



4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่า ปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายนั้น ปลาหมึกกล้วยมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าปลาหมึกกระดอง แต่ปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลายมีน้ำน้อยกว่าปลาหมึกกระดองที่ผ่านการละลาย ทั้งนี้เนื่องจาก ความหนาของปลาหมึกกล้วยน้อยกว่าปลาหมึกกระดองจึงทำให้การถ่ายโอนมวลของน้ำเป็นไปได้เร็วกว่า ดังนั้นเมื่อนำปลาหมึกกล้วยมาผ่านการละลายจึงมีน้ำออกจากเนื้อเยื่อปลาหมึกมากกว่า ซึ่งน้ำมีอิทธิพลต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบทางเคมีอื่นนอกจาก น้ำของปลาหมึกกล้วยแตกต่างจากปลาหมึกกระดองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.5$) โดยอิทธิพลของการละลายทำให้องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ยกเว้นปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง แสดงว่าปริมาณไขมันและเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการละลาย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลาย

พันธุ์ปลาหมึก	การละลาย	ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี* (dry basis)					
		ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	คาร์โบไฮเดรต
กล้วย	ไม่ผ่าน	81.66±0.15d	85.67±0.22d	5.56±0.05a	0.49±0.10a	6.28±0.05c	2.00a
	ผ่าน	78.27±0.10a	85.32±0.10c	5.60±0.04a	0.43±0.03a	6.39±0.10d	2.26b
กระดอง	ไม่ผ่าน	80.34±0.11c	82.96±0.80b	6.56±0.09b	1.07±0.05b	3.80±0.10a	5.61c
	ผ่าน	79.04±0.12b	82.12±0.51a	6.61±0.06b	1.01±0.09b	4.14±0.15b	6.12d

*ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึงปริมาณร้อยละของแต่ละองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2 การตรวจสอบเครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

4.2.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก หาโดยวิธี modified method of mixture วิธีนี้ใช้ได้กับปลาหมึกซึ่งมีความชื้นสูง โดยใช้ถุง LDPE บรรจุตัวอย่างเพื่อไม่ให้ตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน และมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนในขณะทดลอง โดยมีเม็ดโฟมและโฟมหนา 3 นิ้ว ทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มอยู่และในการหาอุณหภูมิและเวลาสมมูล (T_p, t_p) ใช้ตำแหน่งบนเส้นกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำในแคลอรีมิเตอร์จากจุดที่เริ่มเป็นเส้นตรงจนถึงจุดสุดท้ายในการทดลอง (ภาคผนวก ง) โดยใช้ตำแหน่งเริ่มต้นที่ทำให้ได้ค่า R^2 (coefficient of determination) สูงสุดเป็นอุณหภูมิและเวลาสมมูล เนื่องจากหลังภาวะสมมูลพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นเส้นตรง

ในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้น้ำหนักเป็นสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ พบว่า แคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 79.942 ± 0.479 แคลอรี/องศาเซลเซียส และเมื่อนำแคลอรีมิเตอร์มาทดสอบด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะคือกลีเซอรินซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Heldman, 1979) ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองของกลีเซอรินมีค่าเท่ากับ 0.560 ± 0.010 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าทางทฤษฎีร้อยละ 0.5 และเมื่อใช้แคลอรีมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของน้ำนมวัวที่ความชื้นร้อยละ 85.91 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.895 ± 0.008 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่าความร้อนจำเพาะของนมวัวที่รายงานไว้ (Rao และ Rizvi, 1986) จากสมการ

$$C_p = [4.190xW + ((1.370 + 0.0113T)(1-W))] \times 0.239 \dots\dots\dots (33)$$

โดยพบว่าน้ำนมวัวที่ความชื้นร้อยละ 85.91 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.903 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกันร้อยละ 0.8 และเมื่อใช้แคลอรีมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อหมูที่ความชื้นร้อยละ 65 ที่อุณหภูมิ -8 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.329 ± 0.011 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อหมูที่รายงานไว้ (Mohsenin, 1980) ที่ความชื้นร้อยละ 60 อุณหภูมิ -7.2 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.319 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกันร้อยละ 3.1 ดังนั้น แคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะที่ให้ค่าที่เชื่อถือได้ (จากหลักการทางวิศวกรรมที่ให้ความผิดพลาดได้ร้อยละ 25)

4.2.2 ค่าสภาพนำความร้อน

ใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง จากการทดลองได้เลือกใช้กลีเซอรินเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ให้แก่ probe เนื่องจากสะดวกและหาง่าย นอกจากนี้ยังใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์คงที่ โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับ 220 โวลต์ เป็น

กระแสตรง 1.5 โวลต์ เพื่อให้ได้กระแสไฟที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง และในการหาค่าสภาพนำความร้อน จะพิจารณาเฉพาะผลการทดลองที่กราฟเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ มีค่า R^2 มากกว่า 0.90 ขึ้นไปเพื่อให้ข้อมูลระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เชื่อถือได้ ทำให้ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น (Nix และคณะ, 1960)

จากการทดสอบ thermal conductivity probe โดยหาค่าสภาพนำความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพนำความร้อนคือ carageenan gel (pure IOTA) เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 0.136 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน (Kent และคณะ, 1984) สภาพนำความร้อนของสารละลาย gel ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.130 ± 0.011 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ซึ่งต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 6.5 นอกจากนี้เมื่อใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อวัวที่ความชื้นร้อยละ 64 ปริมาณไขมันร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ในทิศทางขนานกับเนื้อเยื่อ ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.380 ± 0.025 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน แตกต่างจากค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อวัวที่รายงานไว้ (Rao และ Rizvi, 1986) จากสมการ

$$k = 10^{-3} (400 - 4.49F + 0.147W + 1.74T) \dots\dots\dots (34)$$

โดยพบว่าสภาพนำความร้อนของเนื้อวัว ที่ความชื้นร้อยละ 64 ปริมาณไขมันร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.382 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ประมวลร้อยละ 0.5 ดังนั้น thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนที่เชื่อถือได้

4.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

ใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนเพื่อทำการทดลองหาค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ได้ใช้ propylene glycol เป็นสารตัวกลางในการรักษาอุณหภูมิ เนื่องจาก propylene glycol ไม่แข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ ยังคงเป็นของเหลวในขณะที่ทำการทดลอง

จากการทดลองใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพ
 แพร่ความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ carageenan gel เข้มข้นร้อยละ
 20 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ 1.250×10^{-7} เมตร²/วินาที
 (Kent และคณะ, 1984) และสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่า $1.245 \times 10^{-7} \pm$
 0.001×10^{-7} เมตร²/วินาที ซึ่งต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 0.4 นอกจากนี้เมื่อใช้
 thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของเนื้อมดที่ความชื้นร้อยละ 76.81
 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ $1.820 \times 10^{-7} \pm 0.050 \times 10^{-7}$ เมตร²/วินาที
 ซึ่งต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของเนื้อมดที่รายงานไว้ (Singh, 1982) จากสมการ

$$\alpha = [0.057363W + 0.006288(T + 273)] \times 10^{-7} \dots \dots \dots (35)$$

ที่ความชื้น 76.81 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.823×10^{-7} เมตร²/วินาที
 ประมาณร้อยละ 0.2 ดังนั้น thermal diffusivity plate ที่ประกอบขึ้นสามารถหาค่า
 สภาพแพร่ความร้อนที่เชื่อถือได้

4.3 ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

จากการทดลองบันทึกค่าอุณหภูมิในช่วงเวลาที่กำหนดเพื่อนำมาคำนวณค่าความร้อน
 จำเพาะ สภาพนำความร้อน และสภาพแพร่ความร้อน ดังตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ง ได้
 ผลดังแสดงในภาคผนวก จ วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ
 ที่มีต่อค่าสมบัติทางความร้อน และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับพันธุ์ ภาวะการละลาย
 อุณหภูมิโดยใช้ multiple regression analysis

4.3.1 ความร้อนจำเพาะ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ตารางที่ 4.2) พบว่า อิทธิ
 ผลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลาย ภาวะการละลาย และอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ
 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก

SOV	d_f	SS	MS	ค่า F
พันธุ์(P)	1	1.168×10^{-2}	1.168×10^{-2}	5.168×10^{-1}
ภาวะการละลาย(H)	1	1.967×10^{-1}	1.967×10^{-1}	8.702*
อุณหภูมิ(T)	3	2.651	8.835×10^{-1}	39.082*
PH	1	8.110×10^{-2}	8.110×10^{-2}	3.587*
PT	3	8.319×10^{-2}	2.773×10^{-2}	1.226
HT	3	6.730×10^{-2}	2.243×10^{-2}	9.923×10^{-1}
PHT	3	6.810×10^{-2}	2.270×10^{-2}	1.004
Error	32	7.234×10^{-1}	2.261×10^{-2}	

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึก (ตารางที่ 4.3) พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันในช่วง -40 ถึง -10 องศาเซลเซียส ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย (ประมาณร้อยละ 7.84) สำหรับปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกระดองมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกกล้วย (ประมาณร้อยละ 9.22) ดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีตามสมการ (1) โดยความชื้นมีค่าความร้อนจำเพาะสูงที่สุด (0.465 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส (ประภาศรี และคณะ, 2531)) และปลาหมึกมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 78-83 ดังนั้นความชื้นมีอิทธิพลต่อค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าองค์ประกอบทางเคมีอื่น จึงทำให้ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายและปลาหมึกกระดองที่ผ่านการละลายซึ่งมีปริมาณความชื้นมากกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายและปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลาย (ร้อยละ 1.64 และ



0.1 ตามลำดับ) มีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่า ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Levy (1979) ซึ่งพบว่าในช่วงอุณหภูมิ -2 ถึง -10 องศาเซลเซียส เนื้อวุ้นซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงกว่ามีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าถึงแม้ว่าจะมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พื้นผิวและอุณหภูมิเดียวกัน โดยที่ปลาหมึกกล้วยเมื่อนำมาผ่านการละลาย มีค่าความร้อนจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 20.78 (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย) ซึ่งเป็นไปตามปริมาณความชื้นที่ลดลง (ร้อยละ 4.33) เช่นเดียวกับปลาหมึกกระดองเมื่อนำมาผ่านการละลาย ค่าความร้อนจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 3.17 ตามปริมาณความชื้นที่ลดลง (ร้อยละ 1.64) เช่นกัน ดังนั้นอิทธิพลของการละลายทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกลดลงเนื่องจากปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งเห็นได้ว่าการลดลงของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมากกว่าปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลาย โดยที่ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายลดลงเป็น 5 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง ส่วนปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลาย ค่าความร้อนจำเพาะลดลงคิดเป็น 2 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะนอกจากขึ้นกับความชื้นยังขึ้นกับความหนาแน่น (Mohsenin, 1980) ซึ่งจากการทดลองพบว่าความหนาแน่นของปลาหมึกกล้วยแช่แข็งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายมีค่าเท่ากับ 0.992 และ 1.001 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองแช่แข็งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายมีค่าเท่ากับ 1.005 และ 1.011 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิไม่ทำให้ค่าความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยความหนาแน่นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะในทิศทางตรงข้ามกับความชื้น นั่นคือความร้อนจำเพาะลดลงเมื่อความหนาแน่นมากขึ้น จากความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายกับปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลายมีค่ามากกว่าปลาหมึกกระดอง โดยที่ปลาหมึกที่ผ่านการละลายมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จึงมีผลเสริมให้การลดลงของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมีค่ามากกว่าปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลายทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายลดลงมากกว่าปลาหมึกกระดอง ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะจากความชื้นควรพิจารณาที่ความหนาแน่นเดียวกัน จึงให้ผลถูกต้องมากกว่า สาเหตุที่ปลาหมึกที่ผ่านการละลายมีความหนาแน่นมากกว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย อาจเนื่องมาจากเมื่อนำปลาหมึกมาทำการแช่แข็งแบบช้าด้วย still air freezer ทำให้

เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เบียดโครงสร้างของเนื้อเยื่อทำให้โครงสร้างเสียไปบางส่วน (Love, 1962) ดังนั้นเมื่อนำปลาหมึกมาทำการละลายจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและอากาศที่แทรกตัวอยู่ในน้ำออกมาจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย (Lawrie, 1960) ทำให้ปริมาณของตัวอย่างลดลงมากกว่ามวล มีผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเนื่องจากความหนาของปลาหมึกกล้วยมีน้อยกว่าจึงทำให้การถ่ายโอนมวลน้ำและอากาศเป็นไปได้เร็วกว่า ความหนาแน่นของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายจึงเพิ่มขึ้นมากกว่า และจากการสังเกตพบว่าปลาหมึกกล้วยนอกจากมีการสูญเสียน้ำมากกว่า ยังมีลักษณะเนื้อนิ่มและอ่อนตัวกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการทำลายโครงสร้างในระหว่างการแช่แข็งแบบช้าทำให้เส้นใยกล้ามเนื้อเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ (เยาวลักษณ์, 2528)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ที่ช่วงอุณหภูมิ			
		-40 _{±1} °C	-30 _{±1} °C	-18 _{±1} °C	-10 _{±1} °C
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	0.481 _{±0.001}	0.501 _{±0.009}	0.647 _{±0.015}	1.146 _{±0.014}
	ผ่านการละลาย	0.375 _{±0.002}	0.398 _{±0.007}	0.479 _{±0.002}	1.017 _{±0.007}
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	0.435 _{±0.043}	0.452 _{±0.032}	0.575 _{±0.046}	1.111 _{±0.077}
	ผ่านการละลาย	0.426 _{±0.001}	0.444 _{±0.002}	0.527 _{±0.002}	1.066 _{±0.034}

เมื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก พบว่าที่พันธุ์และภาวะการละลายเดียวกันค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนจำเพาะของน้ำซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของค่า

ความร้อนจำเพาะมีลักษณะแบบพาราโบลาลง (รูปที่ 4.2) ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในช่วงของการแช่แข็งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำเป็นน้ำแข็งซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของน้ำสูงกว่าน้ำแข็งประมาณ 2-3 เท่า ดังนั้นในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำเป็นน้ำแข็งยังไม่หมด ค่าความร้อนจำเพาะจึงสูงตามค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ นอกจากนี้เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงจะมีผลึกของตัวถูกละลายในอาหารเกิดขึ้น ซึ่งผลึกเหล่านี้ส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มมากขึ้นด้วย (Mohsenin, 1980) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Long (1955) ซึ่งได้ทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อปลาในช่วงอุณหภูมิ -6 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่าความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มลดลงแบบพาราโบลาลงเมื่ออุณหภูมิต่ำลงเช่นเดียวกับความร้อนจำเพาะของเนื้อสัตว์อื่นๆ ในช่วงการแช่แข็ง (Reverzev และ Khakulin, 1987; Mohsenin, 1980) และการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงของการแช่แข็งด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูป $C_p = A + BT + CT^2$ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	$C_p = 1.805 + 8.417 \times 10^{-2} T + 1.289 \times 10^{-3} T^2$	0.961
	ผ่านการละลาย	$C_p = 1.730 + 8.964 \times 10^{-2} T + 1.413 \times 10^{-3} T^2$	0.951
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	$C_p = 1.903 + 9.412 \times 10^{-2} T + 1.446 \times 10^{-3} T^2$	0.929
	ผ่านการละลาย	$C_p = 1.780 + 8.994 \times 10^{-2} T + 1.421 \times 10^{-3} T^2$	0.952

