



รายงานการวิจัย

ทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดินปี 2535

รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และทางความร้อนของกึ่งและบลาพนัก

โดย

ชัยยุทธ ธีรดิษากุล

กัญญา เลหาสงคราม

สาขารุฟ ชัยวานิชศิริ

พิชญ์อร นานอินทราชูธ

สรายุทธ ชานิกุล

RESEARCH REPORT

GOVERNMENT RESEARCH FUND, FISCIAL YEAR 1992

FINAL REPORT

PHYSICOCHEMICAL AND THERMAL PROPERTIES OF PRAWNS AND SQUIDS

BY

CHAIYUTE THUNPITHAYAKUL

KALAYA LACHASONGKRAM

SAIWARUN CHAIWANICHSIRI

PICHAON VANAIN'TARAVUTE

SARAYUTE CHUMNIKUL

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้จากการสนับสนุนเงินทุนวิจัย จากเงินทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2535 ที่จัดสรรให้กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และฝ่ายวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนให้ทำการวิจัยในเรื่องนี้

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นศึกษาการสร้างและปรับปรุงอุปกรณ์สำหรับหาค่าสมบัติทางความร้อนของ กุ้งและปลาหมึกให้เหมาะสม โดยกุ้งศึกษาผลของพันธุ์ *Penaeus monodon* Fabricius, *Penaeus merguensis* de Man) วิธีการแช่แข็ง (โดยใช้วิธี air-blast freezing และ dry-ice freezing) และ อุณหภูมิ (-30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส) ส่วนปลาหมึกทำการศึกษาค่าผลของพันธุ์ (*Lotigo formosana* และ *Sepia pharaonis*) ภาวะการละลาย (ผ่านการละลายและไม่ผ่านการละลาย) และ อุณหภูมิ (-40 ± 1 -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนซึ่งได้แก่ ความร้อนจำเพาะ สภาพนำความร้อน และสภาพแพร่ความร้อน โดยหาค่าความร้อนจำเพาะด้วยวิธี modified method of mixture ค่าสภาพนำความร้อนด้วย thermal conductivity probe และค่า สภาพแพร่ความร้อนด้วยวิธี thermal diffusivity plate ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อน ในช่วงแช่แข็งของกุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing มีค่าเท่ากับ 0.423 - 1.148 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส 1.109 - 1.288 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 5.116×10^{-7} - 6.942×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ และกุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าเท่ากับ 0.433 - 1.147 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส 1.066 - 1.291 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 5.837×10^{-7} - 7.851×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ สำหรับค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงแช่แข็งของกุ้ง แช่บิวท์ที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing มีค่าเท่ากับ 0.516 - 1.206 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส 1.116 - 1.304 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 5.908×10^{-7} - 7.141×10^{-7} เมตร²/วินาที และกุ้งแช่บิวท์ที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าเท่ากับ 0.509 - 1.198 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส 1.122 - 1.313 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 5.942×10^{-7} - 7.800×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ ในช่วงการแช่แข็งของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าเท่ากับ 0.481 - 1.146 แคลอรีต่อกรัม องศาเซลเซียส 1.311 - 1.567 วัตต์ต่อเมตร องศาเซลวิน และ 2.761×10^{-7} - 7.451×10^{-7} เมตร²ต่อวินาที ตามลำดับ และที่ผ่านการละลายมีค่า 0.375 - 1.017 แคลอรีต่อกรัม องศาเซลเซียส 1.156 - 1.394 วัตต์ต่อเมตร องศาเซลวิน และ 2.833×10^{-7} - 8.814×10^{-7} เมตร²ต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายในช่วงแช่แข็งมีค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อน เท่ากับ 0.435 - 1.111 แคลอรีต่อกรัม องศาเซลเซียส 1.279 - 1.523 วัตต์ต่อเมตร องศาเซลวิน และ 2.891×10^{-7} - 8.492×10^{-7} เมตร²ต่อวินาที ตามลำดับ ส่วนที่ผ่านการละลายในช่วงแช่แข็งมีค่า 0.426 - 1.066 แคลอรีต่อกรัม องศาเซลเซียส 1.244 - 1.493 วัตต์ต่อเมตร องศาเซลวิน และ 2.901×10^{-7} - 8.554×10^{-7} เมตร²ต่อวินาที ตามลำดับ สำหรับกุ้งค่าสภาพนำความร้อน

และค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความสัมพันธ์แบบ polynomial กับ พันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิ ส่วน
ค่าค่าความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์แบบ polynomial กับ พันธุ์และอุณหภูมิ สำหรับปลาหมึก ค่า
ความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความสัมพันธ์แบบ polynomial
พันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ

ABSTRACT

This research focused firstly on; constructing and improving the proper equipment for measuring the specific heat (C_p), thermal conductivity (k) and thermal diffusivity (α) of giant tiger prawn, banana prawn, squid and cuttle fish and secondly, studying the effects of breeds (*Penaeus monodon* Fabricius, *Penaeus mergensensis* de Man), freezing methods (air-blast freezing and dry-ice freezing) and temperatures (-30 ± 1 , -18 ± 1 and $-10 \pm 1^\circ\text{C}$) for giant tiger prawn and banana prawn; and studying the effects of breeds (*Lotigo formosana* and *Sepia pharaonis*), conditions of thawing (unthawed and thawed) and temperatures (-40 ± 1 , -30 ± 1 , -18 ± 1 and $-10 \pm 1^\circ\text{C}$) for squid and cuttle fish on their thermal properties. The C_p , k and α were measured by modified method of mixture, thermal conductivity probe, and thermal diffusivity plate, respectively. The corresponding C_p , k and α of giant tiger prawn frozen by air-blast freezing were $0.423 - 1.148 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.109 - 1.288 \text{ W/m K}$, and $5.116 \times 10^{-7} - 6.942 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ while the giant tiger prawn frozen by dry-ice freezing were $0.433 - 1.147 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.066 - 1.291 \text{ W/m K}$, and $5.837 \times 10^{-7} - 7.851 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ respectively. The values of C_p , k and α of banana prawn frozen by air-blast freezing were $0.516 - 1.206 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.116 - 1.304 \text{ W/m K}$, and $5.908 \times 10^{-7} - 7.141 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and those of banana prawn frozen by dry-ice freezing were $0.509 - 1.198 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.122 - 1.313 \text{ W/m K}$, and $5.942 \times 10^{-7} - 7.800 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. The values of C_p , k and α of unthawed squid were $0.481 - 1.143 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.311 - 1.567 \text{ W/m K}$, and $2.761 \times 10^{-7} - 7.451 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ while those of the thawed squid were $0.375 - 1.017 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.156 - 1.349 \text{ W/m K}$, and $2.833 \times 10^{-7} - 8.814 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. The value of C_p , k and α of unthawed cuttle fish were $0.435 - 1.111 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.279 - 1.523 \text{ W/m K}$, and $2.891 \times 10^{-7} - 8.492 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ and those of thawed cuttle fish were $0.426 - 1.066 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $1.244 - 1.493 \text{ W/m K}$, and $2.901 \times 10^{-7} - 8.554 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. The k and α were found to be polynomial functions with breeds, freezing methods and temperatures, while the C_p was found to be polynomial functions with breeds and temperature for giant tiger prawn and banana prawn. For squid and cuttle fish, the C_p , k and α were found to be polynomial functions with breeds, conditions of thawing and temperatures.

สารบัญ

	หน้า
หน้าหัวเรื่อง	i, ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทคัดย่อ (ไทย)	iv, v
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	vi
สารบัญ	vii, viii
รายการตารางประกอบ	ix, x, xi
รายงานภาพประกอบ	xii, xiii, xiv
คำอธิบายสัญลักษณ์	xv, xvi, xvii
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารบริษัท	2
2.1 การวัดสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล	2
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล	28
2.3 ปลาหมึก	33
2.4 กุ้ง	37
2.5 สมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง	39
3. วิธีการทดลอง	42
3.1 ทฤษฎีและสมมติฐานในการทดลอง	42
3.2 ลักษณะของ เครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อน	45
3.3 ตัวอย่าง	51
3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	52
3.5 การหาความหนาแน่นของตัวอย่าง	52
3.6 การเตรียมตัวอย่าง	53
3.7 วิธีการทดลองหาสมบัติทางความร้อน	55
3.8 ขอบเขตในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก และกุ้ง	59
3.9 รวบรวมผลการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ	60

4. ผลการทดลองและวิจารณ์	61
4.1 การตรวจสอบเครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง	61
4.2 ผลการทดลองและวิจารณ์สมบัติทางความร้อนของปลาหมึก	64
4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึก	64
4.2.2 ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก	65
4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์สมบัติทางความร้อนของกุ้ง	91
4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้ง	91
4.3.2 ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของกุ้ง	92
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	118
5.1 สรุปผลการทดลอง	118
5.2 ข้อเสนอแนะ	123
เอกสารอ้างอิง	124
ภาคผนวก ก	133
ภาคผนวก ข	134
ภาคผนวก ค	139
ภาคผนวก ง	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ของ องค์ประกอบต่างๆในอาหารกับอุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)	3
2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความชื้น (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน) และความหนาแน่น(กรัม/มิลลิเมตร) ขององค์ประกอบต่างๆในอาหารกับอุณหภูมิ (องศาเซลวิน)	9
2.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิดกับความชื้น	29
2.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลบางชนิดกับไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต	30
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยในส่วนที่กินได้ 100 กรัม	35
2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกระดองในส่วนที่กินได้ 100 กรัม	36
2.7 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก	40
2.7 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้ง	41
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลาย	65
4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าความร้อน จำเพาะของปลาหมึก	66
4.3 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการ ละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	69
4.4 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	70

- 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพ
ความร้อนของปลาหมึก 74
- 4.6 ค่าเฉลี่ยสภาพความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการ
ละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) 77
- 4.7 สมการ regression ของค่าสภาพความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก
กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง
ของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) 78
- 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแปร
ความร้อนของปลาหมึก 82
- 4.9 ค่าเฉลี่ยสภาพแปรความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการ
ละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง
-10 องศาเซลเซียส) 84
- 4.10 สมการ regression ของค่าสภาพแปรความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก
กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง
ของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) 85
- 4.11 ค่าสภาพแปรความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย
และที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศา
เซลเซียส) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (15) 90
- 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งกุลาดำ 91
- 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งแช่ปวย 92
- 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่ำค่าความร้อน
จำเพาะของกุ้ง 93
- 4.15 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี
air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ในช่วง
อุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 95

- 4.16 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็ง ด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 96
- 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพ นำความร้อนของกุ้ง 101
- 4.18 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ในช่วง อุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 102
- 4.19 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็ง ด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 105
- 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพ แพร่ความร้อนของกุ้ง 109
- 4.21 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ในช่วง อุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 111
- 4.22 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็ง เมื่อทำการแช่แข็งด้วยวิธี air-balst freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส 112

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ก. ภาพตัดขวางของ specific heat calorimeter	4
2.1 ข. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำใน calorimeter	4
2.2 ก. รูปแบบของ DSC	6
2.2 ข. DSC Thermogram สำหรับการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ	6
2.3 เครื่องมือที่ใช้หาค่า ความร้อนจำเพาะโดยวิธีของ Moline	7
2.4 ภาพตัดขวางของ Parallel plate apparatus	11
2.5 Concentric sphere apparatus	12
2.6 ภาพตัดขวางของ Concentric cylinder apparatus	14
2.7 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าสภาพการนำความร้อนแบบ semi-steady state	16
2.8 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe	18
2.9 ตำแหน่งของ thermocouple และ heater ใน aluminium plate	20
2.10 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่างโดยวิธี Acalorimeter	22
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของสภาพแพร่ความร้อน	23
2.12 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยการวัด temperature profile	24
2.13 ตัวอย่าง slab ที่ใช้ในการทดลอง	27
2.14 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab shape	27
2.15 ลักษณะโครงสร้างของบลานหมึก	34
2.16 ลักษณะของกึ่งกุลาตา	38
2.17 ลักษณะของกึ่งแปเปว	39
3.1 ภาพตัดขวางของแคลอริมิเตอร์	46

3.2	ลักษณะของ thermal conductivity probe	47
3.3	ลักษณะของ thermal conductivity plate	48
3.4	ลักษณะของ thermal diffusivity plate	50
3.5	เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab ในการทดลอง	51
4.1	ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับภาวะการละลายต่อค่าความร้อนจำเพาะของ ปลาหมึกในช่วงอุณหภูมิ (ก) -40 ± 1 องศาเซลเซียส, (ข) -30 ± 1 องศาเซลเซียส (ค) -18 ± 1 องศาเซลเซียส (ง) -10 ± 1 องศาเซลเซียส	72
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	73
4.3	ผลของอิทธิพลร่วมของภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของ ปลาหมึกในช่วงอุณหภูมิ (ก) -40 ± 1 องศาเซลเซียส, (ข) -30 ± 1 องศาเซลเซียส (ค) -18 ± 1 องศาเซลเซียส (ง) -10 ± 1 องศาเซลเซียส	80
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	81
4.5	ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ ความร้อนของปลาหมึกทั้งที่ (ก)ไม่ผ่านการละลาย และ (ข)ที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ(-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	87
4.6	ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อสภาพแพร่ ความร้อนของ (ก) ปลาหมึกกล้วย และ (ข) ปลาหมึกกระดองในช่วง อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ(-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)	88

- 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก
กระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายกับอุณหภูมิในช่วง
อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) 98
- 4.8 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับวิธีการแช่แข็งต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 -10 ± 1 องศาเซลเซียส
- 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ 99
- 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่บ๊วย 100
- 4.11 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำ
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 -10 ± 1 องศาเซลเซียส 103
- 4.12 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนจำเพาะของกุ้งแช่บ๊วย
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 -10 ± 1 องศาเซลเซียส 104
- 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ 107
- 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่บ๊วย 108
- 4.15 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำ
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 -10 ± 1 องศาเซลเซียส 114
- 4.16 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนจำเพาะของกุ้งแช่บ๊วย
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 -10 ± 1 องศาเซลเซียส 115
- 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ 116
- 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า
จุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่บ๊วย 117

คำอธิบายสัญลักษณ์

- A = พื้นที่หน้าตัดของการถ่ายโอนความร้อน
- C_e = Euler's constant (0.5772157)
- C_p = ความร้อนจำเพาะ
- C_{pA} = ความร้อนจำเพาะของอะลูมิเนียม
- C_{pB} = ความร้อนจำเพาะของของเหลวใน chamber B
- C_{pS} = ความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง
- C_{pt} = ความร้อนจำเพาะของ stainless steel
- C_{pW} = ความร้อนจำเพาะของน้ำ
- C_{pr} = ความร้อนจำเพาะของสารมาตรฐานอ้างอิง
- D_s = ความหนาของตัวอย่าง
- D_r = ความหนาของสารมาตรฐานอ้างอิง
- d = deflection สำหรับตัวอย่าง
- d' = deflection สำหรับสารมาตรฐานอ้างอิง
- dT/dt = ความชันของกราฟเส้นตรงช่วงหลังจากภาวะสมดุล
- dT/dx = ความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทางเดียวกับการถ่ายโอนความร้อน
- E = ปริมาณความร้อนที่สูญเสียหรือได้รับจากสิ่งแวดล้อมที่ลดลง
- f = ค่าความชันของ heating curve
- H_c = ค่าความจุความร้อน
- h = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว
- I = กระแสไฟฟ้าที่เข้า
- k = ค่าสภาพนำความร้อน
- k_r = สภาพนำความร้อนของสารมาตรฐานอ้างอิง
- k_s = สภาพนำความร้อนของตัวอย่าง

- L = ความยาวทรงกระบอก
 l = ครึ่งหนึ่งของความยาวของตัวอย่าง
 M_A = น้ำหนักของภาชนะบรรจุอะลูมิเนียม
 M_B = น้ำหนักของภาชนะบรรจุ (empty pan)
 M_S = น้ำหนักของตัวอย่างและภาชนะบรรจุ
 M_T = น้ำหนักของสารมาตรฐานอ้างอิงและภาชนะบรรจุ
 m_T = มวลของสารมาตรฐานอ้างอิง
 m_S = มวลของตัวอย่าง
 P = ตำแหน่งของ thermocouple ภายในตัวอย่าง
 Q = ปริมาณความร้อน
 q' = ปริมาณความร้อนต่อหน่วยความยาว
 R = ความต้านทานของขดลวดให้ความร้อน
 r = รัศมี
 s = ความชันของกราฟเส้นตรง ($dT/d(\ln t)$)
 T = อุณหภูมิ
 T_C = อุณหภูมิ เริ่มต้นของแคลอริมิเตอร์
 T_S = อุณหภูมิ เริ่มต้นของตัวอย่าง
 T_t = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการกวนของ stirrer ในเวลา t
 T_W = อุณหภูมิ เริ่มต้นของน้ำ
 t = เวลา
 V = ความต่างศักย์ที่ใช้
 W = ปริมาณความร้อน
 w_A = น้ำหนักของอะลูมิเนียม
 w_B = น้ำหนักของของเหลวใน chamber B
 w_S = น้ำหนักของตัวอย่าง

w_t = น้ำหนักของ stirrer ใน chamber B

w_w = น้ำหนักของน้ำ

x = ระยะทาง

x_i = อัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่างๆในอากาศ 100 ลิตร

Y = Dimensionless temperature ratio

α = ค่าสภาพแพร่ความร้อน

ρ = ความหนาแน่น



อาหารทะเลแช่แข็งนับเป็นผลิตภัณฑ์อาหารส่งออกของประเทศไทยที่ติดอันดับ 1 ใน 10 ของผลิตภัณฑ์อาหารส่งออก (พาณิชย์, 2534) โดยเฉพาะปลาหมึกและกุ้ง ขั้นตอนหลักในกระบวนการผลิตปลาหมึกและกุ้งสดแช่แข็ง คือ ขั้นตอนการแช่แข็ง ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ยังประสบปัญหาเกี่ยวกับการใช้เวลาในการแช่แข็งที่เหมาะสม ภาวะในถาวรบวนการแช่แข็ง (อุณหภูมิต่ำและเวลา) ปลาหมึกและกุ้งได้มาจากการเสียเปรียบอุณหภูมิต่ำและเวลาที่โรงงานใช้แช่แข็งแช่แข็งอาหารทะเลอื่น ๆ ฉะนั้นภาวะที่ใช้อาจไม่เหมาะสม เนื่องจากวัตถุดิบแต่ละชนิดมีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน ดังนั้นการมีข้อมูลพื้นฐานด้านสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง ได้แก่ ความร้อนจำเพาะ (specific heat) สภาพนำความร้อน (thermal diffusivity) และ สภาพแพร่ความร้อน (thermal diffusivity) ทำให้สามารถคาดคะเนเวลาในการแช่แข็งที่เหมาะสมได้ (Cleland, 1980) จึงเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายลง ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. สร้างและปรับปรุงเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับวัดค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง
2. ศึกษาผลของพันธุ์ การละลายและอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกในช่วงแช่แข็ง
3. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกกับพันธุ์ การละลายและอุณหภูมิ
4. ศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของกุ้งในช่วงแช่แข็ง
5. หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้งกับพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

2.1.1 การวัดความร้อนจำเพาะ

ความร้อนจำเพาะเป็นสมบัติทางเทอร์โมไดนามิคส์อย่างหนึ่งของสาร คือเป็น ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารมวล 1 หน่วยไป 1 องศา ในเรื่องของ อาหารความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ (C_p) มีบทบาทสำคัญมากกว่าความร้อนจำเพาะที่ ปริมาตรคงที่ (C_v) โดยปกติค่าความร้อนจำเพาะของอาหารคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะ ขององค์ประกอบต่างๆ (C_{pi}) ในอาหารกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ (x_i) นั้นๆ (Toledo, 1991) ดังสมการ (1)

$$C_p = \sum (C_{pi} x_i) \dots\dots\dots (1)$$

ค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่างๆในอาหาร ยังขึ้นกับอุณหภูมิ

(Toledo, 1991) ดังแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ขององค์ประกอบต่างๆ ในอาหาร กับอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

องค์ประกอบ	สมการ
ความชื้น	$C_p = 0.9975 - 1.1 \times 10^{-8}T + 1.31 \times 10^{-6}T^2$
โปรตีน	$C_p = 0.4797 + 2.89 \times 10^{-4}T - 3.14 \times 10^{-7}T^2$
ไขมัน	$C_p = 0.4739 + 3.52 \times 10^{-4}T - 1.15 \times 10^{-6}T^2$
เส้นใย	$C_p = 0.4409 + 4.61 \times 10^{-4}T - 1.11 \times 10^{-6}T^2$
เถ้า	$C_p = 0.2610 + 4.51 \times 10^{-4}T - 8.79 \times 10^{-7}T^2$
คาร์โบไฮเดรต	$C_p = 0.3699 + 4.69 \times 10^{-4}T - 1.42 \times 10^{-6}T^2$

ค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการคำนวณตามองค์ประกอบต่างๆ ในอาหารที่อุณหภูมิใดๆ จะมีค่าแตกต่างจากค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองประมาณ 0.7 ถึง 1.9 เท่า (Moline, 1961) ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะที่ถูกต้องของอาหารแต่ละชนิดต้องหาจากการทดลอง ซึ่งการวัดค่าความร้อนจำเพาะสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

2.1.1.1 การใช้แคลอรีมิเตอร์

เครื่องมือที่ใช้มีอยู่หลายแบบ แต่ใช้หลักการทางานเดียวกันคือใช้

แคลอรีมิเตอร์ที่มีลักษณะเป็น vacuum-jacket ซึ่งมีช่องสำหรับใส่ตัวอย่างขนาดพอเหมาะ มีฝาปิดอย่างมิดชิดและมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำซึ่งใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนในแคลอรีมิเตอร์ (Mohsenin, 1980; Hwang และ Hayakawa, 1979) ดังรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนโดยมีฉนวนหุ้มอย่างเพียงพอเพื่อนำให้มีการสูญเสียหรือได้รับความร้อน (adiabatic) ตามทฤษฎี ข้อดีของการใช้แคลอรีมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ คือการเตรียมตัวอย่างและขั้นตอนในการทดลองง่าย สามารถใช้ผู้ที่มีความชำนาญน้อยทำ

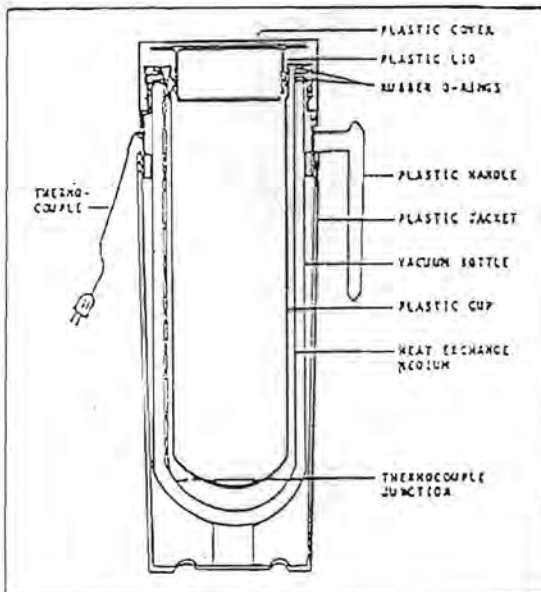
การทดลอง นำไปใช้ในขั้นตอนการผลิตได้ เนื่องจากแคลอรีมิเตอร์มีน้ำหนักเบาปริมาณน้อย และใช้เวลาในการทดลองสั้น การคำนวณค่าความร้อนจำเพาะใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานดังสมการ

$$C_{ps} w_s (\Delta T_s) = C_{pw} w_w (\Delta T_w) + H_C (\Delta T_C) - E \dots\dots (2)$$

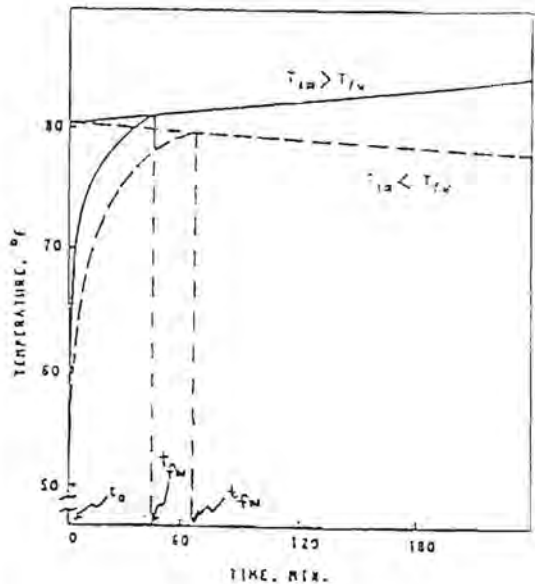
เมื่อ $E = (C_{pw} w_w + H_C + C_{ps} + w_s) (dT / dt) t_F$

T_{am} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

T_{fw} คือ อุณหภูมิที่จุดสมดุล



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 (ก) ภาพตัดขวางของ แคลอรีมิเตอร์

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในแคลอรีมิเตอร์

การใช้แคลอรีมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนจำเพาะสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ก. Method of mixture

ผสมตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะในงานแคลอรีมิเตอร์ ซึ่งโดยปกติจะใช้น้ำกลั่น จากนั้นวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปต่อเวลา นำไปคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน

ข. Modified method of mixture หรือ indirect mixing method

วิธีนี้ดัดแปลงมาจากวิธี method of mixture

โดยใส่ตัวอย่างในภาชนะบรรจุแยกจากสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ตัวอย่างและสารตัวกลางไม่มีการสัมผัสกัน ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ วิธีนี้กำจัดปัญหาเกี่ยวกับค่าความร้อนของการละลายของตัวอย่างในสารดังกล่าวได้ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าความร้อนจำเพาะได้แก่ กุ้ง (Suzuki และคณะ, 1979)

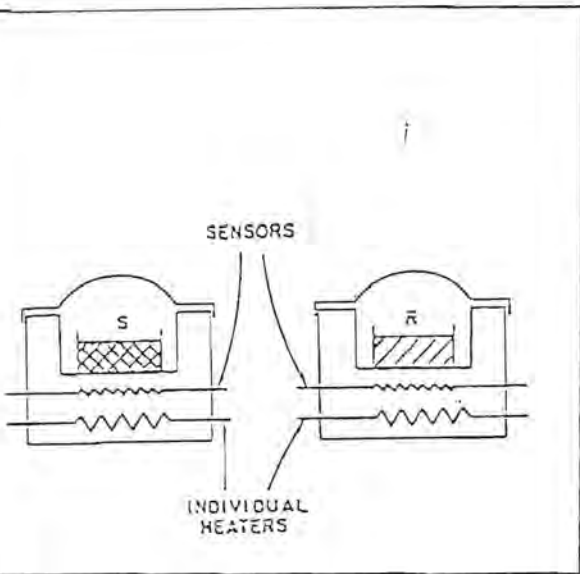
เมื่อเปรียบเทียบการหาค่าความร้อนจำเพาะทั้ง 2 วิธีพบว่า method of mixture เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นต่ำ และไม่ละลายในสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน ขณะที่วิธี modified method of mixture เหมาะสำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นสูง

2.1.1.2 การใช้ Differential scanning calorimeter: (DSC)

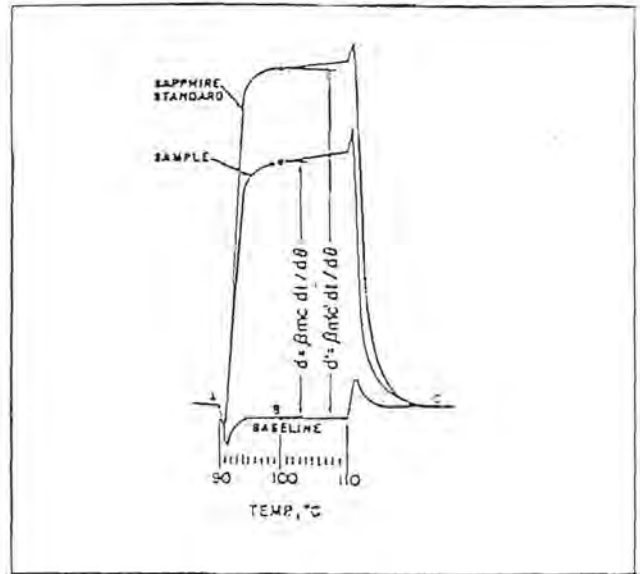
ใช้หลักการเปรียบเทียบผลของพลังงานที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปด้วยความร้อน มีเครื่องบันทึก (รูปที่ 2.2 ก) ทำการบันทึกพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียในขณะที่มีการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในรูปของ thermogram (รูปที่ 2.2 ข) พื้นที่ใต้ thermogram จะแสดงสัดส่วนพลังงานความร้อนที่ได้รับหรือคายของตัวอย่างในระหว่างกระบวนการ ภายในเครื่องประกอบด้วย sample holder (S), reference holder (R), เครื่องบันทึกอุณหภูมิ และ temperature programmer ซึ่งเป็นส่วนควบคุมระบบการให้ความร้อน ความเป็นส่วนใหญ่งานงานและการคำนวณจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ สมการที่ใช้คำนวณค่าความร้อนจำเพาะด้วยวิธีนี้คือ

$$C_p = (dm_r/d'm_s) C_{pr} + (C_{pA} / m_s)[d \{ (M_r - M_B) + (M_B - M_A) \} / d'm_s]$$

.....(3)



(ก)



(ข)

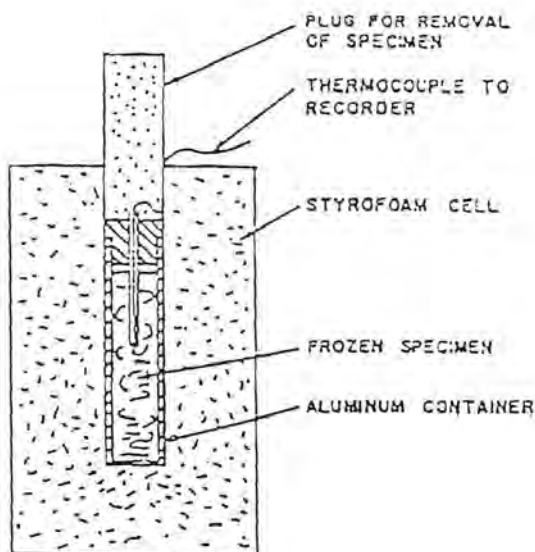
รูปที่ 2.2 (ก) รูปแบบของ DSC (ข) DSC Thermogram สำหรับการคำนวณค่า ความร้อนจำเพาะ

ข้อดีของวิธี DSC คือ การให้ผลการวัดที่ถูกต้องและรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยเป็นเพียงจำนวนมิลลิกรัมเท่านั้น แต่วิธี DSC ต้องใช้เครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีทางไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ควบคุม การเตรียมตัวอย่างต้องระมัดระวัง ผู้ทำการทดลองต้องมีความรู้และความชำนาญสูง ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าความร้อนจำเพาะได้แก่ surimi (Wang และ Kolbe, 1991) และปลาหีอด (Sanz และคณะ, 1987)

2.1.1.3 Moline's method

วิธีนี้ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของอาหารแช่แข็ง (Moline และคณะ, 1961) เครื่องมือที่ใช้ประกอบด้วยกล่อง polystyrene ซึ่งเป็นฉนวนเพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนเร็วจนเกินไป ภายในมี aluminium container อยู่บริเวณกลางกล่องเพื่อใช้บรรจุตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ด้านบนมีฝาทำจาก polystyrene ดังรูปที่ 2.3 ในขั้นตอนจะนำวัตถุที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะบรรจุใน container ไปทำให้มีอุณหภูมิต่ำเท่ากับจุดเยือกแข็งอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำไปใส่ในกล่องโพลีสไตรีนที่อุณหภูมิห้อง วัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของวัตถุด้วย thermocouple เพื่อนำมาหาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียให้กับสิ่งแวดล้อม (Q) โดยใช้สมการ (4) จากนั้นนำตัวอย่างที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะบรรจุลงใน container และทำการทดลองเช่นเดิม สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีนี้คือ

$$C_{ps} = \{ [Q/(\Delta T/\Delta t) - C_{pA} w_A] / w_S \} \dots \dots \dots (4)$$



รูปที่ 2.3 เครื่องมือที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธีของ Moline

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้หาค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้แก่ ปลาสด, กุ้ง (Moline และคณะ, 1961)

2.1.2 การวัดสภาพนำความร้อน

สภาพนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากการชนกันโดยตรงของอนุภาค (โมเลกุล, อะตอม, อิเล็กตรอน) อันเนื่องมาจากการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ เกิดขึ้นได้สิ้นเชิงเพราะโมเลกุลของของแข็งอยู่ใกล้กันมากกว่าโมเลกุลของของเหลว หรือ ก๊าซ ค่าสภาพนำความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อน ถ้าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงอัตราเร็วของการถ่ายโอนความร้อนก็จะมีค่าสูงเช่นกัน และค่าสภาพนำความร้อนเป็นสมบัติเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด (Mohsenin, 1980)

สภาพนำความร้อนที่ภาวะสมดุล สามารถคำนวณโดยใช้ Fourier's law ซึ่งอุณหภูมิของตัวอย่างในแต่ละจุดคงที่และไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และอัตราเร็วในการถ่ายโอนความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังสมการ

$$Q / A = -k dT / dx \dots\dots\dots(5)$$

สมการนี้เรียกว่า Fourier equation ซึ่งการวัดค่าสภาพนำความร้อนจะอาศัยพื้นฐานของสมการนี้

ค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณจากค่าสภาพนำความร้อนขององค์ประกอบทางเคมี (k_i) และสัดส่วนโดยปริมาตร (x_{vi}) ของแต่ละองค์ประกอบ และมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$k = \sum (k_i x_{vi}) \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{เมื่อ } x_{vi} = x_{i\rho c} / \rho_i$$

$$\rho_c = 1 / \sum x_i / \rho_i$$

โดยสภาพนำความร้อน (k_i) และความหนาแน่น (ρ_i) ขององค์ประกอบ
 ต่างๆ ในอาหารสามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ
 (Toledo, 1991) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน)
 และความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) ขององค์ประกอบต่างๆ ในอาหารกับอุณหภูมิ
 (องศาเซลวิน)

องค์ประกอบ	สมการ	
	k_i	ρ_i
ความชื้น	$0.57109 - 0.0017625T - 6.7306 \times 10^{-6}T^2$	$997.18 + 0.003T - 0.0037574T^2$
โปรตีน	$0.1788 + 0.0011958T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	$1329.9 - 0.518T$
ไขมัน	$0.1807 - 0.0027604T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	$925.59 - 0.417T$
เส้นใย	$0.18331 + 0.0012497T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	$1311.5 - 0.365T$
เถ้า	$0.3296 + 0.001401T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	$2423.8 - 0.280T$
คาร์โบไฮเดรต	$0.2014 + 0.0013874T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	$1599.1 - 0.310T$

วิธีการวัดค่าสภาพนำความร้อนของอาหารทะเลแบ่งเป็น 3 แบบคือ

2.1.2.1 Steady State method วิธีนี้ตัวอย่างที่ต้องการวัด

อยู่ในภาวะสมดุลคืออุณหภูมิ ๕ จุดใดๆ คงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา) การหาค่าสภาพนำ
 ความร้อนทำได้โดยวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างและความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่ง
 หลักการนี้มี 3 วิธีดังนี้

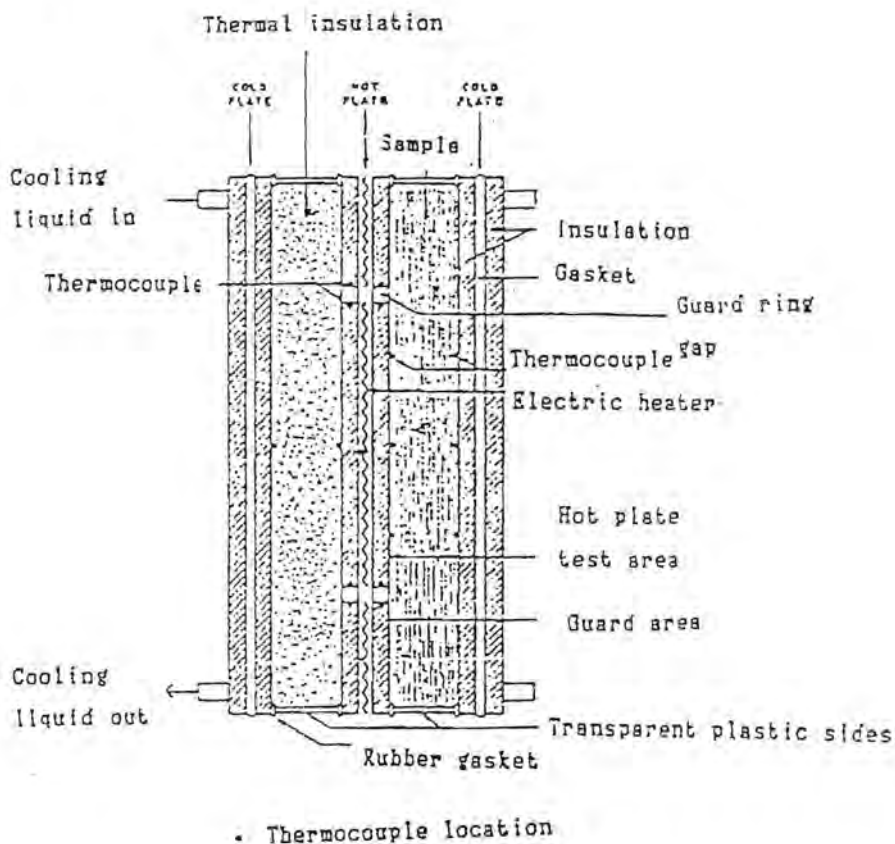
ก. Modified parallel plate method หรือ Modified guard hot plate method

วิธีนี้ให้ผลค่อนข้างถูกต้องเหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารแห้งและอาหารที่เป็นแผ่น โดยการใส่ตัวอย่างในช่องว่างช่องหนึ่งภายในเครื่องมือ (Lentz, 1961) ให้ด้านหนึ่งสัมผัสกับแหล่งให้ความร้อน (heat source) และอีกด้านสัมผัสกับแหล่งรับความร้อน (heat sink) และมี guard plate สำหรับป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม ดังรูปที่ 2.4 ส่วนอีกช่องหนึ่งจะใส่วัตถุอ้างอิง ซึ่งนิยมใช้ฉนวนที่ทราบค่าสภาพนำความร้อนวิธีนี้รับรู้งจากวิธีการของ Guard hot plate ซึ่งมีช่องใส่ตัวอย่างเพียงช่องเดียว และวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรงเพื่อคำนวณค่าสภาพนำความร้อนของตัวอย่าง โดยอาศัยสมมติฐานว่าปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างจะเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ไหลผ่านตัวอย่างและไม่มีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น แต่ในทางปฏิบัตินั้นแหล่งให้ความร้อนหลักถ่ายโอนความร้อนสู่ hot plate ซึ่งเป็นส่วนนำให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง แต่ไม่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่ guard ring gap ทำให้เกิดความไม่สมดุลทางความร้อนระหว่าง hot plate และ guard ring gap จึงมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นทำให้ผลการทดลองผิดพลาดได้ การใช้วัตถุอ้างอิงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่างโดยตรง ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณได้จาก

$$Q = k_r A (T_1 - T_2) / D_r = k_s A (T'_1 - T'_2) / D_s \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของตัวอย่าง

T'_1 และ T'_2 คืออุณหภูมิทั้งสองด้านของวัตถุอ้างอิง



รูปที่ 2.4 ภาพตัดขวางของ Parallel plate apparatus

วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองนาน แต่สามารถใช้กับตัวอย่างที่มีการนำความร้อนแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง (non isotropic materials) ได้ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ ปลาเค็ม และ salmon (Lentz, 1961)

ข. Concentric sphere method

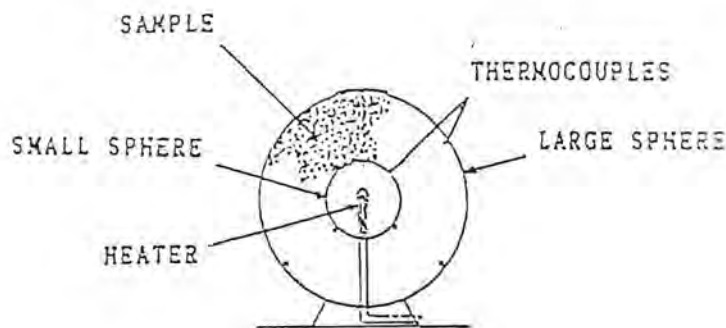
วิธีนี้หาค่าสภาพนำความร้อนโดยบรรจุตัวอย่างลงใน

ช่องว่างของเครื่องมือรูปร่างทรงกลมที่มีรัศมีภายใน r_1 และมีรัศมีภายนอก r_2 (El-sabrigi และคณะ, 1981) ซึ่งมี heater ติดตั้งอยู่ภายในทรงกลมด้านใน (รูปที่ 2.5) นำเครื่องมือในส่วนทั้งสองหุ้มฉนวนที่มีหัตถ์สำหรับหมุนเวียนอากาศบริเวณรอบเครื่องมือและให้ความร้อนจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณจากสมการ(8)

$$k = Q (r_2 - r_1) / 4\pi (T_1 - T_2) r_1 r_2 \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ $Q = Vit$

T_1 และ T_2 คือ อุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2) ที่ภาวะสมดุลตามลำดับ



รูปที่ 2.5 Concentric sphere apparatus

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หลัก steady state ที่ให้ค่าสภาพนำความร้อนที่ถูกต้องมากที่สุดเนื่องจากสามารถกำจัดความผิดพลาดอันเกิดจากการสูญเสียความร้อนได้ แต่ไม่เป็นที่ยอมรับเนื่องจากต้องใช้ตัวอย่างที่มีรูปร่างทรงกลมโดยแท้จริง และต้องตัดแบ่งครึ่ง

ตัวอย่างทรงกลมเพื่อสอด heater ตัวอย่างอาหารที่วัดค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้คือ ปลา
คือคอด (Long, 1955)

ค. Concentric cylinder method

วิธีนี้ส่วนใหญ่นำมาใช้กับตัวอย่างอาหารที่เป็นผงหรือเป็น

เม็ดเล็กๆ โดยบรรจุตัวอย่างในช่องว่างรูวงแหวนของเครื่องมือรูปทรงกระบอกที่มีรัศมีภายใน
(r₁) และรัศมีภายนอก (r₂) ดังรูปที่ 2.6 ให้ความร้อนโดยใช้ heater ที่อยู่ด้านใน
ของทรงกระบอกและมีอ่างน้ำมันที่มีอุณหภูมิคงที่เพื่อรักษาอุณหภูมิ ค่าสภาพนำความร้อน จะคำนวณ
ได้จากสมการ

$$k = Q \ln (r_1-r_2) / [2\pi l (T_1-T_2)] \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ Q = VIt

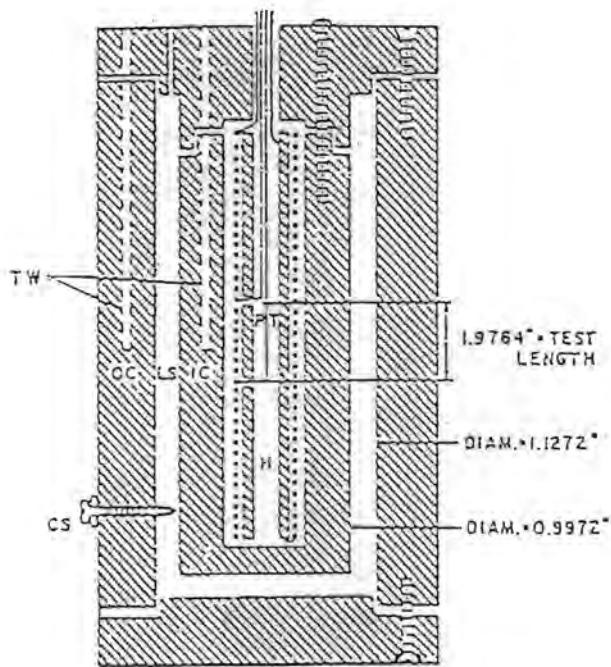
T₁ และ T₂ คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมี r₁ และ r₂ ตามลำดับที่ภาวะ
สมดุล

r₁ และ r₂ คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของทรงกระบอกตามลำดับ

l คือ ความยาวทรงกระบอก

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพนำความร้อน

ได้แก่ ปลาคือคอด, Herring, Whale meat (Baghe-khandan และคณะ, 1981 อ้างถึง
Steel, 1958 และ Smith และคณะ, 1952) Hadcock (Baghe-khandan และคณะ,
1981, อ้างถึง Luckและคณะ, 1964)



- LS = Liquid space หรือ
ช่องว่างตัวอย่าง
- CS = Centering screw
- H = Heater
- IC = Inner cylinder-brass
- OC = Outer cylinder
- TW = Thermister well
- PT = Potential taps

รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของ concentric cylinder apparatus (Woodams และคณะ, 1968, อ้างถึง Wolf and Sibbitt, 1954)

การวัดค่าสภาพความร่อนแบบ steady state มีข้อดีคือการคำนวณง่าย และสามารถวัดค่าสภาพความร่อนของตัวอย่างที่เป็นของเหลว ผง หรือ เมล็ดได้ แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับตัวอย่างอาหารกึ่งแข็งที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากจะเกิด moisture migration เพราะใช้เวลานานในการทดลองแต่ละครั้งนานหลาย ชั่วโมงนอกจากนี้ยังอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมืออีกด้วย (Reidy และ Rippen, 1971)



2.1.2.2 Semi - steady state method วิธีนี้ใช้หลักการของ quasi - steady state heat transfer ซึ่งเหมาะกับตัวอย่างที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ โดยวัดปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างได้รับด้วยการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของตัวกลางที่รับความร้อน จากการสัมผัสกับตัวอย่าง (ตัวกลางที่นิยมใช้คือก๊าส เซอริน) โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาของตัวกลางมีน้อย ทำให้ตัวอย่างอยู่ในภาวะกึ่งสมดุล

การหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้จะใส่ตัวอย่างให้อยู่ระหว่าง chamber A และ chamber B ซึ่งจะติดกับส่วนของช่องไหลโดยตรงทั้งสองด้าน (รูปที่ 2.7) ใน chamber A จะมีช่องไหลอุณหภูมิสูง เพื่อถ่ายโอนความร้อนไปสู่ตัวอย่าง ส่วน chamber B จะมีช่องไหลอุณหภูมิต่ำเพื่อรับความร้อนจากตัวอย่าง ภายในเครื่องมือจะมี stirrer เพื่อช่วยทำให้อุณหภูมิภายใน chamber สม่าเสมอ และเครื่องมือจะมีฉนวนหุ้ม เพื่อป้องกันการถ่ายโอนความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อม ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณจากสมการ

$$k = (w_s c_{ps} (T_{5f} - T_{50}) D_s) / A (T_3 - T_4) \Delta t \dots\dots\dots(10)$$

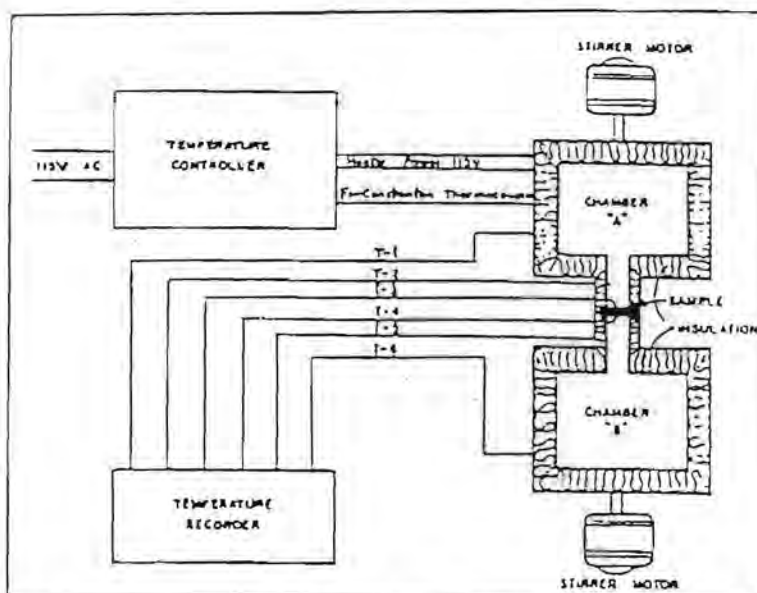
เนื่องจากในการทดลองจะมีความร้อนที่สูญเสียไปกับ stirrer และผนัง chamber และการทำงานของ stirrer ให้พลังงานออกมา สมการ(10) จึงดัดแปลงเป็น

$$k = \frac{(w_s c_{ps} + w_B c_{pB} + w_t c_{pt}) (T_{5f} - T_{50} - T_t) D_s}{A (T_3 - T_4) \Delta t} \dots\dots\dots(11)$$

เมื่อ T_{5f} และ T_{50} เป็นอุณหภูมิของช่องไหลใน chamber B ในเวลา t และเวลาเริ่มต้น ตามลำดับ

T_3 เป็นอุณหภูมิของผิวตัวอย่างที่ติดกับ chamber A ในเวลา t

T_4 เป็นอุณหภูมิของผิวตัวอย่างที่ติดกับ chamber B ในเวลา t



รูปที่ 2.7 การติดตั้งเครื่องมือในการวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ semi - steady state

วิธีนี้ไม่มีข้อจำกัดคือไม่เหมาะสำหรับการวัดค่าสภาพนำความร้อนของวัตถุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงมาก และมีการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมือ ซึ่งขัดแย้งกับสมมติฐานในการคำนวณ ทำให้ค่าที่คำนวณได้ผิดพลาด แต่วิธีนี้สามารถใช้กับวัตถุที่มีรูปร่างไม่เป็นทรงเรขาคณิต เช่น เปลือกหอย (Tulshian และ Wheaton, 1986) และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนในการคำนวณ ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้ คือ ปลาหมึก (Matuszek และคณะ, 1983)

2.1.2.3 Transient หรือ unsteady state method วิธีนี้ตัวอย่างอยู่ในภาวะไม่สมดุลและใช้เวลาในการทดลองเร็วมาก โดยวัตถุอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา วิธีที่ใช้หลักการนี้ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนของอาหารทะเลมีเพียงวิธีเดียวคือ Probe method

Probe method เป็นวิธีที่พัฒนามาจาก line heat source method ที่นิยมใช้ในการวัดค่าสภาพนำความร้อน วิธีนี้ใช้ thermal conductivity probe ซึ่งมีลักษณะเป็นเข็มกลวงขนาดเล็ก โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อรัศมีมากกว่า 20 เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเนื่องจากขนาดของ probe ภายในมี heating wire เป็นแหล่งให้ความร้อน และ thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 2.8) การวัดค่าสภาพนำความร้อนทำได้โดยเสียบ probe เข้าไปในตัวอย่างที่มีอุณหภูมิคงที่ จากนั้นให้ความร้อนแก่ heating wire

บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนไปในเวลาสั้นๆ การที่ใช้ thermal conductivity probe อาศัยหลักการที่ว่า แหล่งให้ความร้อนเป็นทรงกระบอกที่มีความยาวไม่จำกัด มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เข้าใกล้ศูนย์และมีการให้ความร้อนในปริมาณคงที่ในแนวรัศมีแก่ตัวอย่างขนาดใหญ่อซึ่งมีความสม่ำเสมอทั่วกันทั้งชิ้นโดยไม่มีแหล่งให้ความร้อนอยู่ภายใน สมการแสดงความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนคือ

$$\partial T / \partial t = \alpha [\partial^2 T / \partial r^2 + (1/r)(\partial T / \partial r)] \dots\dots\dots(12)$$

จากสมการ (12) เมื่อมีแหล่งให้ความร้อนที่มีความยาวไม่จำกัดและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างคือ

$$T = (q' / 2\pi k) \int_p^\infty [(exp(-r^2)) / r dr] \dots\dots\dots(13)$$

$$= r / [2(\alpha t)^{1/2}] \dots\dots\dots(14)$$

$$\text{เมื่อ } q' = 3.414 I^2 R$$

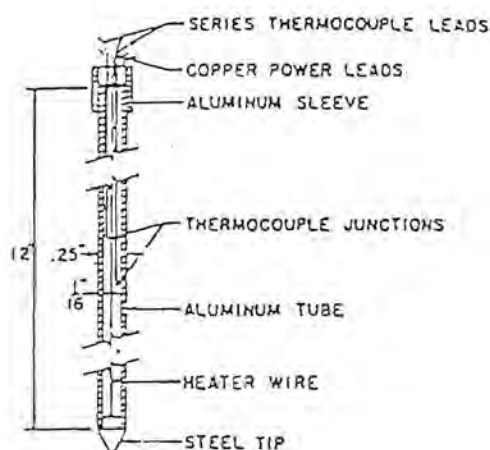
ถ้า T เป็นอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อนที่มีปริมาณความร้อน q' และ β มีค่าน้อยกว่า 0.16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากเวลา t_1 ไปยัง t_2 เป็น

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (q' / 4\pi k) [\ln(t_2 / t_1)] \dots\dots\dots(15)$$

ดังนั้น

$$k = [q' / 4\pi (T_2 - T_1)] \ln(t_2 / t_1) \dots\dots\dots(16)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe (Mohsenin, 1980)

ข้อจำกัดของ thermal conductivity probe คือไม่เหมาะสำหรับ non-viscous food เนื่องจากจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาชั้นรอบๆ probe นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้กับตัวอย่างที่มีความบางมากเช่น หนัังสัตว์ ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีตัวอย่างอยู่รอบ probe ในปริมาณที่มากพอ อย่างไรก็ตาม การใช้ probe ยังได้รับความนิยมเพราะใช้เวลานการทดลองน้อย เหมาะกับอาหารที่มีความชื้นสูง หรืออาหารแช่แข็งและไม่มี การสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง นอกจากนี้ยังเหมาะกับตัวอย่างที่อยู่ในสภาพธรรมชาติอีกด้วย กล่าวคือสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนของผลไม้บนต้นได้ อีกทั้งยังใช้ได้กับตัวอย่างที่อยู่ ในระหว่างการแปรรูป (Reidy และ Rippen, 1971)

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้ thermal conductivity probe ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนได้แก่ salmon, sole, black bhitki, black pomphret, mackerel, red bhitki, singra, hilsa, surama, white pomphret, mallii และ rohu (Kumbhar และคณะ, 1981) surimi (Wang และ Kolbe, 1991) ปลาหมึกกล้วย (Rahman และ Potluri, 1991) เป็นต้น

นอกจากนี้ค่าสภาพนำความร้อนยังสามารถหาได้จากสมการต่างๆ เช่น Thermal diffusion equation (Woodams และ Norvey, 1968; Kent และคณะ, 1984; Matuszek และคณะ, 1983; El-sahrigi และคณะ, 1981), Schwartzberg's equation (Succar และ Hayakawa, 1983), Maxwell-Eucken equation (Lentz, 1961) และ Levy's equation (Succar และ Hayakawa, 1983)

2.1.3 การวัดค่าสภาพนำความร้อน

ค่าสภาพนำความร้อน เป็นสมบัติทางความร้อนที่เกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ผ่านความร้อนเกิดจากการที่วัตถุดูดซับความร้อนเอาไว้ เป็นผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปซึ่งพบในสภาวะ unsteady state หรือ transient heat transfer (Mohsenin, 1980) โดยวัตถุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง จะมีอัตราการแพร่ผ่านของความร้อนได้เร็ว ในทางกลับกันถ้าวัตถุนั้นมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ การแพร่ความร้อนก็จะช้าหรือช้าไปด้วย เมื่อมีการให้ความร้อนหรือดึงความร้อนจากอาหาร การกระจายอุณหภูมิในวัตถุในภาวะ unsteady state แสดงได้ด้วยสมการ

$$dT/dt = \alpha (d^2T / dx^2 + d^2T / dy^2 + d^2T / dz^2) \dots\dots(17)$$

เมื่อ T เป็น อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในแกน x,y,z

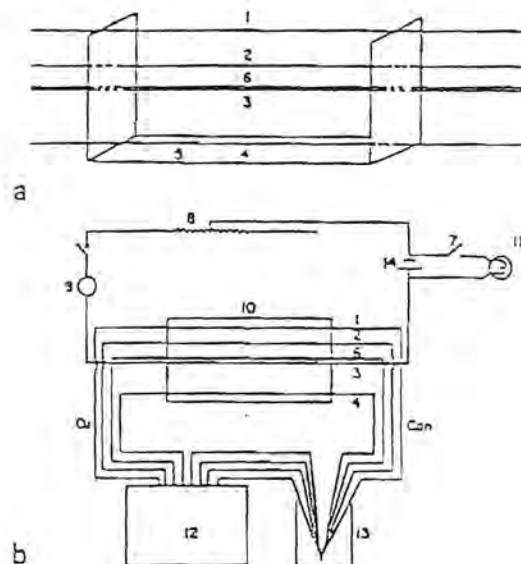
ค่าสภาพนำความร้อนยังมีความสัมพันธ์ กับค่าสภาพนำความร้อน (k) ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) และความหนาแน่น (ρ) ดังสมการ

$$\alpha = k / \rho C_p \dots\dots\dots(18)$$

นอกจากจะหาค่าสภาพนำความร้อนจากสมการ (18) ยังสามารถวัดค่าสภาพนำความร้อนโดยตรงได้หลายวิธีดังนี้

2.1.3.1 Line heat source method

วิธีนี้ Kumbhar และคณะ (1981) ได้นำมาใช้วัดสมบัติทางความร้อนของปลา เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วย 36 guage fine heater wire และ 30 guage copper-constantan thermocouple จำนวน 4 เส้น ทั้งหมดนี้ถูกตรึงไว้ในกรอบของ aluminium plate ซึ่งเป็นที่ใส่ตัวอย่าง (รูปที่ 2.9) จากนั้นนำมาใส่ในกล่องพลาสติกที่ปิดมิดชิด และนำไปจุ่มในอ่างน้ำที่มีของเหลวอยู่ โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ควบคุมโดยใช้ rheostat



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของ thermocouple และ heater ใน aluminium plate

a - perspective view; b - side view of schematic diagram of experimental set-up; 1 to 4-thermocouple; 5-aluminium frame; 6-heater; 7-switch; 8-rheostat; 9-ammeter; 10-sample; 11-bleeder lamp; 12-recorder; 13-thermos flask; 14-storage battery 12 V

thermocouple ตำแหน่งที่ 1 และ 4 วัดอุณหภูมิที่ผิวเพื่อทดสอบว่าความร้อนจาก heating wire ไม่ถึงผิว คือเป็นตัวตรวจสอบขนาดของตัวอย่างไม่ให้เล็กเกินไป ถ้าตัวอย่างมีขนาดเล็กไปมีผลทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่คำนวณได้ไม่ถูกต้อง ส่วนอุณหภูมิที่วัดจาก thermocouple ตำแหน่งที่ 2 จะใช้ในการคำนวณโดยใช้สมการ(19)

$$T = \frac{q}{2\pi k_s} \left[-\frac{C_e}{2} - \ln p + \frac{p^2}{2.1!} - \frac{p^4}{4.2!} - \frac{p^6}{6.3!} \dots \right] \dots (19)$$

ค่า p ที่ได้นิยามคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ(14) ซึ่งค่า x และ t สามารถหาได้จากการทดลอง ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้ line heat source method วัดค่าสภาพแพร่ความร้อนคือปลา 12 พันธุ์ ได้แก่ salmon, sole, black pomphret, mackerel, red bhitki, sinhara, hilsa, surama, white pomphret, malli, black bhitki และ robu ชื่อจากัดของวิธีนี้คือ การบรรจุตัวอย่างใน aluminium plate จะต้องแบ่งตัวอย่างอาหารออกแล้วประกบกันโดยให้ thermocouple และ heating wires อยู่ระหว่างแผ่นเนื้อทั้งสอง ซึ่งจะต้องระวังไม่ให้มีอากาศเกิดขึ้น เพราะทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน

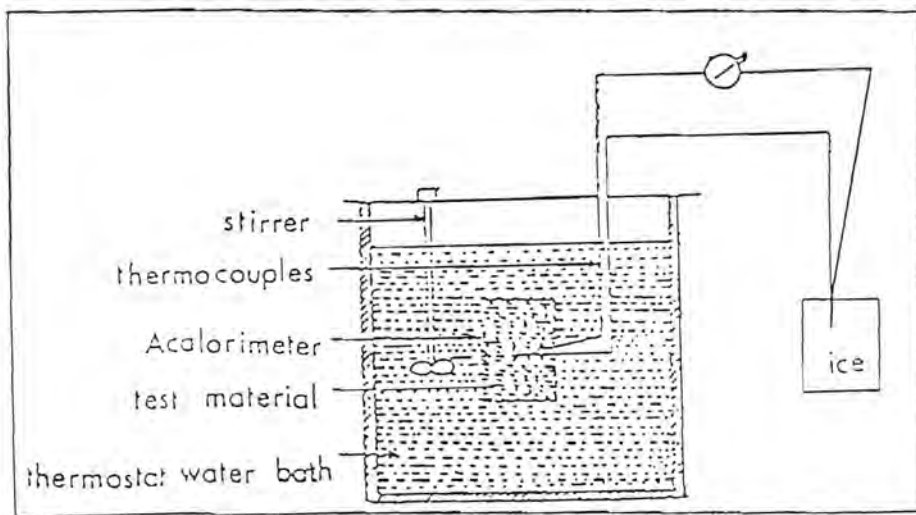
2.1.3.2 Acalorimeter method

เครื่องมือประกอบด้วยกระป๋องทรงกระบอกซึ่งภายในมี

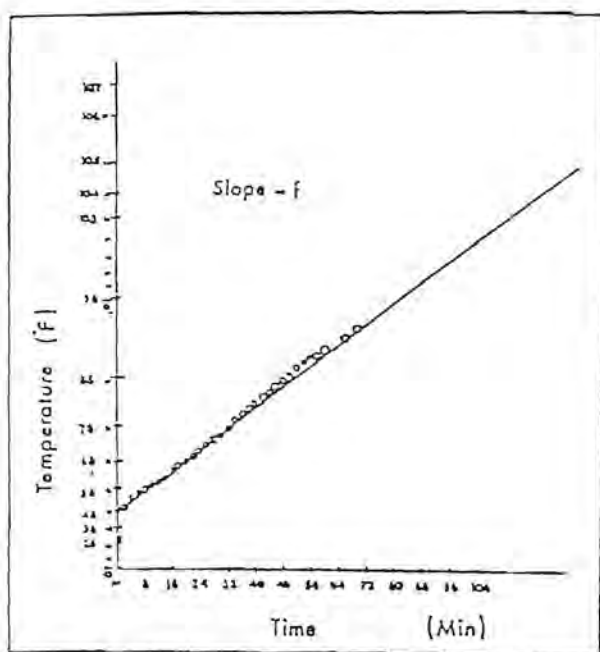
thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิตรงไว้ที่กลางกระป๋อง การหาค่าสภาพแพร่ความร้อนทำโดยนำตัวอย่างใส่ในกระป๋อง นำไปทำให้ร้อนโดยใช้น้ำอ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน (รูปที่ 2.10) บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา และนำมาสร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังรูปที่ 2.11 (Annamma และ Rao, 1974) และคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ(20) ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน ได้แก่ปลา mackerel และปลา sardine (Annamma และ Rao, 1974)

2.306

$$\alpha = \frac{2.306}{f[(2.4048/r)^2 + (\pi/21)^2]} \dots\dots\dots(20)$$



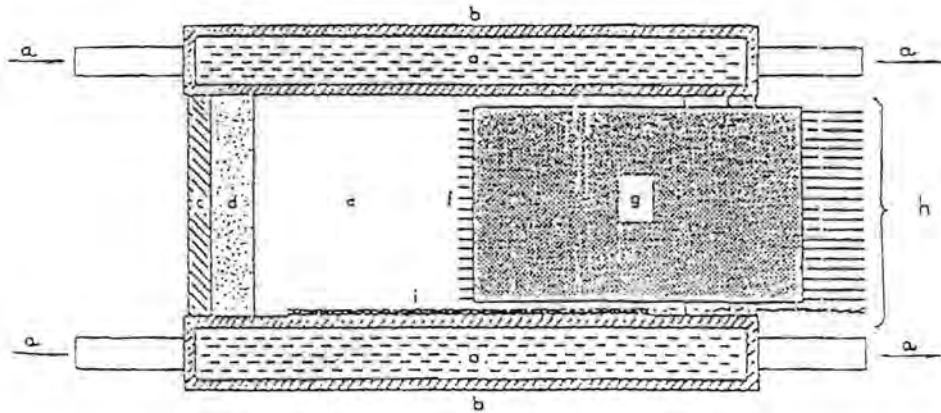
รูปที่ 2.10 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่าง โดยวิธี Acalorimeter



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของสภาวะแปรความร้อน

2.1.3.3 การใช้ Temperature profiles

ตัวอย่างจะถูกบรรจุใน block ซึ่งด้านข้างทั้ง 4 ด้านจะฉาบด้วยพอยมางที่ทาหน้าที่เป็นฉนวน ส่วนด้านบนและด้านล่างจะสัมผัสกับแผ่นโลหะแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งด้านหนึ่งจะเป็นส่วนนำความร้อนแก่ตัวอย่าง (thawing) และอีกด้านหนึ่งทาหน้าที่ตั้งความร้อนออกจากตัวอย่าง (freezing) (รูปที่ 2.12) ดังนั้นการนำความร้อนหรือความเย็นจะผ่านตัวอย่างในแนวแกน y เท่านั้น (one dimension heat flow) อุณหภูมิในตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ จะถูกวัดโดยใช้ probe ซึ่งประกอบด้วย thermocouple 20 เส้นที่เชื่อมติดอยู่กับแผ่นพลาสติกบางๆ ระยะระหว่างจุดที่วัดแต่ละจุดห่างกันประมาณ 2.54 mm และบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 60 วินาที (Kent และ คณะ, 1984)



รูปที่ 2.12 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยการวัด Temperature profiles

(a) flow of hot or cold ethanol : (b) aluminium heat exchanger :
 (c) rectangular tufnol frame : (d) thermal insulation around sample :
 (e) sample : (f) thermocouple junctions : (g) plastic strip
 supporting thermocouples : (h) Cable to data logger : (i) heat flux
 sensor

หลักการของวิธีนี้คือ อุณหภูมิที่กระจายในตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลง
 ไม่คงที่ ค่าสภาพแพร่ความร้อนหาได้จากการวัดอุณหภูมิที่กระจายในตัวอย่างตำแหน่งต่าง ๆ ใน
 เวลาที่กำหนดและนำอุณหภูมิที่วัดได้ไปคำนวณหาค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยใช้สมการ
 heat equation ดังนี้

$$\alpha(T_e) = \frac{\partial T / \partial t}{\partial^2 T / \partial x^2} \Bigg|_{x = x_e} \dots\dots\dots(21)$$

- เมื่อ x = ระยะทางที่ตั้งฉากกับ freezer - thawer plate
 T_e = อุณหภูมิต่ำสุดหรือสูงสุดของ Temperature profile
 x_e = ตำแหน่งที่อุณหภูมิ T_e

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ศึกษาค่าสภาพแพร่ความร้อนด้วยวิธีนี้ คือ

ปลาเค็ม และ mackerel (Kent และคณะ, 1984) ซึ่งข้อจำกัดของการใช้ temperature profiles คือถ้าจำนวนบ่อน้ำความถี่รอบๆ ตัวอย่างไม่ดีจะมีการสูญเสียของความถี่เกิดขึ้น ทำให้อัตราการ freezing ช้าลงและอัตราการ thawing เร็วขึ้น และ thermocouple จะต้องยึดแน่นกับแผ่นพลาสติกเพื่อให้เสียบ probe เข้าไปในตัวอย่างได้ตามตำแหน่งที่ต้องการ การสร้างเครื่องมือและการคำนวณด้วยวิธีนี้จะยุ่งยาก แต่มีข้อดีคือไม่ต้องควบคุมอัตราการให้ความร้อนและใช้ระยะเวลาในการทดลองสั้น การให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากตัวอย่างจะใกล้เคียงกับวิธีที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารมาก

2.1.3.4 Slab shape method

วิธีนี้เหมาะสำหรับอาหารที่มีเนื้อนุ่ม เช่น พวกลูกปลาและเนื้อต่างๆ (Kubota และคณะ, 1983) ซึ่งทำเป็นทรงกลมหรือรูปร่างอื่นใดก็ได้ เครื่องมือที่ใช้วัดประกอบด้วยกล่องที่ทำด้วยวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง เป็นส่วนที่ใช้ในการบรรจุตัวอย่าง ส่วนด้านที่ไม่ต้องการให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจะหุ้มด้วยฉนวนหนา 50 มิลลิเมตร ทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆที่กำหนดไว้ด้วย thermocouple (รูปที่ 2.13) ใช้อ่างน้ำพร้อมเครื่องกวน 2 อ่าง เป็นอุปกรณ์สำหรับรักษาอุณหภูมิตัวอย่างให้คงที่ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างตามลำดับ (รูปที่ 2.14) บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปที่แต่ละจุดในตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆด้วยเครื่อง recorder แล้วนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปคำนวณโดยวิธีโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยมีเงื่อนไขว่า การถ่ายโอนความร้อนเกิดเพียงทิศทางเดียว (one - dimensional heat flow) ไม่มีแหล่งกำเนิด

ความร้อนภายในวัตถุ และสภาพแพร่ความร้อนไม่ขึ้นกับตำแหน่งและอุณหภูมิ การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนใช้หลักการของ finite difference โดยนำอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณ dimension temperature ratio, Y (Kubota และคณะ, 1983) จากสมการ

$$Y_{i,j+1} = Y_{i,j} + (Y_{i-1,j} - 2Y_{i,j} + Y_{i+1,j}) / M \dots\dots(22)$$

$$Y = (T - T_f) / (T_0 - T_f) \dots\dots\dots(23)$$

$$M = (\Delta x^2 / (\alpha \Delta t)) \dots\dots\dots(24)$$

เมื่อ $M =$ dimensionless number

$\Delta x =$ ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิ

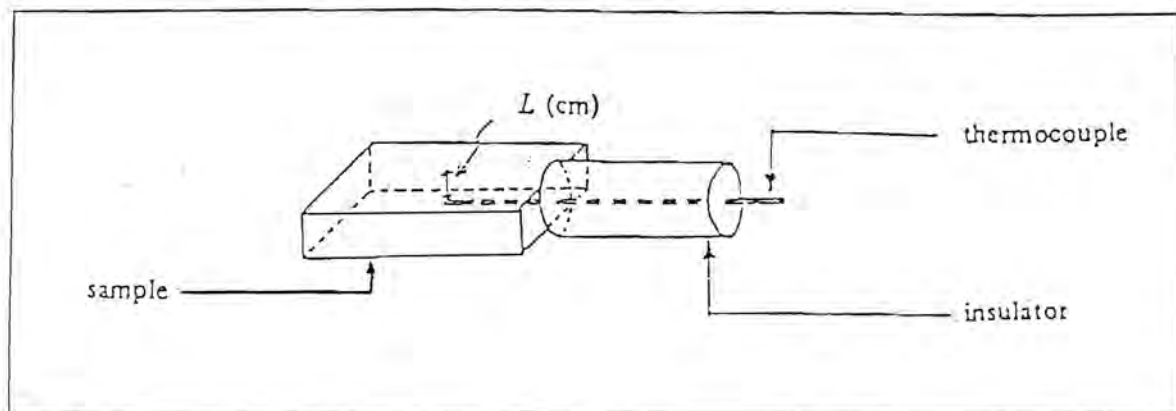
$\Delta t =$ ระยะเวลาในการวัด

Kubota และคณะ(1983)และ Albin และคณะ(1979) พบว่าจำนวนจุดที่ใช้วัดอุณหภูมิในตัวอย่างที่ควรใช้คือ 5 จุด และ Chang และคณะ(1990)สรุปไว้ว่า Δt ควรจะมีค่าประมาณ 6.5-8 วินาที เพื่อให้มีความผิดพลาดในการคำนวณน้อยที่สุด

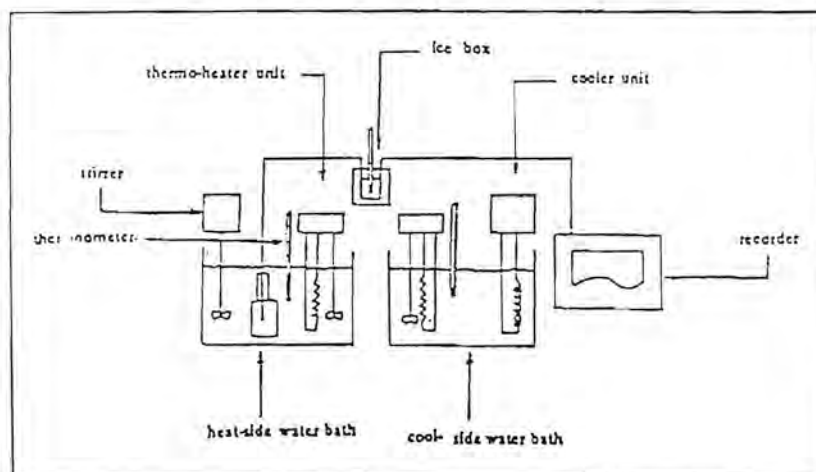
การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนทำได้โดยการประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนเพื่อแทนลงในสมการ(24) คำนวณความแตกต่างระหว่าง dimensionless temperature ratio จากการทดลองและการคำนวณในรูปของ standard deviation(σ) หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ประมาณไว้กับ standard deviation ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของตัวอย่างคือ ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ทำให้เกิด standard deviation ค่าสุดซึ่งหาได้โดยวิธี differential หรือทำการสร้างกราฟระหว่างค่า Y ที่ได้จาก การทดลองและการคำนวณ

ข้อจำกัดของวิธี slab shape คือ infinite slab plate ในทางทฤษฎีจะต้องมีความยาวไม่จำกัด ซึ่งในทางปฏิบัติเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น slab plate จะต้องมียึดตราส่วนความยาวต่อความหนา มากกว่า 3 ขึ้นไป และ infinite slab model ต้องมีความหนาตั้งแต่ 2 เซนติเมตรขึ้นไป เพราะถ้าบางกว่านี้ จะเกิดปัญหาในการสอด thermocouple probe เข้าไปยังศูนย์กลางของตัวอย่างอาหาร(Kubota และคณะ, 1983)

ตัวอย่างอาหารทะเลที่ใช้วิธีนี้วัดค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ กุ้ง (Albin และคณะ, 1979)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่าง slab ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.14 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab shape

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลได้แก่ ปัจจัยจากธรรมชาติของอาหาร คือ องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร, โครงสร้างของเนื้อเยื่อ, ความหนาแน่น และปัจจัยภายนอก คือ อุณหภูมิ ผลจากการละลาย (thawing) อัตราการแช่แข็งและอัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง (Mohsenin, 1980) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปัจจัยจากธรรมชาติของอาหาร

2.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารได้แก่ ความชื้น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เส้นใย และเถ้า

ก. ความชื้น

น้ำมีค่าสมบัติทางความร้อนสูง กล่าวคือ น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสจะมีค่าความจุเพาะ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อน 0.579 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และมีค่าสภาพแพร่ความร้อน 1.43×10^{-7} เมตร² ต่อวินาที ดังนั้นอาหารที่มีความชื้นสูงจึงมีสมบัติทางความร้อนสูงด้วย (Mohsenin, 1980; Bennet และ Myers, 1983; Nesvadba และ Eunson, 1984) การทำนายค่าสมบัติทางความร้อนจากปริมาณความชื้นในช่วงเหนือจุดเยือกแข็งพบว่ามีความผิดพลาดประมาณร้อยละ 10 โดยมีความชื้นในอาหารมากกว่าร้อยละ 50 และมีการผิดพลาดมากขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นน้อยกว่า 50% นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะมีความสัมพันธ์ของค่าสมบัติทางความร้อนกับปริมาณความชื้นน้อยกว่าช่วงอุณหภูมิเหนือจุดเยือกแข็ง (Lamb, 1976) โดยที่ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของอาหารแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิด
กับความชื้น

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ	เอกสารอ้างอิง
อาหาร	above freezing below freezing		$c_p = 0.008W + 0.2$ $c_p = 0.003W + 0.2$	Mohsenin, 1980
ปลาสด	10	30-90	$\alpha = 0.70 + 0.00683W$	Nesvadba และ
(บด)	25	30-90	$\alpha = 1.01 + 0.00385W$	Eunson, 1984
	-40	30-90	$\alpha = -0.475 + 0.0173W$	
	-10	30-90	$\alpha = -1.341 + 0.0228W$	
ปลา			$k = 0.0324 + 0.3294W$	Lamb, 1976

ข. องค์ประกอบอื่นๆ

องค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล โดยผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต กับค่าสมบัติทางความร้อนแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเลบางชนิดกับไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น	สมการ	เอกสารอ้างอิง
mackerel Sardine Bolti	-10 ถึง 10	60-90	$C_p = w+0.5F^*+0.36P^*$	El-Sahrigiและคณะ, 1981
Cod	0 ถึง 25	50-90	$k=0.83w+9.709 \times 10^{-3}p$	Hill และคณะ, 1967
Salmon	0 ถึง 25	50-90	$k=0.73w+4.926 \times 10^{-3}p$	

* F = สัดส่วนของไขมันในตัวอย่าง

P = สัดส่วนของโปรตีนในตัวอย่าง

2.2.1.2 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ

โครงสร้างของเนื้อเยื่อ ที่ศกทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ ความพรุน และลักษณะภายในเนื้อเยื่อ จะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารทะเล มีผู้ศึกษาพัฒนาสมการ โดยอาศัยข้อมูลของวัสดุที่ประกอบด้วยน้ำ โปรตีนและไขมัน กับค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางขนานกับเนื้อเยื่อ (k_{11}) ดังต่อไปนี้ (Baghe-Khandan และคณะ, 1981, อ้างถึง Poppendick และคณะ, 1966)

$$k_{11} = \rho_s \sum_{n=1}^3 \frac{k_i W_i}{\rho_i} \dots \dots \dots (25)$$

ส่วนสมการที่ใช้กับอาหารที่ประกอบด้วยน้ำ โปรตีนและไขมันกับค่าสภาพนำความร้อนในทิศทางตั้งฉาก (k_{\perp}) คือ

$$k = \frac{1}{\rho_s \sum_{n=1}^3 \frac{W_i}{k_i \rho_i}} \dots \dots \dots (26)$$

สำหรับความพรุนจะมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนเนื่องจากภายในรูพรุนจะมีอากาศและไอน้ำอยู่ภายในซึ่งจะมีผลต่อการถ่ายโอนของความร้อน (Nesvadba และ Eunson, 1984)

2.2.1.3 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของวัตถุมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อน คือถ้าวัตถุมีความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้ค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้น ค่าสภาพแพร่ความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะต่ำลง (Mohsenin, 1980)

2.2.2 ปัจจัยภายนอก

ปัจจัยภายนอกที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ผลจากการละลาย (thawing) อัตราการแช่แข็งและอัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง

2.2.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อสมบัติทางความร้อนอาหารทะเลดังนี้
 ก. ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร ค่าความร้อนจำเพาะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ค่าความร้อนจำเพาะจะหาค่าไม่ได้ (Mohsenin, 1980) ส่วนค่าสภาพนำความร้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าสภาพนำความร้อนของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในอาหารและค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นลักษณะคล้ายเส้นตรงกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Kumbhar และ คณะ, 1981)

ข. ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง พบว่าค่าความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา เมื่ออุณหภูมิต่ำลง (Mohsenin, 1980) ส่วนค่าสภาพนำความร้อนก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (Polley และคณะ, 1980) และค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิซึ่งความสัมพันธ์จะไม่เป็นเส้นตรงแต่มักพบเป็นแบบพาราโบลา (Kumbhar และคณะ, 1980)

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำเริ่มแรกของการแข็งตัว (initial freezing temperature) ที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ (phase change) จะมีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนมาก พบว่าค่าความร้อนจำเพาะจะมีค่ามากจนหาค่าไม่ได้ และค่าสภาพนำความร้อนก็จะมีค่ามากเช่นกัน ส่วนค่าสภาพแพร่ความร้อนจะมีค่าต่ำสุด (Matuszek และคณะ, 1983)

2.2.2.2 ผลจากการละลาย (thawing)

เมื่อนำอาหารไปทำการแช่แข็งพบว่า ถ้าเป็นการแช่แข็งแบบช้า ผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่มากจนทำลายผนังเซลล์ได้ ดังนั้นเมื่อนำมาทำการละลายจึงทำให้น้ำบางส่วนออกมาจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย ทำให้มีน้ำในอาหารน้อยลง (Fennema, 1973) มีผลให้ค่าสภาพนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะต่ำลง (Mohsenin, 1980)

2.2.2.3 อัตราการแช่แข็ง (freezing rate)*

อัตราการแช่แข็ง จะมีผลต่อขนาดของผลึกน้ำแข็งซึ่งทำห้ค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าต่างกัน (Mohsenin, 1980)

2.2.2.4 อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็ง

อัตราส่วนที่น้ำเป็นน้ำแข็งจะวัดในรูปของร้อยละของน้ำที่ยังไม่เป็นน้ำแข็ง (% unfrozen water) ซึ่งค่าสมบัติทางความร้อนของน้ำและน้ำแข็งมีค่าแตกต่างกัน จึงมีผลให้ค่าสมบัติทางความร้อนของอาหารแตกต่างกัน (Mohsenin, 1980)

2.3 ปลาหมึก

ปลาหมึกเป็นสิ่งมีชีวิตที่จัดอยู่ในพวกเดียวกับหอย คือ phylum Mollusca อยู่ใน class Cephalopoda มีชื่อสามัญว่า cuttle fish, squid, octopus และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sepia sp.*, *Loligo sp.*, *Octopus sp.* (พาณิชย์ , 2534)

2.3.1 ลักษณะโครงสร้างของปลาหมึก

ลักษณะโครงสร้างของเนื้อปลาหมึก(รูปที่ 2.17)ประกอบด้วยเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (muscle tissue) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue)

2.3.1.1 เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ (muscle tissue) มีประมาณร้อยละ 90 ของเนื้อเยื่อทั้งหมด ซึ่งเป็นชั้นของกล้ามเนื้อที่เรียงตัวอยู่ระหว่างเปลือก (tunic) ของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ซึ่งเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อประกอบด้วย เส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber) 2 กลุ่มเรียงตัวไขว้กัน คือ

ก. เส้นใยกล้ามเนื้อตามแนวเส้นรอบวง (circumferential muscle fiber) มีลักษณะเป็นกล้ามเนื้อรูปวงแหวนซ้อนๆกัน

ข. เส้นใยตามแนวรัศมี (radial fiber) มีทิศทางตั้งฉากกับเปลือกทั้งสองของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน

เส้นใยกล้ามเนื้อทั้งสองกลุ่มมีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5 ± 2.5 ไมครเมตร จากการเรียงตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อในลักษณะดังกล่าวจึงเป็นการง่ายที่จะฉีกเนื้อปลาหมึกออกเป็นแผ่นๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกล้ามเนื้อปลาหมึกที่แตกต่างไปจากลักษณะกล้ามเนื้อของสัตว์โดยทั่วไป

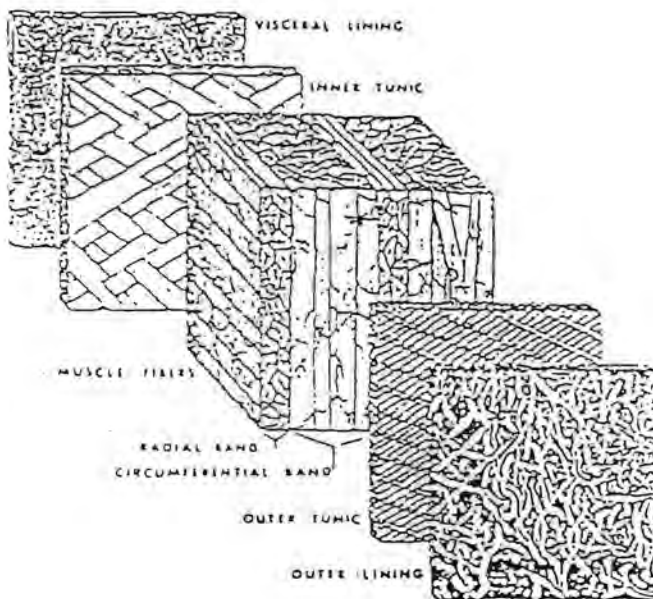
2.3.1.2 เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

ก. เปลือกชั้นนอก (outer tunic) ประกอบด้วย เส้นใยซึ่งมีแบบของการเรียงตัวที่เฉพาะ

ข. เปลือกชั้นใน (inner tunic) ประกอบด้วย เส้นใยที่เรียงตัวกันอย่างไม่มีระเบียบ

ขนาดเส้นใยของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.10 ไมครเมตร และขนาดรูปร่างจะแตกต่างกันไปบ้างในแต่ละกลุ่มของเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ที่

ผิวของเปลือกชั้นนอกและชั้นใน จะมีเนื้อเยื่อบางอย่างอยู่ คือ ผนังชั้นนอก(outer lining) ปกคลุมเปลือกชั้นนอกมีลักษณะเป็นเส้นใยที่เรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และผนังชั้นใน (inner lining) ปกคลุมเปลือกชั้นใน มีลักษณะเป็นหนังบางๆซึ่งไม่มีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งโครงสร้างของปลาหมึกแต่ละพันธุ์นั้นจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยจะต่างกันที่สัดส่วนของเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ขนาดของเส้นใยและขนาดรูปร่างของเนื้อเยื่อ



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของปลาหมึก

2.3.2 ลักษณะของปลาหมึก

ปลาหมึกที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการแช่แข็งคือ ปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง

2.3.2.1 ปลาหมึกกล้วย

ปลาหมึกกล้วยหรือที่เรียกชื่ออื่นๆว่า หมึกหอม หมึกกะตอย หมึกตะเภา หมึกจีนและหมึกเข็ม (ทศพร, 2528) จัดอยู่ใน family Loligonidae ปลาหมึกกล้วยที่ใช้ในการทดลองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Loligo formosana* ซึ่งเป็นพันธุ์ที่นิยมนำมาแช่แข็ง ลักษณะทั่วไปคือ ตัวเรียวยาว มีหนวดสิบเส้น มีครีบอยู่สองข้างท้ายสุดของลำตัว ลำตัวยาว 20-35 เซนติเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยในส่วนที่กินได้ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	82.00
คาร์โบไฮเดรต	0.70
เส้นใย	0.00
โปรตีน	15.30
เถ้า	1.20
ไขมัน	0.80

ที่มา: ตารางคุณค่าอาหารในส่วนที่กินได้ 100 กรัม กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (สาธารณสุข, 2527)

2.3.2.2 ปลาหมึกกระดอง

ปลาหมึกกระดองหรือที่อาจเรียกว่า ปลาหมึกสน, หมึกญี่ปุ่น

(ทศพร, 2528) จัดอยู่ใน family Sepiidae ปลาหมึกกระดองที่ใช้ในการทดลองเป็นปลาหมึกกระดองที่มีชื่อสามัญว่า shortclub cuttle fish และชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Sepia pharaonis* เป็นพันธุ์ที่นิยมนำมาแช่แข็ง ลักษณะทั่วไปคือ ลำตัวแบน รูปไข่ มีขนาด 10 เส้น ครีบอกอยู่ข้างๆ ทางด้านล่างของลำตัว หัวแบนกว้าง หนังกาบรูปโค้ง ถุงหมึกมีขนาดใหญ่ กระดองภายในเป็นแผ่นแบนหนากว้างและเป็นสารประกอบของแคลเซียมมีลักษณะคล้ายชอล์ค ลำตัวยาว 10-35 เซนติเมตร และมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกระดองในส่วนที่กินได้ 100 กรัม

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	81.00
คาร์โบไฮเดรต	1.00
เส้นใย	0.00
โปรตีน	16.00
เถ้า	1.00
ไขมัน	0.90

ที่มา: ตารางคุณค่าอาหารในส่วนที่กินได้ 100 กรัม กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (สาธารณสุข, 2527)

2.4 กุ้ง

กุ้งเป็นสัตว์น้ำที่ไม่มีกระดูกสันหลังประเภทหนึ่ง ลำตัวยาว มีเปลือกหุ้มตัวและแบ่งเป็นปล้อง ๆ อยู่ใน phylum Arthropoda และจัดอยู่ใน class Crustacea (ประจวบ, 2537)

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างของกุ้ง

ลักษณะโครงสร้างของกุ้งประกอบด้วย โครงสร้างภายนอก (exoskeleton) หรือเปลือก และเนื้อกุ้งหรือกล้ามเนื้อ (muscle)

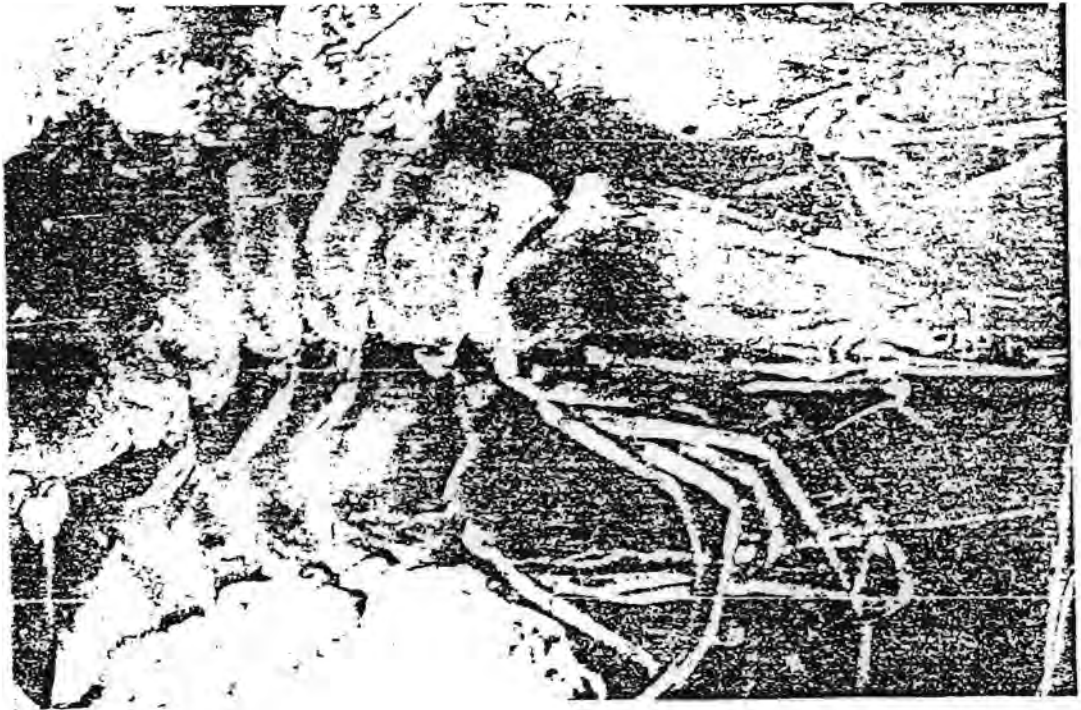
กล้ามเนื้อของกุ้งมีเพียงชนิดเดียวคือ กล้ามเนื้อลาย (striated muscle) ซึ่งพบได้ตามลำตัวรอบอวัยวะต่าง ๆ กล้ามเนื้อลายประกอบด้วย myofibril จำนวนมากรวมกันเป็น muscle fiber ที่มี sarcolemma เป็นเยื่อบาง ๆ หุ้มอยู่

2.4.2 ลักษณะของกุ้ง

กุ้งที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการแช่แข็ง คือ กุ้งกุลาดำ และกุ้งแช่พวย

2.4.2.1 กุ้งกุลาดำ

กุ้งกุลาดำ หรือกุ้งทะเล หรือกุ้งม้าลาย มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Penaeus monodon Fabricius และมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า tiger prawn หรือ giant tiger prawn กุ้งชนิดนี้จัดอยู่ในวงศ์ Penaeidae ในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ลำตัวเป็นสีม่วงแดง มีแถบสีฟ้าคาดพาดขวาง ลำตัวเป็นปล้อง โคนขาว่ายน้ำมีแถบสีเหลืองเป็นปล้อง ๆ เปลือกหัวเกลี้ยงไม่มีขน ทนวดมีสีดำ ไม่มีลาย พันกรีด้านบนมี 7-8 ซี่ ด้านล่างมี 3 ซี่ ร่องข้างกรรทั้งสองด้านมีลักษณะแคบ และยาวไม่ถึงพันกรีอันสุดท้าย ที่ขาเกินคู่ที่ 5 ไม่มีระยางอันนอก ถิ่นอาศัยของกุ้งกุลาดำ ได้แก่ ฝานน้ำมฤตได้หวัน ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และที่พบมาได้แก่ ออสเตรเลีย และอินเดีย เป็นกุ้งที่อยู่ในเขตร้อน ชอบอาศัยอยู่บริเวณน้ำลึก ห่างออกจากฝั่ง และชอบพื้นที่ทะเลที่เป็นดินทราย สามารถทนอยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิสูง และความเค็มต่ำ เช่น บริเวณป่าชายเลน (วัลลภ, 2532)



รูปที่ 2.16 ลักษณะของกุ้งกุลาดำ

2.4.2.2 กุ้งแช่เปี้ยว

กุ้งแช่เปี้ยว มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Penaeus merguensis* de Man และมีชื่อเป็นภาษาอังกฤษว่า Banana prawn กุ้งแช่เปี้ยวจะมีลักษณะลำตัวค่อนข้างใส มีสีอ่อน หรือสีครีม มีกรืออยู่บนแนวระดับยาวเกือบเท่าความยาวของเปลือกตัว ลำกรือสูง ปลายกรือแคบ ด้านบนของกรือมีฟัน 5-8 ซี่ ด้านล่างมี 4-5 ซี่ ร่องข้าง และร่องบนกรือสั้น และจะหายไปบนบริเวณตรงกลางของเปลือก กรือและสันบนเปลือกท้องมีสีน้ำตาลปนแดง ส่วนปลายมีสีแดง กุ้งแช่เปี้ยวพบอยู่ทั่วไปบนป่าธรรมชาติ และจะพบชุกชุมในบริเวณที่มีความลึกของน้ำทะเลประมาณ 10 เมตร ชอบอาศัยอยู่ในที่พื้นดินเป็นดินโคลนหรือเลน (สุวิทย์ ชีนลินธุ์, 2531)



รูปที่ 2.17 ลักษณะของกึ่งแซปวีย

2.5 สมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกึ่ง

จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก (ตารางที่ 2.7) และค่าสมบัติทางความร้อนของกึ่ง (ตารางที่ 2.8) พบว่ามีการศึกษาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกึ่งน้อยมาก เป็นเพียงแต่ศึกษาในแต่ละช่วงอุณหภูมิเท่านั้น ไม่มีการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ พันธุ์ ภาวะการละลาย ทิศทางการเรียงตัวของเนื้อเยื่อ วิธีการแช่แข็งและปัจจัยอื่น ดังนั้นค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกึ่งยังไม่เพียงพอ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ อุณหภูมิ ภาวะการละลาย สำหรับปลาหมึก และวิธีการแช่แข็งสำหรับกึ่งกับค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกึ่งในช่วงแช่แข็ง เพื่อให้มีข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

ตารางที่ 2.7 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

อาหาร	อุณหภูมิ °C	ความร้อนจำเพาะ cal/g °C	สภาพนำความร้อน W/m°C	สภาพแพร่ความร้อน m ² /h	เอกสารอ้างอิง
squid mince	-30 ถึง 57		— — $k=3.29 \times 10^{-6}$ $-4.29 \times 10^{-9}T$ $-2.86 \times 10^{-11}T^2$		Matuszek และ คณะ, 1983
squid	-10	1.43			Reverzev
fillet	-18	0.60			, 1987
80.3%mc	-30	0.50			
squid fillet					Rahman
82.6%mc	30		0.49		, 1991
dry					
80.9%mc	30		0.52		
79.6%mc			0.49		
79.4%mc			0.48		
79.1%mc			0.50		
78.2%mc			0.49		
75.5%mc			0.51		
58.1%mc			0.32		
14.4%mc			0.13		

ตารางที่ 2.8 สมการหรือค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้ง

อาหาร	อุณหภูมิ °C	ความร้อนจำเพาะ cal/g °C	สภาพนำความร้อน W/m°C	สภาพแพร่ความร้อน m ² /hx10 ⁻³	เอกสารอ้างอิง
shrimp peeled and de- vined of graded=					Albin และ คณะ, 1979
200/500	10			0.50	
300/500	10			0.44	
200/300	-10			3.19	
300/500	-10			2.16	
shrimp below freezing		0.449			Polley และ คณะ, 1980
above freezing		0.831			
shrimp	-30 ถึง 57		$k=9.37 \times 10^{-6}$ $-3.89 \times 10^{-8}T$ $+1.62 \times 10^{-11}T^2$		Mutuszek และ คณะ, 1983

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 ทฤษฎีและสมมติฐานในการทดลอง

3.1.1 การหาค่าความร้อนจำเพาะ

ใช้วิธี modified method of mixture หรือ indirect mixing method ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะคำนวณได้จากสมการสมดุลทางความร้อนระหว่างความร้อนที่น้ำและแคลอรีมิเตอร์ได้รับหรือสูญเสียกับความร้อนที่ตัวอย่างได้รับหรือสูญเสีย การเลือกใช้วิธีนี้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ เนื่องจากวิธีนี้ไม่มีการพิจารณาถึงการได้รับความร้อนหรือสูญเสียความร้อนจากสิ่งแวดล้อมในการที่ทดลองที่อุณหภูมิจุดสมดุลต่างจากอุณหภูมิบรรยากาศ มีการป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ที่มีลักษณะเป็น vacuum jacket ที่มีฉนวนหุ้มอย่างเพียงพอ (Hwang และ Hawakawa, 1979) สะดวกต่อการทดลองในห้องปฏิบัติการ ใช้ปริมาณตัวอย่างไม่มาก และตัวอย่างไม่สัมผัสโดยตรงกับสารตัวกลาง

ส่วนวิธี method of mixture นั้นไม่เหมาะสมเนื่องจากปลาหมึกมีความชื้นสูงจึงอาจสูญเสียน้ำให้กับสารตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนได้ สำหรับวิธี differential scanning calorimeter ต้องใช้ความชำนาญมากและเครื่องมือราคาแพง ส่วนวิธี Moline's method ต้องใช้ตัวอย่างปริมาณมากแม้วิธีการจะคล้ายคลึงกับ modified method of mixture

3.1.2 การหาค่าสภาพนำความร้อน

การหาค่าสภาพนำความร้อนเลือกใช้วิธี unsteady state method โดยใช้ thermal conductivity probe เนื่องจากวิธีนี้เหมาะกับตัวอย่างที่มีความชื้นสูงในช่วงแคบแข็งและใช้เวลาในการทดลองสั้น ส่วนวิธี steady state method นั้นใช้เวลาและค่าที่ได้ อาจเกิดการผิดพลาดเนื่องจากเกิด moisture migration รวมทั้งอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมืออีกด้วย ส่วนการหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธี semi-steady state method ใช้เครื่องมือยุ่งยาก และควบคุมไม่ให้ความร้อนถ่ายโอนสู่สิ่งแวดล้อมได้ยาก ค่าสภาพนำความร้อนคำนวณจากความชันของเส้นตรงที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง \ln ของเวลากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Rao และ Rizvi, 1986)

สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดจำกัดจะกำหนดค่าหัตถวิธานระหว่างความยาวต่อความกว้างมีค่ามากกว่า 4 (Qashou และคณะ, 1970) ขนาดของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากสมการ (29) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการวัดค่าสภาพนำความร้อนมีค่าประมาณ 1-2 นาที เนื่องจากสะดวก ให้ผลการทดลองที่มีความแม่นยำมากกว่าและทำให้ขนาดของตัวอย่างไม่ใหญ่เกินไปจนความจำเป็น การคำนวณใช้หลักการว่า ถ้า 4 เท่าของ Fourier number มีค่าน้อยกว่า 0.6 ทำให้มีความผิดพลาดน้อยมาก เพราะไม่มีการรบกวนจากกระแสไฟฟ้าไปยังตัวอย่าง แต่ถ้ามีค่ามากกว่า 0.6 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางของ heat flow ที่ขอบของตัวอย่าง (Kustermann และคณะ, 1981) ดังสมการ

$$4 F_0 < 0.6 \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$F_0 = t / (D^2 \alpha) \quad \dots\dots\dots(28)$$

เมื่อ D คือ ครึ่งหนึ่งของความหนา

$$t_{\max} = (0.6 D^2) / (4 \alpha) \quad \dots\dots\dots(29)$$

จากการคำนวณเบื้องต้นพบว่าเวลาที่มากที่สุดในการวัดค่าสภาพหน้าความร้อน และความหนาของตัวอย่างที่น้อยที่สุดโดยใช้ probe แล้วให้ค่าถูกต้องเป็น 65 วินาที และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับซึ่งภาชนะที่ใส่ตัวอย่างควรมีลักษณะเป็น plate เนื่องจาก รูปทรงของปลาหมึกที่เป็นแผ่น นอกจากนี้ยังสามารถเรียงตัวอย่างลงในภาชนะในทิศทางเดียวกันได้ เนื่องจากการเรียงตัวของเนื้อเยื่อมีผลต่อค่าสภาพหน้าความร้อน

3.1.3 การหาค่าสภาพแพร่ความร้อน

ใช้วิธี slab shape method ที่มีการถ่ายโอนความร้อนในทิศทางเดียว (one dimensional heat transfer) และไม่มีแหล่งให้ความร้อนภายในวัตถุ นอกจากนี้ยัง กำหนดค่าหาค่าสภาพแพร่ความร้อนเป็นค่าอิสระไม่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งและอุณหภูมิ เหตุผลในการพิจารณา เลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากตัวอย่างอาหารที่ใช้คือ ปลาหมึกมีลักษณะเป็นแผ่น ซึ่งทำเป็นทรงกลมหรือ รูปทรงอย่างอื่นได้ยาก และวิธีนี้ใช้ปริมาณตัวอย่างไม่มาก ส่วนวิธี line heat source method จะใช้ตัวอย่างอาหารปริมาณมาก และการสร้างเครื่องมือยุ่งยากมาก และวิธี Acalorimeter method ใช้ตัวอย่างปริมาณมาก ไม่เหมาะสมกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแผ่นอย่างปลาหมึก ส่วนวิธี temperature profile ใช้หลักการเดียวกับ slab method เพียงแต่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการ

การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนของวิธีนี้ใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยมี flow chart ดังแสดงในภาคผนวก ก และเลือกใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมเพราะ สามารถคำนวณได้เร็วกว่าภาษาอื่น การแก้สมการใช้ numerical calculation โดย กำหนด initial และ boundary condition ดังนี้

initial condition

$$t = 0, \quad 0 < x < 2L : T = T_0$$

boundary condition

$$t \leq 0, \quad x = 0 \text{ และ } 2L : T = T_e$$

$$t \geq 0, \quad x = L : \partial T / \partial t = 0$$

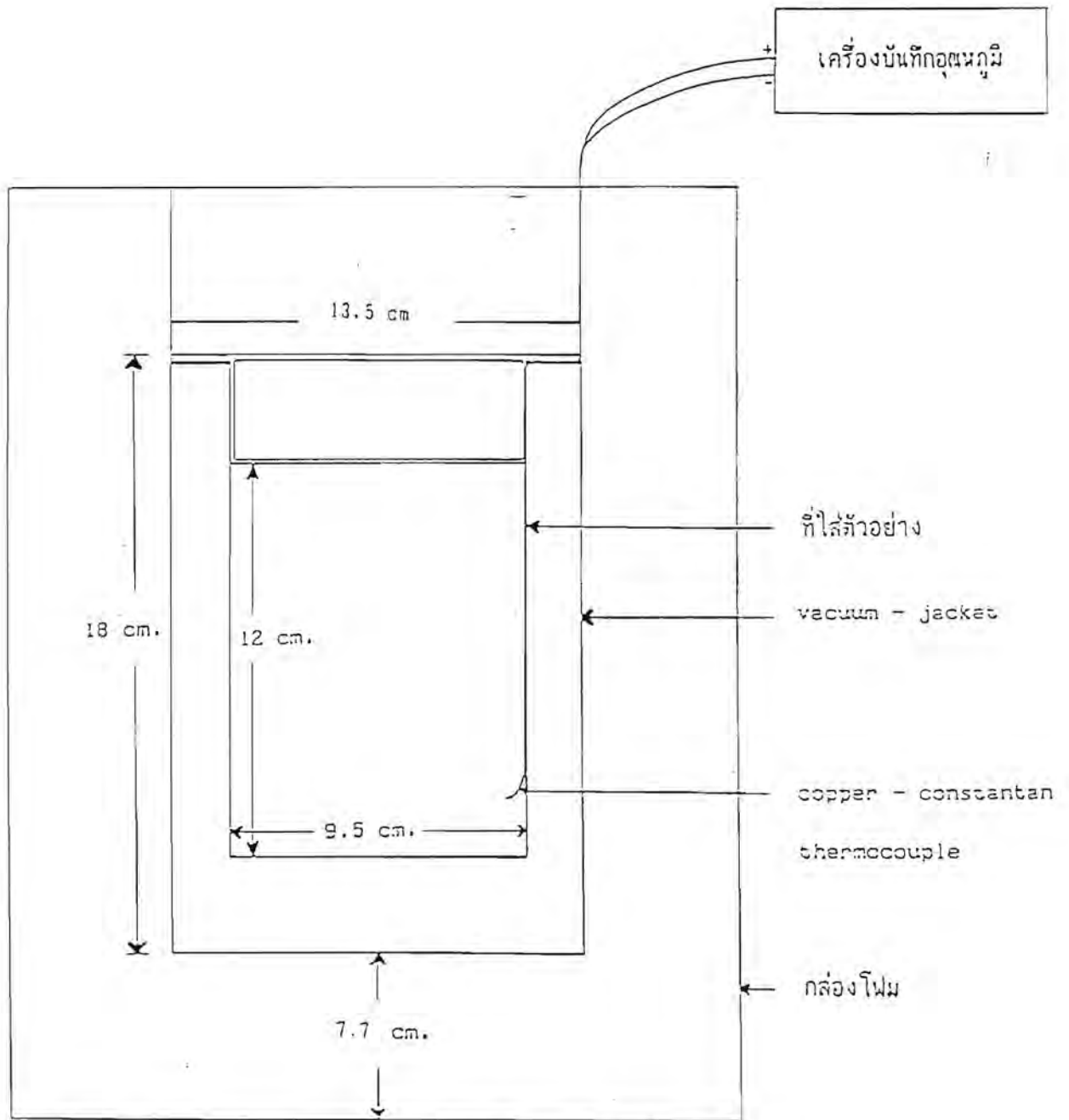
$$t = \infty, \quad 0 \leq x \leq 2L : T = T_e$$

เมื่อ L เป็น ครึ่งหนึ่งของความยาวของตัวอย่างด้านที่มีการถ่ายโอนความร้อน และ T_0 และ T_e เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายตามลำดับ โดยตั้งสมมติฐานว่าการถ่ายโอนความร้อนบริเวณ film ที่ผิวน้อยมากจนถือว่าไม่มีผลต่อการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งวิธี numerical ที่ใช้คือ explicit method ที่ต้องใช้ $M \geq 2$

3.2 ลักษณะของเครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อน

3.2.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

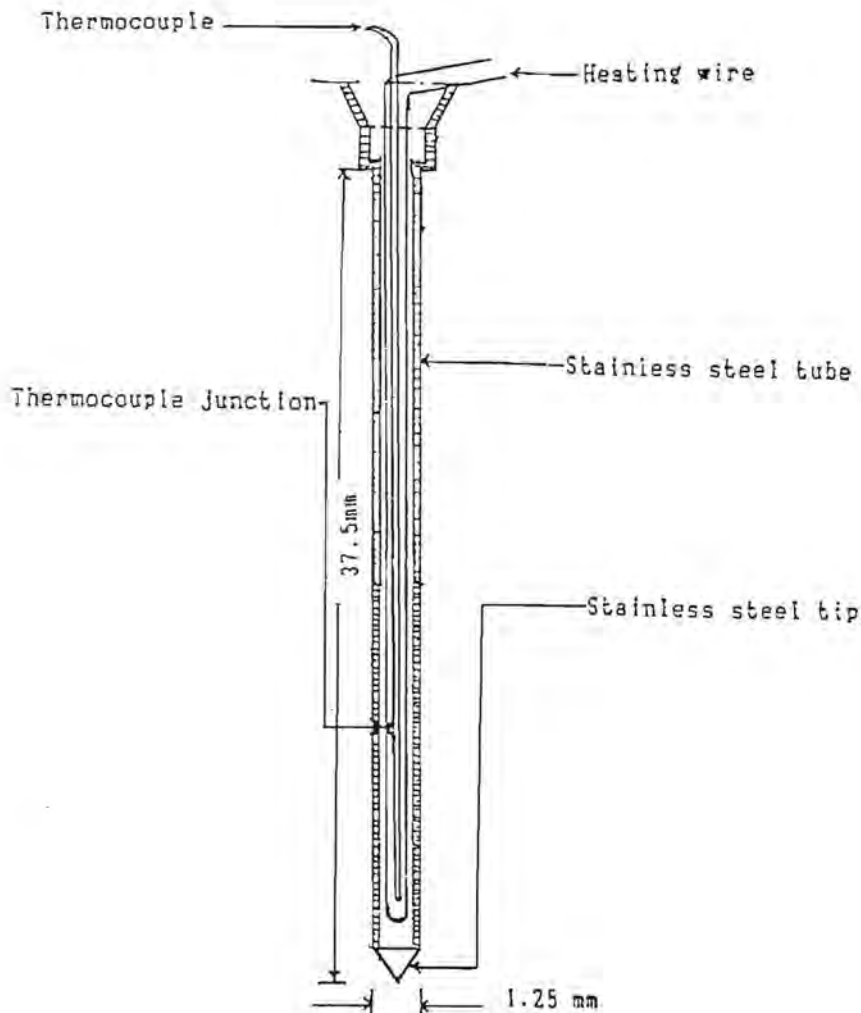
ใช้วิธี modified method of mixture หรือ indirect mixing method เครื่องมือที่ใช้คือแคลอรีมิเตอร์ (รูปที่ 3.1) ที่ประกอบด้วยกระติกน้ำร้อนที่มีลักษณะเป็น vacuum jacket ซึ่งช่องบรรจุตัวอย่างจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5 เซนติเมตร สูง 12.5 เซนติเมตร ภายในกระติกน้ำร้อนใส่น้ำกลั่นซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส (ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส) เป็นสารตัวกลางที่แลกเปลี่ยนความร้อน และใช้ thermocouple type T (copper-constantan) ต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (CHINO model DR 015 accuracy ± 0.1 องศาเซลเซียส) วัดอุณหภูมิของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ และอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างที่บรรจุในถุง LLDPE (Linear Low Density Polyethylene) ซึ่งใช้ได้สี่ในช่องแช่แข็ง และสามารถป้องกันไขมันและน้ำได้คืออีกด้วย มีขนาดกว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร หนา 0.1 มิลลิเมตร แคลอรีมิเตอร์มีการป้องกันการสูญเสียความร้อนจากระบบโดยหุ้มด้วยโฟมหนา 3 นิ้ว และมีเม็ดโฟมบรรจุบริเวณช่องว่างระหว่างกระติกน้ำร้อนกับแผ่นโฟม



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางของแคลอรีมิเตอร์

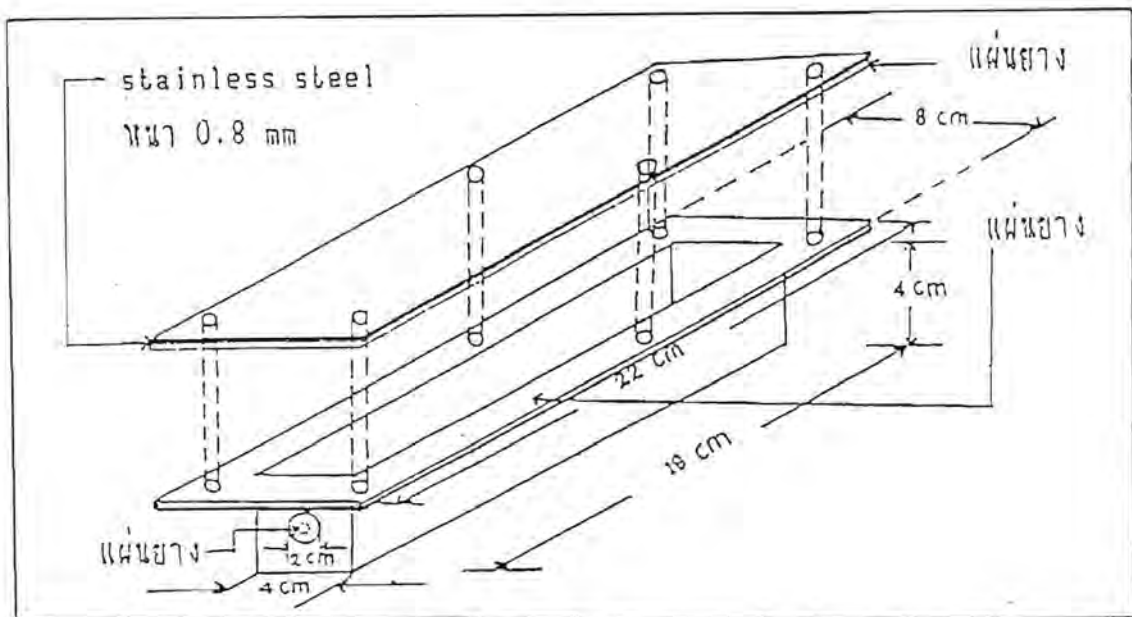
3.2.2 ค่าสภาพนำความร้อน

ใช้ thermal conductivity probe (รูปที่ 3.2) เพื่อหาสภาพนำความร้อนของปลาหมึก probe ที่ใช้ตัดแปลงมาจากวิธีของ Sweat (1974) โดยตัว probe ประกอบด้วย เซมิคอนดักเตอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.25 มิลลิเมตร ยาว 37.5 มิลลิเมตร ซึ่งภายในมี thermocouple type T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ copper และ constantan เท่ากับ 0.08 มิลลิเมตร ปลายด้านหนึ่งของ thermocouple อยู่บริเวณกึ่งกลาง probe ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ภายใน probe มี nichrome heating wire ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 มิลลิเมตร ซึ่งมีปลายด้านหนึ่งอยู่ปลาย probe และปลายอีกด้านหนึ่งต่อกับแหล่งจ่ายไฟ กระแสตรงความต่างศักย์ 1.5 โวลต์ ช่องว่างภายใน probe บรรจุปรอทเพื่อแทนที่อากาศที่มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำ



รูปที่ 3.2 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe

สำหรับ thermal conductivity plate ที่ใส่ตัวอย่างได้จากการคำนวณตามสมการ(29) พบว่าขนาดของตัวอย่างที่เหมาะสมควรมีขนาด 4x18x4 เซนติเมตร โดยมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่สามารถเปิดผาด้านบน และด้านข้างด้านหนึ่งเจาะรูเพื่อให้อาจสามารถเสียบ probe เข้าไป (รูปที่ 3.3) ทำจาก stainless steel ทน 0.8 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการวัสดุที่มีสภาพนำความร้อนสูง (เพื่อให้อุณหภูมิภายในตัวอย่างเท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการโดยเร็ว) ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหารและมีความคงรูปดี

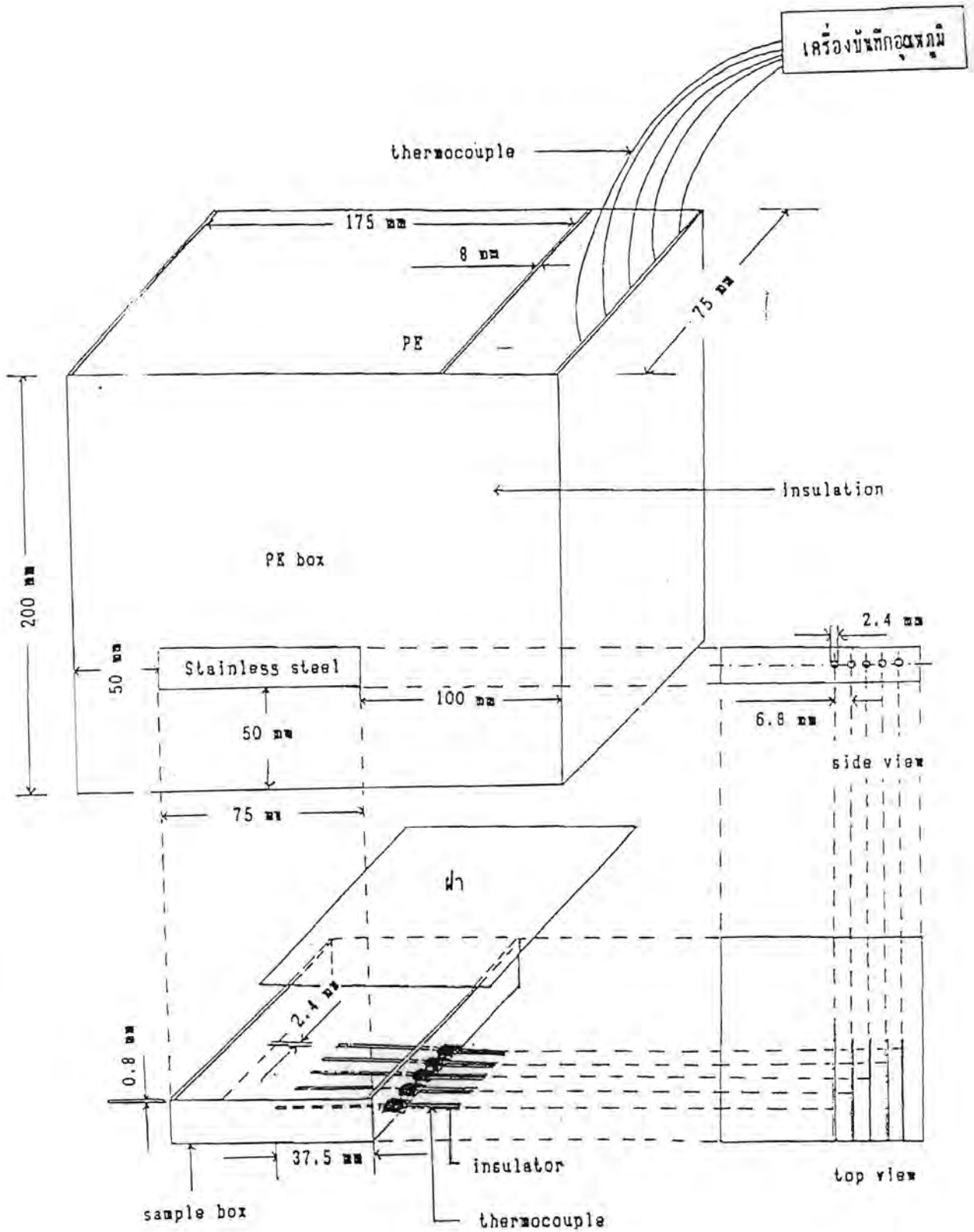


รูปที่ 3.3 ลักษณะของ thermal conductivity plate

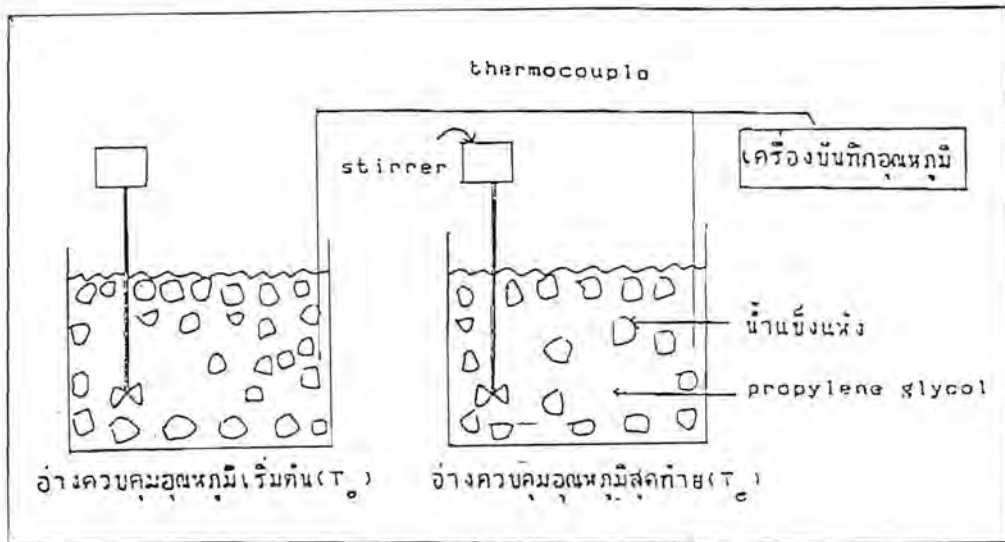
3.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

ใช้ thermal diffusivity plate ที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Kubota และคณะ (1983); Nesvadba และ Eunson(1984) เพื่อให้เหมาะสมกับตัวอย่าง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 โดย thermal diffusivity plate มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมจตุรัสแบน ขนาด $7.5 \times 7.5 \times 2$ เซนติเมตร ทำด้วยพลาสติก polyethylene (PE) ที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อน $7.9743 \times 10^{-2} \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ที่ 30°C หนา 0.8 เซนติเมตร ซึ่ง PE สามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง (-300 ถึง 100°C องศาเซลเซียส) และไม่ทำปฏิกิริยากับ propylene glycol โดยมีอากาศที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อน $0.02 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ที่ 30°C เป็นฉนวนหุ้มหนา 5 เซนติเมตรโดยรอบ ส่วนบริเวณที่ต้องการให้มีการถ่ายโอนความร้อนจะใช้ stainless steel หนา 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงถึง $1601.17 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ที่ 20°C ผ่าจะทำด้วยพลาสติก PE เช่นกัน โดยภายในกล่องจะมีการเจาะรู 5 รูเพื่อสอด probe ซึ่งทำจากเซมิคอนดักเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 มิลลิเมตร ภายในมีสาย thermocouple type T ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ copper และ constantan เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตรสอดอยู่ ปล่อยให้ปลายสาย thermocouple อยู่ที่ปลาย probe เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ โดยห่างกันรูละ 0.68 เซนติเมตรตามลำดับ

ในการทดลองจะนำกล่องนี้แช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มี propylene glycol เป็นสารตัวกลางในการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยรักษาสภาวะแวดล้อมให้คงที่ และมีการกวนอย่างสม่ำเสมอ(รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.4 ลักษณะของ thermal diffusivity plate



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธี slab ในการทดลอง

3.3 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่ใช้เป็นพลาสติก 2 พันธุ์และกึ่ง 2 พันธุ์คือ

- 3.3.1 พลาสติกกล้วย ชื่อจากสะพานปลากรุงเทพฯ โดยมีขนาด 20-25 เซนติเมตร มีน้ำหนักในช่วง 1000-1200 กรัม/ตัว
- 3.3.2 พลาสติกกระดอง เป็นพลาสติกกระดองลายเสือชื่อมาจากสะพานปลากรุงเทพฯ โดยมีขนาด 15-20 เซนติเมตร มีน้ำหนักในช่วง 1000-1200 กรัม/ตัว
- 3.3.3 กึ่งกุลาตา ชื่อจากสะพานปลากรุงเทพฯ โดยมีขนาด 17-25 เซนติเมตร มีน้ำหนักในช่วง 25-35 กรัม/ตัว
- 3.3.4 กึ่งแซปเปี่ย ชื่อจากสะพานปลากรุงเทพฯ โดยมีขนาด 20-30 เซนติเมตร มีน้ำหนักในช่วง 30-40 กรัม/ตัว

3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

หาปริมาณความชื้นโดยวิธีเครื่อง hot air oven ดัดแปลงจากวิธีวิเคราะห์ของ AOAC 14.004 (1984) ปริมาณโปรตีนโดยวิธีเครื่อง micro Kjeldahl ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC 2.057 (1984) ปริมาณไขมันโดยวิธีเครื่อง soxhlet ตามวิธีของ AOAC 14.089 (1984) ปริมาณเส้นใยดัดแปลงจากวิธีของ AOAC 7.006 (1984) และปริมาณเถ้าตามวิธีของ AOAC 7.009 (1984) และปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยวิธีผลต่างขององค์ประกอบต่างๆ จาก 100 (ดังแสดงในภาคผนวก ข)

3.5 การหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2524)

- ก. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและบันทึกไว้
- ข. เติมเมล็ดกลงในภาชนะโลหะจนเต็ม อ่านปริมาตรของเมล็ดงาที่ใช้เติมนั้นโดยใช้กระบอกตวง
- ค. วางตัวอย่างลงในภาชนะ เติมเมล็ดกลงไปจนเต็ม อ่านปริมาตรของเมล็ดงาที่ใช้เติมนั้นโดยใช้กระบอกตวง
- ง. คำนวณหาความหนาแน่นของตัวอย่างจากสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของตัวอย่าง} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง (g)}}{(\text{ปริมาตรของเมล็ดงาในข้อ ข} \\ - \text{ปริมาตรเมล็ดงาในข้อ ค})}$$

..... (30)

3.6 การเตรียมตัวอย่าง

3.6.1 ปลาหมึก

3.6.1.1 สำหรับวัดค่าความร้อนจำเพาะ

หั่นตัวอย่างโดยเอาเฉพาะส่วนตัว (fillet) ที่ลอกเปลือกชั้นในและเปลือกชั้นนอกออกเป็นชิ้นขนาด $2 \times 2 \times 1$ เซนติเมตรจำนวน 150 กรัมใส่ในถุง LLDPE แล้วนำไปแช่แข็งใน air blast freezer (AUGUSTA ไม่ปรากฏ model และประเทศที่ผลิต) ที่อุณหภูมิของอากาศ -40 องศาเซลเซียส โดยมีความเร็วลม 4 เมตรต่อวินาทีไหลผ่านตามขวางของตัวอย่าง พบว่ามีการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่า 1 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังนั้นจึงเป็นการแช่แข็งแบบช้า (ใหญ่, 2529)

ส่วนตัวอย่างที่ต้องทำการละลาย (thawing) จะนำปลาหมึกเฉพาะส่วนตัวที่ลอกเปลือกชั้นในและเปลือกชั้นนอกออกใส่ถุง LLDPE ประมาณ 1 กิโลกรัม แล้วเสียบปลายด้านหนึ่งของ thermocouple type T ไว้ในตัวอย่างปลายอีกด้านต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ นำไปแช่ใน still air freezer ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาละลายโดยนำตัวอย่างที่อยู่ถุง LLDPE แช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 30 ± 2 องศาเซลเซียส ปริมาตร 2 ลิตร บันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างทุก 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างประมาณ 5 องศาเซลเซียส พบว่าใช้เวลา 55 นาที ซึ่งใช้เป็นเวลาในการละลายครั้งต่อไป จากนั้นจึงนำตัวอย่างมาหั่นเป็นขนาด $2 \times 2 \times 1$ เซนติเมตร แล้วนำไปแช่แข็งด้วย air blast freezer จนได้อุณหภูมิตามต้องการ

3.6.2.2 สำหรับวัดค่าสภาพนำความร้อน

หั่นตัวอย่างปลาหมึกโดยเอาเฉพาะส่วนตัว (fillet) เช่นเดียวกับข้อ 3.6.1.1 เป็นชิ้นขนาด $4 \times 9 \times 1$ เซนติเมตร บรรจุใน thermal conductivity plate โดยเรียงตามแนวยาวของภาชนะจนถึงความสูงเท่ากับภาชนะบรรจุ

ส่วนตัวอย่างปลาหมึกที่ต้องการละลายให้ทำเหมือนข้อ 3.6.1 โดยใช้เวลา 55 นาทีในการละลาย หลังจากละลายแล้วจะนำปลาหมึกมาทำการหั่นเป็นขนาด $4 \times 9 \times 1$ เซนติเมตรบรรจุใน thermal conductivity plate และนำไปแช่แข็งด้วย air blast freezer จนได้อุณหภูมิตามต้องการ

3.6.3.3 สำหรับวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

หั่นชิ้นตัวอย่างโดยเอาเฉพาะส่วนตัว (fillet) เป็นชิ้นขนาด $2 \times 7.5 \times 1$ เซนติเมตร แล้วเรียงลงใน thermal diffusivity plate ตามแนวยาวของภาชนะจนแน่นให้ได้ความกว้างเท่ากับภาชนะบรรจุ

ส่วนตัวอย่างปลาหมึกที่ต้องการทำการละลาย (thawing) ให้ทำเหมือน

ข้อ 3.6.1.1 หลังจากละลายนำปลาหมึกมาหั่นเป็นขนาด $2 \times 7.5 \times 1$ เซนติเมตร

3.6.2 กุ้ง

3.6.2.1 สำหรับวัดค่าความร้อนจำเพาะ

ตัดหัวแกะเปลือกและหางออกจนหมด เอาเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อเท่านั้น จำนวน 150 กรัม ใส่ในถุง LLDPE เสียบ thermocouple ให้ได้บริเวณกึ่งกลางของถุง จากนั้นนำไปแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing จนได้อุณหภูมิตามต้องการ

3.6.2.2 สำหรับวัดค่าสภาพนำความร้อน

ตัดหัวแกะเปลือกและหางออกจนหมด เอาเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อเท่านั้นนำไปเรียงลงใน thermal conductivity plate โดยเรียงตามแนวยาวของภาชนะจนได้ความกว้าง ยาว และสูง เท่ากับภาชนะ จากนั้นนำไปแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing จนได้อุณหภูมิตามต้องการ

3.6.2.3 สำหรับวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

ตัดหัวแกะเปลือกและหางออกจนหมด เอาเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อ นำไปเรียงลงใน thermal diffusivity plate โดยเรียงตามแนวยาว จนได้ความกว้าง ยาว และสูง เท่ากับภาชนะบรรจุ จากนั้นนำไปแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing หรือ วิธี dry-ice freezing จนได้อุณหภูมิตามต้องการ

3.7 วิธีการทดลองหาสมบัติทางความร้อน

3.7.1 การวัดค่าความร้อนจำเพาะ

ใช้แคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้น และทดสอบหาค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ โดยใช้น้ำเป็นสารอ้างอิง (ความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ก. ใส่น้ำ 250 กรัมในแคลอรีมิเตอร์ปัสอียาห์อุณหภูมิของน้ำและ แคลอรีมิเตอร์คงที่ที่อุณหภูมิห้อง

ข. ใส่น้ำ 150 กรัมในถุง LLDPE (linear low density polyethylene) จากนั้นนำใบแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ที่มีอุณหภูมิกึ่งที่ประมาณ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาทีหรือจนอุณหภูมิของน้ำในถุงสมดุลกับอุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

ค. บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอรีมิเตอร์และในถุง LLDPE เริ่มต้น โดยใส่ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ

ง. นำถุงที่บรรจุน้ำใส่ลงในแคลอรีมิเตอร์ที่มีน้ำอยู่ แล้วปิดฝาทันที

จ. บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ทุก 1 นาทีเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีการเขย่าแคลอรีมิเตอร์อย่างสม่ำเสมอ

ฉ. สร้างกราฟระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับเวลา อ่านค่าอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ ความชันของกราฟเส้นตรง (dT/dt) มีค่า R^2 หลังภาวะสมดุลสูงสุด เป็นอุณหภูมิและ เวลาสมดุล (T_F, t_F)

ช. คำนวณค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ จากสมการ(2) แต่เปลี่ยน จากตัวอย่างมาเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยที่ใช้โปรแกรม LOTUS 1-2-3

ซ. นำตัวอย่างที่เตรียมแล้วไปทำการแช่แข็ง และรักษาอุณหภูมิจึงที่ตามต้องการโดยใช้ propylene glycol และน้ำแข็งแห้ง(เป็นเวลาประมาณ 30 นาที)

ด. ใส่น้ำ 250 กรัมที่ 65 องศาเซลเซียสในแคลอรีมิเตอร์ บันทึกอุณหภูมิของน้ำในแคลอรีมิเตอร์เริ่มต้น

ด. ใส่วัตถุอย่างที่ได้อุณหภูมิตามต้องการลงในแคลอรีมิเตอร์ แล้วปิดฝาทันที

ด. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ จ และ ฉ แต่คำนวณผลการทดลองโดยใช้สมการ(31) ซึ่งมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งในปลาหมึกหรือกุ้งมาเกี่ยวข้อง เนื่องจากมีการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งในปลาหมึกหรือกุ้ง ไปเป็นน้ำในระหว่างการทดลอง

$$(C_{pw}W_w + H_c)T_c + C_{ps}W_sT_s - E = C_{ps}W_sT_f + C_{pw}W_wT_f + H_cT_c + LH$$

.....(31)

เมื่อ LH = ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งในปลาหมึกหรือกุ้ง (cal)
 = [ความร้อนแฝงของน้ำแข็ง (80 cal/g) x ความชื้นปลาหมึกหรือกุ้ง x W_s]

3.7.2 การวัดค่าสภาพนำความร้อน

ใช้ thermal conductivity probe ในการหาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง โดยใช้หม้อแปลงไฟกระแสสลับเป็นกระแสตรงขนาด 1.5 V เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน หาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ด้วยกัลวีเซอรีน(ค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.285 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ที่ 20 องศาเซลเซียส) โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ก. เสียบ thermal conductivity probe ลงในกัลวีเซอรีนที่มีอุณหภูมิคงที่ที่ 20 องศาเซลเซียส

ข. ต่อสาย thermocouple ของ probe เข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิและรจจนอุณหภูมิของกัลวีเซอรีนคงที่

ค. ให้พลังงานความร้อนโดยใช้หม้อแปลงไฟเป็น 1.5 โวลต์ แล้วบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของกึ่งเซอรินทุก 1 วินาที เป็นเวลา 60 วินาที

ง. สร้างกราฟของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ จะได้กราฟเส้นตรง หาค่าความชันของกราฟ (s) เพื่อคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ จากสมการ

$$q' = 4 sk \dots\dots\dots(32)$$

จ. ทำการทดลองประมาณ 6 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรม LOTUS 1-2-3

ฉ. เสียบ thermal conductivity probe ลงไปด้านข้าง plate ที่ใส่ตัวอย่างไว้ แล้วนำไปทำการแช่แข็ง และรักษาอุณหภูมิให้ได้ตามต้องการโดยใช้ propylene glycol และน้ำแข็งแห้ง

ช. ต่อสาย thermocouple ของ probe เข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิและทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ ค ถึง จ

3.7.3 การวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

ใช้ thermal diffusivity plate ที่มี probe เสียบอยู่ 5 จุด และอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ประกอบขึ้น โดยใช้สารละลาย propylene glycol และน้ำแข็งแห้งเป็นตัวกลาง ในการควบคุมอุณหภูมิในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยรักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ก. บรรจตุตัวอย่างกึ่งหรือปลายใน thermal diffusivity plate ปิดฝาแล้วเสียบ thermocouple เข้าไปที่ด้านข้าง 5 จุดตามตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อวัดอุณหภูมิจากนั้นนำไปทำการแช่แข็ง

ข. นำสารละลาย propylene glycol ไปแช่ในตู้แช่แข็งจนได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วจึงนำมาใส่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ 2 อ่าง อาจใช้น้ำแข็งแห้งช่วยลดอุณหภูมิ โดยใส่ น้ำแข็งแห้งลงในสารละลาย propylene glycol ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ให้ได้อุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) และอุณหภูมิสุดท้าย (T_e) ตามต้องการ .

ค. นำ thermal diffusivity plate แช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างคงที่สม่ำเสมอทั่วชิ้น (± 0.1 องศาเซลเซียส) จากนั้นจึงนำ thermal diffusivity plate แช่ลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิสุดท้าย (T_e) และเริ่มบันทึกอุณหภูมิของ propylene glycol ในอ่างควบคุมอุณหภูมิและตัวอย่างทุก ๆ นาทีเป็นเวลา นาน 60 นาที

ง. นำอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละเวลา ไปคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนโดยใช้ภาษา C ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่คำนวณได้เป็นค่าที่อุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ของอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้าย

3.8 ขอบเขตในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง

ศึกษาผลของอุณหภูมิ ภาวะการละลาย(thawing) วิธีการแช่แข็ง และพันธุ์ที่มีต่อสมบัติทางความร้อน ได้แก่ ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกและกุ้งโดยวางแผนการทดลองแบบ factorial design (เจริญ,2527) โดยมีตัวแปร 3 ตัว คืออุณหภูมิ 4 ระดับ, ภาวะการละลาย 2 ระดับ วิธีการแช่แข็ง และพันธุ์ 2 ระดับ และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

ก. อุณหภูมิ ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำได้แก่ -40 ± 1 , -30 ± 1 , -18 ± 1 , และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส

ข. ภาวะการละลาย(thawing) ได้แก่ไม่ผ่านการละลายและผ่านการละลาย ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการละลายคือตัวอย่างที่ผ่านการแช่แข็งด้วย air blast freezer จนได้อุณหภูมิตามต้องการก่อนวัดค่าสมบัติทางความร้อน ส่วนตัวอย่างที่ผ่านการละลายหมายถึงนำตัวอย่างที่แช่แข็งจาก still air freezer มาทำการละลาย จากนั้นนำไปแช่แข็งด้วย air blast freezer จนได้อุณหภูมิตามต้องการก่อนวัดค่าสมบัติทางความร้อน

ค. วิธีการแช่แข็ง คือ การแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing

ง. พันธุ์ ได้แก่ ปลาหมึกกล้วยพันธุ์ *Loligo formosana* และ ปลาหมึกกระดองพันธุ์ *Sepia pharaonis* และกุ้งกุลาดำพันธุ์ *Penaeus monodon* Fabricious และ กุ้งแช่บ๊วยพันธุ์ *Penaeus merguensis* de Man

3.9 รวบรวมผลการทดลองและวิเคราะห์ผลทางสถิติ

นำค่าสมบัติทางความร้อนคือ ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อนค่า และค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกและกุ้งที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลดังนี้

3.9.1 ทหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องศพประกอบทางเคมี และสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ห้องศพประกอบทางเคมี ดังรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ค

3.9.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ อุณหภูมิ ภาวะการละลาย สำหรับปลาหมึก และวิธีการแช่แข็งสำหรับกุ้ง ต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้งโดยใช้โปรแกรม STAT PAK (STATISTICAL ANALYSIS PACKAGE : NORTHWEST ANALYTICAL, INC. POSTLAND, OREGON. 1983)

3.9.3 ทหสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกกับพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนของกุ้งกับพันธุ์วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ โดยการทห multiple regression ของข้อมูลทั้งหมด และพิจารณาความสำคัญของเทอมต่างๆ ในสมการโดยใช้ analysis of variance ในการตัดเทอมที่ไม่น่ามีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ด้วยโปรแกรม S.P.S. (DATABASIC, Inc. Mt. Pleasant MI 48888)

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การตรวจสอบเครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อนของพลาสติกและกึ่ง

4.1.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของพลาสติกและกึ่งหาโดยวิธี modified method of mixture วิธีนี้ใช้ได้กับพลาสติกซึ่งมีความชื้นสูง โดยใช้ถุง LLDPE บรรจุตัวอย่างเพื่อไม่ให้ตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน และมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนในขณะทดลอง โดยมีเม็ดโคมและโคมหนา 3 นิ้ว ทากหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มอยู่และในการหาเวลาสมดุล (t_F) ใช้ตำแหน่งบนเส้นกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของไนแกเคลอรีมิเตอร์ที่มีค่า R^2 สูงสุด เนื่องจากในการทดลองพบว่าตำแหน่งที่มีค่า R^2 สูงสุด มีแนวโน้มเป็นตำแหน่งเดียวกับเวลาที่ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับอุณหภูมิเป็นเส้นตรงที่ดีที่สุด

ในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้น้ำกลั่นเป็นสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ พบว่าแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 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 0.50 และเมื่อใช้แคลอรีมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมันวัวที่ความชื้นร้อยละ 85.91 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.895 ± 0.008 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของนมวัวที่รายงานไว้ (Rao และ Rizvi, 1986) จากสมการ

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

โดยพบว่า น้ำนมวัวที่ความชื้นร้อยละ 85.91 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.903 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งแตกต่างกันร้อยละ 0.8 ดังนั้นแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.1.2 ค่าสภาพนำความร้อน

ใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง จากการทดลองได้เลือกใช้กึ่งเซลล์ฮีโมวีนเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ให้แก่ probe เนื่องจากสะดวกและหาง่าย นอกจากนี้ยังใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์คงที่โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับ 220 โวลต์ เป็นกระแสตรง 1.5 โวลต์ เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง 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) เข้มชื้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ที่มีค่าสภาพการนำความร้อนเท่ากับ 0.136 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน (Kent และคณะ, 1984) สภาพนำความร้อนของสารละลาย gel ที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.130 ± 0.011 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ซึ่งต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 6.46 นอกจากนี้เมื่อใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อวัวที่ความชื้นร้อยละ 64 ปริมาณไขมันร้อยละ 16 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ในทิศทางขนานกับเนื้อเยื่อ ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.380 ± 0.025 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน 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 องศาเซลวิน ประมาณร้อยละ 0.517 ดังนั้น thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.1.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

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

จากการทดลองใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของสารอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพแพร่ความร้อนคือ carageenan gel เข้มข้นร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเท่ากับ 1.25×10^{-7} เมตร²/วินาที (Kent และคณะ, 1984) และสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลองมีค่า $1.200 \times 10^{-7} \pm 0.001 \times 10^{-7}$ เมตร²/วินาที ซึ่งต่างจากค่าที่รายงานไว้ร้อยละ 0.36 นอกจากนี้เมื่อใช้ thermal diffusivity plate หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของเนือบคที่ความชื้นร้อยละ 76.81 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ $1.82 \times 10^{-7} \pm 0.05 \times 10^{-7}$ เมตร²/วินาที ซึ่งต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของเนือบคที่รายงานไว้ (Singh, 1982) จากสมการ

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

ที่ความชื้น 76.81 ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 1.823×10^{-7} เมตร²/วินาที
 ประมาณร้อยละ 1.59 ดังนั้น thermal diffusivity plate ที่ประกอบขึ้นสามารถหาค่า
 สภาพแพร่ความร้อนได้ถูกต้อง

4.2 ผลการทดลองและวิจารณ์สมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

4.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้ง
 ที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำได้ผลดังตารางที่ 4.1 พบว่า
 ปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายนั้น ปลาหมึกกล้วยมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าปลาหมึกกระดอง
 แต่ปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลายมีน้ำน้อยกว่าปลาหมึกกระดองที่ผ่านการละลาย ทั้งนี้เนื่องจาก
 ความหนาของปลาหมึกกล้วยน้อยกว่าปลาหมึกกระดองจึงทำให้การถ่ายโอนมวลของน้ำเป็นไปได้เร็ว
 กว่า ดังนั้นเมื่อนำปลาหมึกกล้วยมาผ่านการละลายจึงมีน้ำออกจากเนื้อเยื่อปลาหมึกมากกว่า ซึ่งน้ำมี
 อิทธิพลต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง นอกจากนี้ยังพบว่าองค์ประกอบทางเคมีอื่นนอกจาก
 น้ำของปลาหมึกกล้วยแตกต่างจากปลาหมึกกระดองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.5$) โดย
 อิทธิพลของการละลายทำให้องค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ยกเว้นปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใย
 ของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดอง แสดงว่าปริมาณไขมันและเส้นใยไม่เปลี่ยนแปลงใน
 ระหว่างการละลาย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลาย

พันธุ์ปลาหมึก	การละลาย	ปริมาณร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี* (dry basis)					
		ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เส้นใย	เถ้า	
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±0.08a	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 ($p < 0.05$)

4.2.2 ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึก

จากการทดลองบันทึกค่าอุณหภูมิในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อนำมาคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ สภาพหนาความร้อน และสภาพแพร่ความร้อนดังตัวอย่างการคำนวณภาคผนวก วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมบัติทางความร้อน และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิโดยใช้ multiple regression analysis

4.2.2.1 ความร้อนจำเพาะ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ตารางที่ 4.2)

พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลาย ภาวะการละลาย และอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก

SOV	df	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 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมี ตามสมการ (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 เนื้อวัวซึ่งมีปริมาณความชื้นสูงกว่ามีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าถึงแม้ว่าจะมีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พันธุ์ และอุณหภูมิเดียวกัน โดยที่ปลาหมึกกล้วยเมื่อนำมาผ่านการละลาย มีค่าความร้อนจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 20.78 (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย) ซึ่งเป็นไปตามปริมาณความชื้นที่ลดลง (ร้อยละ 4.33) เช่นเดียวกับปลาหมึกกระดองเมื่อนำมาผ่านการละลาย ค่าความร้อนจำเพาะลดลงประมาณร้อยละ 3.17 ตามปริมาณความชื้นที่ลดลง (ร้อยละ 1.64) เช่นกัน ดังนั้นอิทธิพลของการละลายทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นลดลง ซึ่งเห็นได้ว่าการลดลงของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมากกว่าปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลาย โดยที่ค่าความร้อนจำเพาะของ

ปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายลดลงเป็น 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 จึงมีผลเสริมให้การลดลงของค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมีค่ามากกว่าปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลายทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมีค่ามากกว่าปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลาย ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะจากความชื้นควรพิจารณาที่ความหนาแน่นเดียวกันจึงจะให้ผลถูกต้องมากกว่า สาเหตุที่ปลาหมึกที่ผ่านการละลายมีความหนาแน่นมากกว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย อาจเนื่องจากเมื่อนำปลาหมึกมาทำการแช่แข็งแบบช้าด้วย still air freezer ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่เปื่อยโครงสร้างของเนื้อเยื่อทำให้โครงสร้างเสียไปบางส่วน (Love, 1962) ดังนั้นเมื่อนำปลาหมึกมาทำการละลายจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำและอากาศที่แทรกตัวอยู่น้ำออกมาจากโครงสร้างของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลาย (Lawrie, 1960) ทำให้ปริมาตรของตัวอย่างลดลงมากกว่ามวล มีผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และเนื่องจากความหนาแน่นของปลาหมึกกล้วยมีน้อยกว่าจึงทำให้การถ่ายโอนมวลน้ำและอากาศเป็นไปได้เร็วกว่า 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 นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของค่าความร้อนจำเพาะมีลักษณะแบบพาราโบล่าหงาย (รูปที่ 4.2) ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในช่วงของการแช่แข็งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำเป็นน้ำแข็งซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของน้ำสูงกว่าน้ำแข็งประมาณ 2-3 เท่า ดังนั้นในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำเป็นน้ำแข็งซึ่งยังไม่หมด ค่าความร้อนจำเพาะจึงสูงตามค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ นอกจากนี้เมื่อลดอุณหภูมิจนต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะมีผลของตัว



ถูกละลายในอาหารเกิดขึ้น ซึ่งผลึกเหล่านี้ส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มมากขึ้นด้วย (Mohsenin, 1980) ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Long(1955) ซึ่งได้ทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อปลาในช่วงอุณหภูมิ -6 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่าความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มลดลงแบบพาราโบลาหลังจากเมื่ออุณหภูมิต่ำลงเช่นเดียวกับความร้อนจำเพาะของเนื้อสัตว์อื่น ๆ 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 $R^2 = 0.946$ โดยอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลายและอุณหภูมิกำลังสองมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก

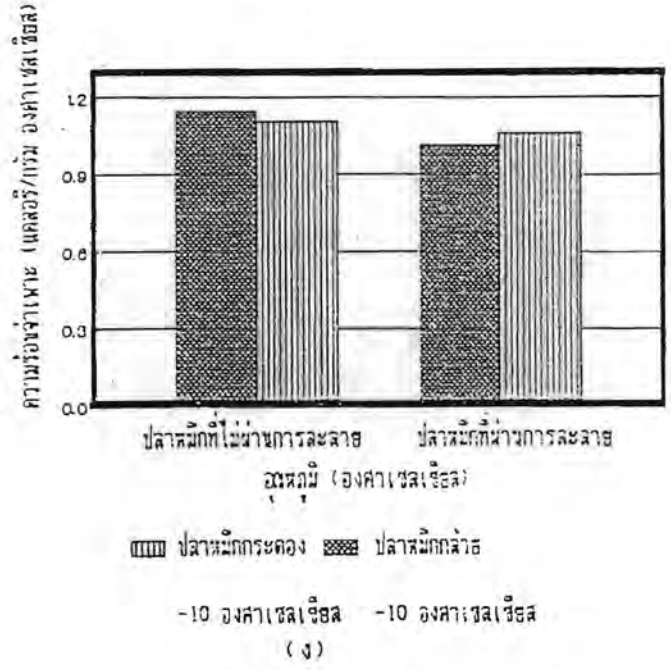
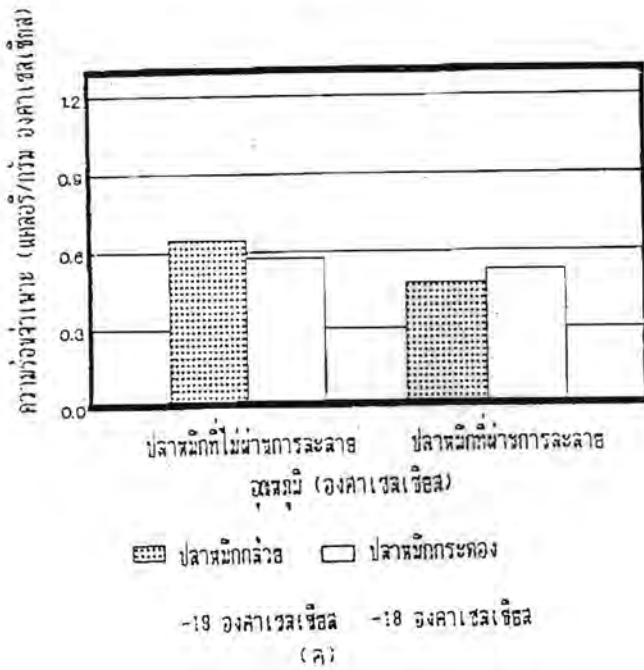
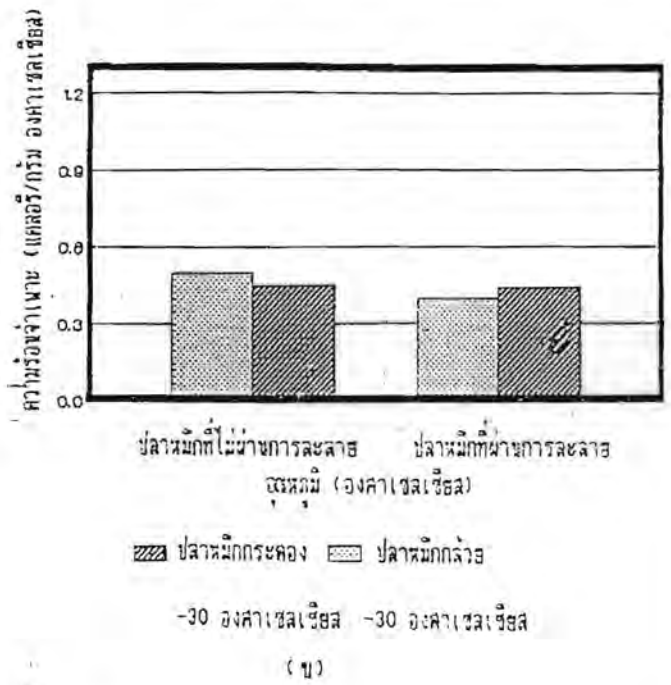
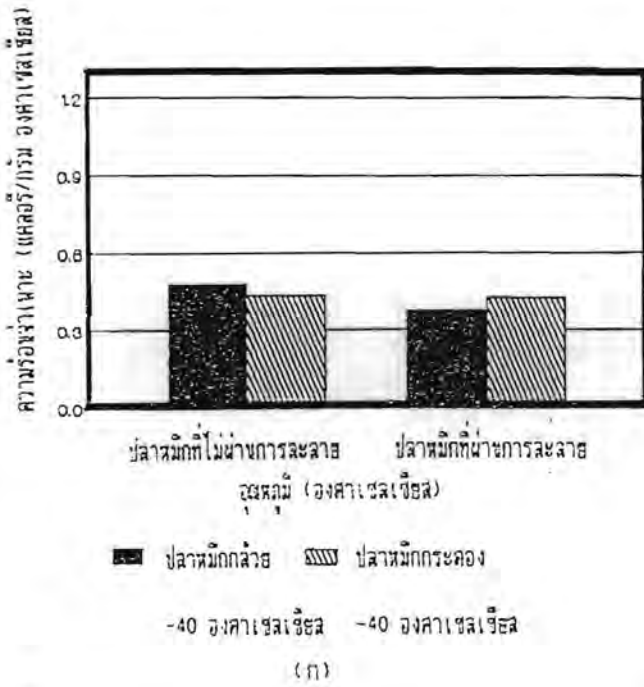
$$C_p = 1.868 - 5.050 \times 10^{-2}P - 1.265 \times 10^{-1}H + 8.979 \times 10^{-2}T + 9.910 \times 10^{-2}PH + 1.402 \times 10^{-3}T^2 \dots\dots\dots(36)$$

เมื่อ P คือ พันธุ์ของปลาหมึกมีค่าเท่ากับ 0 (ปลาหมึกกล้วย) และ 1 (ปลาหมึกกระดอง)

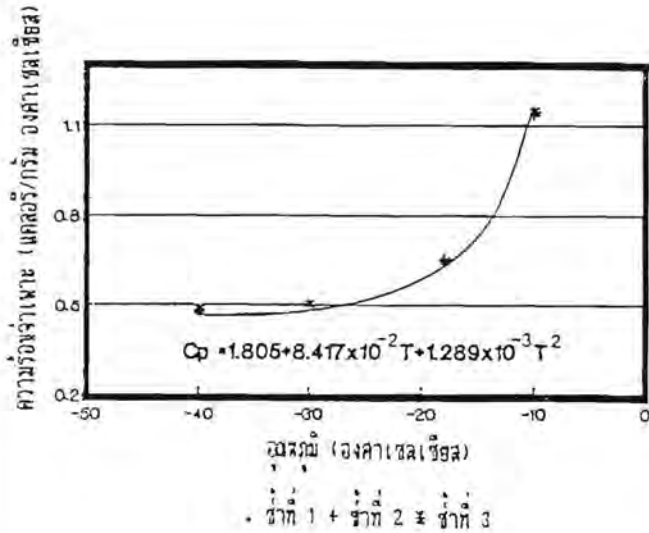
H คือ ภาวะการละลายมีค่าเท่ากับ 0 (ไม่ผ่านการละลาย) และ 1 (ผ่านการละลาย)

T คือ อุณหภูมิ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

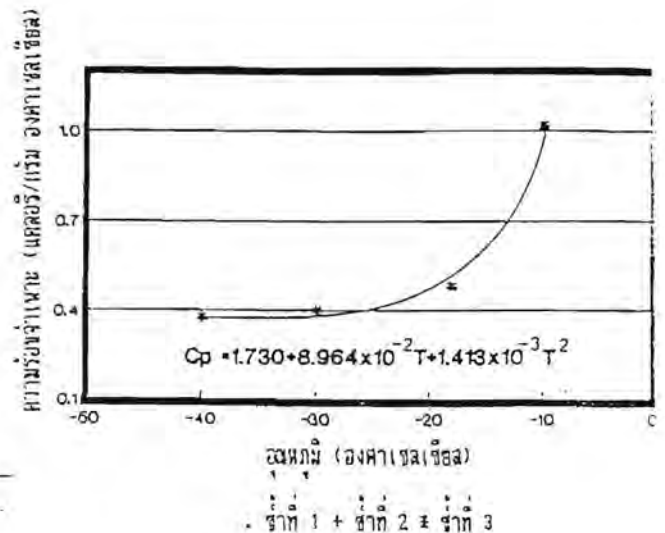
จากสมการ (36) เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 1.110 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองร้อยละ 3.11 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านก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



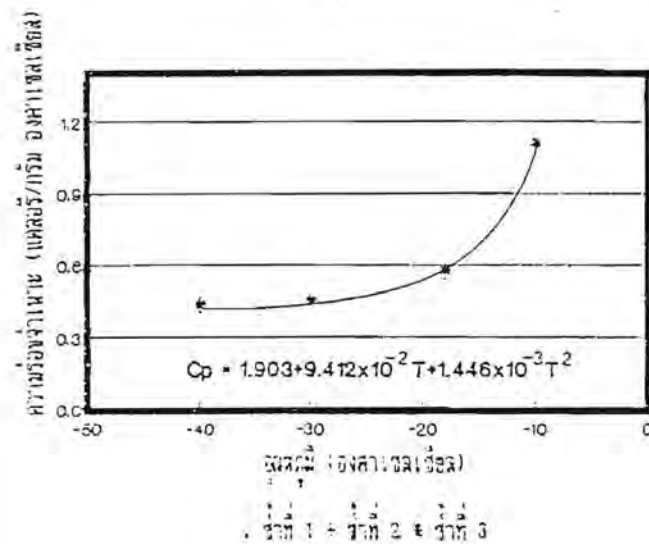
รูปที่ 4.1 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับภาวะการละลายต่อค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึก ในช่วงอุณหภูมิ (ก)-40±1 องศาเซลเซียส, (ข)-30±1 องศาเซลเซียส, (ค)-18±1 องศาเซลเซียส และ (ง)-10±1 องศาเซลเซียส



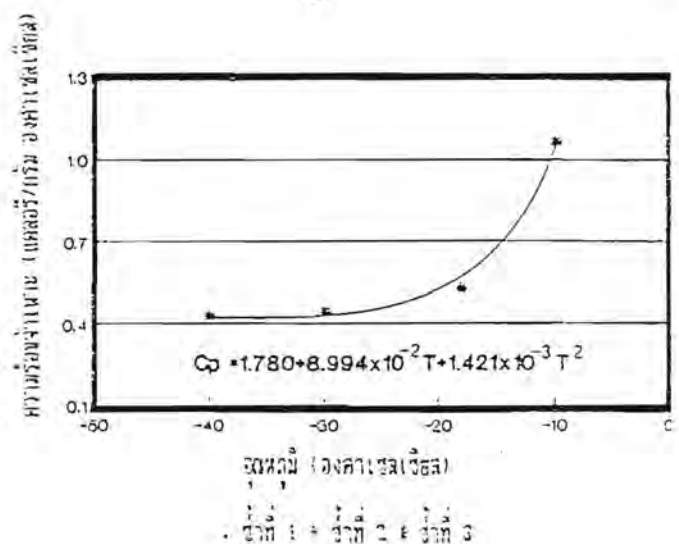
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

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

- ก) พลาสติกกึ่งไม่ผ่านการละลาย ข) พลาสติกกึ่งผ่านการละลาย
- ค) พลาสติกกระจกไม่ผ่านการละลาย ง) พลาสติกกระจกผ่านการละลาย

4.3.2 สภาพหน้าความร้อน

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

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพหน้าความร้อนของปลาหมึก

SOV	df	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 ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพความร้อนของปลาหมึก (ตารางที่ 4.7) พบว่า ๕ อุณหภูมิเดียวกัน ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพความร้อนสูงกว่า ปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายประมาณร้อยละ 2.39 ส่วนปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกระดองมีค่าสภาพความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกล้วยประมาณร้อยละ 6.73 เนื่องจาก ค่าสภาพความร้อนขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีตามสมการ (6) โดยความขึ้นเป็นองค์ประกอบ ที่มีผลต่อค่าสภาพความร้อนสูงสุด (2.440 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน (Mohsenin, 1980)) เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีอื่น และองค์ประกอบหลักของปลาหมึกคือน้ำ ดังนั้น ที่ภาวะการละลายและอุณหภูมิเดียวกัน ปลาหมึกที่มีปริมาณความชื้นมากกว่าจึงมีค่าสภาพความร้อน สูงกว่า ซึ่งให้ผลลักษณะเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัย ของ Lentz (1961) พบว่าในช่วงอุณหภูมิ 4 ถึง 36 องศาเซลเซียส เนื้อวัวซึ่งมีปริมาณ ความชื้นสูงกว่า มีค่าสภาพความร้อนสูงกว่าถึงแม้ว่ามีองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของค่าสภาพความร้อนระหว่างปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลาย มีค่ามากกว่าที่ไม่ผ่านการละลาย (รูปที่ 4.3) ทั้งที่ความแตกต่างของปริมาณความชื้นในปลาหมึก ทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีค่าน้อยกว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลึกน้ำแข็ง ที่เกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็งแบบช้าทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของเนื้อเยื่อ จึงมีผลให้ โครงสร้างของเนื้อเยื่อของปลาหมึกที่ผ่านการละลายแล้วมีลักษณะที่ไม่เหมือนเดิม ซึ่ง Rao และ Rizvi(1989)และ Miller และ Sunderland(1963) ได้กล่าวไว้ว่าค่าสภาพความร้อน นอกจากจะขึ้นกับปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อเยื่ออีกด้วย ดังนั้นการเปรียบเทียบ ค่าสภาพความร้อนของอาหารจากปริมาณความชื้น ควรพิจารณาที่โครงสร้างของเนื้อเยื่อที่เหมือนกัน จึงให้ผลที่เชื่อถือได้ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman และ Druscoll (1991) พบว่า ปลาหมึกกล้วยในส่วนของหนวด(tentacle) และผิวหนังนอก(mantle) ที่มีลักษณะ โครงสร้างของเนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน และปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 78.6 และ 77.4 ตามลำดับ) แต่กลับมีค่าสภาพความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับเนื้อเยื่อปลาหมึกที่เท่ากัน นอกจากนี้

ยังพบว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พันธุและอุณหภูมิเดียวกัน ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rahman และ Driscoll (1991) พบว่า Calamari ในส่วนของผิวชั้นนอก เมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลงเช่นกัน และจากการทดลองยังพบว่าปลาหมึกกล้วย เมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลง ประมาณร้อยละ 23.03 (เมื่อเปรียบเทียบกับค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย) และความชื้นลดลงร้อยละ 4.15 โดยที่ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ลดลงนั้นคิดเป็น 5 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง ส่วนปลาหมึกกระดอง เมื่อนำมาผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนลดลงประมาณร้อยละ 3.33 และปริมาณความชื้นลดลงร้อยละ 1.61 ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนลดลงเพียง 2 เท่าของปริมาณความชื้นที่ลดลง จากการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกทั้งสองชนิดตามปริมาณความชื้นที่ให้ผลแตกต่างกัน เป็นการสนับสนุนเหตุผลที่ว่าสภาพนำความร้อนขึ้นกับปริมาณความชื้นและโครงสร้างของเนื้อเยื่อด้วย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยสภาพหน้าความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

พันธุ์ปลาหมึก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยสภาพหน้าความร้อน(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

เมื่อศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพหน้าความร้อนของปลาหมึก(ตารางที่ 4.6) พบว่าสภาพหน้าความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองที่ภาวะการละลายเดียวกัน ที่อุณหภูมิ -40±1, -30±1, -18±1 และ -10±1 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาว่า (รูปที่ 4.4) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะในช่วงของการแช่แข็งจะเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของน้ำที่เป็นน้ำแข็ง ซึ่งค่าสภาพหน้าความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นจะเห็นว่าในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำบางส่วนยังไม่เป็นน้ำแข็งจึงมีสภาพหน้าความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่น้ำเป็นน้ำแข็งเกือบหมดแล้ว ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pham และ Willix(1989)

ซึ่งทำการทดลองเกี่ยวกับเนื้อลูกแกะที่มีความชื้นประมาณร้อยละ 71-75 ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -40 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ในการวิเคราะห์ด้วย regression เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อนของ ปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงของการแช่แข็ง พบว่า สมการที่ได้อยู่ในรูปของ $k = A+BT+CT^2$ ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์เท่านั้น โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.7

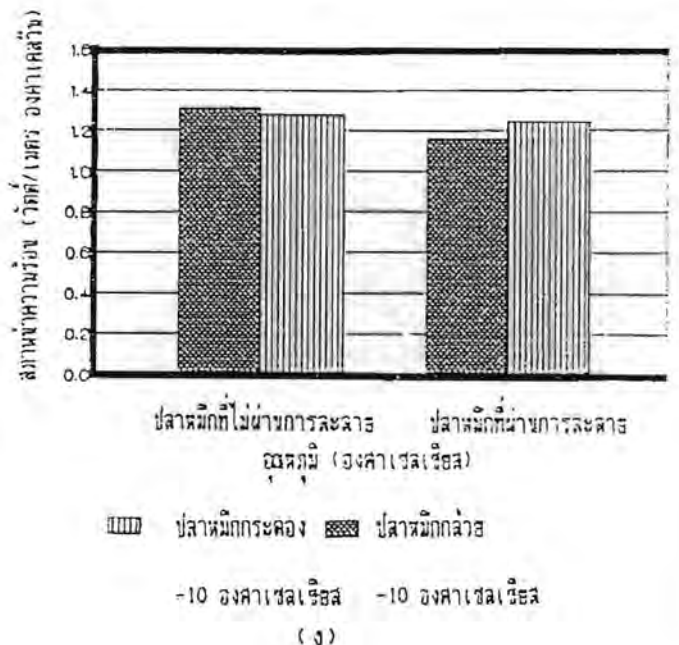
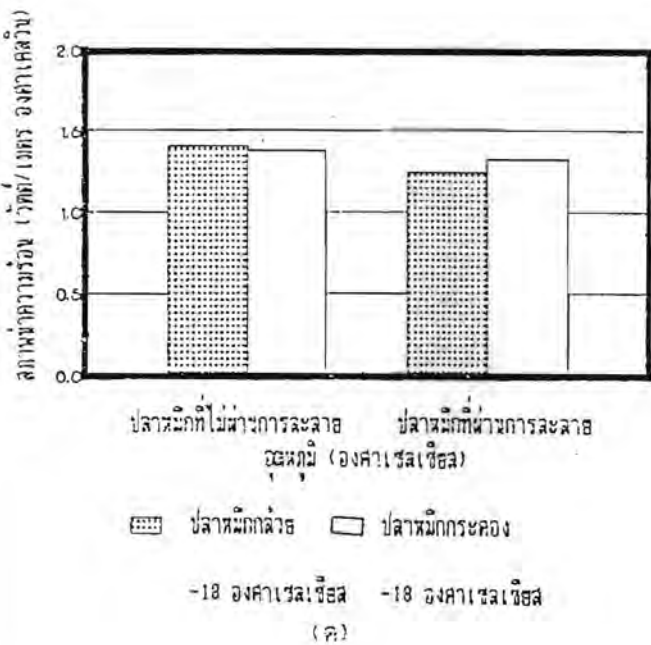
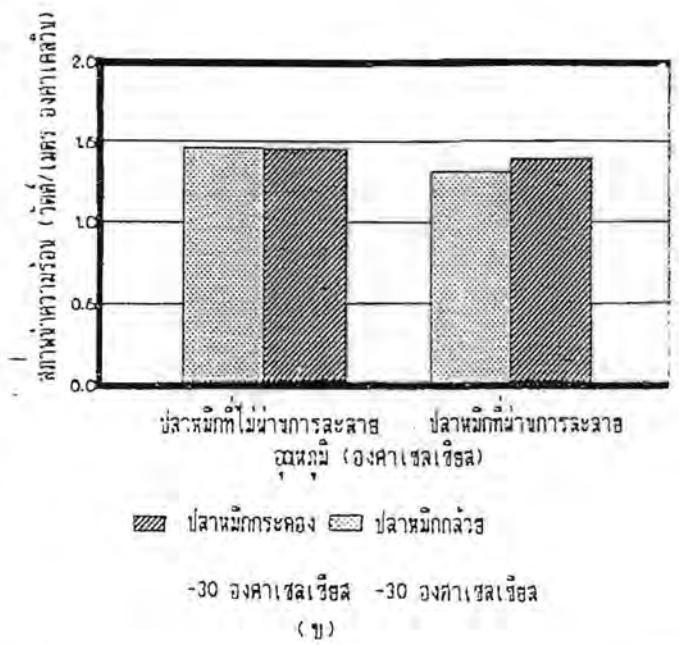
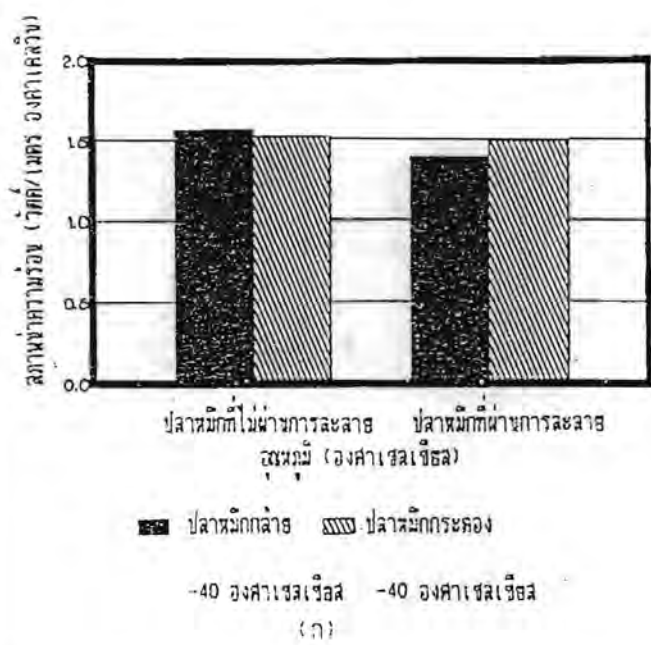
ตารางที่ 4.7 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและ ปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

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

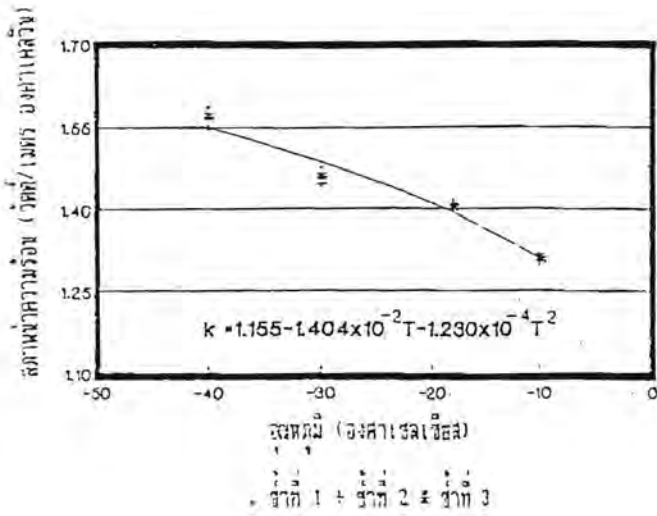
เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกับพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิโดยใช้ multiple regression พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดังสมการ (37) โดยมีค่า $R^2 = 0.987$

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

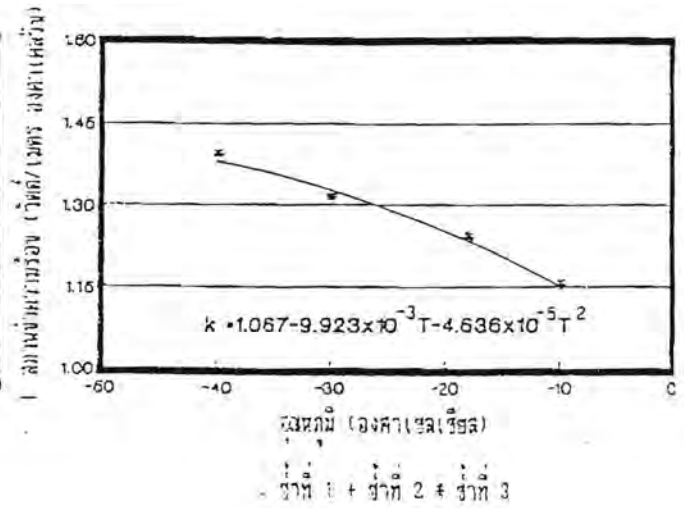
เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -40 ในสมการ (37) พบว่ามีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 1.552 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองคือ 1.567 วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส ร้อยละ 0.95 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



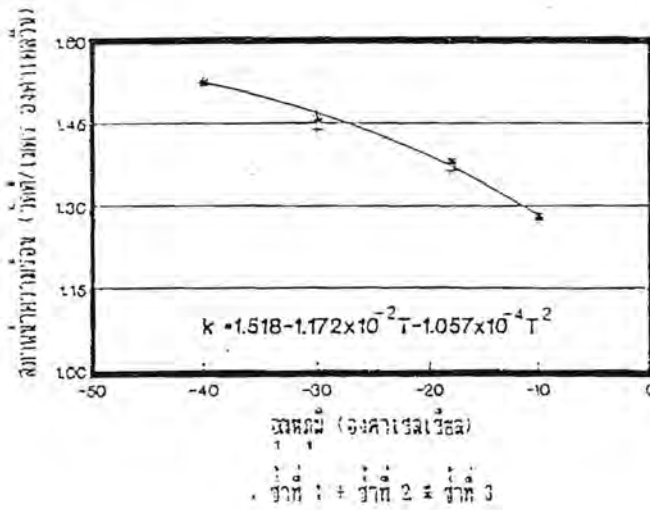
รูปที่ 4.3 ผลของอิทธิพลร่วมของพื้นที่กับภาวะการละลายต่อค่าสภาพน้ำความร้อนของพลาสติกาน ช่วงอุณหภูมิ (ก) -40 ± 1 องศาเซลเซียส, (ข) -30 ± 1 องศาเซลเซียส, (ค) -18 ± 1 องศาเซลเซียส และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส



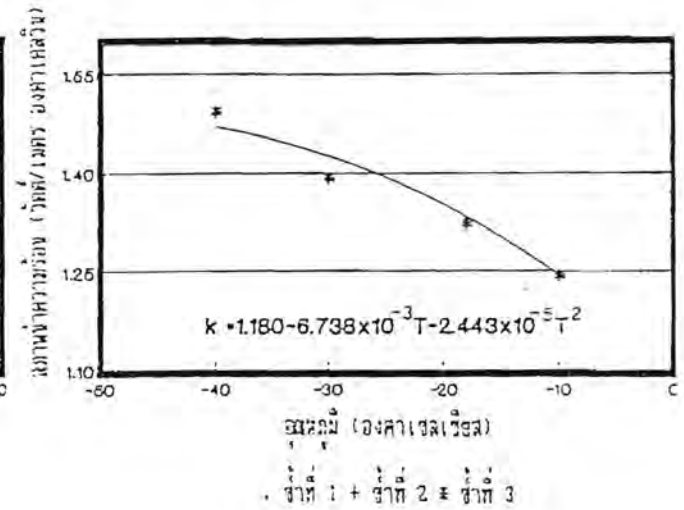
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

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

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

4.3.3 สภาพแพร่ความร้อน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิ ต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ กับภาวะการละลาย อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับอุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างภาวะการละลายกับอุณหภูมิ พันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ มีผลต่อสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้ผลดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก

SOV	df	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 ที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก พบว่าในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง -40 องศาเซลเซียส ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายถึงร้อยละ 4.49-19.49 ส่วนปลาหมึกที่ผ่านการละลายปลาหมึกกล้วยกลับมีแนวโน้มของค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกระดองร้อยละ 1.67-2.49 โดยที่ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (รูปที่ 4.5) ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าสภาพแพร่ความร้อน ขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น ตามสมการ (18) ดังเช่นค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย พบว่าปลาหมึกกล้วยมีค่าต่ำกว่าปลาหมึกกระดอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความจุเพาะของปลาหมึกกล้วยมีค่าสูงในขณะที่ค่าสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นมีค่าเกือบเท่ากับปลาหมึกกระดอง ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยต่ำกว่าปลาหมึกกระดอง นอกจากนี้ค่าสภาพแพร่ความร้อนยังขึ้นกับโครงสร้างทางกายภาพด้วย (Mohsenin, 1980) ซึ่งขนาดรูปร่างของเนื้อเยื่อและขนาดของเส้นใยของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองก็แตกต่างกัน (พัชรินทร์, 2529 และ พาณิชย์, 2534) เป็นผลให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าแตกต่างกัน และค่าสภาพนำความร้อนที่แตกต่างกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงนั้นเป็นเพราะค่าสภาพแพร่ความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำมีผลให้ในช่วงต้นของการแช่แข็งที่น้ำเป็นน้ำแข็งยังไม่หมดจึงทำให้ความแตกต่างของค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงต้นมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ -10 ถึง -40 องศาเซลเซียส ปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายมีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.70-20.77 เช่นเดียวกับปลาหมึกกระดองที่มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.62-4.92 เมื่อผ่านการละลายทั้งที่ปริมาณความชื้นลดลง อาจเนื่องจากเมื่อนำปลาหมึกมาผ่านการละลาย นอกจากมีน้ำออกมาจากเนื้อเยื่อแล้วยังมีอากาศที่แทรกตัวอยู่ในน้ำภายในเนื้อเยื่อซึมออกมาด้วย (Lawrie, 1981) ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของอากาศมีค่าต่ำ (1.67×10^{-9} เมตร²/วินาที ที่ 30 องศาเซลเซียส (Rao และ Rizvi, 1986)) ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ผ่านการละลายแล้วมีค่าสูงขึ้น

นอกจากนี้ผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่แข็งแบบช้าทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนด้วย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนจากปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิต่างกัน จะต้องมีการสร้างของเนื้อเยื่อที่เหมือนกันด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าความแตกต่างของค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง (รูปที่ 4.6) เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อน

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

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

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

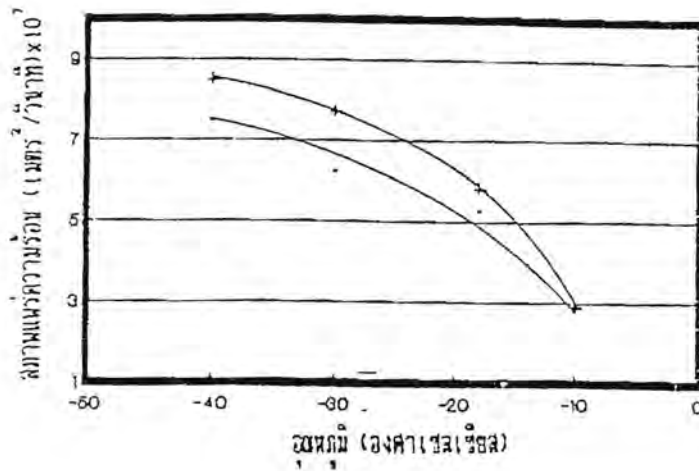
ตารางที่ 4.10 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

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

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

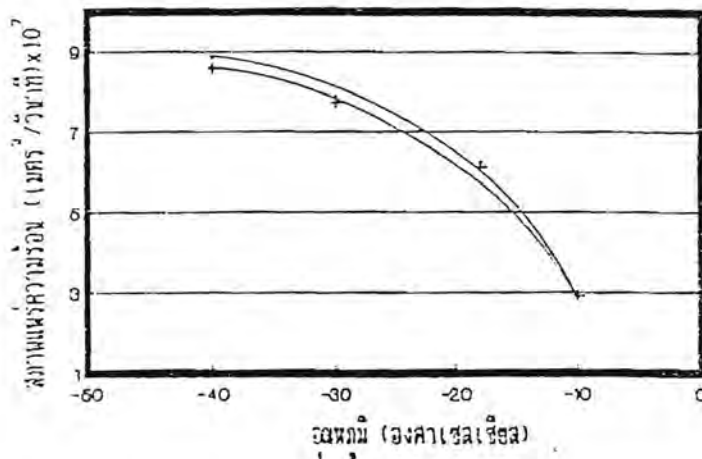
$$\alpha = [-1.169 - 8.804 \times 10^{-2}P - 6.005 \times 10^{-2}H - 4.528 \times 10^{-1}T - 2.095 \times 10^{-1}PH + 3.644 \times 10^{-2}PT - 4.369 \times 10^{-2}HT + 4.595 \times 10^{-2}PHT - 6.160 \times 10^{-3}T^2] \times 10^{-7} \dots \dots \dots (38)$$

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)



• ปลายหมักกล้ว + ปลายหมักกระดอง

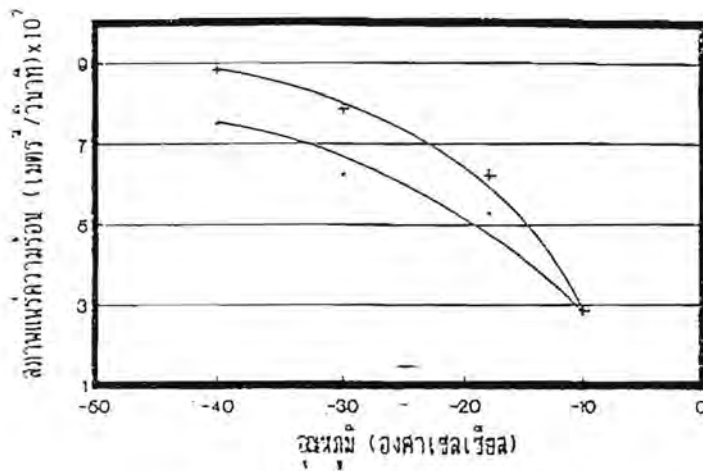
(ก)



• ปลายหมักกล้ว + ปลายหมักกระดอง

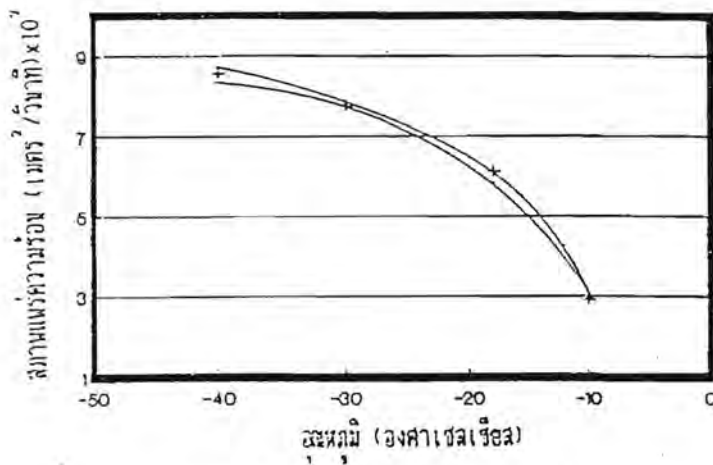
(ข)

รูปที่ 4.5 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแนวความร้อนของปลายหมักทั้งที่ (ก) ไม่ผ่านการละลาย (ข) และที่ผ่านการละลาย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



• ปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย + ปลาหมึกที่ผ่านการละลาย

(ก)



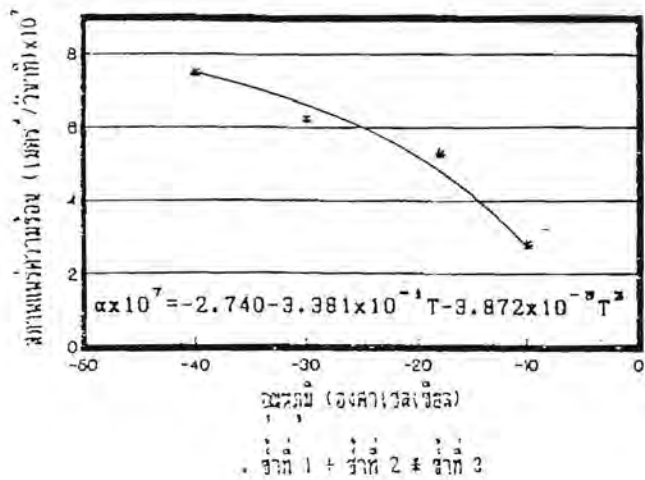
• ปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย + ปลาหมึกที่ผ่านการละลาย

(ข)

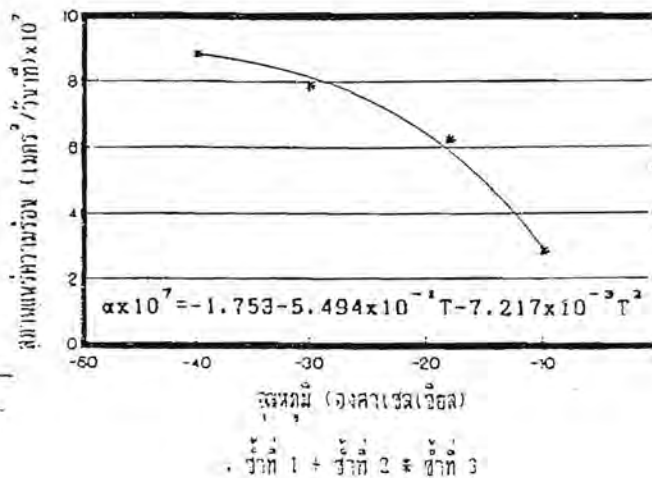
รูปที่ 4.6 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์ ภาวะการละลาย และอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่

ความเข้มข้นของ (ก) ปลาหมึกกล้วย และ (ข) ปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ

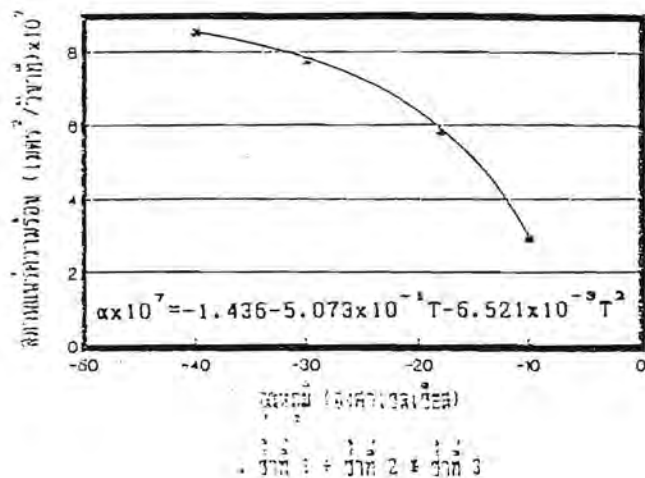
ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-40 ถึง -10 องศาเซลเซียส)



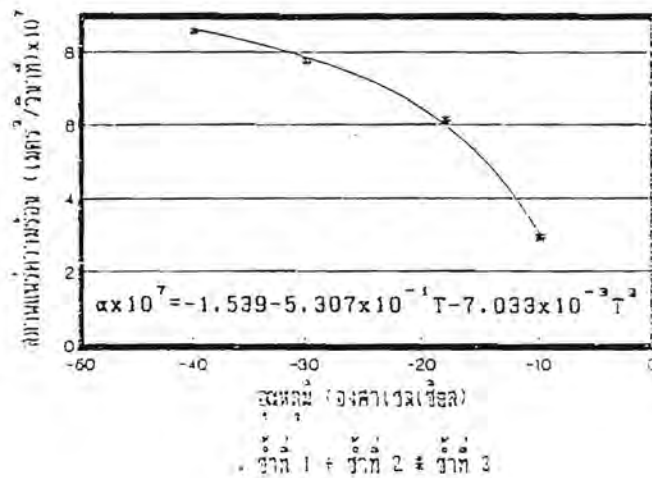
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

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

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

ค่าสภาพแพร่ความร้อนนอกจากได้จากการทดลอง ยังสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพนำความร้อน (สมการ (18)) โดยใช้ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากสมการ (32) และสมการ (31) ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นได้จากการทดลอง ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.11 ซึ่งพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการคำนวณมีค่าแตกต่างจากการทดลองร้อยละ $-12.24 - 11.15$ ทั้งนี้ อาจเนื่องจากค่าความหนาแน่นที่หาจากการทดลองเป็น apparent density ไม่ใช่ความหนาแน่นที่แท้จริงจึงทำให้ผลของการทดลองแตกต่างจากผลของการคำนวณ ดังนั้นสามารถนำสมการนี้มาประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนของพลาสติกในช่วงแช่แข็งที่ให้ค่าค่อนข้างเชื่อถือได้

ตารางที่ 4.11 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของพลาสติกถ้วยและพลาสติกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (18)

พันธุ์ พลาสติก	ภาวะการละลาย	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน(เมตร ² /วินาที) $\times 10^7$ ที่อุณหภูมิ			
		-40 °C	-30 °C	-18 °C	-10 °C
ถ้วย	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

4.3 ผลการทดลองและวิจารณ์สมบัติทางความร้อนของกึ่ง

4.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของกึ่ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกุกลาดาและกึ่งแซปวีย ที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักในกึ่งคือ น้ำ ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของกึ่งกุกลาดา

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

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของกุ้งแช่บ๊วย

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	78.21 ± 0.45
โปรตีน	14.61 ± 0.07
ไขมัน	1.10 ± 0.05
เส้นใย	0
เถ้า	1.12 ± 0.04
คาร์โบไฮเดรต	4.97

4.3.2 ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อสมบัติทางความร้อนของกุ้ง

ค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลองในช่วงอุณหภูมิที่กำหนด ดังตัวอย่างการคำนวณในการภาคผนวก ง ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก จ วิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ ผลของวิธีการแช่แข็งและผลเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนเหล่านี้ แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิโดยใช้ multiple regression analysis

4.3.2.1 ความร้อนจำเพาะ

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลในตารางที่ 4. พบว่า อุณหภูมิพื้นฐ่และอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและพื้นฐ่ที่มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพื้นฐ่ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง

SOV	df	SS	MS	F
พื้นฐ่ (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 ($p < 0.05$)

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของ กุ้งจากรายที่ 4.15 พบว่า ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส กุ้งแช่ปวยที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freezing มีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่ากุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing (ประมาณร้อยละ 5.64) และกุ้งแช่ปวยที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่ากุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing (ประมาณร้อยละ 5.50) ดังรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะความชื้นมีอิทธิพลต่อค่าความร้อนจำเพาะมากที่สุด พบว่าค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าเท่ากับ 0.50 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส (Fleming, 1969) และกุ้งซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 76-78 ดังนั้นความชื้นจึงมีอิทธิพลต่อค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าองค์ประกอบทางเคมีอื่น จึงทำให้กุ้งแช่ปวยซึ่งมีค่าความชื้นสูงกว่ากุ้งกุลาดำ จึงมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lovy (1979) ซึ่งทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อวัว และพบว่าเนื้อวัวที่มีปริมาณความชื้นสูงกว่าจะมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่า ถึงแม้ว่าจะมีองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -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	0.661±0.014	1.146±0.002
	dry-ice freezing	0.450±0.015	0.654±0.006	1.145±0.002
แช่ปวย	air-blast freezing	0.519±0.004	0.687±0.002	1.194±0.012
	dry-ice freezing	0.516±0.007	0.657±0.011	1.189±0.008

เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง พบว่า กุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งที่ใช้วิธีการแช่แข็งแบบเดียวกันจะให้ค่าความร้อนจำเพาะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Long (1955) ซึ่งทำการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อปลาน้ำจืดในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -40 ถึง -6 องศาเซลเซียส พบว่าความร้อนจำเพาะมีแนวโน้มลดลงแบบพาราโบลาหงายเมื่ออุณหภูมิลดลง การหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และ วิธี dry-ice freezing ด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้มีอยู่ในรูป $C_p = A+BT+CT^2$ โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยแช่แข็ง
ด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ
-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination(R^2)
กุลาดำ	air-blast freezing	$C_p=2.147+1.220 \times 10^{-1}T+2.192 \times 10^{-3}T^2$	0.996
	dry-ice freezing	$C_p=2.158+1.234 \times 10^{-1}T+2.216 \times 10^{-3}T^2$	0.999
แช่บ๊วย	air-blast freezing	$C_p=2.276+1.331 \times 10^{-1}T+2.488 \times 10^{-3}T^2$	0.999
	dry-ice freezing	$C_p=2.292+1.359 \times 10^{-1}T+2.557 \times 10^{-3}T^2$	0.999

จากการศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิที่มีต่อค่า
ความร้อนจำเพาะของกุ้งโดยใช้ multiregression หาสมการความสัมพันธ์ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด
เป็นดังสมการโดยมีค่า $R^2 = 0.998$

$$C_p = 2.211+2.26 \times 10^{-2}p-6.890 \times 10^{-3}m+1.292 \times 10^{-1}T-1.130 \times 10^{-3}pT \\ +2.363 \times 10^{-3}T^2 \quad \dots \dots \dots (39)$$

เมื่อ p คือ พันธุ์ของกุ้งสำหรับกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยมีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

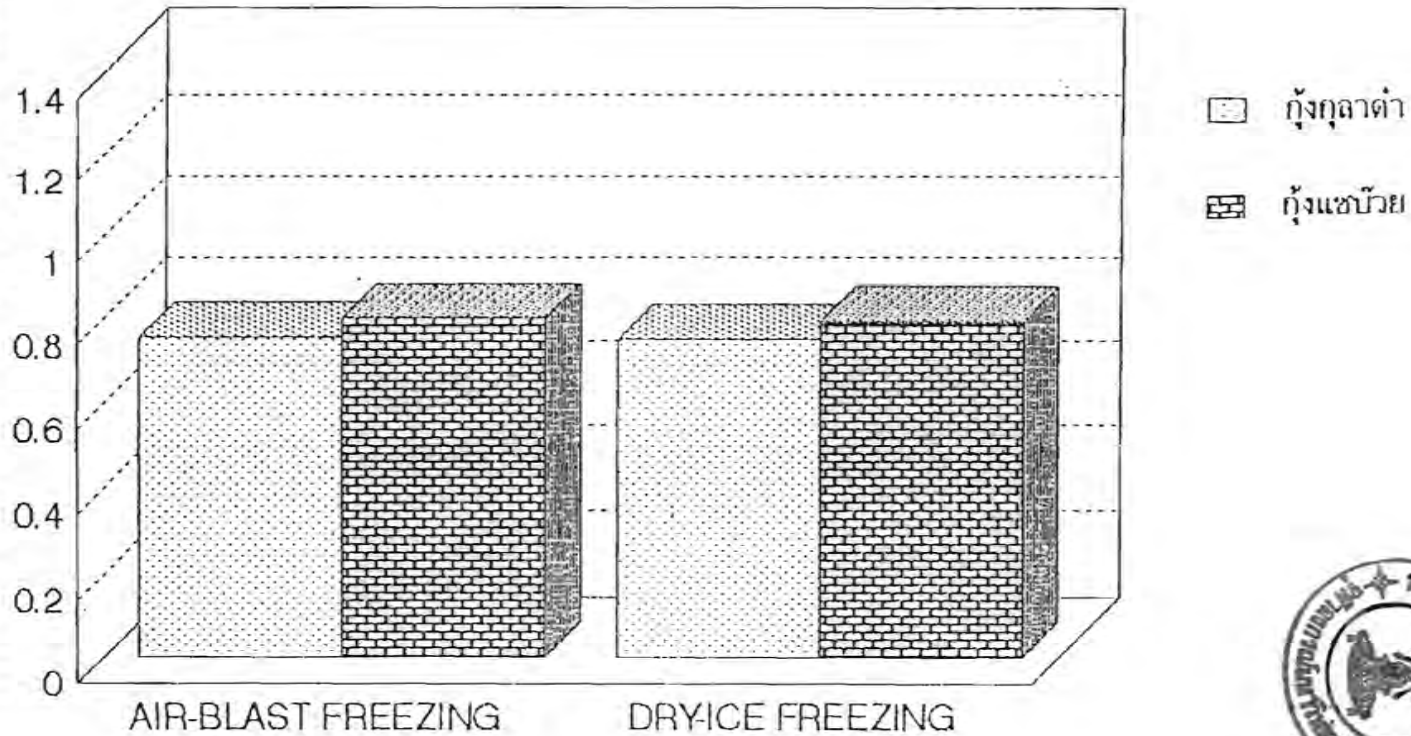
m คือ วิธีการแช่แข็งสำหรับวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing

มีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

T คือ อุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

จากสมการที่ 39 เมื่อแทนค่าต่าง ๆ เพื่อหาค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำแช่แข็งที่แช่แข็งด้วย วิธี air-blast freeaing ที่อุณหภูมิต่ำ -30 องศาเซลเซียส ได้เท่ากับ 0.462 ซึ่งต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองร้อยละ 0.43 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และวิธี dry-ice freezing ที่อุณหภูมิต่ำ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

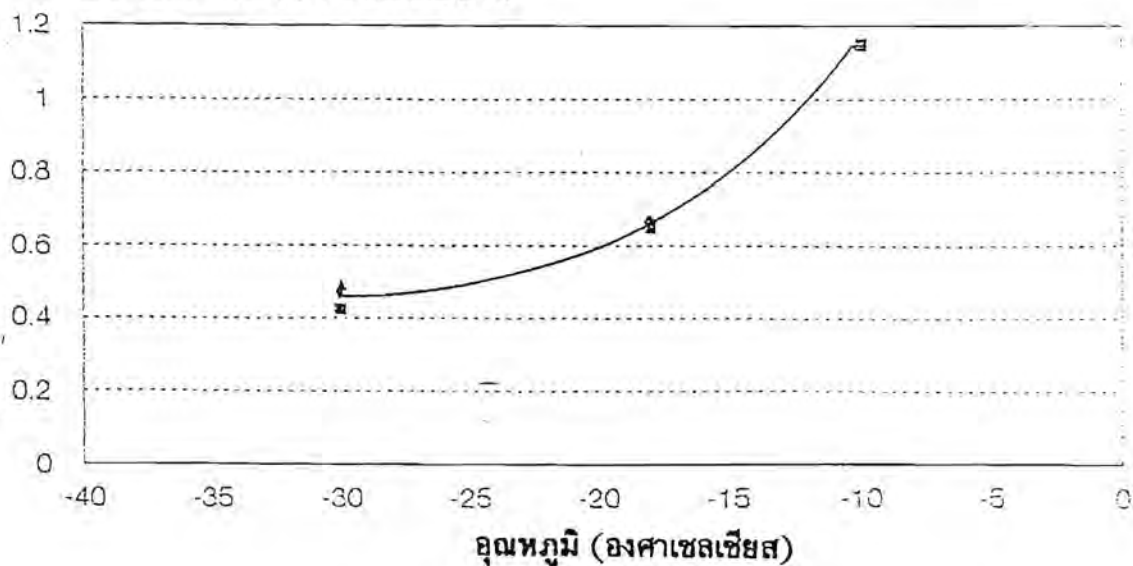
ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.8 ผลของอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับวิธีการแช่แข็งต่อค่าความร้อนจำเพาะของกุ้ง
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส

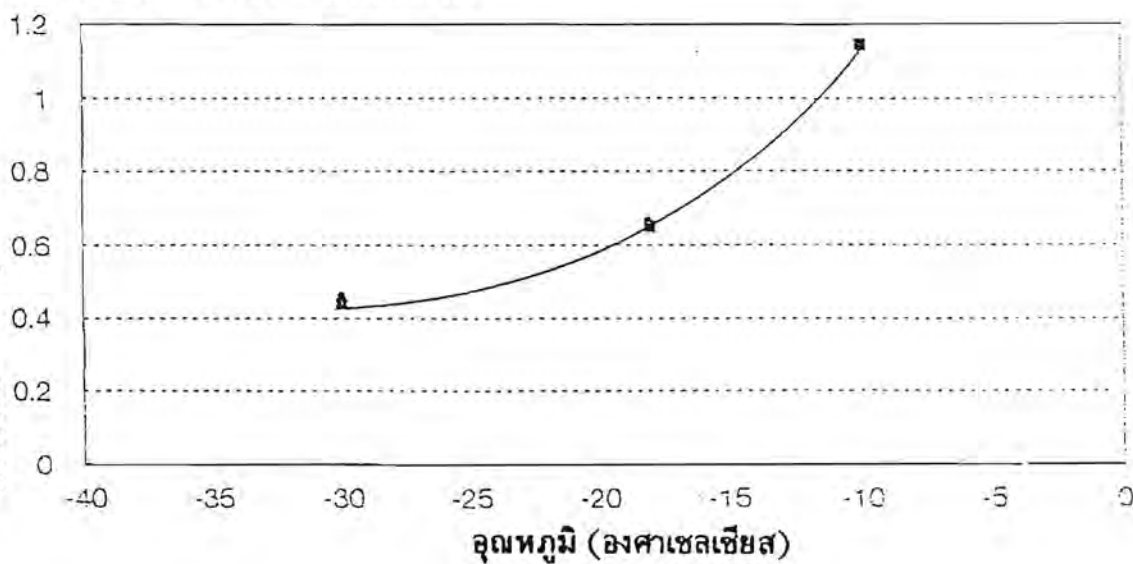
ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)

BY AIR-BLAST FREEZING



ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)

BY DRY-ICE FREEZING

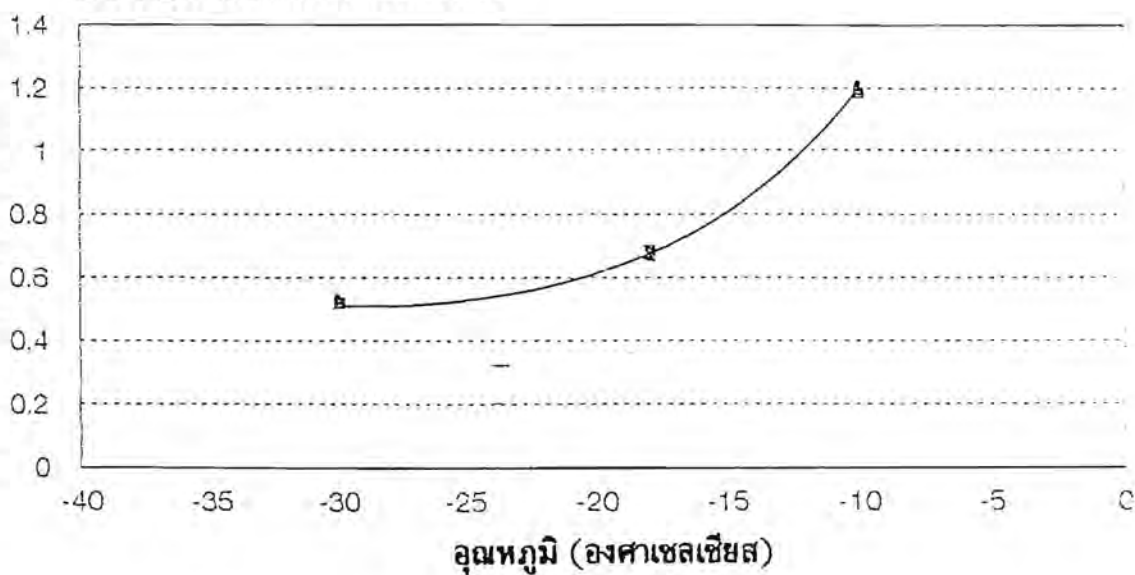


● ซ้ำที่ 1 △ ซ้ำที่ 2 □ ซ้ำที่ 3

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

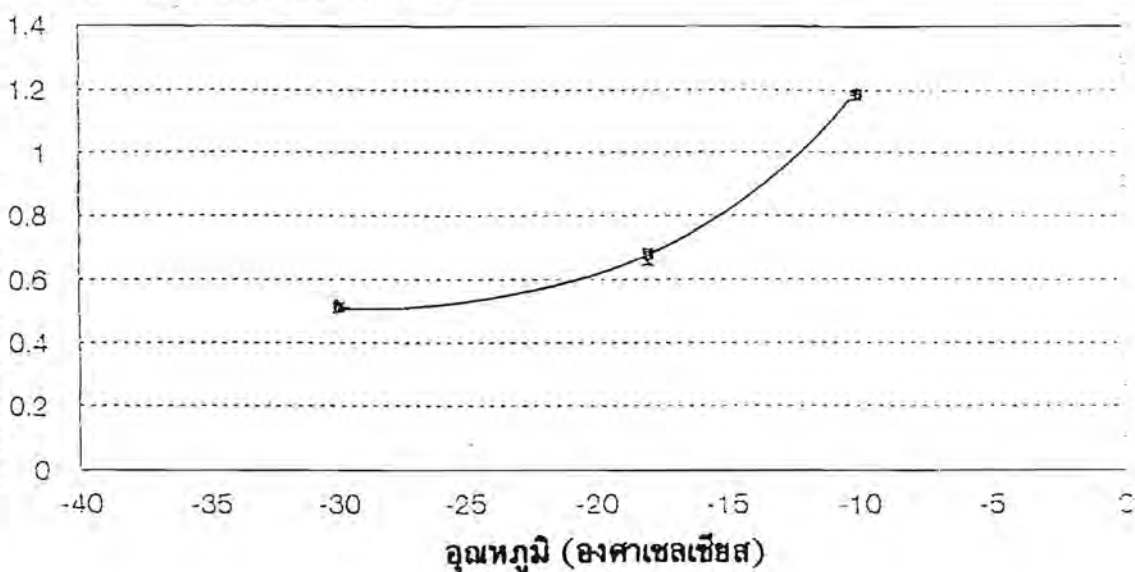
ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)

BY AIR-BLAST FREEZING



ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)

BY DRY-ICE FREEZING



● ซ้ำที่ 1 △ ซ้ำที่ 2 □ ซ้ำที่ 3

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่บ๊วย

4.3.2.2 สภาพหน้าความร้อน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลพบว่า ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิต่อค่าสภาพหน้าความร้อนของกุ้งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าอิทธิพลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิจึงมีผลต่อค่าสภาพหน้าความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้ผลดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพหน้าความร้อนของกุ้ง

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}	

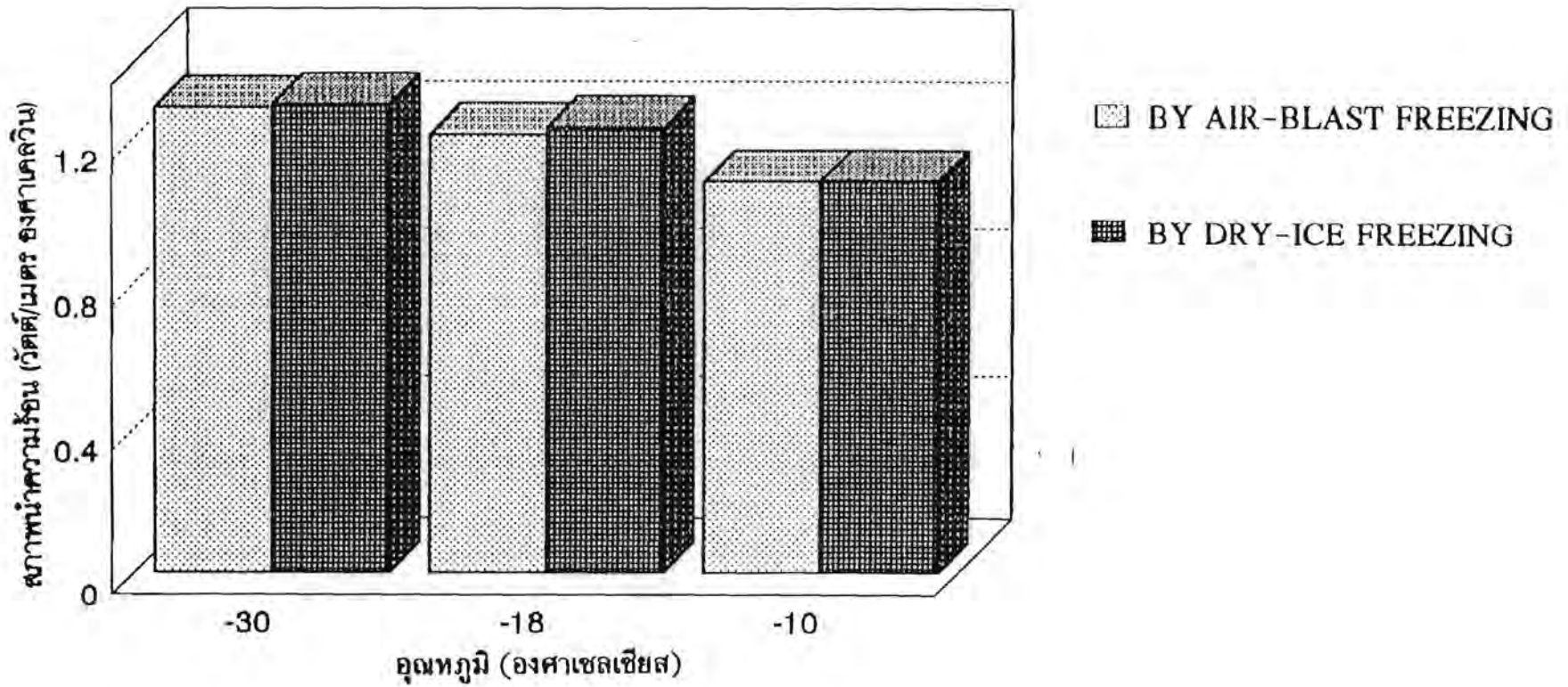
* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อนำค่าเฉลี่ยสภาพความร้อนของกุ้ง ตารางที่ 4.18

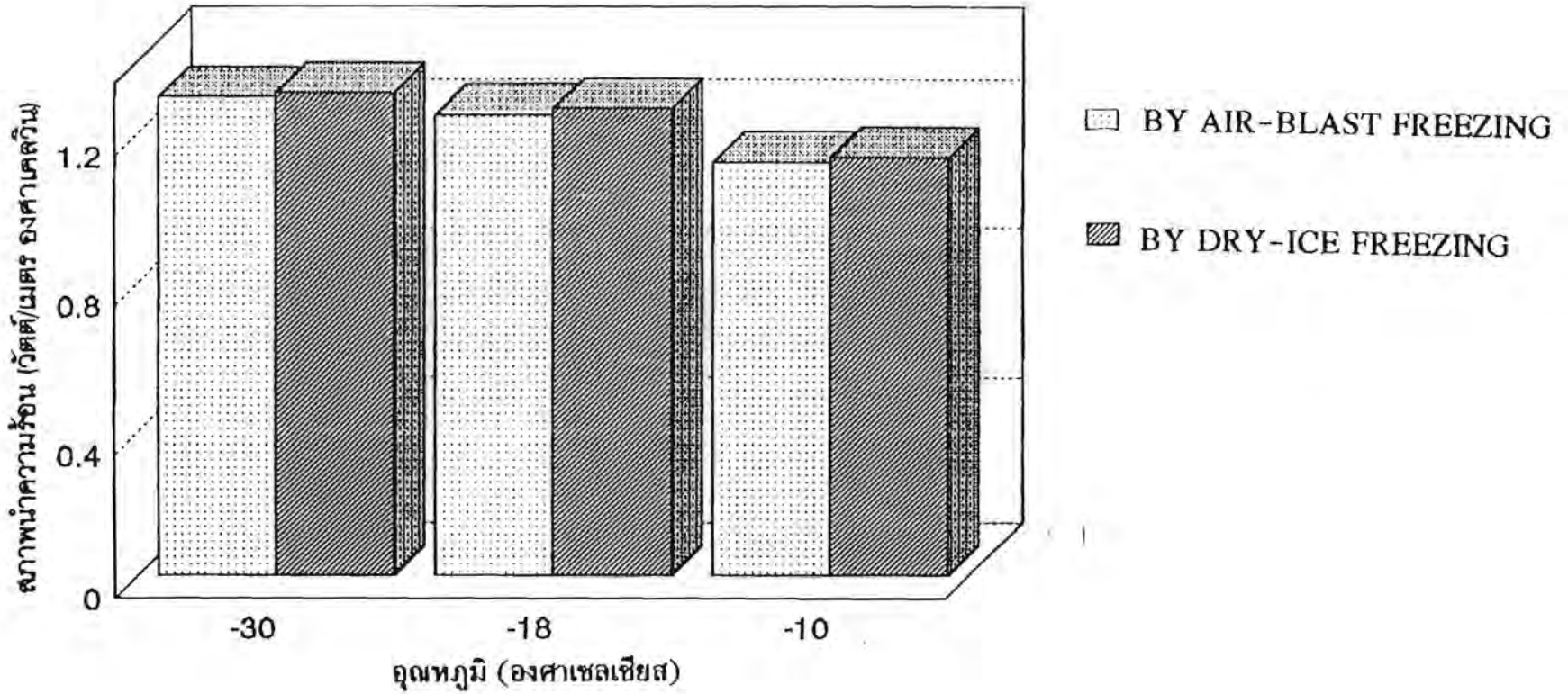
มาเปรียบเทียบกันจะพบว่า กุ้งแช่ปวยจะมีค่าสภาพความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำประมาณร้อยละ 2.9 ทั้งนี้เนื่องมาจากกุ้งแช่ปวยมีปริมาณความชื้นมากกว่ากุ้งกุลาดำ ซึ่งค่าสภาพความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และความชื้นเป็นองค์ประกอบที่มากที่สุด ดังนั้นจึงมีอิทธิพลมากที่สุดเมื่อเทียบกับองค์ประกอบทางเคมีค่าอื่น และเมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการแช่แข็งจะพบว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพความร้อนมากกว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing ประมาณร้อยละ 0.90 (รูปที่ 4.11 และ 4.12) ทั้งนี้คาดว่าเนื่องมาจากวิธีการแช่แข็งที่แตกต่างกันทำให้โครงสร้างภายในเนื้อกุ้งแตกต่างกัน จึงทำให้ค่าสภาพความร้อนของกุ้งที่ได้แตกต่างกันไปด้วย ซึ่ง Rao และ Rizvi (1989) ได้กล่าวไว้ว่าค่าสภาพความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเนื้อเยื่ออีกด้วย

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยสภาพความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	ค่าเฉลี่ยสภาพความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน) ในช่วงอุณหภูมิ		
		-30±1 °C	-18±1 °C	-10±1 °C
กุลาดำ	air-blast freezing	1.278±0.010	1.207±0.013	1.080±0.025
	dry-ice freezing	1.284±0.007	1.224±0.009	1.081±0.018
แช่ปวย	air-blast freezing	1.298±0.007	1.250±0.007	1.117±0.002
	dry-ice freezing	1.310±0.003	1.266±0.003	1.131±0.013



รูปที่ 4.11 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนของกึ่งกุลาตำในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพนำความร้อนของกึ่งแซนไวยในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส

เมื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งพบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยแช่แข็ง ที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ที่อุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง (รูปที่ 4.13 และ 4.14) ซึ่งคาดว่า เป็นผลเนื่องมาจากสัดส่วนปริมาณน้ำที่เป็นน้ำแข็งแตกต่างกัน กล่าวคือค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งจะมีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนของน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นในช่วงแรก ๆ ของการแช่แข็งปริมาณน้ำในเนื้อกุ้งยังเป็นน้ำแข็งไม่หมด จึงทำให้มีค่าสภาพนำความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่ปริมาณน้ำในเนื้อกุ้งเป็นน้ำแข็งเกือบหมดแล้ว ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pham และ Willix (1989) ซึ่งได้ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -40 องศาเซลเซียส โดยวัดค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อลูกแกะที่ความชื้นประมาณร้อยละ 71 ถึง 75 พบว่าค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิลดลง จากผลการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูปของ $k=A+BT+T^2$ โดยมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ สมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยแช่แข็ง ด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination (R^2)
กุลาดำ	air-blast freezing	$k=0.834-2.962\times 10^{-2}T-4.900\times 10^{-4}T^2$	0.971
	dry-ice freezing	$k=0.787-3.584\times 10^{-2}T-6.400\times 10^{-4}T^2$	0.986
แช่บ๊วย	air-blast freezing	$k=0.837-3.434\times 10^{-2}T-6.300\times 10^{-4}T^2$	0.996
	dry-ice freezing	$k=0.842-3.547\times 10^{-2}T-6.600\times 10^{-4}T^2$	0.993

จากการศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพ
 นาร้อนของกุ้งโดยใช้ multiregression ทาสสมการความสัมพันธ์ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดัง
 สมการโดยมีค่า $R^2 = 0.982$

$$k = 0.801 + 3.644 \times 10^{-2}P + 1.089 \times 10^{-2}M - 3.832 \times 10^{-2}T - 6.100 \times 10^{-4}T^2$$

.....(40)

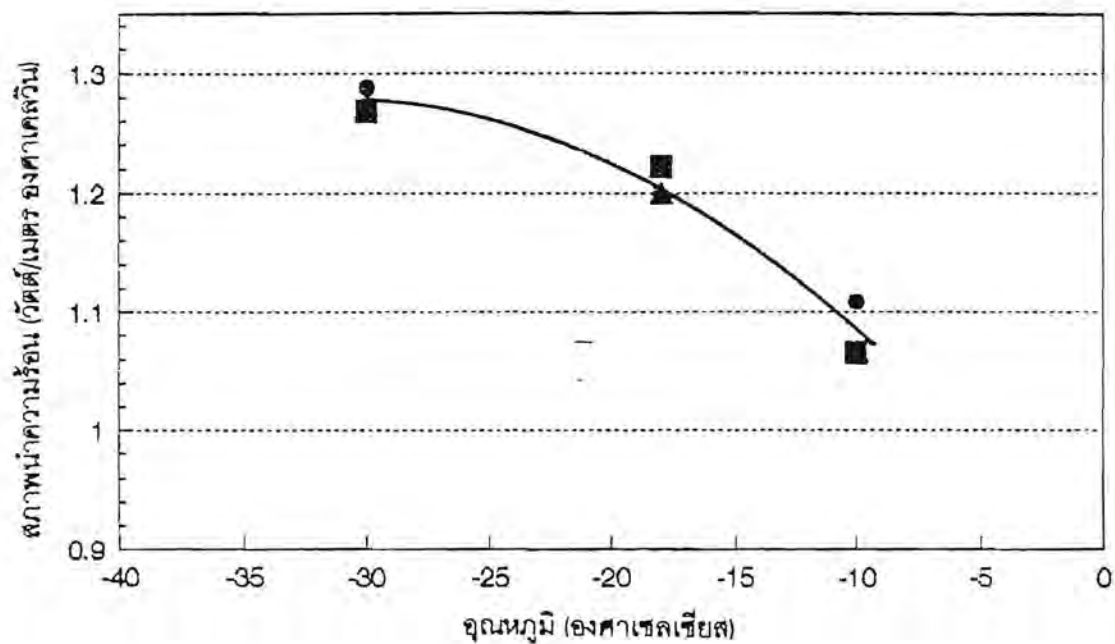
เมื่อ P คือ พันธุ์ของกุ้งสำหรับกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยมีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

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

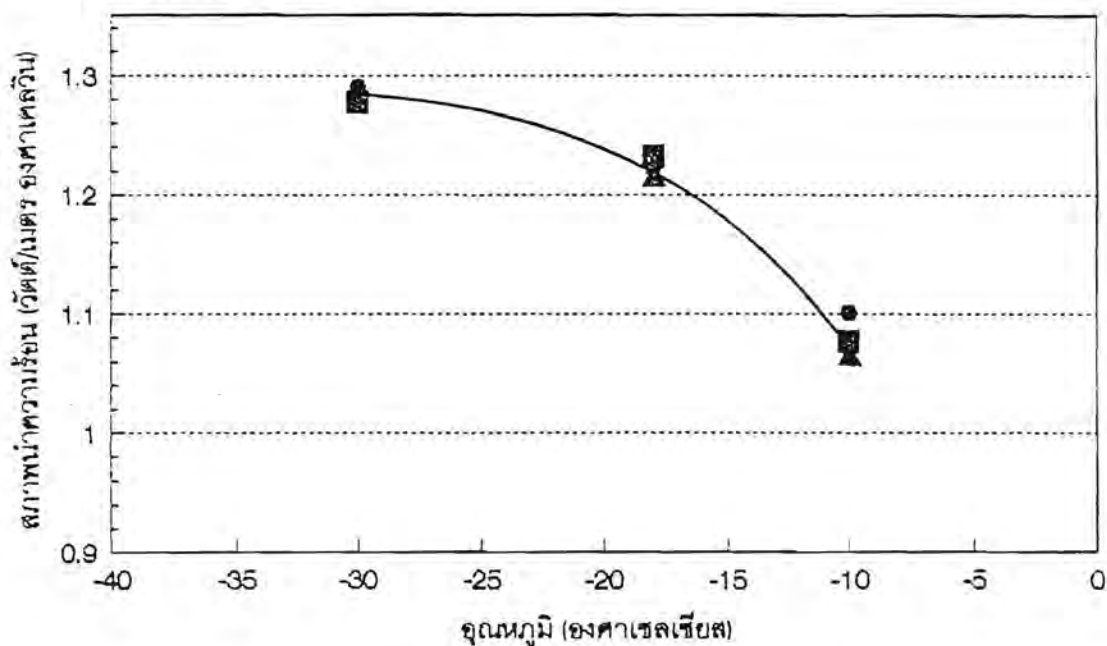
T คือ อุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

จากสมการ (40) เมื่อแทนค่าเพื่อหาค่าสภาพนาร้อนของกุ้งกุลาดำแช่แข็งที่แช่แข็ง
 ด้วยวิธี air-blast freezing ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสภาพนาร้อนเท่ากับ
 1.232 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ซึ่งต่างจากค่าสภาพนาร้อนของกุ้งกุลาดำแช่แข็งที่สภาวะเดียว
 กันที่ได้จากการทดลองร้อยละ 4 ดังนั้นสมการนี้จึงให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าสภาพนาร้อน
 ของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่บ๊วยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice
 freezing ในช่วงอุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

BY AIR-BLAST FREEZING

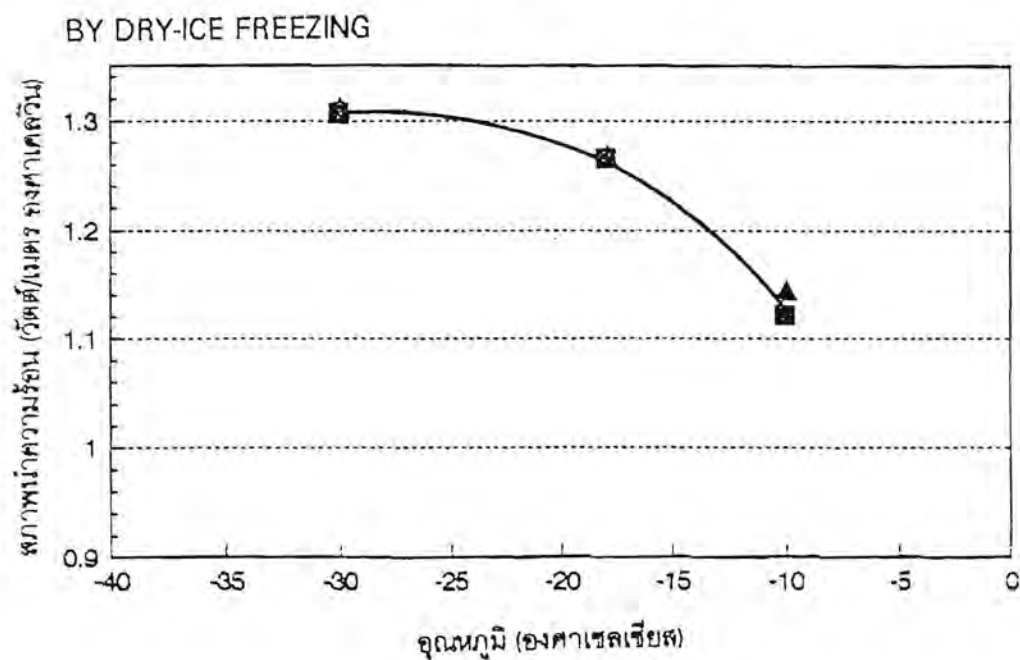
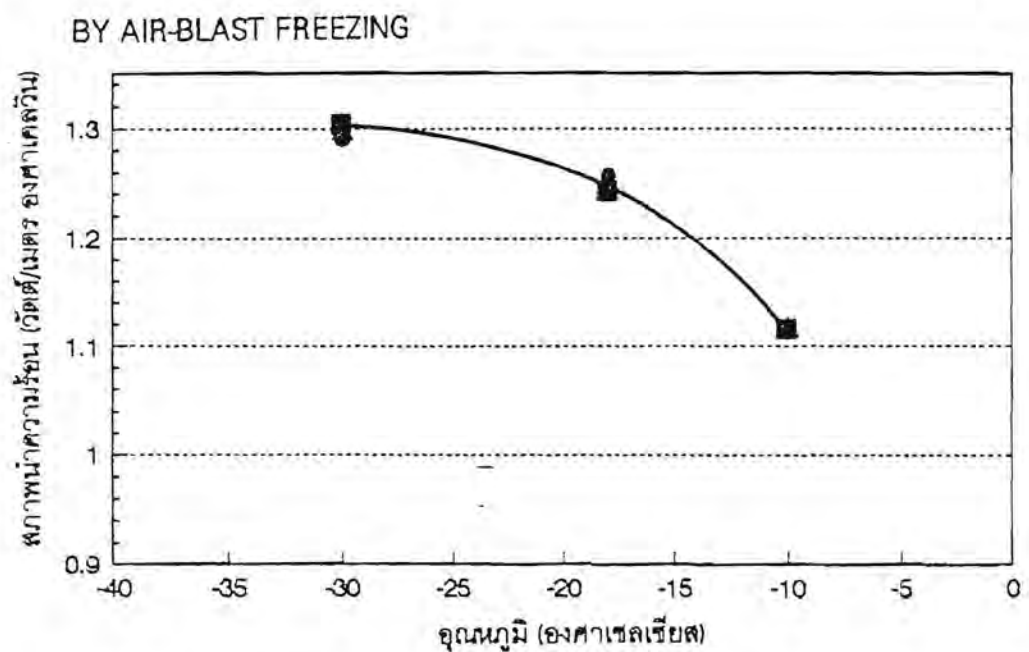


BY DRY-ICE FREEZING



● ซ้ำที่ 1 △ ซ้ำที่ 2 □ ซ้ำที่ 3

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ



● ซ้ำที่ 1 △ ซ้ำที่ 2 □ ซ้ำที่ 3

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่ปวย

4.3.2.3 สภาพแพร่ความร้อน

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและ อุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) พบว่าอิทธิพลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ได้ผลดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้ง

SOV	df	SS	MS	F
พันธุ์ (P)	1	3.259×10^{-15}	3.259×10^{-15}	4.880 *
วิธีการแช่แข็ง (M)	1	9.380×10^{-15}	9.380×10^{-15}	14.047 *
อุณหภูมิ (T)	2	1.052×10^{-13}	5.258×10^{-14}	78.736 *
PM	1	6.769×10^{-16}	6.769×10^{-16}	1.014
PT	2	9.585×10^{-16}	4.792×10^{-16}	0.718
MT	2	3.188×10^{-15}	1.594×10^{-15}	2.387
PMT	2	4.388×10^{-16}	2.194×10^{-16}	0.329
Error	24	1.603×10^{-14}	6.678×10^{-16}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.21 เป็นการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ถึง -10 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีการแช่แข็งวิธี air-blast freezing กับวิธี dry-ice freezing พบว่ากุ้งแช่ปวยมีค่าสภาพแพร่ความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำประมาณร้อยละ 3 ทั้งนี้เนื่องจากกุ้งแช่ปวยมีปริมาณความชื้นมากกว่ากุ้งกุลาดำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Nesvadba และ Eunson (1984) ที่พบว่าปลาคือคอบคมีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ -30 -18 และ -10 องศาเซลเซียส ส่วนวิธีการแช่แข็งทั้ง 2 วิธีคือ วิธี air-blast freezing กับวิธี dry-ice freezing ที่มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวย พบว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพแพร่ความร้อนมากกว่ากุ้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing ประมาณร้อยละ 4.89 (รูปที่ 4.15 และ 4.16) ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากโครงสร้างของผลึกน้ำแข็งภายในเนื้อกุ้งที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางกายภาพด้วย (Mohsenin, 1980)

ตารางที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และแช่แข็งด้วยวิธี 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	6.167±0.155	5.478±0.356
	dry-ice freezing	7.428±0.431	6.343±0.406	5.881±0.051
แช่ปวย	air-blast freezing	6.944±0.196	6.315±0.258	5.994±0.084
	dry-ice freezing	7.467±0.345	6.460±0.128	6.034±0.091

ผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ± 1 $-18 \pm$ และ -10 ± 1 องศาเซลเซียสที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้ง ให้ผลในลักษณะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่า (รูปที่ 4.17 และ 4.18) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nesvada (1984) ซึ่งทำการทดลองกับปลาคือคอบคที่ความชื้นร้อยละ 90.4 ในช่วงอุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสพบว่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง และในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวย ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing ในช่วงของการแช่แข็งด้วย regression analysis พบว่าสมการที่ได้อยู่ในรูป $\alpha = A+BT+CT^2$ โดยมีความแตกต่างกันที่สัมประสิทธิ์ ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยแช่แข็ง
เมื่อทำการแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing
ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

พันธุ์กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	สมการ regression	Coefficient of determination(R ²)
กุลาดำ	air-blast freezing	$\alpha \times 10^7 = 4.299 - 1.356 \times 10^{-2}T - 1.760 \times 10^{-3}T^2$	0.868
	dry-ice freezing	$\alpha \times 10^7 = 5.597 - 1.198 \times 10^{-2}T - 1.635 \times 10^{-3}T^2$	0.843
แช่ปวย	air-blast freezing	$\alpha \times 10^7 = 5.703 - 2.296 \times 10^{-2}T - 6.130 \times 10^{-4}T^2$	0.862
	dry-ice freezing	$\alpha \times 10^7 = 5.778 - 1.032 \times 10^{-2}T - 1.533 \times 10^{-3}T^2$	0.919

จากการศึกษาผลของพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน
ของกุ้งโดยใช้ multiple regression หาสมการความสัมพันธ์ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นดัง
สมการ โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.847

$$\alpha = [5.088 + 1.903 \times 10^{-1}P + 3.228 \times 10^{-1}M - 4.519 \times 10^{-2}T + 5.050 \times 10^{-4}T^2] \times 10^{-7}$$

.....(41)

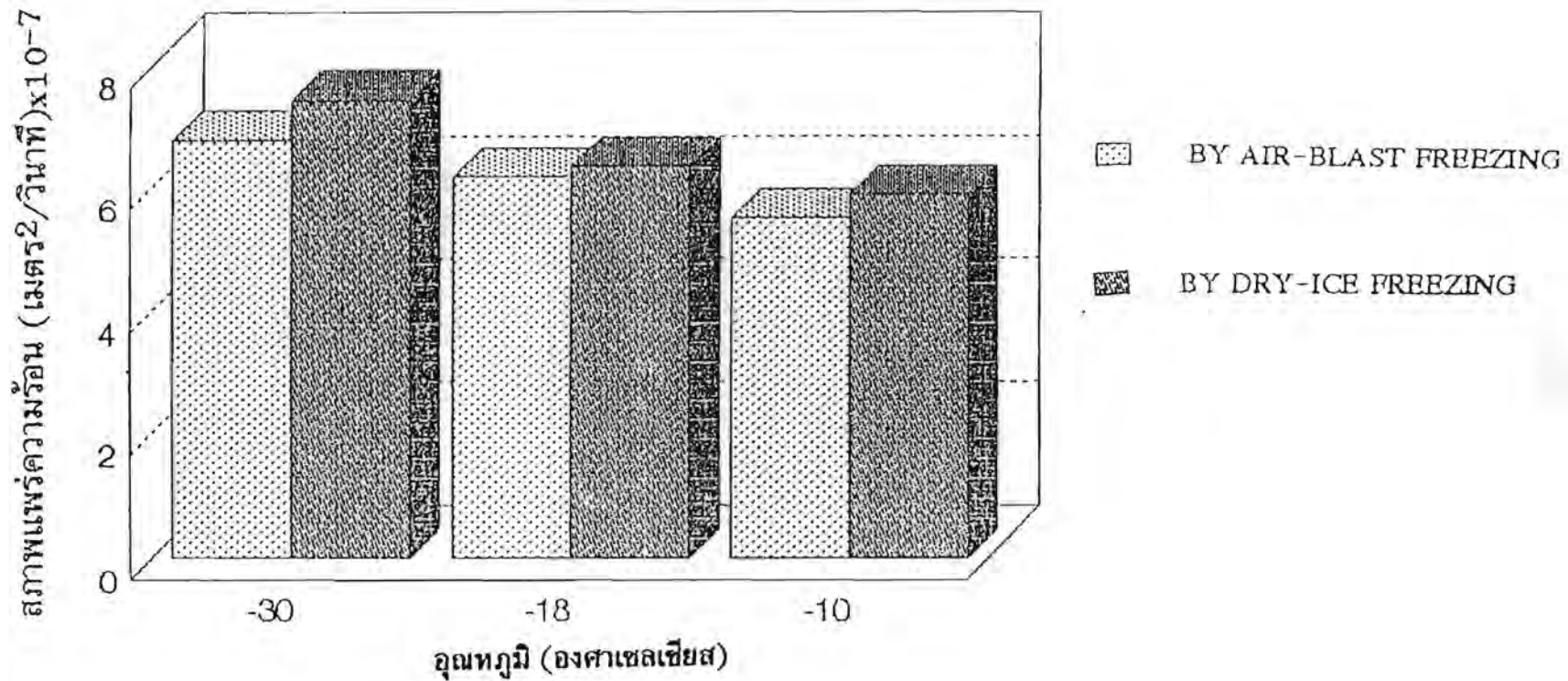
เมื่อ P คือ พันธุ์ของกุ้งสำหรับกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยมีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

M คือ วิธีการแช่แข็งสำหรับวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing

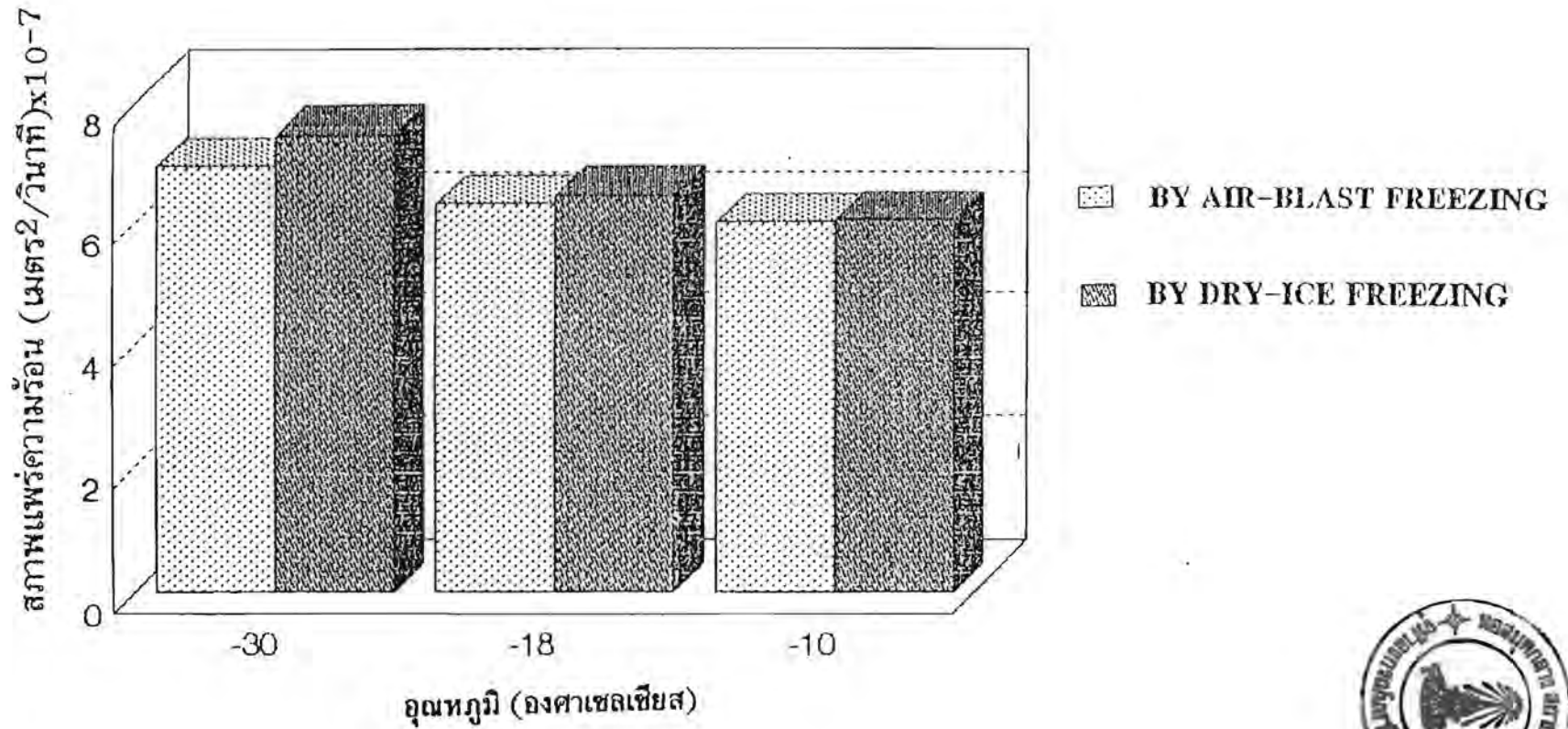
มีค่าเท่ากับ 0 และ 1 ตามลำดับ

T คือ อุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

จากสมการที่ 41 เมื่อแทนค่าเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของกุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing ที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส พบว่าค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 6.898×10^{-7} เมตร²/วินาที ซึ่งค่าที่ได้ต่างจากค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของกุ้งกุลาดำที่สภาวะเดียวกันที่ได้จากการทดลองคือ $6.778 \times 10^{-7} \pm 0.204$ เมตร²/วินาที เท่ากับร้อยละ 1.77 ดังนั้นสมการนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยทั้งที่วิธีการแช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และ วิธี dry-ice freezing ในช่วงแช่แข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส)

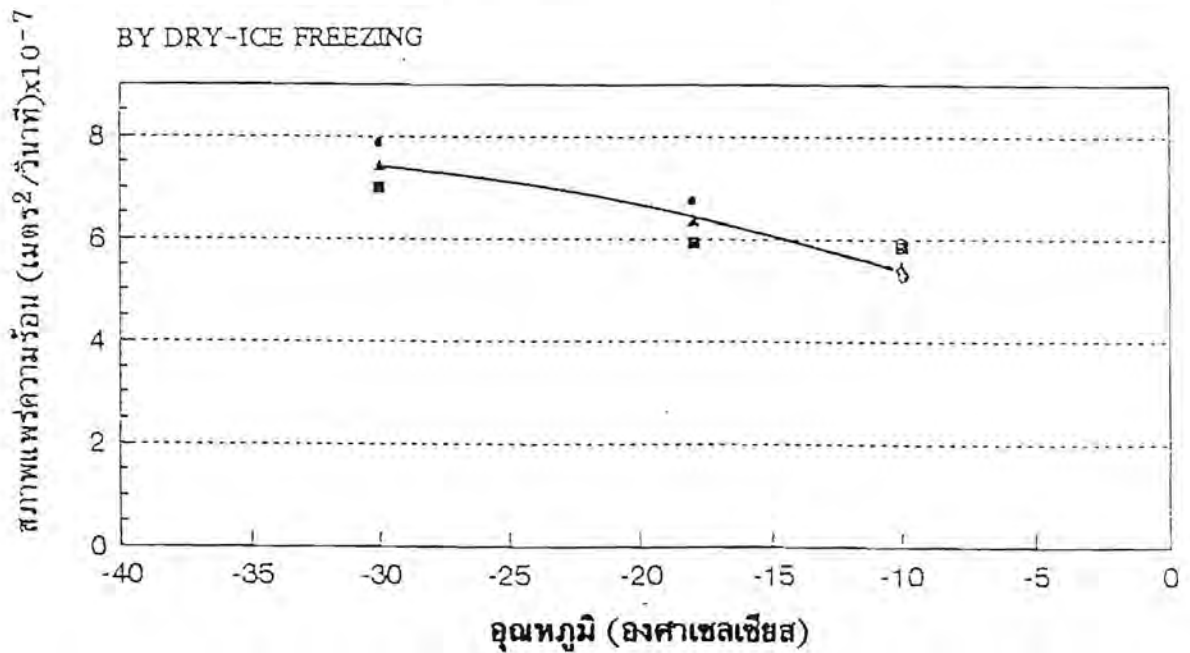
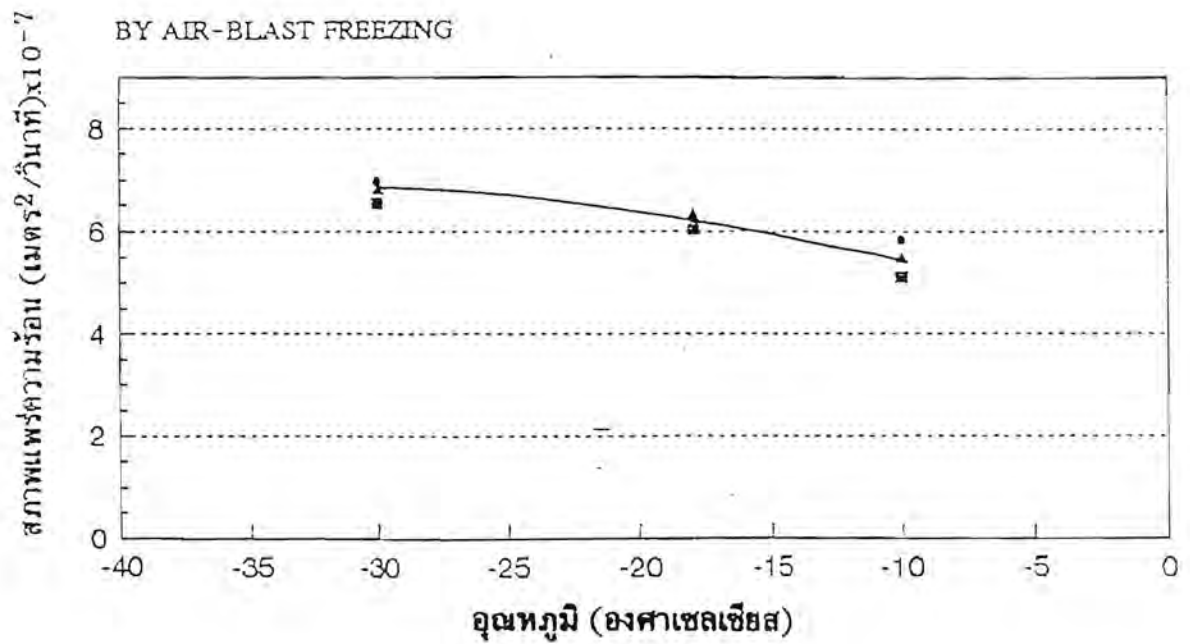


รูปที่ 4.15 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส



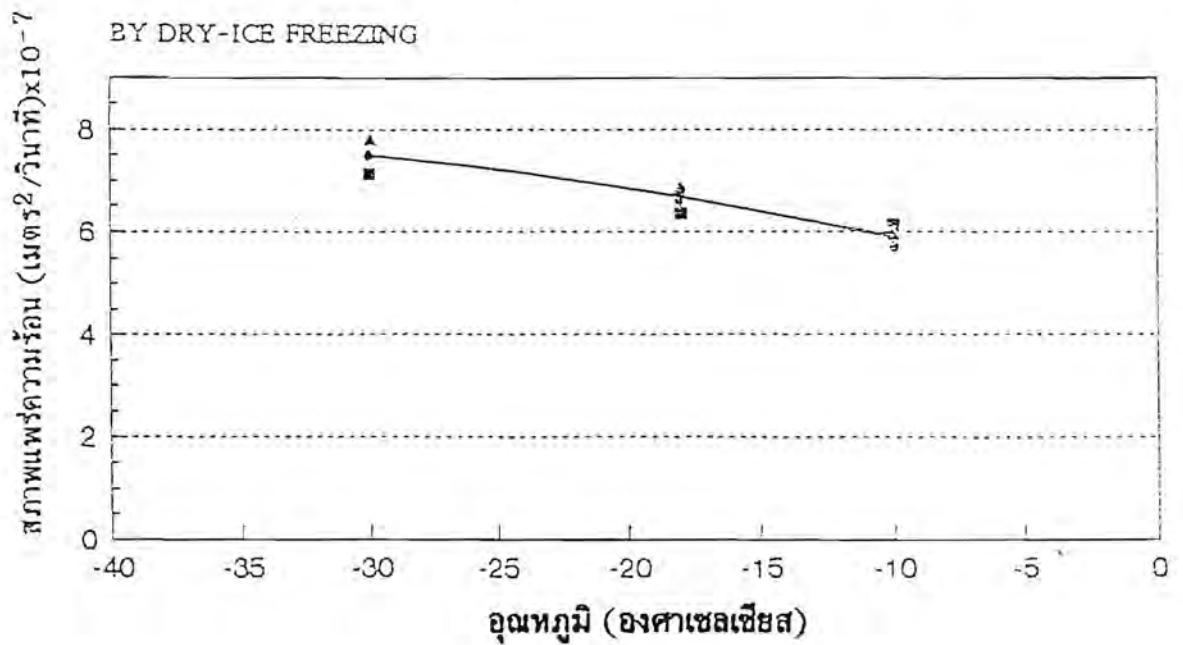
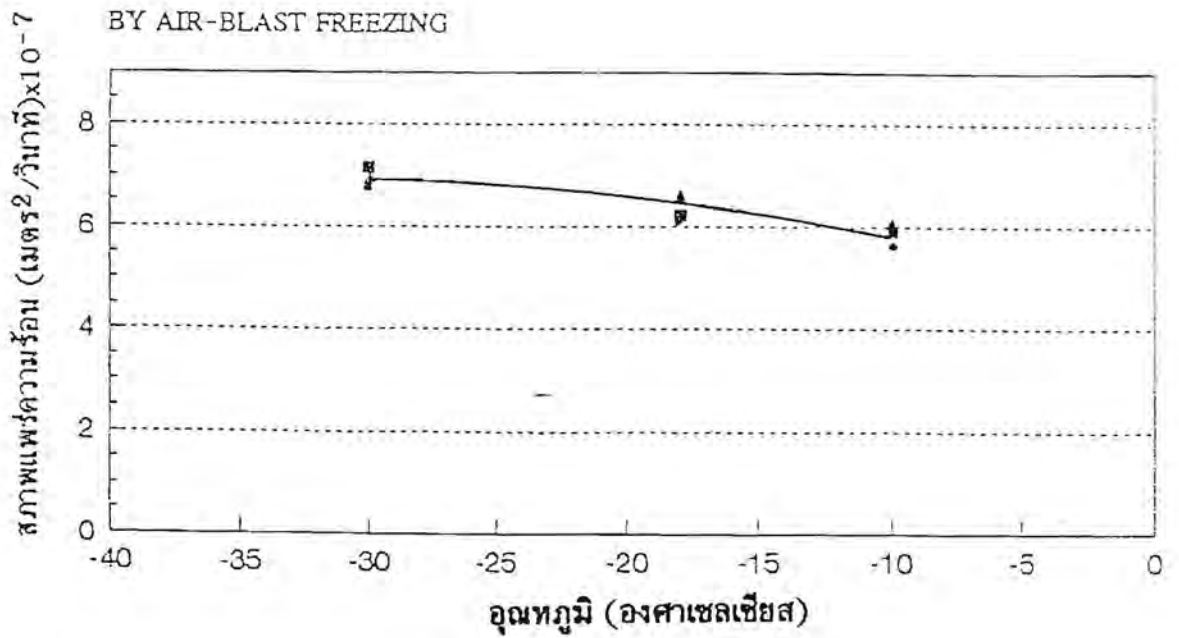
รูปที่ 4.16 ผลของวิธีการแช่แข็งต่อสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งแช่แข็งในช่วงอุณหภูมิ -30 ± 1 -18 ± 1 และ -10 ± 1 องศาเซลเซียส





● ซีรีส์ที่ 1 Δ ซีรีส์ที่ 2 \square ซีรีส์ที่ 3

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งกุลาดำ



● ซ้ที่ 1 △ ซ้ที่ 2 □ ซ้ที่ 3

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ของกุ้งแช่บ๊วย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ปลาหมึก

1.1 การหาค่าความร้อนจำเพาะโดยวิธี modified method of mixture

พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธู์กับภาวะการละลาย ภาวะการละลายและอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะโดยที่อุณหภูมิเดียวกันปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย สำหรับปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกระดองมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกกล้วย และปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พันธู์และอุณหภูมิเดียวกัน โดยที่ปลาหมึกกระดองเมื่อผ่านการละลายมีค่าความร้อนจำเพาะลดลงน้อยกว่าปลาหมึกกล้วยเมื่อผ่านการละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน นอกจากนี้ที่พันธู์และภาวะการละลายเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง -10 องศาเซลเซียสมีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาหงายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง 0.481-1.146 และ 0.375-1.017 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง 0.435-1.111 และ 0.426-1.066 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียสตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธู์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิกับค่าความร้อนจำเพาะดังกล่าว ($R^2 = 0.946$) คือ

$$C_p = 1.868 - 5.050 \times 10^{-2} p - 1.265 \times 10^{-1} H + 8.979 \times 10^{-2} T + 9.910 \times 10^{-2} p H + 1.402 \times 10^{-3} T^2$$

1.2 การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยใช้ thermal conductivity probe โดยการปรับปรุงภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างเป็นแบบ plate เพื่อความเหมาะสม เมื่อศึกษาถึงผลของพันธุ์ภาวะการละลาย และอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกพบว่า พันธุ์ ภาวะการละลาย อุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับภาวะการละลาย มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน โดยปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย ส่วนปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกระดองมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกกล้วยที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยที่ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกทั้งสองชนิดที่ผ่านการละลายมีค่าแตกต่างกันมากกว่าปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลาย และปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พันธุ์และอุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง -10 องศาเซลเซียส ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง $1.311-1.567$ และ $1.156-1.394$ วัตต์/เมตร องศาเซลวินตามลำดับ สำหรับค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง $1.279-1.523$ และ $1.244-1.493$ วัตต์/เมตร องศาเซลวินตามลำดับและสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ การละลายและอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อน ดังกล่าว ($R^2 = 0.987$) คือ

$$k = 1.224 - 2.625 \times 10^{-2}P - 1.587 \times 10^{-1}H - 9.750 \times 10^{-3}T - 1.125 \times 10^{-1}PH - 3.875 \times 10^{-5}T^2$$

1.3 การหาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยใช้ thermal diffusivity plate

หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึก พบว่าพันธุ์ ภาวะการละลาย อุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ กับภาวะการละลายและอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์กับอุณหภูมิ อิทธิพลร่วมระหว่างภาวะการละลายกับอุณหภูมิ และอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ ภาวะการละลายและอุณหภูมิ มีผลต่อสภาพแพร่ความร้อน โดยปลาหมึก กกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายมีค่าสภาพแพร่ความร้อนต่ำกว่าปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย ส่วน ปลาหมึกที่ผ่านการละลาย ปลาหมึกกล้วยกลับมีแนวโน้มของค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าปลาหมึก กระดองที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยความแตกต่างของสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึก กระดองที่ไม่ผ่านการละลายมีค่ามากกว่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ผ่านการละลาย สำหรับ ปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายมีสภาพแพร่ความร้อนต่ำกว่าปลาหมึกที่ผ่านการละลายที่พันธุ์และอุณหภูมิเดียวกัน และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -40 ถึง -10 องศาเซลเซียสทำให้สภาพแพร่ความร้อนของ ปลาหมึกมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง นอกจากนี้เมื่อลดอุณหภูมิจำลองค่าสภาพแพร่ ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น และค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลายที่พันธุ์เดียวกันมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง $2.761 \times 10^{-7} - 7.451 \times 10^{-7}$ และ $2.833 \times 10^{-7} - 8.814 \times 10^{-7}$ เมตร²/วินาที ตามลำดับ ส่วนค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลายและ ที่ผ่านการละลายอยู่ในช่วง $2.891 \times 10^{-7} - 8.492 \times 10^{-7}$ และ $2.901 \times 10^{-7} - 8.551 \times 10^{-7}$ เมตร²/วินาที ตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ การละลายและอุณหภูมิกับค่า สภาพแพร่ความร้อนดังกล่าว ($R^2 = 0.979$) คือ

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

2. กุ้ง

2.1 การหาค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งโดยวิธี modified method of mixture พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์และอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ โดยกุ้งแช่ปวยทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และ วิธี dry-ice freezing มีค่าความร้อนจำเพาะสูงกว่ากุ้งกุลาดำที่แช่แข็งทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และวิธี dry-ice freezing การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาหงายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และวิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 0.423 - 1.148 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส และ 0.433 - 1.147 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งแช่ปวยทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และ วิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 0.156 - 1.206 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส และ 0.509 - 1.198 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียสตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ ต่อค่าความร้อนจำเพาะดังกล่าว ($R^2 = 0.998$) คือ

$$C_p = 2.211 + 2.267 \times 10^{-2}P - 6.890 \times 10^{-3}H + 1.292 \times 10^{-1}T - 1.130 \times 10^{-3}PT + 2.363 \times 10^{-3}T^2$$

2.2 การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยใช้ thermal conductivity probe

พบว่า พันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ มีผลต่อสภาพนำความร้อน โดย กุ้งแช่ปวย ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพนำความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และ วิธี dry-ice freezing ส่วนกุ้งกุลาดำและกุ้ง

แช่ปวยที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสภาพความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาคว่ำเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ค่าสภาพความร้อนของกุ้งกุลาดำทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 1.109-1.288 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 1.066-1.291 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ตามลำดับ ส่วนค่าสภาพความร้อนของกุ้งแช่ปวยทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และ วิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 1.116-1.304 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน และ 1.122-1.313 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน ตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิต่อค่าสภาพความร้อนดังกล่าว ($R^2 = 0.982$) คือ

$$k = 0.801 + 3.644 \times 10^{-2}P + 1.089 \times 10^{-2}M - 3.832 \times 10^{-2}T - 6.100 \times 10^{-4}T^2$$

2.3 การหาค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งโดยใช้ thermal diffusivity plate พบว่า พันธุ์ วิธีการแช่แข็งและอุณหภูมิ มีผลต่อสภาพแพร่ความร้อน โดย กุ้งแช่ปวย ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพแพร่ความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และ วิธี dry-ice freezing ส่วนกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยที่แช่แข็งด้วยวิธี dry-ice freezing มีค่าสภาพแพร่ความร้อนมากกว่ากุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแช่ปวยมีค่าเพิ่มขึ้นแบบ

พาราโบลาคว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และวิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 5.176×10^{-7} – 6.942×10^{-7} เมตร²/วินาที และ 5.837×10^{-7} – 7.851×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ ส่วนค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งแช่ปวยทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี air-blast freeaing และ วิธี dry-ice freezing อยู่ในช่วง 5.908×10^{-7} – 7.141×10^{-7} เมตร²/วินาที และ 5.942×10^{-7} – 7.800×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ และสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ วิธีการแช่แข็ง และอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนดังกล่าว ($R^2 = 0.847$) คือ

$$\infty = [5.088 + 1.903 \times 10^{-1}P + 3.228 \times 10^{-1}M - 4.519 \times 10^{-2}T + 5.050 \times 10^{-4}T^2] \times 10^{-7}$$

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกกุ้งในช่วงแช่แข็งไปแล้วนั้น ควรมีการปรับปรุงอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น อ่างที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงแช่แข็ง ควรมีตัวทำความเย็นและตัวควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ เพื่อควบคุมอุณหภูมิในช่วงแช่แข็งให้คงที่และแม่นยำตลอดเวลา ส่วนเครื่องบันทึกอุณหภูมิควรบันทึกได้ทุกวินาทีและสามารถทำงานร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อที่จะได้สะดวกในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ตลอด นอกจากนี้อาจศึกษาเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของการละลายที่มีต่อโครงสร้างของเนื้อเยื่อ สัดส่วนของน้ำที่เป็นน้ำแข็ง ขนาดของผลึกน้ำแข็งที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของปลาหมึกและกุ้ง

เอกสารอ้างอิง

จรัญ จันทลักขณา. 2527. สถิติ วิถีวีเคราะห้และวางแผนงานวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 5.

กรุงเทพมหานคร: สำนักไทยวัฒนาพานิช.

ทศพร วงศ์รัตน์. 2528. ทรัพยากรประมงทะเลของไทย. กรุงเทพมหานคร: แผนกธรรมชาตวิทยา
สยามสมาคม. หน้า 24-42.

ธนาคารกสิกรไทย. 2532. ปลาหมึกสดแช่เย็น: บัญหาอยู่ที่การผลิต. สรุปข่าวธุรกิจธนาคารกสิกรไทย
ปีที่ 13 ฉบับที่ 8. กรุงเทพมหานคร: ธนาคารกสิกรไทย.

บริษัทอินเตอร์เนชั่นแนล บิสสิเนส ซีลิวซ์(ประเทศไทย) จำกัด. 2532. คู่มือพ่อค้าส่งออก.

กรุงเทพมหานคร: บริษัทอินเตอร์เนชั่นแนล บิสสิเนส ซีลิวซ์(ประเทศไทย) จำกัด.

ประภาศรี สิงห์รัตน์, จีระ อัฐรัตน์และไพศาล วุฒิจานงค์. 2531. หลักวิศวกรรมการแปรรูปอาหาร.

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 152

ประจวบ หล้าอุบล. 2527. กุ้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โครงการหนังสือเกษตรชุมชน
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พัชรีรินทร์ ดันตระโกศล. 2529. ผลิตภัณฑ์จากเนื้อปลาหมึกกระดอง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พาณิชย์, กระทรวง. 2534. วิธีการส่งออกปลาหมึกสดแช่เย็น. กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์ กระทรวง
พาณิชย์. หน้า 13-17.

ไพฑูริย์ ธรรมรัตน์ว่าสิภ. 2529. กรรมวิธีการแปรรูปอาหาร. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะ
ทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 340.

มนตรีวา อัมพะเสวด. 2534. สถานการณ์สินค้าเกษตรกรรม ปี 2533 และแนวโน้มปี 2534.
กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์: 3,60-62.

- เยาวลักษณ์ สุรพันธุ์ศิษฐ์. 2528. เทคโนโลยีเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์. ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 25.
- วิจารณ์ ฤดีศานต์. 2535. ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อสมบัติทางความร้อนของมะละกอ และมะม่วง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วัลลภ คงเพิ่มทุน. 2532. กุ้งกุลาดำ. กรุงเทพมหานคร: โครงการหนังสือเกษตรชุมชน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- สาธิตชูช, กระทรวง. 2527. ตารางแสดงคุณค่าอาหารไทย. กองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2534. มอก. 373-2524: มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แป้งสาลีชนิดทำเค้ก. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สุวิทย์ ชีนสินธุ์. 2531. การเลี้ยงกุ้งแช่เป็วย และกุ้งกุลาดำ. กรุงเทพมหานคร: เรืองแสงการพิมพ์
- องค์การสะพานปลา. งานงบประมาณและสถิติ. 2533. สถิติการประมงประจำปี 2534. งานงบประมาณและสถิติ. องค์การสะพานปลา.
- Albin, F.V., Badari - narayana, K., Srinivasa - Murthy, S., and Krishna - Murthy, M.V. 1979. Thermal diffusivities of some unfrozen and frozen food models. Journal of Food Technology 14: 361-367.
- Annamma, T.T., and Rao, C.V.N. 1974. Studies on thermal diffusivity and conductivity of fresh and dry fish. Fishery Technology 11(1): 28-33.
- Bahge - Khandan, M.S., Choi, Y., and Okos, M.R. 1981. Improved line heat source thermal conductivity probe. Journal of Food Science 46(6): 1430-1432.

- Bennette, C.O., and Myers, J.E. 1983. Momentum, Heat and Mass Transfer.
3rd edition. Japan: McGraw Hill International Book Company.
- Chang, S.Y., and Toledo, R.T. 1990. Simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient during sterilization of carrot disc in packed bed. Journal of Food Science 55: 199-205.
- Chen, C.S. 1985. Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: enthalpy and apparent specific heat. Journal of Food Science 50: 1158-1166.
- Cleland, A.C. 1980. Unsteady State Heat Transfer. United State of America. (Unpublished Manuscript)
- Conditioning Engineers. 1985. American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers Handbook. Fundamental SI edition. California: The American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Inc.
- El - Sahrigi, A.E., Hassan, Y.M., Soliman, S.A., and Ec - Mansy, H.A. 1981. Physico - thermal properties of some varieties of fish and meat. Proceeding of European Meeting of Meat Research Workers 1(27) : 339-342.
- Fellow , P.J. 1990, Food Processing Technology: Principle and Practice
England : Ellis Horwood Ltd. pp. 381-392
- Fennema, O.R., Powrie, W.D., and Marth, E.H. 1973. Low Temperature Preservation of Foods and Living Matter. New York: Marcel Dekker, Inc. pp 87-96.

- Fleming ,A.K. 1969. Calorimeter properties of lamb and other meats. Journal of Food Science 44: 435-438,448.
- Hayakawa, K. 1973. New computational procedure for determining the apparent thermal diffusivity of a solid body approximated with an infinite slab. Journal of Food Science 38: 623-629.
- Heldman ,D.F.1979. Food Process Engineering pp.121. Westport,Connecticut: The AVI Publishing.
- Hill, J.E., Leitman, J.D. and Sunderland, J.E. 1967. Thermal conductivity of various meat. Food Technology 21: 1143-1148.
- Holland, L.D.,and Liapis, A.I. 1983. Computer Method for Solving Dynamic Separation Problems. London: McGraw Hill Book Company.
- Hwang, M.P., and Hayakawa, K. 1979. A specific heat calorimeter for foods. Journal of Food Science 44: 435-438,448.
- Kent, M., Christionsen, K., Van-Haneghem, I.A., Holtz, E., Morley, M.J., Nesvadba, P., and Poulsent, K.P. 1984. Cost 90 collaborative measurements of thermal properties of food. Journal of Food Engineering 3: 117-150.
- Kleinbaum, D.G., and Kupper, L.L. 1978. Applied Regression Analysis and other Multivariable method. Massachusetts: Duxbury Press, a Division of Wadsworth Publishing Company Inc. pp 2, 99, 106, 188-208.

- Kubota, K., Takase, Y., Suzuki, K., and Esaka, M. 1983. A study on the thermal diffusivity of potato slabs in various conditions. Journal of the Faculty of Applied Biological Science : Hiroshima University 22: 141-152.
- Kumbhar, B.K., Agarwal, R.S., and Das, K. 1981. Thermal properties of fresh and frozen fish. International Journal of Refrigeration 4(3) : 143-146.
- Kustermann, M., Scherrer, R., and Kutzbach, H.D. 1981. Thermal conductivity and diffusivity of shelled corn and grain. Journal of Food Process Engineering 4(3): 137-153.
- Lamb, J. 1976. Influence of water on thermal properties of food. Chemistry and Industry 24: 1046-1048.
- Lawrie, E. 1981. Developments in Meat Science 2. England : Applied Science Publishers Ltd. pp.128-154.
- Lentz, C.P. 1961. Thermal conductivity of meats, fats, gelatin gels and ice. Food Technology 15(5): 243-247.
- Levy, F.L. 1979. Enthalpy and specific heat of meat and fish in the freezing range. Journal of Food Technology 14: 549-560.
- Long, R.A.K. 1955. Some thermodynamic properties of fish and their effect on the rate of freezing. Journal of Science Food and Agricultural 6(10): 621-633.
- Love, R.M. 1962. Effect of freezing rate on the location of ice crystal in post rigor cod muscle. Journal of science Food and Agriculture 13: 269-280.

- Matuszek, T., Niesteruk, R., and Ojahuga, A.G. 1983. Temperature conductivity of krill, shrimp and squid over the temperature range 240 - 330 K. Proceeding of the 6th International Congress of Food Science and Technology 1: 221-222.
- Miller, H.C., and Sunderland, I.E. 1963. Thermal conductivity of beef. Food technology : 490-492.
- Morley, M.J., and Fursey, G.A.J. 1988. The apparent specific heat and enthalpy of fatty tissue during cooling. International Journal of Food Science and Technology 23: 467-477.
- Moline, S.W., Sawdye, J.A., Short, A.J., and Rinfret, A.P. 1961. Thermal properties of food at low temperature. Food Technology 15: 228-231.
- Mohsenin, N.N. 1980. Thermal Properties of Food and Agricultural Materials. New York: Gordon and Breach Science Publisher. pp 12,34-142.
- Nesvadba, P., and Eunson, C. 1984. Moisture and temperature dependence of thermal diffusivity of cod minces. Journal of Food Technology 19: 585-592.
- Nix, G.H., Vachon, R.I., Lowery, G.W., and McCurry, T.A. 1968. The line source method : procedure and iteration scheme for combined determination of conductivity and diffusivity. Proceeding of the eight International Conference on thermal Conductivity: 999-1008.
- Pham, Q.T., and Willix, J. 1989. Thermal conductivity of fresh lamb meat, offals and fat in the range -40 to +30°C: measurements and correlations. Journal of Food Science 54(3): 508-515.

- Polley, G.L., Synder, O.P., and Kotnoor, P. 1980. A compilation of thermal properties of foods. Food technology 34(11): 76-94.
- Qashou, M., Nix, G.H., Vachon, R.I., and Lowery, G.W. 1970. Thermal conductivity values for ground beef and chuck. Food Technology 24(4)] : 189-192.
- Rahman, M.S., and Potluri, P.L. 1991. Thermal conductivity of fresh and dried squid meat by line source thermal conductivity probe. Journal of Food Science 56(2): 582-583.
- Rao, M.A., and Rizvi, S.S.H. 1986. Engineering properties of Food. New York: Mercel Dekker, Inc. pp 49-88.
- Reidy, G.A. and Rippen, A.C. 1971. Method for determining thermal conductivity in food. Transactions of the American Society of Agricultural Engineer 14: 248-254.
- Reverzev, V.V., and Khakulin, D.V. 1987. Thermophysical properties of Bartram's squid at low temperatures. Rybnoe Khozyaistvo 9: 66-67.
- Sanz, P.D., Alonso, M.D., and Mascheroni, R.H. 1987. Thermophysical properties of meat product: general bibliography and experimental values. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 30(1): 283-289,296.
- Singh, R.P. 1982. Thermal diffusivity in food processing. Food Technology 36(2): 87-91.
- Succar, J., and Hayakawa, K.I. 1983. Empirical for predicting thermal physical properties of food at freezing or defrosting temperature. Lebensmittel - Wissenschaft und Technologie 16(6): 326-331.

- Suzuki, M., Kobayashi, T., and Yanagimoto, M. 1979. Thermal characterising of Antarctic krill, *Euphausia Supeiba*. Bulletin of the Japanese Society of of Scientific Fisheries 45(6): 754-751.
- Sweat, V.E. 1974. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science 39(3): 1080-1083.
- Toledo, R.T. 1991. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd edition. New York: Van Nostrand Reinhold. pp.134-139,233-235.
- Tressler, D.K., Arsdel, W.B.V., and Copley, M.J. 1968. The Freezing Preservation of Foods. Connecticut: The AVI Publishing Company, Inc. pp. 26-51.
- Tulshian, N., and Wheaton, F. 1986. Oyster (*Crasstrea Virginica*) shell thermal conductivity : technique and determination. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers 29: 626-632.
- Wang, D.Q., and Kolbe, E. 1991. Thermal properties of surimi analysed using DSC. Journal of Food Science 56(2): 302-308.
- Woodams, E.E., and Nowvey, J.E. 1968. Literature value of thermal conductivities of foods. Food Technology 22(4) : 150-158.

มาตรฐาน

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิราวุฒ



ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์

ข.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC 14.004

อุปกรณ์

ตู้อบลมร้อนของ WTE BINDER รุ่น E-53

วิธีทดลอง

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม ใส่ในภาชนะอลูมิเนียมซึ่งแห้งสนิท
2. นำตัวอย่างเข้าอบหาความชื้นในอุปกรณ์ดังกล่าว ซึ่งควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและทำให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก
3. อบตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

ปริมาณความชื้น (%) = $\{[\text{น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g)} - \text{น้ำหนักที่คงที่ของตัวอย่างหลังการอบ (g)}] \times 100\} / \text{น้ำหนักของตัวอย่าง (g)}$

ข.2 การวิเคราะห์ปริมาณแอมโมเนีย

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC 2.057

อุปกรณ์

Gerhardt Kjeldatherm Digestion Unit และ Gerhardt Vapodest I

สารเคมี

- 1 สารละลายกรด sulphuric เข้มข้น
- 2 สารละลายกรด sulphuric เข้มข้น 0.1 %
- 3 สารละลาย sodium hydroxide เข้มข้น 50%
- 4 สารละลายกรด boric เข้มข้น 4%
- 5 Catalyst (ส่วนผสมของ K_2SO_4 และ Se ในอัตราส่วน 100:1)
- 6 Indicator ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Methyl Red และ Methylene Blue

วิธีทดลอง

- 1 ชั่งตัวอย่างแห้ง 2 กรัมใส่ลงในขวดย่อย
- 2 เติม Catalyst 10 กรัม
- 3 เติมสารละลายกรด sulphuric เข้มข้น 30 มิลลิลิตร
- 4 ย่อยตัวอย่างด้วยเครื่อง Kjeldatherm ซึ่งควบคุมอุณหภูมิในการย่อยเป็น 3

ช่วงคือ

ช่วงที่ 1 ใช้อุณหภูมิ $250^{\circ}C$ เป็นเวลา 15-20 นาที

ช่วงที่ 2 ใช้อุณหภูมิ $380^{\circ}C$ เป็นเวลา 30-45 นาที

ช่วงที่ 3 ใช้อุณหภูมิ $380^{\circ}C$ เป็นเวลา 20-30 นาที เพิ่มจากช่วงที่ 2

ย่อยตัวอย่างจนได้สารละลายสีเหลืองอ่อน

- 5 กลับตัวอย่างที่ย่อยแล้วด้วยเครื่อง Vapodest I โดยใช้สารละลาย sodium hydroxide เข้มข้น 50 % เป็นตัวทำปฏิกิริยาและเก็บสารที่กลับได้ในสารละลายกรด บอริกซึ่งเติม Indicator 5-6 หยด
- 6 ไตเตรตสารละลายที่กลับได้ด้วยสารละลายกรด sulphuric เข้มข้น 0.1 N

$$\text{ปริมาณโปรตีน (\%)} = \frac{A \times B \times 6.25 \times 1.4}{c}$$

A = normality ของกรด sulphuric ที่ใช้ไตเตรต

B = ปริมาตรกรด sulphuric ที่ใช้ไตเตรต

C = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

ข.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน

ตามวิธีของ AOAC 14.0089

อุปกรณ์

Soxtherm Automatic รุ่น S-166

วิธีทดลอง

- 1 ชั่งตัวอย่างแห้ง 2 กรัมแล้วหอด้วยกระดาษกรอง Whatman NO. 1 โดยห่อ 2 ชั้น
- 2 ใส่หอดตัวอย่างใน thimble ซึ่งบรรจุในขวดสกัดที่แห้งสนิทและทราบน้ำหนักที่แน่นอน
- 3 เติม petroleum ether ซึ่งใช้เป็นตัวสกัด 100 มิลลิลิตรลงในขวดสกัด
- 4 สกัดไขมันเป็นเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมงโดยควบคุมอุณหภูมิของ silicone oil ซึ่งเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับอุปกรณ์ที่ใช้สกัดที่ 150 °C
- 5 ระเหย petroleum ether ออกจากส่วนไขมันที่สกัดได้ แล้วอบขวดสกัดที่ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 6 ทาให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนักขวดสกัด

$$\text{ปริมาณไขมัน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณไขมันที่สกัดได้ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

ข.4 ปริมาณเถ้า

ตามวิธีของ AOAC 7.009

วิธีทดลอง

- 1 ชั่งตัวอย่างแห้ง 2 กรัม ใส่ใน crucible ที่แห้งสนิทและรู้น้ำหนักที่แน่นอน
- 2 นำตัวอย่างเข้าเผาใน furnace muffle ที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 3 ทาให้เย็นใน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก

$$\text{ปริมาณเถ้า (\%)} = \frac{\text{ปริมาณเถ้า(กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง(กรัม)}}$$

ข.5 ปริมาณเส้นใย

ดัดแปลงจากวิธีของ AOAC 7.006

อุปกรณ์

ชุดวิเคราะห์เส้นใยของ Gerhardt รุ่น RF-16/6 ซึ่งประกอบด้วย hot plate, beaker 600 cc., round condenser

สารเคมี

- 1 สารละลายกรด sulphuric เข้มข้น 0.255 N
- 2 สารละลาย sodium hydroxide เข้มข้น 0.31 N
- 3 95% ethyl alcohol

วิธีทดลอง

- 1 ชั่งตัวอย่างที่สกัดไขมันออกแล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดที่กำลังเดือด 200 มิลลิลิตร จากนั้นต่อ round condenser เข้ากับบีกเกอร์เพื่อรักษาระดับของกรดให้คงที่ขณะย่อยซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- 2 กรองส่วนผสมผ่านกระดาษกรองชนิดที่นิยมใช้เถ้าซึ่งรูน้ำหนักรัดแน่นลงล่างส่วนที่ติดบนกระดาษกรองด้วยน้ำร้อนจนหมดความเป็นกรด
- 3 ล้างส่วนที่ติดบนกระดาษกรองลงในบีกเกอร์ด้วยสารละลาย sodium hydroxide 200 มิลลิลิตร จากนั้นย่อยต่อไปอีก 30 นาที
- 4 กรองส่วนผสมด้วยกระดาษกรองแผ่นเดิมแล้วล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดความเป็นด่าง จากนั้นล้างด้วย แอลกอฮอล์ 100 มิลลิลิตร
- 5 นำส่วนที่ติดบนกระดาษกรองไปอบให้แห้ง แล้วใส่ใน crucible เพื่อหาปริมาณเถ้าที่เหลืออยู่

6 ทิ้งให้เย็นนาน desiccator แล้วชั่งน้ำหนัก crucible

$$\text{ปริมาณเสียน้ำ (%) = } \frac{\text{น้ำหนักที่หายไประหว่างเผาแก้ว (กรัม) x 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}}$$

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ค.1 การเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

1. จัดอันดับค่าเฉลี่ยจากค่าต่ำสุดไปหาสูงสุด หรือค่าสูงสุดไปค่าต่ำสุด
2. คำนวณค่า LSD จากสูตร

$$LSD = t_{\alpha/2}(v, k) \sqrt{\frac{2MS_E}{r}}$$

เมื่อ $t_{\alpha/2}(v, k)$ คือ ค่าที่ได้จากตารางการแจกแจงที ที่ระดับความมีนัยสำคัญ $\alpha/2$ ชั้น
ความเป็นอิสระ v ที่ระดับกลุ่มทดลองต่างกัน

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนภายในกลุ่มซึ่งได้จากการวิเคราะห์
ความแปรปรวน

v คือ ชั้นความเป็นอิสระของความแปรปรวนภายในประชากร
โดย $v = N - k$

N คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด

k คือ จำนวนกลุ่มทดลอง

r คือ ขนาดของตัวอย่างในกลุ่มทดลอง

3. หาผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างแต่ละคู่

4. เปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างแต่ละคู่กับค่า LSD ที่คำนวณ
ได้ที่แต่ละระดับกลุ่มทดลองต่างกัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัว
อย่างจากประชากรคู่ใดมีค่ามากกว่าค่า LSD ที่คำนวณได้ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของประชากรคู่นั้นแตกต่างกัน
อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค.2 ตัวอย่างการคำนวณค่า mean square error

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ข้อมูลแบบ one-way ANOVA ของค่าปริมาณความชื้นของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและที่ผ่านการละลาย โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ได้ผลดังนี้

ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย	% mc = 81.67 , 81.81 , 81.52
ปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลาย	% mc = 78.26 , 78.37 , 78.18
ปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย	% mc = 80.45 , 80.34 , 80.23
ปลาหมึกกระดองที่ผ่านการละลาย	% mc = 79.16 , 78.92 , 79.05

SOV	df	SS	MS	F
Treatment	1	17.237	17.237	1053.811
Error	4	6.543×10^{-2}	1.636×10^{-2}	

ค.3 ตัวอย่างการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย

เปรียบเทียบปริมาณความชื้นของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลาย และที่ผ่านการละลายดังนี้

ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย $\bar{x}_{mc(1)} = 81.66$

ปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลาย $\bar{x}_{mc(2)} = 78.27$

ปลาหมึกกระดองที่ไม่ผ่านการละลาย $\bar{x}_{mc(3)} = 80.34$

ปลาหมึกกระดองที่ผ่านการละลาย $\bar{x}_{mc(4)} = 79.04$

Degree of freedom = 8

จาก one-way ANOVA $MS_E = 1.636 \times 10^{-2}$

$$(2 \times MS_E / r)^{0.5} = (2 \times 1.636 \times 10^{-2} / 3)^{0.5}$$

$$= 1.044 \times 10^{-1}$$

$$LSD = t_{\alpha/2}(r, k) \sqrt{\frac{2MS_E}{r}}$$

จากตาราง

	p = 2	p = 3	p = 4
$t_{0.05}$	3.26	4.04	4.53
ดังนั้น $LSD_{0.05}$	0.340	0.422	0.473

$$\bar{x}_{mc(1)} - \bar{x}_{mc(2)} = 81.66 - 78.27 = 3.39 > 0.473$$

$$\bar{x}_{mc(1)} - \bar{x}_{mc(4)} = 81.66 - 79.04 = 2.62 > 0.422$$

$$\bar{x}_{mc(1)} - \bar{x}_{mc(3)} = 81.66 - 80.34 = 1.32 > 0.340$$

$$\bar{x}_{mc(3)} - \bar{x}_{mc(2)} = 80.34 - 78.27 = 2.07 > 0.422$$

$$\bar{x}_{mc(3)} - \bar{x}_{mc(4)} = 80.34 - 79.04 = 1.30 > 0.340$$

$$\bar{x}_{mc(4)} - \bar{x}_{mc(2)} = 79.04 - 78.27 = 0.77 > 0.340$$

แสดงว่า $\bar{x}_{mc(4)}$ และ $\bar{x}_{mc(1)}$ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

$\bar{x}_{mc(4)}$ และ $\bar{x}_{mc(2)}$ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

$\bar{x}_{mc(4)}$ และ $\bar{x}_{mc(3)}$ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

$\bar{x}_{mc(3)}$ และ $\bar{x}_{mc(2)}$ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

%mc(3) และ %mc(1) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

%mc(2) และ %mc(1) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณ

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะ

-ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -10.0 องศาเซลเซียส

น้ำหนักของปลาหมึกกล้วย (W_S)	=	152.65	กรัม
น้ำหนักของน้ำ (W_W)	=	400.00	กรัม
อุณหภูมิเริ่มต้นของปลาหมึกกล้วย (T_S)	=	-10.00	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (T_W)	=	66.20	องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pW})	=	0.999	แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส
ความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ (H_C)	=	61.289	แคลอรี/องศาเซลเซียส

จากกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ (รูปที่ 1) พบว่า

อุณหภูมิที่จุดสมดุล (T_F)	=	33.20	องศาเซลเซียส
เวลาที่จุดสมดุล (t_F)	=	61	นาที

ความชันของกราฟเส้นตรง (รูปที่ ง.1) ภายหลังจากภาวะสมดุล $(dT/dt) = -0.00779$ องศาเซลเซียส/นาที

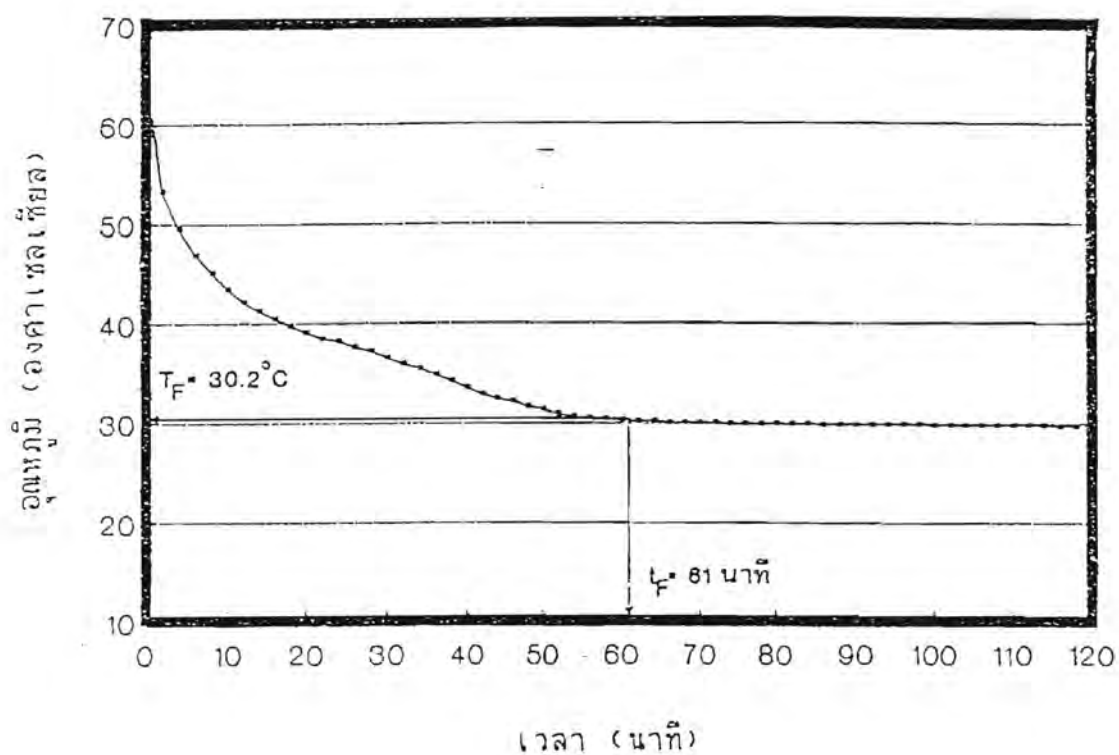
คำนวณค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วย (C_{pS}) โดยแทนค่าต่างๆในสมการ (31) คือ

$$(C_{pW}W_W + H_C)T_C + C_{pS}W_S T_S + LH = C_{pS}W_S T_F + C_{pW}W_W T_F + H_C T_C - E \quad \dots (31)$$

เมื่อ $E = (C_{pW}W_W + H_C + C_{pS}W_S)(dT/dt)t_F$

$$LH = 80 \times \text{ความชื้นของปลาหมึก} \times W_S$$

ได้ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วย = 1.127 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส



รูปที่ ง.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในเซลล์อิมิตเตอร์ของปลาหมึกกล้วยที่ผ่าน
ผ่านการละลาย ที่อุณหภูมิ -10.0 องศาเซลเซียส



จ.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าสภาพนำความร้อน

-ปลาหมึกกล้วยที่ไม่ผ่านการละลาย ที่อุณหภูมิ -39.8 องศาเซลเซียส

คำนวณค่าสภาพนำความร้อน (k) จากกราฟระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ ของปลาหมึกกล้วย (รูปที่ 2) โดยใช้ thermal conductivity probe ที่มี $q = 2.132$ วัตต์/เมตร และแทนค่าต่างๆ ในสมการคือ

$$q = -4 Sk$$

หรือ

$$k = q/4 S$$

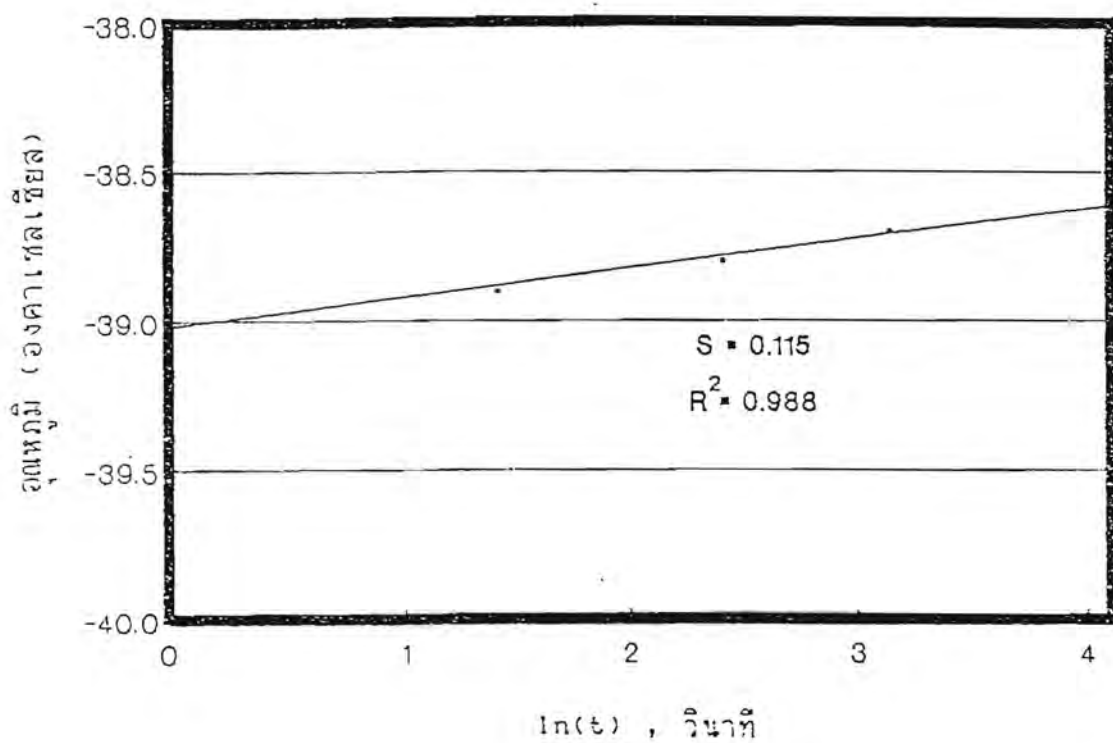
ได้ผลดังนี้

ครั้งที่	R^2	ความชัน(S)	k (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน)
1	0.988	0.115	1.469
2	0.987	0.106	1.593
3	0.989	0.114	1.475
4	0.986	0.115	1.468
5	0.989	0.108	1.559
6	0.990	0.108	1.569

เฉลี่ย $k = 1.521 \pm 0.051$

ได้ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยเท่ากับ

= 1.521 วัตต์/เมตร องศาเซลวิน



รูปที่ ง.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดหมุนกับ $\ln(t)$ ของปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -39.8 องศาเซลเซียส

จ.3. ตัวอย่างการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อน

-ปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลาย ที่อุณหภูมิ -34 ถึง -46 องศาเซลเซียส

จากการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยการประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนเริ่มต้นเป็น 0.5050 มิลลิเมตร²/วินาที และนำมาคำนวณโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซี พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานระหว่าง dimensionless temperature ratio จากการคำนวณและการทดลองที่ n ต่างๆเป็นดังนี้

n	α_n (มิลลิเมตร ² /วินาที)	σ_n
1	0.5050	0.1314
2	0.5100	0.1290
3	0.5150	0.1266
4	0.5200	0.1244
5	0.5250	0.1221
6	0.5300	0.1200
7	0.5350	0.1178
8	0.5400	0.1157
9	0.5450	0.1137
10	0.5500	0.1117
11	0.5550	0.1098
12	0.5600	0.1079
13	0.5650	0.1061
14	0.5700	0.1043
15	0.5750	0.1026
16	0.5800	0.1010
17	0.5850	0.0993
18	0.5900	0.0978
19	0.5950	0.0963

20	0.6000	0.0948
21	0.6050	0.0934
22	0.6100	0.0920
23	0.6150	0.0907
24	0.6200	0.0895
25	0.6250	0.0883
26	0.6300	0.0871
27	0.6350	0.0860
28	0.6400	0.0850
29	0.6450	0.0840
30	0.6500	0.0831
31	0.6550	0.0822
32	0.6600	0.0814
33	0.6650	0.0806
34	0.6700	0.0799
35	0.6750	0.0792
36	0.6800	0.0786
37	0.6850	0.0780
38	0.6900	0.0775
39	0.6950	0.0770
40	0.7000	0.0766

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่าง α_n กับ σ_n พบว่า α_n มีความสัมพันธ์กับ σ_n แบบพาราโบลา โดยมี ($R^2 = 1.000$) สมการเป็น

$$\sigma = 0.6327 - 1.4855\alpha + 0.9922\alpha^2$$

ดังนั้นค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยที่ผ่านการละลายที่อุณหภูมิ -34 ถึง -46 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ $7.456 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

ตารางที่ ๑.1 ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง

พันธุ์ปลาหมึก	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	-40	0.479	0.482	0.483	0.481	0.002
		-30	0.493	0.506	0.51	0.503	0.009
		-18	0.628	0.648	0.665	0.647	0.019
		-10	1.127	1.16	1.152	1.146	0.017
	ผ่านการละลาย	-40	0.378	0.374	0.372	0.375	0.003
		-30	0.39	0.397	0.403	0.397	0.007
		-18	0.477	0.478	0.481	0.479	0.002
		-10	1.009	1.016	1.025	1.017	0.008
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	-40	0.377	0.482	0.445	0.435	0.053
		-30	0.423	0.498	0.435	0.452	0.040
		-18	0.511	0.619	0.595	0.575	0.057
		-10	1.015	1.113	1.204	1.111	0.095
	ผ่านการละลาย	-40	0.425	0.426	0.427	0.426	0.001
		-30	0.447	0.443	0.441	0.444	0.003
		-18	0.525	0.526	0.53	0.527	0.003
		-10	1.032	1.066	1.1	1.066	0.034

ตารางที่ ๑.2 ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง

พันธุ์ปลาหมึก	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน)				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	-40	1.521	1.524	1.524	1.523	0.002
		-30	1.479	1.456	1.435	1.457	0.022
		-18	1.391	1.357	1.388	1.379	0.019
		-10	1.281	1.271	1.286	1.279	0.008
	ผ่านการละลาย	-40	1.396	1.397	1.392	1.395	0.003
		-30	1.306	1.314	1.325	1.315	0.010
		-18	1.254	1.244	1.229	1.242	0.013
		-10	1.161	1.155	1.152	1.156	0.005
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	-40	1.582	1.576	1.544	1.567	0.020
		-30	1.456	1.446	1.479	1.460	0.017
		-18	1.406	1.403	1.407	1.405	0.002
		-10	1.303	1.314	1.315	1.311	0.007
	ผ่านการละลาย	-40	1.499	1.492	1.488	1.493	0.006
		-30	1.388	1.391	1.397	1.392	0.005
		-18	1.315	1.333	1.325	1.324	0.009
		-10	1.244	1.240	1.248	1.244	0.004

ตารางที่ ๑.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของปลาหมึกกล้วยและปลาหมึกกระดองทั้งที่ไม่ผ่านการละลายและผ่านการละลายในช่วงแช่แข็ง

พันธุ์ปลาหมึก	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) $\times 10^{-7}$				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กล้วย	ไม่ผ่านการละลาย	-40	7.461	7.425	7.456	7.447	0.020
		-30	6.207	6.234	6.219	6.220	0.014
		-18	5.272	5.245	5.287	5.268	0.021
		-10	2.761	2.761	2.761	2.761	0.000
	ผ่านการละลาย	-40	8.818	8.810	8.814	8.814	0.004
		-30	7.866	7.862	7.861	7.863	0.003
		-18	6.213	6.234	6.225	6.224	0.011
		-10	2.838	2.833	2.828	2.833	0.005
กระดอง	ไม่ผ่านการละลาย	-40	8.494	8.493	8.490	8.492	0.002
		-30	7.726	7.730	7.719	7.725	0.006
		-18	5.828	5.795	5.771	5.798	0.029
		-10	2.884	2.891	2.898	2.891	0.007
	ผ่านการละลาย	-40	8.550	8.558	8.554	8.554	0.004
		-30	7.736	7.729	7.722	7.729	0.007
		-18	6.104	6.101	6.107	6.104	0.003
		-10	2.891	2.910	2.902	2.901	0.010

ตารางที่ ๑.4 ค่าความร้อนจำเพาะของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็ง ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี
air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing

พันธุ์ กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความร้อนจำเพาะ(แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กุลาดำ	AIR-BLAST FREEZING	-30	0.468	0.489	0.423	0.460	0.034
		-18	0.665	0.673	0.646	0.661	0.014
		-10	1.147	1.144	1.148	1.146	0.002
	DRYICE FREEZING	-30	0.456	0.46	0.433	0.450	0.015
		-18	0.659	0.656	0.648	0.654	0.006
		-10	1.147	1.144	1.145	1.145	0.002
แชบ๊วย	AIR-BLAST FREEZING	-30	0.523	0.519	0.516	0.519	0.004
		-18	0.686	0.689	0.685	0.687	0.002
		-10	1.206	1.195	1.182	1.194	0.012
	DRYICE FREEZING	-30	0.523	0.517	0.509	0.516	0.007
		-18	0.68	0.662	0.682	0.675	0.011
		-10	1.186	1.198	1.184	1.189	0.008

ตารางที่ ๑.5 ค่าสภาพนำความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็ง ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี
air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing

พันธุ์ กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพนำความร้อน(วัตต์/เมตร องศาเซลวิน)				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กุลาดำ	AIR-BLAST FREEZING	-30	1.288	1.276	1.269	1.278	0.010
		-18	1.198	1.200	1.222	1.207	0.013
		-10	1.109	1.067	1.065	1.080	0.025
	DRYICE FREEZING	-30	1.291	1.282	1.278	1.284	0.007
		-18	1.223	1.216	1.233	1.224	0.009
		-10	1.101	1.066	1.077	1.081	0.018
แชบ๊วย	AIR-BLAST FREEZING	-30	1.290	1.300	1.304	1.298	0.007
		-18	1.257	1.251	1.243	1.250	0.007
		-10	1.117	1.119	1.116	1.117	0.002
	DRYICE FREEZING	-30	1.310	1.313	1.307	1.310	0.003
		-18	1.263	1.269	1.266	1.266	0.003
		-10	1.124	1.146	1.122	1.131	0.013

ตารางที่ ๑.6 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกุ้งกุลาดำและกุ้งแชบ๊วยแช่แข็ง ทั้งที่แช่แข็งด้วยวิธี
air-blast freezing และวิธี dry-ice freezing

พันธุ์ กุ้ง	วิธีการแช่แข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สภาพแพร่ความร้อน(เมตร/วินาที) ² x10 ⁻⁷				
			ซ้ำที่ 1	ซ้ำที่ 2	ซ้ำที่ 3	ค่าเฉลี่ย	STD
กุลาดำ	AIR-BLAST FREEZING	-30	6.942	6.843	6.549	6.778	0.204
		-18	6.111	6.342	6.048	6.167	0.155
		-10	5.828	5.489	5.116	5.478	0.356
	DRYICE FREEZING	-30	7.851	7.444	6.989	7.428	0.431
		-18	6.738	6.363	5.927	6.343	0.406
		-10	5.936	5.837	5.869	5.881	0.051
แชบ๊วย	AIR-BLAST FREEZING	-30	6.749	6.942	7.141	6.944	0.196
		-18	6.119	6.608	6.219	6.315	0.258
		-10	5.999	6.076	5.908	5.994	0.084
	DRYICE FREEZING	-30	7.490	7.800	7.112	7.467	0.345
		-18	6.600	6.432	6.349	6.460	0.128
		-10	6.038	5.942	6.123	6.034	0.091

