บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วย ที่ได้จากผลการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักในกุ้งคือ น้ำ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกุ้งกุลาดำ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	75.59 ± 0.45
โปรตีน	14.21 ± 0.07
ไขมัน	1.64 ± 0.05
เส้นใย	0.41 ± 0.08
เถ้า	1.22 ± 0.03
คาร์โบไฮเดรต	6.93

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อกุ้งแชบ๊วย

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	78.20 ± 0.45
โปรตีน	14.61 ± 0.07
ไขมัน	1.10 ± 0.05
เส้นใย	-
เถ้า	1.12 ± 0.04
คาร์โบไฮเดรต	4.97

4.2 การตรวจสอบเครื่องมือในการหาสมบัติทางความร้อนของกุ้ง

4.2.1 ค่าสภาพนำความร้อน

การใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของกุ้ง ได้เลือกใช้กลีเซอรีนเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ให้แก่ probe เนื่องจากกลีเซอรีนเป็นสารที่มีความหนืดค่อนข้างสูงทำให้สภาวะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการนำความร้อน ในการทดลองใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์มาเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 1.5 โวลต์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง และในการหาค่าสภาพนำความร้อน จะพิจารณาเฉพาะผลการทดลองที่กราฟเป็นเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิกับ ln(t) มีค่า R^2 มากกว่า 0.90 ขึ้นไป (Wang and Kolbe, 1990 quoting Murakami and Okos, 1988) เพื่อให้ข้อมูลระหว่างอุณหภูมิกับ ln(t) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เชื่อถือได้ ทำให้ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

จากการทดสอบ thermal conductivity probe โดยหาค่าสภาพนำความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพนำความร้อน คือ carageenan gel (pure IOTA) เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.136 วัตต์/เมตรองศาเคลวิน (Kent et al., 1984) สภาพนำความร้อนของสารละลาย gel จากการทดลอง

มีค่าเท่ากับ 0.142 ± 0.140 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ซึ่งแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 4.41 ดังนั้น thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง หาได้โดยใช้วิธี modified method of mixture วิธีนี้ใช้ได้ดีกับกุ้งซึ่งมีความชื้นสูง โดยใช้ถุง LLDPE บรรจุตัวอย่าง เพื่อไม่ให้ตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน ในการหาเวลาสมดุล (t_F) ใช้ตำแหน่งบนเส้นกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์ ที่มีค่า R^2 สูงสุด เนื่องจากในการทดลองพบว่าตำแหน่งที่มีค่า R^2 สูงสุด มีแนวโน้มเป็นตำแหน่งเดียวกับเวลาที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นเส้นตรงที่ดีที่สุด (วิโรจน์ ฤดีศานต์, 2535)

ในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้น้ำกลั่นเป็นสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ พบว่าแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 34.702 ± 0.856 แคลอรี/ องศาเซลเซียส และเมื่อนำแคลอริมิเตอร์มาทดสอบด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะคือกลีเซอรีน ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Heldman, 1979) ได้ค่าความร้อนจำเพาะของกลีเซอรีนเท่ากับ 0.612 ± 0.041 แคลอรี/ กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 10.27 ดังนั้นแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

จากการทดสอบ thermal diffusivity plate โดยการหาค่าสภาพแพร่ความร้อนของ agar food model ซึ่งประกอบด้วย agar ร้อยละ 2.83 น้ำตาลร้อยละ 2.83 และน้ำร้อยละ 94.34 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเท่ากับ $(6.814 \pm 0.654)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที ซึ่งแตกต่างจากที่ Nesvadba (1982) รายงานไว้ว่ามีค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ $(6.5 \pm 0.700)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที อยู่ร้อยละ 4.80 นอกจากนี้เมื่อใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ carageenan gel เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส [ค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ 1.25×10^{-7} เมตร^2/วินาที (Kent et al., 1984)] พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเท่ากับ $(1.200 \pm 0.016)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที ต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 0.40 ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า thermal diffusivity plate ที่ประกอบขึ้นสามารถหาค่าสภาพแพร่ความร้อนได้ถูกต้อง

มีค่าเท่ากับ 0.142 ± 0.140 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ซึ่งแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 4.41 ดังนั้น thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.2.2 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง หาได้โดยใช้วิธี modified method of mixture วิธีนี้ใช้ได้ดีกับกุ้งซึ่งมีความชื้นสูง โดยใช้ถุง LLDPE บรรจุตัวอย่าง เพื่อไม่ให้ตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน ในการหาเวลาสมดุล (t_F) ใช้ตำแหน่งบนเส้นกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์ ที่มีค่า R^2 สูงสุด เนื่องจากในการทดลองพบว่าตำแหน่งที่มีค่า R^2 สูงสุด มีแนวโน้มเป็นตำแหน่งเดียวกับเวลาที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นเส้นตรงที่ดีที่สุด (วิโรจน์ ฤดีศานต์, 2535)

ในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้น้ำกลั่นเป็นสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ พบว่าแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 34.702 ± 0.856 แคลอรี/ องศาเซลเซียส และเมื่อนำแคลอริมิเตอร์มาทดสอบด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะคือกลีเซอรีน ซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (Heldman, 1979) ได้ค่าความร้อนจำเพาะของกลีเซอรีนเท่ากับ 0.612 ± 0.041 แคลอรี/ กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 10.27 ดังนั้นแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

จากการทดสอบ thermal diffusivity plate โดยการหาค่าสภาพแพร่ความร้อนของ agar food model ซึ่งประกอบด้วย agar ร้อยละ 2.83 น้ำตาลร้อยละ 2.83 และน้ำร้อยละ 94.34 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าเท่ากับ $(6.814 \pm 0.654)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที ซึ่งแตกต่างจากที่ Nesvadba (1982) รายงานไว้ว่ามีค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ $(6.5 \pm 0.700)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที อยู่ร้อยละ 4.80 นอกจากนี้เมื่อใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ carageenan gel เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส [ค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ 1.25×10^{-7} เมตร^2/วินาที (Kent et al., 1984)] พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเท่ากับ $(1.200 \pm 0.016)\times10^{-7}$ เมตร^2/ วินาที ต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 0.40 ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า thermal diffusivity plate ที่ประกอบขึ้นสามารถหาค่าสภาพแพร่ความร้อนได้ถูกต้อง

4.3 ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของกุ้ง

นำค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลองในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมบัติทางความร้อนเหล่านี้ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ โดยใช้ multiple regression analysis

4.3.1 ค่าสภาพนำความร้อน

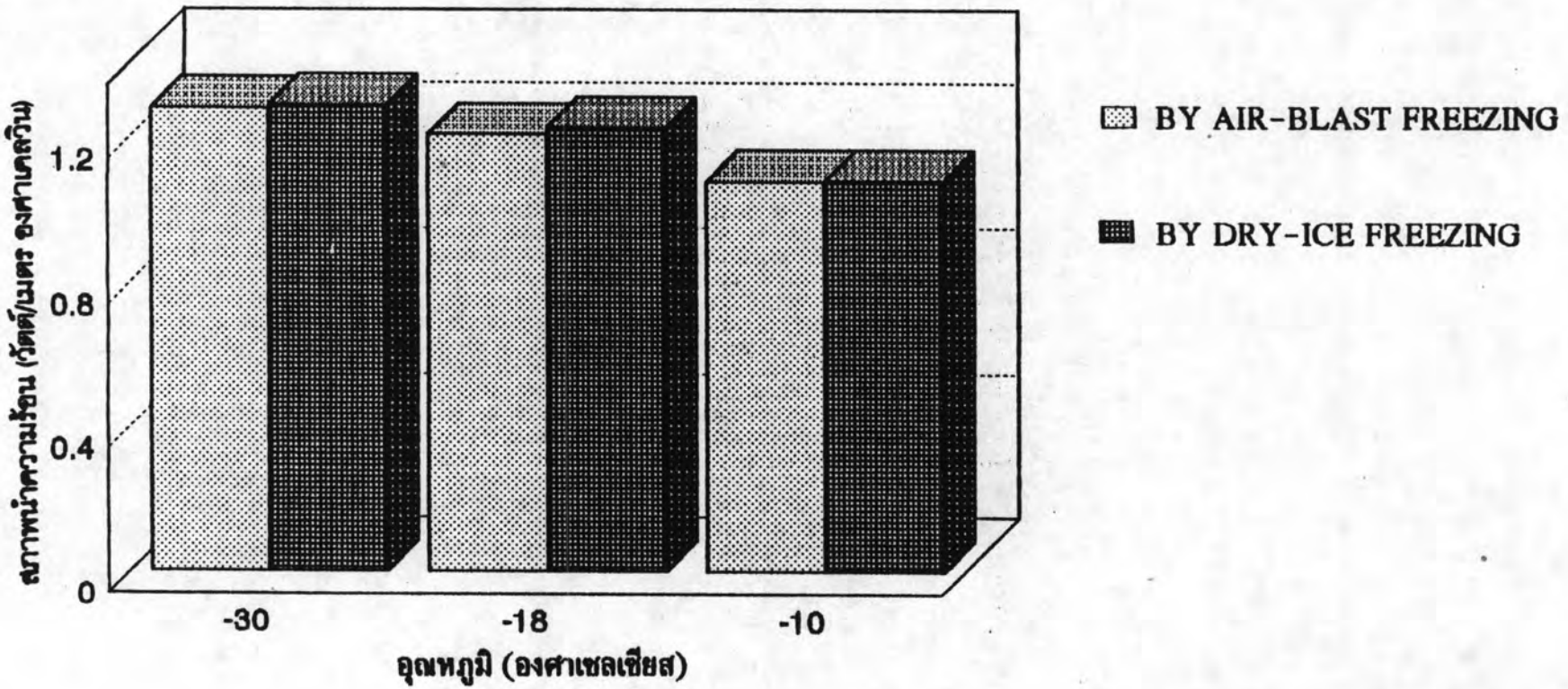
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้ง

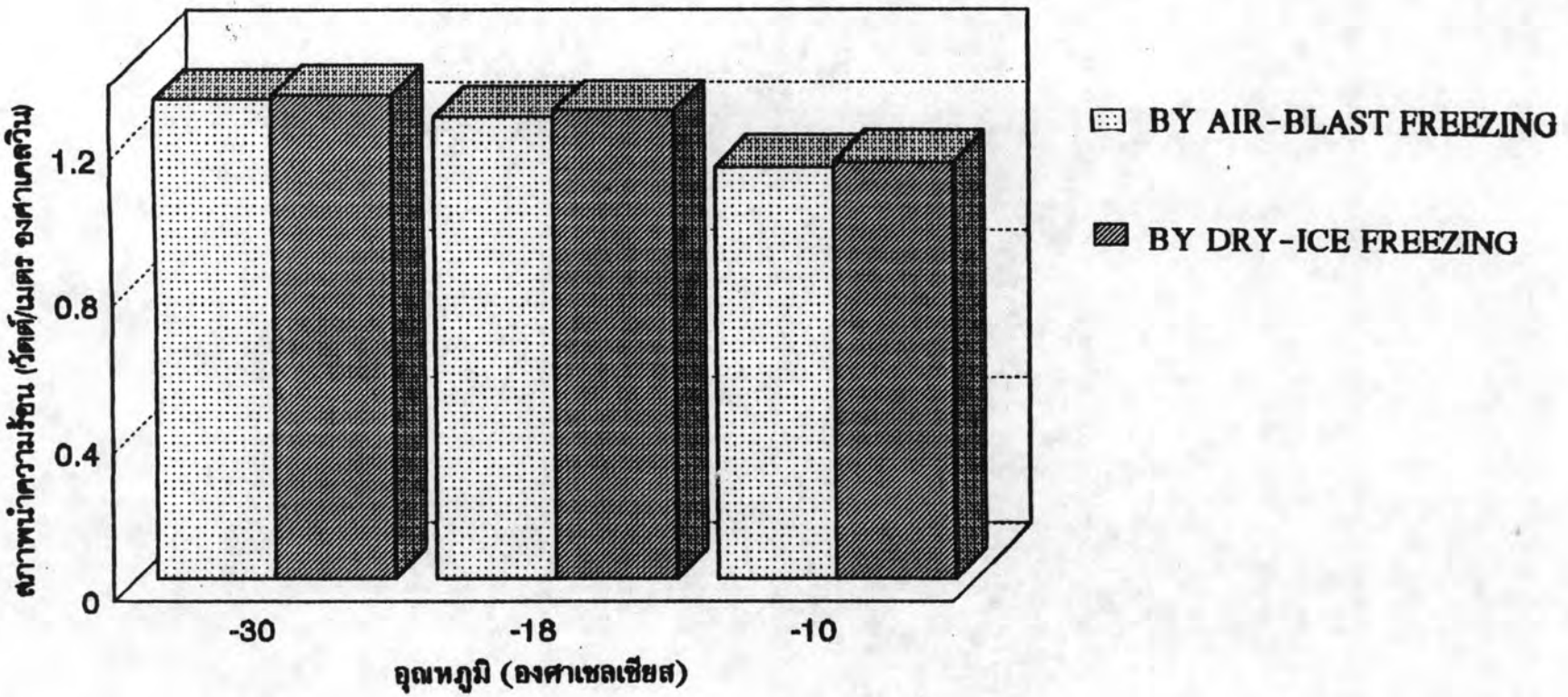
SOV	df	SS	MS	F
พันธุ์ (P)	1	1.195×10^{-2}	1.195×10^{-2}	88.347 *
วิธีการแช่แข็ง (M)	1	1.067×10^{-3}	1.067×10^{-3}	7.887 *
อุณหภูมิ (T)	2	2.288×10^{-1}	1.144×10^{-1}	845.542 *
PM	1	6.944×10^{-5}	6.944×10^{-5}	0.513
PT	2	7.737×10^{-4}	3.869×10^{-4}	2.859
MT	2	1.467×10^{-4}	7.336×10^{-5}	0.542
PMT	2	7.372×10^{-5}	3.686×10^{-5}	0.272
Error	24	3.247×10^{-3}	1.353×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของกุ้ง (ตารางที่ 4.4) มาเปรียบเทียบกันพบว่า กุ้งแชบ๊วยจะมีค่าสภาพนำความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำ ทั้งนี้เนื่องมาจากกุ้งแชบ๊วยมีปริมาณความชื้นมากกว่ากุ้งกุลาดำ ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และความชื้นถือว่าเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุด Toledo (1991) ได้คำนวณหาค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 19 องศาเซลเซียสขององค์ประกอบทางเคมีของเนื้อหมู พบว่าน้ำ โปรตีน ไขมัน เถ้า มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.602 0.200 0.128 และ 0.355 วัตต์/เมตร องศาเคลวิล ตามลำดับ ดังนั้นน้ำจึงมีอิทธิพลมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ และเมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการแช่แข็งพบว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพนำความร้อนมากกว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing (รูปที่ 4.1 และ 4.2) ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากวิธีการแช่แข็งที่แตกต่างกันทำให้โครงสร้างภายในเนื้อกุ้งแตกต่างกัน โดยกุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ซึ่งมีอัตราการแช่แข็งเร็วกว่าวิธี air-blast freezing จึงทำให้ผลึกของน้ำแข็งที่เกิดขึ้นมีจำนวนมากและมีขนาดเล็กกว่า (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2535) Mohsenin (1980) กล่าวจาก Luyet (1964) ว่าขนาดของผลึกน้ำแข็งในผลิตภัณฑ์เนื้อแช่แข็งจะมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน ดังนั้นกุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพนำความร้อนมากกว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing อาจเนื่องมาจากผลึกน้ำแข็งขนาดเล็กกว่ามีความต้านทานความร้อนน้อยกว่า



รูปที่ 4.1 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำในช่วงอุณหภูมิ -30±1 -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งแชบ๊วยในช่วงอุณหภูมิ -30±1 -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือแช่แข็งด้วย วิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

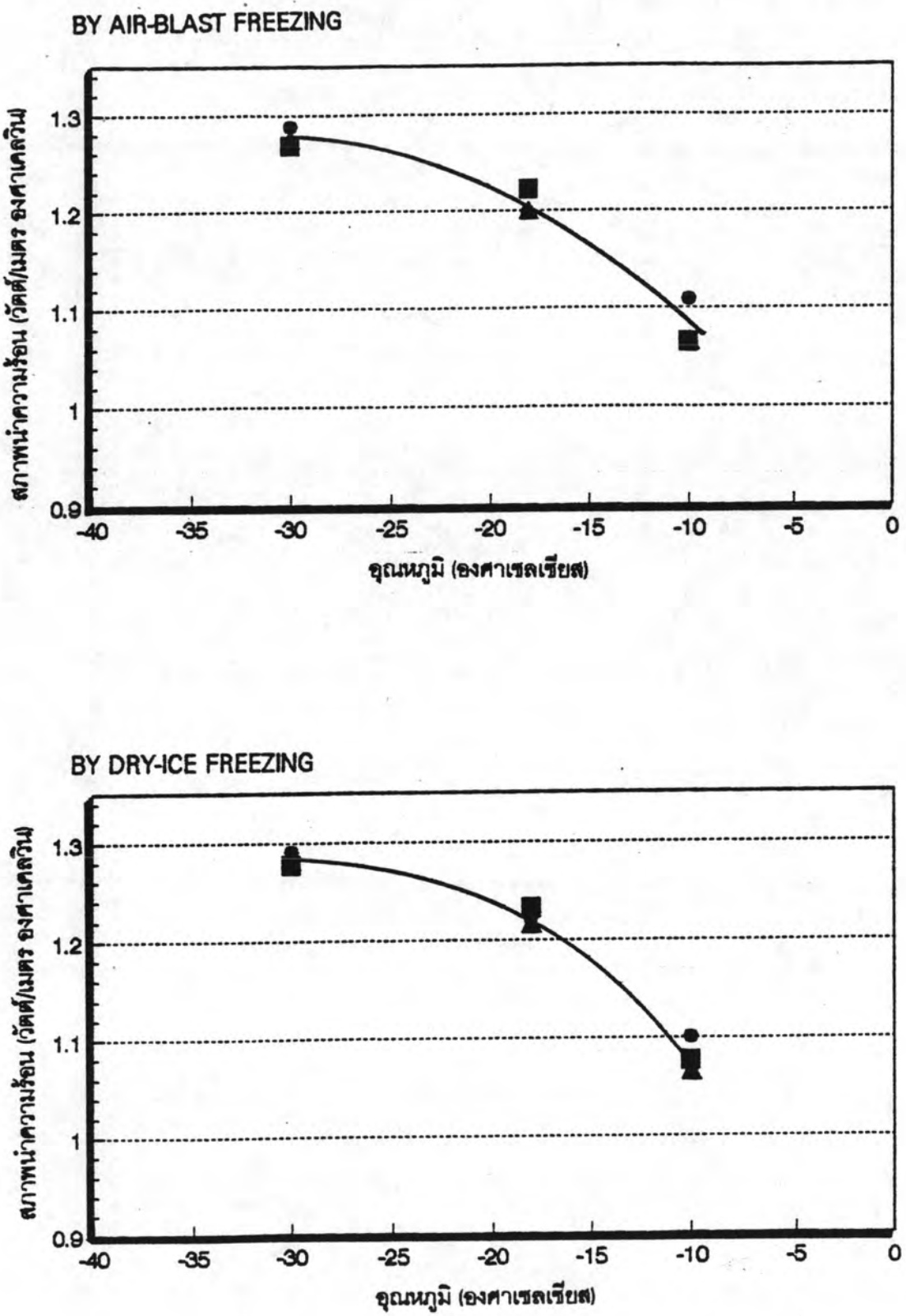
พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
		-30±1 °C	-18±1 °C	-10±1 °C
กุลาดำ	air-blast freezing	1.278±0.010 ^{n,b}	1.207±0.013 ^{y,c}	1.080±0.025 ^{n,b}
	dry-ice freezing	1.284±0.007 ^{n,b}	1.224±0.009 ^{y,b}	1.081±0.018 ^{n,b}
แชบ๊วย	air-blast freezing	1.298±0.007 ^{n,a}	1.250±0.007 ^{y,a}	1.117±0.002 ^{n,a}
	dry-ice freezing	1.310±0.003 ^{n,a}	1.266±0.003 ^{y,a}	1.131±0.013 ^{n,a}

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละพันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

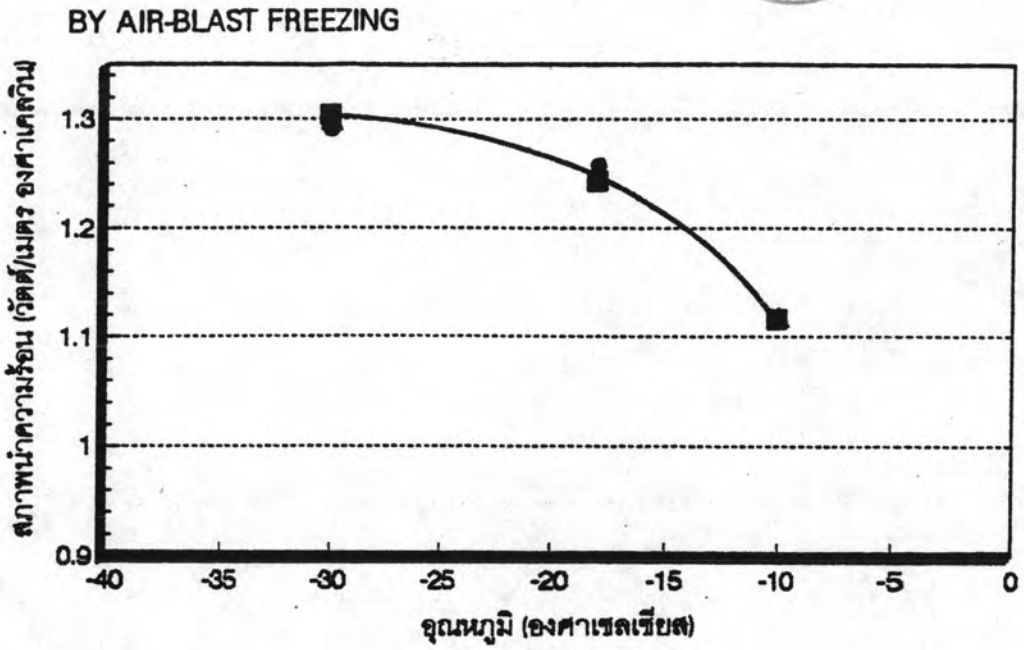
- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่พันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

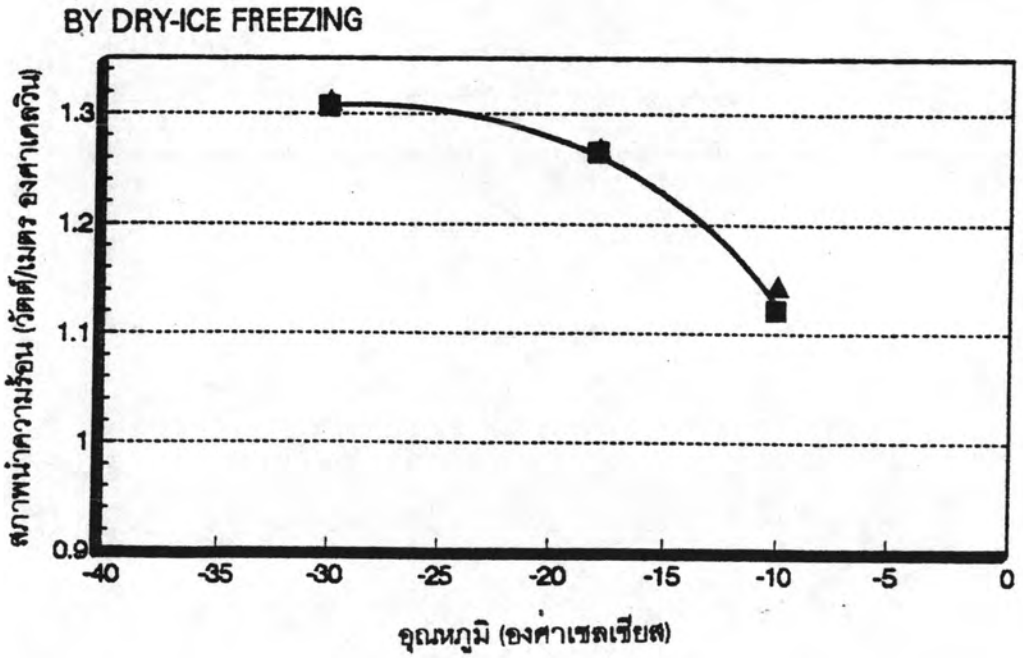
เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งพบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็ง ที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ที่อุณหภูมิ -30±1 -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง (รูปที่ 4.3 และ 4.4) ซึ่งคาดว่าเป็นผลเนื่องมาจากสัดส่วนปริมาณน้ำที่เป็นน้ำแข็งแตกต่างกัน กล่าวคือค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งจะมีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนของน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นในช่วงแรก ๆ ของการแช่แข็งปริมาณน้ำในเนื้อกุ้งยังเป็นน้ำแข็งไม่หมด จึงทำให้มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่ปริมาณน้ำในเนื้อกุ้งเป็นน้ำแข็งเกือบหมดแล้ว ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ พิชญ์อร วนาอินทรายุธ (2536) ซึ่งได้วัดค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองที่ความชื้นประมาณร้อยละ 81

ถึง 82 ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิลดลง เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อสัตว์อื่นๆ ในช่วงการแช่แข็ง (Miller and Sunderland, 1963; Sweat et al., 1973; Levy, 1982; Barrera and Zaritzky, 1779; Pham and Willix, 1989; Wang and Kolbe, 1990) เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อน (k) และอุณหภูมิ (T) ด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูปของ $k = A+BT+CT^2$ โดยมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ A, B และ C (ตารางที่ 4.5)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ





รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแชบ๊วย

ตารางที่ 4.5 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กุ้งกุลาดำ	air-blast freezing	$k = 0.834 - 2.962\times10^{-2}T - 4.900\times10^{-4}T^2$	0.971
	dry-ice freezing	$k = 0.787 - 3.584\times10^{-2}T - 6.400\times10^{-4}T^2$	0.986
กุ้งแชบ๊วย	air-blast freezing	$k = 0.837 - 3.434\times10^{-2}T - 6.300\times10^{-4}T^2$	0.996
	dry-ice freezing	$k = 0.842 - 3.547\times10^{-2}T - 6.600\times10^{-4}T^2$	0.993

จากการหาความสัมพันธ์ของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งโดยใช้ multiple regression โดยใช้ dummy variable สำหรับตัวแปรพันธุ์และวิธีการแช่แข็ง (Kleinbaum and Kupper, 1978) พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (28) โดยมีค่า $R^2 = 0.982$

$$k = 0.801+3.644\times10^{-2}P+1.089\times10^{-2}M-3.832\times10^{-2}T-6.100\times10^{-4}T^2 \quad \text{.....(28)}$$

เมื่อ P คือพันธุ์ของกุ้งสำหรับกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยมีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

M คือวิธีการแช่แข็งสำหรับวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing มีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

T คืออุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

4.3.2 ค่าความร้อนจำเพาะ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะ พบว่า พันธุ์ อุณหภูมิและอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและพันธุ์มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง

SOV	df	SS	MS	F
พันธุ์ (P)	1	1.778×10^{-12}	1.778×10^{-2}	105.108 *
วิธีการแช่แข็ง (M)	1	4.271×10^{-14}	4.271×10^{-4}	2.525
อุณหภูมิ (T)	2	2.990	1.495	8839.496 *
PM	1	5.400×10^{-6}	5.400×10^{-6}	0.032
PT	2	2.615×10^{-3}	1.308×10^{-3}	7.730 *
MT	2	7.070×10^{-5}	3.540×10^{-5}	0.209
PMT	2	3.940×10^{-5}	1.970×10^{-5}	0.116
Error	24	4.059×10^{-3}	1.691×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกุ้ง (ตารางที่ 4.7) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส กุ้งแชบ๊วยมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่ากุ้งกุลาดำเมื่อแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และ กุ้งแชบ๊วย มีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่ากุ้งกุลาดำเมื่อแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ทั้งนี้เนื่องจากกุ้งแชบ๊วยมีค่าความชื้นสูงกว่ากุ้งกุลาดำจึงมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่า ซึ่งผลของการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Levy (1979) ได้ทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อวัวในช่วงอุณหภูมิ -2 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าเนื้อวัวที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าจะมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่า ถึงแม้ว่าจะมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน และ พิชญ์อร วนาอินทรายุธ (2536) ซึ่งทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าปลาหมึกกระดองมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกกล้วย เนื่องจากปลาหมึกกระดองมีความชื้นสูงกว่าปลาหมึกกล้วย

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

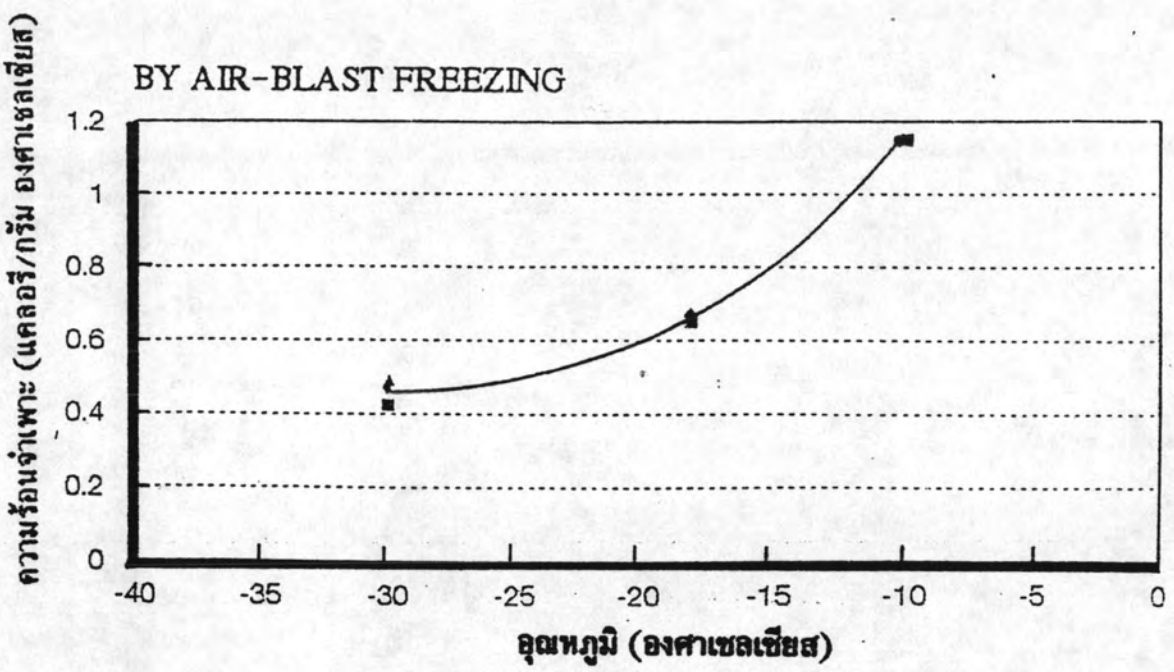
พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
		-30±1 °C	-18±1 °C	-10±1 °C
กุลาดำ	air-blast freezing	0.460±0.034 ^{n,b}	0.661±0.014 ^{y,bc}	1.146±0.002 ^{n,b}
	dry-ice freezing	0.450±0.015 ^{n,b}	0.654±0.006 ^{y,c}	1.145±0.002 ^{n,b}
แชบ๊วย	air-blast freezing	0.519±0.004 ^{n,a}	0.687±0.002 ^{y,a}	1.194±0.012 ^{n,a}
	dry-ice freezing	0.516±0.007 ^{n,a}	0.675±0.011 ^{y,ab}	1.189±0.008 ^{n,a}

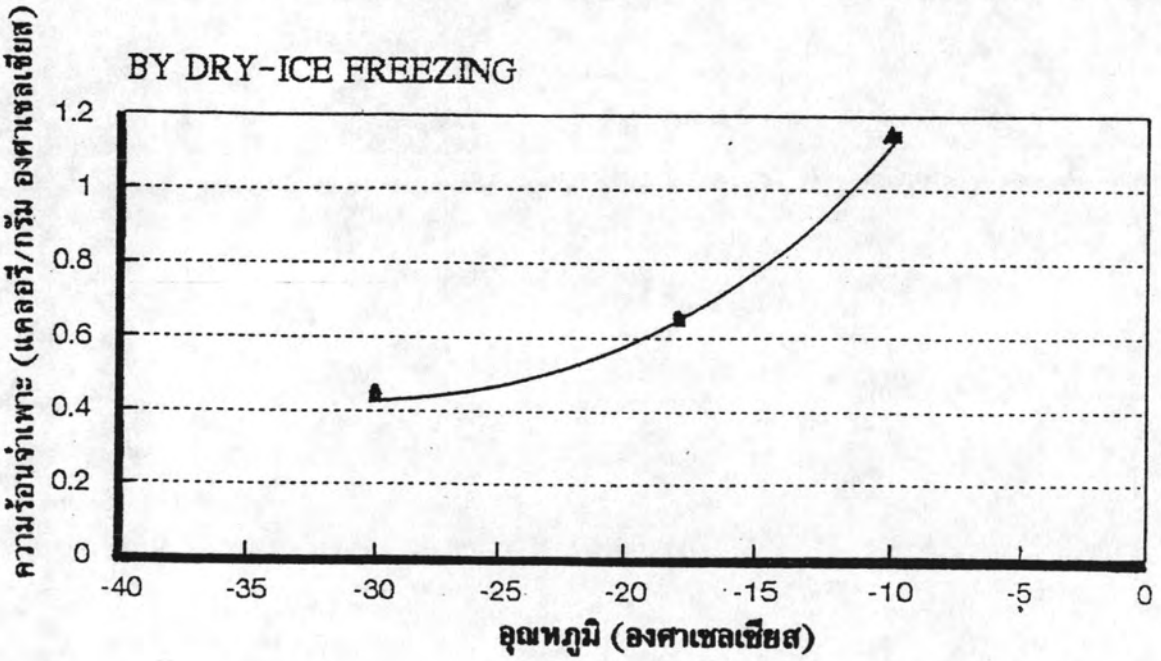
* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละพันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่พันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

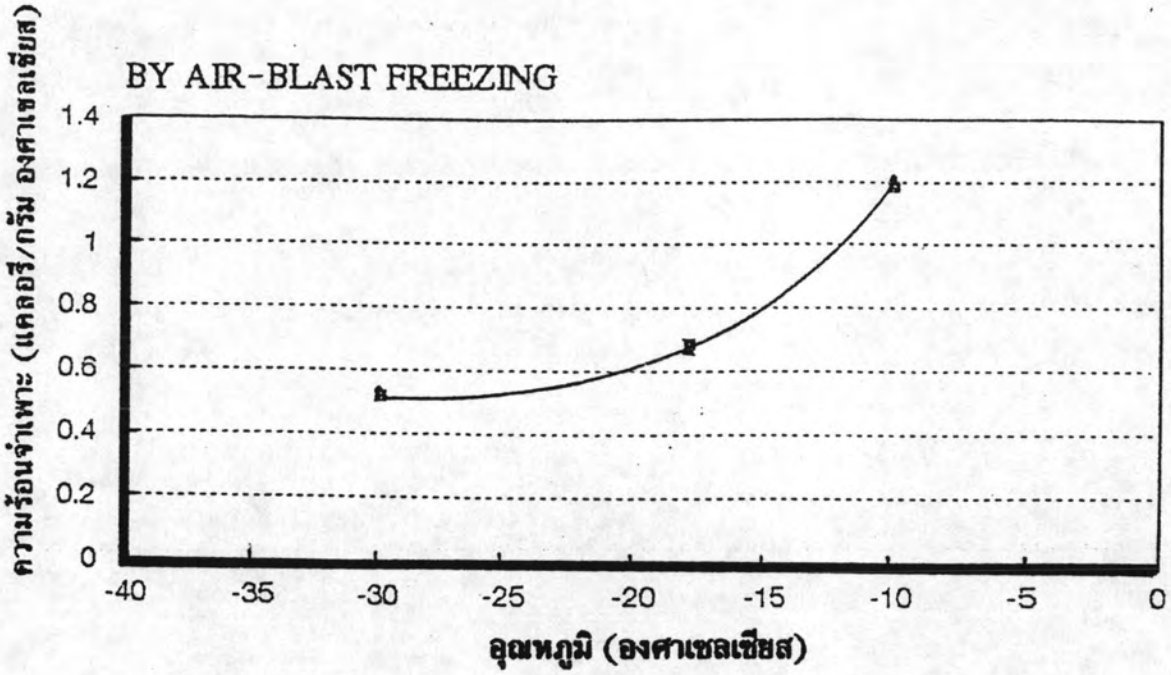
เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง พบว่ากุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็งที่ใช้วิธีการแช่แข็งแบบเดียวกันจะให้ค่าความร้อนจำเพาะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของค่าความร้อนจำเพาะมีลักษณะแบบพาราโบลาหงาย (รูปที่ 4.5และ 4.6) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำเป็นน้ำแข็งในช่วงของการแช่แข็ง ซึ่งความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าสูงกว่าน้ำแข็งประมาณ 2 เท่า (Lamb, 1976) ดังนั้นในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำเป็นน้ำแข็งยังไม่หมด ค่าความร้อนจำเพาะจึงสูงตามค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ พิชญ์อร วนาอินทรายุธ (2536) ที่ได้ทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง -10 องศาเซลเซียสและพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกลดลงแบบพาราโบลาหงายเมื่ออุณหภูมิต่ำลง เช่นเดียวกับความร้อนจำเพาะของเนื้อปลาในช่วงการแช่แข็ง (Long, 1955) การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า

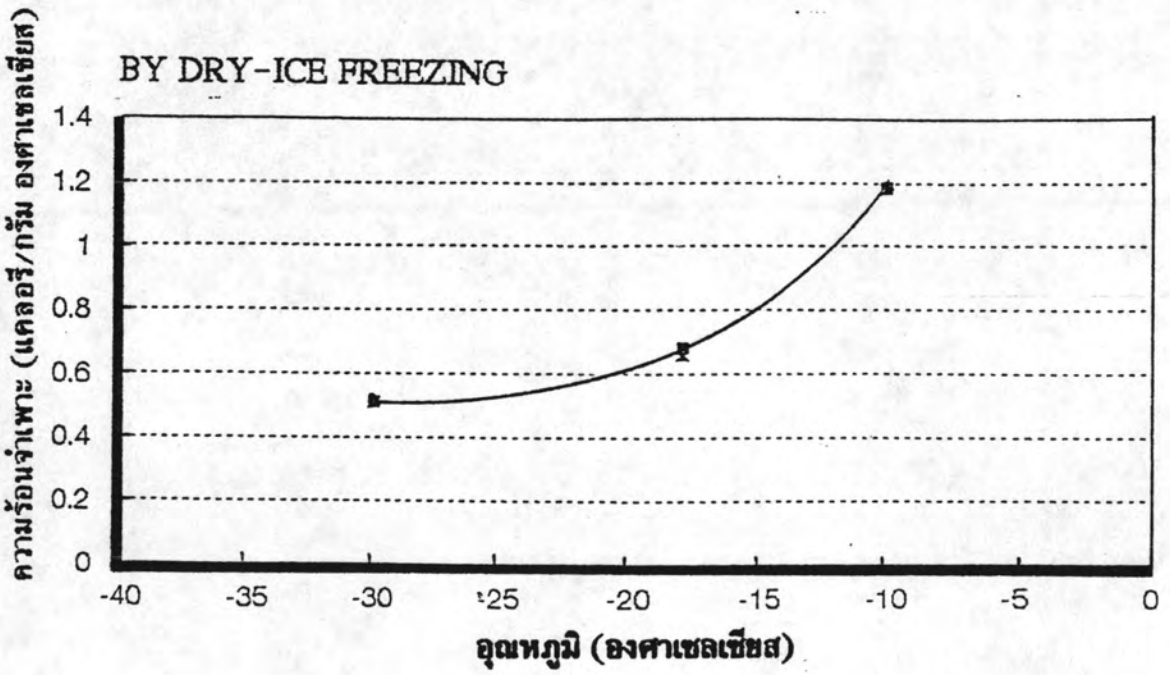
ความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และ วิธี dry-ice freezing ด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูป $C_p = A+BT+CT^2$ (ตารางที่ 4.8)





รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ





รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแชบ๊วย

ตารางที่ 4.8 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กุ้งกุลาดำ	air-blast freezing	$C_p = 2.147+0.122T+2.192x10^{-3}T^2$	0.996
	dry-ice freezing	$C_p = 2.158+0.123T+2.216x10^{-3}T^2$	0.993
กุ้งแชบ๊วย	air-blast freezing	$C_p = 2.276+0.133T+2.488x10^{-3}T^2$	0.999
	dry-ice freezing	$C_p = 2.292+0.136T+2.557x10^{-3}T^2$	0.998

จากการศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งโดยใช้ multiple regression พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (29) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.998

$$C_p = 2.207+2.267x10^{-2}P+1.292x10^{-1}T-1.130x10^{-3}PT +2.363x10^{-3}T^2 \quad \text{.....(29)}$$

4.3.1 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

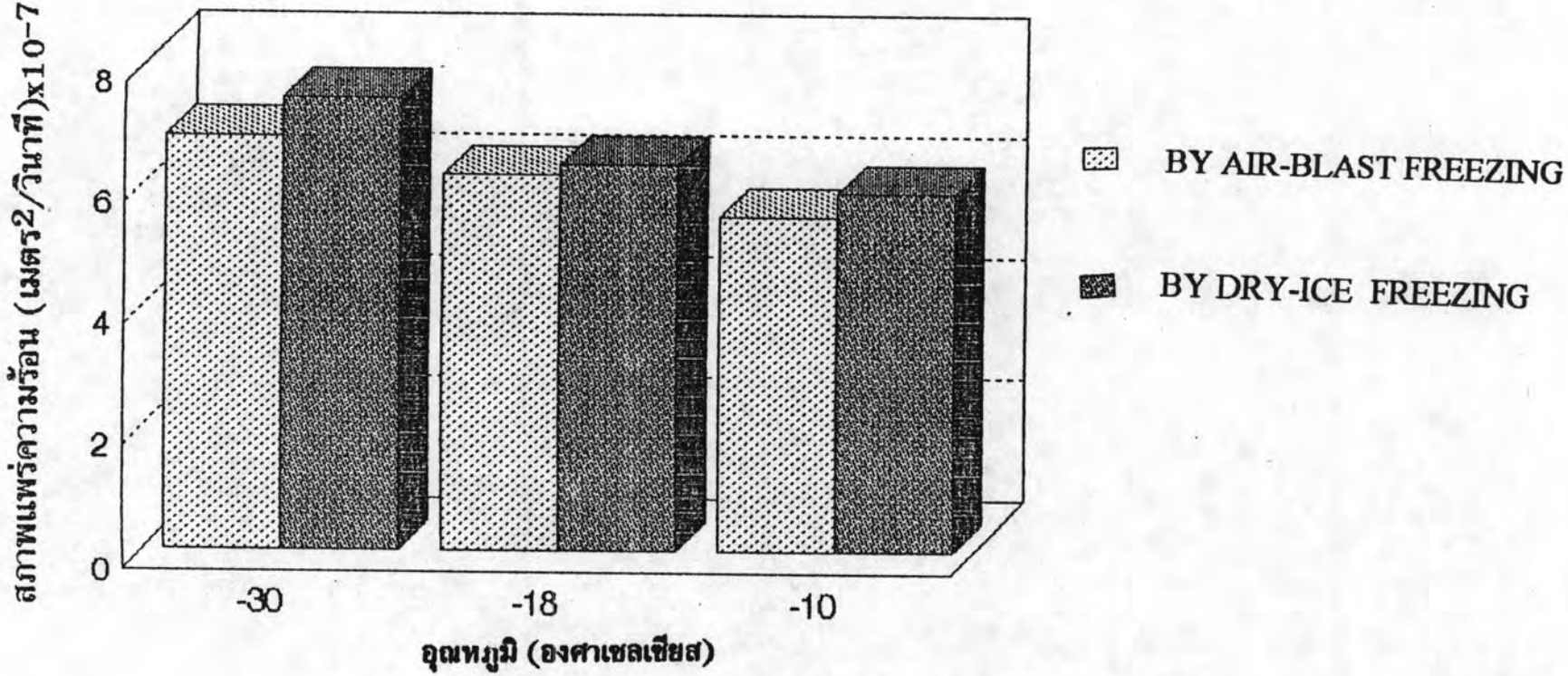
จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ได้ผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้ง

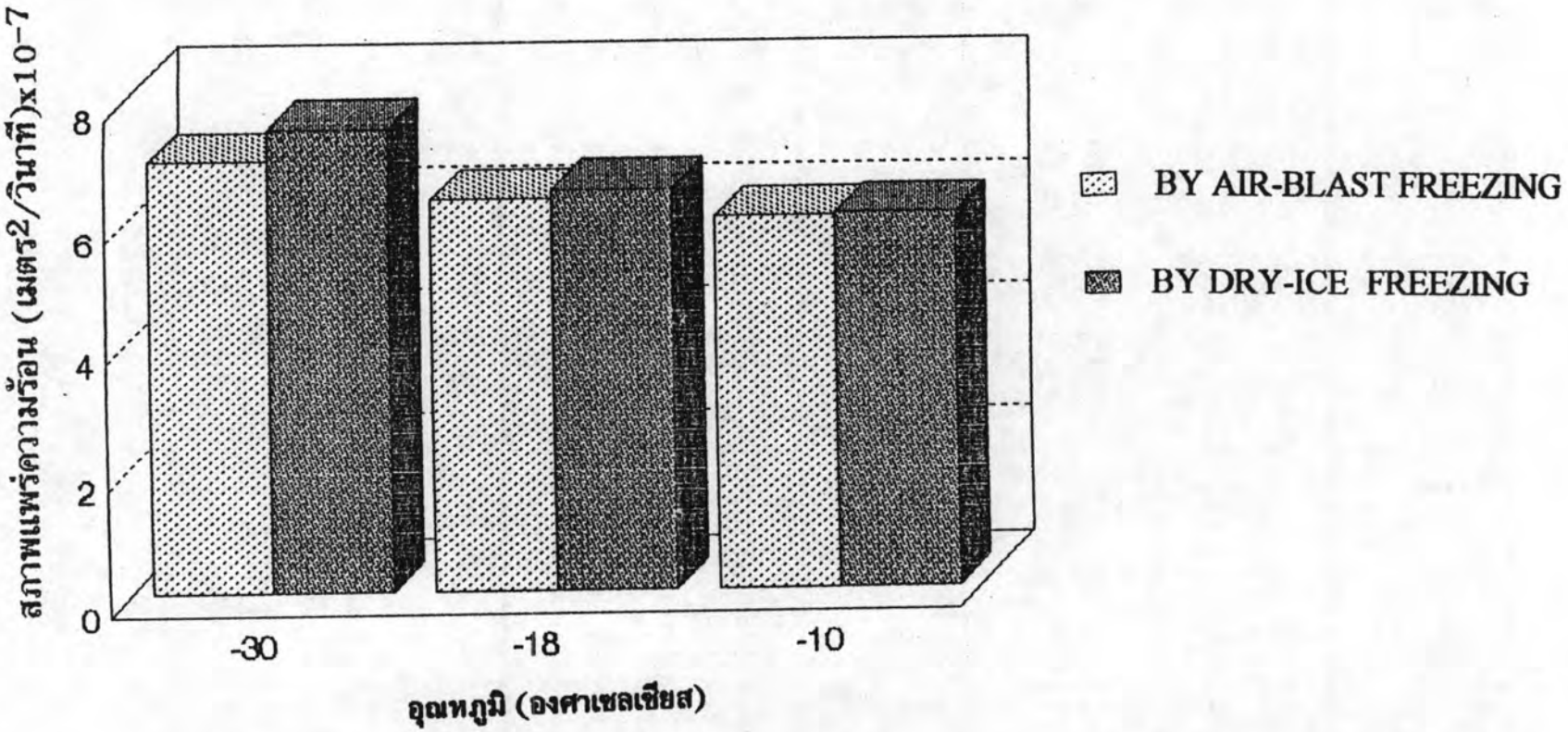
SOV	df	SS	MS	F
พันธุ์ (P)	1	3.26×10^{-15}	3.26×10^{-15}	4.880 *
วิธีการแช่แข็ง(M)	1	9.38×10^{-15}	9.38×10^{-15}	14.047 *
อุณหภูมิ (T)	2	1.05×10^{-13}	5.26×10^{-14}	78.736 *
PM	1	6.77×10^{-16}	6.77×10^{-16}	1.014
PT	2	9.58×10^{-16}	4.79×10^{-16}	0.718
MT	2	3.19×10^{-15}	1.59×10^{-15}	2.387
PMT	2	4.39×10^{-16}	2.19×10^{-16}	0.329
Error	24	1.60×10^{-14}	6.68×10^{-16}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากตารางที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่ากุ้งแชบ๊วยมีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่ากุ้งกุลาดำซึ่งผ่านการแช่แข็งทั้งวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ทั้งนี้เนื่องจากกุ้งแชบ๊วยมีปริมาณความชื้นมากกว่ากุ้งกุลาดำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Nesvadba และ Eunson (1984) ที่พบว่าปลา cod บดมีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ส่วนผลของวิธีการแช่แข็งทั้ง 2 วิธี คือ วิธี air-blast freezing กับ วิธี dry-ice freezing ที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วย พบว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing (รูปที่ 4.7 และ 4.8) ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างของผลึกน้ำแข็งภายในเนื้อกุ้งที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกันกับที่พบในค่าสภาพนำความร้อน



รูปที่ 4.7 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำในช่วงอุณหภูมิ -30±1 -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งแชบ๊วยในช่วงอุณหภูมิ -30±1 -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส

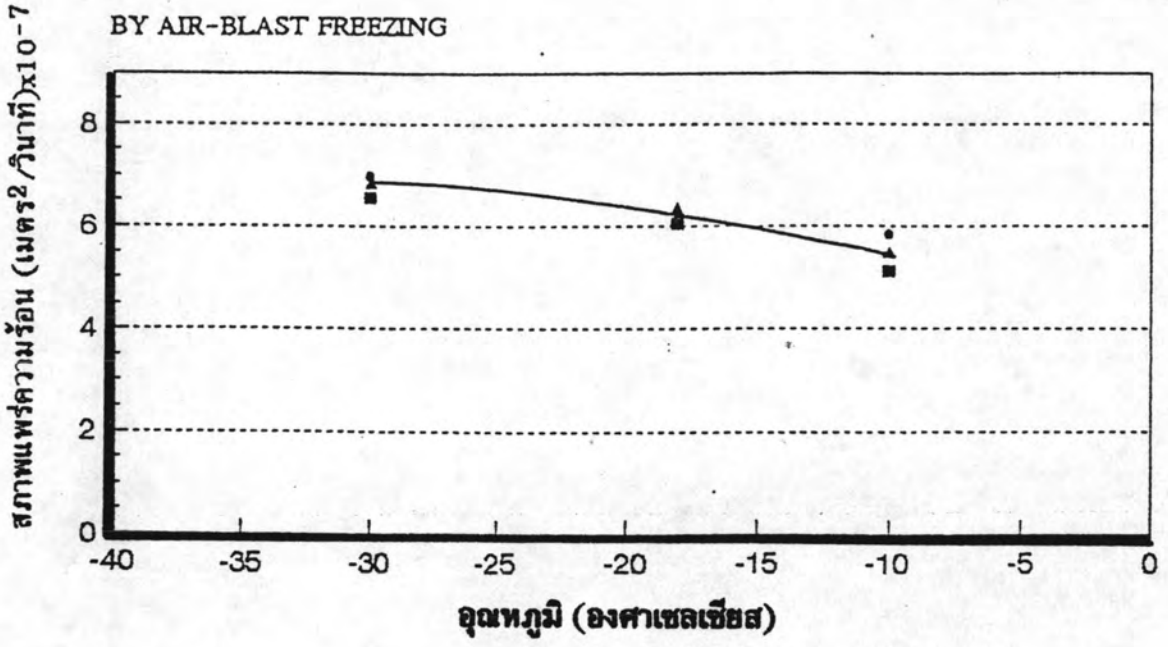
ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

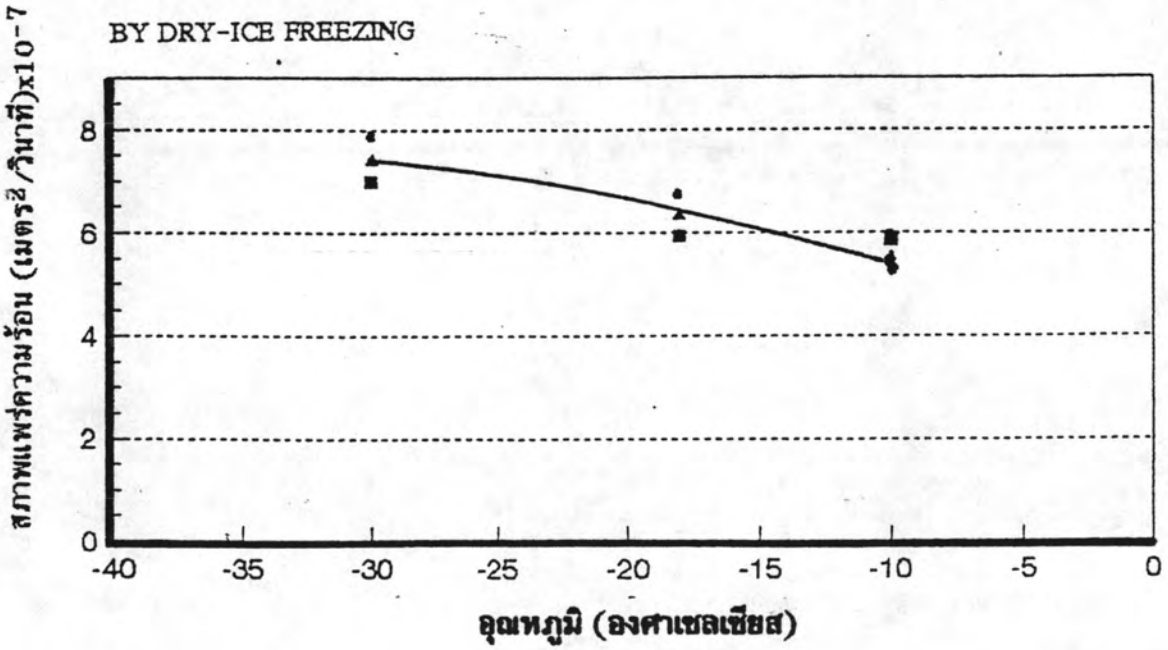
พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^{-7} ที่ช่วงอุณหภูมิ		
		-25 ถึง -35 °C	-13 ถึง -23 °C	-5 ถึง -15 °C
กุลาดำ	air-blast freezing	6.778±0.204 ^{n,c}	6.167±0.155 ^{y,a}	5.478±0.356 ^{n,b}
	dry-ice freezing	7.428±0.431 ^{n,b}	6.343±0.406 ^{y,a}	5.881±0.051 ^{y,a}
แชบ๊วย	air-blast freezing	6.944±0.196 ^{n,bc}	6.315±0.258 ^{y,a}	5.994±0.084 ^{y,a}
	dry-ice freezing	7.467±0.345 ^{n,a}	6.460±0.128 ^{y,a}	6.034±0.091 ^{y,a}

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละพันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

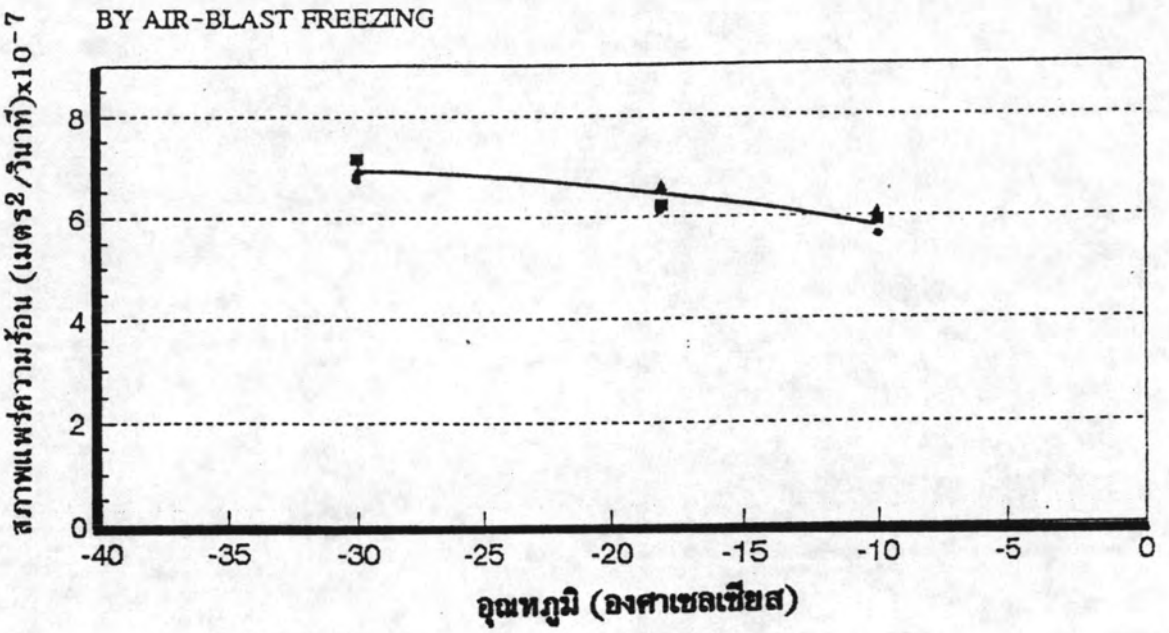
- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่พันธุ์หรือวิธีการแช่แข็งต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

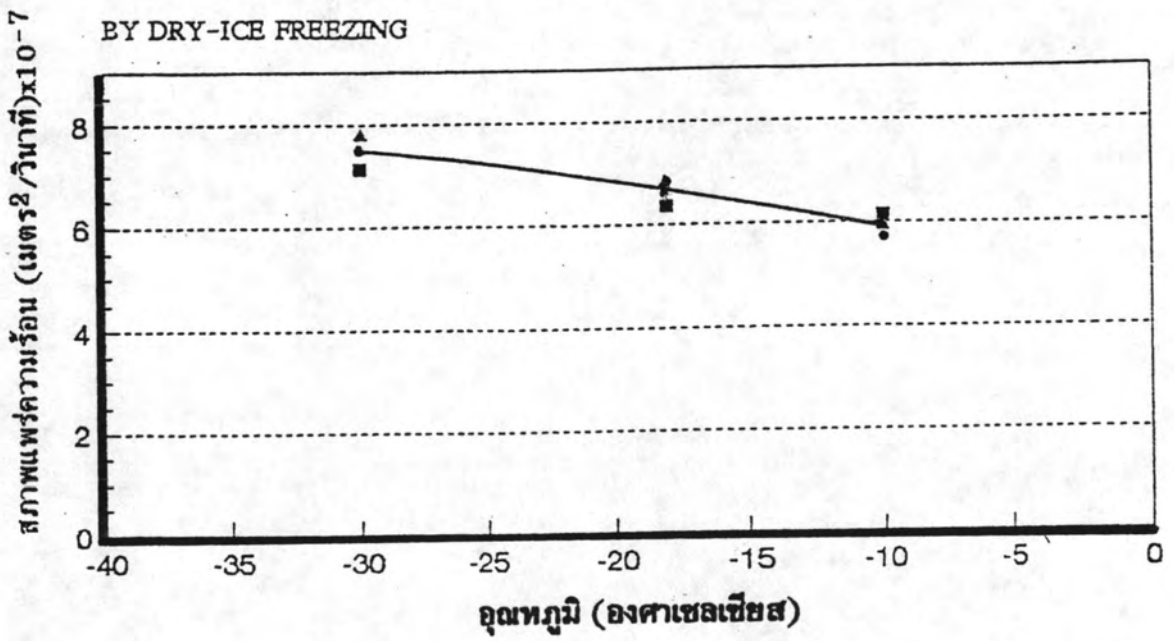
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียสมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำ ดังนั้นในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำยังเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งไม่หมดค่าสภาพแพร่ความร้อนจึงต่ำกว่าในช่วงหลังของการแช่แข็ง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nesvadba และ Eunson (1984) ซึ่งทำการทดลองกับปลา cod บดที่ความชื้นร้อยละ 90.4 ในช่วงอุณหภูมิแช่แข็ง พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และให้ผลเช่นเดียวกันกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ –40 ถึง -10 องศาเซลเซียส (พิชญ์อร วนาอินทรายุธ, 2536) ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยทั้งที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing และ วิธี dry-ice freezing ในช่วงของการแช่แข็ง พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูป $\alpha = A+BT+CT^2$ โดยมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ A, B และ C (ตารางที่ 4.11)





รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ





รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแชบ๊วย

ตารางที่ 4.11 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กุ้งกุลาดำ	air-blast freezing	$\alpha x10^7 = 4.299-13.56x10^{-2}T-1.760x10^{-3}T^2$	0.868
	dry-ice freezing	$\alpha x10^7 = 5.597-1.198x10^{-2}T-1.635x10^{-3}T^2$	0.843
กุ้งแชบ๊วย	air-blast freezing	$\alpha x10^7 = 5.703-2.296x10^{-2}T-6.130x10^{-4}T^2$	0.862
	dry-ice freezing	$\alpha x10^7 = 5.778-1.032x10^{-2}T-1.533x10^{-3}T^2$	0.919

จากการศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งโดยใช้ multiple regression พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (30) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.847

$$\alpha = [5.088+1.903x10^{-1}P+3.228x10^{-1}M - 4.519x10^{-2}T+5.050x10^{-4}T^2]x10^{-7} \quad .....(30)$$