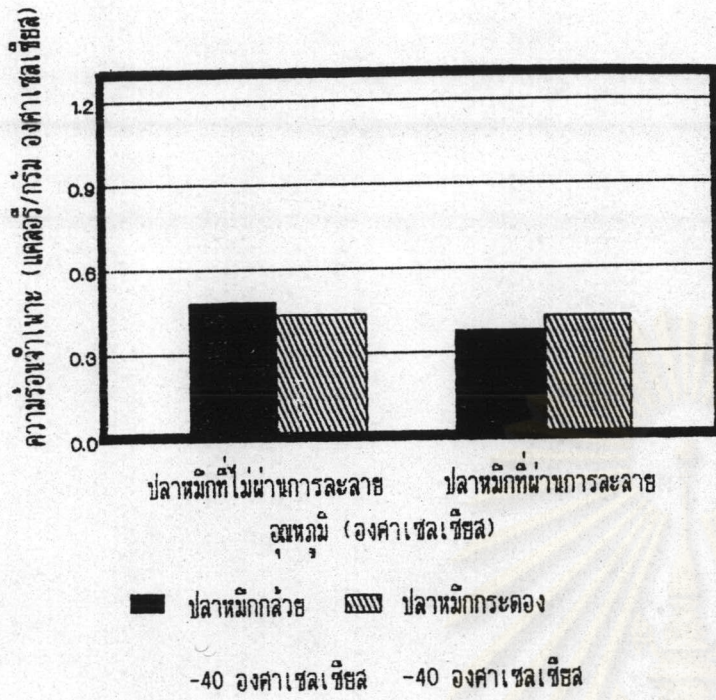
เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกับพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง -10 องศาเซลเซียส ด้วย multiple regression โดยใช้ dummy variable สำหรับตัวแปรพันธุ์และภาวะการละลาย (Kleinbaum และ Kupper, 1978) พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (36) โดยมีค่า $R^2 = 0.946$

$$C_p = 1.868 - 5.050 \times 10^{-2} P - 1.265 \times 10^{-1} H + 8.979 \times 10^{-2} T + 9.910 \times 10^{-2} PH + 1.402 \times 10^{-3} T^2 \dots\dots\dots (36)$$

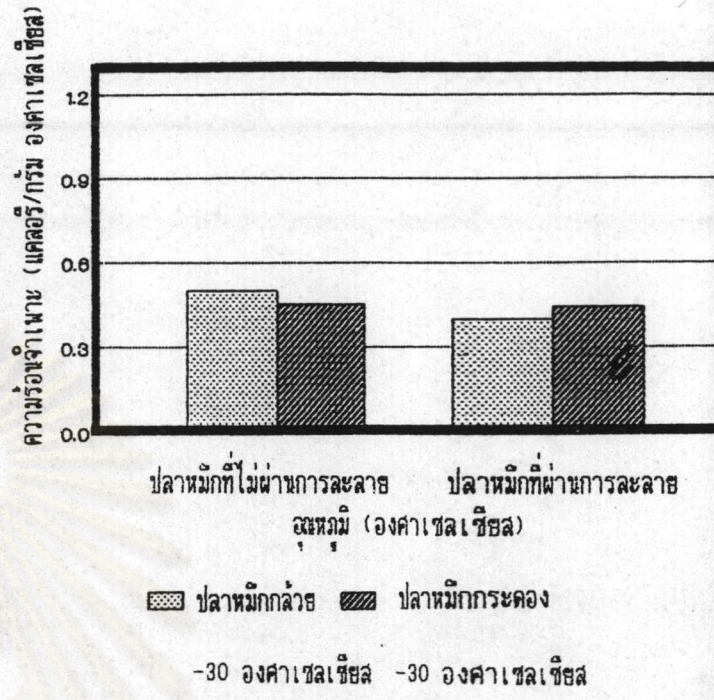
เมื่อ P คือ พันธุ์ของปลาหมึกมีค่าเท่ากับ 0 (ปลาหมึกกล้วย) และ 1 (ปลาหมึกกระดอง)
 H คือ ภาวะการละลายมีค่าเท่ากับ 0 (ไม่ผ่านการละลาย) และ 1 (ผ่านการละลาย)
 T คือ อุณหภูมิ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

จากสมการ (36) เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 1.110 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองร้อยละ 3.11 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

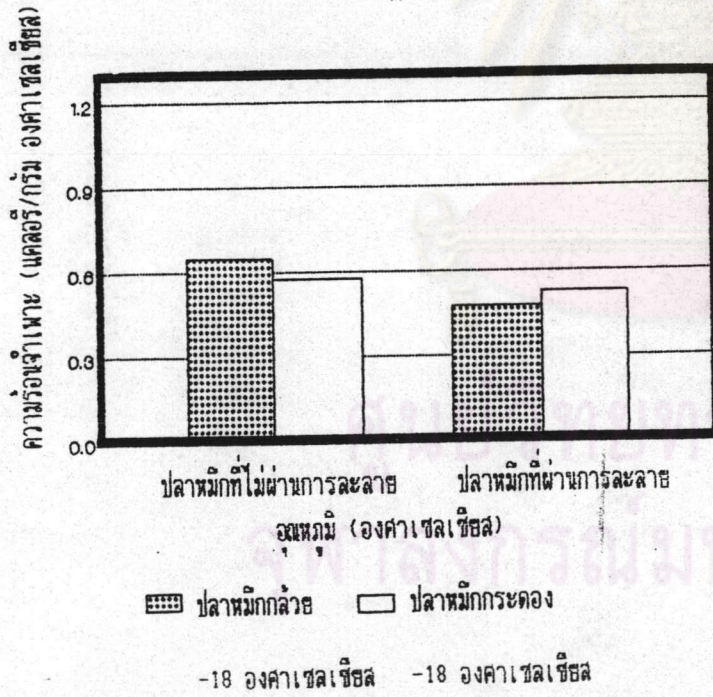
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



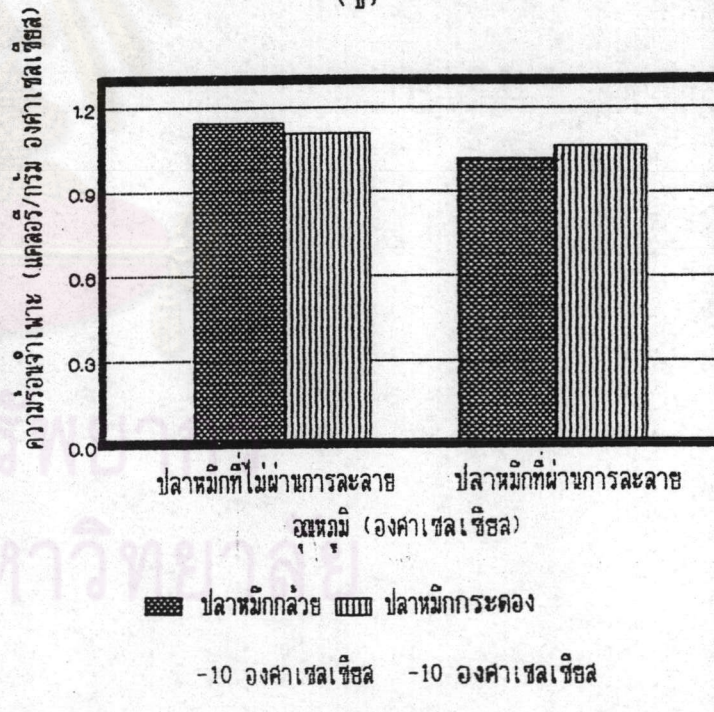
(ก)



(ข)

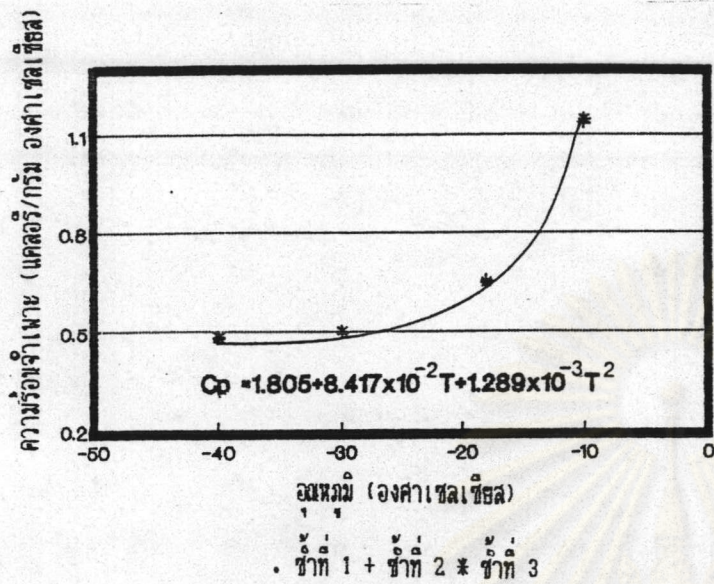


(ค)

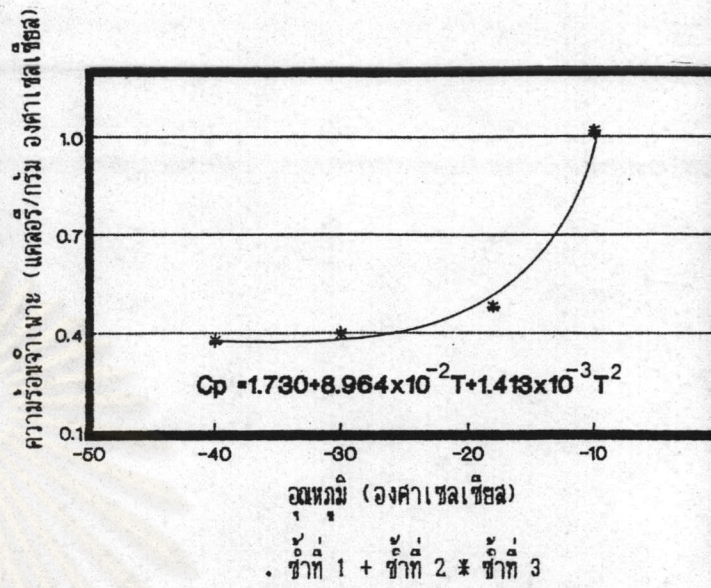


(ง)

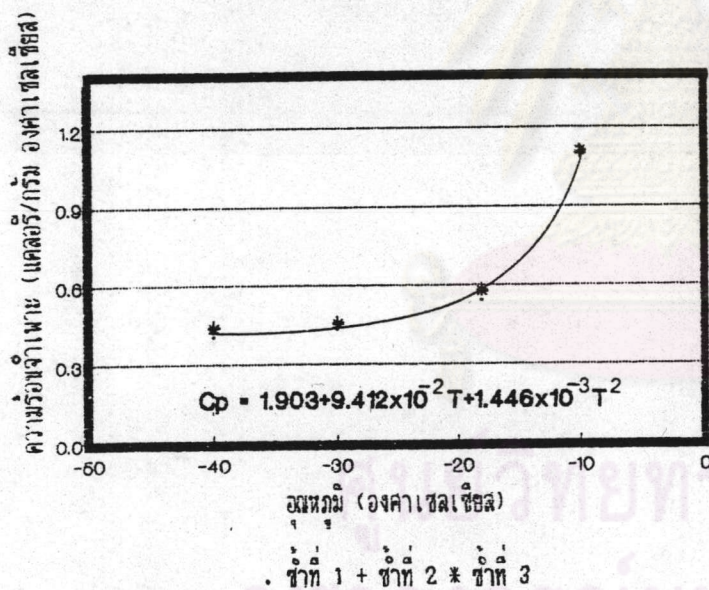
รูปที่ 4.1 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธึกกับภาวะการละลายต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก ในช่วงอุณหภูมิ (ก)-40₊₁ องศาเซลเซียส, (ข)-30₊₁ องศาเซลเซียส, (ค)-18₊₁ องศาเซลเซียส และ (ง)-10₊₁ องศาเซลเซียส



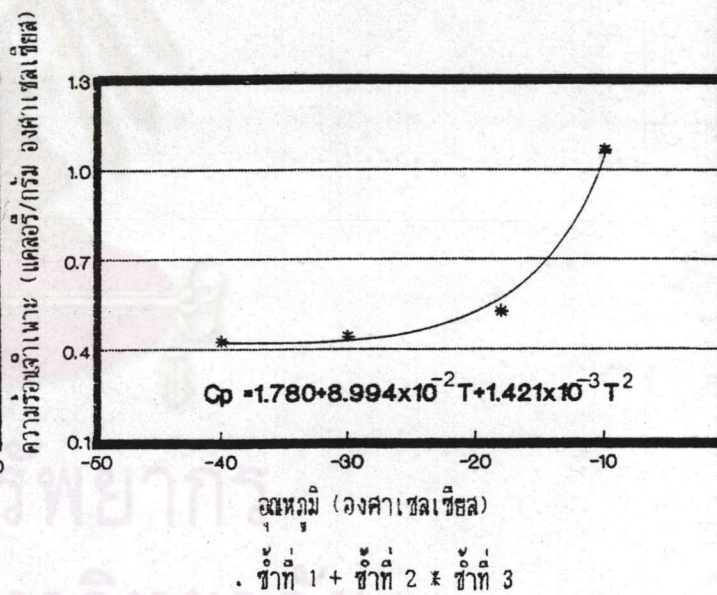
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง ทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

- ก) ปลาหมึกกล้วยไม่ผ่านการละลาย ข) ปลาหมึกกล้วยผ่านการละลาย
- ค) ปลาหมึกกระดองไม่ผ่านการละลาย ง) ปลาหมึกกระดองผ่านการละลาย

4.3.2 สภาพนำความร้อน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลเพื่อศึกษาผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ดังตารางที่ 4.5 พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลาย พันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิ มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึก

SOV	d_f	SS	MS	ค่า F
พันธุ์ (P)	1	2.036×10^{-2}	2.036×10^{-2}	10.451*
ภาวะการละลาย (H)	1	9.677×10^{-2}	9.677×10^{-2}	49.688*
อุณหภูมิ (T)	3	3.765×10^{-1}	1.255×10^{-1}	64.429*
PH	1	2.318×10^{-2}	2.318×10^{-2}	11.900*
PT	3	7.766×10^{-3}	2.588×10^{-3}	1.328
HT	3	4.974×10^{-3}	1.658×10^{-3}	0.851
PHT	3	1.178×10^{-2}	3.929×10^{-3}	2.016
Error	32	6.234×10^{-2}	1.948×10^{-3}	

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของปลาหมึก (ตารางที่ 4.7) พบว่า ณ อุณหภูมิเดียวกัน ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่า ปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายประมาณร้อยละ 2.39 ส่วนปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกระดองมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกล้วยประมาณร้อยละ 6.73 เนื่องจาก

ค่าสภาพนำความร้อนขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีตามสมการ (6) โดยความชื้นเป็นองค์ประกอบที่มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนสูงที่สุด (2.440 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน (Mohsenin, 1980)) เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีอื่น และองค์ประกอบหลักของปลาหมึกคือน้ำ ดังนั้นที่ภาวะการละลายและอุณหภูมิเดียวกัน ปลาหมึกที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าจึงมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่า ซึ่งให้ผลลักษณะเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lentz (1961) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 4 ถึง 36 องศาเซลเซียส เนื้อวัวซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงกว่า มีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าถึงแม้ว่ามีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของค่าสภาพนำความร้อนระหว่างปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีค่ามากกว่าที่ไม่ผ่านการละลาย (รูปที่ 4.3) ทั้งที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นในปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีค่าน้อยกว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่แข็งแบบช้าทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเนื้อเยื่อ จึงมีผลให้โครงสร้างของเนื้อเยื่อของปลาหมึกที่ผ่านการละลายแล้วมีลักษณะที่ไม่เหมือนเดิม ซึ่ง Rao และ Rizvi (1989) และ Miller และ Sunderland (1963) ได้กล่าวไว้ว่าค่าสภาพนำความร้อนนอกจากจะขึ้นกับปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อเยื่ออีกด้วย ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนของอาหารจากปริมาณความชื้น ควรพิจารณาที่โครงสร้างของเนื้อเยื่อที่เหมือนกัน จึงให้ผลที่เชื่อถือได้ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman และ Driscoll (1991) พบว่า ปลาหมึกกล้วยในส่วนของหนวด (tentacle) และผิวหนังนอก (mantle) ที่มีลักษณะโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน และปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 78.6 และ 77.4 ตามลำดับ) แต่กลับมีค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางตรงกันข้ามกับเนื้อเยื่อปลาหมึกที่เท่ากัน นอกจากนี้ยังพบว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พื้นฐ์และอุณหภูมิเดียวกัน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman และ Driscoll (1991) พบว่า Calamari ในส่วนของผิวหนังนอก เมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลงเช่นกัน และจากการทดลองยังพบว่าปลาหมึกกล้วยเมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลง ปริมาณร้อยละ 23.03 (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย) และความชื้นลดลงร้อยละ 4.15 โดยที่ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ลดลงนั้นคิดเป็น 5 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง ส่วนปลาหมึกกระดองเมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลงประมาณร้อยละ 3.33 และปริมาณความชื้นลดลงร้อยละ 1.61 ซึ่งค่า

สภาพนำความร้อนลดลงเพียง 2 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง จากการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกทั้งสองชนิดตามปริมาณความชื้นที่ให้ผลแตกต่างกัน เป็นการสนับสนุนเหตุผลที่ว่าสภาพนำความร้อนขึ้นกับปริมาณความชื้นและโครงสร้างของเนื้อเยื่อด้วย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ			
		-40±1 °C	-30±1 °C	-18±1 °C	-10±1 °C
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	1.567±0.017	1.460±0.014	1.405±0.002	1.311±0.005
	ผ่านการละลาย	1.394±0.002	1.315±0.008	1.243±0.009	1.156±0.004
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	1.523±0.001	1.457±0.018	1.379±0.015	1.279±0.006
	ผ่านการละลาย	1.493±0.005	1.392±0.004	1.324±0.008	1.244±0.004

เมื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึก (ตารางที่ 4.6) พบว่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองที่ภาวะการละลายเดียวกัน ที่อุณหภูมิ -40±1, -30±1, -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำ (รูปที่ 4.4) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในช่วงของการแช่แข็งจะเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของน้ำที่เป็นน้ำแข็ง ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำบางส่วนยังไม่เป็นน้ำแข็งจึงมีสภาพนำความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่น้ำเป็นน้ำแข็งเกือบหมดแล้ว นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับผลึกของตัวถูกละลายที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ ซึ่งผลึกของตัวถูกละลายมีผลให้ค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้น (Mohsenin, 1980) ผลการทดลองนี้สอดคล้อง

กับงานวิจัยของ Pham และ Willix (1989) ซึ่งทำการทดลองเกี่ยวกับเนื้อลูกแกะที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 71-75 ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ในการวิเคราะห์ด้วย regression เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงของการแช่แข็งพบว่า สมการที่ได้อยู่ในรูปของ $k = A+BT+CT^2$ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์เท่านั้น โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและ ปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	$k_{ } = 1.155 - 1.404 \times 10^{-2} T - 1.230 \times 10^{-4} T^2$	0.976
	ผ่านการละลาย	$k_{ } = 1.067 - 9.923 \times 10^{-3} T - 4.636 \times 10^{-5} T^2$	0.985
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	$k_{ } = 1.518 - 1.172 \times 10^{-2} T - 1.057 \times 10^{-4} T^2$	0.897
	ผ่านการละลาย	$k_{ } = 1.180 - 6.738 \times 10^{-3} T + 2.443 \times 10^{-5} T^2$	0.985

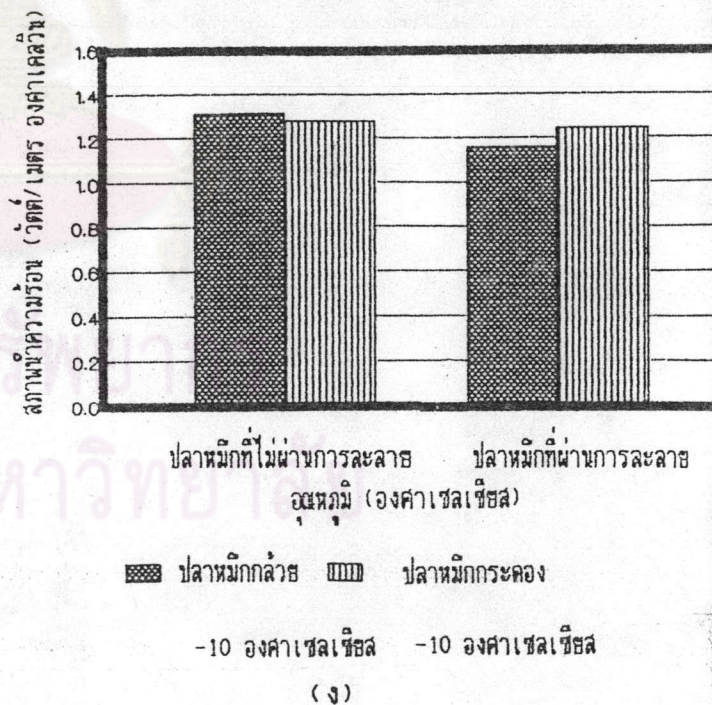
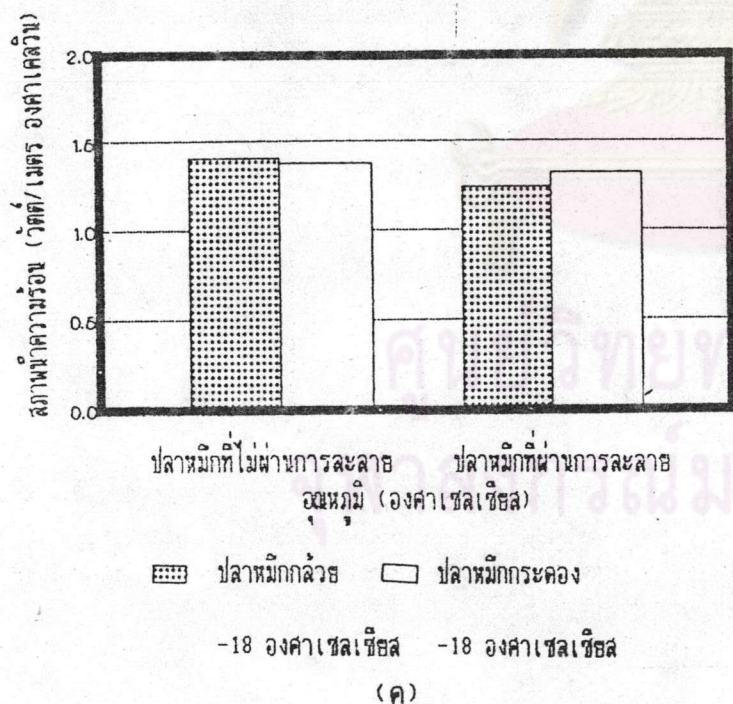
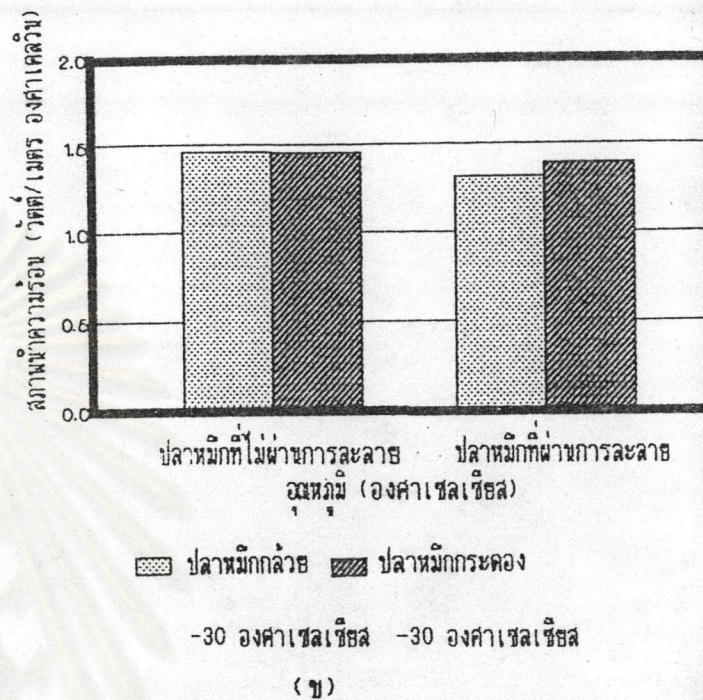
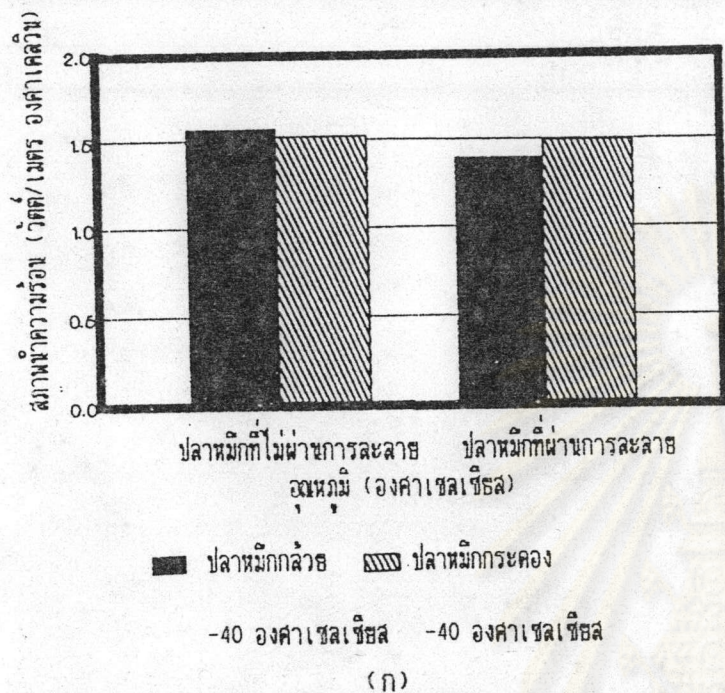
เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกับพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิโดยใช้ multiple regression พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (37) โดยมีค่า $R^2 = 0.987$

$$k_{||} = 1.224 - 2.625 \times 10^{-2} P - 1.587 \times 10^{-1} H - 9.750 \times 10^{-3} T - 1.125 \times 10^{-1} PH - 3.875 \times 10^{-5} T^2 \dots \dots \dots (37)$$

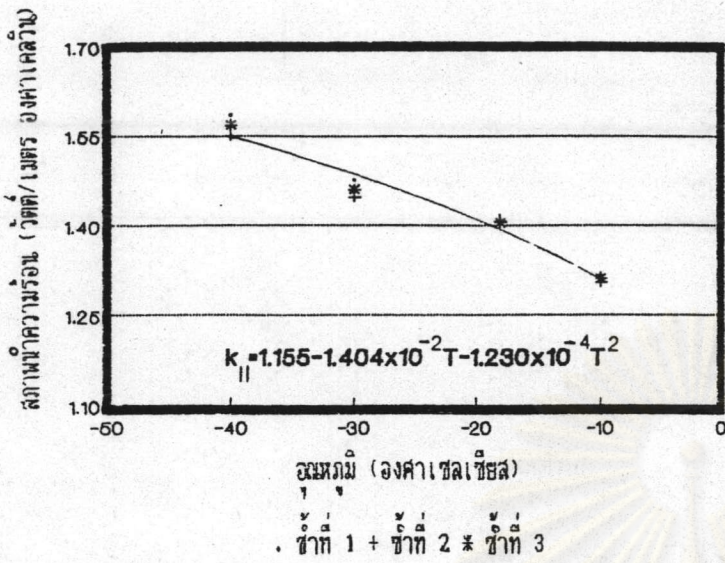
เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่
อุณหภูมิ -40 ในสมการ (37) พบว่ามีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 1.552 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน
ซึ่งต่างจากค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองคือ 1.567
วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ร้อยละ 0.95 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าสภาพนำ
ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วง
แค่นี้ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



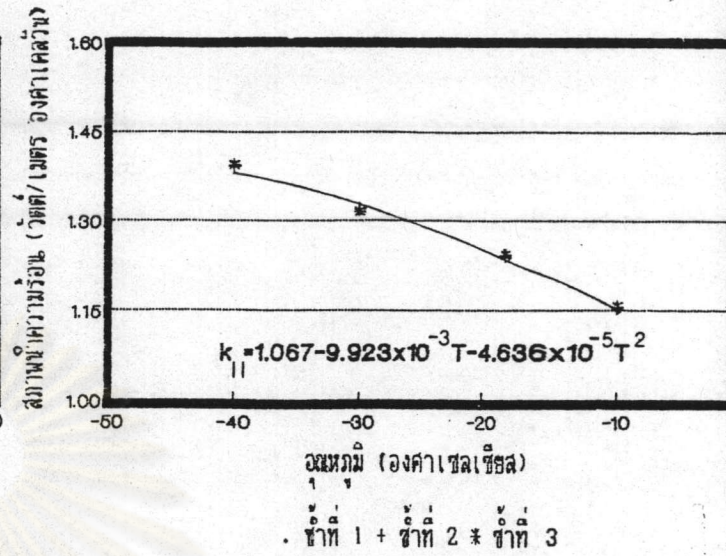
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



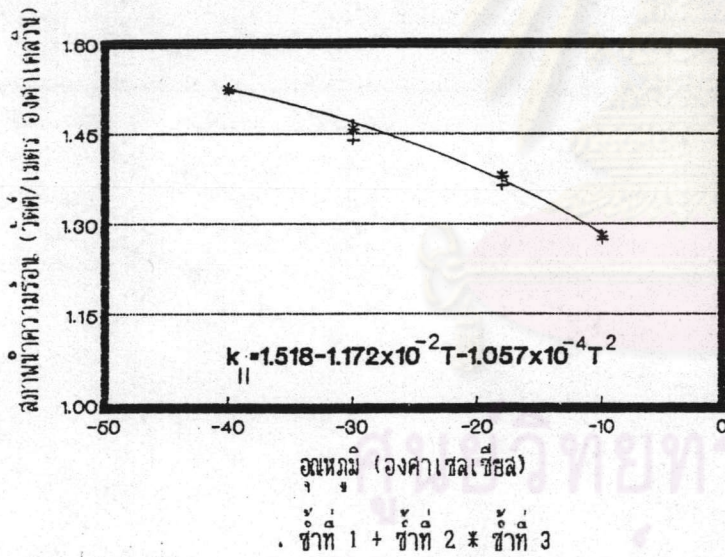
รูปที่ 4.3 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับภาวะการละลายต่อค่าสภาพนำความร้อนของปลายหมึกในช่วงอุณหภูมิ (ก) -40 ± 1 องศาเซลเซียส, (ข) -30 ± 1 องศาเซลเซียส, (ค) -18 ± 1 องศาเซลเซียส และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส



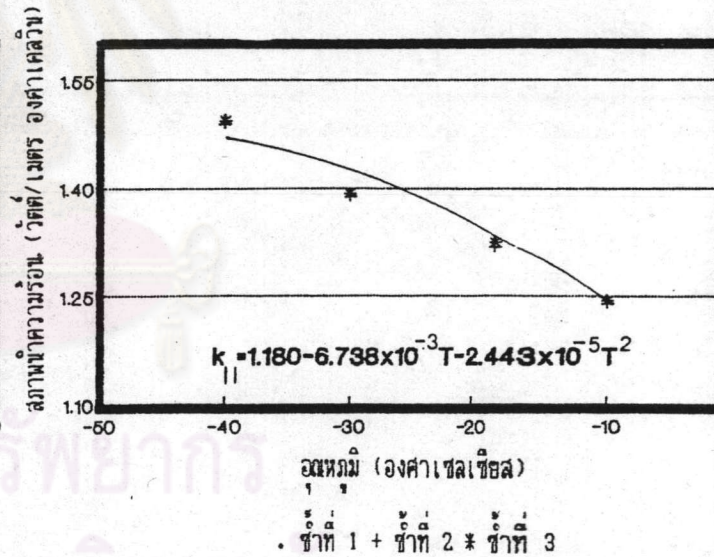
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วย และปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

- ก) ปลาหมึกกล้วยไม่ผ่านการละลาย ข) ปลาหมึกกล้วยผ่านการละลาย
- ค) ปลาหมึกกระดองไม่ผ่านการละลาย ง) ปลาหมึกกระดองผ่านการละลาย



4.3.3 สภาพแปรความร้อน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิ ต่อค่าสภาพแปรความร้อนของปลาหมึกในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลาย อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับอุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างภาวะการละลายกับอุณหภูมิ พันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ มีผลต่อสภาพแปรความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแปรความร้อนของปลาหมึก

SOV	d_f	SS	MS	ค่า F
พันธุ์(P)	1	1.421×10^{-14}	1.421×10^{-14}	37462.86*
ภาวะการละลาย(H)	1	3.652×10^{-14}	3.652×10^{-14}	96242.29*
อุณหภูมิ(T)	3	2.071×10^{-12}	6.902×10^{-13}	1819067*
PH	1	2.495×10^{-14}	2.495×10^{-14}	65750.86*
PT	3	5.934×10^{-15}	1.978×10^{-15}	5212.953*
HT	3	1.099×10^{-14}	3.664×10^{-15}	9657.905*
PHT	3	1.106×10^{-14}	3.687×10^{-15}	9715.809*
Error	32	1.214×10^{-17}	3.794×10^{-19}	

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.9 เมื่อศึกษาถึงผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าสภาพแปรความร้อนของปลาหมึก พบว่าในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง -40 องศาเซลเซียส ปลาหมึกก่กลัวยที่

ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายถึงร้อยละ 4.49-19.49 ส่วนปลาหมึกที่ผ่านการละลายปลาหมึกกล้วยกลับมีแนวโน้มของค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกระดองร้อยละ 1.67-2.49 โดยที่ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความแตกต่างกันขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (รูปที่ 4.5) ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าสภาพแพร่ความร้อน ขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ตามสมการ (17) ดังเช่นค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย พบว่าปลาหมึกกล้วยมีค่าต่ำกว่าปลาหมึกกระดอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยมีค่าสูง ในขณะที่ค่าสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นมีค่าเกือบเท่ากับ ปลาหมึกกระดอง ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยต่ำกว่าปลาหมึกกระดอง นอกจากนี้ค่าสภาพแพร่ความร้อนยังขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพด้วย (Mohsenin, 1980) ซึ่งขนาดรูปร่างของเนื้อเยื่อและขนาดของเส้นใยของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองก็แตกต่างกัน (พัชรินทร์, 2529 และ พาณิชย์, 2534) เป็นผลให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าแตกต่างกัน และค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ต่างกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงนั้นเป็นเพราะค่าสภาพแพร่ความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำมีผลให้ในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำเป็นน้ำแข็งยังไม่หมดจึงทำให้ความแตกต่างของค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงต้นมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง -40 องศาเซลเซียส ปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.70-20.77 เช่นเดียวกับ ปลาหมึกกระดองที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.62-4.92 เมื่อผ่านการละลายทั้งที่ ปริมาณความชื้นลดลง อาจเนื่องจากเมื่อนำปลาหมึกมาผ่านการละลาย นอกจากมีน้ำออกมาจากเนื้อเยื่อแล้วยังมีอากาศที่แทรกตัวอยู่ในน้ำภายในเนื้อเยื่อซึมออกมาด้วย (Lawrie, 1980) ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของอากาศมีค่าต่ำ (1.67×10^{-3} เมตร²/วินาที ที่ 30 องศาเซลเซียส (Rao และ Rizvi, 1986)) ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ผ่านการละลายแล้วมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่แข็งแบบช้าทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนด้วย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนจาก ปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิเดียวกัน จะต้องมีการสร้างของเนื้อเยื่อที่เหมือนกันด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (รูปที่ 4.6) เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อน

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) × 10 ⁷ ที่ช่วงอุณหภูมิ			
		-34 ถึง -46 °C	-26 ถึง -34 °C	-14 ถึง -22 °C	-7 ถึง -13 °C
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	7.451±0.004	6.220±0.011	5.271±0.014	2.761±0.000
	ผ่านการละลาย	8.814±0.004	7.863±0.002	6.224±0.009	2.833±0.005
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	8.492±0.001	7.726±0.007	5.798±0.024	2.891±0.007
	ผ่านการละลาย	8.554±0.004	7.731±0.006	6.101±0.003	2.901±0.009

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -40±1, -30±1, -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียสต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก ให้ผลลักษณะเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน คือ มีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำ (รูปที่ 4.7) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งเป็นเพราะสัดส่วนของน้ำกับน้ำแข็งในช่วงแช่แข็ง และผลึกของตัวถูกละลายที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nesvadba และ Eunson (1984) ซึ่งทำการทดลองเกี่ยวกับปลาคอดบดที่ความชื้นร้อยละ 90.4 ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงของการแช่แข็งด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูปของ $\alpha = A+BT+CT^2$ โดยมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	สมการ regression	Coefficient of determination, R^2
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	$\alpha \times 10^7 = -2.740 - 3.381 \times 10^{-1} T - 3.872 \times 10^{-3} T^2$	0.979
	ผ่านการละลาย	$\alpha \times 10^7 = -1.753 - 5.494 \times 10^{-1} T - 7.217 \times 10^{-3} T^2$	0.981
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	$\alpha \times 10^7 = -1.436 - 5.073 \times 10^{-1} T - 6.521 \times 10^{-3} T^2$	0.989
	ผ่านการละลาย	$\alpha \times 10^7 = -1.539 - 5.307 \times 10^{-1} T - 7.033 \times 10^{-3} T^2$	0.984

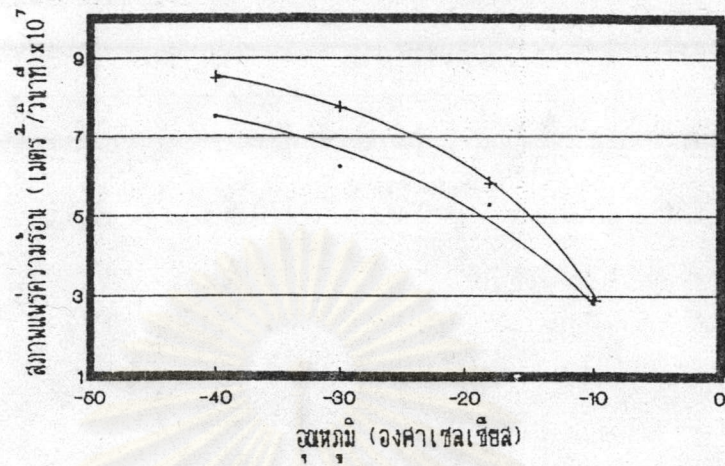
จากการศึกษาผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก โดยใช้ multiple regression หาสมการความสัมพันธ์ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (37) โดยมีค่า $R^2 = 0.979$

$$\alpha = [-1.169 - 8.804 \times 10^{-2} P - 6.005 \times 10^{-2} H - 4.528 \times 10^{-1} T - 2.095 \times 10^{-1} PH + 3.644 \times 10^{-2} PT - 4.369 \times 10^{-2} HT + 4.595 \times 10^{-2} PHT - 6.160 \times 10^{-3} T^2] \times 10^{-7} \dots \dots \dots (37)$$

จากสมการ (37) เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 7.087×10^{-7} เมตร²/วินาที ซึ่งต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองคือ 7.455×10^{-7} เมตร²/วินาที เท่ากับร้อยละ 4.94 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

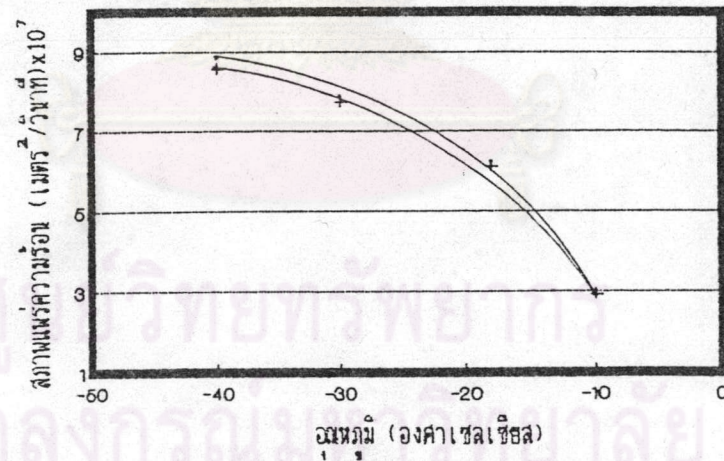


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



• ปลาหมึกกล้วย + ปลาหมึกกระดอง

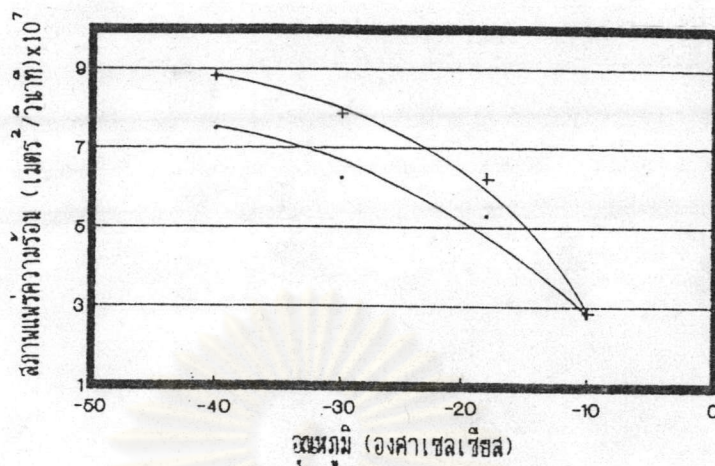
(ก)



• ปลาหมึกกล้วย + ปลาหมึกกระดอง

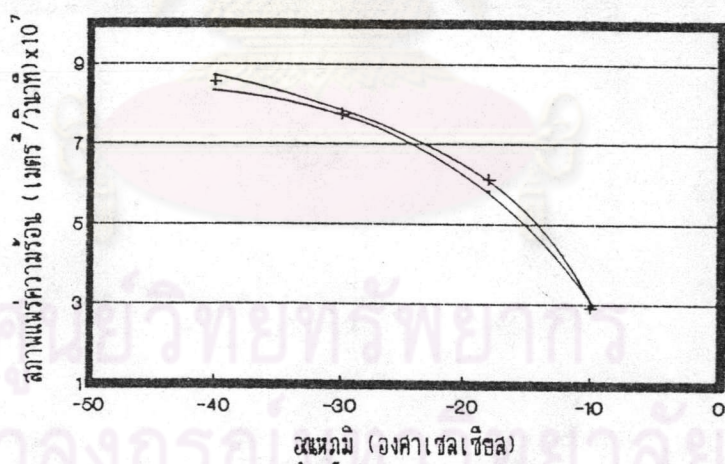
(ข)

รูปที่ 4.5 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกทั้งที่ (ก) ไม่ผ่านการละลาย และ (ข) ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



• ปลายหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย + ปลายหมึกที่ผ่านการละลาย

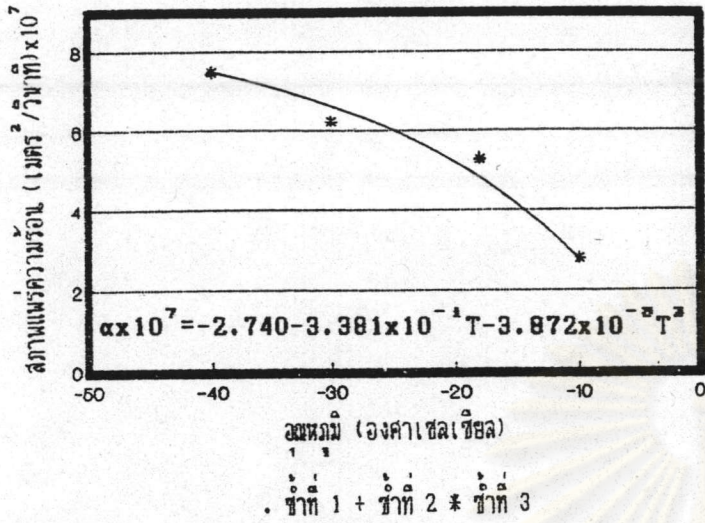
(ก)



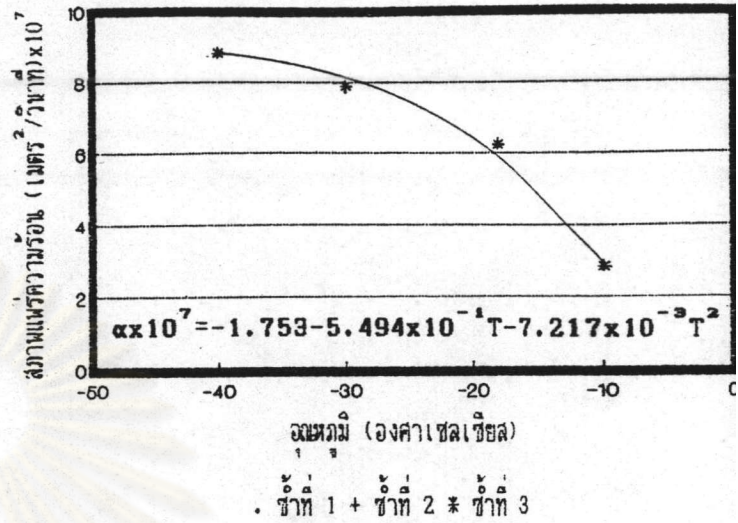
• ปลายหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย + ปลายหมึกที่ผ่านการละลาย

(ข)

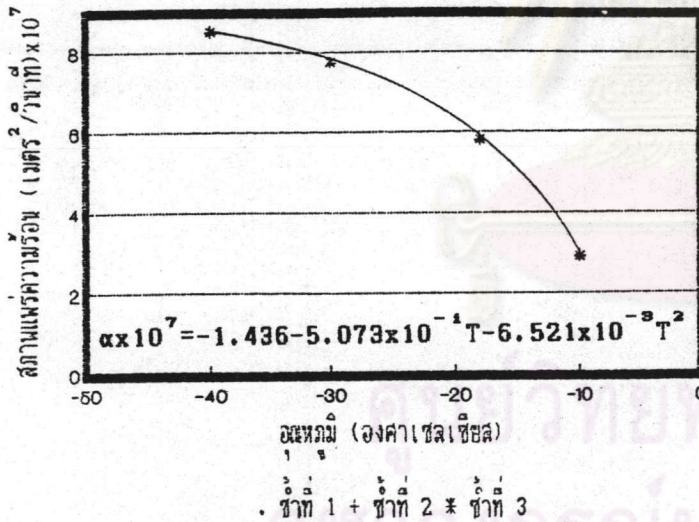
รูปที่ 4.6 ผลของอิทธิพลร่วมของพื้นที่ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของ (ก) ปลายหมึกกล้วย และ (ข) ปลายหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



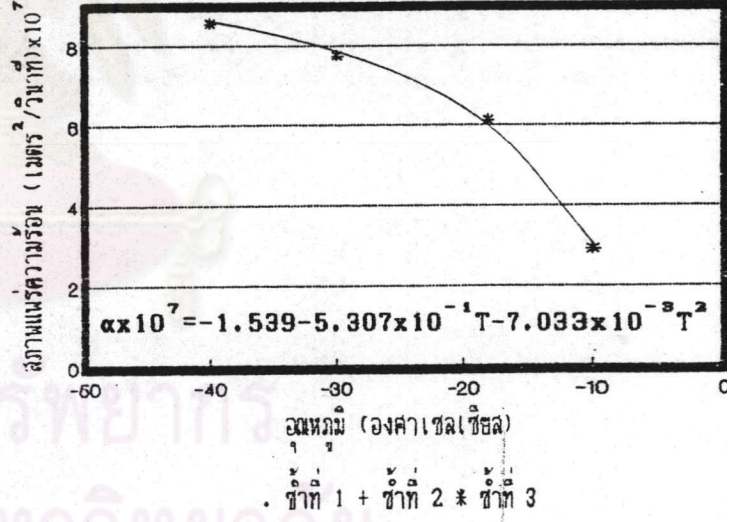
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง ทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

- ก) ปลาหมึกกล้วยไม่ผ่านการละลาย ข) ปลาหมึกกล้วยผ่านการละลาย
- ค) ปลาหมึกกระดองไม่ผ่านการละลาย ง) ปลาหมึกกระดองผ่านการละลาย

ค่าสภาพแพร่ความร้อนนอกจากได้จากการทดลอง ยังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพนำความร้อน (สมการ (17)) โดยใช้ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากสมการ (32) และสมการ (31) ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นได้จากการทดลอง ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการคำนวณมีค่าแตกต่างจากการทดลองร้อยละ -12.24 - 11.15 ทั้งนี้ อาจเนื่องจากค่าความหนาแน่นที่หาจากการทดลองเป็น apparent density ไม่ใช่ความหนาแน่นที่แท้จริงจึงทำให้ผลของการทดลองแตกต่างจากผลของการคำนวณ ดังนั้นสามารถนำสมการนี้มาประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกในช่วงช่วงแค่นี้ซึ่งให้ค่าค่อนข้างเชื่อถือได้

ตารางที่ 4.11 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (17)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) $\times 10^7$ ที่อุณหภูมิ *			
		-40 °C	-30 °C	-18 °C	-10 °C
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	7.826 (5.03)	7.001 (11.15)	5.217 (-1.02)	2.423 (-12.24)
	ผ่านการละลาย	8.849 (3.51)	7.865 (0.25)	6.178 (-0.73)	2.706 (-4.53)
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	8.302 (2.28)	7.643 (-1.13)	5.687 (-1.91)	2.730 (-5.37)
	ผ่านการละลาย	8.260 (-3.43)	7.389 (-4.39)	5.922 (-1.83)	2.750 (-5.40)

* ตัวเลขในวงเล็บหมายถึง ร้อยละของความแตกต่างของค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง