วยตัวทำละลายที่ไม่ละลายอนุภาคผง ซึ่งค่าที่ได้ อาจแตกต่างกันออกไปหรือต่ำกว่าค่าที่เป็นจริงโดยขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวทำละลายที่ใช้ในการแทรกเข้าแทนที่ช่องว่างหรือรูพรุนต่างๆ (จักรพันธ์, 2551) ความหนาแน่นของอนุภาคผงจะเพิ่มขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของอนุภาคผงของ Starch มีค่าเท่ากับ 1500 kg/m^3 ซึ่ง α -Glucose มีค่าเท่ากับ 1544 kg/m^3 และ β -Glucose มีค่าเท่ากับ 1562 kg/m^3 (Rahman, 1995)

4.4 ผลของความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่ออุณหภูมิกลาสทรานซิชัน



รูปที่ 4.22 อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของน้ำลำไยผง

จากรูปที่ 4.15 แสดงการวิเคราะห์หาอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ของน้ำลำไยผง พบว่าที่อุณหภูมิ 5°C มีค่า T_g อยู่ในช่วง $52.14-53.11^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 10°C มีค่า T_g อยู่ในช่วง $53.22-53.99^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 25°C มีค่า T_g อยู่ในช่วง $54.05-54.60^\circ\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 35°C มีค่า T_g อยู่ในช่วง $54.49-54.96^\circ\text{C}$ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิการเก็บรักษาและระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นค่า T_g จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิการเก็บรักษาสูงขึ้น ปริมาณความชื้นของน้ำลำไยผงลดลง ทำให้ค่า T_g สูงขึ้น อาหารผงที่มี

ปริมาณความชื้นต่ำและมีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาจะทำให้สามารถเก็บรักษาได้โดยไม่เปลี่ยนสถานะ แต่อย่างไรก็ตามถ้าอาหารผงมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า T_g จะลดลง เพราะฉะนั้นอาหารที่เก็บที่อุณหภูมิห้องจะมีความเสี่ยงมากในการเกิดการเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลวหนืดเนื่องจากมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Kurozawa, *et al.*, 2009) ซึ่งน้ำลำไยผงที่ศึกษานี้มีค่า T_g สูงกว่าอุณหภูมิการเก็บรักษา แต่ต้องควบคุมสภาวะการเก็บรักษา โดยที่ระดับความชื้นสูงน้ำลำไยผงจะดูดความชื้น ทำให้น้ำลำไยผงเหนียวเกาะกันเป็นก้อน การเติมมอลโทเดกซ์ทรินเพื่อเพิ่มค่า T_g และป้องกันไม่ให้ผลิตภัณฑ์เกิดความเหนียว (stickiness) จึงได้รับความนิยมในการผลิตน้ำผลไม้ผง (พีรพล, 2550)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved