

บทที่ 4

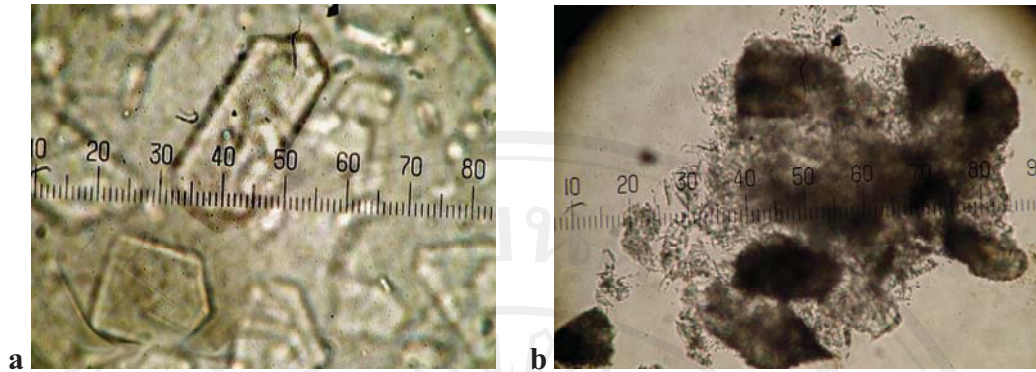
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึก

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึก จากสุภาพารัม ผึ้ง อ.แมริม จ.เชียงใหม่ ก่อนจะนำไปละลายผลึกด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงและการแช่ในอ่างน้ำร้อนได้ผลดังต่อไปนี้

4.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึกเริ่มต้น แสดงผลดังตารางที่ 4.1 โดยพบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึกมี ค่าความสว่าง (L) เท่ากับ 69.33 และมีค่า a เท่ากับ 2.61 โดย a ที่มีค่าเป็นบวก แสดงว่ามีสีค่อนข้างแดง ส่วนค่า b ของตัวอย่าง น้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึก เท่ากับ 29.08 โดย b ที่มีค่าเป็นบวก แสดงว่ามีสีค่อนข้างเหลือง ซึ่งแสดงว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึกมีโทนสีออกสีเหลืองแดงหรือเหลืองส้ม ค่าความหนืดของ น้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลึก มีค่าความหนืดเท่ากับ 22295 mPa s โดยลักษณะผลึกของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน นั้นพบว่าผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันจะมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต มีทั้ง 5 และ 6 เหลี่ยม แสดงดังภาพที่ 4.1 (a) โดยผลึกที่มีขนาดใหญ่จะเกิดจากการซ้อนทับและรวมกลุ่มกันของ ผลึกรูปทรงเรขาคณิตเหล่านี้ แสดงดังภาพที่ 4.1 (b) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปผลึกน้ำผึ้งจะมีการขยายขนาดทั้งแนวกว้างและแนวยาว เกิดจากการซ้อนทับกันของผลึกจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลึกเดี่ยวที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าแทรกระหว่างช่องว่างของผลึกขนาดใหญ่ จึงเกิดการรวมตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (ชนากร และจิตติธัน, 2551)



ภาพที่ 4.1 ลักษณะผลึกของน้ำผึ้งดอกทานตะวันเริ่มต้น สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ (a) กำลังขยาย 40 เท่า และ (b) กำลังขยาย 4 เท่า

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตผลึก

ตัวอย่าง	ค่าสี			ความหนืด (mPa s)
	L	a	b	
น้ำผึ้งดอกทานตะวันตผลึก	69.33 ± 0.14	2.61 ± 0.07	29.08 ± 0.22	22295 ± 124.90

4.1.2 สมบัติทางเคมีของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตผลึก

จากตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันตผลึกมีความชื้น (ฐานเปียก) ร้อยละ 19.29 ซึ่งอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด คือไม่เกินร้อยละ 21 (Codex Alimentarius Commission, 2001) และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 80.71 โดยคิดเป็นปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในน้ำ ร้อยละ 77.85 และค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) เท่ากับ 0.60

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางเคมีของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลูก

สมบัติทางเคมี	ปริมาณ
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	19.29 ±0.14
2. ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	80.71 ±0.14
3. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (ร้อยละ)	77.85 ±0.92
4. ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w)	0.60 ±0.03
5. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	3.50 ±0.05
6. น้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	77.15 ±0.16
7. น้ำตาลรีดิวิซ์ (ร้อยละ)	73.49 ±1.74
8. ฟรักโทส (ร้อยละ)	35.08 ±0.75
9. กลูโคส (ร้อยละ)	40.73 ±0.53
10. ซูโครส (ร้อยละ)	0.68 ±0.01
11. มอลโทส (ร้อยละ)	0.65 ±0.06
12. กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ วิธี DPPH radical scavenging activity (ร้อยละ)	77.04 ±0.86
13. กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ (ร้อยละ) วิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP)	96.05 ±0.06
14. ปริมาณ Hydroxymethylfurfural (mg/kg)	5.37 ±0.11
15. ปริมาณ Diastase activity (Gothe-Scale)	13.17 ±0.27

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลูก เท่ากับ 3.65 ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานผลิตภัณฑ์น้ำผึ้ง คือ 3.2-4.5 (Codex Alimentarius Commission, 2001)

ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่พบในน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลูก เท่ากับร้อยละ 77.15 คิดเป็นน้ำตาลรีดิวิซ์ ร้อยละ 73.49 ปริมาณน้ำตาลที่พบสูงที่สุดคือกลูโคส ร้อยละ 40.73 รองลงมาคือฟรักโทส ร้อยละ 35.08 โดยสัดส่วนปริมาณฟรักโทสต่อกลูโคสเท่ากับ 1.16 และมีสัดส่วนกลูโคสต่อปริมาณน้ำเท่ากับ 2.1 โดยปริมาณน้ำที่พบในตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลูกเริ่มต้นคือร้อยละ 19.29 ซึ่งถ้าหากพบว่าน้ำผึ้งมีอัตราส่วนฟรักโทสต่อกลูโคส น้อยกว่า 1.14 และมีอัตราส่วนกลูโคสต่อปริมาณน้ำ มากกว่าหรือเท่ากับ 2.1 จะส่งผลให้น้ำผึ้งตกลูกได้ง่าย (White *et al.*, 1974) ส่วนปริมาณซูโครสที่พบเท่ากับ ร้อยละ 0.68 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำผึ้งคือไม่เกินร้อยละ 5 (Codex Alimentarius Commission, 2001)

เมื่อวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ตกผลึกด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity พบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระร้อยละ 54.93 และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กและสารประกอบเฟอร์ริไซยาไนด์ที่ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปเฟอร์รัสที่เพิ่มขึ้น (Ferreira *et al.*, 2009) พบกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระเท่ากับร้อยละ 88.75

ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์พิวรัลที่พบในตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกผลึกเริ่มต้นเท่ากับ 5.37 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่อยู่ในระดับมาตรฐาน โดยในมาตรฐานของ Codex ระบุว่าน้ำผึ้งสำหรับบริโภคจะมีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์พิวรัลได้ไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม หรือไม่เกิน 40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ USDA (Bogdanov *et al.*, 1999) และการวิเคราะห์ค่า Diastase activity พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกผลึกเริ่มต้นมีค่า Diastase activity เท่ากับ 13.17 Gothe-Scale ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของน้ำผึ้งที่ระบุคือไม่น้อยกว่า 3 Gothe-Scale (Codex Alimentarius Commission, 2001) ดังนั้นน้ำผึ้งดอกทานตะวันจึงมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ถึงแม้ว่าจะเกิดการตกผลึกแล้วก็ตาม เมื่อนำน้ำผึ้งเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกผลึกพบว่าน้ำผึ้งมีส่วนที่เป็นของแข็งคิดเป็นร้อยละ 40-45 ของน้ำหนักทั้งหมด

4.2 การละลายผลึกน้ำผึ้งโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

นำน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกผลึกที่บรรจุในขวดปริมาตร 150 มิลลิลิตร มาละลายผลึกโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับของแอมพลิจูด ร้อยละ 20 25 30 35 และ 40 และวิเคราะห์การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงโดยการบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงทุกนาที ที่ระดับแอมพลิจูดแตกต่างกัน ด้วยการจุ่มโพรบเทอร์โมคัปเปิลลงในน้ำผึ้ง 4 ตำแหน่ง ในแนวระนาบเดียวกัน ได้แก่ จุดศูนย์กลางของบีกเกอร์ ที่ระยะ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ และ $\frac{3}{4}$ ของรัศมีของบีกเกอร์ และ 3 ตำแหน่ง ในแนวรัศมีเดียวกัน ได้แก่ ที่ระดับความลึก $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{2}$ และ $\frac{3}{4}$ ของตัวอย่าง จนกระทั่งผลึกในน้ำผึ้งละลายหมด พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 สมบัติการแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ในระหว่างการทดสอบการแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงในน้ำผึ้งพบว่าเมื่อระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของน้ำผึ้งจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากระดับแอมพลิจูดที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดแคปพิเทชันได้มากขึ้น Sala *et al.*, (1995) รายงานว่าในสภาวะที่ฟองอากาศแตกนั้น

มีผลทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 4,727 องศาเซลเซียส และความดันสูงถึง 2,000 atm ดังนั้นเมื่อเกิดแคปวิเทชันมากขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำผึ้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ระยะเวลาและอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

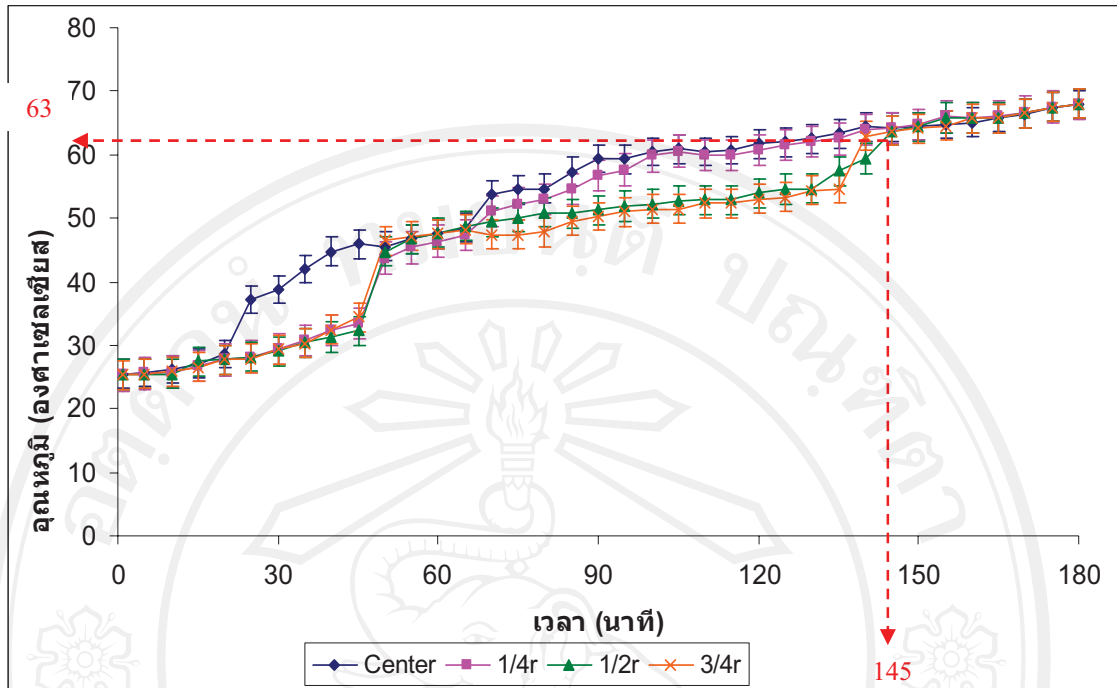
ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	
		เริ่มต้น	สุดท้าย
20	3	25 ±1	69.5 ±1.5
25	2.5	25 ±1	72.0 ±1.0
30	2	25 ±1	75.0 ±2.0
35	1.5	25 ±1	78.5 ±1.5
40	1	25 ±1	82.5 ±2.5

นอกจากนี้เมื่อระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ระยะเวลาในการละลายผลึกลดลงด้วย จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อละลายผลึกด้วยระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20 ใช้เวลา 3 ชั่วโมง ในการละลายผลึกน้ำผึ้งจนหมด และเมื่อเพิ่มระดับแอมพลิจูดขึ้นเป็นร้อยละ 25 30 35 และ 40 พบว่าเวลาที่ใช้ในการละลายผลึกลดลงเท่ากับ 2.5 2 1.5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Miles *et al.*, (1999) ซึ่งศึกษาการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการละลายอาหารแช่แข็ง พบว่าเมื่อระดับความเข้มของคลื่นอัลตราซาวด์เพิ่มขึ้น อัตราเร็วในการละลายของผลึกน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้นด้วย โดยเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการเกิดแคปวิเทชันนั่นเอง

4.2.1.1 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ในแนวระนาบเดียวกัน

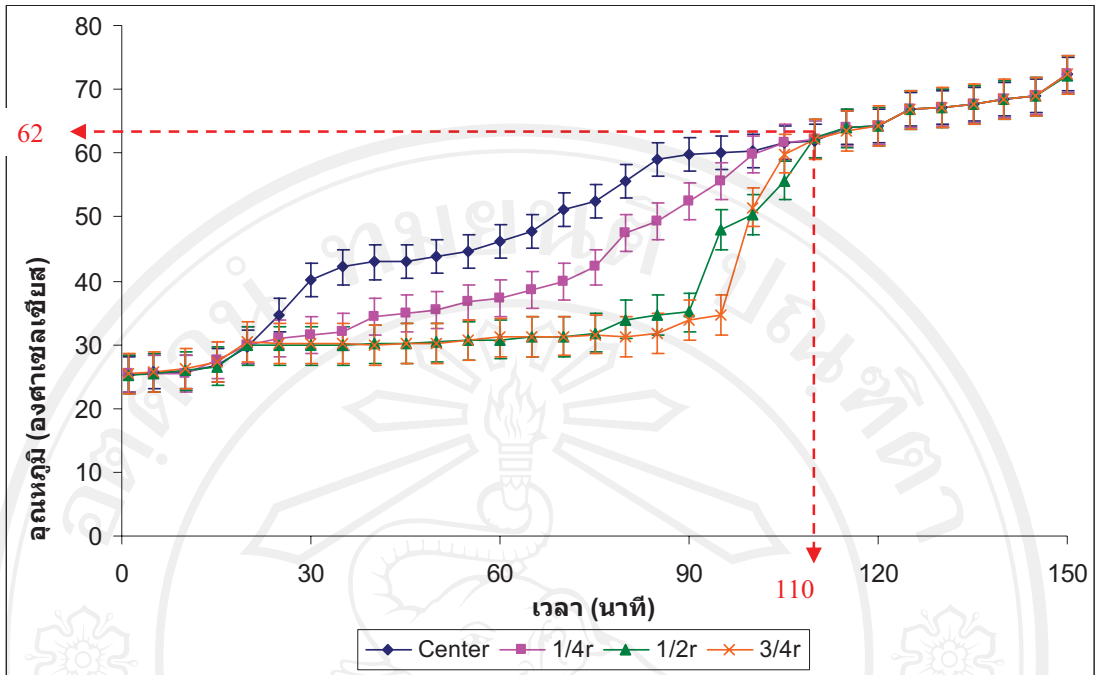
การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ทุกระดับแอมพลิจูด ในแนวระนาบเดียวกัน หากรัศมีแตกต่างกัน การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ในตำแหน่งที่อยู่ใกล้จุดกำเนิดคลื่นจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เร็วกว่าตำแหน่งอื่นๆ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่วัดได้ที่จุดศูนย์กลางของบีกเกอร์จะเกิดขึ้นเร็วที่สุด รองลงมาคือตำแหน่งที่ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{2}$ และ $\frac{3}{4}$ ของรัศมีของบีกเกอร์ตามลำดับ เนื่องจากที่จุดศูนย์กลางของบีกเกอร์เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์มากที่สุด ตัวอย่างจึงเกิดการสั่นได้มากและสามารถเกิดแคปวิเทชันได้มากส่งผลให้อุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้นได้เร็ว (Palma and Barroso, 2002) จากการศึกษาพบว่าน้ำผึ้งตกผลึกมีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบผสม (complex heating) โดยช่วงแรกเส้นกราฟจะเพิ่มขึ้นอย่าง

ซ้ำๆ เนื่องจากน้ำผึ้งมีความหนืดสูงเพราะมีผลึกจำนวนมาก การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจึงเป็นแบบการนำ (conductive heating) โดยเกิดการส่งผ่านความร้อนระหว่างอนุภาคของผลึกที่ไม่มีการเคลื่อนที่ การส่งผ่านความร้อนจึงเกิดได้ช้า (ทนง, 2549) นอกจากนี้ในของเหลวที่มีความหนืดสูง การเกิดแคปพิเทชันจะเกิดได้ยาก (Mason, 1998) จึงเกิดความร้อนได้ช้า และเมื่อผลึกเริ่มละลายส่งผลให้ความหนืดของน้ำผึ้งลดลง จึงสามารถเกิดแคปพิเทชันได้เพิ่มขึ้น รวมทั้งโมเลกุลของน้ำตาลสามารถเคลื่อนที่ได้มากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพา (convective heating) ความร้อนจะถูกถ่ายเทโดยโมเลกุลของอาหารมีการเคลื่อนที่ไปด้วย อาทิเช่น อาหารที่มีความหนืดต่ำและผลิตภัณฑ์ที่มีขึ้นอาหารขนาดเล็ก เมื่อได้รับความร้อนส่วนที่เป็นของเหลวจะได้รับความร้อนก่อน ทำให้ความหนาแน่นน้อยลงจึงเคลื่อนที่ไปด้านบน และส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและมีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนลงมาด้านล่าง จึงเกิดการหมุนเวียนขึ้น การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดได้เร็ว (วิล, 2545) ดังนั้นกราฟในช่วงต่อมาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และภายหลังจะพบว่าอุณหภูมิทุกๆจุดจะเพิ่มขึ้นจนระดับอุณหภูมิเท่ากัน จนกระทั่งผลึกถูกละลายจนหมดอุณหภูมิทุกจุดในบีกเกอร์จึงเท่ากัน จากภาพที่ 4.2 ลักษณะการส่งผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20 ในน้ำผึ้งตกผลึก ที่ช่วงเวลา 0 ถึง 145 นาที การส่งผ่านความร้อนจะเป็นแบบการนำ และเมื่อผลึกถูกละลายเป็นของเหลว การส่งผ่านความร้อนจึงเปลี่ยนเป็นแบบการพา ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะเกิดได้ดีกว่า สังเกตได้ว่าที่เวลา 145 นาที อุณหภูมิของน้ำผึ้งจะอยู่ระหว่าง 63 ± 2 องศาเซลเซียส และพบว่าทุกตำแหน่งรัศมีเริ่มมีอุณหภูมิใกล้เคียง หลังจากนั้นอุณหภูมิแต่ละจุดในตัวอย่างจะเพิ่มขึ้นเท่ากันจนกระทั่งผลึกละลายหมด

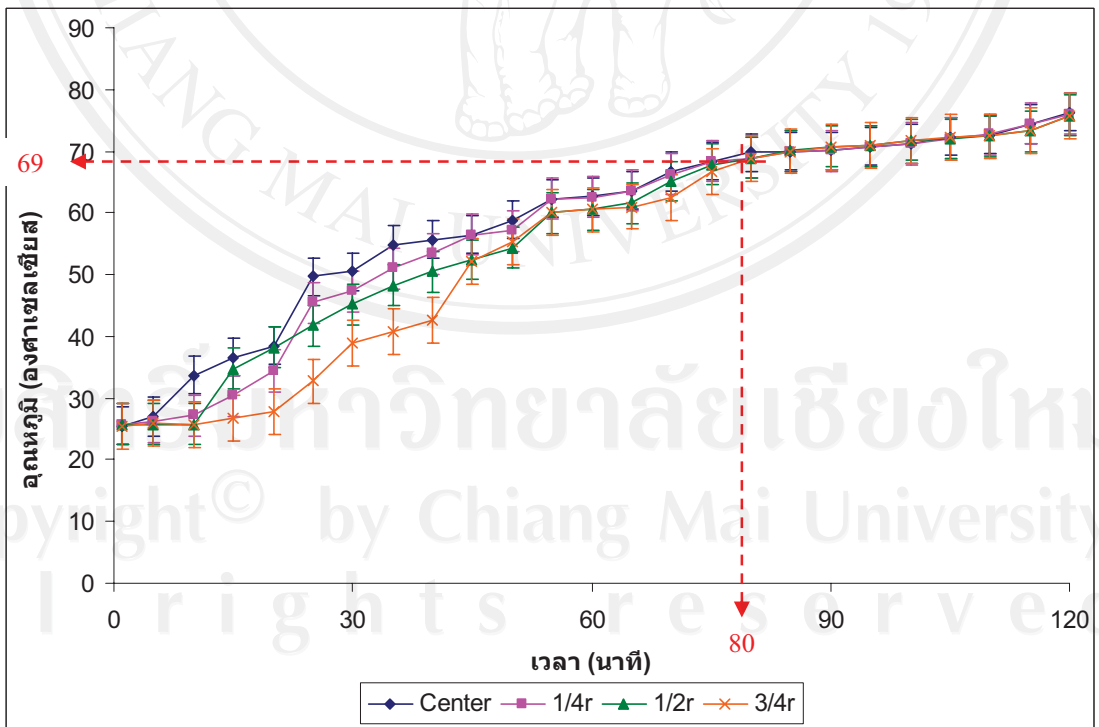


ภาพที่ 4.2 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ความลึก $\frac{1}{2}$ ของน้ำผึ้ง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20

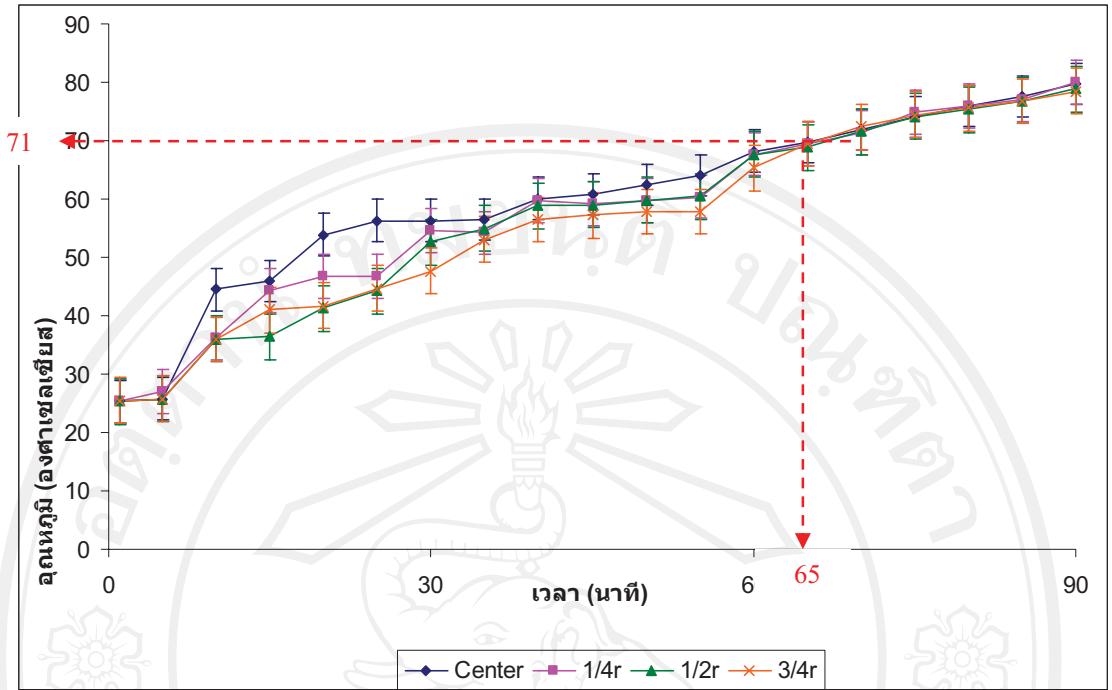
ลักษณะการแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ในน้ำผึ้งตกผลึก ที่ระดับแอมพลิจูดอื่นๆ พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกัน คือช่วงที่ผลึกยังละลายไม่หมดจะเกิดการแทรกผ่านความร้อนแบบการนำ โดยตำแหน่งรัศมีที่ใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นมาก จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิรวดเร็วกว่า เนื่องจากตัวอย่างได้รับคลื่นสูง ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ถึง 4.6 จนกระทั่งเมื่อผลึกละลายกลายเป็นของเหลว อุณหภูมิทุกตำแหน่งในตัวอย่างจึงเท่ากัน เพราะการถ่ายเทความร้อนแบบการพาโมเลกุลของสารสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้ทั้งระบบมีอุณหภูมิเท่ากัน โดยน้ำผึ้งจะเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพาเมื่อเข้าสู่อุณหภูมิ 62 ± 2 69 ± 2 71 ± 2 และ 74 ± 2 องศาเซลเซียส ที่เวลา 110 80 65 และ 40 นาที เมื่อละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 25 30 35 และ 40 ตามลำดับ แสดงว่าที่ระดับแอมพลิจูดสูงขึ้น การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ในน้ำผึ้งจะเกิดได้เร็วขึ้น



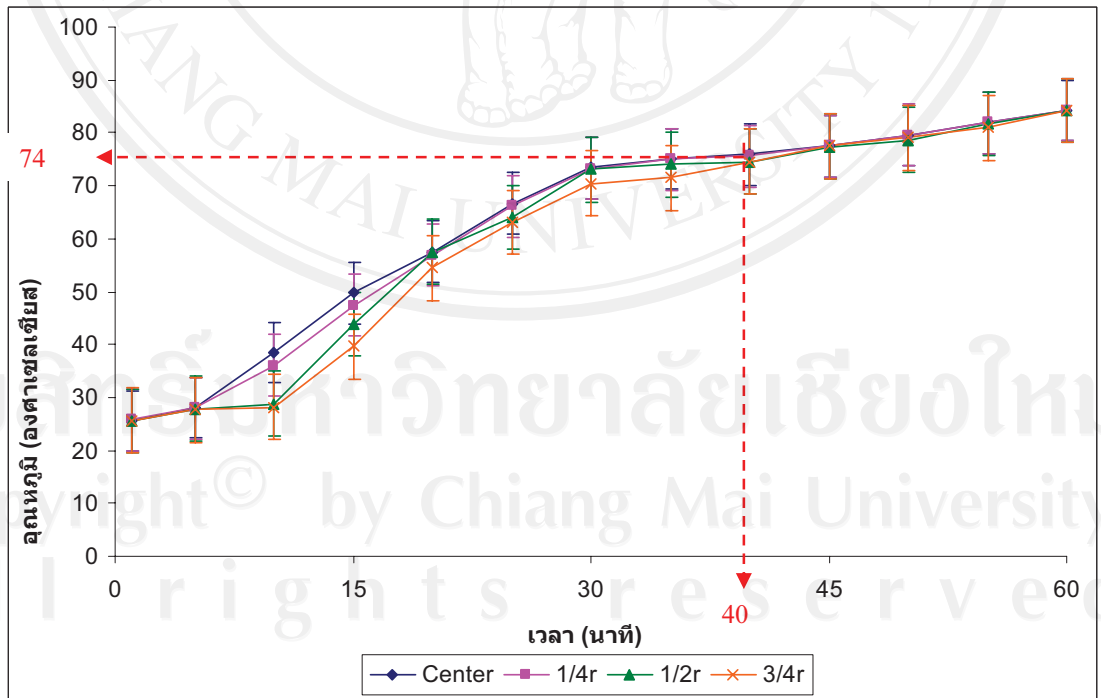
ภาพที่ 4.3 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ความลึก 1/2 ของน้ำผึ้ง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 25



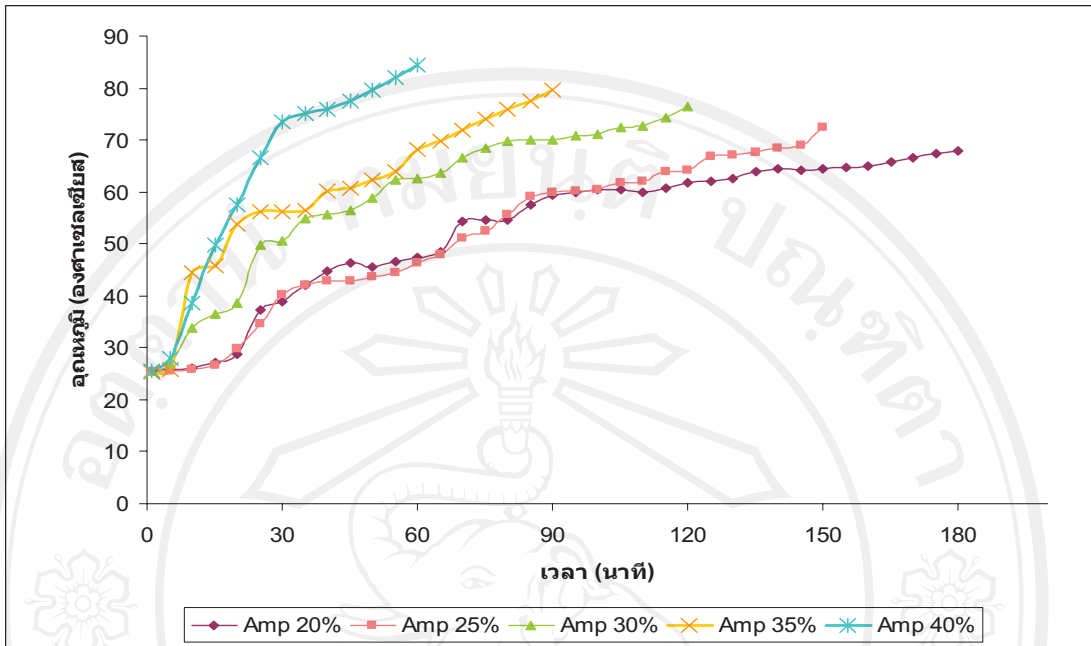
ภาพที่ 4.4 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ความลึก 1/2 ของน้ำผึ้ง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 30



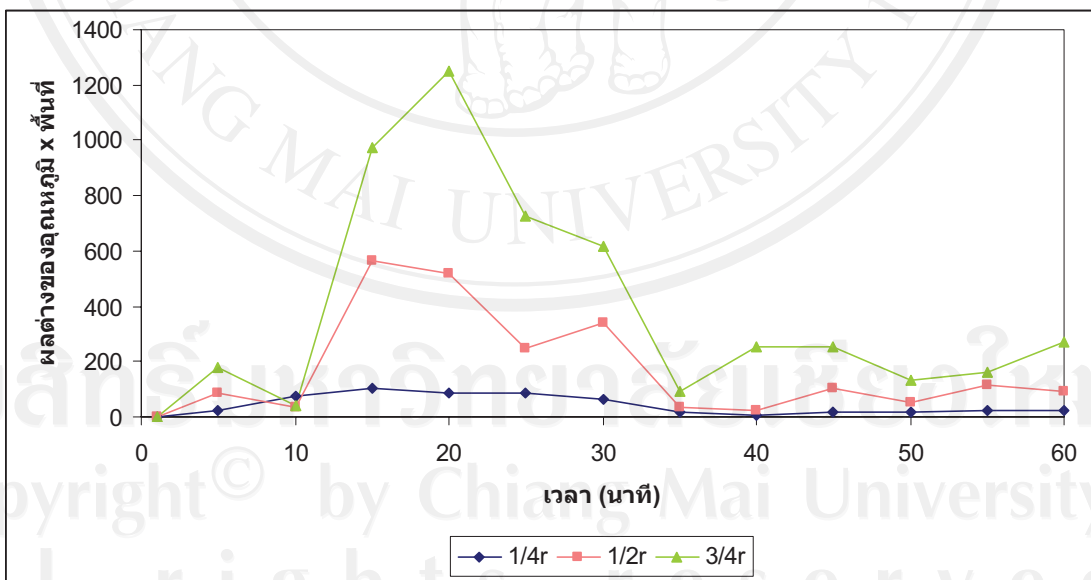
ภาพที่ 4.5 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ความถี่ 1/2 ของน้ำผึ้ง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 35



ภาพที่ 4.6 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ความถี่ 1/2 ของน้ำผึ้ง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40



ภาพที่ 4.7 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดต่างๆ ณ จุดศูนย์กลางของบีกเกอร์



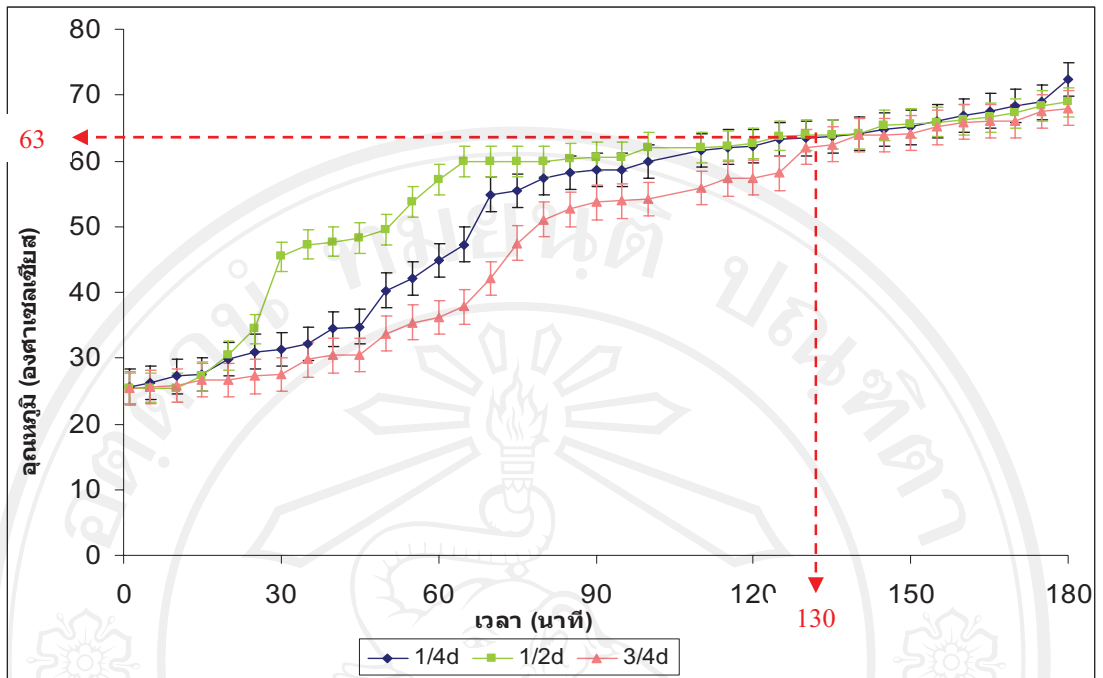
ภาพที่ 4.8 อัตราการแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 ที่รัศมีต่างๆ

เมื่อพิจารณาอัตราการแทรกผ่านความร้อนที่เกิดขึ้น พบว่าระยะของรัศมีมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เพราะเมื่อระยะรัศมีเพิ่มขึ้นระยะทางในการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย จากภาพที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าที่ทุกระยะรัศมีมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างไม่สม่ำเสมอในช่วงแรก เนื่องจากน้ำผึ้งยังมีการผสมกันระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลว การแทรกผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลจึงเป็นแบบผสมระหว่างการนำและการพา จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบางช่วงเกิดขึ้นช้า และบางช่วงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเมื่อผลึกละลายเป็นของเหลว ความหนืดของน้ำผึ้งจะมีค่าลดลง การถ่ายเทความร้อนจึงเปลี่ยนเป็นเป็นแบบการพา ส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทุกจุดในน้ำผึ้งสม่ำเสมอขึ้น และเมื่อผลึกน้ำผึ้งถูกละลายจนหมด อุณหภูมิทุกจุดในน้ำผึ้งจะเพิ่มขึ้นเท่ากัน และ ณ เวลาเท่ากัน เมื่อระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นน้อยจะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้เร็วกว่าและละลายได้เร็วกว่า ซึ่งสังเกตได้จากกราฟที่ระยะรัศมีที่ $\frac{1}{4} r$ จะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเร็วกว่ากราฟที่ระยะรัศมี $\frac{1}{2} r$ และ $\frac{3}{4} r$ ดังนั้นหากต้องการละลายผลึกน้ำผึ้งในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะต้องใช้ระยะเวลาในการละลายผลึกเพิ่มขึ้น

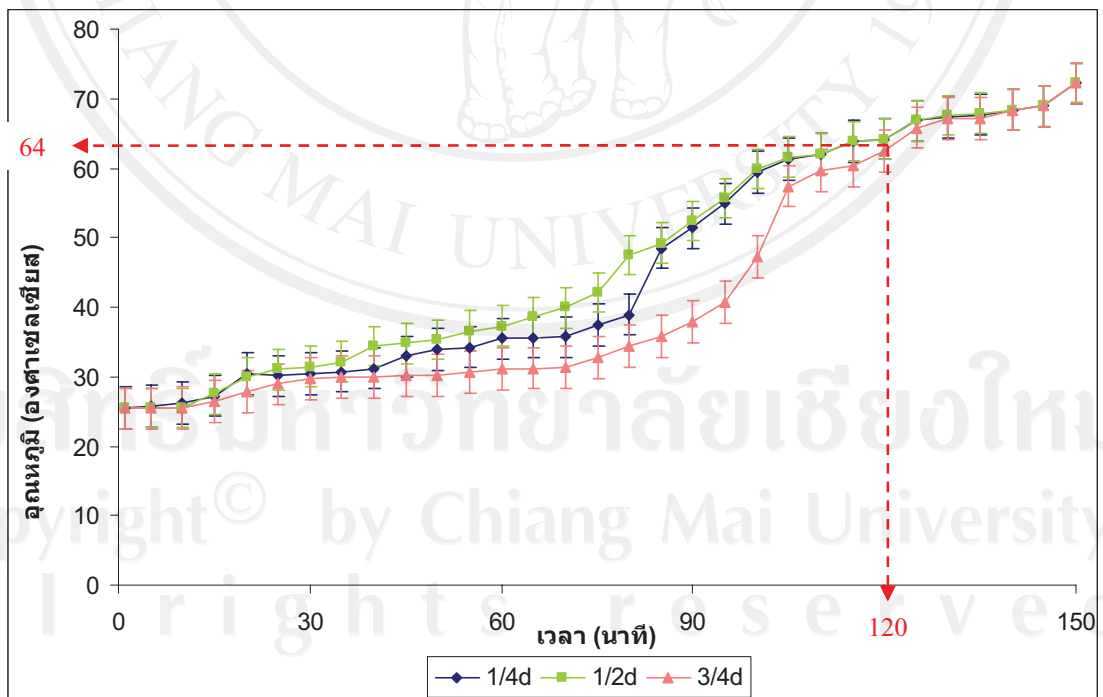
4.2.1.2 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับความลึกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์ในแนวรัศมีเดียวกัน ที่ระดับความลึกต่างกัน คือ ที่ระดับความลึก $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{2}$ และ $\frac{3}{4}$ ของตัวอย่าง พบว่าทุกแอมพลิจูดให้ผลเช่นเดียวกันคือระดับความลึก $\frac{1}{2}$ ของตัวอย่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่ใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นมากที่สุด จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเร็วกว่าที่ระดับความลึก $\frac{1}{4}$ และ $\frac{3}{4}$ ของตัวอย่าง เนื่องจากการอยู่ใกล้แหล่งกำเนิดคลื่นมากจะได้รับแรงสั่นมาก ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนแก๊สของฟองอากาศเกิดได้ดี จึงเกิดแคปวิเทชันได้มาก (Sala *et al.*, 1995) อุณหภูมิบริเวณจุดศูนย์กลางจึงเพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าตำแหน่งความลึกอื่น ที่ระดับความลึก $\frac{3}{4}$ ของตัวอย่าง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ช้าที่สุด เนื่องจากเมื่อน้ำผึ้งละลายและเกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการพา โมเลกุลของสารจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ โดยส่วนที่ได้รับความร้อนก่อนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของผลึกน้ำผึ้งน้อยลงจึงลอยขึ้นด้านบน ดังนั้นส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งความหนาแน่นสูงกว่าจะตกลงมาข้างล่าง ส่งผลให้ระดับความลึกที่ $\frac{3}{4}$ ของตัวอย่างร้อนช้าที่สุด (วิไล, 2545)

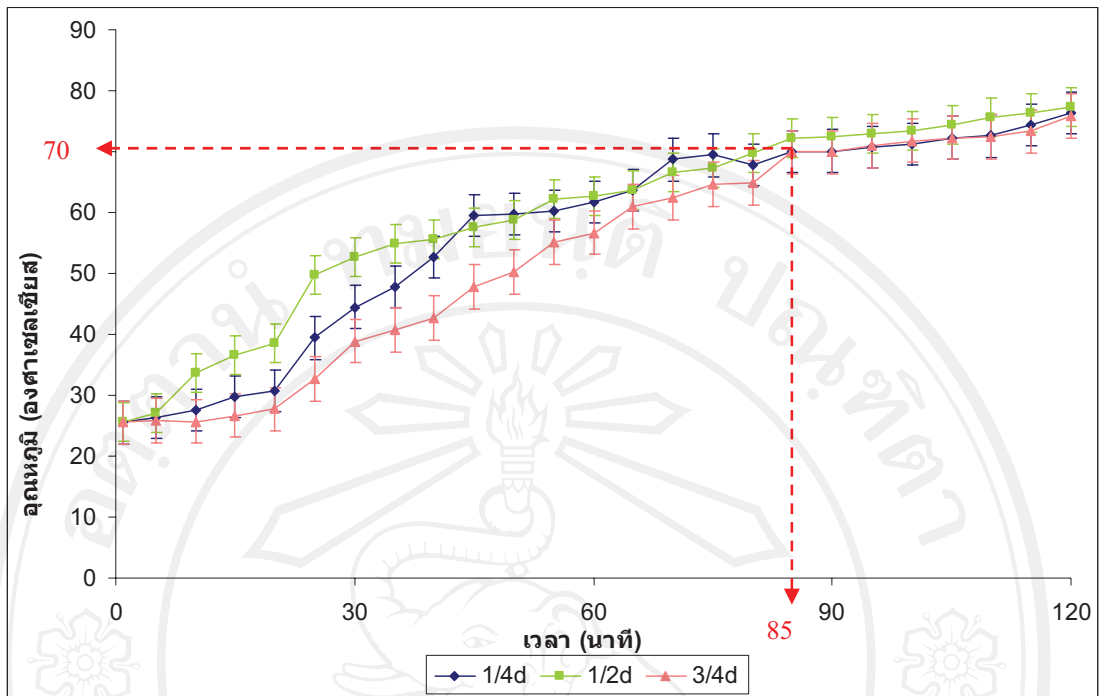
ที่ระดับความลึกต่างกันนี้ น้ำผึ้งจะเริ่มเข้าสู่การถ่ายเทความร้อนแบบการพา เมื่อมีอุณหภูมิที่ 63 64 70 71 และ 78 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลา 130 120 85 70 และ 45 นาที เมื่อละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20 25 30 35 และ 40 ตามลำดับ



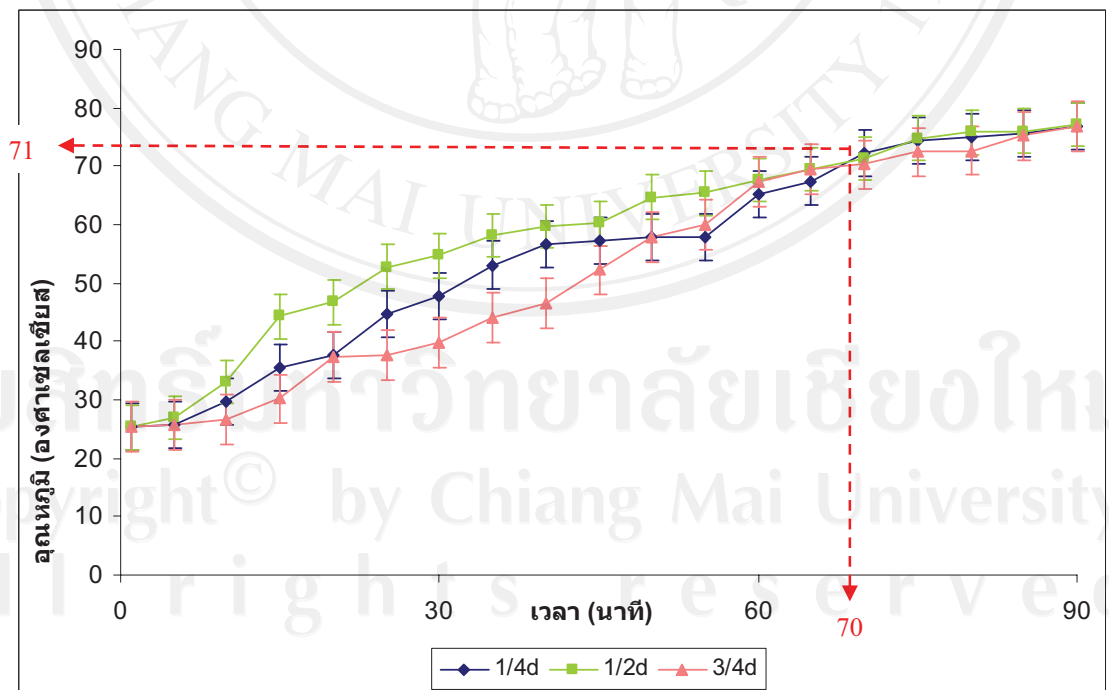
ภาพที่ 4.9 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ตำแหน่ง $\frac{1}{2}$ ของรัศมีของ บีกเกอร์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20



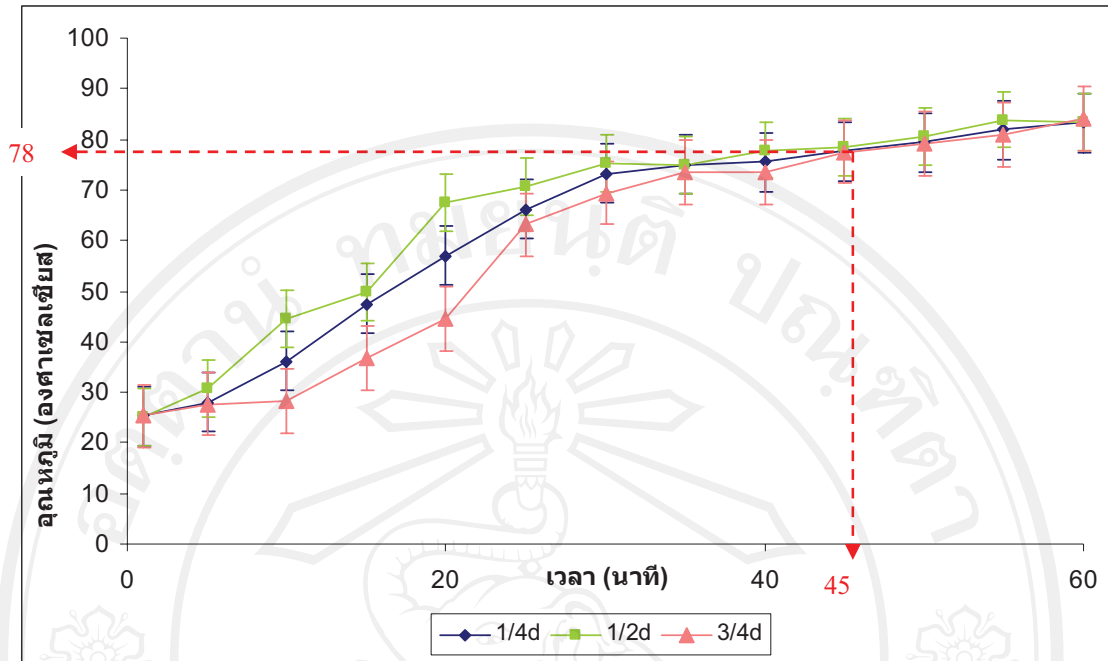
ภาพที่ 4.10 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ตำแหน่ง $\frac{1}{2}$ ของรัศมีของ บีกเกอร์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 25



ภาพที่ 4.11 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ตำแหน่ง $\frac{1}{2}$ ของรัศมีของ บีกเกอร์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 30



ภาพที่ 4.12 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ตำแหน่ง $\frac{1}{2}$ ของรัศมีของ บีกเกอร์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 35



ภาพที่ 4.13 การแทรกผ่านความร้อนของคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ ตำแหน่ง 1/2 ของรัศมีของ บีกเกอร์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40

4.2.2 สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ
ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูด 5 ระดับ แสดง
 ดังตารางที่ 4.4 ถึง ตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.4 ค่าสีและค่าความหนืดของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกผลึกเริ่มต้น เปรียบเทียบกับน้ำผึ้ง
 ดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	ค่าสี			ความหนืด (mPa s)
	L	a	b	
Control	69.01 ^a ±0.46	2.61 ^a ±0.07	29.08 ^c ±0.22	22295 ^a ±124.89
20	51.10 ^b ±0.54	-0.81 ^b ±0.04	51.70 ^{ab} ±1.14	5881 ^b ±39.94
25	50.88 ^b ±0.35	-0.45 ^b ±0.26	49.78 ^b ±0.72	5759 ^c ±6.00
30	50.77 ^b ±0.50	-0.48 ^b ±0.39	52.11 ^{ab} ±0.94	5955 ^b ±6.65
35	52.00 ^b ±1.71	-1.47 ^c ±0.33	52.43 ^{ab} ±3.25	5963 ^b ±10.39
40	52.52 ^b ±0.42	-1.44 ^c ±0.02	53.74 ^a ±0.79	5605 ^d ±6.92

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ
 ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าสีของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ไม่ผ่านการละลายผลึก
 (control) และน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ ความถี่ 20
 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับร้อยละแอมพลิจูดต่างกัน พบว่าค่าสีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
 ($P \leq 0.05$) โดยตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะมีค่าความสว่าง หรือ ค่า L ลดลง การที่ค่า
 ความสว่างของน้ำผึ้งลดลงนี้ เป็นผลจากการที่ผลึกกลูโคสในน้ำผึ้งถูกละลาย เนื่องจากผลึกกลูโคส
 ที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นสีเหลืองออกขาวขุ่น และผลึกยังมีสมบัติในการกระจายหรือสะท้อนแสงได้
 เมื่อวัดค่าความสว่างด้วยเครื่องวัดสี ผลึกจะสะท้อนแสงจากเครื่องวัดสีจึงได้ค่าความสว่างสูง ดังนั้น
 เมื่อผลึกน้ำตาลเหล่านี้ถูกละลายจึงส่งผลให้ค่าความสว่างของน้ำผึ้งลดลง (ขนิษฐา, 2550) น้ำผึ้งที่
 ผ่านการละลายผลึกแล้วจะมีค่า b เพิ่มขึ้น หรือหมายถึงมีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น ส่วนค่า a ของตัวอย่าง
 นั้นพบว่าจะลดลงจนมีค่าติดลบ โดยหมายถึงตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะแสดงออก

โทนสีเขียวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งการที่น้ำผึ้งมีค่าสีเหลืองและเขียวเพิ่มขึ้นนี้ สาเหตุหนึ่งเป็นเพราะผลึกกลูโคสถูกละลาย เพราะผลึกเหล่านี้นอกจากจะส่งผลต่อค่าความสว่างแล้วยังส่งผลต่อค่าสีของน้ำผึ้งด้วย โดยปริมาณผลึกที่ลดลงจะสัมพันธ์กับค่า a ที่ลดลง และผกผันกับค่า b ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ ขนิษฐา (2550) ที่พบว่าปริมาณผลึกในน้ำผึ้งดอกทานตะวันมีผลกับค่าสีเขียวและสีเหลืองของน้ำผึ้ง โดยปริมาณผลึกกลูโคสที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสีเหลืองและสีเขียวของน้ำผึ้งลดลง นอกจากปริมาณผลึกกลูโคสแล้ว ยังมีสาเหตุอื่นๆอีก เช่น การเกิดปฏิกิริยาการเมลไลเซชันของฟรักโทส (fructose caramelization reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบ non-enzymatic browning ที่เกิดกับน้ำตาล โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และส่งผลให้เกิด รงควัตถุสีน้ำตาลขึ้น (Vaikousi *et al.*, 2009) ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าสีของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกแล้วมีค่าเพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ได้รับคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 มีค่าความสว่าง (L) และ ค่าสีเหลือง (b) สูงที่สุด เท่ากับ 52.52 และ 53.74 ตามลำดับ และมีค่าสีแดง (a) เท่ากับ -1.44

น้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงที่ระดับแอมพลิจูดแตกต่างกัน พบว่ามีความหนืดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ความหนืดของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกนั้นมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก น้ำผึ้งมีสมบัติการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ดังนั้นค่าความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (ความเร็วที่ไ้วัด) ซึ่งค่าความหนืดของน้ำผึ้งจะแปรผันตามปริมาณของแข็งในน้ำผึ้ง เมื่อมีของแข็งมากย่อมมีแรงต้านทานการไหลมาก ส่งผลให้มีค่าความหนืดมาก (Nation Honey Board, 2007) ดังนั้นน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ประกอบด้วยผลึกกลูโคสจำนวนมากจึงมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้ว และพบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง เมื่อระดับแอมพลิจูดของคลื่นอัลตราซาวด์เพิ่มสูงขึ้นค่าความหนืดของน้ำผึ้งจะลดลง เพราะที่ระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดแคปิวเทชันและการเกิด surface contact area จะเพิ่มขึ้นด้วย ส่งผลให้อุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้น (Palma and Barroso, 2002) ดังนั้นผลึกกลูโคสจึงถูกละลายจนหมด และส่งผลให้ค่าความหนืดของน้ำผึ้งลดลง ดังตารางที่ 4.4 งานวิจัยของ Yanniotis *et al.* (2006) และ Sopade *et al.* (2002) พบว่าอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืด โดยความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากผลึกของกลูโคส เมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose monohydrate จะสามารถทนความร้อนได้ถึง 50 องศาเซลเซียส และเมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose anhydrous จะสามารถทนความร้อนได้ถึง 50-80 องศาเซลเซียส (Yong, 1975) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้ผลึกของกลูโคสละลายได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำ ดังตารางที่ 4.5 พบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งที่ละลายผลึก

โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับแอมพลิจูดแตกต่างกันนั้น มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ ที่ระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลึกกลูโคสละลายได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	ปริมาณความชื้น ^{ns} (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด ^{ns} (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็งที่ ละลายได้ (°Brix)
Control	19.29 ± 0.14	80.71 ± 0.14	77.85 ^c ± 0.92
20	19.60 ± 0.56	80.40 ± 0.56	80.05 ^a ± 0.07
25	19.56 ± 1.39	80.44 ± 1.39	79.55 ^b ± 0.07
30	19.65 ± 0.33	80.35 ± 0.33	79.45 ^b ± 0.07
35	19.48 ± 0.50	80.52 ± 0.50	79.30 ^b ± 0.14
40	18.76 ± 0.12	81.24 ± 0.12	79.45 ^b ± 0.07

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)
2.) ns หมายถึง ข้อมูลในแถวนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ^{ns}	ค่าความเป็นกรดต่าง ^{ns}
Control	0.60 ± 0.03	3.50 ± 0.05
20	0.59 ± 0.00	3.52 ± 0.06
25	0.59 ± 0.00	3.63 ± 0.01
30	0.59 ± 0.00	3.52 ± 0.12
35	0.59 ± 0.00	3.51 ± 0.11
40	0.59 ± 0.00	3.49 ± 0.07

หมายเหตุ 1.) ns หมายถึง ข้อมูลในแถวนี้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 น้ำผึ้งดอกทานตะวันตผลึก และที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์ กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ทุกตัวอย่าง มีปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็ง ทั้งหมด ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) และค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ($P>0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายผลึกไม่สูงพอที่จะเปลี่ยนสถานะของน้ำให้ กลายเป็นไอ แล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร จึงไม่เกิดการระเหยขึ้น (สุคนธ์, 2549) ดังนั้นเมื่อ ความชื้นของตัวอย่าง ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีจึงไม่มีการ เปลี่ยนแปลง โดยปกติปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าวอเตอร์แอกทิวิตี จะมีความสัมพันธ์กัน เพราะร้อยละของน้ำหนักคิดจากค่าความชื้นและปริมาณของแข็งทั้งหมด (Zamora *et al.*, 2006)

ตารางที่ 4.7 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้ คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ	
	DPPH radical scavenging activity (ร้อยละ)	Ferric reducing antioxidant power (ร้อยละ)
Control	77.04 ^a ±0.86	96.05 ^{ab} ±0.06
20	72.27 ^c ±2.20	95.65 ^b ±0.23
25	70.25 ^c ±1.45	95.63 ^b ±0.04
30	75.24 ^b ±0.86	96.12 ^a ±0.72
35	75.41 ^b ±0.45	96.20 ^a ±0.74
40	75.65 ^b ±1.35	96.08 ^{ab} ±1.66

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity การใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 20-40 มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) (ตารางที่ 4.7) เนื่องจาก สารต้านอนุมูลอิสระนั้นมีความไวต่อความร้อนจึงเกิดการเสียดสภาพได้ง่ายเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี อุณหภูมิสูง โดยอัตราการเสื่อมสภาพของสารต้านอนุมูลอิสระจะขึ้นกับอุณหภูมิและระยะเวลาใน การให้ความร้อน (Herbach *et al.*, 2006) จากการศึกษานี้พบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก โดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ช่วงระดับแอมพลิจูดร้อยละ 30 - 40 นั้นมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ

สูงกว่าช่วงระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20-25 เนื่องจากที่ระดับแอมพลิจูดสูงขึ้นผลึกน้ำผึ้งจะใช้เวลาในการละลายผลึกเร็วกว่าที่ระดับแอมพลิจูดต่ำ น้ำผึ้งจึงสัมผัสกับความร้อนในระยะเวลาที่สั้น (2 1.5 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ) ดังในตารางที่ 4.3 ส่งผลให้สารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้งเสื่อมสภาพน้อย ซึ่งสอดคล้องกับเมื่อวิเคราะห์ ด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power พบว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกแล้วมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก และพบว่าน้ำผึ้งที่ละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ช่วงระดับแอมพลิจูดร้อยละ 30-40 นั้น มีการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระเล็กน้อย แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยระดับกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเป็นผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดนี้จะมีสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระคล้ายกับสารต้านอนุมูลอิสระในธรรมชาติ (Manzocco *et al.*, 2001 and Nicoli *et al.*, 1997)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัลและกิจกรรมของเอนไซม์ไดเอสเทส ของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง

ระดับแอมพลิจูด (ร้อยละ)	hydroxymethylfurfural (mg/kg)	diastase activity (Gothe-Scale)
Control	5.37 ^c ±0.11	13.17 ^a ±0.27
20	7.39 ^a ±1.18	11.43 ^b ±0.16
25	8.18 ^a ±0.46	10.50 ^c ±0.28
30	8.05 ^a ±0.25	9.98 ^d ±0.28
35	7.74 ^a ±0.40	9.59 ^d ±0.23
40	6.30 ^b ±1.12	10.53 ^c ±0.28

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P\leq 0.05$)

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัล พบว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ทุกระดับแอมพลิจูดมีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัลสูงกว่าในน้ำผึ้งปกติ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) โดยเมื่อคลื่นอัลตราซาวด์เพิ่มระดับแอมพลิจูดขึ้นในช่วงร้อยละ 20 ถึง 40 อุณหภูมิของน้ำผึ้งก็จะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 68-85 องศาเซลเซียส และส่งผลให้สร้างไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟรัลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tosi *et al.* (2007) ที่พบว่าเมื่อ

ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างน้ำผึ้ง ที่อุณหภูมิ 60 ถึง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที สามารถทำให้ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเพิ่มขึ้นเป็น 24.3 ถึง 90.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากเดิมที่มีเพียง 5.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของกลูโคสและฟรักโทสในสภาวะที่เป็นกรด (Feather *et al.*, 1982) โดยความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเพิ่มสูงขึ้น (Tosi *et al.*, 2007) ในการศึกษาวิจัยนี้พบว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงระดับแอมพลิจูด ร้อยละ 20-35 ทำให้ปริมาณ ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลในน้ำผึ้งละลายผลึกเพิ่มสูงกว่าน้ำผึ้งปกติ 1.4-1.5 เท่า ขณะที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลในน้ำผึ้งละลายผลึกสูงกว่าน้ำผึ้งปกติ 1.2 เท่า เนื่องจากที่ระดับแอมพลิจูด ร้อยละ 40 ใช้เวลาในการละลายผลึกน้อยที่สุด ทำให้การเร่งปฏิกิริยาในการสร้างไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลจากความร้อนเกิดได้น้อย แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเพิ่มขึ้น ก็ยังอยู่ในระดับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งคือไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ Codex หรือ ไม่เกิน 40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ USDA และมาตรฐาน มอก. (Bogdanov *et al.*, 1999 ; มอก., 2526)

นอกจากนั้นพบว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะมีกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเตสลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเตสมักถูกใช้เป็นดัชนีเพื่อบ่งชี้คุณภาพของน้ำผึ้ง เนื่องจากไคเอสเตสเป็นเอนไซม์ที่พบในน้ำผึ้ง และมักเสื่อมสลายเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง หรือเก็บรักษาเป็นเวลานาน (Cheftel *et al.*, 1989) โดยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งควรมีกิจกรรมของเอนไซม์ ไม่น้อยกว่า 3 Gothe-Scale (Codex Alimentarius Commission, 2001) จากผลการทดลองพบว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 ระยะเวลาในการละลายผลึกจะสั้นเพียง 1 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.3) ส่งผลให้เอนไซม์ไคเอสเตสถูกทำลายน้อยลง โดยพบกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเตส 10.53 Gothe Scale ซึ่งอยู่ในระดับที่มาตรฐานกำหนด ในการทดลองนี้การใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในช่วงระดับแอมพลิจูดร้อยละ 20 – 40 อุณหภูมิสุดท้ายของผลิตภัณฑ์จะอยู่ระหว่าง 68 – 85 องศาเซลเซียส Gonnet *et al.*, (1964) รายงานว่าให้ความร้อนสูงแต่ระยะเวลาที่สั้น จะช่วยคงคุณภาพของเอนไซม์ไคเอสเตสได้ เมื่อให้ความร้อนน้ำผึ้ง ที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6-7 นาที เพื่อการพาสเจอร์ไรซ์จะไม่ทำลายกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเตสจนต่ำกว่าระดับมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดต่างๆ สรุปได้ว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดสูง จะช่วยลดระยะเวลาในการละลายผลึกกลูโคสลง และน้ำผึ้งจะสัมผัสกับความร้อนในระยะเวลาที่สั้นลง สามารถลดการสูญเสียของสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้งได้ โดยการ

ละลายผลึกน้ำผึ้งด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 หรือที่ระดับความสูงแอมพลิจูด 30 เมตร สามารถรักษาการเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระ และกิจกรรมของเอนไซม์ ไคเอสเทส ได้สูง รวมทั้งปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟวรัล พบว่ามีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดอื่นๆ และอยู่ในระดับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งคือไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ Codex หรือไม่เกิน 40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ USDA และมาตรฐาน มอก. (Bogdanov *et al.*, 1999 ; มอก., 2526) และไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในด้านอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เช่น ความชื้น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้ง รวมทั้งยังส่งผลดีต่อลักษณะปรากฏ โดยน้ำผึ้งที่ละลายผลึกแล้วจะมีความหนืดลดลง อยู่ในรูปของเหลวใส และมีสีเหลืองสว่างมากขึ้น

4.3 การละลายผลึกน้ำผึ้งโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

นำน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกละลายที่บรรจุในขวดปริมาตร 150 มิลลิลิตร ละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน โดยให้ความร้อน 3 ระดับ คือ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งผลึกละลายหมด และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันหลังจากที่ผ่านการละลายผลึกได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 ระยะเวลาและอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ	
		เริ่มต้น	สุดท้าย
50	25	25 ± 1	50 ± 1
55	15	25 ± 1	55 ± 1
60	10	25 ± 1	60 ± 1

จากตารางที่ 4.9 พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการละลายผลึกนั้นมีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเวลาที่ใช้ในการละลายผลึกจะลดลง เท่ากับ 25 15 และ 10 ชั่วโมง เมื่อละลายผลึกน้ำผึ้งที่อุณหภูมิ 50 55 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลึกน้ำผึ้งซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลึกของกลูโคส เมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose monohydrate สามารถทนความร้อนได้ 50 องศา

เซลเซียส และเมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose anhydrous จะสามารถทนความร้อนได้ถึง 50-80 องศาเซลเซียส (Yong, 1975) จึงทำให้ระยะเวลาในการละลายผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์จะละลายได้เร็วจึงสามารถลดระยะเวลาในการละลายผลิตภัณฑ์

4.3.1 สมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลิตภัณฑ์ โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

เมื่อระดับความร้อนหรือเวลาที่ใช้ในการละลายเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของน้ำผึ้งดอกทานตะวันมีแนวโน้มลดลง และมีค่าต่ำกว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ยังไม่ผ่านการละลายผลิตภัณฑ์ 4-5 เท่า เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่าความหนืดของน้ำผึ้ง โดยค่าความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Yanniotis *et al.*, 2006 และ Sopade *et al.*, 2002) เพราะค่าความหนืดของน้ำผึ้งแปรผันตามปริมาณของแข็งในน้ำผึ้ง เมื่อมีของแข็งมากย่อมมีแรงต้านทานการไหลมาก ส่งผลให้มีค่าความหนืดมาก (Nation Honey Board, 2007) ดังนั้นเมื่อของแข็งที่ละลายในน้ำหรือผลิตภัณฑ์ถูกละลายมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความหนืดของน้ำผึ้งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำที่ตรวจพบดังตารางที่ 4.11 น้ำผึ้งที่ละลายผลิตภัณฑ์โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ไม่ผ่านการละลายผลิตภัณฑ์ (control) ซึ่งเป็นผลจากการที่ผลิตภัณฑ์ถูกละลายได้ดีขึ้นเมื่อได้รับระดับอุณหภูมิในการละลายสูงขึ้น โดยค่าความหนืดที่ลดลงนี้จะส่งผลต่อการบรรจุ เนื่องจากสมบัติการไหลที่ดีขึ้น จะทำให้ง่ายต่อการบรรจุมากขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าสีและค่าความหนืดของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน ที่ผ่านการละลายผลิตภัณฑ์ โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าสี			ความหนืด (mPa s)
	L	a	b	
Control	69.01 ^a ±0.46	2.61 ^a ±0.07	29.08 ^c ±0.22	22295 ^a ±124.89
50	51.34 ^c ±0.98	-0.82 ^b ±0.07	54.14 ^a ±0.31	5145 ^c ±6.65
55	52.35 ^b ±0.94	-0.68 ^b ±0.36	53.00 ^b ±1.01	5351 ^b ±6.00
60	51.51 ^c ±0.59	-0.86 ^b ±0.12	54.18 ^a ±0.13	4443 ^d ±9.16

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ค่าสีของตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก (control) และผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่าค่าสีของน้ำผึ้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะมีค่าความสว่าง (L) ลดลง ($P \leq 0.05$) การที่ค่าความสว่างของน้ำผึ้งลดลง เป็นผลจากการที่ผลึกกลูโคสในน้ำผึ้ง ซึ่งมีลักษณะเป็นสีเหลืองออกขาวขุ่นถูกละลาย และผลึกยังมีคุณสมบัติในการกระจายหรือสะท้อนแสงได้ เมื่อวัดค่าความสว่างด้วยเครื่องวัดสี ผลึกจะสะท้อนแสงจากเครื่องวัดสี จึงได้ค่าความสว่างสูง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ ขนิษฐา (2550) ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความสว่างในน้ำผึ้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น ค่า b ที่เพิ่มขึ้น หมายถึงการแสดงออกถึงค่าสีเหลืองที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า a ของตัวอย่างนั้นจนมีค่าติดลบ หมายถึงตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะแสดงออกโทนสีเขียวเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน การเพิ่มขึ้นของค่าสีเหลืองและสีเขียวนี้ ผลส่วนหนึ่งเกิดจากการที่ผลึกกลูโคสถูกละลายหรือมีปริมาณลดลง หรือกล่าวได้ว่าปริมาณผลึกที่ลดลงจะสัมพันธ์กับค่า a ที่ลดลง และผกผันกับค่า b ที่เพิ่มขึ้น (ขนิษฐา, 2550) นอกจากนี้สาเหตุการเปลี่ยนแปลงของค่าสีอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการเมลไลเซชันของฟรุกโทส (fructose caramelization reaction) ที่สามารถส่งผลให้น้ำผึ้งมีสีที่เข้มขึ้น โดยความร้อนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา non-enzymatic browning ขึ้นกับน้ำตาลซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำผึ้ง และส่งผลให้เกิดรงควัตถุน้ำตาลขึ้น (Vaikousi *et al.*, 2009) ดังนั้นจึงทำให้ค่าสีของน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกแล้วแสดงออกในโทนสีที่เข้มขึ้น จากการทดลองนี้ตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง มีค่า L และ b สูงที่สุด เท่ากับ 52.79 และ +54.18 ส่วนที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณความชื้น ^{ns} (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด ^{ns} (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (°Brix)
Control	19.29 ±0.14	80.71 ±0.14	77.85 ^b ±0.92
50	19.31±0.02	80.69 ±0.02	76.75 ^c ±0.25
55	19.29 ±0.14	80.71 ±0.15	77.50 ^b ±0.00
60	19.05 ±0.28	80.95 ±0.28	78.65 ^a ±0.05

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

2.) ns หมายถึง ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ^{ns}	ค่าความเป็นกรดต่าง ^{ns}
Control	0.60 ±0.03	3.50 ±0.05
50	0.60 ±0.00	3.48 ±0.07
55	0.60 ±0.00	3.52 ±0.07
60	0.60 ±0.00	3.52 ±0.07

หมายเหตุ 1.) ns หมายถึง ข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

จากตารางที่ 4.11 และ 4.12 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการละลายไม่มีผลต่อปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายผลึกไม่สูงพอที่จะเปลี่ยนสถานะของน้ำให้กลายเป็นไอ แล้วเคลื่อนย้ายออกจากอาหาร จึงไม่เกิดการระเหยขึ้น (สุคนธ์, 2549) ดังนั้นเมื่อความชื้นของตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงจึงส่งผลให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโดยพื้นฐานแล้วปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและค่าวอเตอร์แอกทิวิตีจะมีความสัมพันธ์กัน (Zamora *et al.*, 2006) จากผลการวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวัน

ที่ผ่านการละลายผลึกโดยแช่ในอ่างน้ำร้อน ที่ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น หรือระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น จะมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.13) การใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส ส่งผลให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งละลายผลึกน้อยกว่าน้ำผึ้งที่ไม่ละลายผลึก 1-1.2 เท่า แสดงให้เห็นว่าเวลาในการให้ความร้อนมีผลต่อการเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระ

ตารางที่ 4.13 กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ	
	DPPH radical scavenging activity (ร้อยละ)	Ferric reducing antioxidant power (ร้อยละ)
Control	77.04 ^a ±0.86	96.05 ^a ±0.06
50	68.41 ^b ±3.38	95.43 ^{bc} ±0.05
55	63.02 ^c ±4.17	95.22 ^c ±0.33
60	73.36 ^{ab} ±1.66	95.53 ^b ±0.10

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง (ตารางที่ 4.9) มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงมากที่สุด เนื่องจากสารต้านอนุมูลอิสระสามารถเสื่อมสลายได้ง่ายเมื่ออยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง หรือเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน (Kirca and Cemeroglu, 2003) โดยตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำผึ้งที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการละลายผลึกสั้น (ตารางที่ 4.9) เช่นเดียวกับเมื่อวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power พบว่ากิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกแล้วจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงน้อยที่สุด คือ ตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการละลายผลึกมีความสัมพันธ์กับกิจกรรม

การต้านอนุมูลอิสระของน้ำผึ้ง โดยการใช้อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ตัวอย่างน้ำผึ้งสัมผัสกับความร้อน ในระยะเวลาที่สั้นลง และส่งผลให้กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระของตัวอย่างน้ำผึ้งลดลงน้อยกว่า การใช้อุณหภูมิต่ำ แต่ใช้เวลานานในการละลายผลึก โดยอัตราการเสื่อมสลายของสารต้าน อนุมูลอิสระจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น (Herbach *et al.*, 2006)

ตารางที่ 4.14 ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลและกิจกรรมของเอนไซม์ไดเอสเทส ของน้ำผึ้ง ดอกทานตะวัน ที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ระดับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Hydroxymethylfurfural (mg/kg)	diastase activity (Gothe-Scale)
Control	5.37 ^c ±0.11	13.17 ^a ±0.27
50	10.97 ^b ±0.61	10.85 ^b ±0.33
55	10.66 ^b ±0.86	10.71 ^b ±0.32
60	12.56 ^a ±0.52	8.87 ^c ±0.19

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัล พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกผลึกที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ที่ระดับอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัล เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) นอกจากนี้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นยังมีผลให้เกิดไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Garcia *et al.*, (1986) ที่ศึกษาโดยการให้ความร้อนแก่น้ำผึ้งที่อุณหภูมิ 45 และ 55 องศาเซลเซียส และตรวจวัดปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลทุก 1 ชั่วโมง พบว่าน้ำผึ้งจะมีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลเพิ่มขึ้นประมาณ 0.05 และ 0.31 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลเพิ่มขึ้น (Tosi *et al.*, 2004) เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวของกลูโคสและฟรักโทสในสถานะที่เป็นกรด (Feather *et al.*, 1982) ในการทดลองนี้พบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลเพิ่มสูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัล 12.56 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากเดิม 5.37 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตัวอย่างควบคุม) หรือมีปริมาณเพิ่มขึ้น 2.3 เท่า ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัลฟิวรัลที่เพิ่มขึ้นในทุกตัวอย่างนี้ยังอยู่ในระดับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งคือไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ

Codex หรือไม่เกิน 40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ USDA และมาตรฐาน มอก. (Bogdanov *et al.*, 1999 ; มอก.470, 2526)

จากการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการละลายผลึกเพิ่มขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสน้อยที่สุด คือ 8.87 จากเดิม 13.17 Gothe Scale ในน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ไม่ผ่านการละลายผลึก แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการทำลายเอนไซม์จะเพิ่มขึ้น ถึงแม้เวลาในการให้ความร้อนจะลดลงก็ตาม ดังแสดงในงานวิจัยของ Tosi *et al.* (2007) พบว่าเมื่อให้ความร้อนน้ำผึ้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสลดลง จาก 25.8 Gothe Scale เหลือเพียง 8.1 Gothe Scale แต่อย่างไรก็ตามกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส ที่ตรวจพบในทุกระดับอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในระดับ มาตรฐานกำหนดคือ ไม่น้อยกว่า 3 Gothe-Scale (Codex Alimentarius Commission, 2001)

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ สรุปได้ว่าการแช่น้ำผึ้งในอ่างน้ำร้อนที่ระดับอุณหภูมิสูง ช่วยลดระยะเวลาในการละลายผลึกน้ำตาลกลูโคส และส่งผลให้น้ำผึ้งสัมผัสกับความร้อนในระยะเวลาที่สั้นลง และสามารถลดการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระในน้ำผึ้งได้ โดยการละลายผลึกน้ำผึ้งด้วยอ่างน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สามารถรักษาการเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระไว้ได้มากที่สุด โดยมีกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสและปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัลยังอยู่ในระดับมาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งคือปริมาณกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส ไม่น้อยกว่า 3 Gothe-Scale (Codex Alimentarius Commission, 2001) และปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟิวรัล ไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ Codex หรือไม่เกิน 40 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามมาตรฐานของ USDA และมาตรฐาน มอก (Bogdanov *et al.*, 1999 ; มอก., 2526) รวมทั้งไม่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงทางเคมีในด้านอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เช่น ความชื้น ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้ง รวมทั้งยังส่งผลดีต่อลักษณะปรากฏ โดยน้ำผึ้งที่ละลายผลึกแล้วจะมีความหนืดลดลง อยู่ในรูปของเหลวใส และมีสีเหลืองสว่างมากขึ้น

4.4 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางประสาทสัมผัสของน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก

จากการศึกษาการละลายผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวัน โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับแอมพลิจูดแตกต่างกัน 5 ระดับ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการใช้ละลายผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันคือ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 และการละลายผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวัน โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนที่ระดับอุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ พบว่าระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการละลายผลึกน้ำดอกทานตะวัน คือ ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเปรียบเทียบคุณภาพของน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก โดยทั้ง 2 เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการละลายผลึกให้กลับสู่สภาพของเหลวเช่นเดิม

4.4.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี

การศึกษาเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน ที่ผ่านการละลายผลึกด้วยวิธีต่างกัน

วิธีการ	ค่าสี			ความหนืด (mPa.s)
	L	a	b	
Control	69.01 ^a ±0.46	2.61 ^a ±0.07	29.08 ^b ±0.22	22295 ^a ±124.89
คลื่นอัลตราซาวด์	52.52 ^b ±0.42	-1.44 ^c ±0.02	53.74 ^a ±0.79	5605 ^b ±6.92
อ่างน้ำร้อน	51.51 ^c ±0.59	-0.86 ^b ±0.12	54.18 ^a ±0.13	4443 ^c ±9.16

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

จากตาราง ที่ 4.15 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ไม่ผ่านการละลายผลึก (control) น้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ สภาวะที่เหมาะสม และการแช่ในอ่างน้ำร้อน ณ สภาวะที่เหมาะสม พบว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก โดยทั้ง 2 วิธี มีค่าความสว่าง (L) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำผึ้งที่ไม่ผ่านการละลายผลึก โดยการละลายผลึกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ทำให้น้ำผึ้งมีค่าความสว่างน้อยกว่าการละลายด้วยคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ค่า b มีค่าเป็นบวกแสดงออกถึงโทนสีเหลือง พบว่าทั้งสองวิธีมีค่า b ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนค่า a พบว่าตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนจะมีค่า a แสดงออกถึงโทนสีแดงมากกว่า แสดงว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนมีค่าสี

เข้มกว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์โดยการเปลี่ยนแปลงของค่าสีนี้เป็นผลจากการที่ฟลิกกลูโคส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำผึ้งถูกละลาย เนื่องจากฟลิกกลูโคสที่เกิดขึ้นนี้มีลักษณะเป็นสีเหลืองออกขาวขุ่น และฟลิกยังมีคุณสมบัติในการกระจายหรือสะท้อนแสงได้ เมื่อวัดค่าความสว่างด้วยเครื่องวัดสี ฟลิกจะสะท้อนแสงจากเครื่องวัดสีจึงได้ค่าความสว่างสูง ดังนั้นเมื่อฟลิกกลูโคสเหล่านี้ถูกละลายจึงส่งผลให้ค่าความสว่างของน้ำผึ้งลดลง นอกจากนี้แสดงว่าการละลายฟลิกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนซึ่งใช้เวลานานกว่า จะเกิดปฏิกิริยาการเมลไลเซชันของฟรักโทสได้มากกว่า เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่ถูกเร่งด้วยความร้อนเป็นเวลานาน ดังนั้นน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายฟลิกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนจึงมีสีเข้มกว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายฟลิกด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ ซึ่งน้ำผึ้งที่มีสีเข้มนี้อาจไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

น้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายฟลิกแล้ว มีค่าความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับตัวอย่างน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ยังไม่ผ่านการละลายฟลิก น้ำผึ้งมีสมบัติการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ดังนั้นค่าความหนืดจะไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน (ความเร็วที่ใช้วัด) ซึ่งค่าความหนืดของน้ำผึ้งจะแปรผันตามปริมาณของแข็งในน้ำผึ้ง เมื่อมีของแข็งมากย่อมมีแรงต้านทานการไหลมาก ส่งผลให้มีค่าความหนืดมาก (Nation Honey Board, 2007) ดังนั้นน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ประกอบด้วยฟลิกกลูโคสจำนวนมากจึงมีค่าความหนืดสูงกว่าน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายฟลิกแล้ว โดยน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายฟลิกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง และด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อน จะมีค่าความหนืดลดลง 3.9 และ 5.0 เท่า ตามลำดับ โดยความหนืดที่ลดลงนี้จะส่งผลดีต่อการบรรจุ เนื่องจากสมบัติการไหลที่ดีขึ้นทำให้ง่ายต่อการบรรจุมากขึ้น

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางเคมีของน้ำผึ้งดอกทานตะวันตกลูกที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง และการแช่ในอ่างน้ำร้อน

วิธีการ	ปริมาณความชื้น ^{ns} (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็ง ^{ns} ทั้งหมด (ร้อยละ)	ปริมาณของแข็ง ที่ละลายได้ (°Brix)	ค่าออกเทอร์เอกทวิตี ^{ns}	ค่าความเป็นกรดต่าง ^{ns}
Control	19.29 ±0.14	80.71 ±0.14	77.85 ^b ±0.92	0.60 ±0.03	3.50 ±0.05
คลื่นอัลตราซาวด์	18.76 ±0.12	81.24 ±0.12	79.45 ^a ±0.07	0.59 ±0.00	3.49 ±0.07
อ่างน้ำร้อน	19.05 ±0.28	80.95 ±0.28	78.65 ^a ±0.05	0.60 ±0.00	3.52 ±0.07

วิธีการ	กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระ	
	DPPH radical scavenging activity (ร้อยละ)	diastase activity (Gothé-Scale)
Control	77.04 ^a ±0.86	13.17 ^a ±0.27
คลื่นอัลตราซาวด์	75.41 ^{ab} ±1.35	10.53 ^b ±0.28
อ่างน้ำร้อน	73.36 ^b ±1.66	8.87 ^c ±0.19

วิธีการ	Ferric reducing antioxidant power ^{ns} (ร้อยละ)	Hydroxymethylfurfural (mg/kg)
Control	96.05 ±0.06	5.37 ^b ±0.11
คลื่นอัลตราซาวด์	96.08 ±1.66	6.30 ^b ±1.12
อ่างน้ำร้อน	95.53 ±0.10	12.56 ^a ±0.52

หมายเหตุ 1.) ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงข้อมูลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (P≤0.05)

2.) ns หมายถึง ข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีพบว่าปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าวอเตอร์ แอกทีวิตี (a_w) และค่าความเป็นกรดต่างของน้ำผึ้งทั้งก่อนละลายและหลังละลายผลึกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) น้ำผึ้งที่ผ่านละลายผลึกโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์และการแช่ในอ่างน้ำร้อน มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้มากกว่า น้ำผึ้งที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) เนื่องจากผลึกของน้ำตาลกลูโคส เมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose monohydrate จะสามารถทนความร้อนได้ถึง 50 องศาเซลเซียส และเมื่ออยู่ในรูปของ α -D-glucose anhydrous จะสามารถทนความร้อนได้ 50-80 องศาเซลเซียส (Yong, 1975) ดังนั้นการละลายผลึกด้วยความร้อนแบบปกติที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับแอมพลิจูด ร้อยละ 40 ซึ่งทำให้อุณหภูมิของน้ำผึ้งสูงถึง 83 องศาเซลเซียส (ตารางที่ 4.3) ดังนั้นจึงมีผลให้ผลึกกลูโคสละลายได้หมด

เมื่อวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH radical scavenging activity พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึก โดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 มีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงเล็กน้อย ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำผึ้งที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึก ส่วนน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึก โดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อวิเคราะห์กิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power พบว่าน้ำผึ้งที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึกและผ่านการละลายผลึก โดยทั้ง 2 วิธีมีกิจกรรมการต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าปริมาณ ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลของน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อน มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) เมื่อเทียบกับน้ำผึ้งที่ไม่ผ่านการละลายผลึก ส่วนการละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงพบว่าการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัล ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของกลูโคสและฟรักโทสในสภาวะที่เป็นกรด (Feather *et al.*, 1982) โดยความร้อนจะเป็นตัวเร่งให้ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลให้เพิ่มสูงขึ้น (Tosi *et al.*, 2004) ผลการศึกษาความเป็นพิษหรือผลเสียจากการได้รับไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลต่อความผิดปกติทางพันธุกรรมหรือการกลายพันธุ์นั้นยังไม่ชัดเจน แต่ไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลถือว่าเป็นสารประกอบที่ไม่เป็นที่ต้องการ (Ameur *et al.*, 2006)

จากการศึกษานี้แสดงว่าการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนซึ่งใช้เวลาในการละลายผลึกนานถึง 10 ชั่วโมง มีปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลเพิ่มสูงกว่าการละลายโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 ซึ่งใช้เวลาในการละลายผลึกกลูโคสเพียง 1 ชั่วโมง โดยปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัลที่ตรวจพบเท่ากับ 12.56 และ 6.30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนในน้ำผึ้งที่ยังไม่ผ่านการละลายผลึกพบปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอรัฟิวรัล

5.37 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อนทำให้ปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟิวไรลเพิ่มขึ้น 2.3 เท่า ขณะที่การใช้คลื่นอัลตราซาวด์เพิ่มขึ้นเพียง 1.2 เท่า

กิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส พบว่าการละลายผลึกโดยใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงและการแช่ในอ่างน้ำร้อนส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสลดลง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยพบกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส เท่ากับ 10.53 และ 8.7 Gothe scale ตามลำดับ ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสจะใช้เป็นดัชนีในการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้ง (Cheftel *et al.*, 1989) ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งจะต้องมีกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทส ไม่น้อยกว่า 3 Gothe-Scale (Codex Alimentarius Commission, 2001) ดังนั้นกิจกรรมของเอนไซม์ไคเอสเทสที่เหลือจากการละลายผลึกโดยทั้ง 2 วิธี จึงยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

4.4.2 เปรียบเทียบผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส

เปรียบเทียบสมบัติทางประสาทสัมผัสที่ผู้บริโภคยอมรับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ณ สภาวะที่เหมาะสม และน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ณ สภาวะที่เหมาะสม โดยวางแผนการทดสอบแบบ RCBD ใช้ผู้ทดสอบชิม จำนวน 50 คน ด้วยวิธี 9 points Hedonic scoring test (ไพโรจน์, 2535) เพื่อประเมินความชอบในลักษณะต่างๆ (สี กลิ่น รส) ได้ผลดังตารางที่

ตารางที่ 4.17 คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำผึ้งดอกทานตะวันละลายผลึก

วิธีการ	สี ^{ns}	กลิ่นรส ^{ns}	กลิ่น ^{ns}	การยอมรับโดยรวม ^{ns}
คลื่นอัลตราซาวด์	6.82±0.06	6.67±0.13	6.55±0.09	6.78±0.03
อ่างน้ำร้อน	6.77±0.03	6.78±0.16	6.50±0.09	6.78±0.14

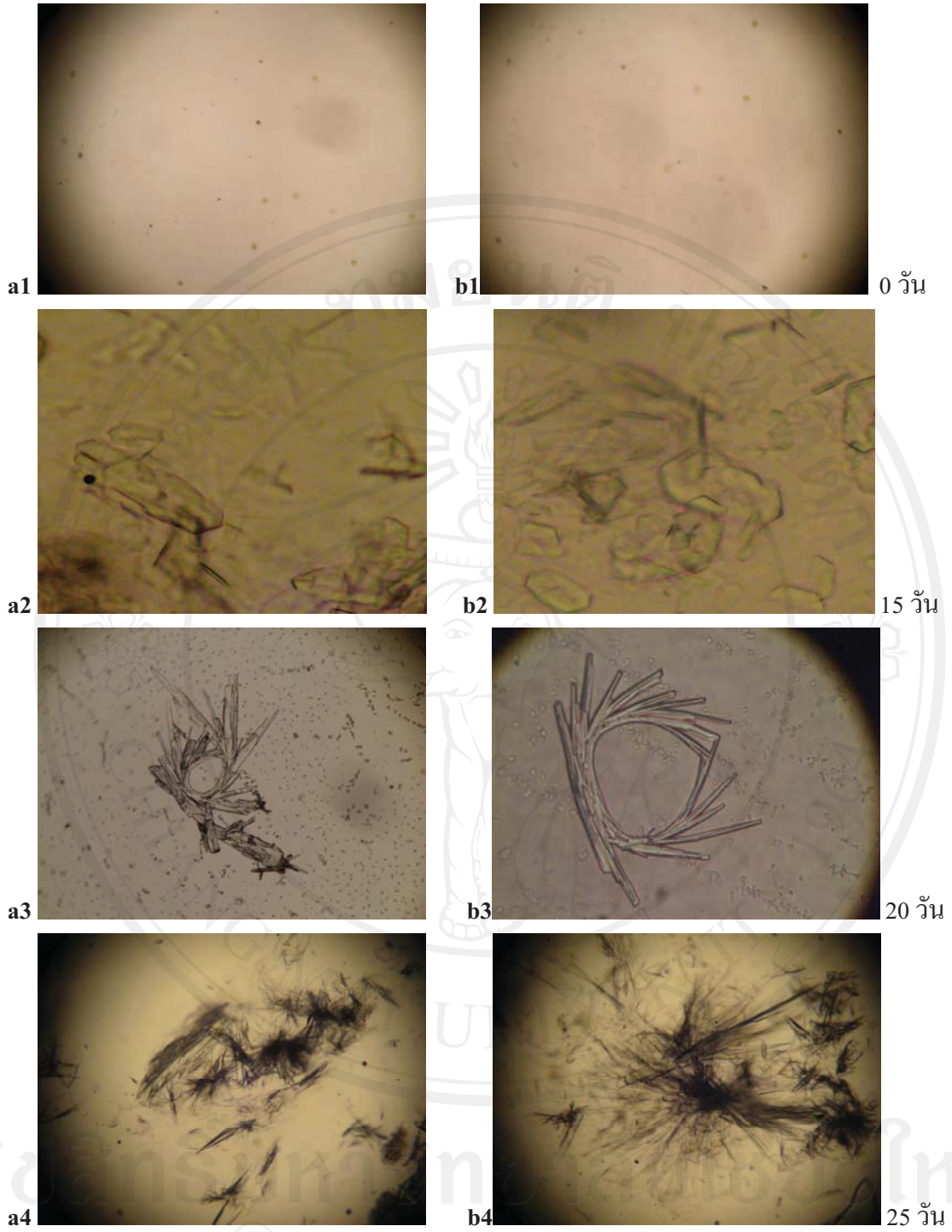
หมายเหตุ ns หมายถึง ข้อมูลในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

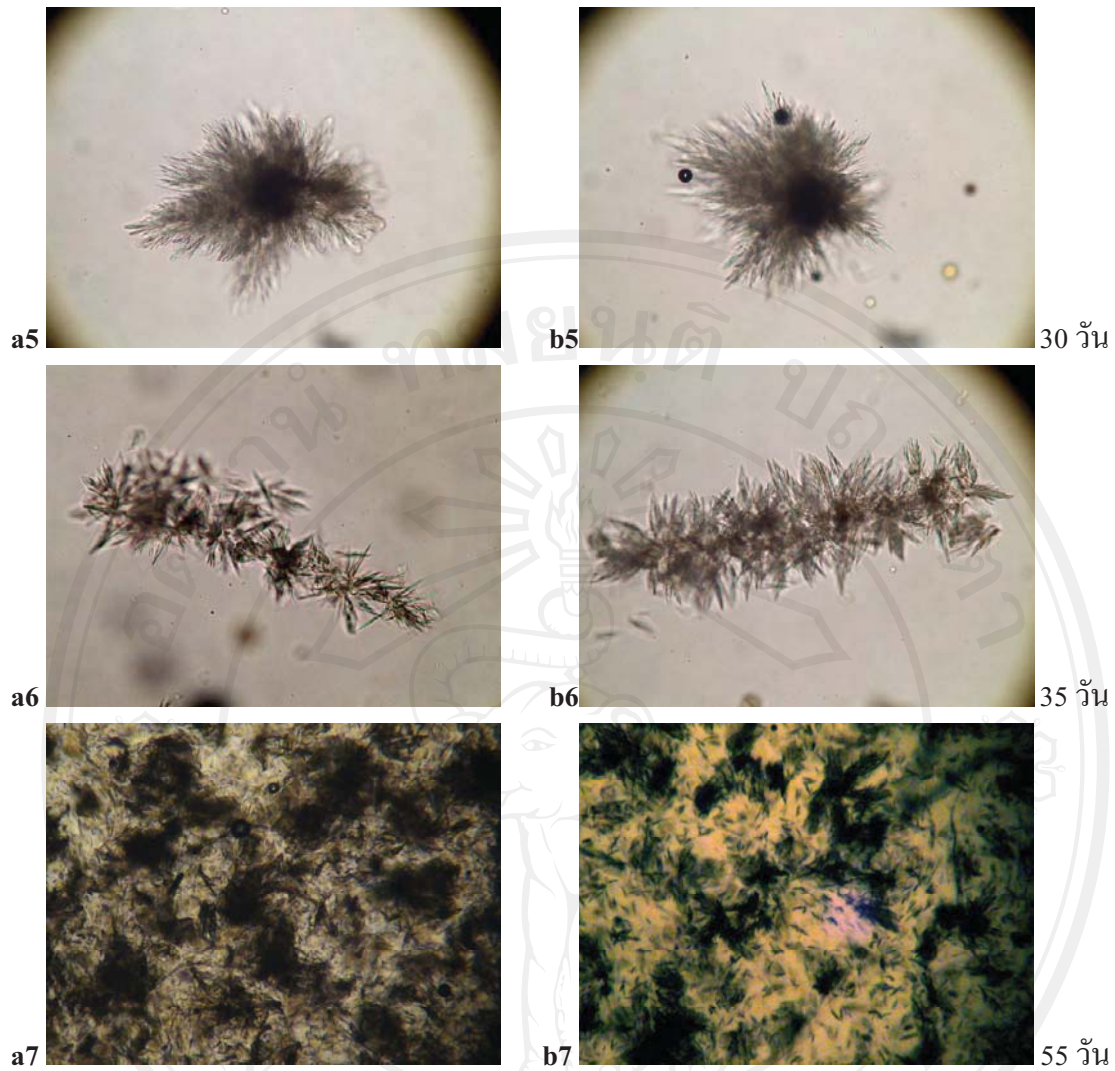
จากตารางที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 และการละลายผลึกโดยใช้ความร้อนแบบปกติ ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่า คะแนนการยอมรับด้านสี กลิ่น กลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยทั้ง 2 วิธี ได้รับคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัสอยู่ในช่วง 6-7 ซึ่งหมายถึง ผู้บริโภคให้การยอมรับน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยทั้ง 2 วิธีอยู่ในระดับชอบน้อยถึงชอบปานกลาง โดยคะแนนการยอมรับในด้านสีและกลิ่นของตัวอย่าง

น้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูงมีแนวโน้มสูงกว่า ตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ซึ่งมีคะแนนการยอมรับด้านสีเท่ากับ 6.82 และ 6.77 ตามลำดับ และมีคะแนนการยอมรับด้านกลิ่นเท่ากับ 6.55 และ 6.50 ตามลำดับ ส่วนด้านกลิ่นรส น้ำผึ้งที่ละลายผลึกด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนได้รับการยอมรับสูงกว่า โดยมีคะแนนการยอมรับเท่ากับ 6.78 และ 6.67 สำหรับตัวอย่างน้ำผึ้งที่ละลายผลึกด้วยคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง เมื่อพิจารณาค่าการยอมรับโดยรวมพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกจากทั้ง 2 วิธี เท่ากัน คือ 6.78 แต่อย่างไรก็ตาม คะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส ทั้งด้านสี กลิ่น กลิ่นรส และการยอมรับโดยรวมของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกจากทั้ง 2 วิธี ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการละลายผลึกแล้ว การละลายผลึกน้ำผึ้งดอกทานตะวันด้วยคลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ใช้เวลาในการละลายผลึกน้อยกว่า การละลายด้วยการแช่ในอ่างน้ำร้อนถึง 10 เท่า ซึ่งเป็นข้อดีของการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ที่ช่วยลดระยะเวลาในการละลายผลึก

4.5 การตกผลึกซ้ำของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน

นำน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยการ ใช้คลื่นอัลตราซาวด์กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40 และที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน ณ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จัดเก็บที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 ระดับ 5 10 และ 25 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 5 และ 10 องศาเซลเซียส เป็นการเก็บรักษาแบบสภาวะเร่ง เพื่อใช้เปรียบเทียบกับ การเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง สุ่มตัวอย่างทุก 5 วัน สังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า จนกว่าจะเห็นการเกิดผลึก เปรียบเทียบอัตราการเกิดผลึกและลักษณะรูปทรงของผลึก พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกโดยทั้งสองวิธี มีอัตราเร็วในการเกิดผลึกซ้ำใกล้เคียงกัน เมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส จะเริ่มสังเกตเห็นผลึกได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 40 เท่า เร็วกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยในวันที่ 10 จะเริ่มสังเกตเห็นผลึกได้ แต่ยังไม่เป็นรูปร่าง โดยผลึกจะเริ่มเปลี่ยนเป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ ทั้งห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมซึ่งสังเกตเห็นได้ประมาณวันที่ 15 หลังจากนั้นผลึกขนาดใหญ่จะค่อยๆ ชักนำผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าให้เข้ามารวมตัวกันจนขยายขนาดขึ้น และประมาณวันที่ 25 จะเริ่มสังเกตเห็นผลึกที่เกิดขึ้นได้ด้วยตาเปล่า โดยที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสนี้ พบว่าน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่ผ่านการละลายผลึกด้วยทั้งสองวิธีจะตกผลึกจนหมดขวดประมาณวันที่ 55 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลึกน้ำผึ้งที่เก็บรักษาอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.14





ภาพที่ 4.14 ลักษณะการก่อกำเนิดของน้ำพื้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ

a1- a7 คือ การก่อกำเนิดของตัวอย่างน้ำพื้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยคลื่นอัลตราซาวด์

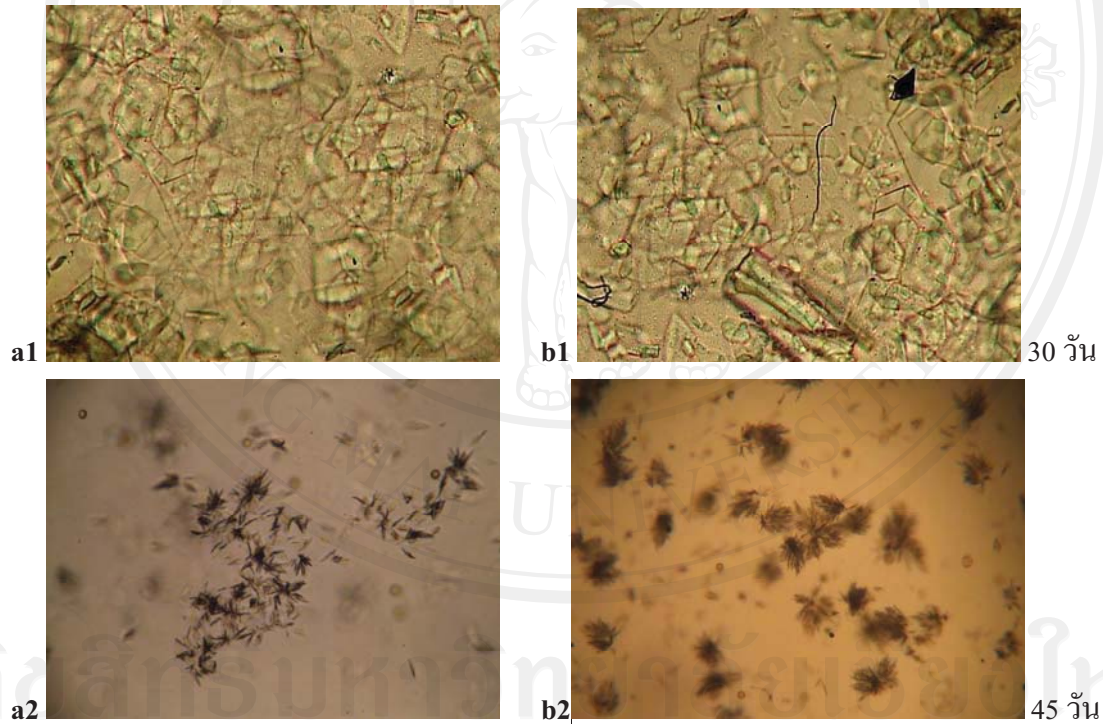
กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40

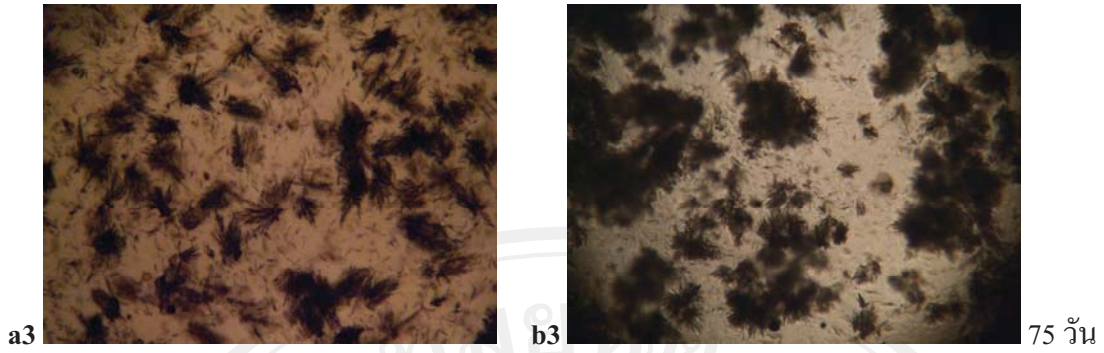
b1- b7 คือ การก่อกำเนิดของตัวอย่างน้ำพื้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน

ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

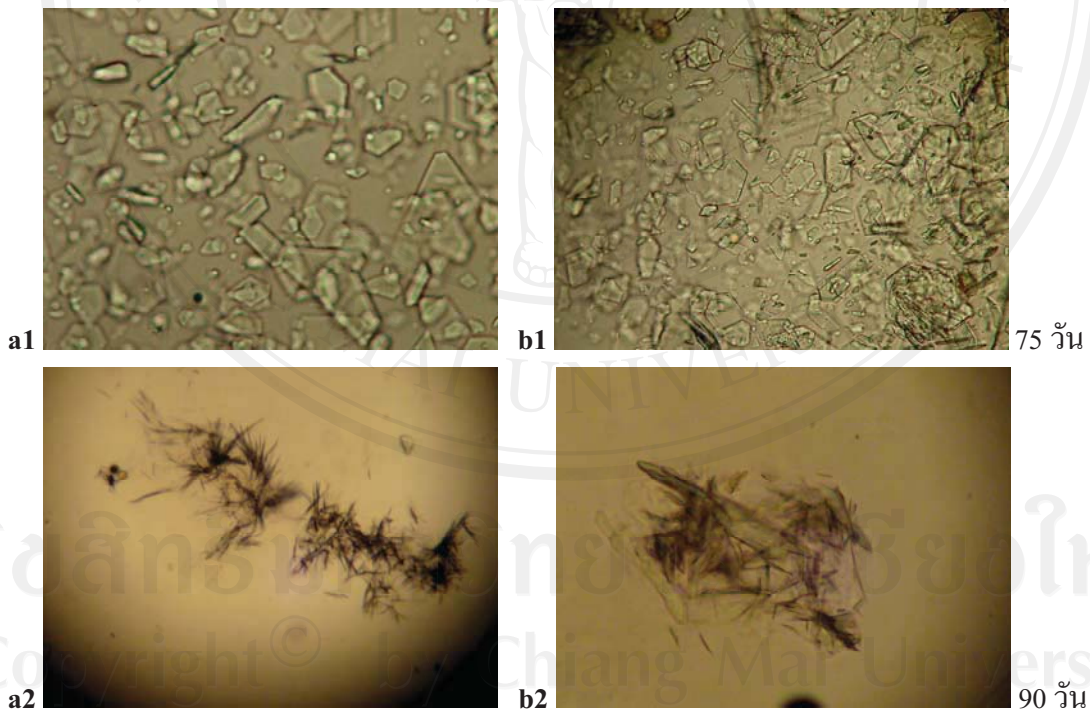
การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส พบว่าการก่อกำเนิดของน้ำพื้งทั้งสองตัวอย่างสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 40 เท่า ประมาณวันที่ 25 และน้ำพื้งจะตกผลึกจนหมดขวดประมาณวันที่ 75

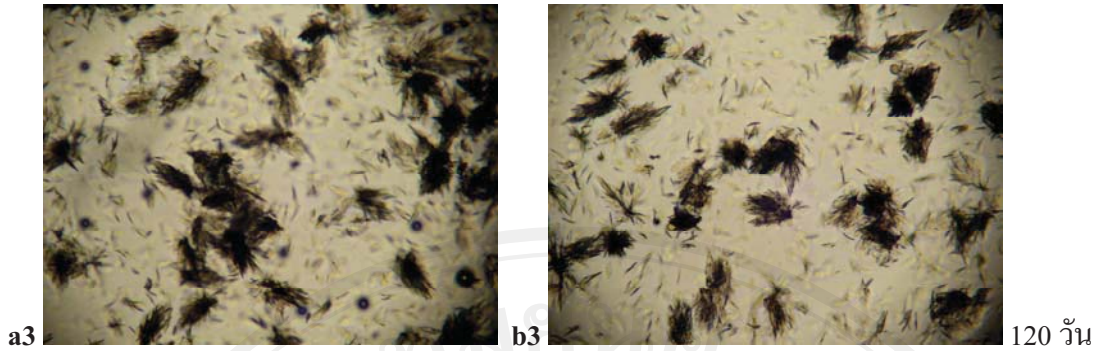
การเก็บรักษาที่ 25 ± 4 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง ระหว่างเดือนธันวาคม จนกระทั่งถึงเดือนกุมภาพันธ์) สามารถสังเกตเห็นผลึกได้ประมาณวันที่ 60 และสังเกตเห็นรูปร่างการเรียงตัวของผลึกในช่วงวันที่ 80 โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมินี้ น้ำผึ้งใช้เวลามากกว่า 140 วัน จึงจะตกผลึกจนหมดขวด พฤติกรรมการก่อตัวของผลึกน้ำผึ้งในระหว่างการเก็บรักษาของทั้งสองอุณหภูมิ มีลักษณะเช่นเดียวกับที่สังเกตได้ จากการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.15 และ 4.16 โดยผลการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ ขนิษฐา (2550) ซึ่งได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำผึ้งดอกทานตะวัน โดยศึกษาที่ อุณหภูมิ 5, 10 และ 25 องศาเซลเซียส และพบว่า การเก็บรักษาน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส น้ำผึ้งดอกทานตะวันจะเริ่มตกผลึกก่อนในวันที่ 15 และตกผลึกจนหมดขวดในวันที่ 35 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส น้ำผึ้งจะเริ่มตกผลึกในวันที่ 21 โดยใช้เวลา 42 วัน จึงตกผลึกจนหมดขวด ส่วนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นั้นจะเริ่มสังเกตเห็นผลึกในวันที่ 80





ภาพที่ 4.15 ลักษณะการก่อผลึกซ้ำของน้ำผึ้งดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ
 a1- a3 คือ การก่อผลึกซ้ำของตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยคลื่นอัลตราซาวด์
 กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40
 b1- b3 คือ การก่อผลึกซ้ำของตัวอย่างน้ำผึ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำร้อน
 ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส





ภาพที่ 4.16 ลักษณะการก่อกำเนิดของน้ำฟุ้งดอกทานตะวัน ที่ 25 ± 4 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างๆ
 a1- a3 คือ การก่อกำเนิดของตัวอย่างน้ำฟุ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยคลื่นอัลตราซาวด์
 กำลังสูง ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่ระดับแอมพลิจูดร้อยละ 40
 b1- b3 คือ การก่อกำเนิดของตัวอย่างน้ำฟุ้งที่ผ่านการละลายผลึกโดยการแช่ในอ่างน้ำ
 ร้อน ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

จากการศึกษานี้พบว่าการตกผลึกซ้ำของน้ำฟุ้งดอกทานตะวัน เมื่อละลายผลึกด้วยการใช้คลื่นอัลตราซาวด์และการแช่ในอ่างน้ำร้อนมีระยะเวลาในการตกผลึกซ้ำไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$) และแสดงให้เห็นว่าอัตราการตกผลึกของน้ำฟุ้งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในการเก็บรักษา โดยเมื่อน้ำฟุ้งถูกเก็บรักษาที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดผลึกจะช้าลง โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 ± 4 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิห้อง) ดังนั้นหากต้องการยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาไม่ให้น้ำฟุ้งตกผลึกจะต้องคำนึงถึงอุณหภูมิในการเก็บรักษาด้วย แต่อย่างไรก็ตามหากอุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของน้ำฟุ้งในด้านอื่นๆ เช่น การเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระ เอนไซม์ไคเอสเทส และการเพิ่มขึ้นของปริมาณไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์พิวรัล (Tosi *et al.*, 2004)