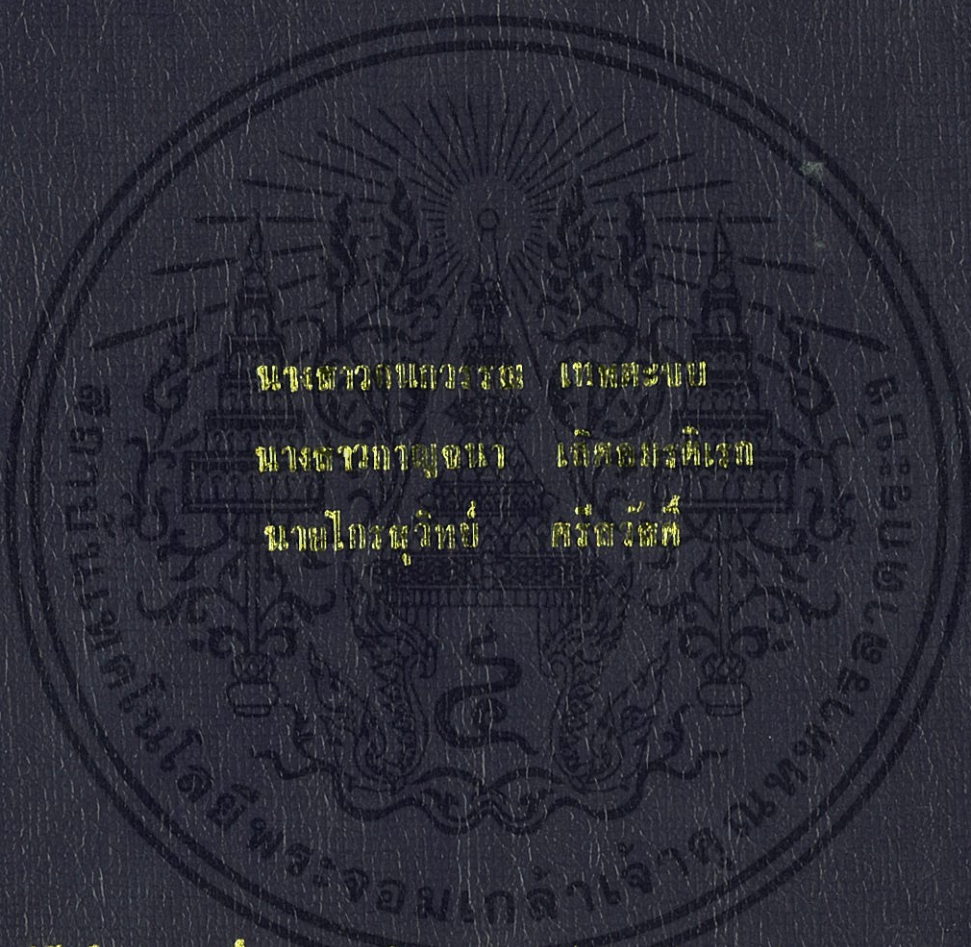


การพัฒนาระบบการผลิตน้ำพริกหน่อกุ้งคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและถุงพาส

PROCESS DEVELOPMENT OF PREMIUM QUALITY  
CANNED AND POUCHED WHAI RED CURRY PASTE



นางสาวกมลวรรณ วัฒนสุชาติ

เนติศาสตร์

นางสาวกัญญา วัฒนสุชาติ

เกษตรศาสตร์

นายไกรสร วัฒนสุชาติ

เศรษฐศาสตร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยคณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและถุงแพซ

PROCESS DEVELOPMENT OF PREMIUM QUALITY  
CANNED AND POUCHED THAI RED CURRY PASTE



T104200

นางสาวกนกวรรณ เทพตะขบ

นางสาวกาญจนา เตีตอมรดิเรก

นายไกรสุวิทย์ ศรีสวัสดิ์

๒๒๗.  
ก125ก  
2551

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...104200...  
วัน,เดือน,ปี...3..๑..๗..ค..2552



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและถุงแพซ

PROCESS DEVELOPMENT OF PREMIUM QUALITY CANNED AND  
POUCHED THAI RED CURRY PASTE

ผู้จัดทำ

นางสาวกนกวรรณ เทพตะขบ

นางสาวกาญจนา เลิศอมรดิเรก

นายไกรสูวิทย์ ศรีสวัสดิ์



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและ ถุงพาส์	
นักศึกษา	นางสาวกนกวรรณ	เทพตะขบ
	นางสาวกาญจนา	เลิศอมรดิเรก
	นายไกรสุวิทย์	ศรีสวัสดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา ปริญญานิพนธ์	ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2551	

### บทคัดย่อ

น้ำพริกแกงแดงเป็นส่วนประกอบหลักในอาหารไทยหลายชนิด มีประโยชน์ต่อร่างกายสามารถเก็บรักษาได้นานในภาชนะปิดผนึกโดยผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่เหมาะสม เป้าหมายของโครงการนี้คือ การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงพาส์ โดยใช้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) ซึ่งมีค่า  $D_{121.1^\circ C}$  และ Z เท่ากับ -381.25 นาที และ  $186.017^\circ C$  เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงพาส์ เมื่อประเมินความถูกต้อง มีค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ 2.7536 และ  $0.3029^\circ C$  และเมื่อประเมินคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงหลังการให้ความร้อนที่ทำนายเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง 13 สภาวะ พบว่า มีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก (SE เฉลี่ย เท่ากับ 2.24 %RSA) ดังนั้นหากต้องการผลิตน้ำพริกแกงแดงที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูง ควรเลือกใช้อุณหภูมิฆ่าเชื้อที่ต่ำกว่า  $120^\circ C$  เนื่องจากใช้เวลาในการฆ่าเชื้อนาน การเพิ่มระยะเวลาในการฆ่าเชื้อในช่วงอุณหภูมินี้ หรือการเพิ่ม  $F_0$  จะมีผลต่อ ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH อย่างมาก

**Project Title** PROCESS DEVELOPMENT OF PREMIUM QUALITY CANNED AND POUCHED THAI RED CURRY PASTE

**Student** Miss Kanokwan Teptakhob  
Miss Kanjana Lert-a-morndireak  
Mr. Kraisuwit Srisawat

**Project Advisor** Assistant Professor Dr. Pimpen Pornchaloempong

**Project for** Bachelor Degree in Food Engineering  
Department of Food Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2008

### ABSTRACT

Red curry paste, an essential ingredient in many Thai dishes, contains several herbs and spices well known for their health benefits. For preserving, it was thermally processed in hermetically sealed container. This study aims to find the optimum thermal processing conditions for producing premium quality canned and pouched Thai red curry paste. The  $D_{121.1^{\circ}C}$  and Z value of antioxidant activity, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) in the paste were found to be -381.25 min. and  $186.017^{\circ}C$  and used as a key quality attribute. The Finite difference describing conduction heat transfer in cylindrical can and retortable pouch were developed and validated. The models were satisfactory predicted temperature giving average SE of  $2.7536$  and  $0.3029^{\circ}C$ . The predicted DPPH of the pasted after 13 processing conditions were good agreed with the experimental (SE. 2.24 %RSA). For achieving high DPPH value, processing temperature lower than  $120^{\circ}C$  should be used. In addition, longer processing time or increasing  $F_0$  value within this temperature range also increase the DPPH value.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและอนุเคราะห์จากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย สำหรับคำแนะนำในการปฏิบัติงาน ทุนในงานวิจัย ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิด จนงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

อาจารย์มธุรดา จิโนรส และ อาจารย์กิตติศักดิ์ วิธินันทกิตต์ สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

อานาจ คุณตะคุ (พี่แมน), วราภรณ์ มาไพศาลทรัพย์ (พี่นุ้ย) และ วรณิภา ฉัตรอุทัย (พี่ต๋ม) ที่ช่วยเหลือในเรื่องการเบิกจ่ายอุปกรณ์และการทำการทดลอง

บุญนำ ผลโพธิ์ (พี่น้ำ) ที่ช่วยเหลือในเรื่องการเบิกงบประมาณ พี่ๆ ชมรมสร้างสรรค์ชีวิต (Modern life club) ที่ช่วยเหลือในเรื่องการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจัดทำรูปเล่มเอกสารต่างๆ

เพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยดูแลและอยู่เคียงข้างเราเสมอ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ข
สารบัญรูปภาพ	ค
รายการสัญลักษณ์	ง
บทที่ 1 ตรวจเอกสาร	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายอุณหภูมิภายใน กระป๋องและถุงพោซ์และการทดสอบความถูกต้อง	4
2.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิภายใน	4
2.2 ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	55
2.3 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	59
บทที่ 3 การประเมินคุณภาพน้ำพริกแกงแดงหลังให้ความร้อน	66
3.1 หาค่าจลนพลศาสตร์ (D และ Z value) ของสารในน้ำพริกแกงแดง เมื่อได้รับความร้อน	66
3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการประเมินคุณภาพ น้ำพริกแกงแดงหลังการให้ความร้อน	70
3.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนาย การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง	70
3.4 สภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงพោซ์	71
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง	75
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	77
ภาคผนวก ข.	89
ภาคผนวก ค.	114
บรรณานุกรม	116

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ ซึ่งนำข้อมูลมาจากการทดลองของมรด และคณะ (2549) เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทรงกระบอก	56
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ที่ได้จากการทดลองและการทำนายในสภาวะต่างๆ สำหรับน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง	59
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายในสภาวะต่างๆ (อะคริลิก ขนาด 80×165×20 mm.)	62
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายในสภาวะต่างๆ (อะคริลิก ขนาด 130×165×20 mm.)	63
ตารางที่ 3.1 แสดงสมการเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของคุณภาพกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ	67
ตารางที่ 3.2 ค่า D-value ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH	68
ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH หลังการให้ความร้อน และแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและการทดลองจริงของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องที่สภาวะต่างๆ	71
ตารางที่ 3.4 แสดงค่า DPPH(%RSA), N/N <sub>0</sub> (%) และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนที่ค่า Fo และอุณหภูมิต่างๆ ของกระป๋องขนาดครึ่งมี 37.5 mm. ความสูง 35 mm. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C	72
ตารางที่ 3.5 แสดงค่า DPPH(%RSA), N/N <sub>0</sub> (%) และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนที่ค่า Fo และอุณหภูมิต่างๆ ของถุงพោซ์ขนาด 140 x 10 x 110 mm. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C	72
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณสารในน้ำพริกแกงแดงที่ผ่านการให้ความร้อน	77
ตารางที่ ก.2 ค่าสีในน้ำพริกแกงแดงโดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ	81
ตารางที่ ก.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ	84
ตารางที่ ก.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด(TPC), ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ(%RSA) และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ	87

## สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพ 3 มิติ ของทรงกระบอกตัดขวาง	5
รูปที่ 2.2 ภาพหน้าตัดแสดงตำแหน่ง Node ในปริมาตรควบคุม บนพื้นที่หน้าตัดขวางของทรงกระบอก	5
รูปที่ 2.3 Node ประเภท A	7
รูปที่ 2.4 Node ประเภท B	8
รูปที่ 2.5 Node ประเภท C	9
รูปที่ 2.6 Node ประเภท D	11
รูปที่ 2.7 Node ประเภท E	12
รูปที่ 2.8 Node ประเภท F	13
รูปที่ 2.9 Node ประเภท G	15
รูปที่ 2.10 Node ประเภท H	17
รูปที่ 2.11 Node ประเภท I	19
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการแบ่งปริมาตรควบคุมวัตถุของทรงสี่เหลี่ยม	21
รูปที่ 2.13 Node ประเภท 1	23
รูปที่ 2.14 Node ประเภท 2	24
รูปที่ 2.15 Node ประเภท 3	25
รูปที่ 2.16 Node ประเภท 4	26
รูปที่ 2.17 Node ประเภท 5	27
รูปที่ 2.18 Node ประเภท 6	28
รูปที่ 2.19 Node ประเภท 7	29
รูปที่ 2.20 Node ประเภท 8	30
รูปที่ 2.21 Node ประเภท 9	31
รูปที่ 2.22 Node ประเภท 10	32
รูปที่ 2.23 Node ประเภท 11	33
รูปที่ 2.24 Node ประเภท 12	34
รูปที่ 2.25 Node ประเภท 13	35
รูปที่ 2.26 Node ประเภท 14	36
รูปที่ 2.27 Node ประเภท 15	37
รูปที่ 2.28 Node ประเภท 16	39
รูปที่ 2.29 Node ประเภท 17	40

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ 2.30 Node ประเภท 18	41
รูปที่ 2.31 Node ประเภท 19	43
รูปที่ 2.32 Node ประเภท 20	44
รูปที่ 2.33 Node ประเภท 21	45
รูปที่ 2.34 Node ประเภท 22	46
รูปที่ 2.35 Node ประเภท 23	47
รูปที่ 2.36 Node ประเภท 24	48
รูปที่ 2.37 Node ประเภท 25	50
รูปที่ 2.38 Node ประเภท 26	51
รูปที่ 2.39 Node ประเภท 27	53
รูปที่ 2.40 ภาพแสดงตำแหน่งพิกัดที่เจาะรูสอคเทอร์โมคัปเปิล	58
รูปที่ 2.41 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ( $\alpha = 1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ , $h = \infty$ )	60
รูปที่ 2.42 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายเมื่อได้รับความร้อนที่สภาวะต่างๆ ( $\alpha = 1.09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ , $h = 800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )	64
รูปที่ 3.1 D-value	66
รูปที่ 3.2 Z-value	66
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า log ของ DPPH กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ	68
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า log ของ D-value ที่อุณหภูมิต่างๆ	69
รูปที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH กับอุณหภูมิมาเชื้อ ที่ค่า $F_0$ เท่ากับ 6, 8 และ 10 ของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงแพซ	73
รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบค่าคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงระหว่างการบรรจุกระป๋องกับถุงแพซที่น้ำหนักบรรจุเท่ากันภายหลังจากได้รับความร้อนที่สภาวะเดียวกัน	74
รูปที่ ข.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 119.1 °C, $F_0 = 17.95 \text{ min}$ )	89

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 114.9 °C, F <sub>0</sub> = 17.95 min)	89
รูปที่ ข.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 119.1 °C, F <sub>0</sub> = 8.05 min)	90
รูปที่ ข.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 114.9 °C, F <sub>0</sub> = 8.05 min)	90
รูปที่ ข.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C, F <sub>0</sub> = 20 min)	91
รูปที่ ข.6 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ( ใช้ค่า Retort temp = 120 °C, F <sub>0</sub> = 13 min)	91
รูปที่ ข.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C, F <sub>0</sub> = 6 min)	92
รูปที่ ข.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 114 °C, F <sub>0</sub> = 13 min)	92
รูปที่ ข.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C, F <sub>0</sub> = 13 min, ครั้งที่ 1)	93
รูปที่ ข.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C, F <sub>0</sub> = 13 min, ครั้งที่ 2)	93
รูปที่ ข.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C, F <sub>0</sub> = 13 min, ครั้งที่ 3)	94

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่าง ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C, F <sub>0</sub> = 13 min, ครั้งที่ 4)	94
รูปที่ ข.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่าง ค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C, F <sub>0</sub> = 13 min, ครั้งที่ 5)	95
รูปที่ ข.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	96
รูปที่ ข.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	96
รูปที่ ข.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	97
รูปที่ ข.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	97
รูปที่ ข.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	98
รูปที่ ข.19 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	98
รูปที่ ข.20 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	99
รูปที่ ข.21 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	99

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	100
รูปที่ ข.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	100
รูปที่ ข.24 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	101
รูปที่ ข.25 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	101
รูปที่ ข.26 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	102
รูปที่ ข.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	102
รูปที่ ข.28 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	103
รูปที่ ข.29 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	103
รูปที่ ข.30 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	104
รูปที่ ข.31 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	104

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.32 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	105
รูปที่ ข.33 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	105
รูปที่ ข.34 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1	106
รูปที่ ข.35 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	106
รูปที่ ข.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	107
รูปที่ ข.37 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2	107
รูปที่ ข.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	108
รูปที่ ข.39 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	108
รูปที่ ข.40 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3	109
รูปที่ ข.41 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	109

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
รูปที่ ข.42 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	110
รูปที่ ข.43 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1	110
รูปที่ ข.44 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	111
รูปที่ ข.45 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	111
รูปที่ ข.46 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2	112
รูปที่ ข.47 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	112
รูปที่ ข.48 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	113
รูปที่ ข.49 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3	113
รูปที่ ค.1 การทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับวัตถุทรงสี่เหลี่ยมด้วยแผ่นอะคริลิก	114
รูปที่ ค.2 การทดลอง โดยแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 80×20×165 mm.	114
รูปที่ ค.3 การทดลอง โดยแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 130×20×165 mm.	115
รูปที่ ค.4 การทดลอง โดยน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง ขนาดรัศมี 37.5 mm. ความสูง 37.5 mm.	115

## รายการสัญลักษณ์

$\alpha$	สัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน ( $m^2 / s$ )
$C_p$	ความจุความร้อนจำเพาะ ( $J / kg \cdot K$ )
$h$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W / m^2 \cdot s$ )
$K$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W / m \cdot K$ )
$cB$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านล่างของปริมาตรควบคุม
$cL$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านบนนอก(ซ้าย)ของปริมาตรควบคุม
$cR$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านบนใน(ขวา)ของปริมาตรควบคุม
$cT$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านบนของปริมาตรควบคุม
$cF$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านหน้าของปริมาตรควบคุม
$cBa$	สัมประสิทธิ์แสดงความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผ่านจากด้านหลังของปริมาตรควบคุม
$dr_i$	ระยะในแนวรัศมีระหว่าง node (i-1,j) และ node (i,j)
$dy_j$	ระยะในแนวแกน y ระหว่าง node (i,j-1) และ node(i,j)
$dx$	ระยะในแนวแกน x
$dy$	ระยะในแนวแกน y
$dz$	ระยะในแนวแกน z
$dV_{i,j}$	ปริมาตรของปริมาตรควบคุมที่ (i,j)
$dV_{i,j,k}$	ปริมาตรของปริมาตรควบคุมที่ (i,j,k)
$dt$	time step
$Nr$	จำนวน node ตามแนวรัศมี
$Ny$	จำนวน node ตามแนวแกน y
$Nx$	จำนวน node ตามแนวแกน x
$Nz$	จำนวน node ตามแนวแกน z
$rA_{i,j}$	พื้นที่ด้านข้างด้านนอกของปริมาตรควบคุม
$rA_{i-1,j}$	พื้นที่ด้านข้าง/ด้านในของปริมาตรควบคุม
$yA_i$	พื้นที่ด้านบน/ด้านล่างของปริมาตรควบคุม
$xA_{i,j,k}$	พื้นที่ปริมาตรควบคุมด้านแกน x
$yA_{i,j,k}$	พื้นที่ปริมาตรควบคุมด้านแกน y
$zA_{i,j,k}$	พื้นที่ปริมาตรควบคุมด้านแกน z
$T$	อุณหภูมิ

# บทที่ 1

## ตรวจเอกสาร

### 1.1 บทนำ

น้ำพริกแกงแดง เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารไทยหลายชนิด เป็นส่วนผสมที่ได้จากการบดผสมสมุนไพรต่างๆ เข้าด้วยกัน ได้ชื่อว่าเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากพบว่ามี สารแคปไซซิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) อยู่มาก โดยอนุมูลอิสระนี้เชื่อว่า มีผลต่อการอักเสบ และการทำลายเนื้อเยื่อในระยะสั้น ในระยะยาวอาจมีผลต่อ ความเสื่อมหรือการแก่ของเซลล์ อาจเป็นสารก่อมะเร็ง โรคหัวใจ และโรคข้อกระดูก จากการวิจัยพบว่าสารต้านอนุมูลอิสระสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งได้ นอกจากนี้ในสมุนไพรต่างๆ ยังมีสรรพคุณในการละลายลิ่มเลือด ลดความดัน ความสามารถในการชะลอความแก่ ความสามารถในการต้านทานจุลชีพ (คณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน กระทรวงสาธารณสุข, 2541)

ปัจจุบันมีการผลิตน้ำพริกแกงแดงส่งออกทั้งในและต่างประเทศ โดยมีการแปรรูปเป็นลักษณะของน้ำพริกแกงแดงกระป๋องและบรรจุในภาชนะอ่อนตัว (retort pouch) เพื่อการขนส่งที่สะดวกและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน น้ำพริกแกงแดง จัดเป็นอาหารกลุ่มกรดต่ำ (Low Acid Food) เนื่องจากมีความเป็นกรด-ด่าง (pH) ประมาณ 5-6 และมีค่า Water Activity (Aw) มากกว่า 0.85 การฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องนี้จะต้องใช้ปริมาณความร้อนที่เพียงพอต่อการทำลายสปอร์ของ *Clostridium botulinum* ถ้าอาหารปลอดเชื้อจากสปอร์และสารพิษของเชื้อนี้ก็จะเป็นที่ปลอดภัยจากเชื้อชนิดอื่นด้วย แต่ข้อเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้คือ การเปลี่ยนแปลงคุณภาพของด้านต่างๆ เช่น สี กลิ่น รส โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารสำคัญที่มีสรรพคุณที่ดีต่อสุขภาพ ดังนั้น การหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จึงมีความสำคัญมาก

มีงานวิจัยหลายงานที่พยายามสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารหลังให้ความร้อน และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตอาหารรูปทรงต่างๆ เช่น ทรงกระบอก (Teixeira et al. 1969; Saguy and Karel 1979; Ohlsson et al. 1980b; Thussen and Kochen 1980; Nadkarni and Hatton 1985; Hendrickx et al. 1993; Silva et al. 1992; Banga et al. 1991 and Sablani et al. 1995; Chen et al. 2002) ทรงสี่เหลี่ยมบาง (Thussen and Kochen 1980; Ohlsson et al. 1980a; Hendrickx et al. 1993) ทรงกลม (Hendrickx et al. 1993; Silva et al. 1994). และทรงกรวย (Pornchaloempong et al. 2003) การหาสภาวะที่เหมาะสมหลังการผ่านความร้อน อาจพิจารณาจากคุณภาพเฉลี่ย (overall quality retention) และคุณภาพผิวหน้าของอาหาร (surface quality retention) (Silva et al. 1993) Noronha et al. (1996) ได้หาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้ อุณหภูมิฆ่าเชื้อทั้งคงที่และไม่คงที่ในอาหารบรรจุเสร็จโดยพิจารณาจากค่าคุณภาพของผิวอาหาร

Margarida et al. (2000) ได้ศึกษาความร้อนที่มีผลต่อการลดลงของค่าจลนพลศาสตร์ของวิตามินซี Wang et al. (2002) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเนื้ออย่างใน Air blast cooling ด้วยวิธี Finite element Simpson et al. (2004) ได้ศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตอาหารทะเลทรงกรวย

โครงการนี้จึงมีเป้าหมายในการพัฒนาการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและถุงพาส โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิภายในระหว่างให้ความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพหลังการให้ความร้อนที่สภาวะต่างๆ ทั้งอุณหภูมิฆ่าเชื้อคงที่และไม่คงที่ โดยใช้ค่าจลนพลศาสตร์ (D-Z value) ของความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl) เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดง และทำการทดลองจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงกระป๋องและแบบพาสระหว่างที่ได้รับความร้อน
2. เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงที่ได้ศึกษาในงานของมรรต และคณะ (2549)
3. รวมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวัตถุประสงค์ข้อ 1 และอัตราการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพจากวัตถุประสงค์ข้อ 2 เพื่อประเมินคุณภาพหลังการให้ความร้อน
4. เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง เพื่อสร้างความมั่นใจในการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษาของโครงการ

1. อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารคงที่และมีค่าเท่ากันทุกจุด
2. การถ่ายเทความร้อนภายในกระป๋องเป็นการการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (conduction) เพียงอย่างเดียว
3. ใช้แผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมบางแทนน้ำพริกแกงแดงบรรจุถุงพาสในการทดสอบการถ่ายเทความร้อนภายในของการทำนายและการทดลองจริง
4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย Microsoft Visual Basic 6.0

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิภายในและการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงพาสเจอร์หว่างได้รับความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เพื่อเป็นการพัฒนาการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและแบบพาสเจอร์คุณภาพสูงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป



## บทที่ 2

# การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายอุณหภูมิภายในกระป๋องและถุงแพซ และการทดสอบความถูกต้อง

### 2.1 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิภายใน

#### 2.1.1 การพัฒนาอุณหภูมิภายในน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง

โครงการนี้ได้ใช้วิธี Finite Differences และหลักการสมดุลพลังงานเพื่อทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงกระป๋อง (วัตถุดิบทรงกระบอก) โดยมีสมมติฐานว่า

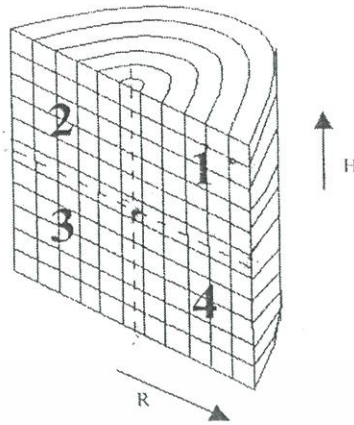
- การถ่ายเทความร้อนภายในกระป๋องบรรจุน้ำพริกแกงแดงเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว
- คุณสมบัติทางความร้อนของน้ำพริกแกงแดงสม่ำเสมอทั้งกระป๋อง และคงที่ตลอดการให้ความร้อน
- การให้ความร้อนน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องในหม้อฆ่าเชื้อ ใช้ไอน้ำชนิดยิ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h, W/m.K$ ) จึงมีค่าสูงมาก (Infinite Heat Transfer Coefficient) ประกอบกับกระป๋องทำด้วยโลหะบางซึ่งมีการนำความร้อนดีมาก จึงให้อุณหภูมิของผิวอาหารที่สัมผัสกระป๋องเท่ากับอุณหภูมิไอน้ำที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ

สมการนำความร้อนในทรงกระบอกพิจารณาในสองมิติ คือ ความร้อนเคลื่อนที่เข้าสู่ทรงกระบอกตามแนวรัศมี และตามแนวส่วนสูง มีดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial H^2} \right) \quad (2.1)$$

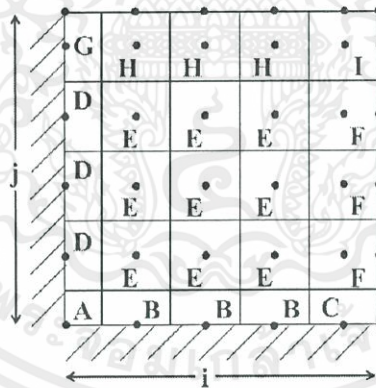
#### 1) การแบ่งปริมาตรควบคุมทรงกระบอก

ขั้นตอนแรกเป็นการแบ่งกระป๋องทรงกระบอกเป็นปริมาตรขนาดเล็ก ที่มีลักษณะเป็นชั้นวงแหวน มีจุดศูนย์กลางเดียวกัน ซึ่งทำให้มีหน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องจากทรงกระบอกสมมาตรในแนวรัศมี ดังนั้นจึงพิจารณาคำนวณเพียง 1 ใน 4 ของทรงกระบอกเท่านั้น (ส่วนที่ 1)



รูปที่ 2.1 ภาพ 3 มิติ ของทรงกระบอกตัดขวาง

โดยกำหนดจุดอ้างอิงที่กึ่งกลาง ปริมาตร เรียกว่า Node โดยแต่ละ Node เป็นตัวแทนของ ปริมาตรควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตำแหน่งของ Node ซึ่งก็คือตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละ ปริมาตรควบคุม ซึ่งอนุกรมของจุดนี้ใช้แทนอนุกรมเฉลี่ยภายในของปริมาตรนั้น สำหรับ node ที่ ผิวไม่มีปริมาตร (Non Capacitance Surface Node (NCSN)) อนุกรมของ node ที่ผิว คืออนุกรมที่ ผิวของอาหาร (Welt et al. ,1997 ) จากนั้น เขียนสมการสมดุลพลังงานของแต่ละ node แก้สมการ เพื่อหาคำตอบ โดยให้ผลลัพธ์เป็นอนุกรม ณ จุดที่เรากำหนด



รูปที่ 2.2 ภาพหน้าตัดแสดงตำแหน่ง Node ในปริมาตรควบคุมบนพื้นที่หน้าตัดขวางของทรงกระบอก

กำหนดให้  $N_r$  คือ จำนวน node ในแนวรัศมี และ  $N_y$  คือ จำนวน node ในแนวครึ่งหนึ่ง ของความสูงของทรงกระบอก node ในแนวรัศมีที่อยู่ภายในตั้งแต่ node ที่ 1 จนถึง  $N_r - 1$  ถูกแบ่ง โดยระยะทางที่เท่ากัน คือ  $dr$  ส่วนระยะห่างระหว่าง node ภายในสุดท้าย ( $N_r - 1$ ) และ node ที่ผิว คือ  $dr/2$

จากความสัมพันธ์ระหว่างรัศมี ( $R$ ) และ  $N_r$  สามารถหา  $dr$  ได้จาก

$$dr = 2 * \text{Radius} / (2 * N_r - 3) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกัน  $dy$  ซึ่งเป็นระยะห่างตามแนวส่วนสูงของทรงกระบอก สามารถหาได้จาก

$$dy = 2 * \text{HalfHeight} / (2 * N_y - 3) \quad (2.3)$$

ระยะทางจากผิวถึง node ใดๆ ตามแนวรัศมี ( $r(i)$ ) สามารถหาได้จาก

$$r(1) = 0 \quad (2.4)$$

$$r(N_r) = \text{Radius} \quad (2.5)$$

$$r(i) = r(i - 1) + dr \quad (2.6)$$

ระยะทางจากผิวถึง node ใดๆ ตามแนวส่วนสูง ( $y(i)$ ) สามารถหาได้จาก

$$y(1) = 0 \quad (2.7)$$

$$y(N_y) = \text{HalfHeight} \quad (2.8)$$

$$y(i) = y(i - 1) + dy \quad (2.9)$$

การชี้เฉพาะของตำแหน่งเส้นขอบนอกของปริมาตรควบคุมต้องพิจารณาจากรูปร่างของวัตถุความร้อนที่ส่งผ่านในแนวตั้ง จากด้านล่างถึงด้านบนทรงกระบอก มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ และความร้อนที่ส่งผ่านในแนวรัศมี มีพื้นที่ไม่คงที่ คือ พื้นที่แนวแบ่งภายใน ( $rA(i-1,j)$ ) น้อยกว่าพื้นที่แนวแบ่งภายนอก ( $rA(i,j)$ ) สามารถหาค่าตำแหน่งเฉลี่ยของพื้นที่นี้ได้ด้วยวิธี log-mean และตำแหน่งด้านข้างของปริมาตรควบคุม สามารถหาค่าตำแหน่งเฉลี่ยได้จาก วิธี log-mean (Welt et al. ,1997 )

$$rA\text{Location}(1) = r(2) / 2 \quad (2.10)$$

$$rA\text{Location}(N_r) = \text{Radius} \quad (2.11)$$

$$rA\text{Location}(i) = (r(i + 1) - r(i)) / (\text{Log}(r(i + 1) / r(i))) \quad (2.12)$$

ตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของปริมาตรควบคุม สามารถหาได้จาก ระยะกึ่งกลางระหว่าง node

$$yA\text{Location}(1) = y(2) / 2 \quad (2.13)$$

$$yA\text{Location}(N_y) = \text{HalfHeight} \quad (2.14)$$

$$yA\text{Location}(j) = yA\text{Location}(j - 1) + dy \quad (2.15)$$

พื้นที่ในแนวตั้ง ( $rA(i, j)$ ) ตั้งฉากกับความร้อนที่ส่งผ่านในแนวรัศมี

$$rA(i, j) = 2 * \pi * rA\text{Location}(i) * (yA\text{Location}(j) - yA\text{Location}(j - 1)) \quad (2.16)$$

พื้นที่ในแนวนอน ( $yA(i)$ ) ตั้งฉากกับความร้อนที่ส่งผ่านในแนวตั้ง

$$yA(1) = \pi * rA\text{Location}(1) * rA\text{Location}(1) \quad (2.17)$$

$$yA\text{sum} = yA(1) \quad (2.18)$$

$$yA(i) = \pi * rA\text{Location}(i) * rA\text{Location}(i) - yA\text{sum} \quad (2.19)$$

$$yA\text{sum} = yA\text{sum} + yA(i) \quad (2.20)$$

และหาปริมาตรย่อยๆ ( $dV(i, j)$ ) ได้จาก

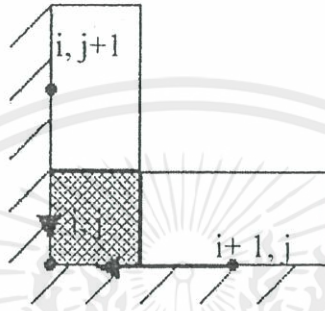
$$dV(i, j) = yA(i) * (yA\text{Location}(j) - yA\text{Location}(j - 1)) \quad (2.21)$$

## 2) สมดุลพลังงาน (Energy balances) ของวัตถุทรงกระบอก

สมดุลพลังงานของ node ประเภทต่างๆ ทั้ง 9 ประเภทเขียนได้ดังนี้

### Node ประเภท A

Node มุมล่างด้านซ้าย ได้รับการถ่ายเทแบบนำความร้อนจาก node ด้านบน, ด้านขวา ส่วน Node ด้านล่างและด้านซ้าย เป็นฉนวน จากรูป 2.3 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.3 Node ประเภท A

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) \quad (2.22)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

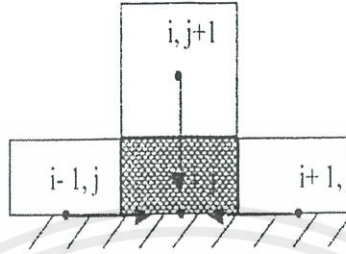
$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n \quad (2.23)$$

เพื่อให้สมการสอดคล้องกับกฎข้อที่ 2 ของ thermo dynamics สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n$  ต้องมากกว่า หรือเท่ากับ 0 เมื่อแก้สมการหาค่าช่วงเวลา (Time step, dt) ที่มากที่สุด จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} \right)} \quad (2.24)$$

### Node ประเภท B

Node ด้านล่าง ได้รับการถ่ายเทแบบนำความร้อนจาก node ด้านบน, ด้านขวา และด้านซ้าย ส่วน Node ด้านล่างเป็นฉนวน จากรูป 2.4 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.4 Node ประเภท B

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot rA_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) \quad (2.25)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูปใหม่จะได้ (2.26)

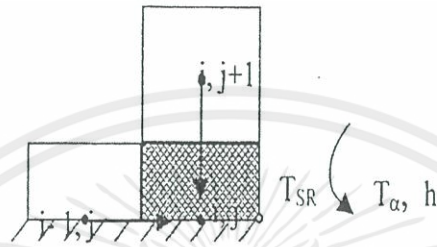
$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n \quad (2.27)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i,j} + rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} \right)} \quad (2.28)$$

### Node ประเภท C

Node ด้านล่างขวา ด้านขวาของ Node เป็น Non-Capacitance Node สัมผัสกับอุณหภูมิภายนอก ด้านล่างของ Node เป็นฉนวน เนื่องจากทรงกระบอกมีลักษณะสมมาตร การถ่ายเทความร้อนจึงพิจารณาเป็นครึ่งหนึ่งตามแนวส่วนสูงของทรงกระบอก ด้านบนและด้านซ้ายมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อน จากรูป 2.5 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.5 Node ประเภท C

กรณีที่  $1/h$  มีค่าไม่สูงมาก

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot r A_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot y A_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot r A_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{K \cdot r A_{i,j}}} \quad (2.29)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูป

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot r A_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot y A_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \left( \frac{K}{h \cdot r A_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot r A_{i,j}} \right)} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot r A_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot y A_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot r A_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot r A_{i,j}} \right)} \right) \cdot T_\infty^n \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{rA_{i,j}}} \right)} \quad (2.31)$$

กรณีที่ 2  $h$  มีค่าสูงมาก ดังนั้น  $T_{sr} = T_\alpha$  และ  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$

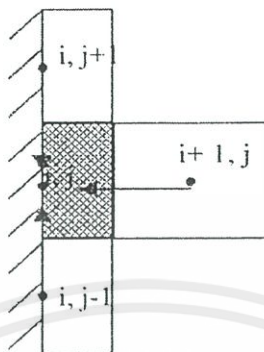
$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} &= \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n \\ &+ \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.32)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{2 \cdot rA_{i,j}}{dr} \right)} \quad (2.33)$$

### Node ประเภท D

Node ด้านซ้าย ได้รับการถ่ายเทแบบนำความร้อนจาก Node ด้านบน, ด้านล่าง และด้านขวา ส่วน Node ด้านซ้ายเป็นฉนวน จากรูป 2.6 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.6 Node ประเภท D

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) \quad (2.34)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูป

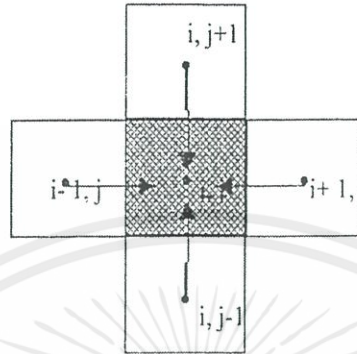
$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n \quad (2.35)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{yA_i}{dy} \right)} \quad (2.36)$$

### Node ประเภท E

Node ส่วนกลางได้รับการถ่ายเทแบบนำความร้อนจาก Node ด้านบน, ด้านล่าง, ด้านขวา และด้านซ้าย จากรูป 2.7 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.7 Node ประเภท E

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot rA_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) \quad (2.37)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูป

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n \quad (2.38)$$

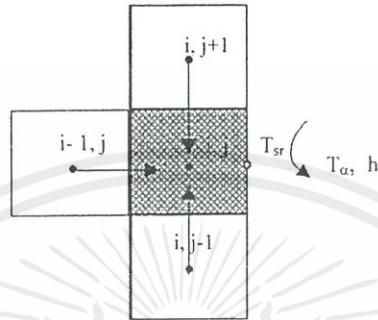
สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{yA_i}{dy} \right)} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Node ประเภท F

Node ด้านขวา ด้านขวาของ Node เป็น Non-Capacitance Node สัมผัสกับอุณหภูมิภายนอก ส่วนด้านบน ด้านซ้ายและด้านล่างเป็น Node ภายใน โดยมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อน จากรูป 2.8 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.8 Node ประเภท F

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j+1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{T_\infty - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{K \cdot rA_{i,j}}} \quad (2.40)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูป จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot rA_{i,j}} \right)} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot rA_{i,j}} \right)} \right) \cdot T_\infty \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}'' \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{rA_{i,j}}} \right)} \quad (2.42)$$

กรณีที่ 2  $h$  มีค่าสูงมาก แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$  และจัดรูป

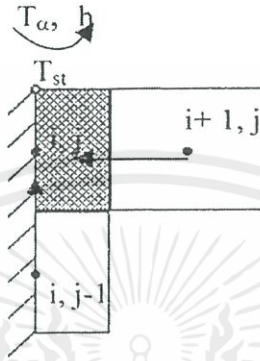
$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} &= \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i,j}'' \\ &+ \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}'' + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j+1}'' + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}'' + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{\infty}'' \end{aligned} \quad (2.43)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}'' \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{2 \cdot rA_{i,j}}{dr} \right)} \quad (2.44)$$

### Node ประเภท G

Node มุมบนด้านซ้าย ด้านบนของ Node เป็น Non-Capacitance Node ซึ่งสัมผัสกับ อุณหภูมิภายนอก ด้านซ้ายของ Node เป็นฉนวน เนื่องจากทรงกระบอกมีลักษณะสมมาตร การ ถ่ายเทความร้อนจึงพิจารณาเป็นครึ่งหนึ่งตามแนวรัศมีของทรงกระบอก ด้านขวาและด้านล่าง เป็น Node ภายในมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อน จากรูป 2.9 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.9 Node ประเภท G

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot r A_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot y A_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot y A_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{T_\infty - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot y A_i} + \frac{dy/2}{K \cdot y A_i}} \quad (2.45)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูปใหม่

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot r A_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot y A_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot y A_i} + \frac{dy}{2 \cdot y A_i} \right)} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot r A_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot y A_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot y A_i} + \frac{dy}{2 \cdot y A_i} \right)} \right) \cdot T_\infty \quad (2.46)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}'' \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dy/2}{yA_i}} \right)} \quad (2.47)$$

กรณีที่ 2  $h$  มีค่าสูงมาก แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$  และจัดรูป

$$T_{i,j}''^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}''^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}''^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}''^n + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{\infty}''^n \quad (2.48)$$

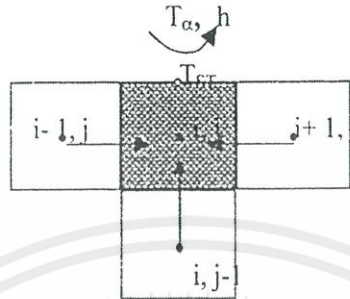
สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}'' \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{2 \cdot yA_i}{dy} \right)} \quad (2.49)$$

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

### Node ประเภท H

Node ด้านบน ด้านบนของ Node เป็น Non-Capacitance node ซึ่งสัมผัสกับอุณหภูมิภายนอก ด้านซ้ายและด้านล่างเป็น Node ภายในมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อน จากรูป 2.10 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.10 Node ประเภท H

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot rA_{i,j}}{dr} (T_{i+1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_i} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_i}} \quad (2.50)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูปใหม่ จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dy}{2 \cdot yA_i} \right)} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dy}{2 \cdot yA_i} \right)} \right) \cdot T_\infty^n \quad (2.51)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dr/2}{yA_i}} \right)} \quad (2.52)$$

กรณีที่ 2 h มีค่าสูงมาก แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$  และจัดรูป

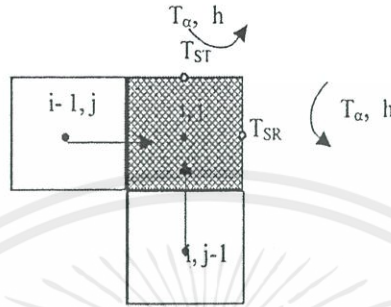
$$\begin{aligned} T_{i,j}^{n+1} &= \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n \\ &+ \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i+1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n \end{aligned} \quad (2.53)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{rA_{i,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{2 \cdot yA_i}{dr} \right)} \quad (2.54)$$

### Node ประเภท I

Node มุมบนด้านขวา มีการนำความร้อนจาก Node ด้านบนและด้านขวา ที่เป็น Non-Capacitance Node ซึ่งสัมผัสกับอุณหภูมิภายนอก ส่วนด้านซ้ายและด้านล่างเป็น Node ภายใน โดยมีการถ่ายเทแบบการนำความร้อน จากสมการพลังงาน ความร้อนจะถูกถ่ายเทจาก Node ที่อยู่ล้อมรอบ node มุมบนด้านขวา จากรูป 2.11 สามารถเขียนเป็นสมการ



รูปที่ 2.11 Node ประเภท I

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot dV_{i,j}}{dt} (T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n) = \frac{K \cdot rA_{i-1,j}}{dr} (T_{i-1,j}^n - T_{i,j}^n) + \frac{K \cdot yA_i}{dy} (T_{i,j-1}^n - T_{i,j}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{K \cdot rA_{i,j}}} + \frac{T_\infty^n - T_{i,j}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_i} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_i}} \quad (2.55)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  และจัดรูปใหม่ จะได้

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot rA_{i,j}} \right)} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dy}{2 \cdot yA_i} \right)} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr}{2 \cdot rA_{i,j}} \right)} \right) \cdot T_\infty^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j} \cdot \left( \frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dy}{2 \cdot yA_i} \right)} \right) \cdot T_\infty^n \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot rA_{i+1,j}} + \frac{dr/2}{rA_{i,j}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_i} + \frac{dr/2}{yA_i}} \right)} \quad (2.57)$$

กรณีที่ 2  $h$  มีค่าสูงมาก แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot c_p}$  และจัดรูป

$$T_{i,j}^{n+1} = \left( 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} - \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot rA_{i-1,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{i-1,j}^n + \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{i,j-1}^n + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot rA_{i,j}}{dV_{i,j} \cdot dr} \right) \cdot T_{\infty}^n + \left( \frac{2 \cdot dt \cdot \alpha \cdot yA_i}{dV_{i,j} \cdot dy} \right) \cdot T_{\infty}^n \quad (2.58)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j}}{\alpha \cdot \left( \frac{rA_{i-1,j}}{dr} + \frac{yA_i}{dy} + \frac{2 \cdot rA_{i,j}}{dr} + \frac{2 \cdot yA_i}{dr} \right)} \quad (2.59)$$

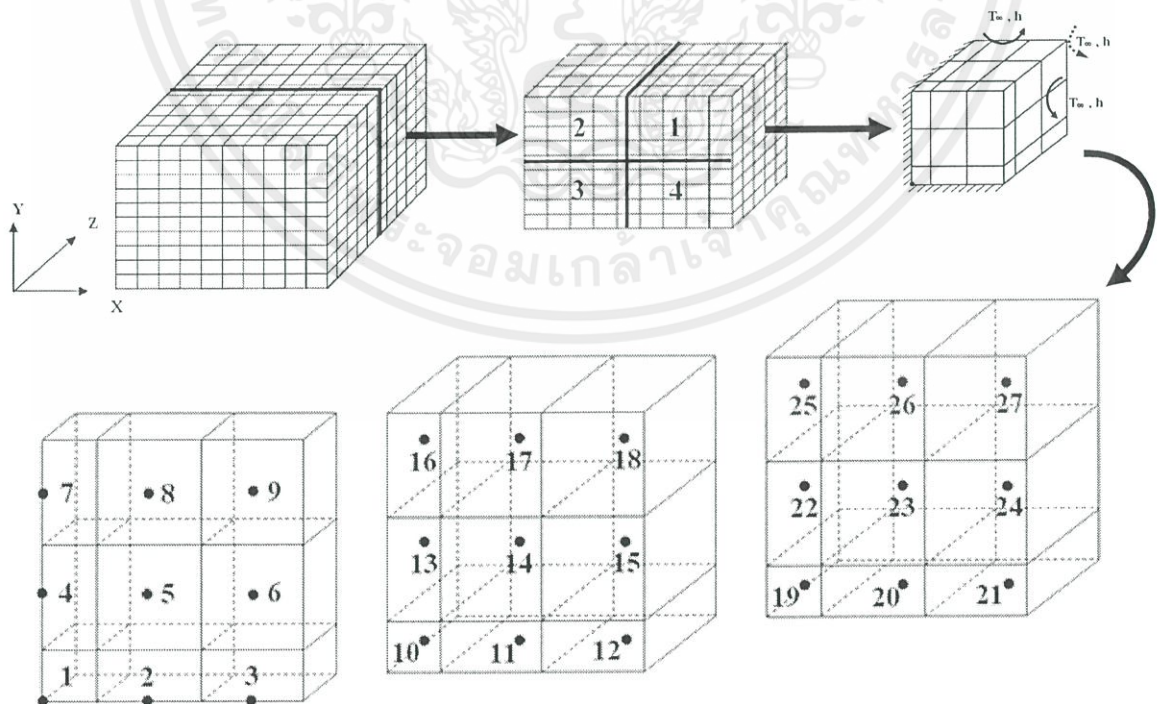
### 2.1.2 การพัฒนาอุณหภูมิภายในน้ำพริกแกงแดงบรรจุถุงพោซ์

ถุงพោซ์มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมบาง ใช้วิธี Finite Differences และหลักการสมดุลพลังงานเพื่อทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงบรรจุถุงพោซ์ (วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมบาง) โดยมีสมมุติฐานว่า

- การถ่ายเทความร้อนภายในถุงพោซ์บรรจุน้ำพริกแกงแดงเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว
- คุณสมบัติทางความร้อนของน้ำพริกแกงแดงสม่ำเสมอทั้งถุงพោซ์ และคงที่ตลอดการให้ความร้อน
- การให้ความร้อนน้ำพริกแกงแดงบรรจุถุงพោซ์ ทำในหม้อฆ่าเชื้อมีน้ำจืดร้อนเป็นตัวกลาง (water spray retort) ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h, W/m.K) จึงมีค่าน้อยกว่าการบรรจุแบบกระป๋อง ประกอบกับถุงพោซ์มีความหนาแน่นน้อยกว่า จึงให้อุณหภูมิของผิวอาหารที่สัมผัสกระป๋องเท่ากับอุณหภูมิภายนอกที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ

สมการนำความร้อนทรงสี่เหลี่ยมพิจารณาในสามมิติ คือ ความร้อนเคลื่อนที่เข้าสู่แกน X แกน Y และ แกน Z มีสมการดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.60)$$



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการแบ่งปริมาตรควบคุมวัตถุของทรงสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) การแบ่งปริมาตรควบคุมวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

ขั้นตอนแรกเป็นการแบ่งทรงสี่เหลี่ยมเป็นปริมาตรขนาดเล็ก ที่มีลักษณะเป็นชั้นมีจุดศูนย์กลางเดียวกัน ซึ่งทำให้มีหน้าตัดขวางเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากทรงสี่เหลี่ยมมีลักษณะสมมาตร ดังนั้นจึงพิจารณาคำนวณเพียง 1 ใน 4 ของทรงสี่เหลี่ยมเท่านั้น

กำหนดให้  $N_x$  คือ จำนวน node ในแนวครึ่งหนึ่งของแกน X,  $N_y$  คือ จำนวน node ในแนวครึ่งหนึ่งของแกน Y และ  $N_z$  คือ จำนวน node ในแนวครึ่งหนึ่งของแกน Z โดย node ที่ 1 จนถึง  $N_r - 1$  ถูกแบ่งโดยระยะทางที่เท่ากัน ส่วนระยะห่างระหว่าง node ที่ผิว คือ  $dr/2$

จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะแนวแกน X และ  $N_x$  สามารถหา  $dx$  ได้จาก

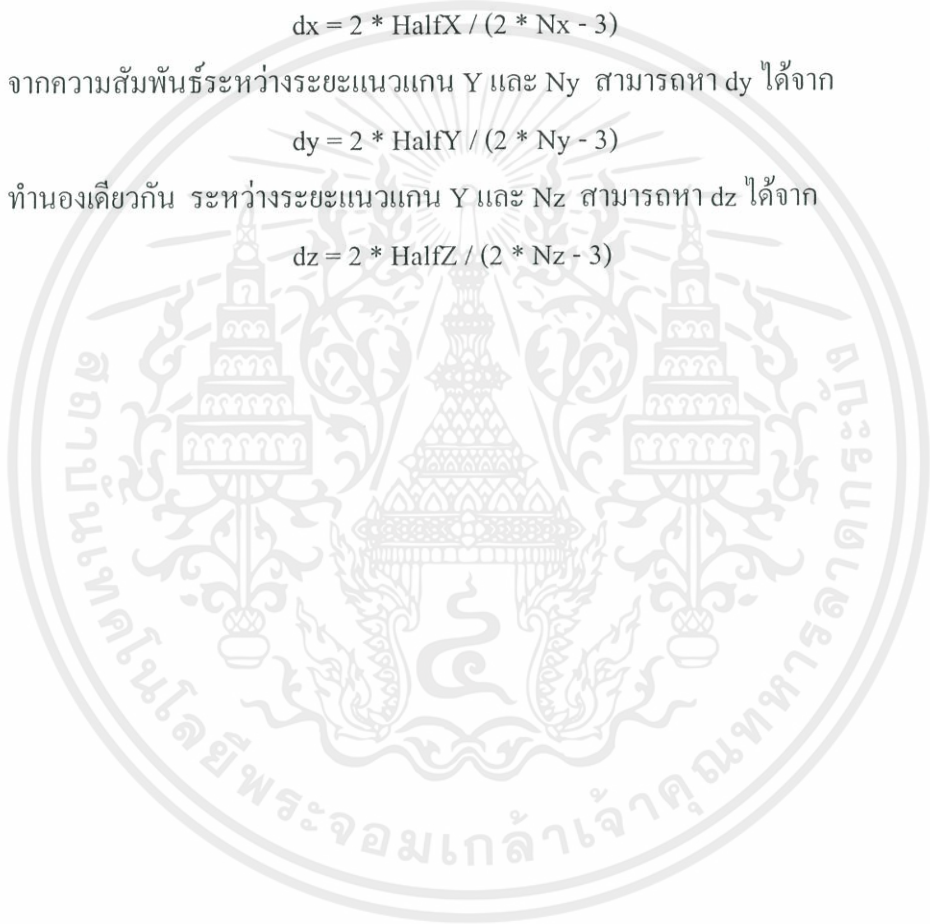
$$dx = 2 * \text{HalfX} / (2 * N_x - 3) \quad (2.61)$$

จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะแนวแกน Y และ  $N_y$  สามารถหา  $dy$  ได้จาก

$$dy = 2 * \text{HalfY} / (2 * N_y - 3) \quad (2.62)$$

ทำนองเดียวกัน ระหว่างระยะแนวแกน Y และ  $N_z$  สามารถหา  $dz$  ได้จาก

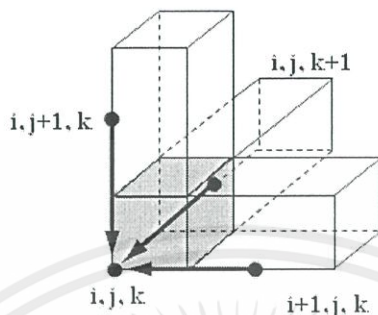
$$dz = 2 * \text{HalfZ} / (2 * N_z - 3) \quad (2.63)$$



## 2) สมดุลพลังงาน (Energy balances) ของวัตถุทรงสี่เหลี่ยม

สมดุลพลังงานของ node ประเภทต่างๆ ทั้ง 27 ประเภทเขียน ได้ดังนี้

### Node ประเภท 1



รูปที่ 2.13 Node ประเภทที่ 1

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.64)$$

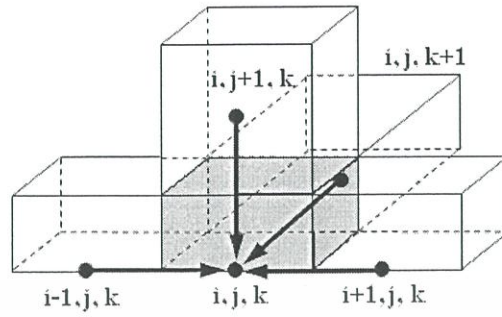
แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.65)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.66)$$

## Node ประเภท 2



รูปที่ 2.14 Node ประเภทที่ 2

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.67)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

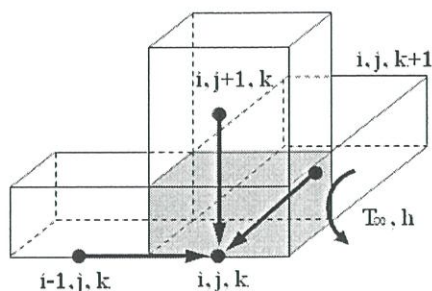
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.68)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 3



รูปที่ 2.15 Node ประเภทที่ 3

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.70)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

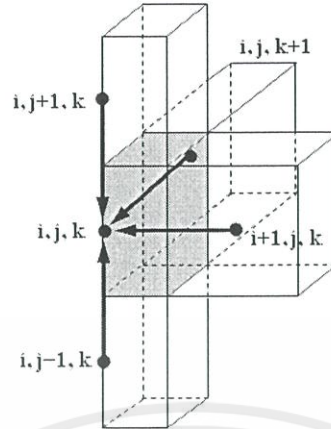
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.71)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 4



รูปที่ 2.16 Node ประเภทที่ 4

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.73)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

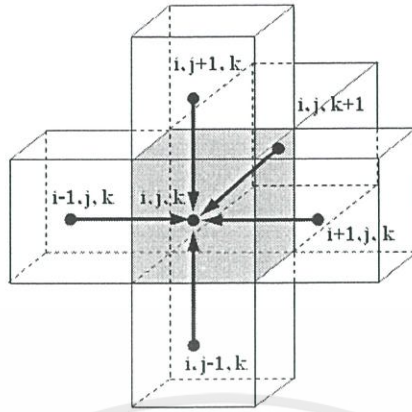
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.74)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.75)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 5



รูปที่ 2.17 Node ประเภทที่ 5

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.76)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

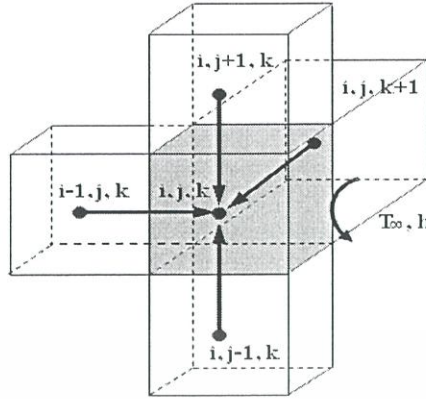
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.77)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.78)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 6



รูปที่ 2.18 Node ประเภทที่ 6

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.79)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

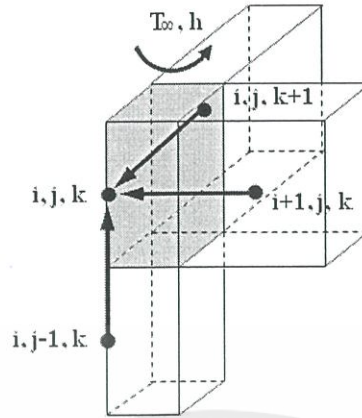
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.80)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.81)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 7



รูปที่ 2.19 Node ประเภทที่ 7

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.82)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

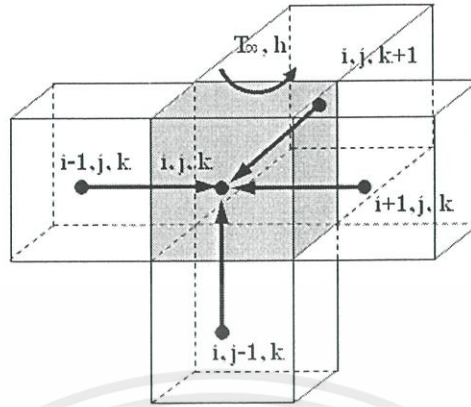
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.83)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 8



รูปที่ 2.20 Node ประเภทที่ 8

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.85)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

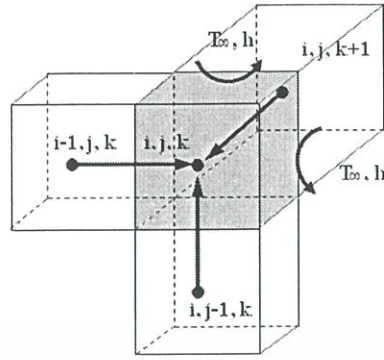
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.86)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.87)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 9



รูปที่ 2.21 Node ประเภทที่ 9

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{k \cdot y \cdot A_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.88)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

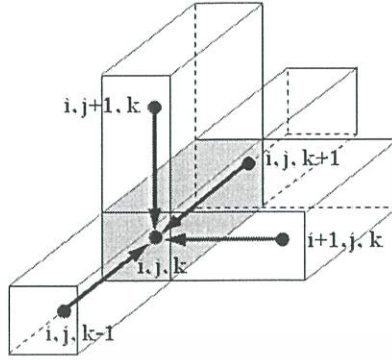
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \quad \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \quad \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.89)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 10



รูปที่ 2.22 Node ประเภทที่ 10

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.91)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จักรูปใหม่ จะได้

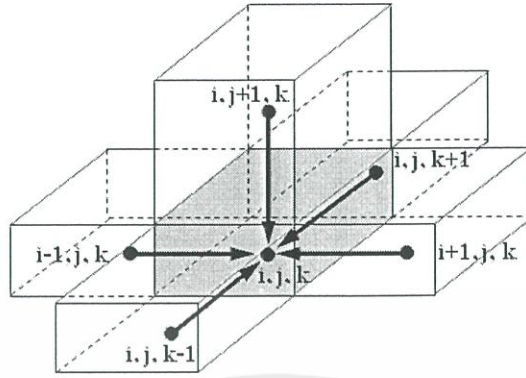
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.92)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.93)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 11



รูปที่ 2.23 Node ประเภทที่ 11

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.94)$$

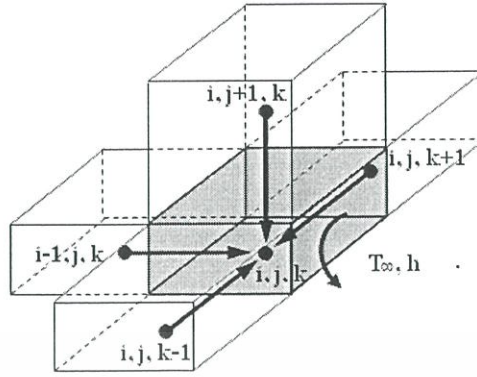
แทนค่า  $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.95)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.96)$$

## Node ประเภทที่ 12



รูปที่ 2.24 Node ประเภทที่ 12

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.97)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

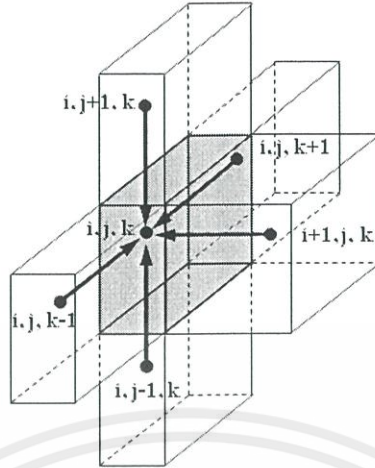
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.98)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.99)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 13



รูปที่ 2.25 Node ประเภทที่ 13

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \end{aligned} \quad (2.100)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

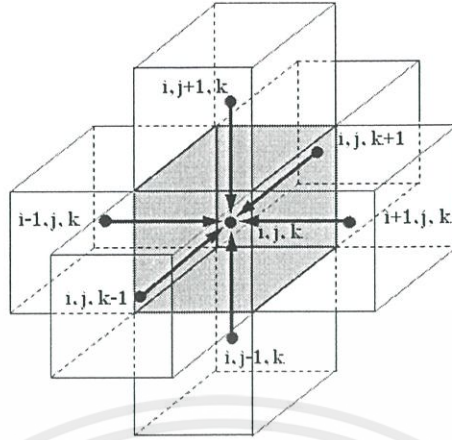
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \end{aligned} \quad (2.101)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.102)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 14



รูปที่ 2.26 Node ประเภทที่ 14

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) &
 \end{aligned} \quad (2.103)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

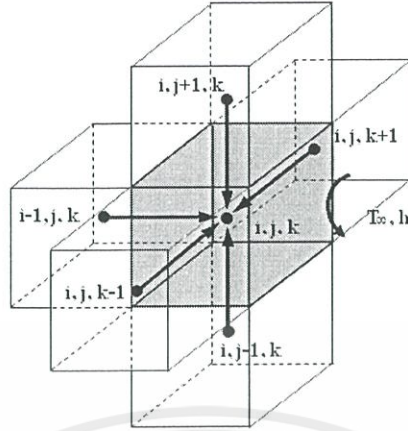
$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\
 + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n \\
 + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n
 \end{aligned} \quad (2.104)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} \right]} \quad (2.105)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 15



รูปที่ 2.27 Node ประเภทที่ 15

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}}
 \end{aligned} \tag{2.106}$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ \frac{1}{dt \cdot \alpha} \left( \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} T_{i-1,j,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} T_{i,j-1,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} T_{i,j+1,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} T_{i,j,k-1}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} T_{i,j,k+1}^n \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} T_{i,j,k}^n \right] \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} T_{i-1,j,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} T_{i,j-1,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} T_{i,j+1,k}^n + \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} T_{i,j,k-1}^n \right. \\
 &\quad \left. + \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} T_{i,j,k+1}^n + \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} T_\infty^n \right] T_{i,j,k}^n
 \end{aligned} \tag{2.107}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

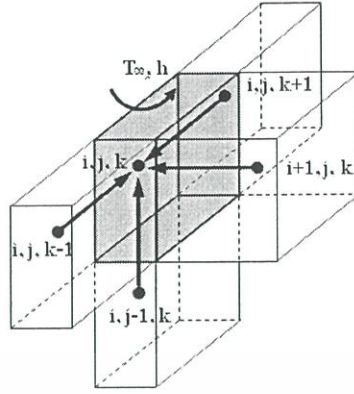
สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{x A_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{y A_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{y A_{i,j,k}}{dy} + \frac{z A_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{z A_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot x A_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot x A_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.108)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 16



รูปที่ 2.28 Node ประเภทที่ 16

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.109)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

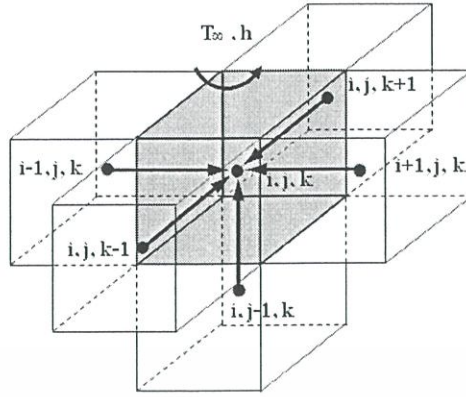
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.110)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.111)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 17



รูปที่ 2.29 Node ประเภทที่ 17

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k-1}}{dy} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k+1}}{dy} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}}
 \end{aligned} \quad (2.112)$$

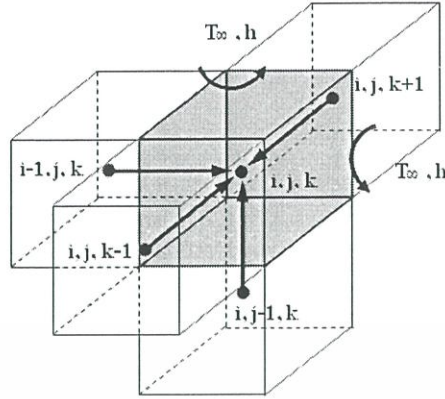
แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k+1}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k+1}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j,k+1}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n
 \end{aligned} \quad (2.113)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k-1}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k+1}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{zA_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.114)$$

## Node ประเภท 18



รูปที่ 2.30 Node ประเภทที่ 18

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k}}{dz} (T_{i,j,k+1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} \\
 + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} & \quad (2.115)
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \quad \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \quad \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \quad \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k+1}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \quad (2.116)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}'' \geq 0$  จะได้สมการ

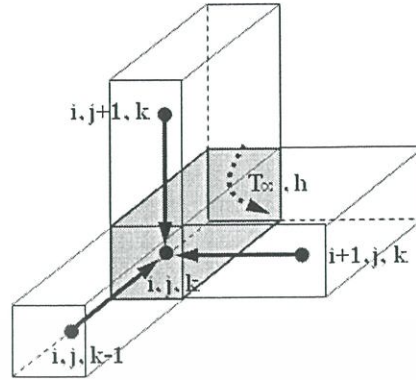
$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{x A_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{y A_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{z A_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{z A_{i,j,k}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot x A_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot x A_{i,j,k}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot y A_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot y A_{i,j,k}}} \right]}$$

(2.117)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 19



รูปที่ 2.31 Node ประเภทที่ 19

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.118)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

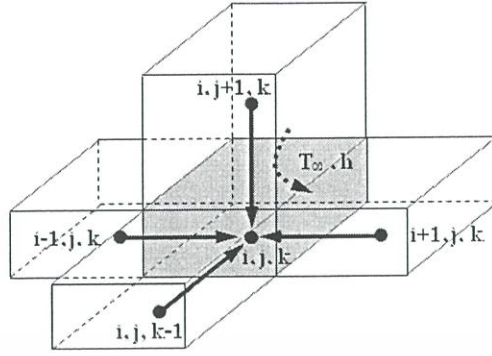
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.119)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.120)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 20



รูปที่ 2.32 Node ประเภทที่ 20

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.121)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

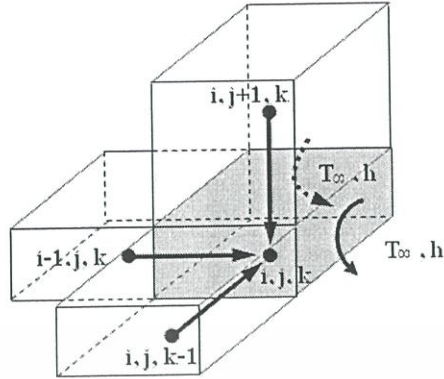
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.122)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.123)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 21



รูปที่ 2.33 Node ประเภทที่ 21

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{dx/2} + \frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{dz/2} \end{aligned} \quad (2.124)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

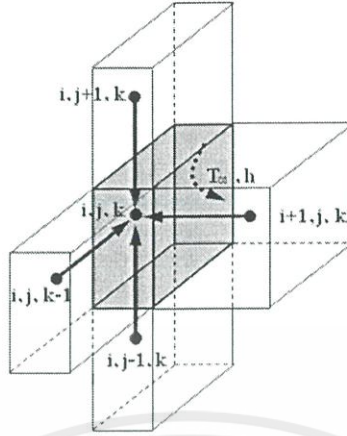
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.125)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.126)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 22



รูปที่ 2.34 Node ประเภทที่ 22

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.127)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

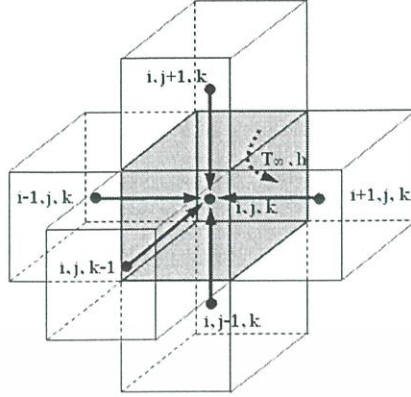
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} - \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.128)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.129)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภทที่ 23



รูปที่ 2.35 Node ประเภทที่ 23

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{T_{\infty}^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.130)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

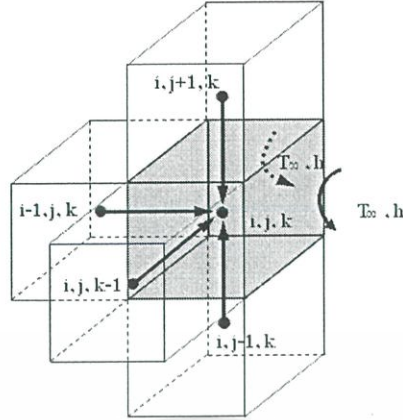
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_{\infty}^n \end{aligned} \quad (2.131)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \left[ \alpha \left[ \frac{xA_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{yA_{i,j,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right] \right] \quad (2.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 24



รูปที่ 2.36 Node ประเภทที่ 24

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 &+ \frac{K \cdot yA_{i,j+1,k}}{dy} (T_{i,j+1,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} \\
 &+ \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}}
 \end{aligned} \tag{2.133}$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j+1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n
 \end{aligned} \tag{2.134}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

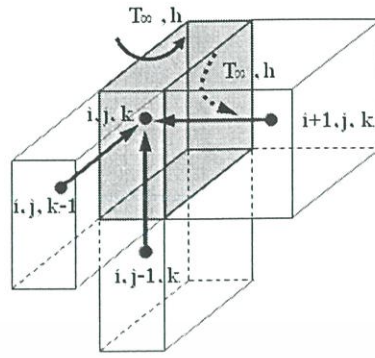
สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}'' \geq 0$  จะได้ว่าสมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{x A_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{y A_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{y A_{i,j,k}}{dy} + \frac{z A_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot x A_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot x A_{i,j,k}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot z A_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot z A_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.135)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 25



รูปที่ 2.37 Node ประเภทที่ 25

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\ &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} \end{aligned} \quad (2.136)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

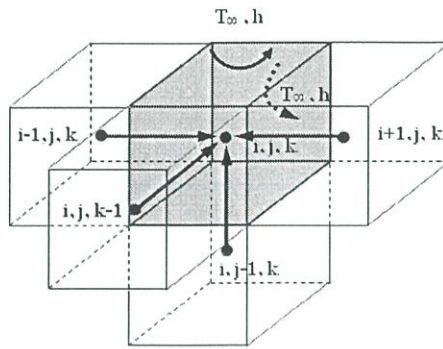
$$\begin{aligned} T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ \frac{1}{dt \cdot \alpha} \left( \frac{dx}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i+1,j,k}^n}{dx} + \frac{dy}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i,j-1,k}^n}{dy} + \frac{dz}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i,j,k-1}^n}{dz} \right) \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{dx}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i+1,j,k}^n}{dx} + \frac{dy}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i,j-1,k}^n}{dy} + \frac{dz}{dV_{i,j,k}} \frac{dT_{i,j,k-1}^n}{dz} \right] T_{i,j,k}^n \\ &+ \left[ \frac{1}{dV_{i,j,k}} \left( \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right) \right] T_\infty^n + \left[ \frac{1}{dV_{i,j,k}} \left( \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right) \right] T_\infty^n \end{aligned} \quad (2.137)$$

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}^n \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{xA_{i,j,k}}{dx} + \frac{yA_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{zA_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}}} + \frac{1}{\frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}}} \right]} \quad (2.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 26



รูปที่ 2.38 Node ประเภทที่ 26

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot xA_{i,j,k}}{dx} (T_{i+1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) &+ \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} \\
 + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} & \quad (2.139)
 \end{aligned}$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ \frac{1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz}}{dt \cdot \alpha} \right] T_{i,j,k}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i+1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \quad (2.140)
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}'' \geq 0$  จะได้สมการ

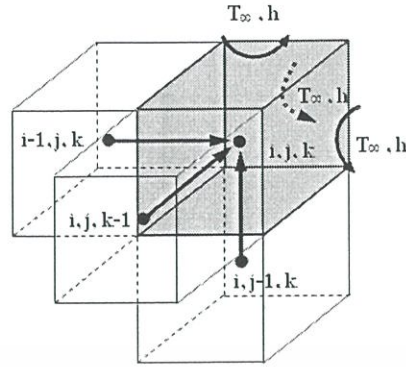
$$dt \leq \alpha \left[ \frac{dV_{i,j,k}}{\frac{x A_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{x A_{i,j,k}}{dx} + \frac{y A_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{z A_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{h \cdot y A_{i,j+1,k}} + \frac{1}{2 \cdot y A_{i,j,k}} + \frac{1}{h \cdot z A_{i,j,k+1}} + \frac{1}{2 \cdot z A_{i,j,k}}} \right]$$

(2.141)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Node ประเภท 27



รูปที่ 2.39 Node ประเภทที่ 27

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho \cdot C_p \cdot dV_{i,j,k}}{dt} (T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n) &= \frac{K \cdot xA_{i-1,j,k}}{dx} (T_{i-1,j,k}^n - T_{i,j,k}^n) + \frac{K \cdot yA_{i,j-1,k}}{dy} (T_{i,j-1,k}^n - T_{i,j,k}^n) \\
 + \frac{K \cdot zA_{i,j,k-1}}{dz} (T_{i,j,k-1}^n - T_{i,j,k}^n) &+ \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx/2}{K \cdot xA_{i,j,k}}} + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy/2}{K \cdot yA_{i,j,k}}} \\
 + \frac{T_\infty^n - T_{i,j,k}^n}{\frac{1}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz/2}{K \cdot zA_{i,j,k}}} &
 \end{aligned} \quad (2.142)$$

แทนค่า  $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$  จัดรูปใหม่ จะได้

$$\begin{aligned}
 T_{i,j,k}^{n+1} &= \left[ 1 - \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} - \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot xA_{i-1,j,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dx} \right] T_{i-1,j,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot yA_{i,j-1,k}}{dV_{i,j,k} \cdot dy} \right] T_{i,j-1,k}^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha \cdot zA_{i,j,k-1}}{dV_{i,j,k} \cdot dz} \right] T_{i,j,k-1}^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot xA_{i+1,j,k}} + \frac{dx}{2 \cdot xA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n + \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot yA_{i,j+1,k}} + \frac{dy}{2 \cdot yA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n \\
 &+ \left[ \frac{dt \cdot \alpha}{dV_{i,j,k} \left[ \frac{K}{h \cdot zA_{i,j,k+1}} + \frac{dz}{2 \cdot zA_{i,j,k}} \right]} \right] T_\infty^n
 \end{aligned} \quad (2.143)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ของเทอม  $T_{i,j,k}'' \geq 0$  จะได้สมการ

$$dt \leq \frac{dV_{i,j,k}}{\alpha \left[ \frac{x A_{i-1,j,k}}{dx} + \frac{y A_{i,j-1,k}}{dy} + \frac{z A_{i,j,k-1}}{dz} + \frac{1}{h \cdot x A_{i+1,j,k} + 2 \cdot x A_{i,j,k}} + \frac{1}{h \cdot y A_{i,j+1,k} + 2 \cdot y A_{i,j,k}} + \frac{1}{h \cdot z A_{i,j,k+1} + 2 \cdot z A_{i,j,k}} \right]} \quad (2.144)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงบรรจุกระป๋องและแบบพาซระหว่างการทำซ้ำด้วยความร้อน

### 2.2.1 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายในน้ำพริกแกงบรรจุกระป๋อง

ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่างน้ำพริกแกงแดง

ตัวอย่างน้ำพริกแกงแดงสดที่ใช้ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้รับความอนุเคราะห์จาก น้ำพริกแม่ศรี 245 ม.1 ถ.เพชรเกษม ต.ธรรมศาลา อ.เมือง จ.นครปฐม ผลิตโดยใช้สูตรและกรรมวิธีผลิตเดียวกับที่ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม

ส่วนประกอบของน้ำพริกแกงแดงสด (ข้อมูลจากข้างกระป๋องบรรจุภัณฑ์)

พริกชี้ฟ้า	35%
กระเทียม	23%
หอมแดง	20%
เกลือ	7%
ตะไคร้	6%
เครื่องเทศอื่นๆ	5%
น้ำตาล	3%
ข่า	1%

บรรจุน้ำพริกแกงแดงสดในกระป๋อง ขนาดส่วนสูง 35 mm. และเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm. น้ำหนักบรรจุกระป๋องละ 120 กรัม ปิดผนึกสนิท และแช่แข็ง มาจากโรงงาน จำนวน 338 กระป๋อง ซึ่ง ขนส่งจากแหล่งผลิตมายังภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังโดยรถยนต์ โดยแช่น้ำแข็งในถังโฟมแล้วนำมาเก็บไว้ในตู้แช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ  $-20^{\circ}\text{C}$  จนกว่าจะทดลอง

การทำซ้ำด้วยความร้อน

นำน้ำพริกแกงแดงสดแช่เยือกแข็งจำนวน 26 กระป๋องต่อการทดลอง ออกจากตู้แช่เยือกแข็งมาละลายในเครื่องอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยสุ่มตัวอย่างน้ำพริกแกงแดงสดจำนวน 3 กระป๋อง เพื่อเจาะรูตรงจุดกึ่งกลางด้านข้างของกระป๋องแล้วสอดเทอร์โมคัปเปิล (Type J, Ellab, Denmark) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Ellaba-s, Denmark) เพื่อบันทึกอุณหภูมิภายในกระป๋อง จนอุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลางกระป๋องมีค่าเท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$

ฆ่าเชื้อน้ำพริกด้วยความร้อนในหม้อฆ่าเชื้อ (KM Grand pack, Thailand) โดยใช้อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ (Retort Temperature, RT) เพื่อให้ได้ค่า  $F_0$  ตามแบบแผนการทดลอง ในตารางที่ 2.1 จากนั้นทำให้กระป๋องเย็นลงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในต่ำกว่า  $50^{\circ}\text{C}$  ในแต่ละการทดลองจะบันทึกอุณหภูมิภายในกระป๋องตัวอย่าง 3 กระป๋องทุกๆ 1 นาที คำนวณผลรวมของค่า  $F_0$  ทุกนาทีจนกระทั่งได้ค่า  $F_0$  รวมตามต้องการ ค่า  $F_0$  สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_0 = \int_0^t 10^{(CT-121)/Z} dt \quad (2.145)$$

โดย  $CT =$  อุณหภูมิที่จุดร้อนซ้ำที่สุดในภาชนะบรรจุ  
 $Z = 10^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 2.1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ ซึ่งนำข้อมูลมาจางานของ จิราภา และคณะ (2550) เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทรงกระบอก

การทดลองที่	$F_0$	Temperature( $^{\circ}\text{C}$ )
1	17.95	119.1
2	17.95	114.9
3	8.05	119.1
4	8.05	114.9
5	20	117
6	13	120
7	6	117
8	13	114
9	13	117 (1)
10	13	117 (2)
11	13	117 (3)
12	13	117 (4)
13	13	117 (5)

การประมาณค่าเบื้องต้นของคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำพริกแกงแดง

น้ำพริกแกงแดงสดมีค่าความชื้นประมาณ 2.58 g water/g dry matter หรือ 72.07%  
มาตรฐานเปียก ซึ่งสามารถประมาณค่าสมบัติเชิงความร้อนเบื้องต้นได้ ดังนี้

ค่าความหนาแน่น ( $\rho_s$ , kg/m<sup>3</sup>) โดย X คือ ความชื้น (g water/g dry matter)

$$\begin{aligned}\rho_s &= 1500 - 291X & (2.146) \\ &= 1500 - (291 \times 2.58) \\ &= 749.22 \quad \text{kg/m}^3\end{aligned}$$

ค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ , kJ/kg·K) โดย M คือ ความชื้นฐานเปียก

$$\begin{aligned}C_p &= 4.187M + 0.837 (1-M) & (2.147) \\ &= 3.349M + 0.837 \\ &= (3.349 \times 0.7207) + 0.837 \\ &= 3.2506 \quad \text{kJ/kg·K}\end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k, W/m·K) โดย W คือ ความชื้นฐานเปียก

$$\begin{aligned}k &= 0.056 + 0.567(W) & (2.148) \\ &= 0.056 + (0.567 \times 0.7207) \\ &= 0.4646 \quad \text{W/m·K}\end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ , m<sup>2</sup>/s)

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{k}{\rho \cdot c_p} & (2.149) \\ &= \frac{0.4646}{749.22 \times (3.2506 \times 1000)} \\ &= 1.93 \times 10^{-7} \quad \text{m}^2/\text{s}\end{aligned}$$

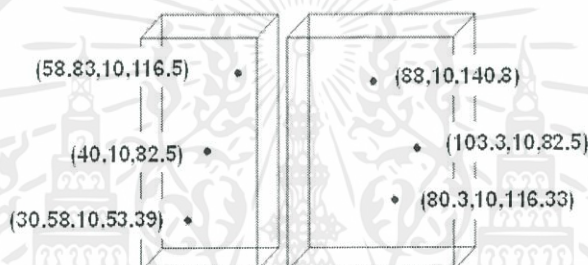
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h, W/m·K)

ค่า h มีค่าสูงมาก (Infinite Heat Transfer Coefficient)

## 2.2.2 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายในของวัตถุทรงสี่เหลี่ยมบาง (แบบเพาซ์)

### ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

การทดลองนี้ได้ใช้แผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $80 \times 20 \times 165$  mm. และ  $130 \times 20 \times 165$  mm. จะเห็นว่าแผ่นอะคริลิกมีรูปร่างคล้ายกับถ่วงเพาซ์ จากนั้นนำแผ่นอะคริลิกมาเจาะรูเพื่อสอดเทอร์โมคัปเปิล (Type J, Ellab, Denmark) ทั้งหมด 3 จุด คือขนาด  $80 \times 20 \times 165$  mm. ที่ตำแหน่งพิกัด (40,10,82.5), (58.83,10,116.5) และ (30.58,10, 53.39) ขนาด  $130 \times 20 \times 165$  mm. ที่ตำแหน่งพิกัด(80.3,10,116.33),(88,10,140.8) และ(103.3,10, 82.5)โดยเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (Ellaba-s, Denmark) เพื่อบันทึกอุณหภูมิภายใน จนอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิภายนอก โดยทดลองทั้งในสภาวะที่อุณหภูมิภายนอกคงที่ ( $T = 70^\circ\text{C}$ ) และไม่คงที่



รูปที่ 2.40 ภาพแสดงตำแหน่งพิกัดที่เจาะรูสอดเทอร์โมคัปเปิล

ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของแผ่นอะคริลิก ([www.matweb.com /search/DataSheet.aspx](http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx))

ค่าความหนาแน่น ( $\rho_s$ ,  $\text{kg/m}^3$ )

$$\rho_s = 1,180 \quad \text{kg/m}^3$$

ค่าความร้อนจำเพาะ ( $C_p$ ,  $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )

$$C_p = 1.47 \quad \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ( $k$ ,  $\text{W/m}\cdot\text{K}$ )

$$k = 0.190 \quad \text{W/m}\cdot\text{K}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ความร้อน ( $\alpha$ ,  $\text{m}^2/\text{s}$ )

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{k}{\rho \cdot c_p} \\ &= \frac{0.19}{1,180 \times (1.47 \times 1000)} \\ &= 1.09 \times 10^{-7} \quad \text{m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ,  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$$h = 800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{Pornchaloempong et al., 2003})$$

## 2.2.3 การประเมินความถูกต้องของผลที่ได้จากการทำนายและทดลอง

นำอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองและอุณหภูมิที่ทำนายได้มาประเมินความถูกต้องจากค่า SE (Std. Error Mean) หรือ ค่าความเฉลี่ยคลาดเคลื่อนมาตรฐานของข้อมูลจาก

$$SE \text{ (Std. Error Mean)} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (T_{\text{predict}} - T_{\text{experiment}})^2}{n}} \quad (2.150)$$

เมื่อ  $T_{\text{predict}}$  คือ อุณหภูมิที่ทำนาย ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{experiment}}$  คือ อุณหภูมิจากการทดลอง ( $^{\circ}\text{C}$ )

$n$  คือ จำนวนการทดลอง (ครั้ง)

## 2.3 ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.3.1 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายใน

#### น้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง

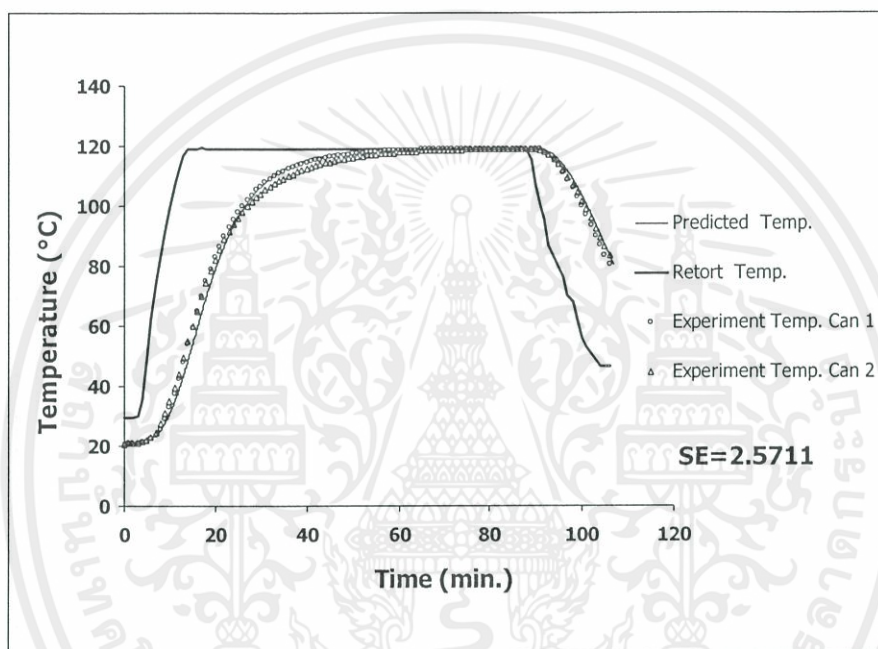
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ที่ได้จากการทดลองและการทำนาย ในสถานะต่างๆ สำหรับน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง

ที่	Example		SE ( $^{\circ}\text{C}$ )
	F0(min)	Retort temp( $^{\circ}\text{C}$ )	
1	17.95	119.1	2.5711
2	17.95	114.9	1.8031
3	8.05	119.1	2.5389
4	8.05	114.9	3.0403
5	20	117	2.2682
6	13	120	1.6796
7	6	117	2.2128
8	13	114	2.0135
9	13	117(1)	2.8250
10	13	117(2)	4.4707
11	13	117(3)	4.7265
12	13	117(4)	3.3450
13	13	117(5)	2.3024
<b>SE average</b>			<b>2.7536</b>

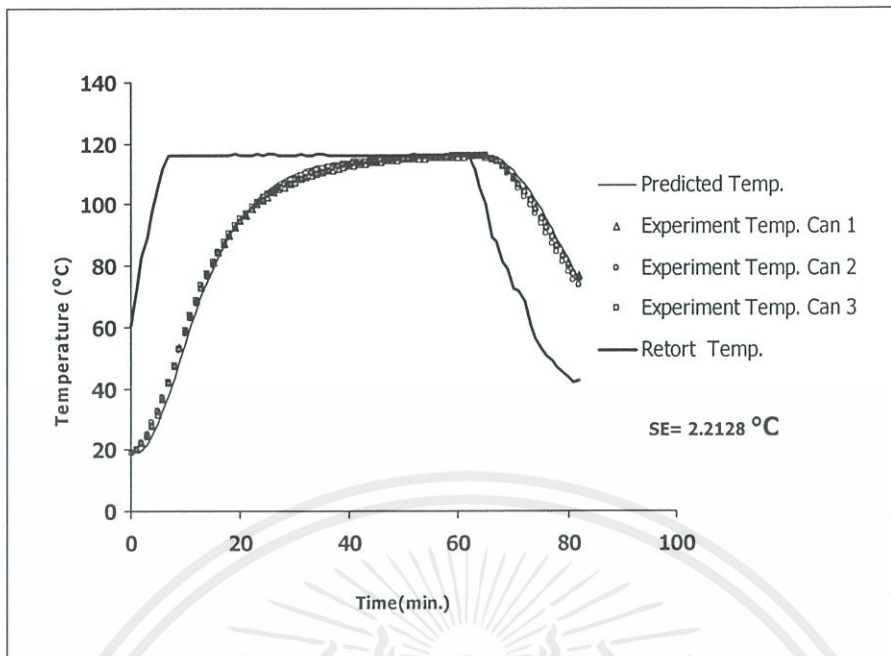
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าการการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงกระป๋องด้วยค่า SE (Std. Error Mean) พบว่ามี ค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ  $2.7536^{\circ}\text{C}$  แสดงว่า ค่าอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยจากค่าจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.41

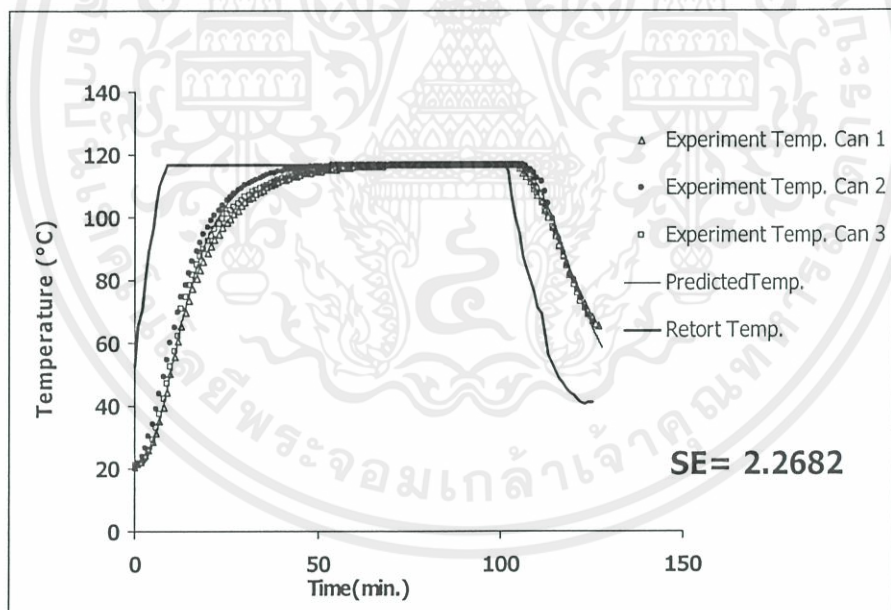
ตัวอย่างกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายที่สภาวะต่างๆ



(a) retort temp.= $119.1^{\circ}\text{C}$ ,  $F_0=17.95$  min

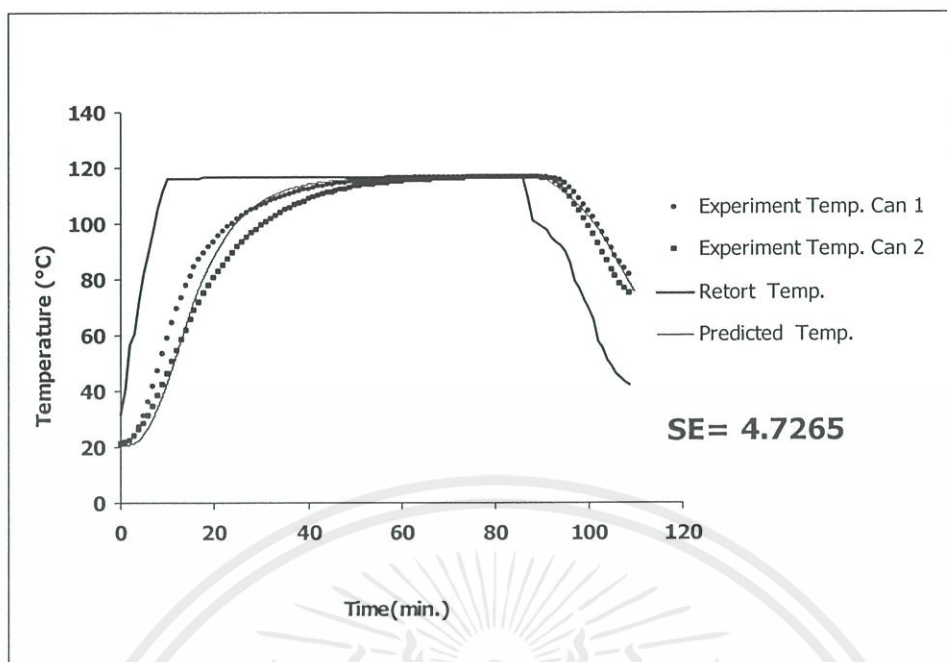


(b) retort temp.=117°C , F<sub>0</sub> = 6 min



(c) retort temp.=117°C , F<sub>0</sub> = 20 min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) retort temp.=117°C ,  $F_0 = 13$  min (ครั้งที่ 3)

รูปที่ 2.41 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ( $\alpha = 1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$ ,  $h = \infty$ )

### 2.3.2 ผลการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายในของวัตถุดูทรงสี่เหลี่ยมบาง (แบบเพาซ์)

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายในสถานะต่างๆ (อะคริลิก ขนาด  $80 \times 165 \times 20$  mm.)

การทดลอง		ค่า SE เฉลี่ย (°C) ที่พิกัดต่างๆ		
ที่	Temp. ภายนอก	(40,10,82.5)	(58.83,10,116.5)	(30.58,10, 53.39)
1	T คงที่ (70°C)	0.275	0.267	0.374
2	T ไม่คงที่	0.311	0.219	0.366

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงค่า SE (Std. Error Mean) ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และการทำนายในสภาวะต่างๆ (อะคริลิก ขนาด 130×165×20 mm.)

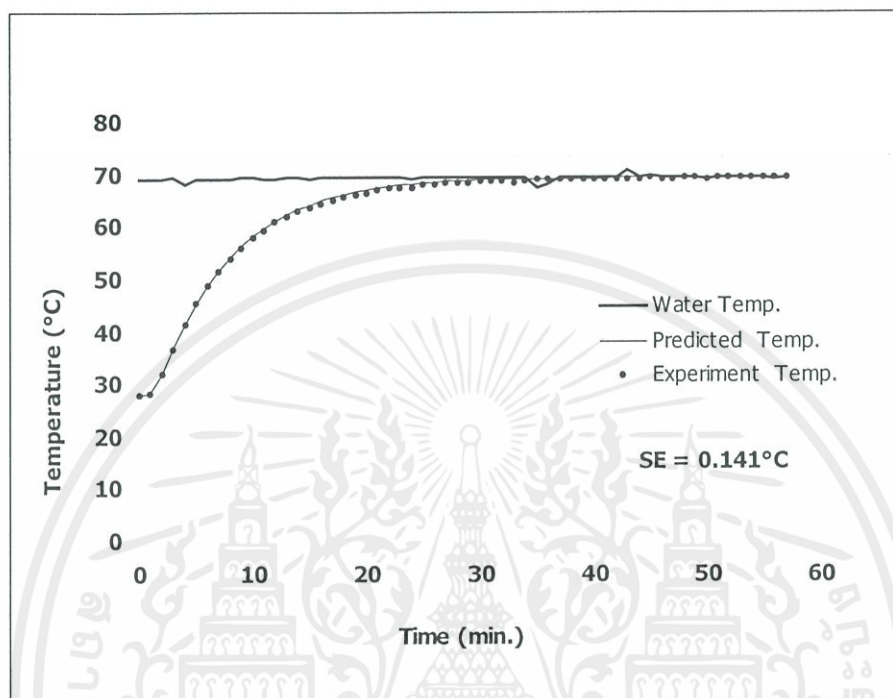
การทดลอง		ค่า SE เฉลี่ย (°C) ที่พิกัดต่างๆ		
ที่	Temp. ภายนอก	(80.3,10,116.33)	(88,10,140.8)	(103.3,10, 82.5)
3	T คงที่ (70 °C)	0.137	0.556	0.186
4	T ไม่คงที่	0.187	0.591	0.166

$$SE_{\text{average}} = 0.3029^{\circ}\text{C}$$

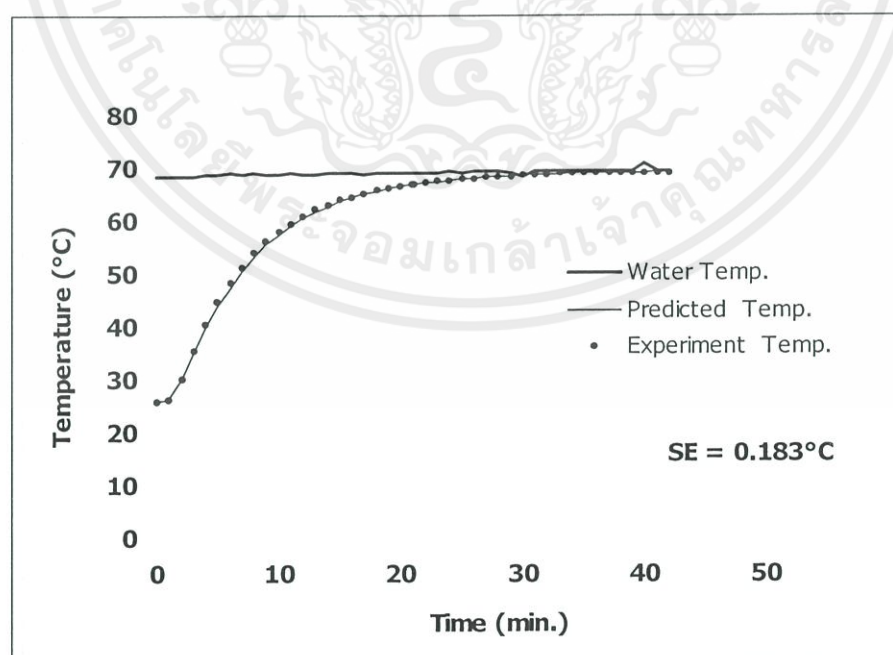
จากข้อมูลในตารางที่ 2.3-2.4 ได้แสดงค่าการแปรปรวนความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายอุณหภูมิภายในของแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมบางด้วยค่า SE (Std. Error Mean) พบว่ามี ค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ  $0.3029^{\circ}\text{C}$  แสดงว่า ค่าอุณหภูมิภายในของแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมบางที่ได้จากการทำนายมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ดังนั้นแบบจำลองที่ทำนายอุณหภูมิภายในของแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมบางนี้ จึงสามารถนำไปทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงบรรจุถุงพาสตี้ได้ โดยใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำพริกแกงแดงแทนค่าลงในแบบจำลอง และแบบจำลองนี้ยังสามารถตอบสนองต่ออุณหภูมิภายนอกได้ทุกช่วง ทั้งอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.42

ตัวอย่างกราฟแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง  
และค่าที่ได้จากการทำนายเมื่อได้รับความร้อนที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิคงที่ ( $70^{\circ}\text{C}$ )



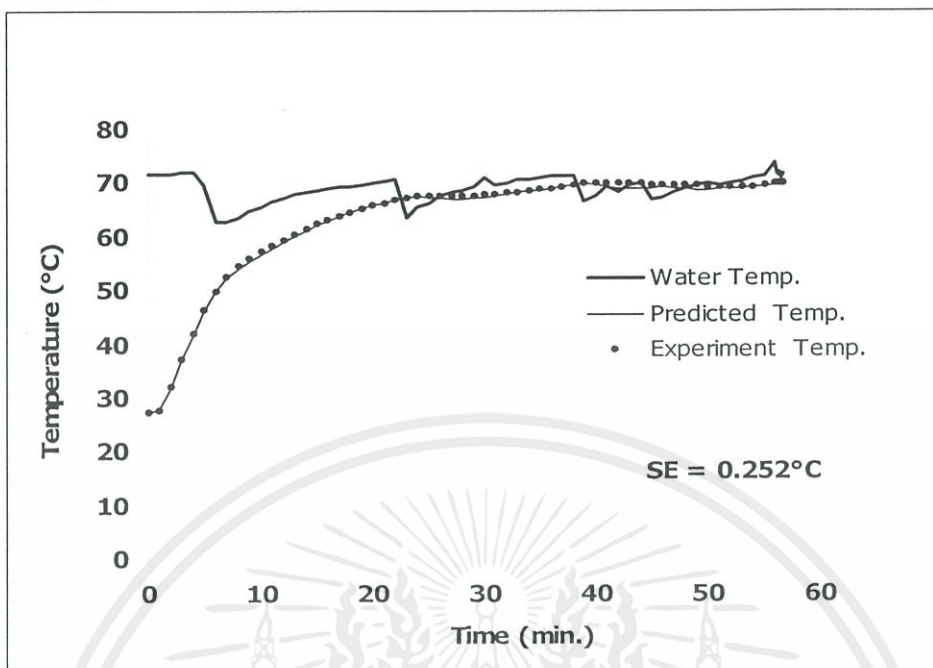
(a) อะคริลิก ขนาด  $80 \times 165 \times 20$  mm., พิกัด (40,10,82.5)



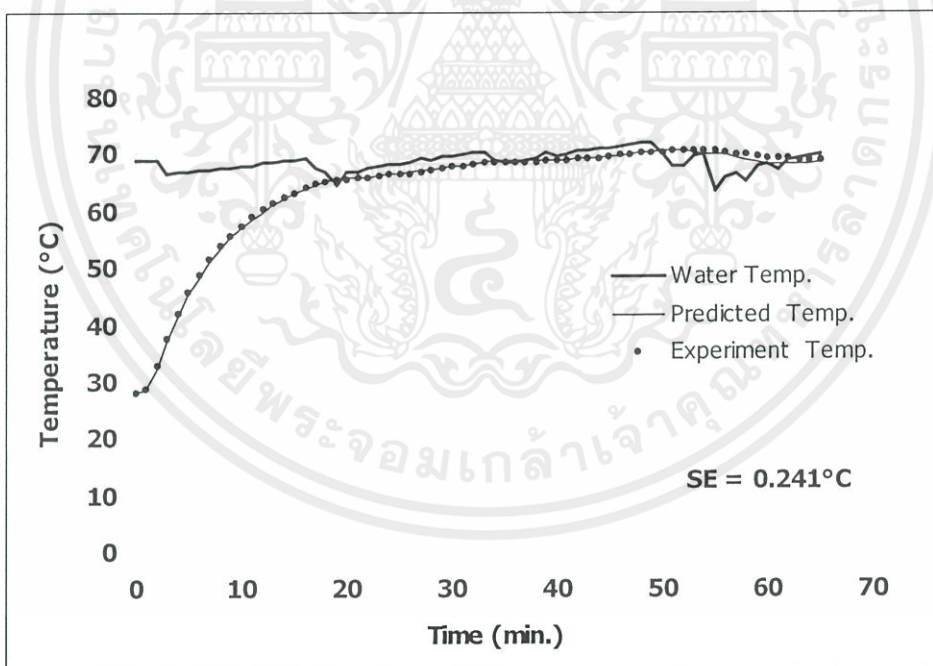
(b) อะคริลิก ขนาด  $130 \times 165 \times 20$  mm., พิกัด (80.3,10,116.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## อุณหภูมิไม่คงที่



(c) อะคริลิก ขนาด 80×165×20 mm., พิกัด (40,10,82.5)



(d) อะคริลิก ขนาด 130×165×20 mm., พิกัด (80.3,10,116.33)

รูปที่ 2.42 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย เมื่อได้รับความร้อนที่สถานะต่างๆ ( $\alpha = 1.09 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$ ,  $h = 800 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

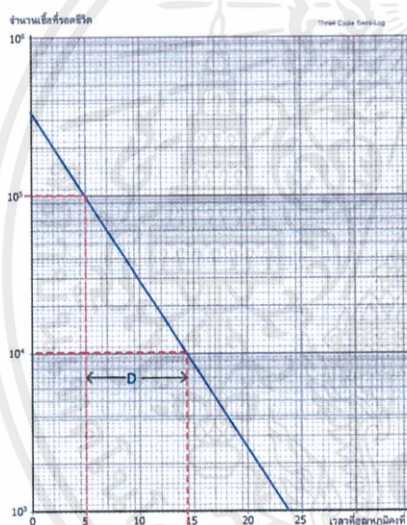
## บทที่ 3

# การประเมินคุณภาพน้ำพริกแกงแดงหลังให้ความร้อน

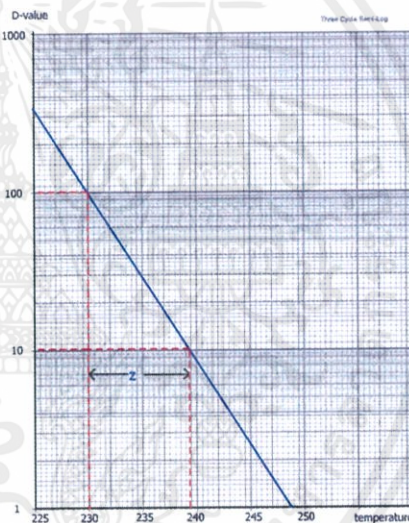
### 3.1 หาค่าจลนพลศาสตร์ (D และ Z value) ของสารในน้ำพริกแกงแดง

#### เมื่อได้รับความร้อน

โดยทั่วไปในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษาอาหารจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นในอาหาร ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพสามารถแสดงได้ด้วยค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (kinetics) ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (kinetics) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ วิธีของอาร์เรเนียส และ D-Z value โครงการนี้จะกล่าวถึง ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (kinetics) แบบ D-Z value เนื่องจาก เป็นค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ (kinetics) ที่นิยมใช้ในอาหารกระป๋อง



รูปที่ 3.1 D-value



รูปที่ 3.2 Z-value

ค่า D-value เป็นตัวบอกค่าความต้านทานความร้อน โดยความหมายของ D-value คือ ระยะเวลาเป็นนาทีที่มีผลทำให้จำนวนจุลินทรีย์ลดลงจากเดิมร้อยละ 90 หรือปริมาณสารเริ่มต้นลดลงจากเดิมร้อยละ 90 ที่ระดับอุณหภูมิหนึ่งๆ ซึ่งกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นเวลาที่ทำให้จุลินทรีย์เริ่มต้นหรือปริมาณสารเริ่มต้นลดลงไป 1 log-cycle ดังรูปที่ 3.1 ถ้าค่า D-value สูง หมายความว่า จุลินทรีย์ หรือปริมาณสารเริ่มต้นถูกทำลายยาก มีความทนทานต่อความร้อนสูง แต่ถ้า ค่า D-value ลดลง เชื้อจุลินทรีย์หรือปริมาณสารเริ่มต้นจะถูกทำลายได้ง่ายขึ้น มีความทนทานต่อความร้อนต่ำลง

ค่า Z-value เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ค่า D-value ลดลงไป 1 log-cycle หาได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่า D-value ในแนวแกนตั้งและอุณหภูมิในแนวแกนนอนบนกราฟ semi-log ดังรูปที่ 3.2

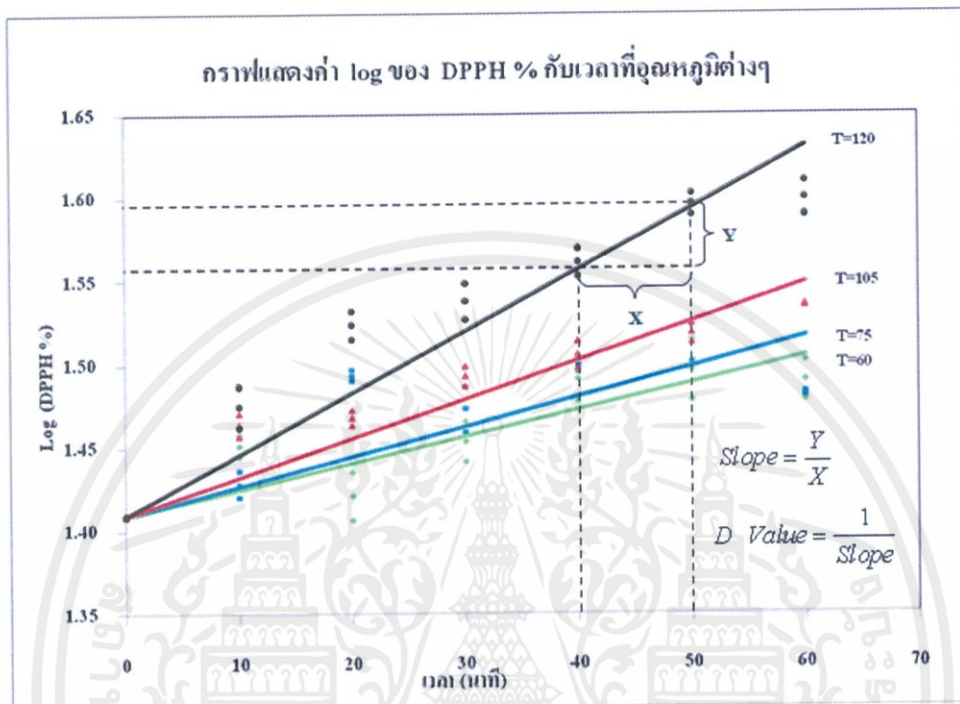
จากงานวิจัยของ มรรุต และคณะ (2549) ได้ศึกษาผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆในน้ำพริกแกงแดงไทย ได้แก่ ค่าสว่าง (L\*), ค่าสีแดง (a\*), ค่าสีเหลือง (b\*), ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก (total phenolic, TPC), ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%RSA) และค่าความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ หลังการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60, 75, 90, 105 และ 120 °C

โครงการนี้ได้วิเคราะห์ค่าจลนพลศาสตร์ (D-value และ Z-value) จากงานของ มรรุต และคณะ (2549) โดยการเขียนกราฟระหว่างค่าปริมาณคุณภาพกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ บนกราฟ semi-log จะได้สมการความสัมพันธ์และค่า R<sup>2</sup> ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าการเปลี่ยนแปลงสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มีค่า R<sup>2</sup> สูงสุด โครงการนี้จึงใช้ค่าจลนพลศาสตร์ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH เป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดง

ตารางที่ 3.1 แสดงสมการเชิงเส้นของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า log ของคุณภาพกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

คุณสมบัติ	อุณหภูมิ (°C)			
	60	75	105	120
<b>total phenolic</b>	$y = 0.0006x + 0.3996$ $R^2 = 0.5009$	$y = 0.0008x + 0.3996$ $R^2 = 0.3607$	$y = 0.0006x + 0.3996$ $R^2 = 0.4537$	$y = 0.0016x + 0.3996$ $R^2 = 0.4915$
<b>DPPH</b>	$y = 0.0016x + 1.4092$ $R^2 = 0.7029$	$y = 0.0018x + 1.4092$ $R^2 = 0.4802$	$y = 0.0023x + 1.4092$ $R^2 = 0.8376$	$y = 0.0037x + 1.4092$ $R^2 = 0.8523$
<b>FRAP</b>	$y = 0.001667x + 0.189463$ $R^2 = 0.3613$	$y = 0.002446x + 0.241513$ $R^2 = 0.2135$	$y = 0.002981x + 0.204304$ $R^2 = 0.5421$	$y = 0.004379x + 0.241032$ $R^2 = 0.5919$
<b>L*</b>	$y = 0.000169x + 1.471893$ $R^2 = 0.3972$	$y = 0.000764x + 1.481262$ $R^2 = 0.7745$	$y = 0.000230x + 1.497348$ $R^2 = 0.1874$	$y = 0.000334x + 1.497049$ $R^2 = 0.2916$
<b>a*</b>	$y = -0.000004x + 1.551338$ $R^2 = 0.001206$	$y = -0.000400x + 1.552622$ $R^2 = 0.580148$	$y = -0.000009x + 1.553524$ $R^2 = 0.011577$	$y = 0.000064x + 1.559425$ $R^2 = 0.071445$
<b>b*</b>	$y = 0.000137x + 1.689429$ $R^2 = 0.327901$	$y = -0.001094x + 1.708916$ $R^2 = 0.452425$	$y = 0.000118x + 1.706086$ $R^2 = 0.099244$	$y = 0.000163x + 1.715341$ $R^2 = 0.100666$

จากกราฟในรูปที่ 3.3 แสดงการหาค่า D-value ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งหาได้จากส่วนกลับความชันของกราฟ semi-log ระหว่างค่า DPPH(%) กับเวลา โดยได้แสดง ค่า D-value ที่อุณหภูมิต่างๆ ในตารางที่ 3.2

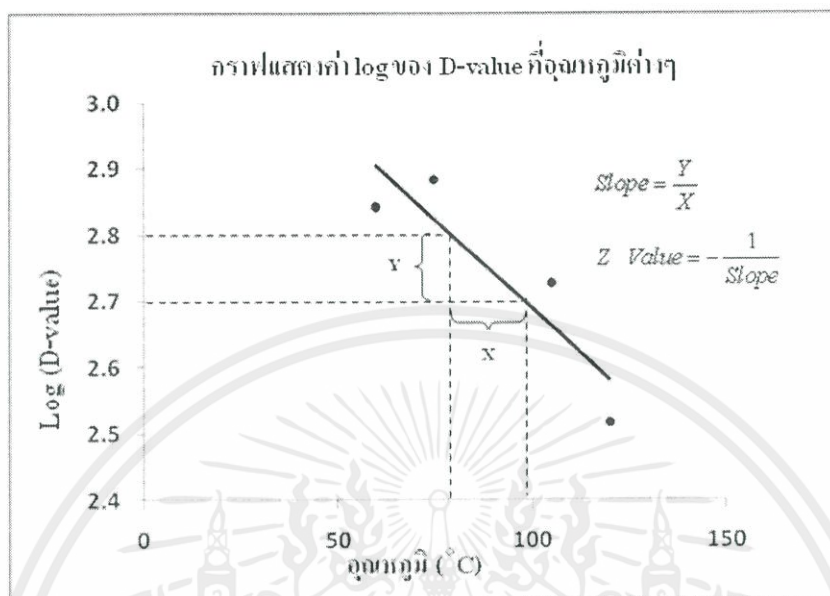


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า log ของ DPPH(%) กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 3.2 ค่า D-value ที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH

อุณหภูมิ (°C)	D-value (นาที)	R-square
60	-696.38	0.703
75	-765.11	0.480
105	-534.47	0.838
120	-329.27	0.852

จากกราฟในรูปที่ 3.4 แสดงการหาค่า Z-value ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ซึ่งหาได้จากกลับส่วนกลับความชันของกราฟ semi-log ระหว่างค่า D-value กับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า log ของ D-value ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากวิธีการข้างต้น ทำให้ทราบว่าสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่า D-value ที่อุณหภูมิอ้างอิง 121.1°C เท่ากับ -381.25 นาที และค่า Z-value เท่ากับ 186.017 °C จะสังเกตเห็นว่า ค่า D-value ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มีค่าเป็นลบ นั้นหมายความว่า ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น จะมีผลทำให้ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH เพิ่มขึ้นจากเดิม

### 3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อการประเมินคุณภาพน้ำพริกแกงแดงหลังการให้ความร้อน

การประเมินค่าเฉลี่ยคุณภาพที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละเวลา หาได้จากสมการค่าเฉลี่ยคุณภาพโดยปริมาตรเฉลี่ย (volume average quality retention) (Pornchaloempong et al. ,2003) คือ

$$\left( \frac{N}{N_0} \right)_{avg} = \frac{1}{V} \int_0^V 10^{-\frac{1}{D_{ref}} \int_0^t \frac{T-T_{ref}}{z} dt} dV \quad (3.1)$$

เมื่อ	$D_{ref}$	คือ D-value ที่อุณหภูมิอ้างอิง ( $121.1^{\circ}C$ ) เท่ากับ -381.25 นาที
	$N_0$	คือ ปริมาณเริ่มต้นที่บ่งชี้คุณภาพ
	$N$	คือ ปริมาณที่ $t$ ใดๆ
	$t$	คือ เวลา (s)
	$T$	คือ อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )
	$T_{ref}$	คือ อุณหภูมิอ้างอิง ( $121.1^{\circ}C$ )
	$V$	คือ ปริมาตร ( $m^3$ )
	$Z$	คือ Z-value ( $^{\circ}C$ ) เท่ากับ $186.017^{\circ}C$

### 3.3 การเปรียบเทียบผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง

งานของจิราภา และคณะ (2550) ได้ศึกษาผลของ  $F_0$  และอุณหภูมิฆ่าเชื้อเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำพริกแกงแดง โดยการวิเคราะห์สารที่สำคัญในน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องภายหลังจากการให้ความร้อน ที่สภาวะต่างๆกัน 13 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%RSA) ของน้ำพริกแกงแดงที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน เท่ากับ 25.873% RSA

การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำนายการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง ทำได้โดยนำค่าการเปลี่ยนแปลงคุณภาพหลังการให้ความร้อนที่ได้จากการทำนายและการทดลองจริงจากงานของจิราภา และคณะ (2550) มาประเมินความถูกต้องด้วยค่า SE (Std. Error Mean) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH หลังการให้ความร้อน และแสดงค่า SE (Std. Error Mean)ระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและการทดลองจริงของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องที่สภาวะต่างๆ

EXAMPLE		DPPH(%RSA)	
F0(min)	Retort temp(°C)	Predicted	Experiment
17.95	119.1	39.932	41.843
17.95	114.9	44.265	40.535
8.05	119.1	36.736	38.548
8.05	114.9	38.091	36.142
20	117	42.413	41.306
13	120	37.188	40.264
6	117	34.601	34.586
13	114	43.528	40.920
13	117(1)	37.685	36.447
13	117(2)	38.552	36.337
13	117(3)	39.225	36.638
13	117(4)	37.870	35.379
13	117(5)	37.207	35.336
		SE average	2.24

หมายเหตุ : ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%RSA) ของน้ำพริกแกงแดงที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน เท่ากับ 25.873% RSA

การประเมินความถูกต้องของค่าที่ได้จากการทำนายและการทดลองจริง มีค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ 2.24 % RSA

### 3.4 สภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงแพซซ์

การหาสภาวะที่เหมาะสม ในการผลิตน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงแพซซ์ ทำได้โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายเวลาในการฆ่าเชื้อและค่าคุณภาพหลังการให้ความร้อนของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 mm. และ สูง 37.5 mm. และบรรจุถุงแพซซ์ ขนาด 140 x 10 x 110 mm. ซึ่งมีปริมาตรเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.4 – 3.5 และ รูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า DPPH(%RSA), N/N<sub>0</sub>(%) และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ที่ค่า Fo และ อุณหภูมิต่างๆ ของกระป๋องขนาดครึ่งลิ 37.5 mm. ความสูง 35 mm. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C

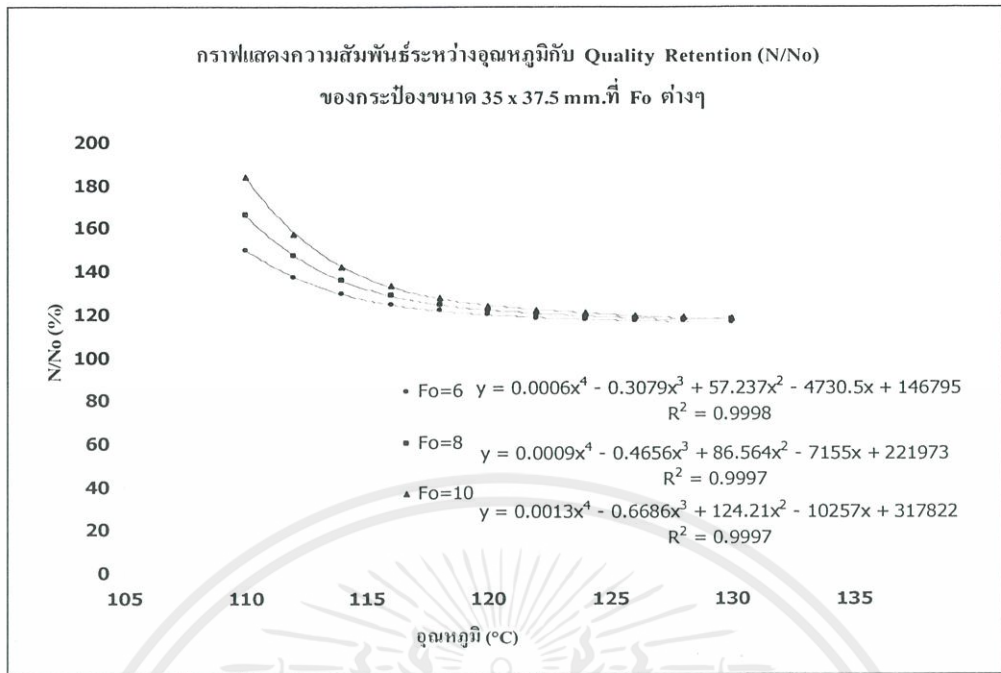
T ( °C )	Fo = 6 min.		Fo = 8 min.		Fo = 10 min.	
	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)
110	38.75(149.76)	111.42	42.89(165.77)	137.17	47.47(183.49)	162.92
112	35.44(136.97)	83.08	37.98(146.79)	99.33	40.70(157.31)	115.58
114	33.44(129.24)	65.17	35.07(135.53)	75.50	36.76(142.07)	85.75
116	32.21(124.50)	53.67	33.29(128.68)	60.33	34.40(132.96)	66.92
118	31.44(121.51)	46.00	32.20(124.47)	50.50	32.96(127.38)	54.83
120	30.94(119.60)	40.67	31.51(121.79)	43.83	32.07(123.96)	46.92
122	30.60(118.27)	36.67	31.06(120.03)	39.08	31.49(121.71)	41.33
124	30.38(117.42)	33.67	30.76(118.90)	35.58	31.10(120.22)	37.25
126	30.23(116.83)	31.25	30.56(118.13)	32.83	30.85(119.24)	34.17
128	30.14(116.49)	29.33	30.42(117.59)	30.58	30.67(118.55)	31.67
130	30.10(116.33)	27.75	30.36(117.34)	28.83	30.58(118.20)	29.75

หมายเหตุ : ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%RSA) ของน้ำพริกแกงแดงที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน เท่ากับ 25.873% RSA

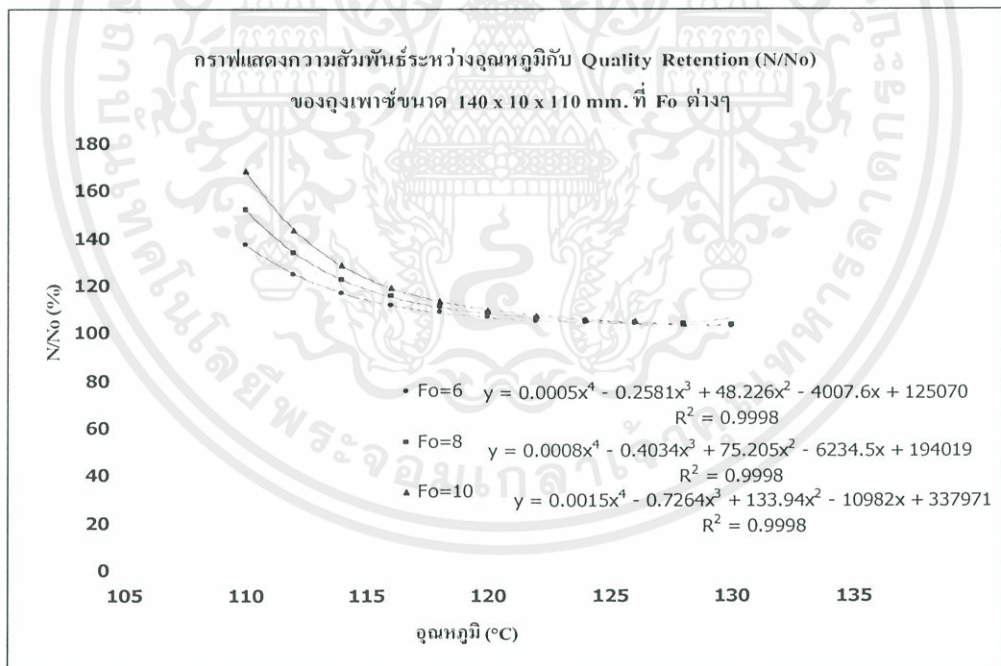
ตารางที่ 3.5 แสดงค่า DPPH(%RSA), N/N<sub>0</sub>(%) และเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ที่ค่า Fo และ อุณหภูมิต่างๆ ของถุงพาส์ขนาด 140 x 10 x 110 mm. อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C

T ( °C )	Fo = 6 min.		Fo = 8 min.		Fo = 10 min.	
	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)	DPPH (%RSA) (N/N <sub>0</sub> (%))	Time(min.)
110	35.48(137.14)	81.83	39.28(151.81)	107.60	43.48(168.05)	133.37
112	32.22(124.55)	53.33	34.53(133.47)	69.58	40.70(143.05)	85.85
114	30.19(116.68)	35.37	31.65(122.32)	45.62	36.76(128.23)	55.88
116	28.89(111.65)	24.03	29.83(115.30)	30.50	34.40(119.07)	36.98
118	28.05(108.40)	16.90	28.67(110.80)	20.98	32.96(113.25)	25.07
120	27.50(106.28)	12.40	27.91(107.88)	14.98	32.07(109.50)	17.55
122	27.14(104.91)	9.57	27.42(105.98)	11.20	31.49(107.06)	12.82
124	26.91(104.01)	7.75	27.10(104.75)	8.80	31.10(105.48)	9.83
126	26.76(103.41)	6.53	26.89(103.95)	7.25	30.85(104.46)	7.93
128	26.65(103.00)	5.70	26.75(103.40)	6.20	30.67(103.78)	6.67
130	26.57(102.71)	5.08	26.66(103.03)	5.47	30.58(103.32)	5.80

หมายเหตุ : ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (%RSA) ของน้ำพริกแกงแดงที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน เท่ากับ 25.873% RSA



(a) บรรจุกระป๋อง

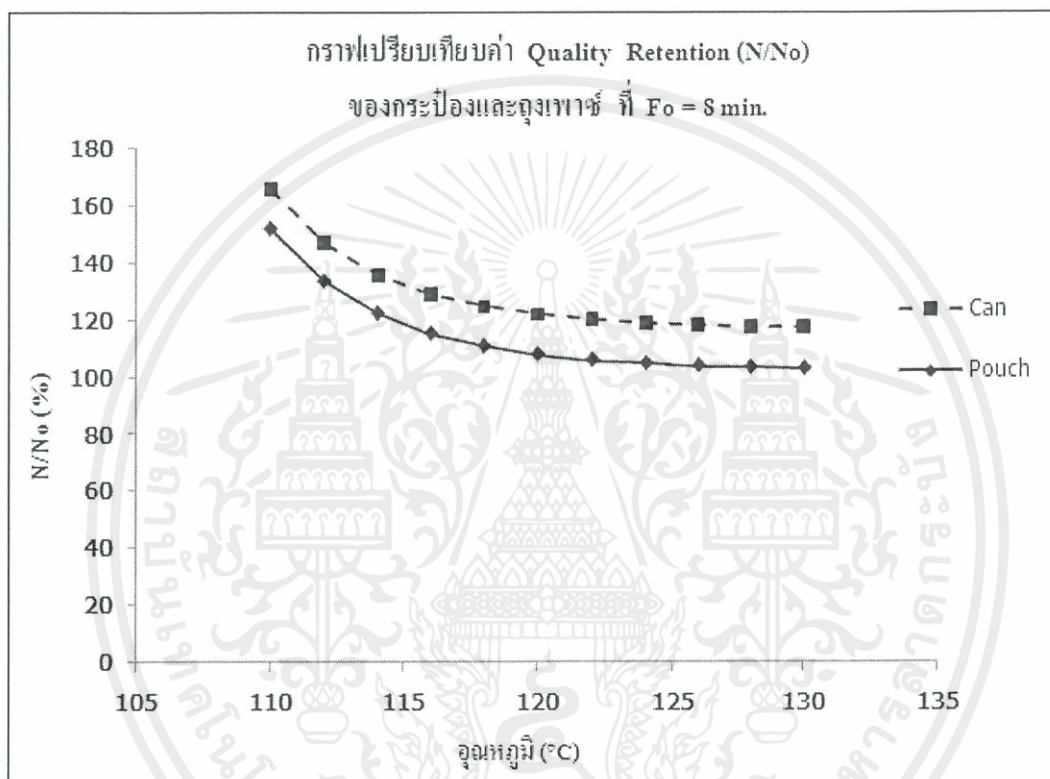


(b) บรรจุถุงพោซ์

รูปที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH กับอุณหภูมิมาเชื้อ  
ที่ค่า  $F_0$  เท่ากับ 6, 8 และ 10 ของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องและถุงพោซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 3.5 สามารถอธิบายได้ว่า ที่  $F_0$  เดียวกันเมื่ออุณหภูมิในการฆ่าเชื้อสูงขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าการใช้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อต่ำ เพราะอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อสูงขึ้นจะใช้เวลาในการฆ่าเชื่อน้อยลง และถ้าอุณหภูมิฆ่าเชื้ออยู่ในช่วง 110-115 °C จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูง แต่ถ้าอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ มากกว่า 120 °C การเพิ่มอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ไม่ว่าที่สภาวะ  $F_0$  ใดๆ



รูปที่ 3.6 กราฟเปรียบเทียบค่าคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงที่บรรจุกระป๋องกับถุงแพคเกจที่น้ำหนักบรรจุเท่ากันภายหลังจากได้รับความร้อนที่สภาวะเดียวกัน

จากกราฟในรูปที่ 3.6 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องกับบรรจุถุงแพคเกจ ที่น้ำหนักบรรจุเท่ากันภายหลังจากได้รับความร้อนที่สภาวะเดียวกัน พบว่า น้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากกว่าการบรรจุถุงแพคเกจ เนื่องจากการบรรจุกระป๋องใช้เวลาในการฆ่าเชื่อนานกว่าการบรรจุถุงแพคเกจ

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

การพัฒนากระบวนการผลิตน้ำพริกแกงแดงคุณภาพสูงบรรจุกระป๋องและถุงพោซ์ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายอุณหภูมิภายในด้วยวิธี Finite Differences โดยให้กระป๋องเป็นทรงกระบอกและถุงพោซ์เป็นทรงสี่เหลี่ยมบาง และทำนายการเปลี่ยนแปลงทางคุณภาพโดยใช้ค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH ( $D_{121.1}^{\circ C}$  เท่ากับ  $-381.25$  นาที และค่า  $Z$  เท่ากับ  $186.017^{\circ C}$ ) เป็นตัวบ่งชี้ จากการทดสอบความถูกต้องพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายอุณหภูมิภายในของน้ำพริกแกงแดงกระป๋อง และแผ่นอะคริลิกซึ่งเป็นตัวแทนของถุงพោซ์ได้อย่างแม่นยำ โดยมีค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ  $2.75$  และ  $0.30^{\circ C}$  ตามลำดับ เมื่อใช้แบบจำลองดังกล่าวร่วมกับค่า  $D-Z$  value ของสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH เพื่อประเมินคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงหลังการให้ความร้อนเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง 13 สภาวะ พบว่า มีค่า SE เฉลี่ย เท่ากับ  $2.24 \%RSA$

น้ำพริกแกงแดงที่ฆ่าเชื้อเพื่อให้ได้  $F_0$  เท่ากัน หากอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อต่ำกว่า  $120^{\circ C}$  คือในช่วง  $110-115^{\circ C}$  จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH สูง เนื่องจากใช้เวลาในการฆ่าเชือนาน การเพิ่มระยะเวลาในการฆ่าเชื้อในช่วงอุณหภูมินี้ หรือการเพิ่ม  $F_0$  จะมีผลต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH อย่างมาก แต่ถ้าอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ มากกว่า  $120^{\circ C}$  การเพิ่มอุณหภูมิ จะไม่มีผลต่อปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH ไม่ว่าที่สภาวะ  $F_0$  ใดๆ ดังนั้นหากต้องการผลิตน้ำพริกแกงแดงที่มีคุณภาพสูง ควรเลือกใช้อุณหภูมิฆ่าเชื้อที่ต่ำกว่า  $120^{\circ C}$

ถ้าเปรียบเทียบระหว่างน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องกับบรรจุถุงพោซ์ ที่ฆ่าเชื้อในสภาวะเดียวกัน โดยมีน้ำหนักบรรจุเท่ากัน น้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องจะมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ DPPH มากกว่าการบรรจุถุงพោซ์ เพราะน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องใช้เวลาในการฆ่าเชือนานกว่าการบรรจุถุงพោซ์



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณสารในน้ำพริกแกงแดงที่ผ่านการให้ความร้อน

temp.(C)	time(min)	rep	total phenolic mg gallic acid equivalent/g dry matter	DPPH (%)	FRAP mg Trolox equivalent/g dry matter FRAP Trolox
60	0	1	2.623	25.665	1.443
		2	2.399	25.643	1.225
		3	2.511	25.654	1.334
	10	1	2.684	28.714	1.873
		2	2.519	27.868	1.751
		3	2.602	28.291	1.812
	20	1	2.439	27.267	1.913
		2	2.393	25.505	1.681
		3	2.416	26.386	1.797
	30	1	2.66	29.219	1.866
		2	2.585	27.653	1.745
		3	2.623	28.436	1.805
	40	1	2.706	31.903	1.964
		2	2.658	30.052	1.554
		3	2.682	30.978	1.759
	50	1	2.681	32.698	1.977
		2	2.652	30.074	1.635
		3	2.666	31.386	1.806
60	1	2.867	31.751	2.057	
	2	2.756	30.069	1.804	
	3	2.812	30.91	1.93	
75	0	1	2.623	25.665	1.443
		2	2.399	25.643	1.225
		3	2.511	25.654	1.334
	10	1	2.624	27.309	2.481
		2	2.581	26.328	1.875
		3	2.603	26.818	2.178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณสารในน้ำพริกแกงแดงที่ผ่านการให้ความร้อน (ต่อ)

temp.(C)	time(min)	rep	total phenolic mg gallic acid equivalent/g dry matter	DPPH (%)	FRAP mg Trolox equivalent/g dry matter
75	20	1	2.806	31.355	2.78
		2	2.458	30.899	1.725
		3	2.632	31.127	2.252
	30	1	2.756	30.636	2.841
		2	2.597	28.799	1.775
		3	2.677	29.717	2.308
	40	1	2.797	31.835	2.767
		2	2.697	31.279	1.84
		3	2.747	31.557	2.303
	50	1	2.789	31.662	2.831
		2	2.762	31.584	1.736
		3	2.775	31.623	2.284
	60	1	2.801	30.38	2.661
		2	2.594	30.22	1.762
		3	2.697	30.3	2.212
90	0	1	2.623	25.665	1.443
		2	2.399	25.643	1.225
		3	2.511	25.654	1.334
	10	1	2.613	27.131	2.056
		2	2.612	25.83	1.74
		3	2.613	26.48	1.898
	20	1	2.643	27.358	2.131
		2	2.534	25.818	1.668
		3	2.588	26.588	1.899
	30	1	2.668	28.547	2.194
		2	2.648	26.764	1.735
		3	2.658	27.656	1.964

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณสารในน้ำพริกแกงแดงที่ผ่านการให้ความร้อน (ต่อ)

temp.(C)	time(min)	rep	total phenolic mg gallic acid equivalent/g dry matter	DPPH (%)	FRAP mg Trolox equivalent/g dry matter
90	40	1	2.635	28.499	2.137
		2	2.594	26.899	1.856
		3	2.614	27.699	1.947
	50	1	2.716	29.24	2.233
		2	2.636	26.837	1.623
		3	2.676	28.039	1.928
	60	1	2.716	29.806	2.199
		2	2.586	28.242	1.748
		3	2.651	29.024	1.974
105	0	1	2.623	25.665	1.443
		2	2.399	25.643	1.225
		3	2.511	25.654	1.334
	10	1	2.653	29.573	2.078
		2	2.517	28.663	1.831
		3	2.585	29.118	1.954
	20	1	2.679	29.704	2.119
		2	2.511	29.087	1.83
		3	2.595	29.396	1.975
	30	1	2.731	31.548	2.229
		2	2.543	30.685	1.917
		3	2.637	31.116	2.073
	40	1	2.765	32.643	2.386
		2	2.537	31.448	1.964
		3	2.651	32.046	2.175
	50	1	2.771	33.432	2.467
		2	2.631	32.583	1.914
		3	2.701	33.007	2.191
	60	1	2.803	34.318	2.64
		2	2.67	34.238	1.943
		3	2.736	34.278	2.292

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลปริมาณสารในน้ำพริกแกงแดงที่ผ่านการให้ความร้อน (ต่อ)

temp.(C)	time(min)	rep	total phenolic mg gallic acid equivalent/g dry matter	DPPH (%)	FRAP mg Trolox equivalent/g dry matter
120	0	1	2.623	25.665	1.443
		2	2.399	25.643	1.225
		3	2.511	25.654	1.334
	10	1	2.977	30.705	2.409
		2	2.535	29.014	2.089
		3	2.756	29.859	2.249
	20	1	2.977	34.038	2.65
		2	2.617	32.747	2.233
		3	2.797	33.393	2.441
	30	1	2.976	35.356	2.918
		2	2.738	33.643	2.157
		3	2.857	34.499	2.537
	40	1	3.055	37.092	3.118
		2	2.886	35.715	2.522
		3	2.971	36.403	2.82
	50	1	3.064	40.047	3.218
		2	2.942	38.876	2.41
		3	3.003	39.461	2.814
	60	1	3.21	40.678	3.094
		2	2.824	38.836	2.546
		3	3.017	39.757	2.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่าสีในน้ำพริกแกงแดง โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

temp.(C)	time(min)	rep	L*	a*	b*	$\Delta E^*$
Standard	-	-	29.14	35.94	48.74	-
60	10	1	29.48	35.55	48.7	0.52
		2	29.89	35.6	48.66	0.83
		3	29.93	35.6	49.6	1.22
	20	1	29.75	35.53	48.68	0.74
		2	29.92	35.5	49.21	1.01
		3	30.15	35.25	49.89	1.68
	30	1	29.86	35.44	49.12	0.96
		2	30.34	35.62	49.55	1.48
		3	30.26	35.48	49.63	1.5
	40	1	30.06	35.68	50.21	1.75
		2	30.4	35.73	49.94	1.75
		3	30.51	35.69	49.78	1.74
	50	1	29.63	35.43	48.94	0.73
		2	30.18	35.72	49.86	1.54
		3	30.24	35.37	49.11	1.29
	60	1	30.17	35.75	49.68	1.41
		2	30.28	35.61	50.09	1.8
		3	30.35	35.56	49.82	1.67
75	10	1	30.53	35.11	49.35	1.73
		2	30.95	34.89	48.38	2.12
		3	30.94	35.6	50.74	2.71
	20	1	31.55	35.29	50.81	3.24
		2	31.75	35.18	50.86	3.45
		3	32.37	34.6	46.76	4.02
	30	1	32.15	34.49	47.61	3.53
		2	32.49	34.04	45.23	5.21
		3	32.37	34.62	47.26	3.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่าสีในน้ำพริกแกงแดง โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ต่อ)

temp.(C)	time(min)	rep	L*	a*	b*	$\Delta E^*$
75	40	1	32.33	34.75	47.64	3.58
		2	32.58	35.05	49	3.56
		3	32.4	35.56	49	3.29
	50	1	31.68	34.64	49.29	2.91
		2	32.39	34.57	48.81	3.53
		3	33.27	33.23	41.02	9.17
	60	1	33.92	33.29	41.55	9.03
		2	33.76	33.62	42	8.49
		3	33.87	33.51	42.17	8.45
90	10	1	32.03	35.36	50.93	3.67
		2	32.25	35.87	52.2	4.65
		3	31.92	35.3	51.06	3.68
	20	1	32.95	33.3	42.7	7.61
		2	31.8	34.99	50.83	3.51
		3	32.09	34.78	50.63	3.69
	30	1	31.47	34.55	49.49	2.81
		2	32.03	34.8	50.94	3.81
		3	31.94	34.85	50.55	3.51
	40	1	31.66	35.35	51.2	3.57
		2	31.77	35.51	52.02	4.23
		3	31.84	34.78	50.39	3.37
	50	1	31.74	35.96	51.24	3.61
		2	31.73	35.07	50.2	3.1
		3	31.94	35.09	50.96	3.67
	60	1	31.24	35.15	50.28	2.72
		2	31.84	35.21	51.4	3.86
		3	31.97	35.25	50.36	3.33
105	10	1	32.03	35.6	51.7	4.15
		2	32.14	35.8	52.36	4.7
		3	32.33	35.71	51	3.92
	20	1	32.1	35.7	50.83	3.63
		2	32.18	35.93	52.11	4.54
		3	32.11	35.73	51.7	4.2

ตารางที่ ก.2 ค่าสีในน้ำพริกแกงแดง โดยผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ต่อ)

temp.(C)	time(min)	rep	L*	a*	b*	$\Delta E^*$
105	30	1	31.87	35.65	50.83	3.45
		2	32.21	35.66	50.55	3.57
		3	32.44	35.6	51.67	4.43
	40	1	31.81	35.77	50.92	3.45
		2	32.07	36.02	50.75	3.55
		3	32.24	35.71	51.65	4.26
	50	1	31.99	35.45	51.03	3.69
		2	32.34	35.88	52.08	4.63
		3	32.32	35.81	52.01	4.56
	60	1	32.27	35.73	51	3.87
		2	32.11	35.71	51.76	4.24
		3	32.22	35.76	51.87	4.39
120	10	1	31.25	35.85	53.79	5.47
		2	32.41	35.73	53.25	5.57
		3	32.22	36.12	52.98	5.24
	20	1	32.31	37.1	51.65	4.46
		2	32.56	36.98	53.39	5.87
		3	32.13	36.68	52.77	5.07
	30	1	32.27	36.75	52.17	4.71
		2	32.39	36.52	52.19	4.78
		3	32.94	36.35	52.79	5.57
	40	1	32.72	36.13	51.48	4.51
		2	32.37	36.71	52.32	4.88
		3	32.64	36.64	52.91	5.49
	50	1	32.24	36.81	53.58	5.81
		2	32.95	36.69	53.96	6.51
		3	32.7	36.53	53.42	5.91
	60	1	32.35	36.32	52.37	4.86
		2	32.22	36.3	52.58	4.94
		3	32.56	36.21	52.76	5.28

หมายเหตุ: L\* หมายถึง ค่าความสว่าง

a\* หมายถึง ค่าสีแดง

b\* หมายถึง ค่าสีเหลือง

$\Delta E^*$  หมายถึง ค่าความแตกต่างรวมของสี

ตารางที่ ก.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ

การทดลอง	F0	Temperature (°C)	จำนวนชั่วโมง	L*	a*	b*	$\Delta E$
Unheated	-	-	5	31.02	35.68	46.97	-
				31.48	35.9	47.17	-
				31.02	35.25	44.79	-
				32.01	33.79	41.78	-
				30.55	36.35	50.29	-
1	17.95	119.1	5	29.54	32.06	47.97	13.17
				29.37	31.73	45.27	10.73
				29.48	33.60	50.02	14.92
				29.33	32.71	49.55	14.60
				30.02	32.29	48.73	13.80
2	17.95	114.9	5	29.33	30.95	43.96	9.85
				28.50	33.25	48.71	13.84
				28.21	32.18	47.78	13.21
				27.95	32.27	47.50	12.99
				28.97	32.29	48.91	14.11
3	8.05	119.1	5	30.13	33.06	47.46	12.40
				30.75	31.86	44.88	10.16
				30.15	33.20	49.59	14.48
				30.10	33.26	51.02	15.89
				30.12	33.09	46.11	11.28
4	8.05	114.9	5	30.79	33.15	46.55	11.45
				32.80	31.53	39.98	6.12
				33.18	31.77	39.48	5.71
				30.49	34.34	51.39	16.13
				30.40	34.64	51.60	16.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ(ต่อ)

การทดลอง	F0	Temperature (°C)	จำนวนซ้ำ	L*	a*	b*	$\Delta E$
5	20	117	5	29.35	31.44	47.69	13.10
				29.74	32.09	47.21	12.41
				29.62	32.64	46.83	11.93
				29.28	33.26	49.96	14.93
				29.54	33.07	50.03	14.99
6	13	120	5	30.33	32.50	46.70	11.76
				31.03	32.76	46.73	11.69
				29.83	33.70	50.49	15.34
				29.61	33.08	48.14	13.13
				30.07	34.26	51.11	15.89
7	6	117	5	33.52	31.43	39.03	5.73
				33.37	32.60	39.56	5.39
				31.15	34.14	50.43	15.17
				32.72	32.00	41.51	7.12
				31.75	35.27	51.74	16.45
8	13	114	5	30.24	31.58	43.71	9.22
				28.87	32.91	48.90	14.01
				29.31	32.36	48.20	13.36
				29.27	32.83	49.14	14.19
				29.39	33.24	49.26	14.23
9	13	117	5	29.15	33.80	49.27	14.21
				31.01	32.33	44.91	10.03
				30.90	32.54	47.98	12.96
				29.59	32.96	48.22	13.23
				29.87	33.44	50.44	15.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าสีของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ(ต่อ)

การทดลอง	F0	Temperature (°C)	จำนวนชั่วโมง	L*	a*	b*	$\Delta E$
10	13	117	5	30.46	32.97	48.75	13.66
				29.93	32.56	45.65	10.77
				29.73	32.69	50.02	15.02
				29.29	33.69	49.53	14.45
				29.43	33.50	50.08	15.00
11	13	117	5	30.16	32.96	49.44	14.36
				30.18	33.85	51.27	16.07
				29.62	33.22	49.96	14.89
				29.72	33.00	49.99	14.94
				30.25	32.65	49.66	14.62
12	13	117	5	30.77	33.10	47.56	12.45
				30.21	33.02	46.98	11.93
				30.90	32.54	47.98	12.96
				30.48	34.50	50.27	15.01
				30.21	33.68	51.09	15.90
13	13	117	5	31.19	33.11	46.30	11.20
				31.37	32.22	46.96	12.03
				29.94	33.15	50.04	14.95
				30.22	33.77	50.64	15.45
				30.82	33.82	51.38	16.15

หมายเหตุ : L\* หมายถึง ค่าความสว่าง

a\* หมายถึง ค่าสีแดง

b\* หมายถึง ค่าสีเหลือง

$\Delta E$  หมายถึง ค่าความแตกต่างรวมของสี

ตารางที่ ก.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด(TPC), ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ(%RSA) และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ

การทดลอง	F <sub>0</sub>	Temperature(°C)	จำนวนซ้ำ	TPC	%RSA	FRAP
Unheated	-	-	3	7.538	25.946	3.799
				7.288	25.726	3.560
				6.966	25.946	3.483
1	17.95	119.1	3	10.691	41.577	7.116
				10.669	42.754	6.865
				10.666	41.198	6.859
2	17.95	114.9	3	10.573	40.727	6.742
				10.505	40.072	6.778
				10.775	40.807	6.955
3	8.05	119.1	3	10.329	38.797	6.359
				9.846	39.003	6.191
				9.886	37.814	6.371
4	8.05	114.9	3	8.798	34.184	5.688
				9.002	36.251	5.865
				9.270	37.990	5.682
5	20	117	3	10.165	40.153	6.706
				10.147	42.079	6.742
				10.118	41.686	6.811
6	13	120	3	9.735	39.856	5.518
				9.828	40.652	5.919
				9.800	40.283	6.080
7	6	117	3	8.526	33.729	5.311
				8.751	34.224	5.688
				8.787	35.806	5.742
8	13	114	3	10.326	40.131	6.167
				10.097	40.469	6.113
				10.548	42.159	6.562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด(TPC), ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ(%RSA) และความสามารถในการรีดิวซ์เฟอร์ริก (FRAP) ของน้ำพริกแกงแดงหลังจากการผ่านการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนตามสภาวะต่างๆ (ต่อ)

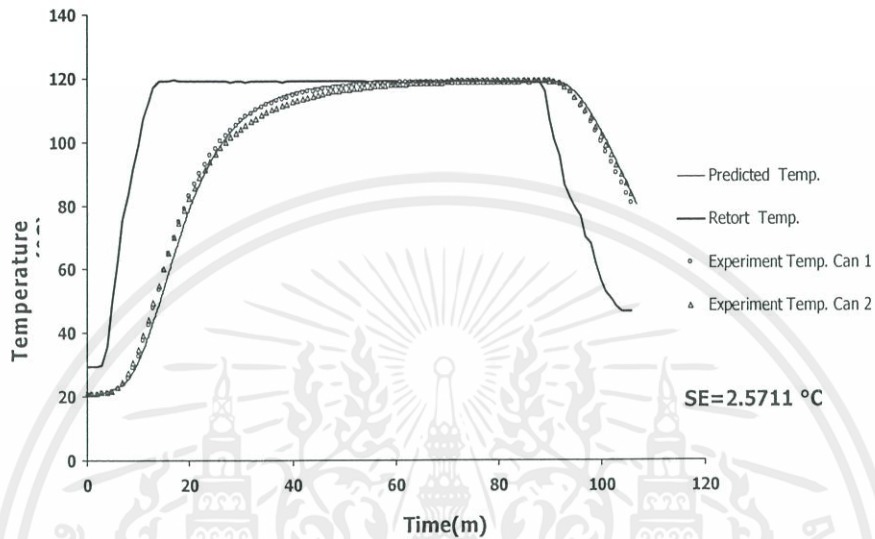
การทดลอง	F <sub>0</sub>	Temperature(°C)	จำนวนซ้ำ	TPC	%RSA	FRAP
9	13	117	3	9.224	36.962	6.161
				9.360	36.822	6.365
				9.317	35.558	6.577
10	13	117	3	9.542	36.826	6.467
				9.442	36.846	6.697
				9.460	35.337	6.733
11	13	117	3	9.395	36.755	6.538
				9.385	36.295	6.733
				9.796	36.866	6.694
12	13	117	3	9.030	35.454	6.577
				9.077	35.989	6.380
				9.238	34.694	6.461
13	13	117	3	9.274	35.794	6.502
				9.324	34.823	6.562
				9.181	35.393	6.305

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

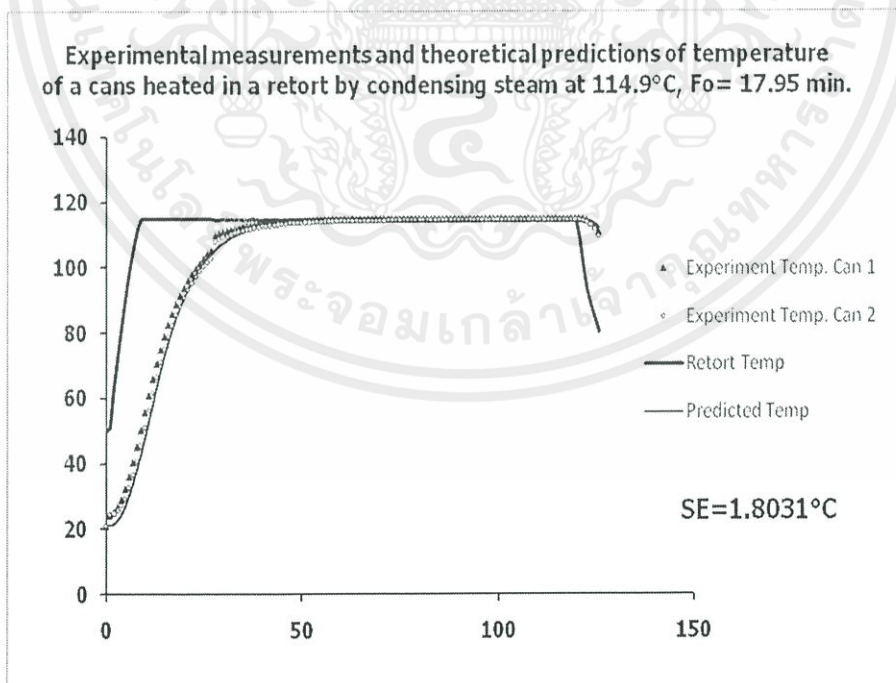
## ภาคผนวก ข.

กราฟเปรียบเทียบผลการทดลองและการทำนายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

**Experimental and predicted center temperature of Thai red curry paste in cans during retorting at 119.1°C,  $F_0 = 17.95$  min.**

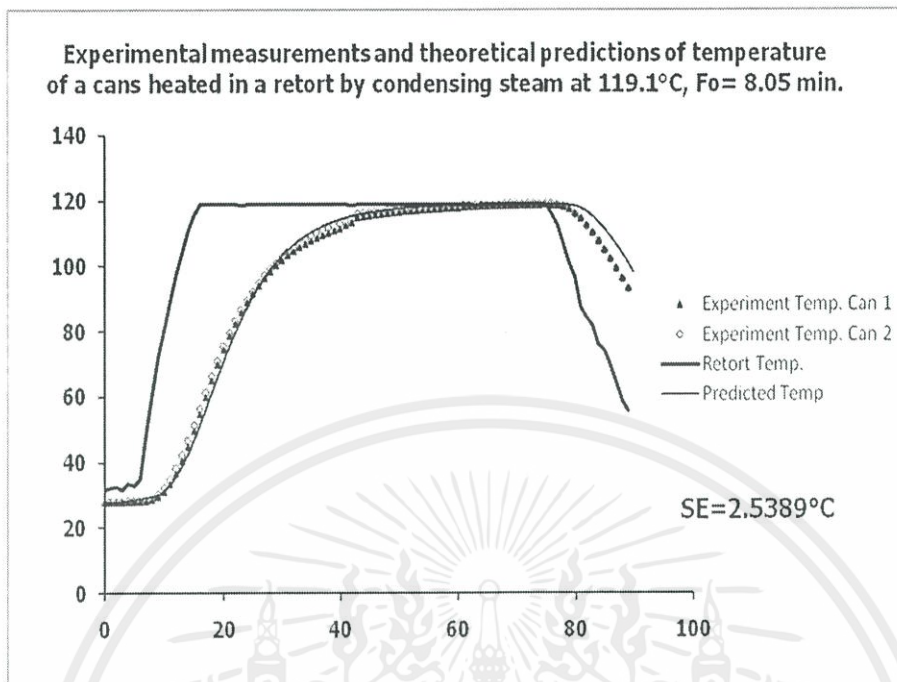


รูปที่ ข.1 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 119.1 °C,  $F_0 = 17.95$  min)

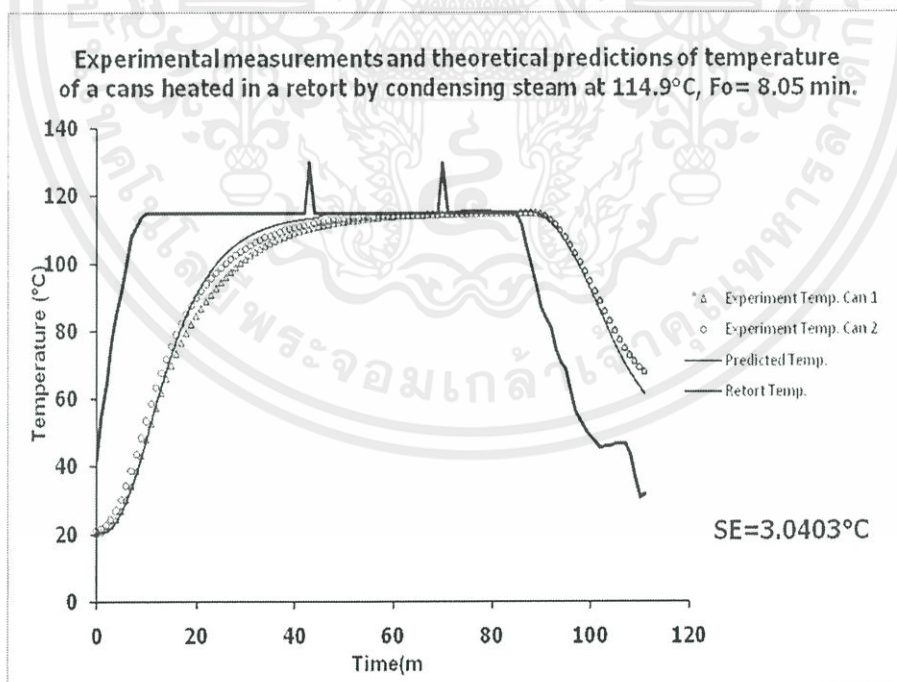


รูปที่ ข.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 114.9 °C,  $F_0 = 17.95$  min)

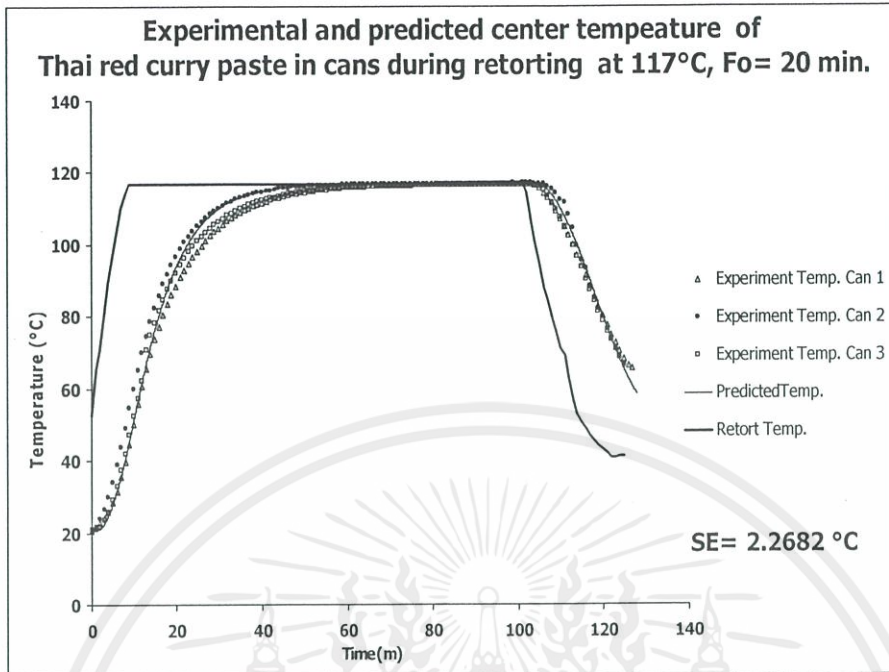
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



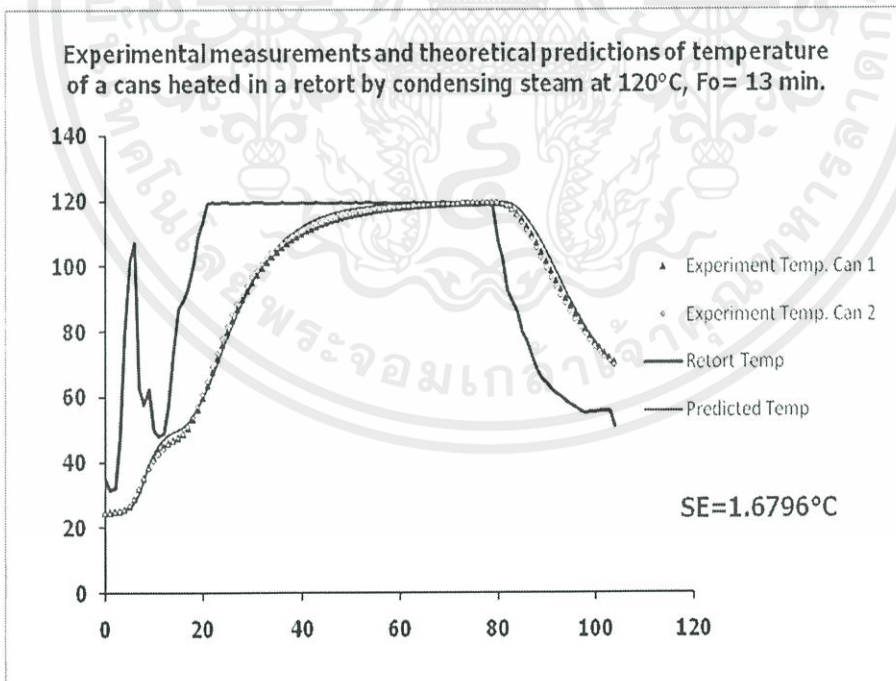
รูปที่ ข.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 119.1 °C, F<sub>0</sub> = 8.05 min)



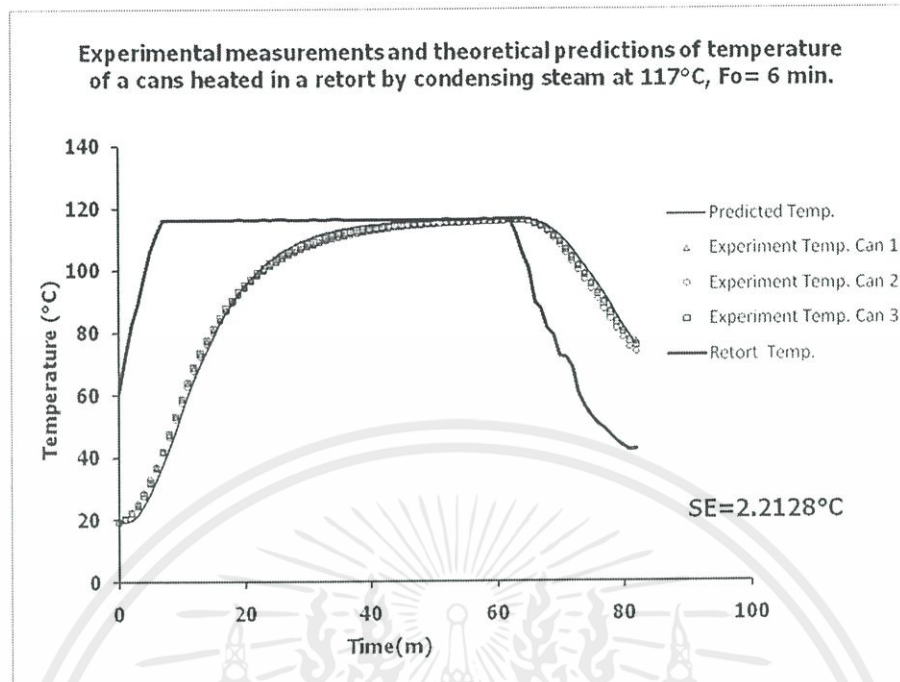
รูปที่ ข.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 114.9 °C, F<sub>0</sub> = 8.05 min)



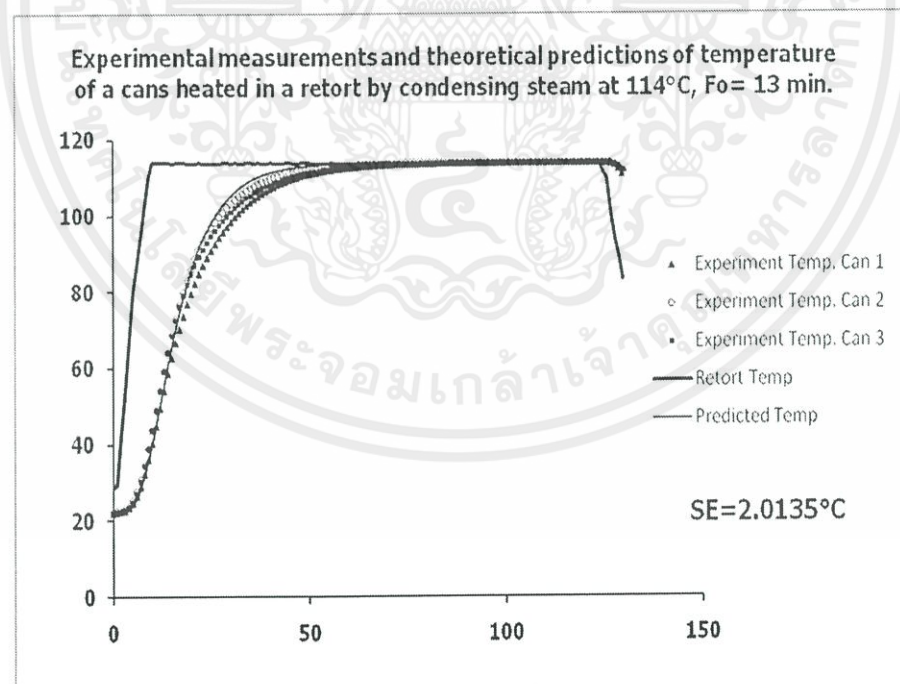
รูปที่ ข.5 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117 °C,  $F_0 = 20$  min)



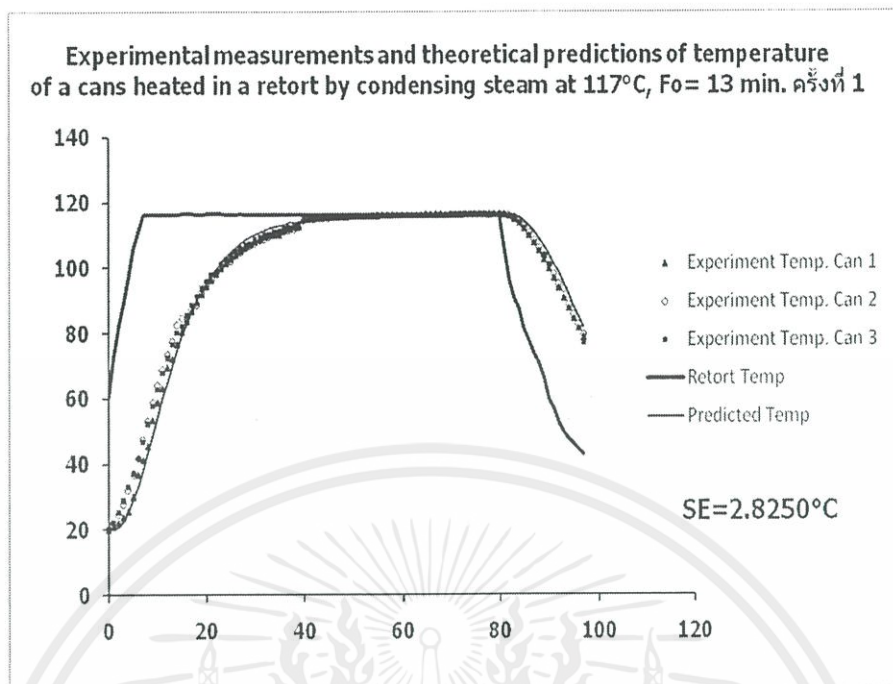
รูปที่ ข.6 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 120 °C,  $F_0 = 13$  min)



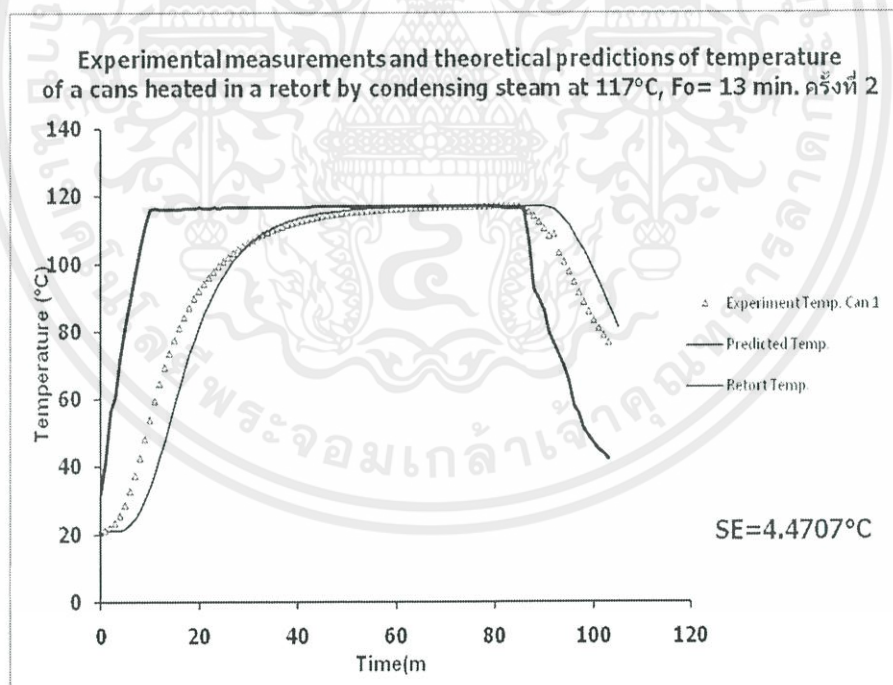
รูปที่ ข.7 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp =  $117^{\circ}\text{C}$ ,  $F_0 = 6$  min)



รูปที่ ข.8 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp =  $114^{\circ}\text{C}$ ,  $F_0 = 13$  min)

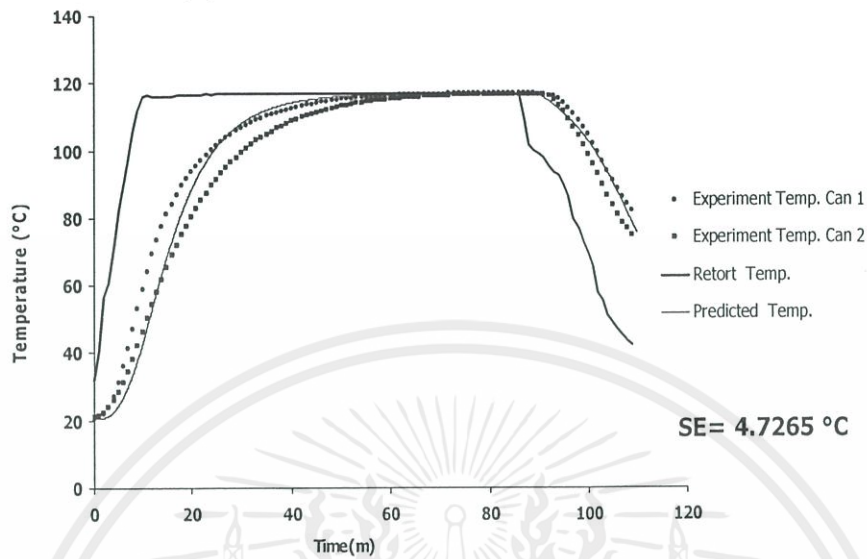


รูปที่ ข.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C,  $F_0 = 13$  min, ครั้งที่ 1)

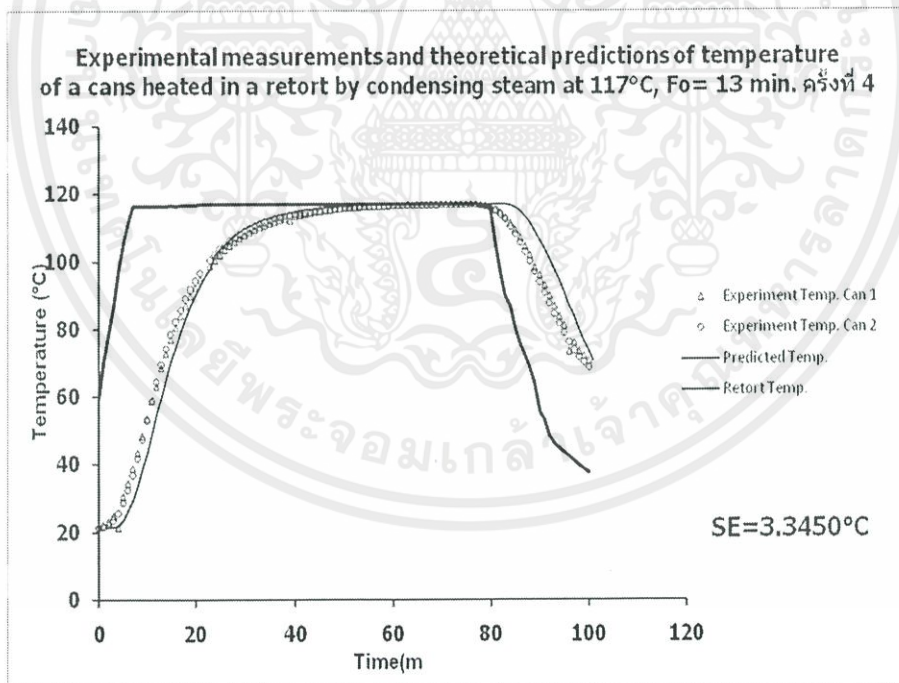


รูปที่ ข.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C,  $F_0 = 13$  min, ครั้งที่ 2)

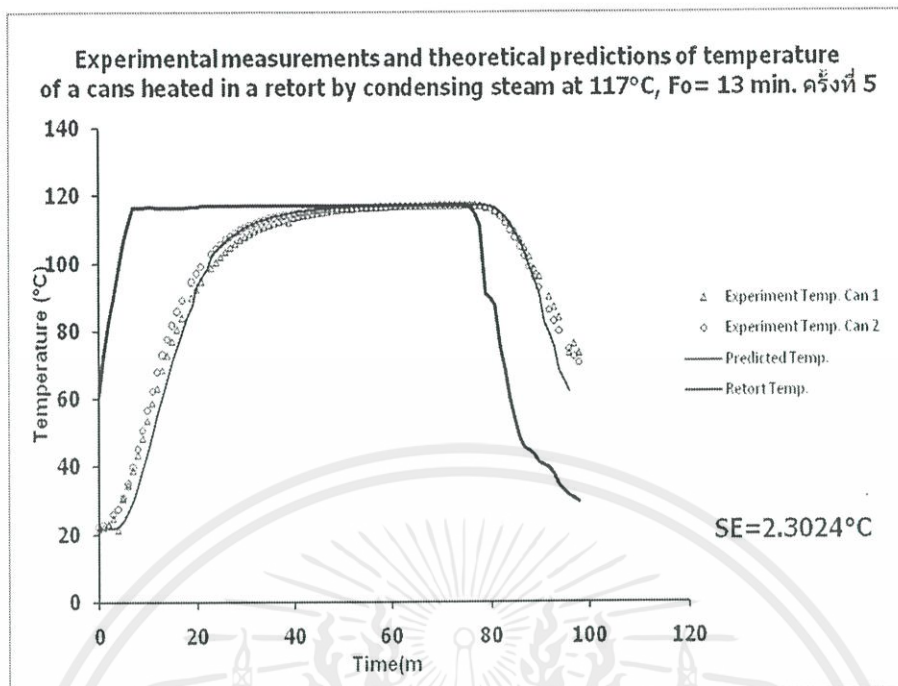
**Experimental and predicted center temperature of Thai red curry paste in cans during retorting at 117°C,  $F_0 = 13$  min.**



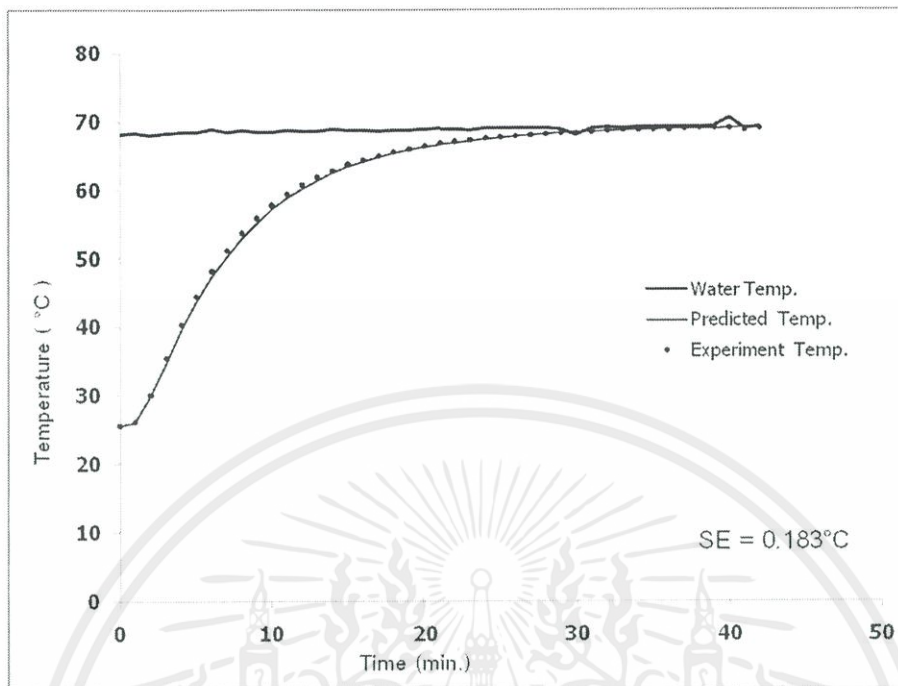
รูปที่ ข.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C,  $F_0 = 13$  min, ครั้งที่ 3)



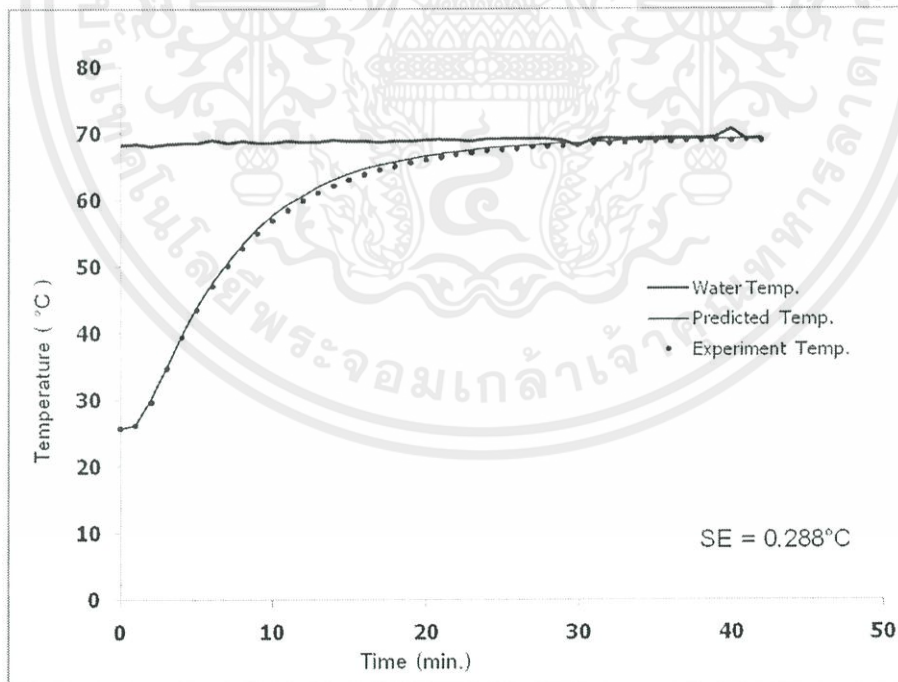
รูปที่ ข.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C,  $F_0 = 13$  min, ครั้งที่ 4)



รูปที่ ข.13 เปรียบเทียบอุณหภูมิใจกลางกระป๋องเมื่อได้รับความร้อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย (ใช้ค่า Retort temp = 117°C,  $F_0 = 13$  min, ครั้งที่ 5)

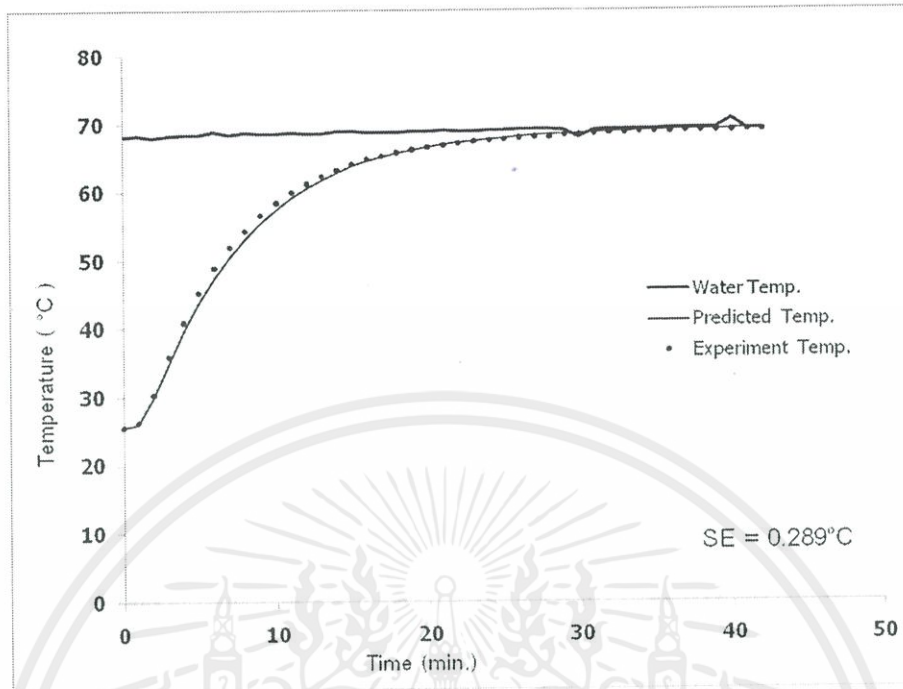


รูปที่ ข.14 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1

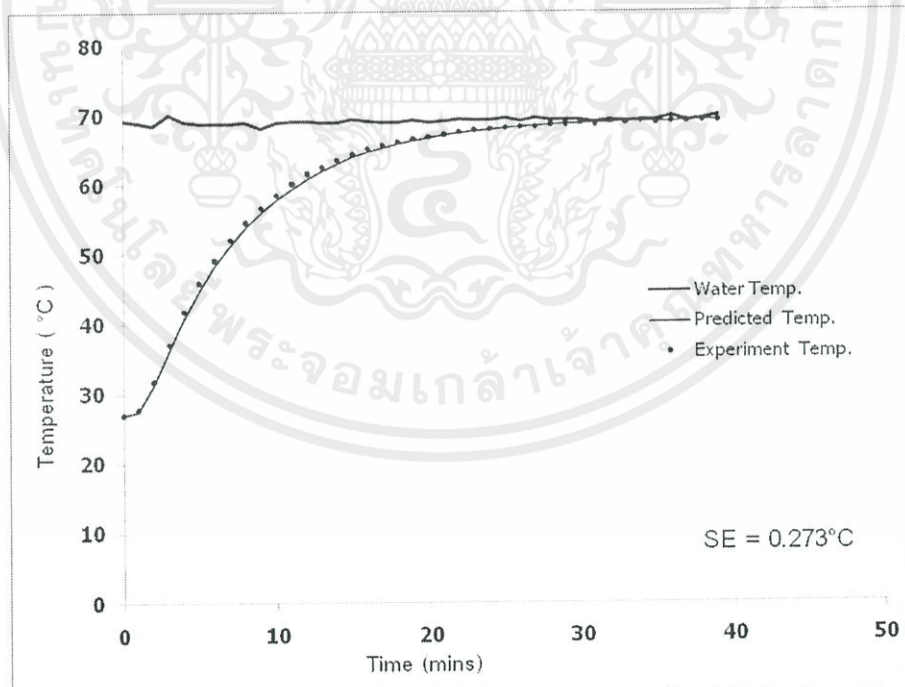


รูปที่ ข.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1

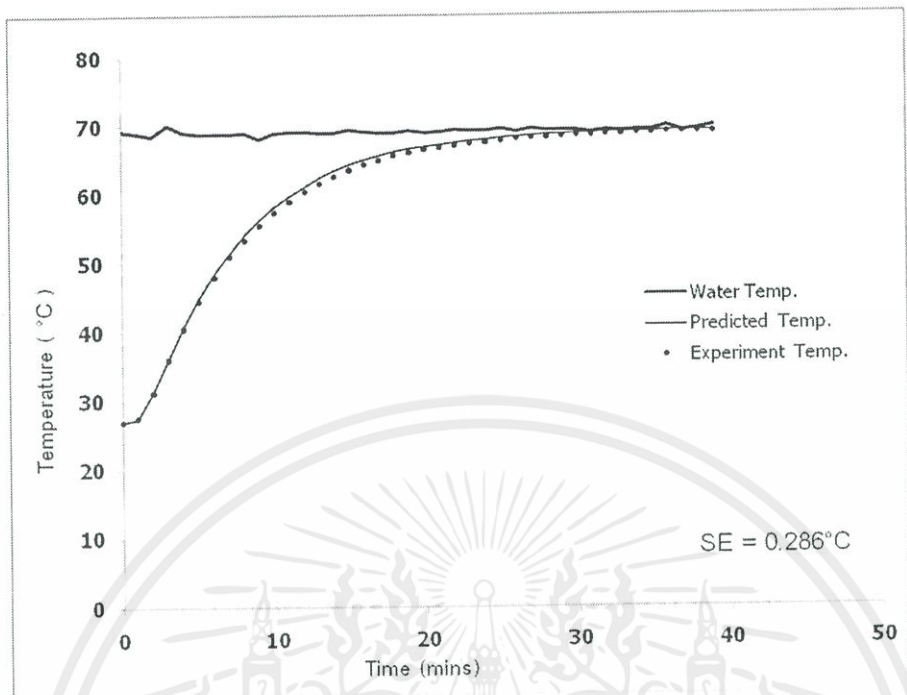
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



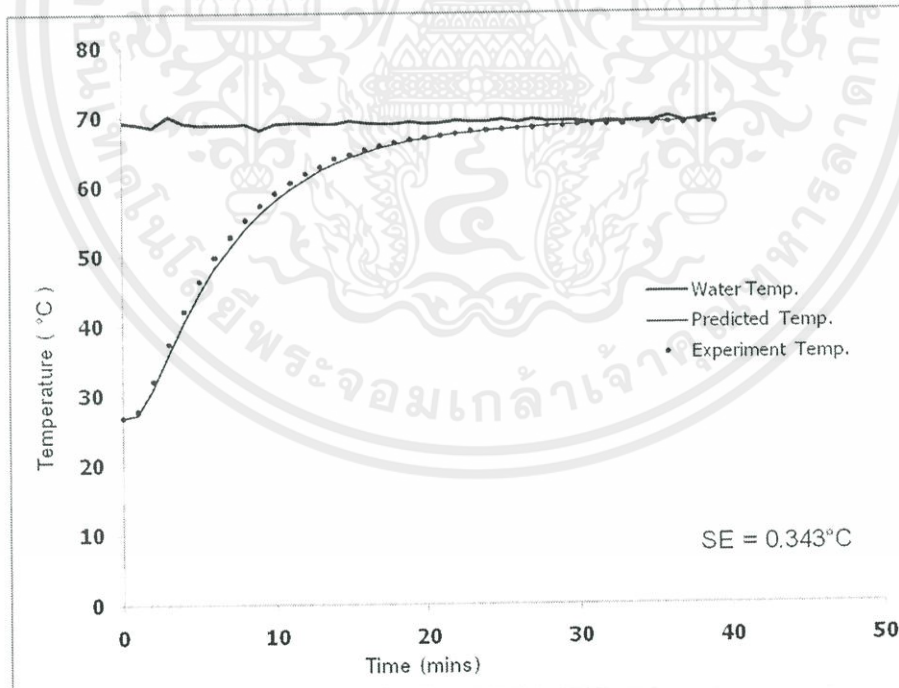
รูปที่ ข.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1



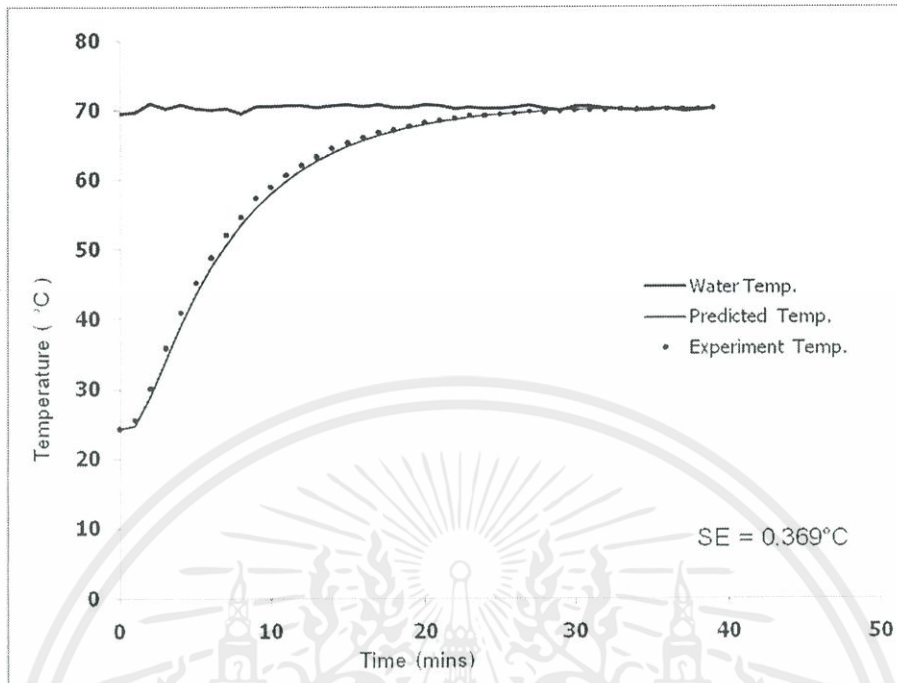
รูปที่ ข.17 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



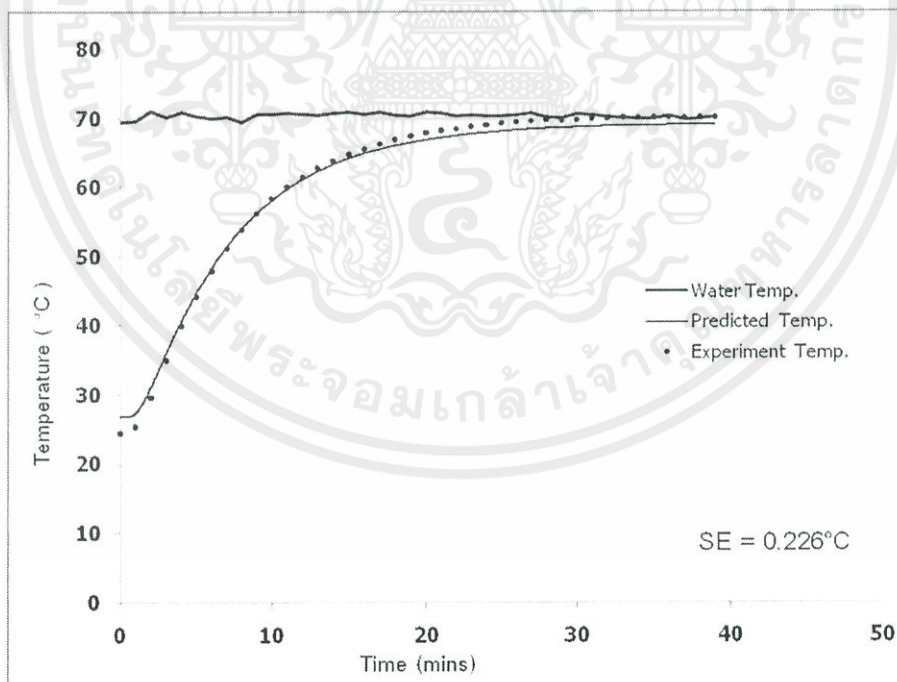
รูปที่ ข.18 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



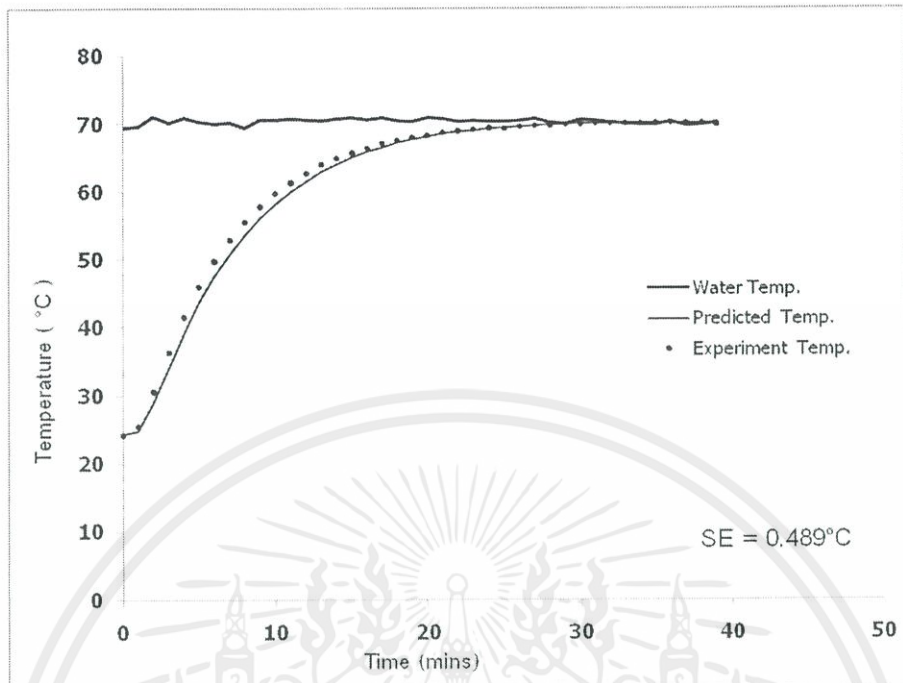
รูปที่ ข.19 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



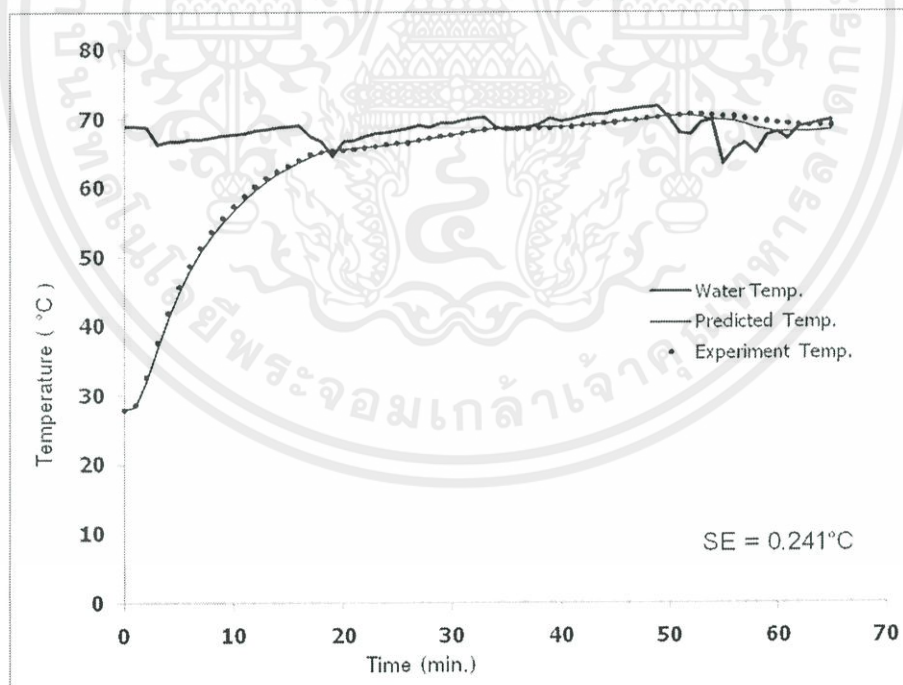
รูปที่ ข.20 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3



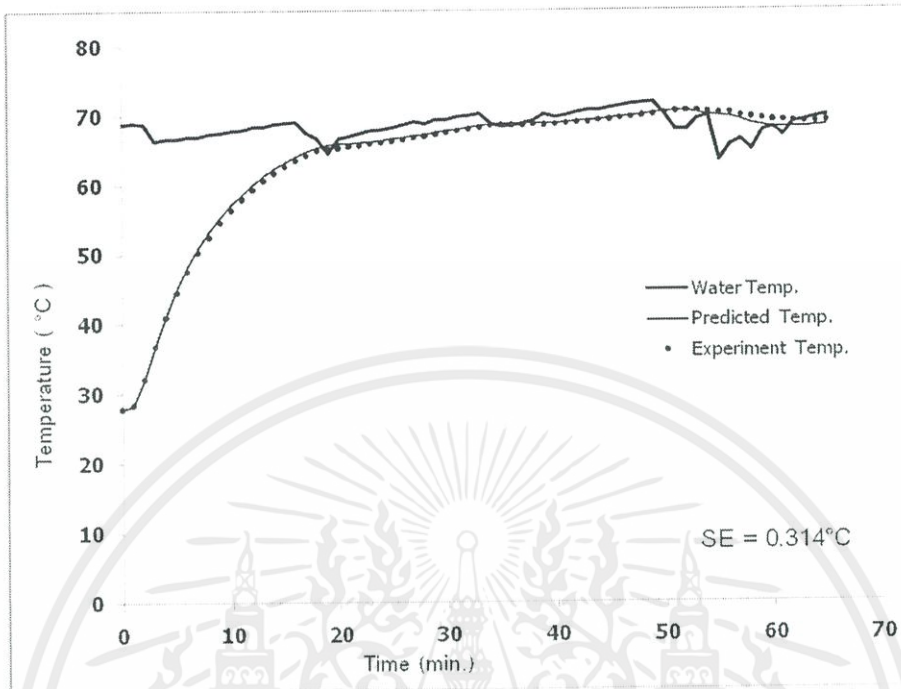
รูปที่ ข.21 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3



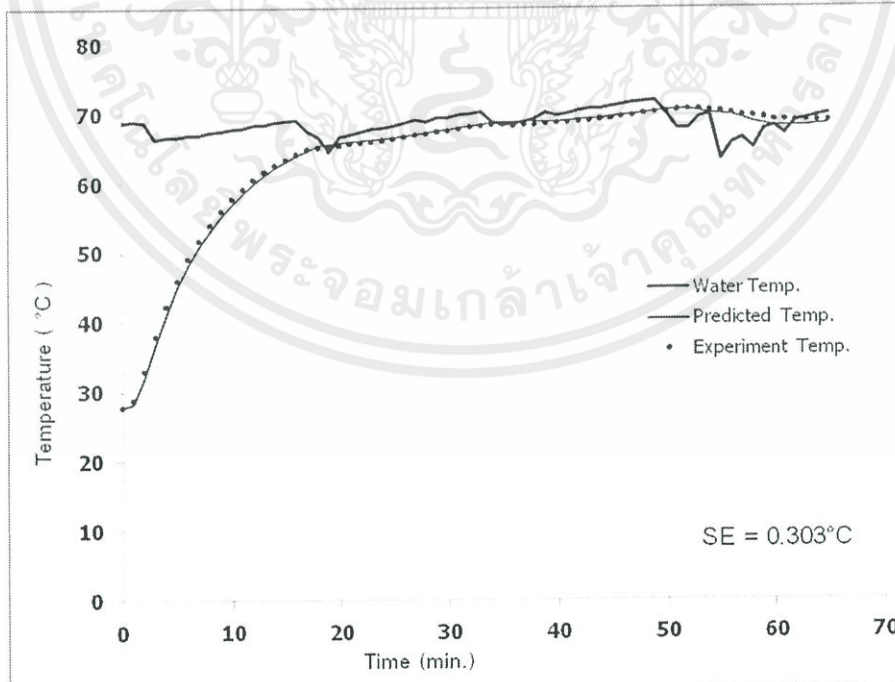
รูปที่ ข.22 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3



รูปที่ ข.23 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1

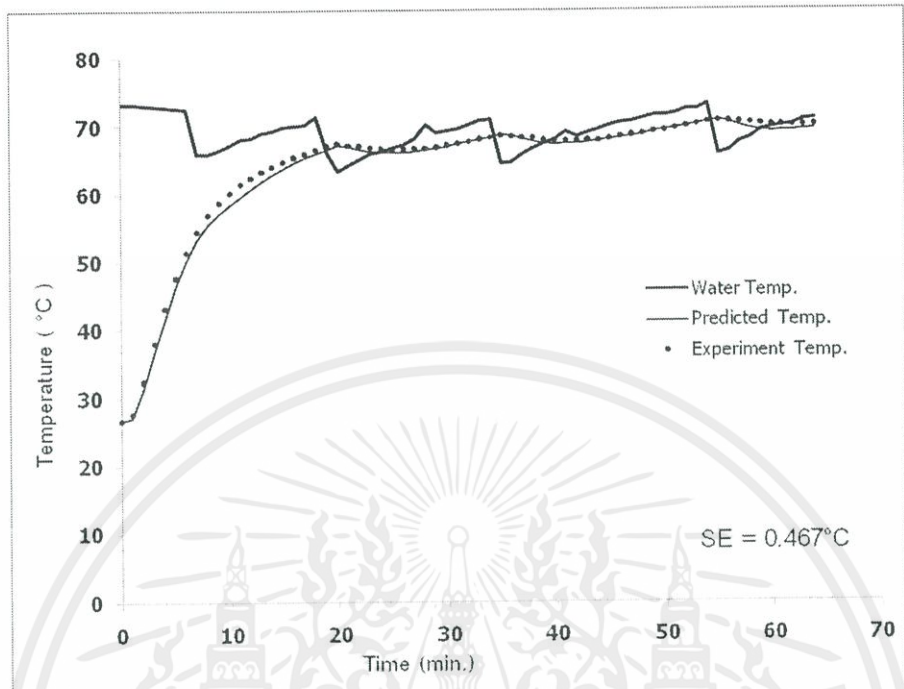


รูปที่ ข.24 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1

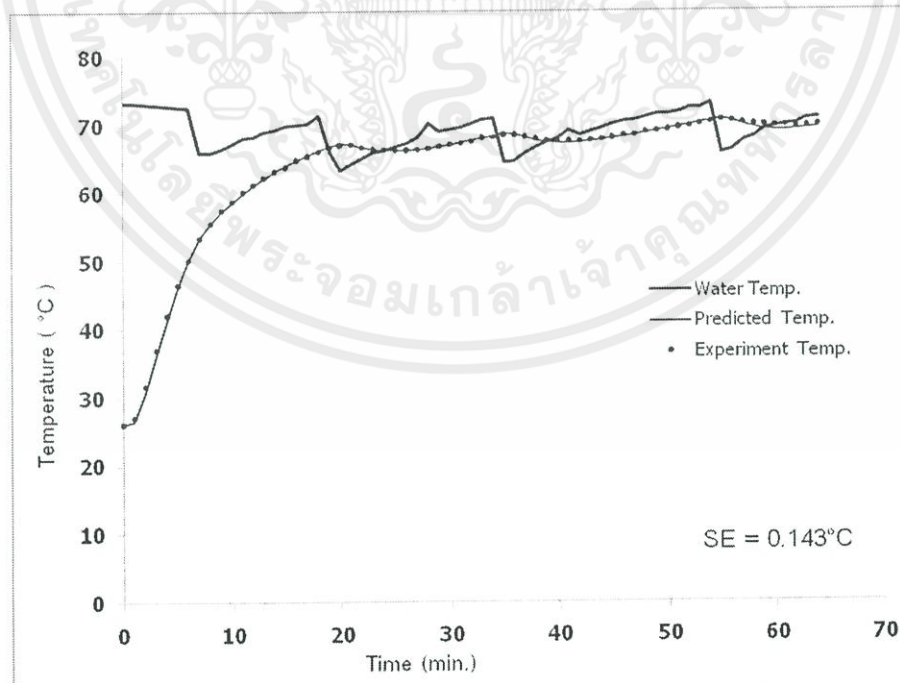


รูปที่ ข.25 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

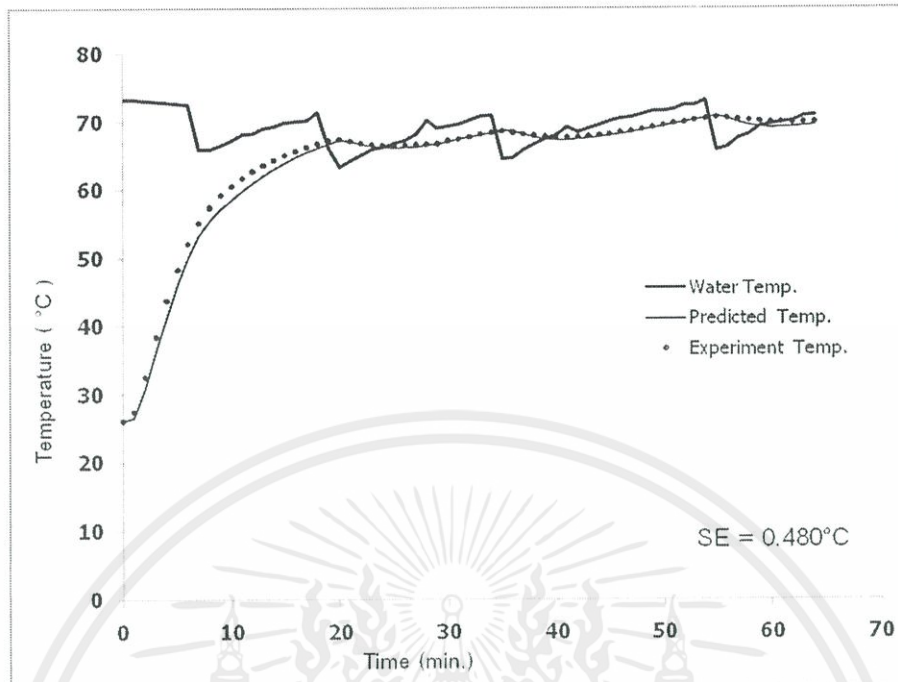


รูปที่ ข.26 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2

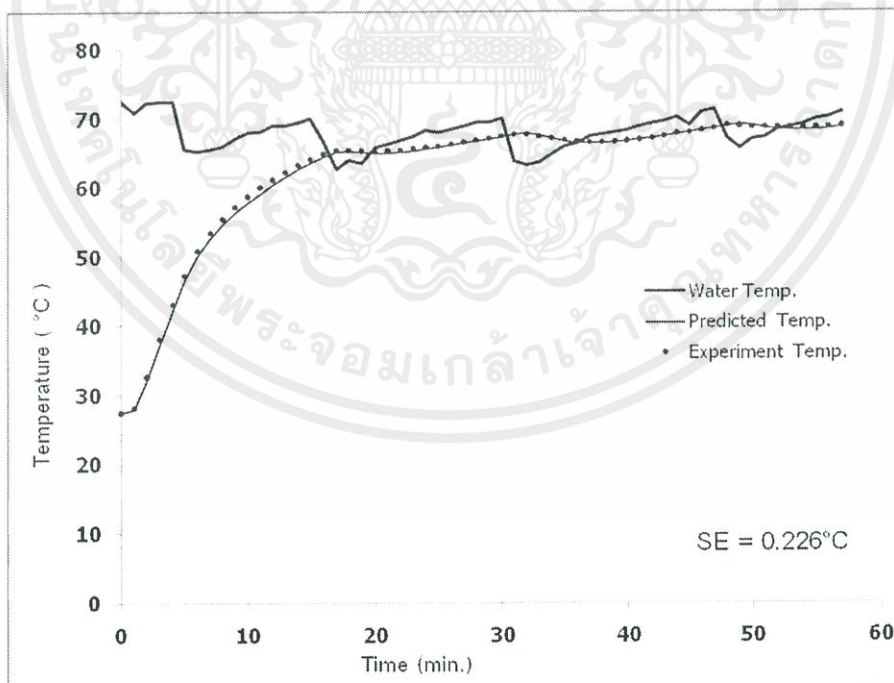


รูปที่ ข.27 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก  
ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

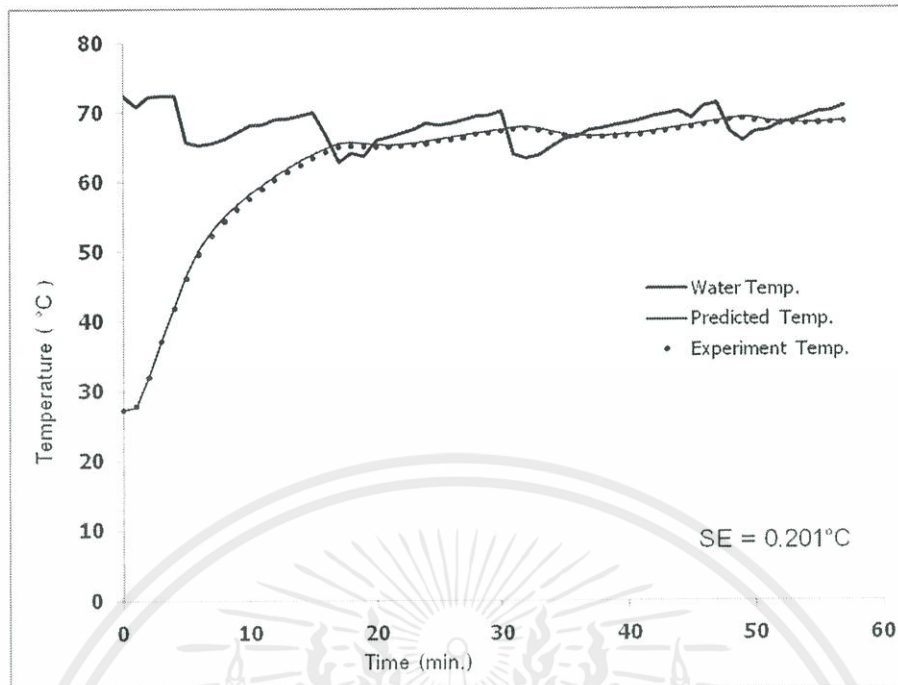


รูปที่ ข.28 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2

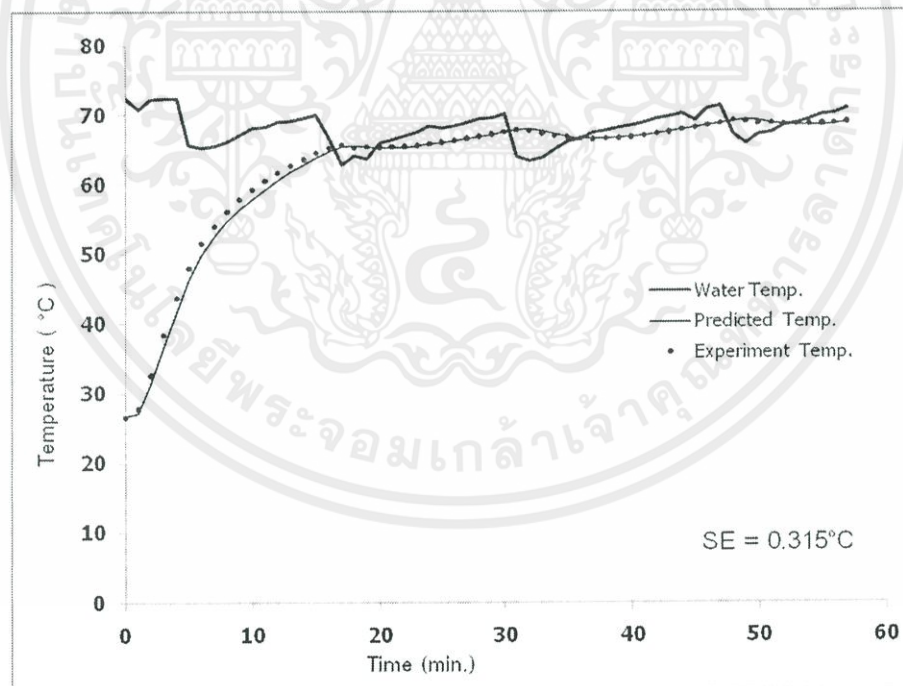


รูปที่ ข.29 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (80.3,10,116.33) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3

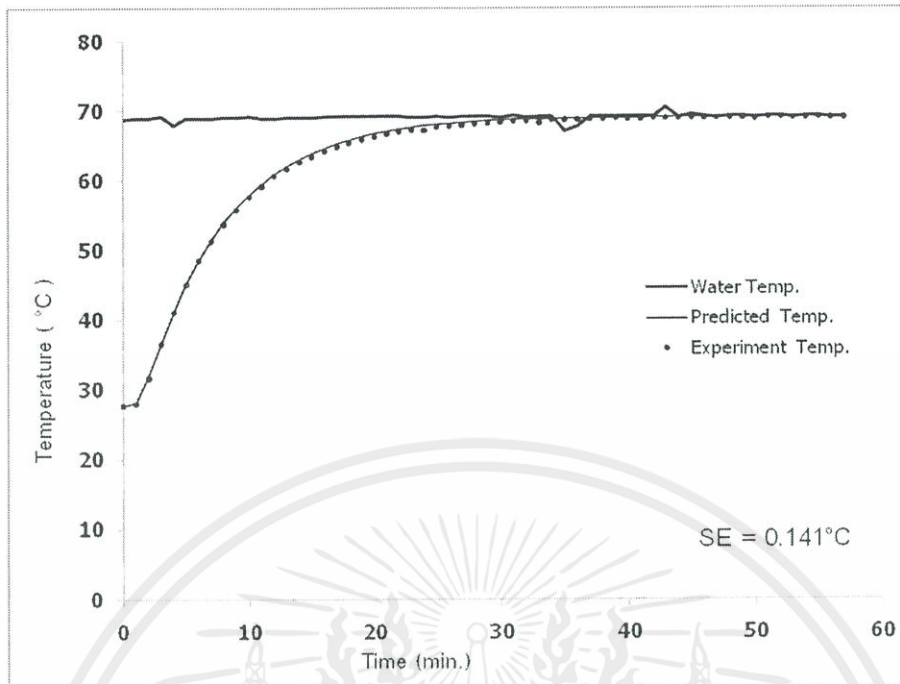
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



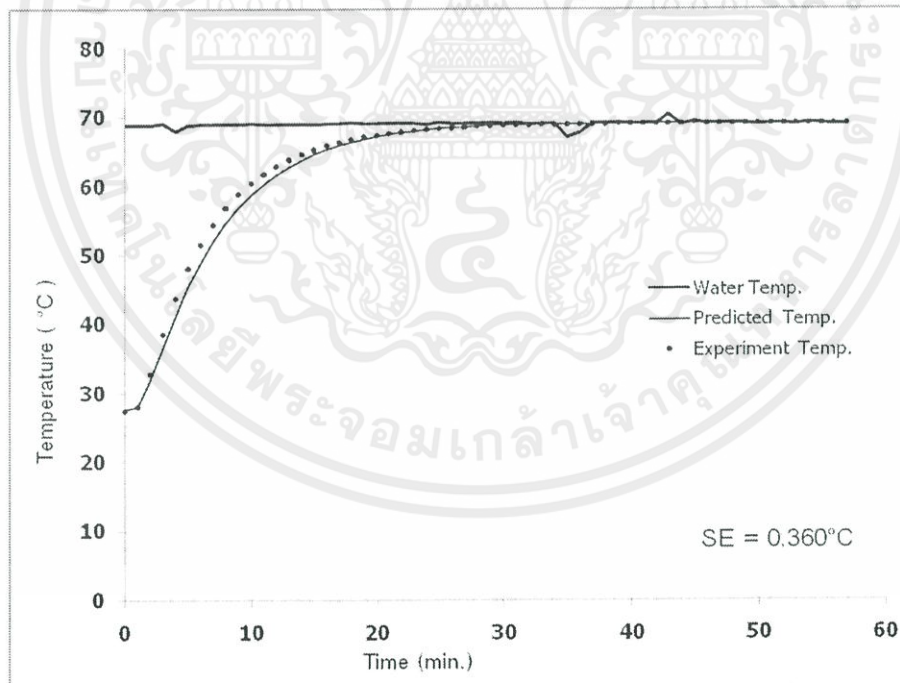
รูปที่ ข.30 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (88,10,140.8) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3



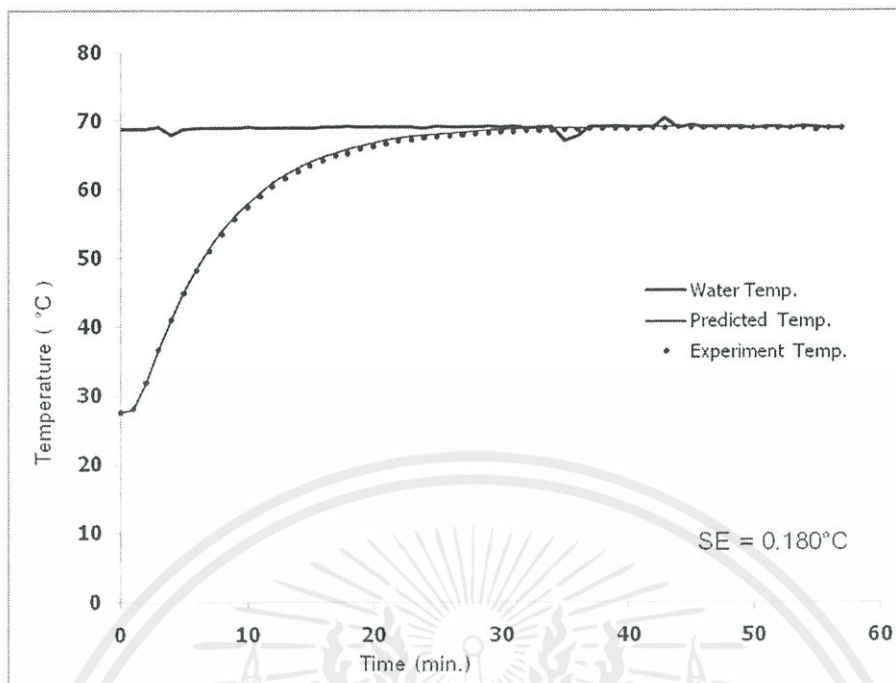
รูปที่ ข.31 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 130x165x20 mm. พิกัด (103.3,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3



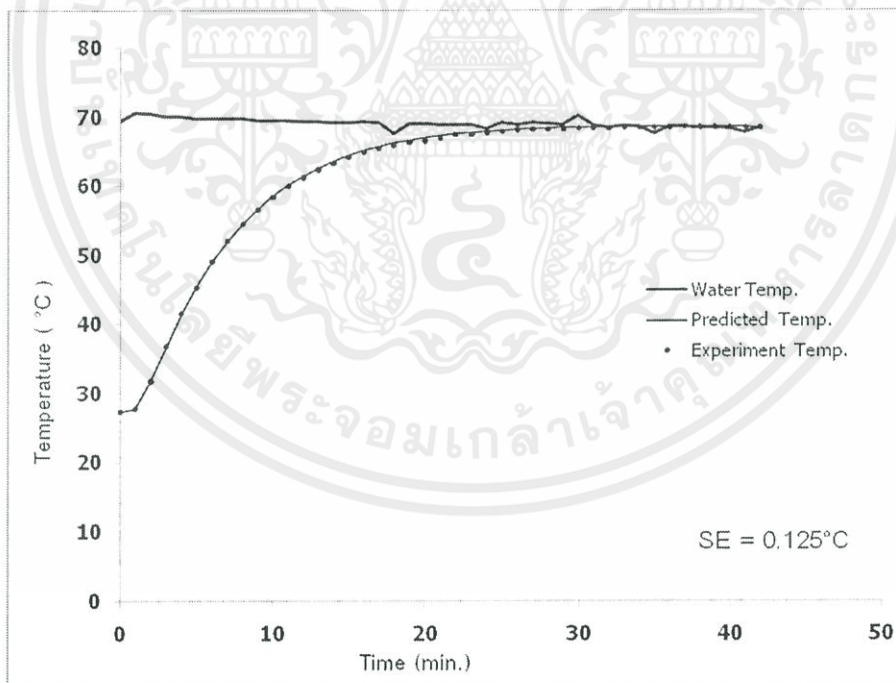
รูปที่ ข.32 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1



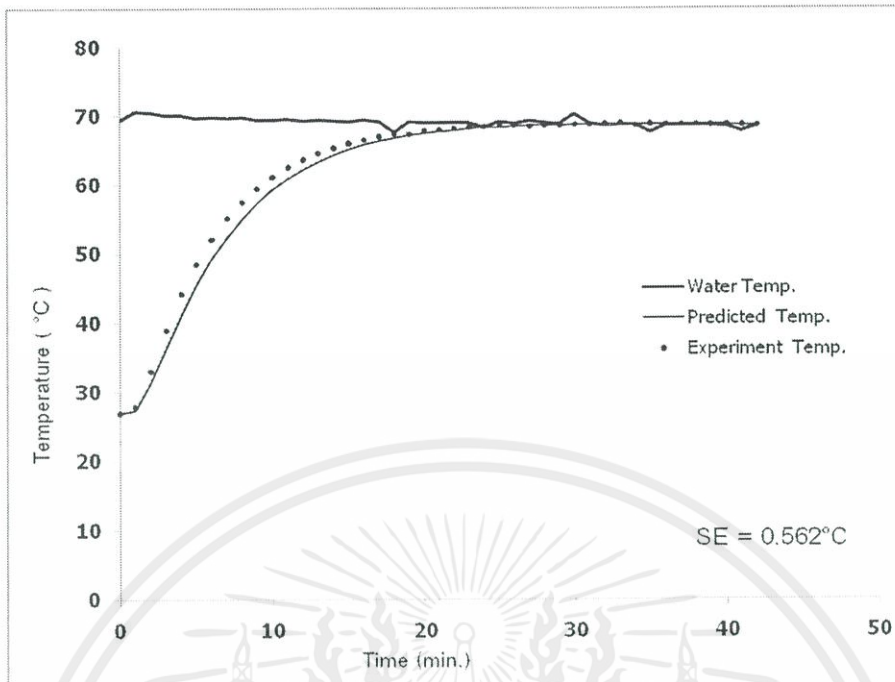
รูปที่ ข.33 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1



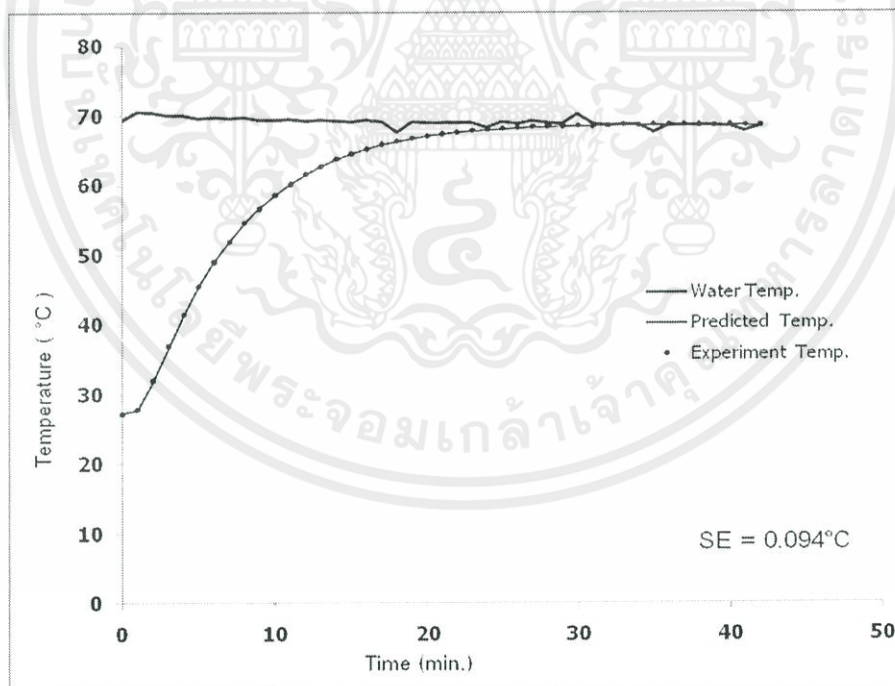
รูปที่ ข.34 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 1



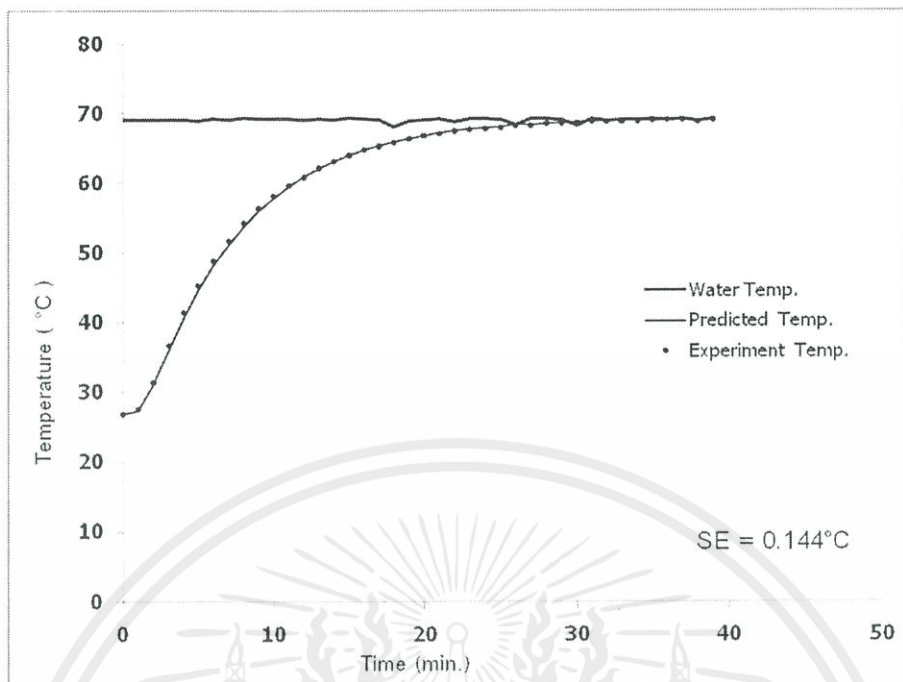
รูปที่ ข.35 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



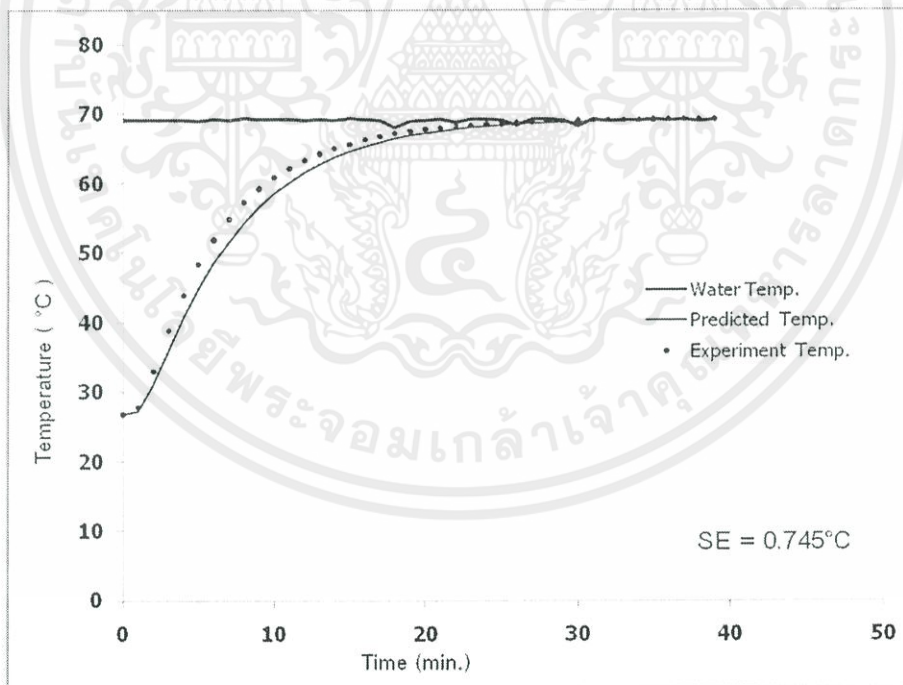
รูปที่ ข.36 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



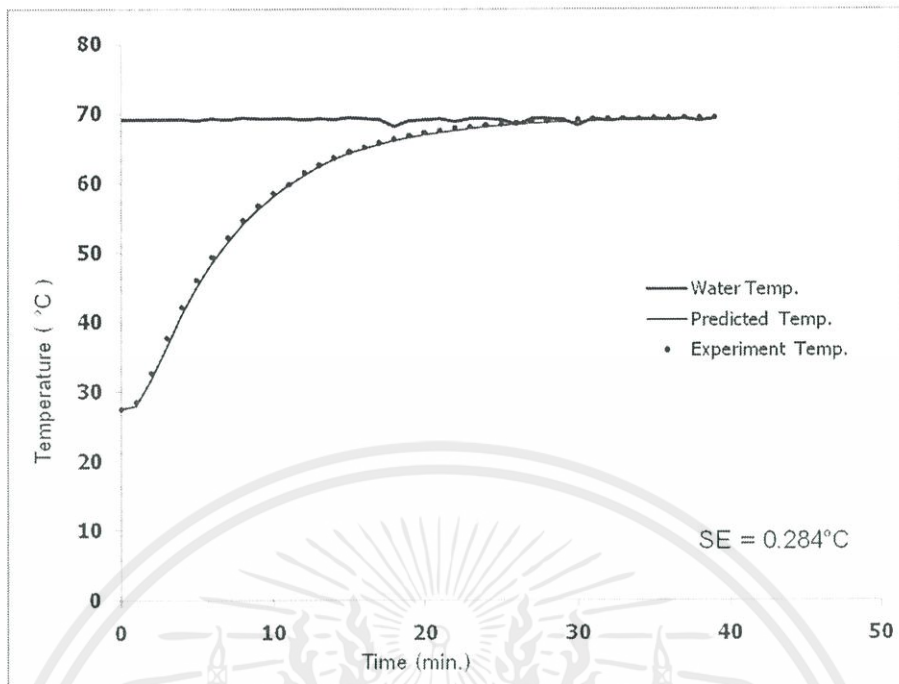
รูปที่ ข.37 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 2



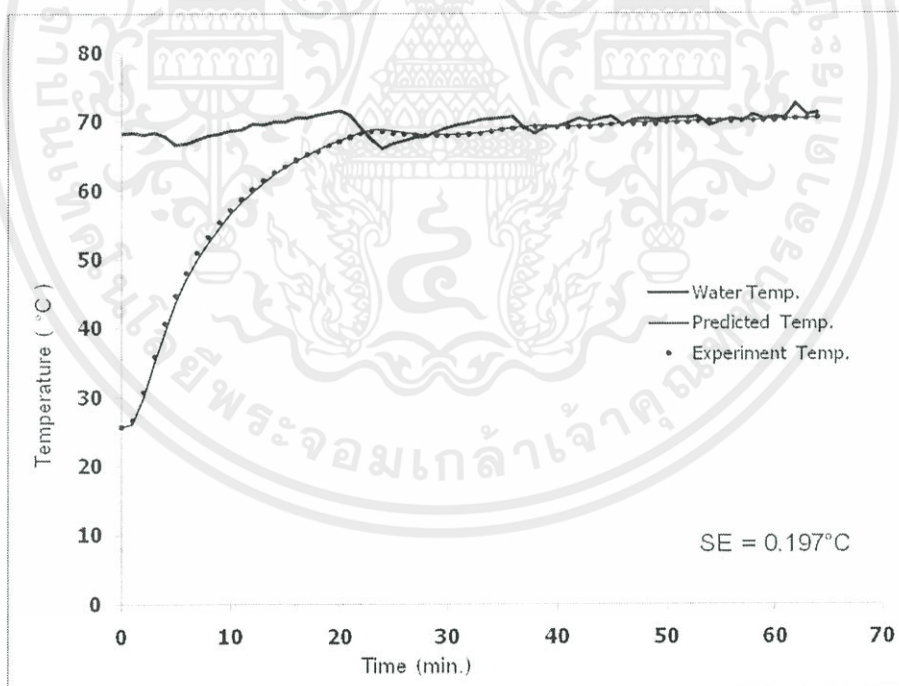
รูปที่ ข.38 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3



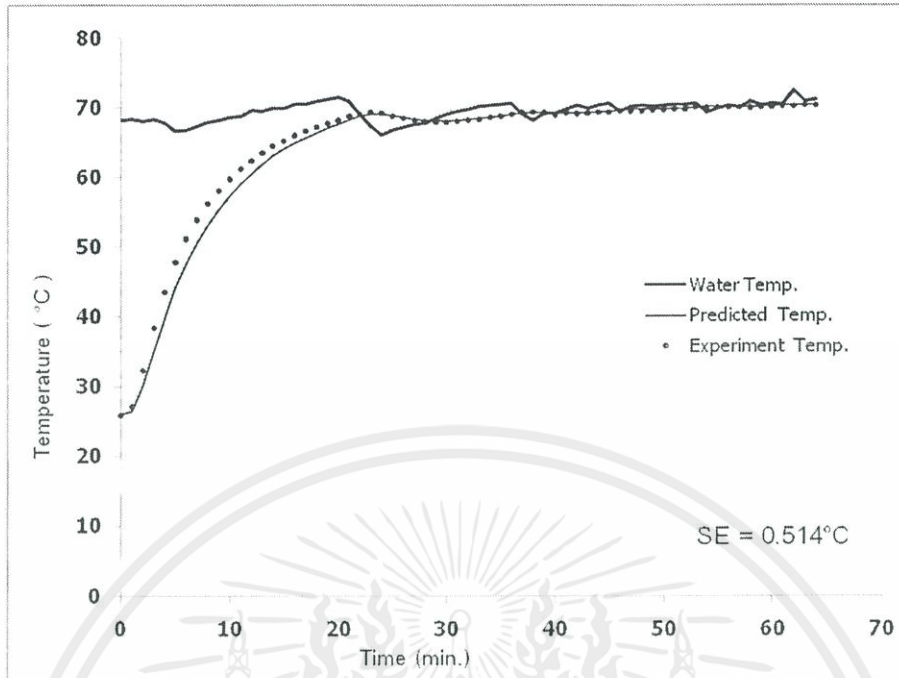
รูปที่ ข.39 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิคงที่ 70°C ครั้งที่ 3



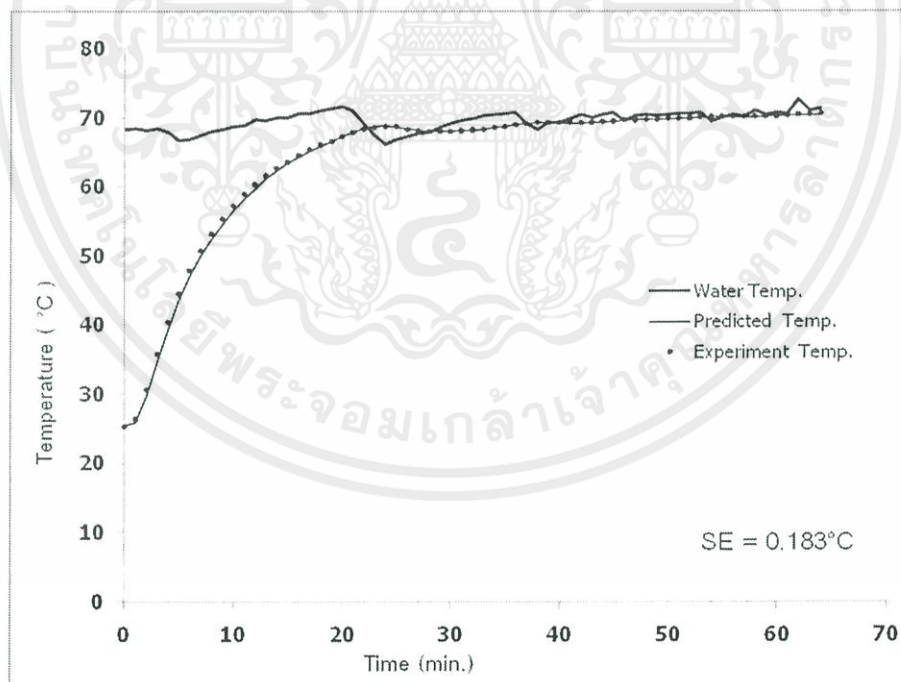
รูปที่ ข.40 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิคงที่ 70 °C ครั้งที่ 3



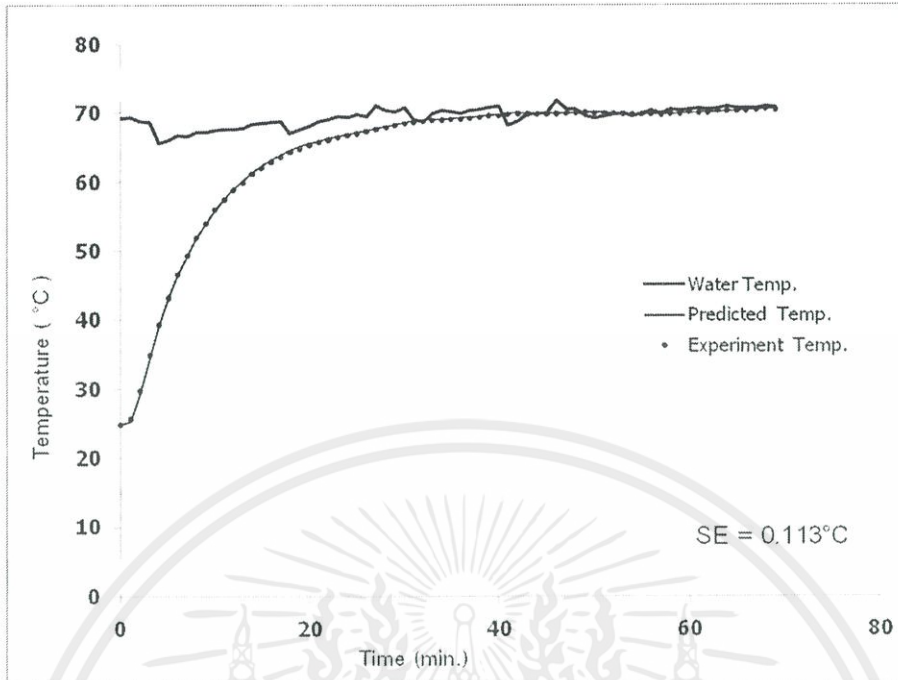
รูปที่ ข.41 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1



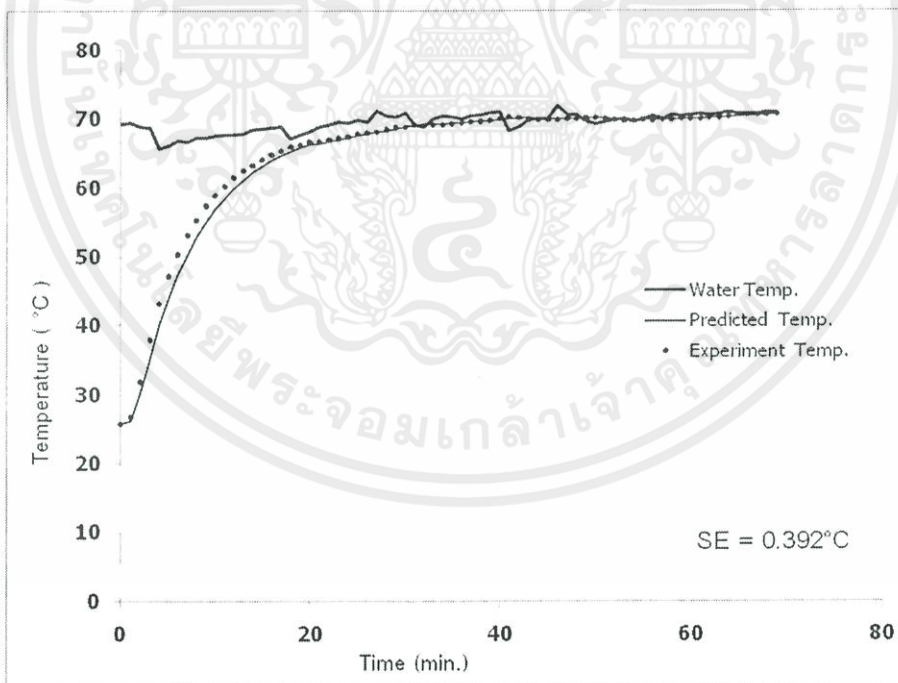
รูปที่ ข.42 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1



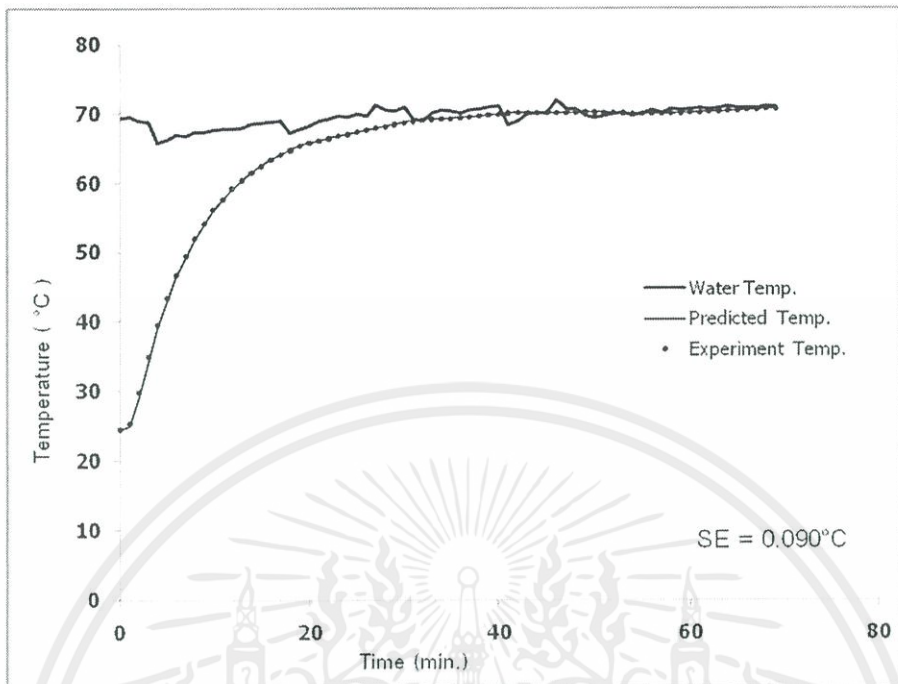
รูปที่ ข.43 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 1



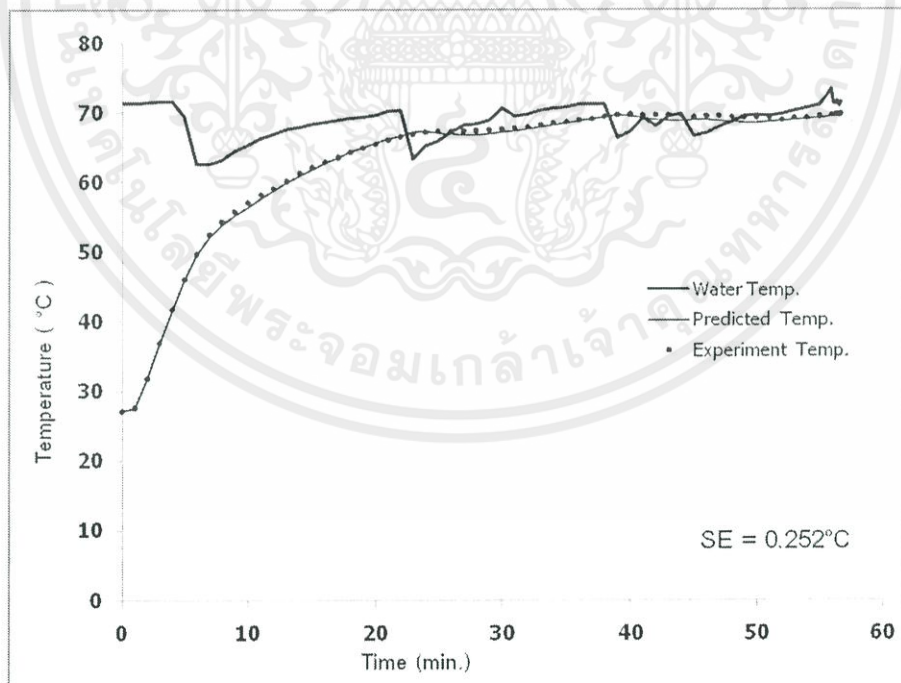
รูปที่ ข.44 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2



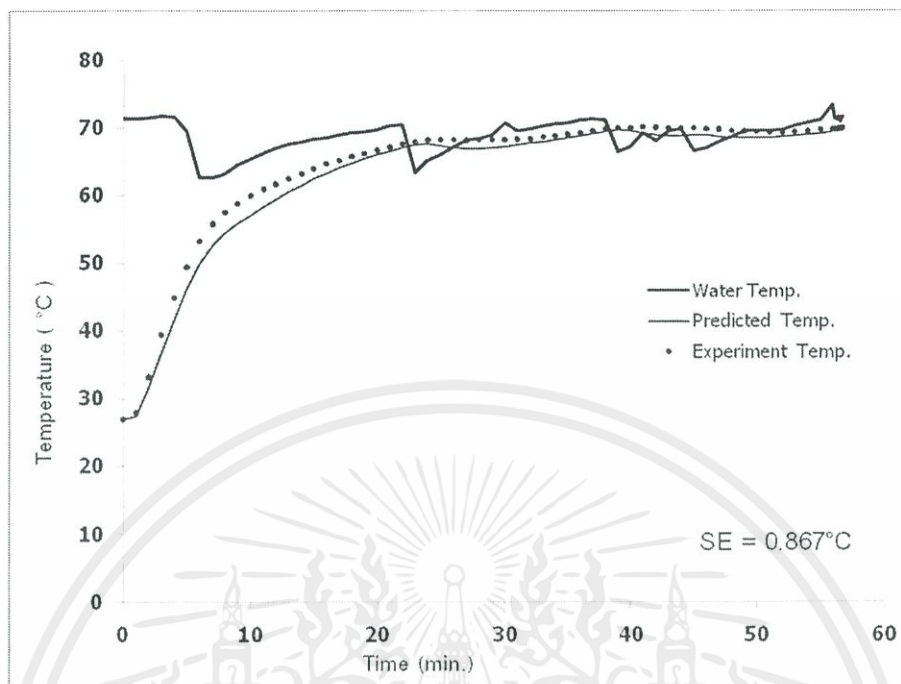
รูปที่ ข.45 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2



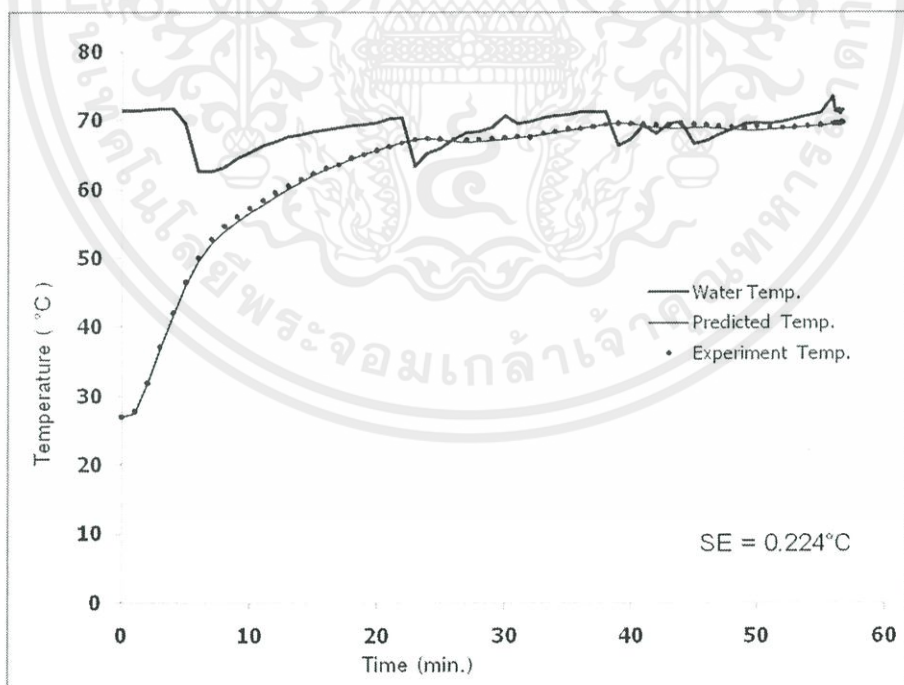
รูปที่ ข.46 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 2



รูปที่ ข.47 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (40,10,82.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3



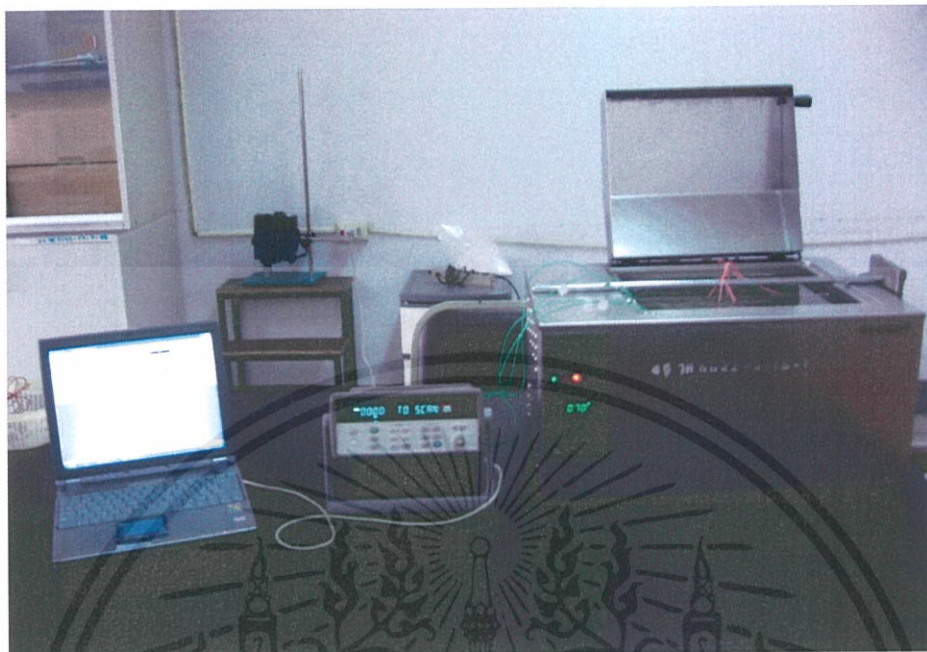
รูปที่ ข.48 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (58.83,10,116.5) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3



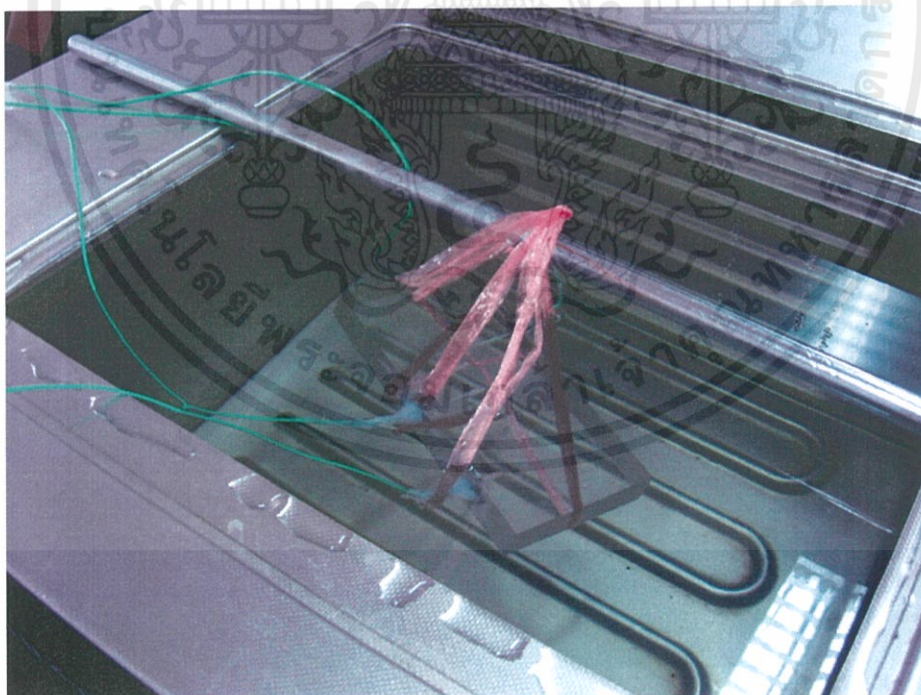
รูปที่ ข.49 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในการทดลองและทำนายอะคริลิก ขนาด 80x165x20 mm. พิกัด (30.58,10,53.39) ที่อุณหภูมิไม่คงที่ ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก. รูปแสดงผลการทดลอง

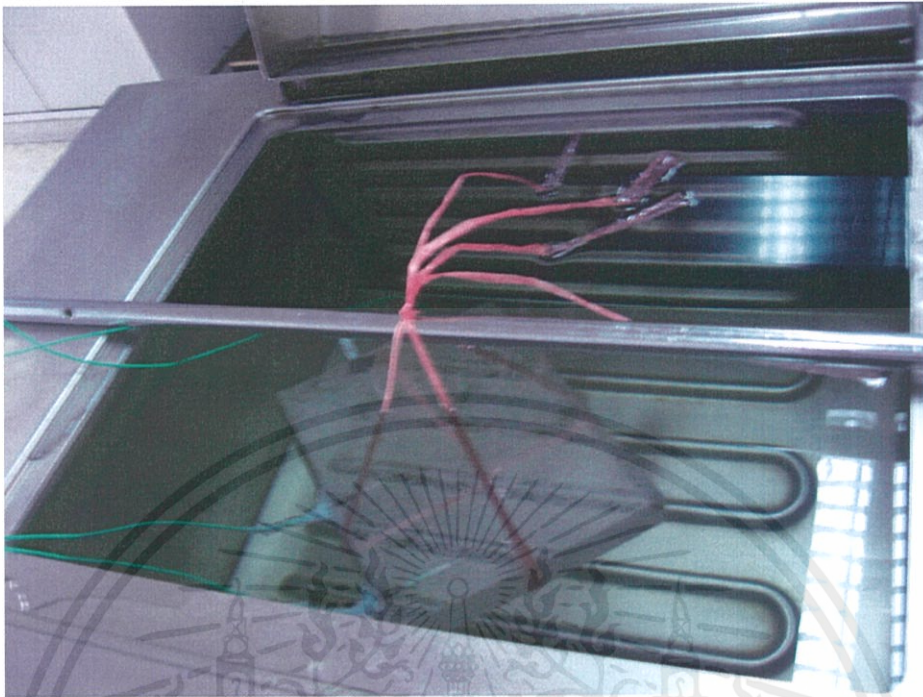


รูปที่ ก.1 การทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวัตถุทรงสี่เหลี่ยมด้วยแผ่นอะคริลิก

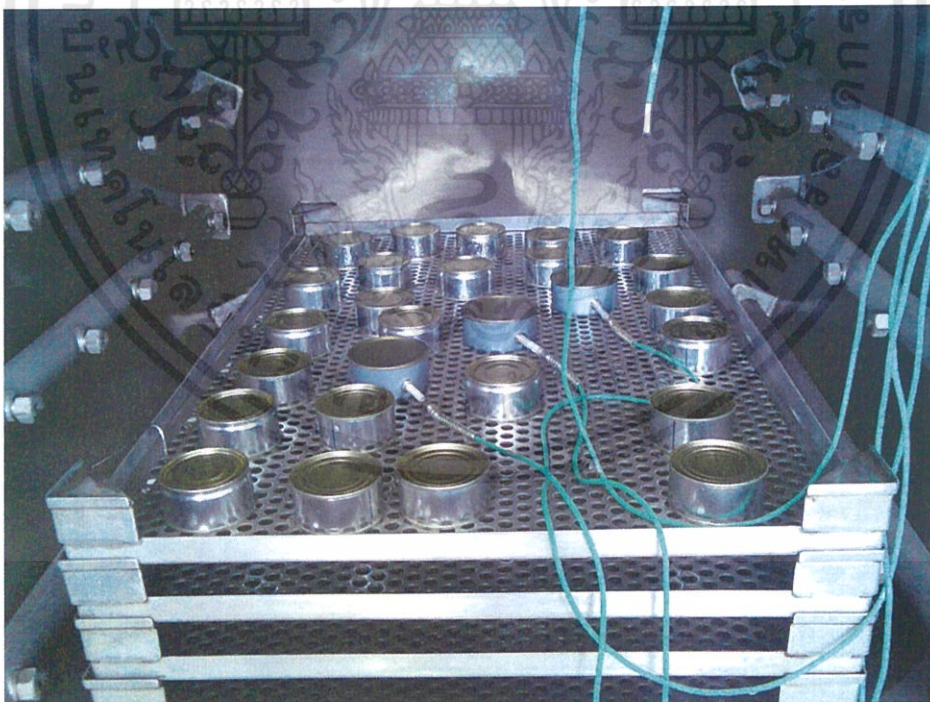


รูปที่ ก.2 การทดลองโดยแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $80 \times 20 \times 165$  mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.3 การทดลอง โดยแผ่นอะคริลิกทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 130×20×165 mm.



รูปที่ ๓.4 การทดลอง โดยน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋องขนาดรัศมี 37.5 mm. ความสูง 37.5 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- จิราภา กัตันหวาน, จุฬานัท ฝิ่งนิล, อุษราพรธณ ชงไชย. “ผลของค่า  $F_0$  และอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อต่อคุณภาพของน้ำพริกแกงแดงบรรจุกระป๋อง”, วิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ ; 2550
- คำเกิง โตประเสริฐพงศ์, วรินทร์ วิโรจน์วรานุรักษ์, อรนุช พันธุ์ไม้สี, “โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายอุณหภูมิภายในของอาหาร”, วิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ; 2544
- ทิพพาพร อยู่วิทยา, “สารละลายเกี่ยวกับอาหารกระป๋องที่มีความเป็นกรดต่ำ: การกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน” วารสารอาหาร, 2536, 23(1), pp. 46-52
- นิรนุช หอมรัตน์. “ศึกษาผลของวิธีการผลิตที่มีคุณภาพของน้ำพริกแกงแดง” [Online]. Available : [http://www.wang.kfunigraz.ac.th/~katzer/engl/generic\\_frame.html](http://www.wang.kfunigraz.ac.th/~katzer/engl/generic_frame.html), 2005.
- ปานมนัส ศิริสมบุญ, พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, สาทิป รัตนภาสกร, “สมบัติทางกายภาพและวิศวกรรมของชีววัตสุ”, ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ; 2538
- ภัทร สุพัตกุล, มนตรี เหลืองอุดมศิลป์, ศุภลักษณ์ เทียงซัด, “โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน”, วิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ; 2544
- มรุต อังสุรัตน์เวช, นัศรแก้ว นิธิเศรษฐิกุล, วรินกาญจน์ วชิรเดชเสถียร, “ผลของความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงของสารต้านอนุมูลอิสระและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ และสีในน้ำพริกแกงแดงไทย”, วิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ; 2549
- คณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน กระทรวงสาธารณสุข, “สมุนไพรรักษาสาธารณสุขมูลฐาน” สำนักงานคณะกรรมการสาธารณสุขมูลฐาน กระทรวงสาธารณสุข. กรุงเทพฯ ; 2541
- Ahmed, Jasim , Shivhare U.S. and Ramaswamy H.S., “A Fraction Conversion Kinetic Model of Thermal Degradation of color in Red Chilli Puree and Paste.” Lebensm. – Wiss u. – technol, 35, 2005, pp. 497-503
- BANGA J.R., PEREZ-MARTIN R.I., GALLARDO J.M. and CASARES J.J., “Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions.” J. Food Eng, 24, 1991, pp. 25

- BANGA J.R., PEREZ-MARTIN R.I., GALLARDO J.M. and CASARES J.J., "Optimization of the thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions." *J. Food Eng*, 24, 1991, pp. 25
- Chen C.R. and Ramaswamy H.S., "Modeling and optimization of variable retort temperature (VRT) thermal processing using coupled neural networks and genetic algorithms." *Journal of Food Engineering*, 53, 2002, pp. 209–220
- HENDRICKX M., SILVA C., OLIVEIRA F. and TOBBACK P., "Generalized semi-empirical formulas for optimal sterilization temperatures of conduction heated foods with infinite surface heat transfer coefficient." *J. Food Eng*, 19, 1993, pp. 141-158
- Lihan Huang, "Computer simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion.", *Journal of Food Process Engineering*, 80, 2007, pp. 839–849
- Marek Markowski, Ireneusz Bialobrzewski, Marek Cierach and Agnieszka Paulo, "Determination of Lyoner type sausages during water bath cooking and cooling.", *Journal of Food Process Engineering*, 65, 2004, pp. 591-598
- Margarida C., Vieira A.A., Teixeira C.L.M. and Silva, "Mathematical modeling of the thermal degradation kinetics of vitamin C in cupuacu (*Theobroma grandiflorum*) nectar." *Journal of Food Engineering*, 43, 2000, pp. 1-7
- Matweb material property data. "Overview of materials for Acrylic" [Online]. Available : <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3cb08da2a0054447a3790015b7214d07>
- NADURNX M.M. and HATTON T.A., "Optimal nutrient retention during the thermal processing of conduction-heated canned foods: application of the distributed minimum principle." *J. Food Sci*, 50, 1985, pp. 1312-1321
- Noronha J., Van Loey A., Hendrickx M. and Tobback P., "Simultaneous Optimisation of Surface Quality during the Sterilisation of Packed Foods using Constant and Variable Retort Temperature Profiles." *Journal of Food Process Engineering*, 30, 1996, pp. 283-297
- OHLSSON T., "Optimal sterilization temperature for flat containers." *J. Food Sci*, 45, 1980a, pp. 848-852
- OHLSSON T., "Optimal sterilization temperatures for sensory quality in cylindrical containers." *J. Food Sci*, 45, 1980b, pp. 1517

- OTT R.L. and Wan, "Introduction to Statistical Methods and Data Analysis." Duxbury Press Belmont, California, 1992 ,pp. 441-441
- PORNCHALOEMPONG P., BALABAN M.O., TEIXEIRA A.A. and CHAU K.V., "NUMERICAL SIMULATION OF CONDUCTION HEATING IN CONICALLYSHAPED BODIES." *Journal of Food Process Engineering*, 25, 2003, pp. 539-555
- PORNCHALOEMPONG P., BALABAN M.O., TEIXEIRA<sup>2</sup> A.A. and CHAU K.V., "OPTIMIZATION OF QUALITY RETENTION IN CONDUCTION-HEATING FOODS OF CONNICAL SHAPE", *Journal of Food Process Engineering*, 25, 2003, pp. 557-570
- SABLAM SS, RAMASWAMY H.S. and PRASHER S.O. "A neural network approach for thermal processing application." *J. Food Processing Preservation*, 19, 1995, pp. 283-310
- SAGUY I. and KAREL M. "Optimal retort temperature profile in optimizing thiamin retention in conduction-type heating of canned foods." *J. Food Sci*, 44, 1979, pp. 1485-1490
- SILVA C., HENDRICKX M., OLIVEIRA F. and TOBBACK P., "Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat-preserved foods." *J. Food Eng*, 17, 1992, pp. 241-258
- SILVA C., OLIVEIRA F. and HENDRICKX M., "Modelling optimum processing conditions for the sterilization of prepackaged foods." *Journal of Food Control*, 4(2), 1993, pp. 67-78
- SILVA C., OLIVEIRA F. and HENDRICKX M., "Quality optimization of conduction heating foods sterilized in different packages." *J. Food Sci Technol*, 29, 1994, pp. 515-530.
- Simpson R., Almonacid S. and Mitchell M., "Mathematical model development, experimental validation and process optimization: retortable pouches packed with seafood in cone frustum shape." *Journal of Food Process Engineering*, 63, 2004, pp. 153-162
- TEIXEIRA A.A., DIXON J.R., ZAHRADNIK J. W. and ZINSMEISTER G.E., "Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction heated foods." *Food Technol*, 23(6), 1969, pp. 137
- THUSSEN H.A.C. and KOCHEN L.H.P.J.M., "Calculation of optimum sterilization conduction for packed conduction-type foods." *J. Food Eng*, 45, 1980, pp. 1267
- Wang Lijun and Da-Wen Sun, "Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method.", *Journal of Food Process Engineering*, 51, 2002, pp. 319-328

WELT B.A., TEIXEIRA A.A., CHAU K.V., BALABAN M.O. and HINTENLANG D.E.,  
“Explicit Finite Difference Methods for Heat Transfer Simulation and Thermal  
Process Design.”, *Journal of Food Science*, 62(2), 1997, pp. 230-236



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้