

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

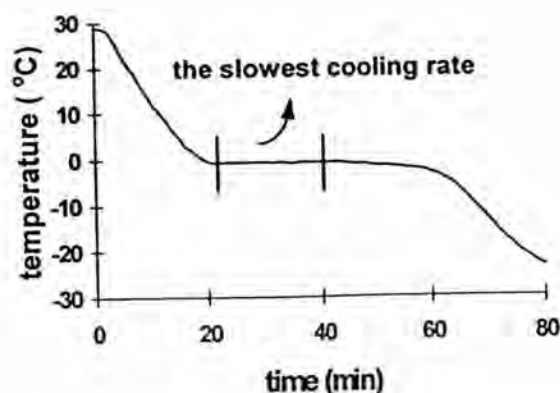
5.1 สมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดอง

5.1.1 ความชื้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในปลาหมึกกระดองสด พบว่ามีความชื้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 81.72 ± 2.01 % ซึ่งปริมาณความชื้นจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อน และใช้ในการประมาณค่าความร้อนแฝงที่ถูกกำจัดออกไปในขณะแช่เยือกแข็ง รวมทั้งประมาณสัดส่วนของน้ำแข็งในอาหาร (Cleland และ Velentas, 1997)

5.1.2 จุดเยือกแข็ง

จากการทดลองพบว่า equilibrium freezing point ของปลาหมึกกระดอง 9 ตัวอย่าง มีค่าอยู่ในระหว่าง -0.8° ถึง -1.5°C ที่ภาวะนี้อุณหภูมิของปลาหมึกกระดองค่อยๆ ลดลงหรือคงที่อยู่ระยะหนึ่งเนื่องจากการกำจัดความร้อนแฝงออกไป (รูปที่ 5.1) ช่วงอุณหภูมิเยือกแข็งดังกล่าวนี้ใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็งของปลาหมึกกระดอง (-0.7° ถึง -1.2°C) ซึ่ง Rahman และ Driscoll (1994b) รายงานไว้ และยังใกล้เคียงกับจุดเยือกแข็งของเนื้อสัตว์อื่นๆ ด้วย เช่น ปลา cod, เนื้อวัว หรือปลาทะเลอื่นๆ ที่อยู่ในระดับน้ำไม่ลึก (Rahman, 1995; Kato, 1985; Endo, 1989) อย่างไรก็ตามค่า equilibrium freezing point ของปลาหมึกกระดองที่วัดได้อาจมีความแตกต่างบ้าง ซึ่งมักเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการวัดจุดเยือกแข็งในอาหารอื่นๆ (Fennema, 1973) ทั้งนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของพันธุ์ ปริมาณความชื้นและของแข็งในปลาหมึกกระดอง ที่อยู่อาศัย ความสด ฤดูกาลจับ และการเรียงตัวของเส้นใยกล้ามเนื้อ ซึ่งปลาหมึกกระดองที่นำมาทดลองมีแหล่งที่มาและพันธุ์ (species) ต่างๆ กัน ดังนั้นปลาหมึกกระดองที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน อาจมีค่า equilibrium freezing point ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ค่าจุดเยือกแข็งที่วัดได้ยังขึ้นกับวิธีวัด เช่น surimi และ เนื้อปลา telapia ซึ่งวัดโดย DSC และ freezing curve method พบว่า วัดจุดเยือกแข็งได้ไม่เท่ากัน (Wang และ Kolbe, 1990; Chen และ Pun, 1995)



รูปที่ 5.1 Freezing curve ของปลาหมึกกระดอง

5.1.3 ความหนาแน่น

ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (ตารางที่ 5.1) พบว่า อุณหภูมิในช่วง $0^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{C}$ ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก อุณหภูมิช่วงนี้ยังไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสถานะของน้ำในปลาหมึก โดยความหนาแน่นเฉลี่ยของปลาหมึกกระดองที่เฉลี่ยของปลาหมึกกระดองมีค่าเท่ากับ 1050.75 kg/m^3 ซึ่งใกล้เคียงผลการทดลองของ Rahman (1994a) ที่พบว่า ปลาหมึกกระดองที่ความชื้น $81.31\pm 0.16\%$ มีค่าความหนาแน่น 1059 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ $20\pm 1.6^{\circ}\text{C}$ และใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเนื้อปลา และอาหารทะเล และเนื้อสัตว์อื่นๆ ที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน (Sanz และ คณะ, 1987) โดยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองและอาหารอื่นๆ ในช่วงอุณหภูมินี้จะขึ้นกับความชื้น และความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 ความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
1 ± 1	1050.5 ± 4.5
10 ± 1	1052.3 ± 2.4
20 ± 1	1049.7 ± 1.7
30 ± 1	1050.5 ± 2.6

สำหรับค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ -5° ถึง -30°C (ตารางที่ 5.2) พบว่า มีค่าน้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C ประมาณ 10% และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกับความหนาแน่นของ ปลา ไก่ เนื้อ (Sanz และคณะ, 1987) และแอปเปิ้ล (Ramaswamy และ Tung, 1981) ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิลดลงอัตราการเกิดผลึกน้ำแข็งจะเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของน้ำแข็งมีค่าน้อยกว่าน้ำ 8% (Fennema, 1996) ดังนั้นความหนาแน่นของปลาหมึกจึงลดลงตามความหนาแน่นของน้ำแข็งที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของปลาหมึก

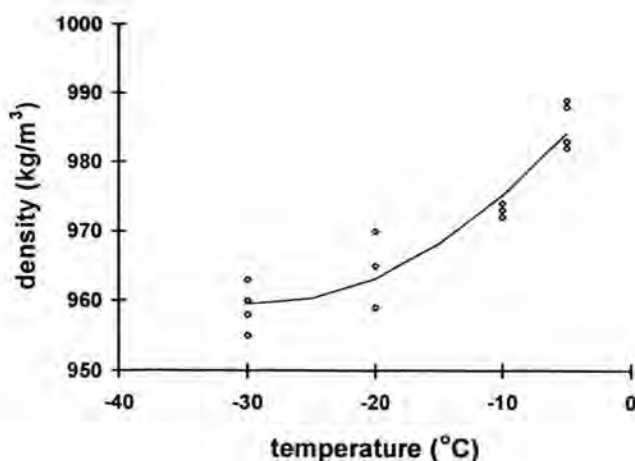
ตารางที่ 5.2 ความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาแน่น (kg/m^3)
-5 ± 1	985.5 ± 3.5 a
-10 ± 1	972.7 ± 1.0 b
-20 ± 1	964.7 ± 4.5 c
-30 ± 1	959.0 ± 3.4 d

a, b, c, d ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแถวตั้ง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองกับอุณหภูมิ พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นแบบพาราโบลาหงาย ตามสมการ 5.1 และรูปที่ 5.2 แสดงผลการคำนวณจากสมการเปรียบเทียบกับกราฟทดลอง

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = 995.4 + 2.441T + 0.04144T^2 \quad (R^2 = 0.882) \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.2 ความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C

5.1.4 ค่าสภาพนำความร้อน

จากการ calibrate probe ที่ประกอบขึ้นเพื่อใช้วัดค่าสภาพนำความร้อน ด้วย 0.4% agar พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองแตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ 1.49% ซึ่งน้อยกว่าค่าความผิดพลาดที่ Sweat และคณะ (1973) กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 4% (ภาคผนวก ก.2) จึงมั่นใจได้ว่า probe ที่ประกอบขึ้นมีความแม่นยำในการวัดค่าสภาพนำความร้อน และเมื่อนำ probe ที่ตรวจสอบแล้วมาใช้วัดค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดอง ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (0° ถึง 30°C) พบว่า มีค่าสภาพนำความร้อนอยู่ระหว่าง 0.528-0.548 W/m.K (ตารางที่ 5.3) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อสัตว์ที่มีความชื้นใกล้เคียงกัน เช่น เนื้อไก่, ปลา cod, salmon, surimi และอาหารทะเลอื่นๆ แต่มีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อสัตว์ที่มีความชื้นต่ำกว่า 75% (Sweat, และคณะ, 1973; Sanz และคณะ, 1987; Wang และ Kolbe, 1990; Rahman, Potluri และ Varamit, 1991) นอกจากนี้ค่าสภาพนำความร้อนยังขึ้นกับองค์ประกอบในอาหาร การเรียงตัวของเส้นใย ช่องว่าง (porosity) ที่มีอยู่ในอาหารที่ทำให้อาหารมีการนำความร้อนลดลง (Sweat, 1994)

ตารางที่ 5.3 ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C

อุณหภูมิ (°C)	ค่าสภาพนำความร้อน (W/m.K)
1±1	0.528±0.009 b
10±1	0.527±0.009 b
20±1	0.548±0.011 a
30±1	0.543±0.010 a

a, b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแถวตั้ง แยกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองกับอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นแบบสมการเส้นตรง (สมการ 5.2) โดยอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มค่าสภาพนำความร้อนน้อยมาก จึงประมาณค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C นี้มีค่าโดยเฉลี่ย 0.536 W/m.K

$$k \text{ (W/m.K)} = 0.526 + 0.0007T \quad (R^2 = 0.316) \quad (5.2)$$

สำหรับค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งในช่วง -5° ถึง -30°C (ตารางที่ 5.4) พบว่ามีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมากขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการแช่เยือกแข็งทำให้ส่วนของน้ำแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็ง (2.433 W/m.K ที่อุณหภูมิ -20°C) สูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนของน้ำ (0.5984 W/m.K ที่อุณหภูมิ 20°C) ถึง 4 เท่า (IIR, 1972; Fennema และคณะ, 1973) ดังนั้นค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองจึงเพิ่มตามสัดส่วนของน้ำแข็งที่สร้างขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิต่ำมีการสร้างผลึกน้ำแข็งสมบูรณ์กว่า ดังนั้นค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองจึงเพิ่มขึ้นจาก 1.124 เป็น 1.644 W/m.K เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก -5° ถึง -30°C และผลนี้ใกล้เคียงกับค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อไก่ ตับวัว เนื้อแกะ และ surimi (Sweat และคณะ, 1973 ; Barrera และ Zaritzky, 1983; Pham และ Willix, 1989; Wang และ Kolbe, 1990)

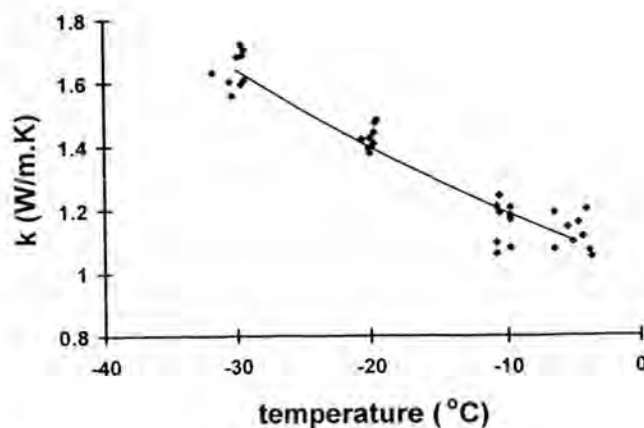
ตารางที่ 5.4 ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าสภาพนำความร้อน(W/m.K)
-5 ± 2	1.124 ± 0.054 c
-10 ± 1	1.158 ± 0.064 c
-20 ± 1	1.424 ± 0.036 b
-30 ± 1	1.644 ± 0.057 a

a, b, c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับกันในแถวตั้ง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

และเมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองกับอุณหภูมิ พบว่า สมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นแบบพาราโบลา (สมการ 5.3) และสามารถแสดงกราฟการคำนวณค่าสภาพนำความร้อนจากสมการกับค่าจากการทดลอง ดังรูปที่ 5.3

$$k \text{ (W/m.K)} = 1.0206 - 0.0147T + 0.0002T^2 \quad (R^2 = 0.919) \quad (5.3)$$



รูปที่ 5.3 ค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -5° ถึง -30°C

5.1.5 ค่าความร้อนจำเพาะ

จากการหาความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้น พบว่า แคลอรีมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง และแคลอรีมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง มีค่าความจุความร้อนเท่ากับ $12.01 \pm 1.08 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$ และ $19.54 \pm 1.81 \text{ cal/}^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยแคลอรีมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งได้ออกแบบป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนให้สิ่งแวดล้อม แต่แคลอรีมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งออกแบบป้องกันไม่ให้เกิดการรับความร้อนจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้คำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่างต่อไป

เมื่อนำแคลอรีมิเตอร์ที่ใช้หาค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ไปทดสอบหาความร้อนจำเพาะของสาร glycerine ซึ่งทราบค่าความร้อนจำเพาะคือ $0.576 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิ 32°C (Geankoplis, 1995) พบว่า วัดความร้อนจำเพาะจากการทดลองได้ $0.604 \pm 0.023 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ แตกต่างจากค่าที่รายงานไว้ 4.9% แสดงว่าแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นสามารถวัดความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง และผลการวัดค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C มีค่าอยู่ระหว่าง $0.884\text{--}0.914 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ (ตารางที่ 5.5) ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานของ Rahman (1993) ที่พบว่า ความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ $17 \pm 2^{\circ}\text{C}$ มีค่าเท่ากับ $0.858 \pm 0.021 \text{ cal/g.}^{\circ}\text{C}$ และค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนจำเพาะของแอปเปิ้ล, surimi ที่พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Ramaswamy และ Tung, 1981; Wang และ Kolbe, 1990) เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในอาหารมีค่าค่อนข้างคงที่ และน้ำยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C การเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของค่าความร้อนจำเพาะของอาหารในช่วงอุณหภูมินี้ อาจเนื่องมาจากปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งพบว่ามีค่าความร้อนจำเพาะของของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Mohsenin, 1980)

ตารางที่ 5.5 ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อนจำเพาะ (cal/g.°C)
1±1	0.884±0.011 c
10±1	0.897±0.008 b
20±1	0.905±0.008 ab
30±1	0.914±0.003 a

a, b, c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแถวตั้ง แยกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองกับอุณหภูมิ พบว่าสมการความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นแบบเส้นตรง แสดงดังสมการ 5.4

$$C_{pu} \text{ (cal/g.}^\circ\text{C)} = 0.8842 + 0.0010T$$

$$\text{หรือ } C_{pu} \text{ (J/kg.}^\circ\text{C)} = 3699.6 + 4.6 T \quad (R^2 = 0.691) \quad (5.4)$$

สำหรับแคลอรีมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ถูกทดสอบโดยนำไปหาค่าความร้อนของอาหารที่ทราบความร้อนจำเพาะ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เนื้อส่วนนอกของไก่ เนื่องจากมีความชื้นใกล้เคียง ปลาหมึกกระดอง จากการทดลองพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของเนื้อส่วนนอกของไก่ มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.596 และ 0.465 cal/g.°C ที่อุณหภูมิ -20°C และ -30°C ซึ่งแตกต่างจากค่าที่ Sanz และคณะ (1987) รายงานไว้ที่อุณหภูมิตีเดียวกัน คือ 2.1 และ 6.8% ตามลำดับ แสดงว่าแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นสามารถวัดค่าความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง และเมื่อนำแคลอรีมิเตอร์ไปวัดค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิ -10° ถึง -30°C พบว่า มีค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกที่อุณหภูมิ 0° ถึง 30°C และค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิ -10° ถึง -30 °C ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 5.6) ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิลดลง การสร้างของผลึกน้ำแข็งในปลาหมึกกระดองจะเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งน้อยกว่าน้ำ 2 เท่า (IIR, 1972; Fennema, 1997) ความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองจึงลดลงตามความร้อนจำเพาะของน้ำแข็งลง เช่นเดียวกับความร้อนจำเพาะของปลา cod ไตแกะ แอปเปิ้ล และ surimi ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (Riedel, 1956; Fleming, 1969; Ramawamy และ

Tung, 1981; Wang และ Kolbe, 1990) อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -10°C มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับความร้อนจำเพาะของเนื้อสัตว์ที่มีความชื้นใกล้เคียงกับปลาหมึก ได้แก่ ปลา cod ที่พบว่า มีค่าความร้อนจำเพาะ $1.300 \text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ที่อุณหภูมิ -9°C ซึ่ง Riedel (1956) วัดด้วย adiabatic calorimeter และจากรายงานของ Wang และ Kolbe (1990) พบว่า surimi มีค่าความร้อนจำเพาะ $0.851 \text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$ ที่ -10°C เมื่อวัดด้วย DSC การที่วัดค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองมีค่าสูงที่อุณหภูมิ -10°C นี้ อาจเนื่องจากการกำจัดความร้อนแฝงขณะเปลี่ยนสถานะ ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิ -1° ถึง -7°C (IIR, 1972; Singh; 1994) ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิสมมูลของสารตัวกลางในแคลอรีมิเตอร์ เช่นเดียวกับที่ Fleming (1969) พบในการวัดความร้อนจำเพาะของไตแกะโดยใช้ adiabatic calorimeter และพบว่าค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ -7°C มีค่าสูงมากและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 5.6 ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -10° ถึง -30°C

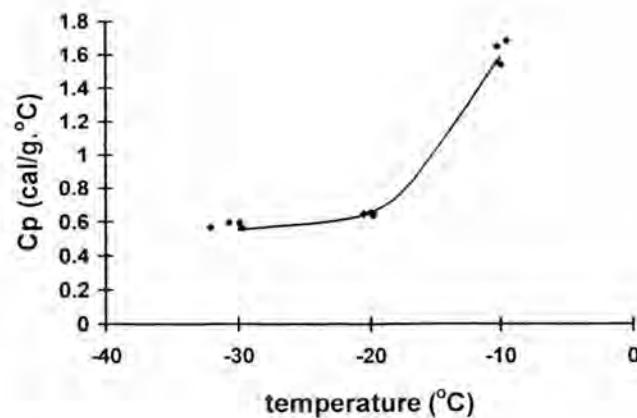
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความร้อนจำเพาะ ($\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$)
-10 ± 1	$1.602\pm 0.075 \text{ a}$
-20 ± 1	$0.645\pm 0.004 \text{ b}$
-30 ± 1	$0.576\pm 0.017 \text{ c}$

a, b, c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับกันในแถวตั้ง แยกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$)

จากการทดลองเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองกับอุณหภูมิ พบว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นแบบพาราโบลา (สมการ 5.5) กราฟสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากสมการกับการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.4

$$C_{pf} (\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}) = 3.3477 + 0.21765T + 0.00415T^2$$

$$\text{หรือ } C_{pf} (\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}) = 14000.7 + 910.7T + 17.1T^2 \quad (R^2 = 0.989) \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.4 ค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองที่อุณหภูมิ -10° ถึง -30°C

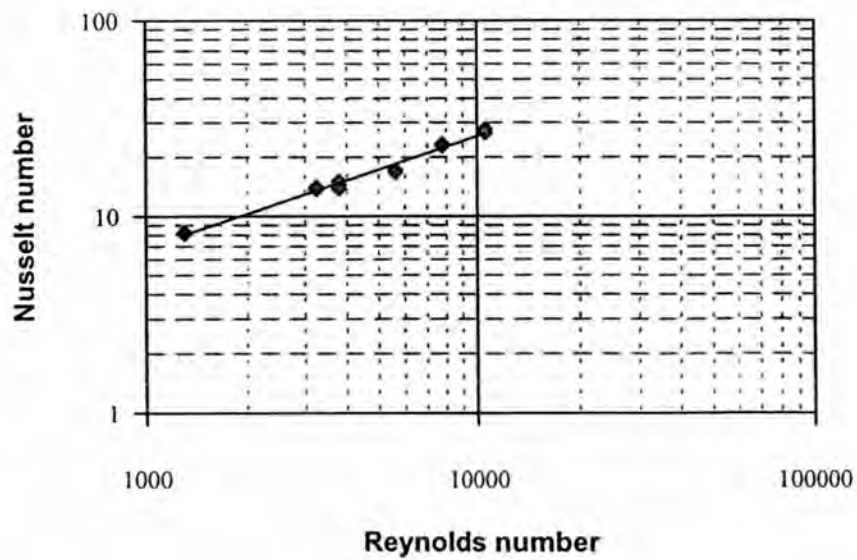
5.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว

ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวที่ความเร็วลมเย็นระดับต่างๆ ใน airblast freezer อุณหภูมิ $-27\pm 3^{\circ}\text{C}$ (ตารางที่ 5.7) พบว่า เมื่อความเร็วลมสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากการเพิ่มความเร็วลมมีผลให้อัตราเร็วการพาความร้อนของลมเย็นไปยังแผ่นอลูมิเนียมมากขึ้น อุณหภูมิที่ผิวของอลูมิเนียมจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้ความเร็วลมสูงแซ่เยือกแข็งอาหาร จะทำให้ freezing rate เพิ่มขึ้น (Singh, 1982; Kerr และคณะ, 1997) และเมื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวกับความเร็วลม ในเทอม Nusselt number (Nu) และ Reynolds number (Re) (ภาคผนวก ข) แสดงได้รูปที่ 5.5 โดย $Nu = hd_{al}/k_a$ และ $Re = \rho_a v d_{al}/\mu_a$ เมื่อ k_a , ρ_a , μ_a คือ ค่าสภาพนำความร้อนของอากาศ ความหนาแน่น และความหนืดของอากาศที่อุณหภูมิ -28°C ซึ่งเท่ากับ 0.02185 W/m.K , 1.4484 kg/m^3 และ $1.472 \times 10^{-5}\text{ kg/m.s}$ ตามลำดับ (Bayazitoglu และ Ozisik, 1988)

ตารางที่ 5.7 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวที่ความเร็วลมเป็นระดับต่างๆ

ความเร็วลม (m/s)	ค่าเฉลี่ย h ($W/m^2.K$)
1.2	14.93 ± 0.12 f
3.0	25.27 ± 0.37 e
3.5	28.65 ± 1.00 d
5.2	33.79 ± 0.51 c
7.2	49.50 ± 0.50 b
9.8	54.21 ± 1.50 a

a, b, c, d, e, f ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแถวตั้ง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



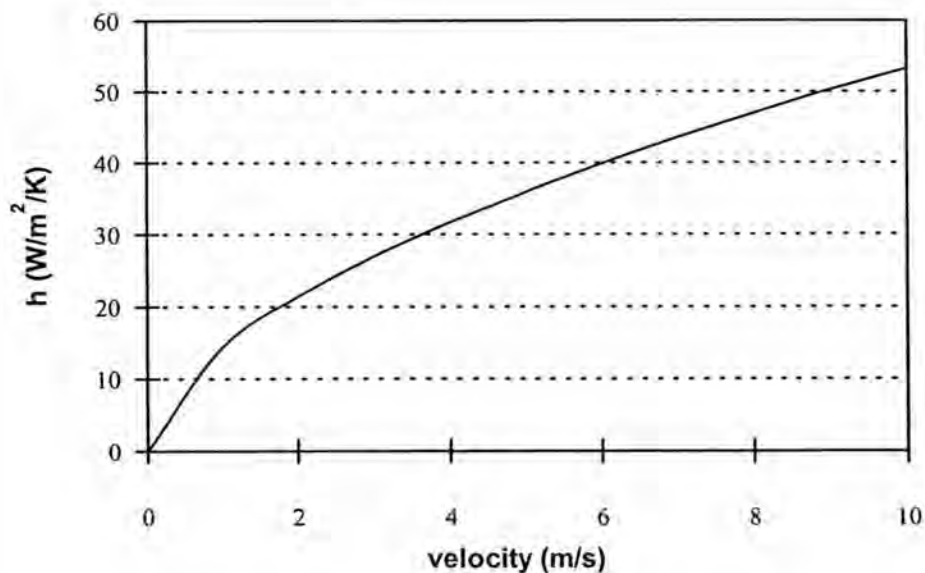
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของ Nusselt number กับ Reynolds number

จากการวิเคราะห์สมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Nusselt number (Nu) กับ Reynolds number (Re) พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดอยู่ในรูปสมการกำลัง (สมการ 5.6) เช่นเดียวกับรายงานของ Flores และ Mascheroni (1988) และ Kerr และคณะ (1997) นอกจากนี้ Flores และ Mascheroni (1988) ยังพบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวของอาหาร นอกจากขึ้นกับความเร็วลมแล้ว ยังขึ้นกับขนาด รูปร่างของอาหาร และการจัดเรียงอาหารใน เครื่องแช่เยือกแข็งอีกด้วย

$$Nu = 0.1378 Re^{0.5674} \quad (R^2 = 0.986) \quad (5.6)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสมการ 5.6 สามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว (สมการ 5.7) และแสดงดังรูปที่ 5.6

$$h = 14.421 v^{0.5674} \quad (5.7)$$



รูปที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนกับความเร็วลม

5.3 ผลการทำนายและการทวนสอบเวลาในการแช่เยือกแข็ง ปลาหมึกกระดองจากแบบจำลองต่าง ๆ และการทำนายการกระจายอุณหภูมิของปลาหมึกกระดอง ณ เวลาต่าง ๆ ขณะแช่เยือกแข็งโดยใช้แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้น

5.3.1 ผลการทำนายและการทวนสอบเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากแบบจำลองต่าง ๆ กับการทดลอง

ในการสร้างแบบจำลองเชิงเลขเพื่อคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจะต้องทราบค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตลอดการแช่เยือกแข็ง ซึ่งค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่วัดได้จากการทดลองได้ถูกนำมาใช้คำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็ง แต่สำหรับค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนในช่วงที่มีการเปลี่ยนสถานะ (จุดเยือกแข็งเริ่มต้นถึงอุณหภูมิ -5°C) ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจาก ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนในช่วงนี้มีความผันแปรสูง ไม่มีความแน่ชัดของข้อมูล งานวิจัยต่าง ๆ จึงนิยมใช้การทำนายจากสมการ หรือการประมาณค่า (approximate) (Bonacina, Comini และ Primecerio, 1973; Lind, 1992) Cleland และ Earle (1984a) ได้รายงานว่าการเลือกใช้ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำนายเวลาและการกระจายอุณหภูมิของอาหารที่เวลาต่าง ๆ ดังนั้นในงานวิจัยต่าง ๆ อาจมีการปรับหรือเลือกใช้ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่แตกต่างกัน แม้ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งอาหารชนิดเดียวกัน (Cleland และ Earle, 1984a ; Pham และ Willix, 1990) ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความแม่นยำใกล้เคียงกับการทดลอง สำหรับงานวิจัยนี้จึงพิจารณาค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.8 โดยค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง ใช้ค่าเฉลี่ยหรือค่าที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง สำหรับในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง -5° ถึง -30°C ใช้ค่าความหนาแน่น และค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองจากสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง ส่วนค่าความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งถึง -5°C ใช้ค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองที่ -5°C (985.5 kg/m^3) ทั้งนี้เนื่องจาก อุณหภูมิในช่วงจุดเยือกแข็งถึง -5°C จะมีอัตราการสร้างผลึกน้ำแข็งในอาหารสูง (IIR, 1972) ซึ่ง Rahman (1995) ได้รายงานว่าความหนาแน่นของน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -1° ถึง -5°C มีค่าค่อนข้างคงที่เท่ากับ $917\text{-}918\text{ kg/m}^3$ และต่ำกว่าความหนาแน่นของน้ำ (ที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ) 8% ค่าความหนาแน่นของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งถึง -5°C จึงลดลงตามความหนาแน่นของน้ำแข็ง สำหรับค่าสภาพนำความร้อนของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งถึง -5°C ได้ใช้หลักการประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) คำนวณจากสมการ $k = -0.147T + 0.389$ ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อปลา

ตารางที่ 5.8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งด้วยวิธีเชิงเลข

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ	
สัดส่วนความชื้นในปลาหมึกกระดอง	$X_{wo} = 0.8172$
สัดส่วนของแข็งในปลาหมึกกระดอง	$X_s = 0.1828$
จุดเยือกแข็งเริ่มต้น ($^{\circ}C$)	$T_{if} = -1.0$
สัดส่วนโดยมวลของ unfreezable water	
ต่อของแข็งในอาหาร	$b = 0.25$
ความหนาแน่น (kg/m^3)	ช่วงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
$\rho_u = 1050.75$	$T \geq T_{if}$
$\rho_f = 985.5$	$-5 \leq T < T_{if}$
$\rho_f = 995.4 + 2.4406T + 0.04144T^2$	$T \leq -5$
ค่าสภาพนำความร้อน ($W/m.K$)	ช่วงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
$k_u = 0.536$	$T \geq T_{if}$
$k_f = -0.147T + 0.389$	$-5 \leq T < T_{if}$
$k_f = 1.0206 - 0.0147T + 0.0002T^2$	$T \leq -5$
ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg.^{\circ}C$)	ช่วงอุณหภูมิ ($^{\circ}C$)
$C_{pu} = 3699 + 4.6025T$	$T \geq T_{if}$
$C_{pf} = C_{pu} - (X_w - X_b) \left[\frac{L_w T_{if}}{T} + \Delta C_p \right]$	$T < T_{if}$
เมื่อ $X_b = b X_s$	
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ($W/m^2.K$)	
$h = 14.421 v^{0.5674}$	
space step (m) และ time step (s)	
$\Delta x = 0.0005 \text{ m}$ $\Delta t = 0.25 \text{ s}$	$d < 0.01 \text{ m}$
$\Delta x = 0.001 \text{ m}$ $\Delta t = 1.0 \text{ s}$	$d \geq 0.01 \text{ m}$

และเนื้อแกะ (Sanz และคณะ, 1987; Pham และ Willix, 1989) ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของปลาหมึกกระดองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ใช้การคำนวณจากสมการซึ่ง Schwartzberg (1976) ได้พัฒนาขึ้น โดยค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนจำเพาะจากการทดลอง สำหรับค่าสัดส่วนโดยมวลของโดยมวลของ unfreezable water ต่อของแข็งในปลาหมึกกระดอง ที่ต้องใช้ในการคำนวณค่าความร้อนจำเพาะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.25 ซึ่ง Cleland และ Valentas (1997) ประมาณให้ใช้ในอาหารที่มีความชื้นสูง

ค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้นที่ใช้ในการ simulate โปรแกรมเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อความแม่นยำในการทำนาย เนื่องจากอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้นที่แน่ชัดไม่สามารถหาได้จากการทดลอง เช่นเดียวกับการหาค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้นในอาหารอื่น ๆ (Fennema และ คณะ, 1973; Rahman, 1995) อย่างไรก็ตาม IIR (1972), Pham (1996), Cleland และ Valentas (1997) ได้รายงานว่า จุดเยือกแข็งเริ่มต้นของเนื้อสัตว์ (lean meat) และอาหารสดที่มีความชื้นสูงมีค่าประมาณ -1.0°C ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาใช้ค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งเริ่มต้นเท่ากับ -1.0°C ซึ่งอยู่ในช่วงค่าอุณหภูมิจุดเยือกแข็งที่ได้จากการทดลอง -0.8° ถึง -1.5°C

ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยวิธีเชิงเลขจะต้องมีการกำหนด space step (Δx) และ time step (Δt) การกำหนดดังกล่าวเป็นไปตามเงื่อนไขของหลักการ explicit finite difference (Miyawaki และคณะ, 1989; Gerald และ Wheatley, 1994) ซึ่งกำหนดว่า $k_{\max} \Delta t / (\rho C_p)_{\min} \Delta x^2 \leq 1/2$ การกำหนด space step และ time step ตามเงื่อนไขนี้เคยใช้ในงานวิจัยของ Cleland และ Earle (1984) Mannapperuma และ Singh (1987) Wilson และ Singh (1987) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ถ้าใช้ตัวอย่างมีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.01 m จะกำหนดให้ space step 0.0005 m ซึ่งค่า time step ที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 0.25 s และเมื่อใช้ตัวอย่างมีความหนา 0.01 m ขึ้นไปจะกำหนดให้ space step 0.001 m ค่า time step ที่คำนวณได้มีค่าประมาณ 1 s เมื่อนำค่า space step ที่กำหนด และ time step ที่คำนวณได้ไปทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง พบว่าไม่ทำให้ผลลัพธ์ที่คำนวณได้เกิดการลู่ออก และเมื่อใช้ time step น้อยกว่าค่า time step ที่คำนวณได้ พบว่าให้ผลลัพธ์ทำนายเวลาได้เท่ากัน แต่ใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ time step เท่ากับ 0.25 s และ 1 s ที่ได้จากการคำนวณข้างต้น ซึ่งคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองได้รวดเร็วและแม่นยำ

สำหรับการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยใช้สมการอย่างง่าย การพิจารณาค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกที่ยังไม่แข็งตัว (unfrozen state) จะใช้ค่าเฉลี่ยของสมบัติทางกายภาพและความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 0° ถึง 30°C สำหรับในภาวะที่อาหารแข็งตัวแล้ว (frozen state) Cleland และ Earle (1984a), Cleland และ Valentas

(1997) รายงานว่า ควรใช้ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนในช่วงอุณหภูมิ -25°C ถึง -40°C เนื่องจาก อุณหภูมิในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของน้ำแข็งน้อย เพราะน้ำส่วนใหญ่กลายเป็นน้ำแข็ง สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่อุณหภูมิ -30°C สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิวหาได้จากสมการความสัมพันธ์จากการทดลอง ข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ข้อมูลทางความร้อนที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็ง โดยใช้สมการอย่างง่าย

ข้อมูลทางความร้อน	
สัดส่วนความชื้นในปลาหมึกกระดอง	$X_{wo} = 0.8172$
สัดส่วนของแข็งในปลาหมึกกระดอง	$X_s = 0.1828$
จุดเยือกแข็งเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{if} = -1.0$
สัดส่วนโดยมวลของ unfreezable water	
ต่อของแข็งในอาหาร	$b = 0.25$
ความหนาแน่นที่ภาวะไม่แข็งตัว (kg/m^3)	$\rho_u = 1050.75$
ความหนาแน่นที่ภาวะแข็งตัว (kg/m^3)	$\rho_f = 959$
ค่าสภาพนำความร้อนที่ภาวะไม่แข็งตัว ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	$k_u = 0.536$
ค่าสภาพนำความร้อนที่ภาวะแข็งตัว ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	$k_f = 1.644$
ความร้อนจำเพาะที่ภาวะไม่แข็งตัว ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	$C_{pu} = 3766$
ความร้อนจำเพาะที่ภาวะแข็งตัว ($\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	$C_{pf} = 2410$
ความร้อนแฝง (J/kg)	$L = 272945$
สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)	$h = 14.421 v^{0.5674}$

ผลการทำนายเวลาจากแบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้น เปรียบเทียบกับเวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 5.10 และเมื่อใช้แบบจำลองอย่างง่ายต่างๆ ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งเปรียบเทียบกับผลการทดลองให้ผลดังตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.10 ค่าเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากการทำนายโดย
ใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเชิงเลขกับการทดลอง

<i>run no</i>	<i>d</i> (m)	T_i (°C)	T_a (°C)	<i>v</i> (m/s)	<i>h</i> (W/m ² .K)	t_{exp} (min)	t_{num} (min)	ความผิดพลาด (%)
1	0.038	26.4	-27.5	8	46.93	390	355	-9
2	0.036	2.6	-27.1	5	35.94	341	335	-2
3	0.038	3	-28.5	4.5	33.86	390	353	-9.5
4	0.023	27.2	-26.8	9.8	52.65	170	176	4
5	0.024	9.7	-27.7	9.8	52.65	152	159	5
6	0.026	8.5	-27.8	9.8	52.65	178	174	-2
7	0.023	7.1	-28.3	5	35.94	186	189	2
8	0.014	27.1	-27.5	9.8	52.65	92	94	2
9	0.012	9.3	-28.4	9.8	52.65	64	67	5
10	0.012	7	-27.2	9.8	52.65	67	69	3
11	0.013	16.3	-28.4	9	50.17	78	80	3
12	0.013	26.4	-27.7	9	50.17	84	88	5
13	0.013	2.1	-29.8	4.5	33.86	92	93	1
14	0.014	1.2	-30.6	4	31.67	100	102	2
15	0.015	8.2	-28.5	4	31.67	123	129	5
16	0.014	3.9	-29	3.5	29.36	111	120	8
17	0.014	27.7	-28.2	4	31.67	138	138	0
18	0.013	3.4	-28.1	3.5	29.36	105	114	9
19	0.014	1.6	-28	3.5	29.36	123	122	-1
20	0.013	0.5	-27.8	3.5	29.36	108	113	5
21	0.012	27.4	-24	3.5	29.36	143	152	6
22	0.013	24.9	-28	3	26.90	137	146	7
23	0.013	24	-27.5	3	26.90	150	148	-1
24	0.013	9.5	-24.5	3	26.90	160	156	-2.5
25	0.014	8.7	-28.5	3	26.90	133	138	4
26	0.012	5.3	-29	1.2	15.99	177	178	1
27	0.008	26.2	-25.4	8	46.93	56	58	4
28	0.006	4.6	-26.3	8	46.93	36	36	0
29	0.007	5.4	-28.9	5	35.94	51	47	-8
30	0.008	5.2	-27.7	4.5	33.86	62	60	-3
31	0.007	26.2	-27.9	3	26.90	72	74	3
32	0.006	26	-28.8	3	26.90	66	71	8
33	0.006	8.3	-26.7	3	26.90	60	60	0
34	0.006	25.2	-30	1.2	15.99	90	95	6
35	0.005	3.4	-30.4	1.2	15.99	70	68	-3

ตารางที่ 5.11 ค่าเวลาในการแช่เยือกแข็งปลาหมึกกระดองจากการทำนายโดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายกับการทดลอง

run no	เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนาย (min)				ความผิดพลาด (%)			
	Plank (1941)	IIR (1972)	C-E (1984b)	M-Pham (1986b)	Plank (1941)	IIR (1972)	C-E (1984b)	M-Pham (1986b)
1	206	236	356	327	-47	-39	-9	-16
2	233	268	334	322	-32	-21	-2	-6
3	248	285	355	342	-36	-27	-9	-12
4	101	116	172	161	-41	-32	1	-5
5	103	119	156	150	-32	-22	2.4	-1
6	114	131	171	165	-36	-26	-4	-8
7	128	147	185	183	-31	-21	-0.4	-2
8	54	62	89	85	-42	-33	-3	-7
9	43	50	63	63	-32	-22	-2	-2
10	45	52	65	65	-32	-22	-3	-3
11	49	57	76	75	-37	-27	-3	-4
12	51	58	84	81	-40	-31	-0.4	-4
13	66	76	89	90	-28	-18	-3	-2
14	74	85	99	100	-26	-15	-1	-0.5
15	86	99	123	124	-30	-20	0	1
16	84	96	115	116	-25	-13	3	5
17	80	93	132	129	-42	-33	-4	-7
18	80	92	109	110	-24	-13	4	5
19	87	100	117	118	-30	-19	-5	-4
20	80	93	108	108	-26	-14	-0.4	0.5
21	86	99	142	137	-40	-31	-0.5	-4
22	86	99	138	136	-37	-27	1	-0.5
23	88	101	140	139	-42	-34	-8	-9
24	99	114	144	146	-38	-29	-10	-9
25	92	106	131	133	-31	-20	-1	0
26	124	142	169	174	-30	-20	-5	-2
27	34	39	55	54	-39	-30	-1	-4
28	24	28	33	34	-34	-24	-8	-6
29	33	38	45	46	-36	-26	-12	-10
30	42	48	58	59	-33	-22	-7	-5
31	45	51	71	71	-38	-29	-1	-2
32	37	42	58	58	-44	-36	-12	-12
33	40	46	56	57	-34	-24	-7	-4
34	58	67	91	92	-35	-26	-1	2
35	48	55	63	65	-32	-22	-10	-6

C-E (1984b): Cleland และ Earle (1984b)

M-Pham (1986b): แบบจำลองของ Pham (1986b) ที่ดัดแปลงเพิ่มเติมโดย Cleland (1991) และ Hossain และคณะ (1992)

จากผลการทดลองเมื่อคำนวณความผิดพลาดโดยทางสถิติระหว่างเวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายโดยวิธีต่างๆ กับเวลาจากการทดลอง แสดงผลได้ดังตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ร้อยละความผิดพลาดทางสถิติ เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทำนายโดยวิธีต่างๆ

ความผิดพลาด (%)	แบบจำลองที่สร้างขึ้น	Plank (1941)	IIR (1972)	C-E (1984b)	M-Pham (1986b)
ค่าเฉลี่ย	1.5	-34.6	-24.8	-3.3	-4.1
ค่าเบี่ยงเบน	4.5	5.7	6.5	4.2	4.5
ค่าสูงสุด	9	-24	-13	4	5
ค่าต่ำสุด	-9.5	-47	-39	-12	-16

จากการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยวิธีเชิงเลข พบว่า สามารถทำนายเวลาได้แม่นยำน่าพอใจ โดยมีความผิดพลาดเฉลี่ย 1.5% เนื่องจากการคำนวณจะใช้ข้อมูลสมบัติทางกายภาพและความร้อนของปลาหมึกกระดองที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดทุกอุณหภูมิ และค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนส่วนใหญ่เป็นค่าจากการทดลอง ส่วนการทำนายค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งใช้สมการทำนาย สำหรับอาหารที่มีความชื้นสูงซึ่งเหมาะกับปลาหมึกกระดอง ผลการทำนายจากงานวิจัยนี้ให้ความแม่นยำเช่นเดียวกับการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง tylose มันฝรั่ง และอาหารประเภทเนื้อสัตว์ (Cleland และ Earle, 1977a, 1977b; Mannaperruma และ Singh, 1987; Pham และ Willix, 1990) ถั่วลิ้นเต่า (Wilson และ Singh, 1987) ที่พบว่ามีความผิดพลาดน้อยกว่า 10% สำหรับงานวิจัยของ Saad และ Scott (1997) ทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งปลา Cod แม่นยำ และพบว่า ความแม่นยำในการทำนายขึ้นกับรูปแบบสมการ finite difference และขึ้นกับ time step และ space step ด้วย

จากผลการใช้สมการอย่างง่ายคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็ง พบว่าแบบจำลองของ Plank (1941) มีความผิดพลาดจากการทำนายสูง โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย -34.6% และทำนายเวลาได้น้อยกว่าจากการทดลอง ความผิดพลาดจากการทำนายโดยใช้สมการ Plank (1941) นี้มีสาเหตุมาจาก ข้อจำกัดในสมมติฐานของสมการ Plank (1941) คือ อาหารต้องมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่จุดเยือกแข็งเริ่มต้น น้ำกลายเป็นน้ำแข็งที่จุดเยือกแข็ง ความหนาแน่นและค่าสภาพนำความร้อนไม่มีการเปลี่ยนแปลงขณะแช่เยือกแข็ง และในสมการคำนวณแอนทาลปีเฉพาะความร้อนแฝง ไม่รวมถึงความร้อนสัมผัสในระยะ precooling

และ tempering ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารสูงขึ้นความผิดพลาดในการทำนายจึงสูงขึ้น ซึ่งพบเช่นเดียวกับรายงานวิจัยของ Hung และ Thompson (1983) Pham (1984) LeBlance และคณะ (1990b) ในแบบจำลองของ IIR (1972) มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับสมมติฐานในแบบจำลองของ Plank (1941) แต่พิจารณาเอนทัลปีในระยะ phase change และ tempering แต่ไม่รวมความร้อนสัมผัสในระยะ precooling จึงให้ความผิดพลาดน้อยกว่าแบบจำลองของ Plank (1941) คือ -24.8% และเมื่ออาหารมีอุณหภูมิเริ่มต้นต่ำหรือเข้าใกล้จุดเยือกแข็ง แบบจำลองของ Plank (1941) และ IIR (1972) จะให้ความผิดพลาดจากการทำนายลดลง แต่อย่างไรก็ตามผลเวลาที่ได้จากการทำนายในแบบจำลองของ Plank (1941) และ IIR (1972) มีค่าต่ำกว่าค่าเวลาจากการทดลองมาก ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติเนื่องจาก เวลาที่ได้จากการคำนวณไม่เพียงพอที่ทำให้อาหารแข็งตัวและมีอุณหภูมิลดลงถึง -18°C ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์หรือปฏิกิริยาเคมีได้ ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ส่วนการใช้แบบจำลองของ Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลองของ Pham (1986b) ที่ดัดแปลงเพิ่มเติมโดย Cleland (1991) และ Hossain และคณะ (1992) พบว่า ความผิดพลาดน้อยกว่าแบบจำลองของ Plank (1941) และ IIR (1972) และมีความผิดพลาดใกล้เคียงกัน คือ -3.3 และ -4.1% ตามลำดับ เนื่องจากแบบจำลองนี้ได้มีการพัฒนาให้ใช้ได้ในช่วงที่กว้างขึ้น คำนวณเอนทัลปีทั้งก่อนและหลังจุดเยือกแข็ง โดยในแบบจำลองที่ Cleland และ Earle (1984b) สร้างขึ้น มีการศึกษาตัวแปรไว้หน่วย และหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ จากการทดลองโดยตรง จึงให้ความแม่นยำในการทำนายสูง สำหรับแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) ซึ่งมีรูปแบบสมการง่าย สามารถทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งได้แม่นยำเช่นกัน เนื่องจากมีการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ มากขึ้น เช่น จุดเยือกแข็งเฉลี่ย รวมทั้ง geometric factor ของอาหารภาวะที่ใช้ในการคำนวณจึงใกล้เคียงกับภาวะแช่เยือกแข็งจริง ความแม่นยำในการทำนายจึงสูงขึ้น

จากการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งโดยใช้แบบจำลองต่างๆ ความผิดพลาดนอกจากเกิดจากข้อจำกัดจากสมมติฐานของแบบจำลองจากเหตุผลข้างต้นแล้ว อาจมีความผิดพลาดมาจากการไม่สามารถวัดความหนาของปลาหมึกกระดองให้มีความละเอียดสูงได้ และความหนาของปลาหมึกอาจจะไม่เท่ากันตลอดชิ้น (แม้พยายามควบคุมแล้ว) รวมทั้งขณะแช่เยือกแข็ง มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในปลาหมึกกระดองไปเป็นน้ำแข็ง ซึ่งน้ำแข็งมีปริมาตรสูงกว่าน้ำ (Fennema, 1997) จึงมีผลให้เกิดการขยายตัว ความหนาของปลาหมึกกระดองจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งพบเช่นเดียวกับการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็ง tylose, มันฝรั่ง และเนื้อสัตว์ (Hung และ Thompson, 1983; Mittal และคณะ, 1993) การพิจารณาใช้ความหนาในการคำนวณจึงมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายด้วย ซึ่งการใช้ความหนาในการคำนวณเบี่ยงเบนไปเพียง 0.001 m ทำให้ค่าเวลาในการแช่เยือกแข็งที่คำนวณได้มีความ

แตกต่างกันมาก เช่น ตัวอย่างใน run no 17 ($d = 0.014$ m, $T_i = 27.7^\circ\text{C}$, $T_a = -28.2^\circ\text{C}$, $v = 4$ m/s) ถ้าใช้ความหนาเบี่ยงเบนไป 0.001 m ทำให้ผลการทำนายเวลาในการแช่เยือกแข็งแตกต่างกัน $\pm 8\%$, $\pm 9\%$, $\pm 7.5\%$, $\pm 8.3\%$, และ $\pm 7.7\%$ ในแบบจำลองเชิงเลข แบบจำลองอย่างง่ายของ Plank (1941), IIR (1972), Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) ตามลำดับ นอกจากนี้ในส่วนของปลาหมึกกระดองมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียว เนื่องจาก ปลาหมึกกระดองที่ใช้ในการทดลองเป็นปลาหมึกสดไม่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียว โดยในปลาหมึกจะมีเส้นใยกล้ามเนื้อ 2 กลุ่ม คือ เส้นใยกล้ามเนื้อตามแนวเส้นรอบวงและเส้นใยกล้ามเนื้อตามแนวรัศมี ซึ่งเรียงตัวไขว้กัน (พิชญ์อร วนาอินทรายุช, 2536) โดยความผิดพลาดจะเห็นได้ชัด เมื่อใช้ตัวอย่างที่มีความหนามากขึ้นและนำขึ้นปลาหมึกกระดองมาวางซ้อนกัน โดยในบางการทดลองไม่สามารถซ้อนกันให้สนิทได้ ดังนั้นผิวหน้าของปลาหมึกกระดองแต่ละชิ้นอาจมีอากาศอยู่ ซึ่งจะเป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้ตัวอย่างมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวมากขึ้น และอากาศมีสมบัติเป็นฉนวนในการนำความร้อน ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนช้าลง จึงต้องใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งจากการทดลองมากขึ้น ผลการทำนายเวลาที่ได้จึงมีค่าน้อยกว่าการทดลอง โดยความผิดพลาดนี้มีค่าสูงและเห็นได้ชัดในการทดลองที่ให้ตัวอย่างที่มีความหนา 0.036 - 0.038 m

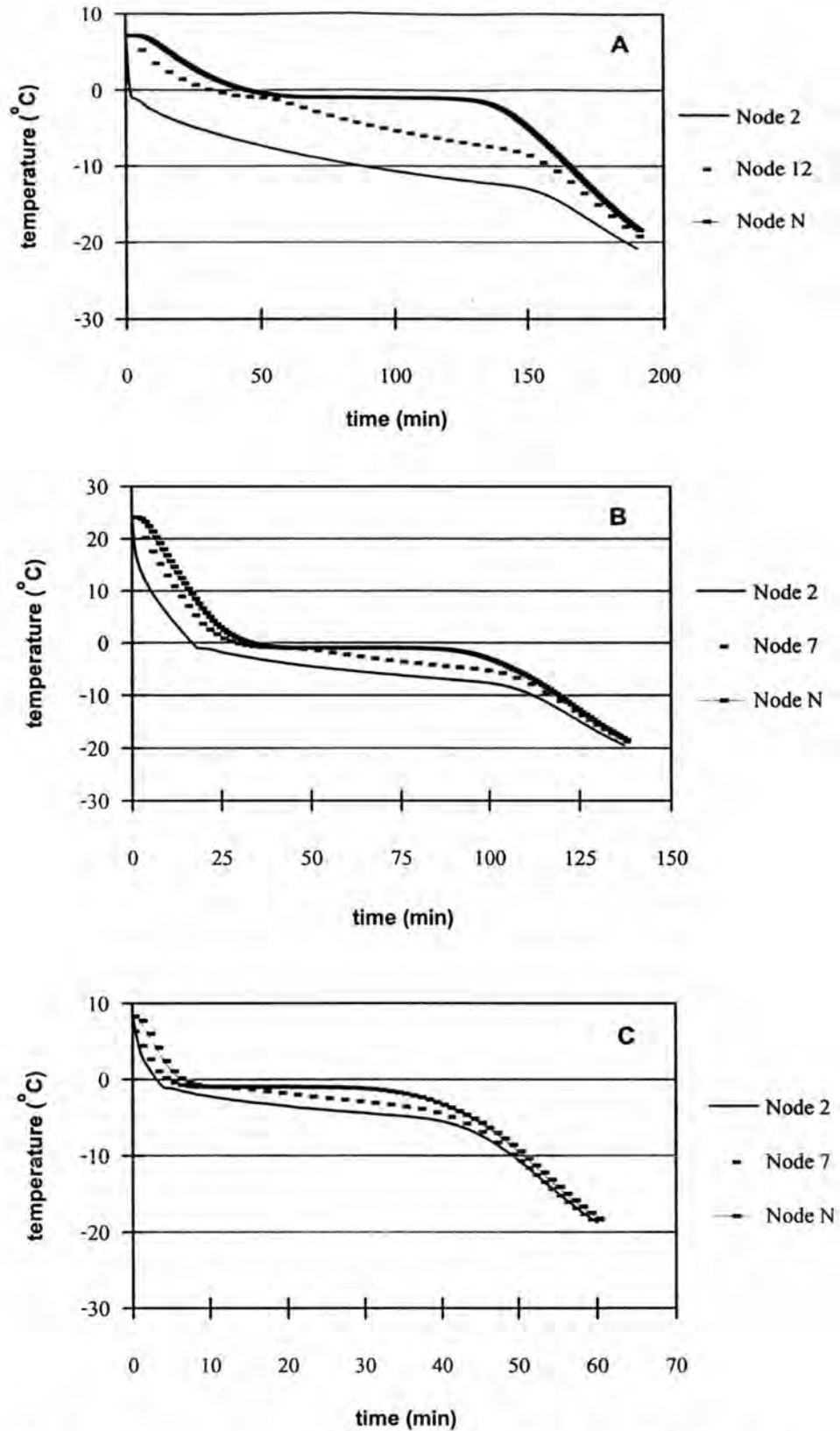
นอกจากนี้การไม่ทราบภาวะการแช่เยือกแข็งที่แน่ชัด เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาด เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ผิว ซึ่งไม่ได้วัดจากตัวอย่างโดยตรง แต่เป็นค่าประมาณโดยใช้ metal transducer แทนอาหาร ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความจริง และในส่วนของ การควบคุมอุณหภูมิลมเย็น ไม่สามารถควบคุมให้อุณหภูมิคงที่ตลอดขณะแช่เยือกแข็งได้ เนื่องจาก มีการเปิดตู้แช่เยือกแข็งขณะนำตัวอย่างเข้าแช่เยือกแข็ง ทำให้อุณหภูมิลมเย็นเปลี่ยนแปลง (fluctuation) และการควบคุมอุณหภูมิลมเย็นใน airblast freezer จะมีความยุ่งยากกว่าเครื่องแช่เยือกแข็งแบบอื่นๆ (Cleland, 1990) ค่าที่นำมาใช้คำนวณในแบบจำลองเป็นอุณหภูมิลมเย็นโดยเฉลี่ย จึงอาจจะมีผลต่อความแม่นยำในการทำนายได้

สำหรับค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อนที่ได้จากการทดลองหรือใช้ทำนายอาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง เนื่องจากปลาหมึกกระดองที่นำมาทดลองย่อมมีความผันแปรของความชื้น ปริมาณของแข็ง การเรียงตัวของกล้ามเนื้อ ความสด ซึ่งมีผลต่อค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อน โดยเฉพาะค่าเอนทาลปี และความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยการคำนวณเวลาในการแช่เยือกแข็งในแบบจำลองต่างๆ ต้องคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะ ความร้อนแฝง เอนทาลปี ซึ่งใช้ค่าความชื้นเฉลี่ยจากการทดลองมาคำนวณหา ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะ ความร้อนแฝง เอนทาลปีที่ได้จากการคำนวณอาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าความร้อนจำเพาะ ความร้อนแฝง เอนทาลปีของปลาหมึกกระดองจริงๆ ทำให้ผลการทำนายมีความผิดพลาดได้

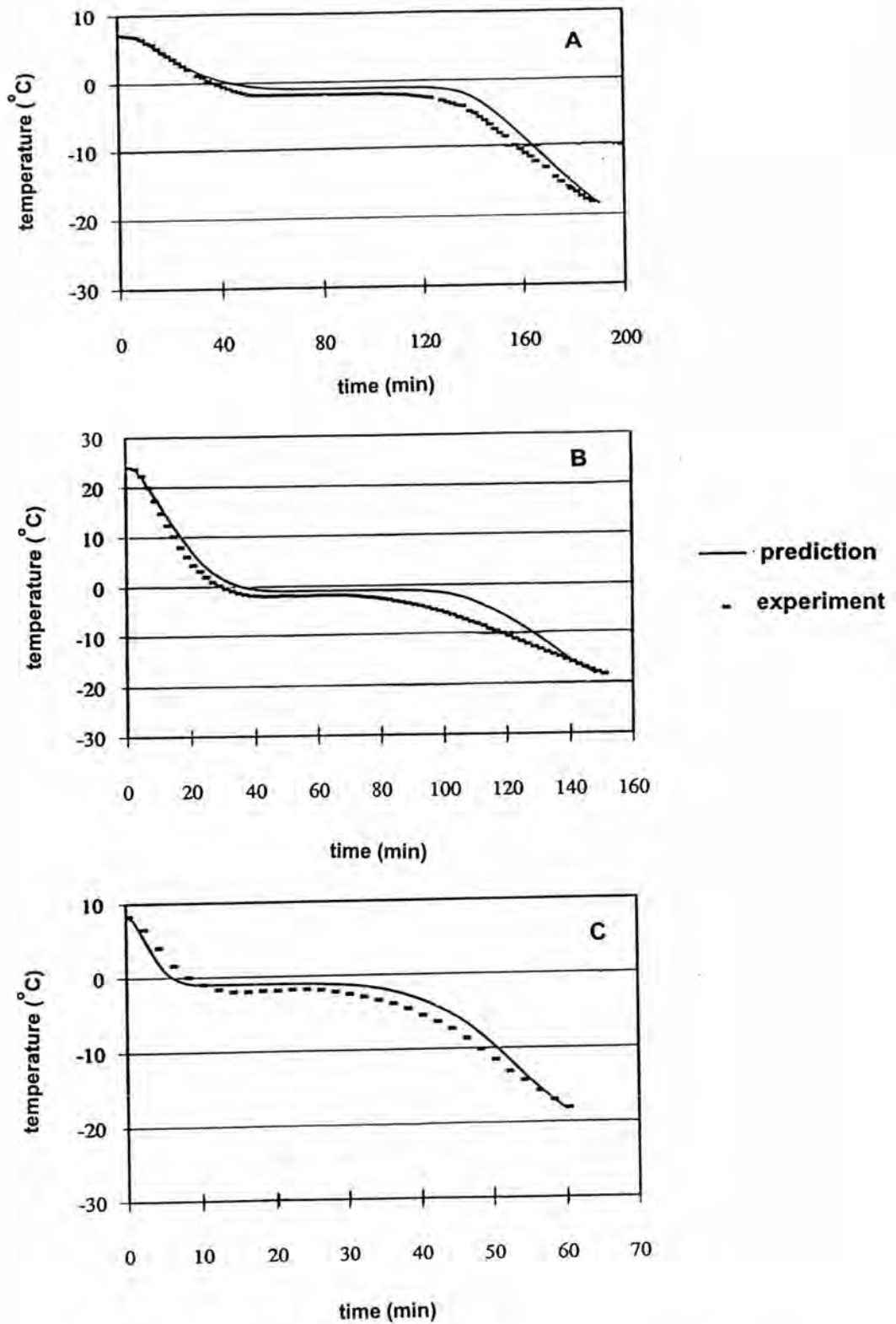
อย่างไรก็ตามเมื่อประเมินสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการ ทำนายดังข้างต้น โดยความผิดพลาดจากสาเหตุหนึ่งๆ อาจเสริมกันหรือหักล้างกัน ซึ่งจากผล การวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้น แบบจำลองของ Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) ให้ความแม่นยำโดยมี ความผิดพลาดน้อยกว่า 10% ซึ่งเป็นความแม่นยำทางวิศวกรรมในระดับที่ดี ที่คาดหวังให้มี ได้ โดยแบบจำลองที่สร้างด้วยวิธีเชิงเลขมีช่วงความผิดพลาด คือ -9.5% ถึง 9% และค่า เวลาที่คำนวณได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าค่าเวลาแท้จริงจากการทดลองเล็กน้อย และมาก กว่าเวลาที่ได้จากการคำนวณในแบบจำลองของ Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลอง ที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b) โดยแบบจำลองอย่างง่ายทั้ง 2 แบบ คำนวณเวลาในการ แช่เยือกแข็งได้น้อยกว่าการทดลอง ดังนั้นเมื่อพิจารณานำไปใช้ในอุตสาหกรรมปลาหมึกแช่ เยือกแข็งหรือในทางปฏิบัติ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงคุณภาพอาหารและความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ด้วย แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้นจะมีความเหมาะสมในการใช้ทำนายเวลามากกว่า เนื่องจากการแช่เยือกแข็งในทางปฏิบัติมักเกิด fluctuation ในอาหาร ไม่สามารถควบคุมภาวะ การแช่เยือกแข็งได้ตามต้องการ และมักมีการเปิดปิดตู้แช่เยือกแข็ง การใช้เวลาที่คำนวณได้ จากแบบจำลองเชิงเลข ซึ่งให้ผลมากกว่าเวลาการทดลองเล็กน้อยจะมีผลดีต่อคุณภาพ อาหารที่เพิ่มความมั่นใจได้ว่าอาหารมีอุณหภูมิสุดท้ายใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการ และมีการ สร้างผลึกน้ำแข็งได้สมบูรณ์กว่าการแช่เยือกแข็งที่ใช้เวลาในการแช่เยือกแข็งในแบบจำลองของ Cleland และ Earle (1984b) และแบบจำลองที่ถูกดัดแปลงของ Pham (1986b)

5.3.2 การทำนายการกระจายอุณหภูมิของปลาหมึกกระดอง ณ เวลาต่าง ๆ ขณะ แช่เยือกแข็งโดยใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยวิธีเชิงเลข

แบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้นสามารถคำนวณการกระจายอุณหภูมิของ ปลาหมึกกระดองที่ตำแหน่งต่างๆ ขณะแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างในบางการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.7 และเมื่อเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิของตำแหน่งที่มีการถ่ายโอนความร้อนช้าที่ สุดจากแบบจำลองเชิงเลขกับการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 การทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่ง node ต่างๆ ในชั้นปลาหมึก
 กระดอง (A) $d = 0.023$ m, $T_i = 7.1^\circ\text{C}$, $T_a = -28.3^\circ\text{C}$, $v = 5$ m/s
 (B) $d = 0.013$ m, $T_i = 24^\circ\text{C}$, $T_a = -27.5^\circ\text{C}$, $v = 3$ m/s (C) $d = 0.006$ m,
 $T_i = 8.3^\circ\text{C}$, $T_a = -26.7^\circ\text{C}$, $v = 3$ m/s



รูปที่ 5.8 การทำนายการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวล่างซึ่งมีการถ่ายโอนความร้อนชั่วที่สุดของปลาหมึกกระดองกับผลจากการทดลอง
 (A) $d = 0.023$ m, $T_i = 7.1^\circ\text{C}$, $T_a = -28.3^\circ\text{C}$, $v = 5$ m/s (B) $d = 0.013$ m, $T_i = 24^\circ$, $T_a = -27.5^\circ\text{C}$, $v = 3$ m/s (C) $d = 0.006$ m, $T_i = 8.3^\circ\text{C}$, $T_a = -26.7^\circ\text{C}$, $v = 3$ m/s

จากรูปที่ 5.8 ผลการทำนายอุณหภูมิจากแบบจำลองเชิงเลขที่สร้างขึ้นกับการทดลอง ยังมีความแตกต่างกันบ้าง โดยความแตกต่างส่วนใหญ่มักมีมากในช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสถานะของน้ำ ทั้งนี้สาเหตุหลักเนื่องมาจากการไม่ทราบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนของอาหารในระยะ phase change ที่แน่ชัด ความคลาดเคลื่อนจากการทำนายอุณหภูมินี้พบเช่นเดียวกับรายงานวิจัยอื่นๆ (Wilson และ Singh, 1987; Manapperuma และ Singh, 1988; Saad และ Scott, 1997) แต่อย่างไรก็ตามผลการทำนายอุณหภูมินี้ ทำให้ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และระยะของการแช่เยือกแข็งอาหาร (precooling, phase change หรือ tempering) ซึ่งการทำนายอุณหภูมิจะมีความแม่นยำได้ถ้าทราบค่าสมบัติทางกายภาพและความร้อน รวมทั้งภาวะการแช่เยือกแข็งที่ชัดเจนขึ้น (Tao, 1975; Hsieh และคณะ 1977; Cleland และ Earle, 1984a)