



บทที่ 4

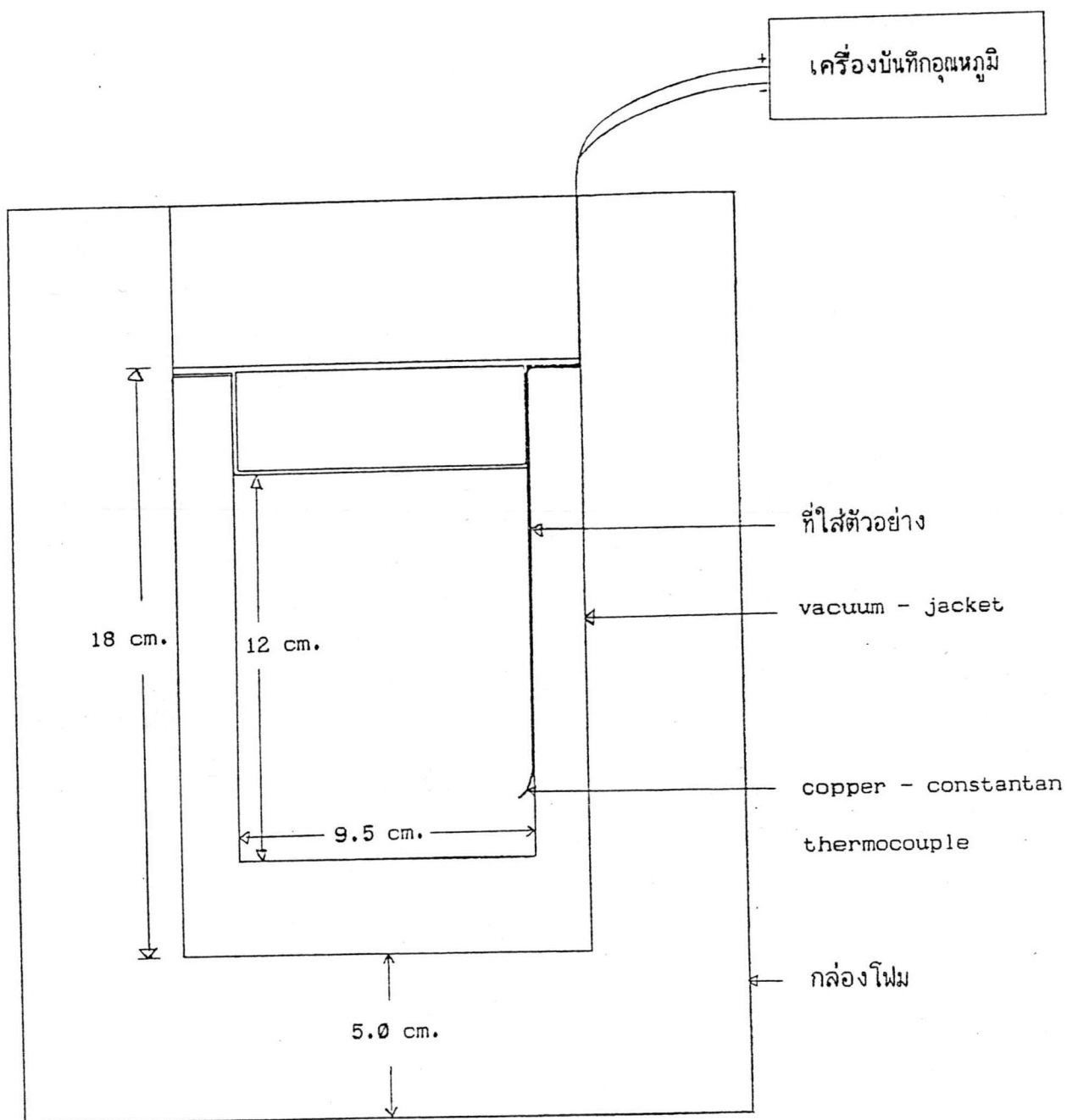
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับหาค่าสมบัติทางความร้อนของสับปะรด

4.1.1 ความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดหาโดยใช้วิธี modified method of mixture เพื่อกำจัดปัญหาการละลายของตัวอย่างสับปะรด ในสารตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน (น้ำ) เนื่องจากสับปะรดมีความชื้นสูง แคลอรีมิเตอร์สำหรับหาค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่ประกอบขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 4.1 และเนื่องจากวิธี modified method of mixture นี้ ต้องไม่มีการสัมผัสกันระหว่างตัวอย่างและสารตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อน จึงใช้ถุงโพลีเอทิลีนสำหรับบรรจุตัวอย่างสับปะรด เนื่องจากโพลีเอทิลีนเป็นวัสดุที่สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้เป็นอย่างดี

จากการทดสอบหาค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ โดยใช้ น้ำ ซึ่งทราบค่าความร้อนจำเพาะเป็นสารอ้างอิง พบว่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน มีค่าเท่ากับ 45.682 ± 0.551 แคลอรี/องศาเซลเซียส และเมื่อทำการทดสอบแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้น ด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ ได้แก่ กลีเซอริน (ค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความร้อนจำเพาะของกลีเซอรินที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.571 ± 0.007 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่างจากค่าทางทฤษฎีเพียงร้อยละ 2.77 และจากการทดลองใช้แคลอรีมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดสด (ความชื้นร้อยละ $80 - 85$) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่ได้จากการทดลอง มีค่าเท่ากับ 0.877 ± 0.002 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่รายงานไว้สำหรับที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (30) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.879 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส และค่าความร้อนจำเพาะที่คำนวณได้จากสมการของ Siebel (27) (ตารางที่ 2.2) ที่ความชื้นร้อยละ 84.45 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.876 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส แสดงว่าแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นนี้ สามารถใช้หาค่าความร้อนจำเพาะโดยให้ผลการทดลองที่ค่อนข้างถูกต้อง



รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางของแคลอรีมิเตอร์

4.1.2 สภาพนำความร้อน

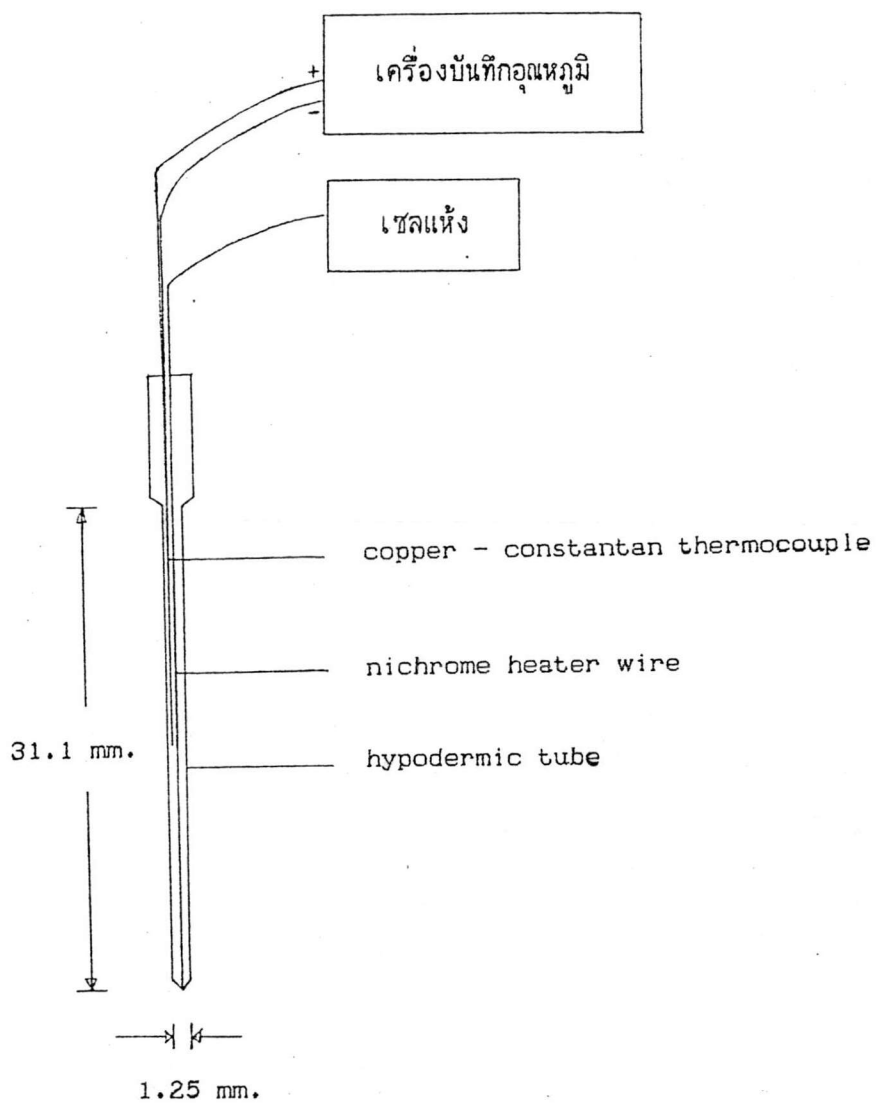
Thermal conductivity probe สำหรับหาค่าสภาพนำความร้อนที่ประกอบขึ้น มีลักษณะดังรูปที่ 4.2 จากการทดลองได้เลือกใช้กาลีเซอรินเป็นสารอ้างอิงสำหรับหาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ เนื่องจากกาลีเซอรินเป็นสารที่มีความหนืดค่อนข้างสูง ทำให้ภาวะการถ่ายโอนเป็นแบบการนำความร้อน และการพิจารณาใช้กระแสตรงจากเซลล์แห้ง (ชนิดอัลคาไลน์) เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน เนื่องจากมีความต่างศักย์คงที่ จากการทดลองเบื้องต้นเมื่อใช้กระแสสลับเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน พบว่ากระแสไฟไม่คงที่ ทำให้พลังงานความร้อนที่ตัวอย่างได้รับมีค่าไม่แน่นอน ดังนั้นจึงใช้ไฟกระแสตรงจากเซลล์แห้งเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อน ซึ่งจะให้กระแสไฟที่สม่ำเสมอกว่า พลังงานความร้อนที่ probe ได้รับจากเซลล์แห้ง 1.5 โวลต์ มีค่า 2.0 - 2.6 วัตต์/เมตร แต่การใช้เซลล์แห้งอาจเกิดกระแสตก เมื่อใช้ไปเป็นเวลานานระยะหนึ่ง จึงต้องมีการเปลี่ยนเซลล์แห้งก่อนใหม่ เมื่อกระแสมีความต่างศักย์ต่ำกว่า 1.5 โวลต์ และในการหาค่าสภาพนำความร้อน จะพิจารณาเฉพาะผลการทดลองที่กราฟเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ ที่มีค่า r^2 ตั้งแต่ 0.985 ขึ้นไป เพื่อให้ข้อมูลระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ ที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างดี ทำให้ค่าสภาพนำความร้อนที่คำนวณได้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น (5)

4.1.3 สภาพแพร่ความร้อน

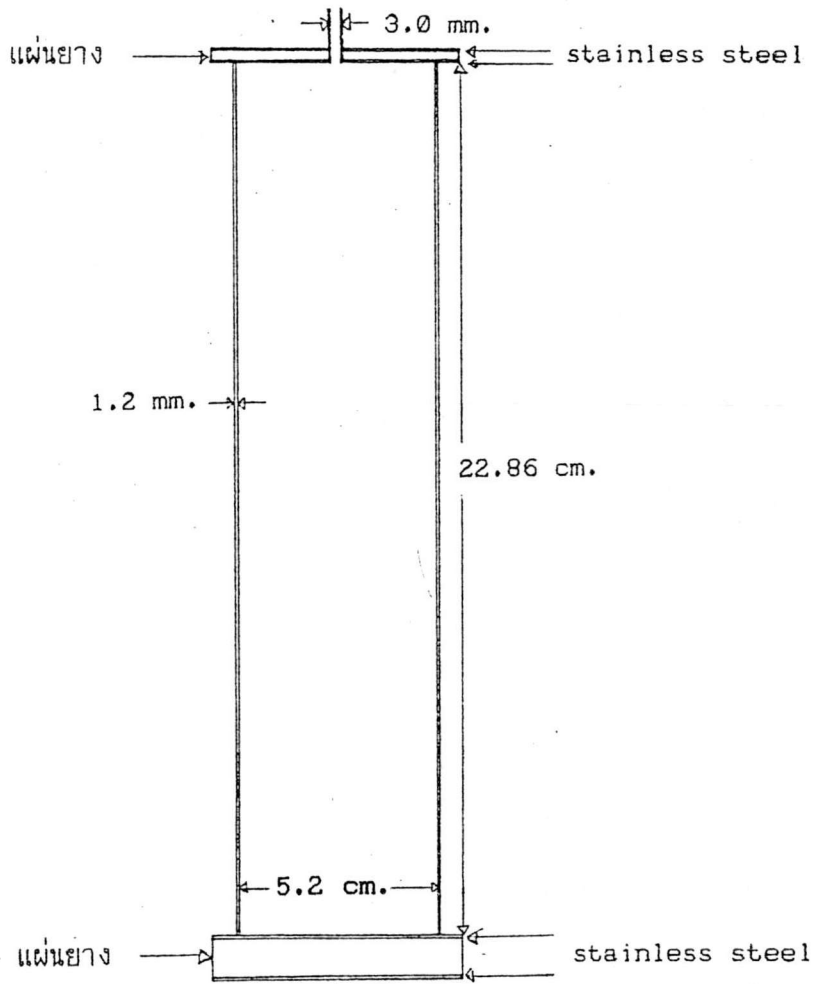
Thermal diffusivity tube ที่ประกอบขึ้นสำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน มีลักษณะดังรูปที่ 4.3 จากการทดลองได้เลือกใช้น้ำมันปาล์มผ่านกรรมวิธี (น้ำมันพืชหมัก) เป็นสารให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้มีจุดเดือดสูงถึงประมาณ 200 องศาเซลเซียส และไม่เกิดควันในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ สำหรับการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้ใช้ propylene glycol เป็นสารถ่ายโอนความร้อน เนื่องจาก propylene glycol เป็นสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ดังนั้น จึงมีสถานะเป็นของเหลวในระหว่างการทดลอง

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด (36) (ตารางที่ 4.1) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ในสับปะรดคือน้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสมบัติทางความร้อนของสับปะรด



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของ thermal diffusivity tube

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสับปะรด

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	84.45 ± 0.52
เส้นใย	0.45 ± 0.03
เถ้า	0.30 ± 0.04
โปรตีน	0.47 ± 0.01
ไขมัน	0.04 ± 0.01

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมบัติทางความร้อนของสับปะรด ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดของค่าสมบัติทางความร้อน ที่ความชื้น (ร้อยละ 60 - 85) และที่อุณหภูมิต่างๆ (ภาคผนวก (ค)) โดยใช้วิธีของ Duncan ในการพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าสมบัติทางความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ และใช้ multiple regression ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติทางความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ

4.3.1 ความร้อนจำเพาะ

4.3.1.1 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 องศาเซลเซียส) จากการคำนวณค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของ 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.2) พบว่า สับปะรดที่ความชื้นต่างกัน จะมีค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 องศาเซลเซียส ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าความร้อนจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามความชื้นของสับปะรด นอกจากนี้ยังพบว่า อุณหภูมิที่ 60 - 65 องศาเซลเซียส และ 80 - 85 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่ความชื้นร้อยละ 60 - 65 และร้อยละ 70 - 75 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับ

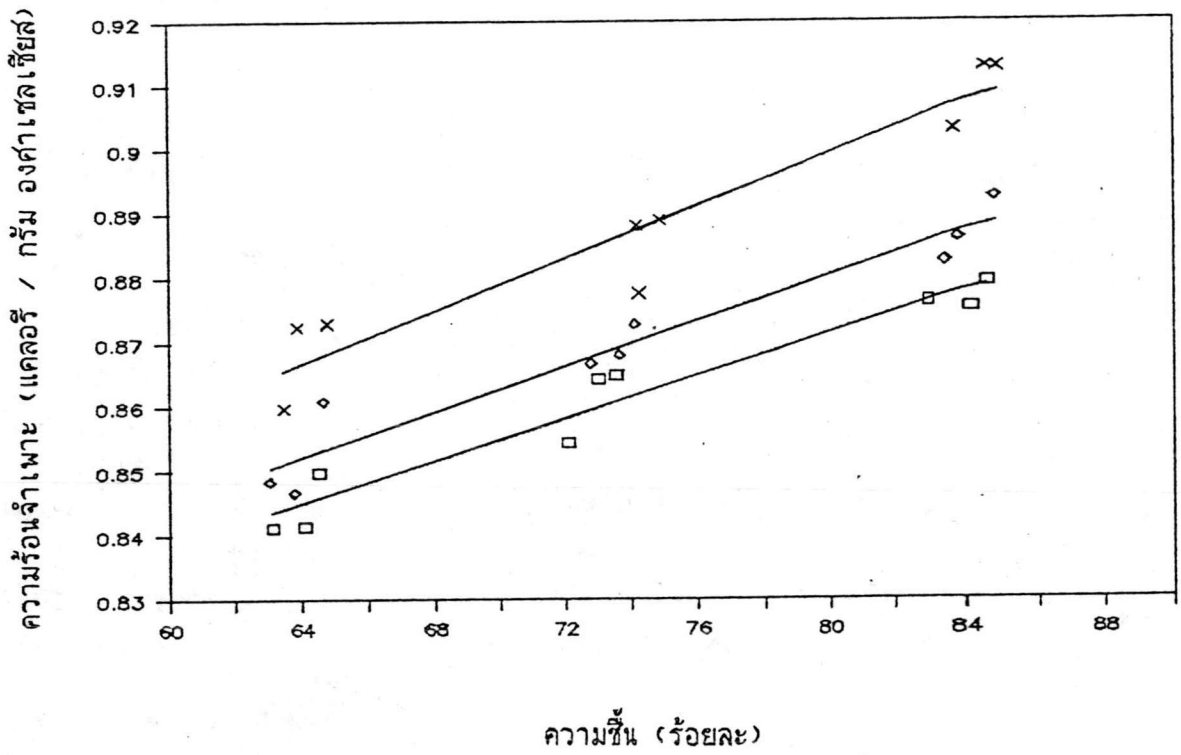
ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขณะที่สับปะรดสด (ความชื้นร้อยละ 80 - 85) มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60 - 65 °C	80 - 85 °C	100 ± 1 °C
60 - 65	0.844 ± 0.005 a, ก	0.852 ± 0.008 a, ก	0.868 ± 0.007 a, ข
70 - 75	0.861 ± 0.006 b, ก	0.869 ± 0.003 b, ก	0.885 ± 0.006 b, ข
80 - 85	0.877 ± 0.002 c, ก	0.887 ± 0.005 c, ข	0.909 ± 0.006 c, ค

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสร้างกราฟระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น (รูปที่ 4.4) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.3) พบว่า ค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงกับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85 ทั้งนี้เนื่องจาก น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะสูง คือ 1 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อสับปะรดมีความชื้นสูงขึ้น จึงทำให้ความร้อนจำเพาะมีค่าสูงตามไปด้วย (7) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นของถั่วลิสงที่ความชื้นร้อยละ 8 - 40 อุณหภูมิ 32 - 57 องศาเซลเซียส (14) และมะพร้าวเส้นที่ความชื้นร้อยละ 2.2 - 51.7 อุณหภูมิ 25 - 55 องศาเซลเซียส (9)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

- อุณหภูมิ 60 - 65 องศาเซลเซียส
- ◇ อุณหภูมิ 80 - 85 องศาเซลเซียส
- × อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส

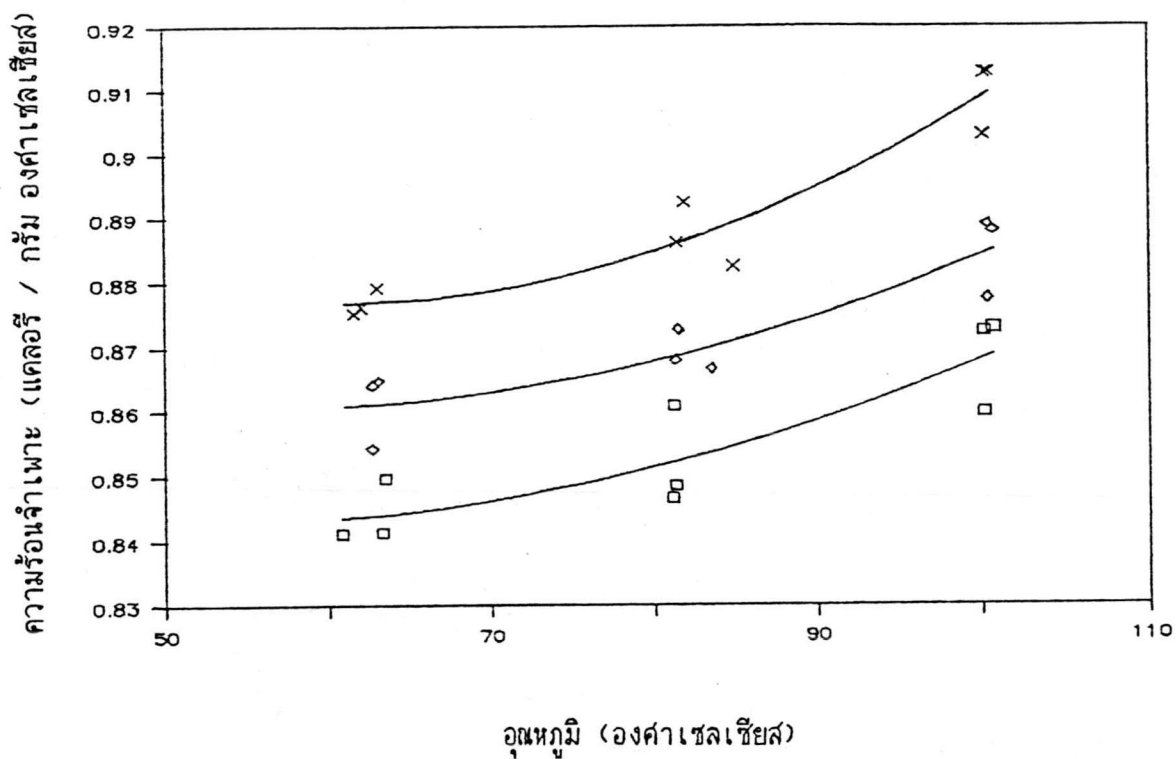
ตารางที่ 4.3 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง
กับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
60 - 65	$C_p = 0.740 + 0.0016M$	0.945
80 - 85	$C_p = 0.740 + 0.0018M$	0.937
100 ± 1	$C_p = 0.736 + 0.0020M$	0.915

* C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

M คือร้อยละของความชื้น

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าความร้อนจำเพาะ
ของสับปะรด โดยการสร้างกราฟระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ (รูปที่ 4.5) และหา
สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ (ตารางที่ 4.4)
พบว่า ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา กับอุณหภูมิของสับปะรด คือ ค่าความร้อนจำเพาะ
เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิกำลังสองที่ระดับความชื้นร้อยละ 60 - 85 เช่นเดียวกับค่าความร้อน
จำเพาะของถั่วลิสง ที่ช่วงความชื้นร้อยละ 8 - 40 อุณหภูมิ 32 - 57 องศาเซลเซียส (14)
ขณะที่ค่าความร้อนจำเพาะของมะพร้าวเส้น ที่ช่วงความชื้นร้อยละ 2.2 - 51.7 อุณหภูมิ 25
- 55 องศาเซลเซียส (9) และ ยาสูบ ที่ช่วงความชื้นร้อยละ 20 - 400 (dry basis)
อุณหภูมิ 40 - 75 องศาเซลเซียส (4) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงกับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ

- ปริมาณความชื้นร้อยละ 60 - 65
- ◇ ปริมาณความชื้นร้อยละ 70 - 75
- × ปริมาณความชื้นร้อยละ 80 - 85

ตารางที่ 4.4 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดกับอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส

ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
60 - 65	$C_p = 0.871 - 0.0011T + 1.0 \times 10^{-5}T^2$	0.774
70 - 75	$C_p = 0.897 - 0.0013T + 1.1 \times 10^{-5}T^2$	0.832
80 - 85	$C_p = 0.951 - 0.0025T + 2.0 \times 10^{-5}T^2$	0.916

* C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของทั้งความชื้น (ร้อยละ 60 - 85) และอุณหภูมิ (60 - 100 องศาเซลเซียส) ต่อค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด โดยการใช่มultiple regression หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นและอุณหภูมิ (โปรแกรม S.P.S.) พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นและอุณหภูมิ เป็นดังสมการที่ 17 โดยมีค่า $r^2 = 0.946$ จากสมการจะเห็นว่าค่าความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์กับความชื้นและกำลังสองของอุณหภูมิ เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ของค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นและอุณหภูมิ (ตารางที่ 4.3 และ 4.4)

$$C_p = 0.770 - 0.0015T + 0.0018M + 1.3 \times 10^{-5}T^2 \quad \dots (17)$$

4.3.1.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.5) พบว่า สับปะรดที่ความชื้นต่างกันจะมีค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าความร้อน-

จำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นของสับปะรด แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ไม่มีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นร้อยละ 60 - 65 , 70 - 75 และ 80 - 85 ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด แต่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส ไม่มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.465 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส (7) ดังนั้น จึงทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง มีค่าน้อยกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะของอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งอื่นๆ (30)

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่อุณหภูมิ		
	-10 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-30 ± 1 °C
60 - 65	0.469 ± 0.002 a,ก	0.472 ± 0.004 a,ก	0.473 ± 0.002 a,ก
70 - 75	0.479 ± 0.002 b,ก	0.477 ± 0.003 b,ก	0.481 ± 0.002 b,ก
80 - 85	0.489 ± 0.001 c,ก	0.487 ± 0.002 c,ก	0.488 ± 0.003 c,ก

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ พบว่า ความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า -10 ± 1 , -18 ± 1 และ -30 ± 1 องศาเซลเซียส มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85 (รูปที่ 4.6) เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูง และมีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

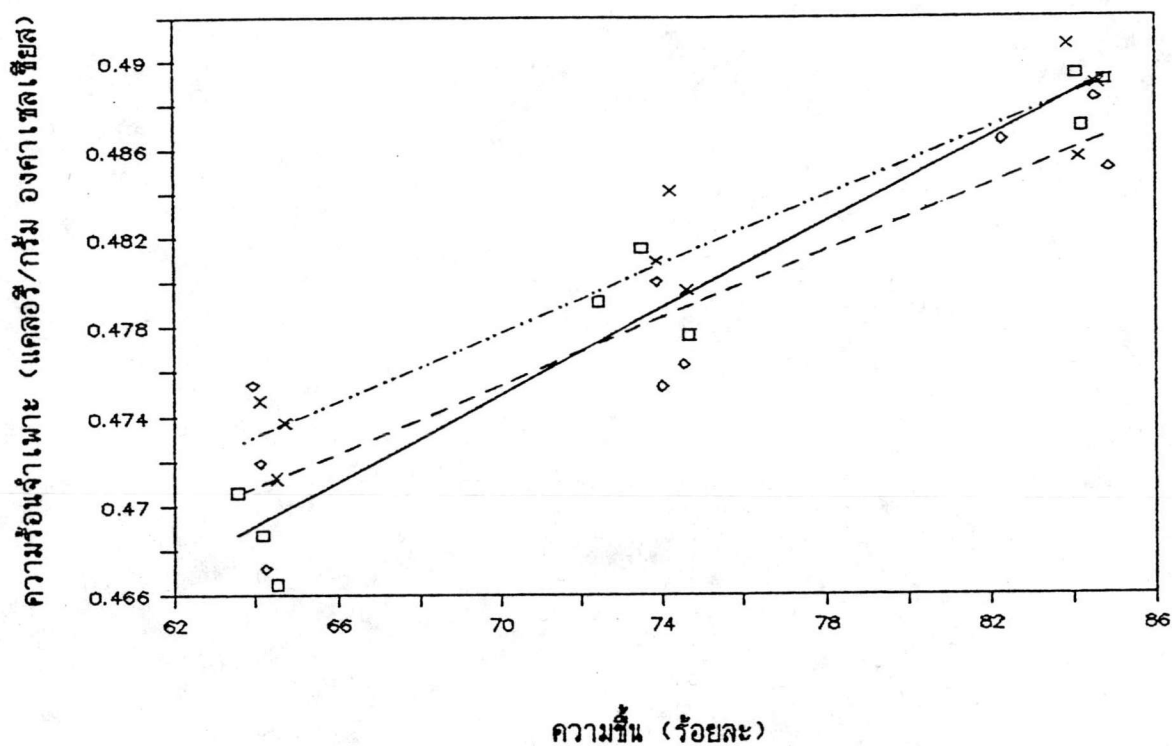
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
-10 ± 1	$C_p = 0.407 + 9.69 \times 10^{-4}M$	0.945
-18 ± 1	$C_p = 0.423 + 7.54 \times 10^{-4}M$	0.838
-30 ± 1	$C_p = 0.424 + 7.67 \times 10^{-4}M$	0.909

* C_p มีหน่วยเป็น แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส

M คือร้อยละของความชื้น

จากการศึกษาผลของความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85 ต่อค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น เป็นดังสมการที่ 18 โดยมีค่า $r^2 = 0.874$

$$C_p = 0.418 + 8.34 \times 10^{-4}M \quad \dots\dots\dots(18)$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

- อุณหภูมิ -10 ± 1 องศาเซลเซียส
- ◇---◇ อุณหภูมิ -18 ± 1 องศาเซลเซียส
- ×-.-.-× อุณหภูมิ -30 ± 1 องศาเซลเซียส

4.3.2 สภาพนำความร้อน

4.3.2.1 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 องศาเซลเซียส) จากการหาค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.7) พบว่าความชื้นของสับปะรดในช่วงร้อยละ 60 - 85 และ อุณหภูมิ 60 - 100 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดมีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นและอุณหภูมิของสับปะรด เช่นเดียวกับเนื้อสัตว์ (28) และผักผลไม้ต่างๆ (5)

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลวิน) * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60 - 65 °C	80 - 85 °C	100 ± 1 °C
60 - 65	0.487 ± 0.012 a,ก	0.540 ± 0.007 a,ข	0.641 ± 0.009 a,ค
70 - 75	0.536 ± 0.001 b,ก	0.557 ± 0.002 b,ข	0.840 ± 0.008 b,ค
80 - 85	0.636 ± 0.003 c,ก	0.738 ± 0.007 c,ข	0.941 ± 0.004 c,ค

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสร้างกราฟระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้น (รูปที่ 4.7) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้น ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.8) พบว่าค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับความชื้นของสับปะรด ทั้งที่

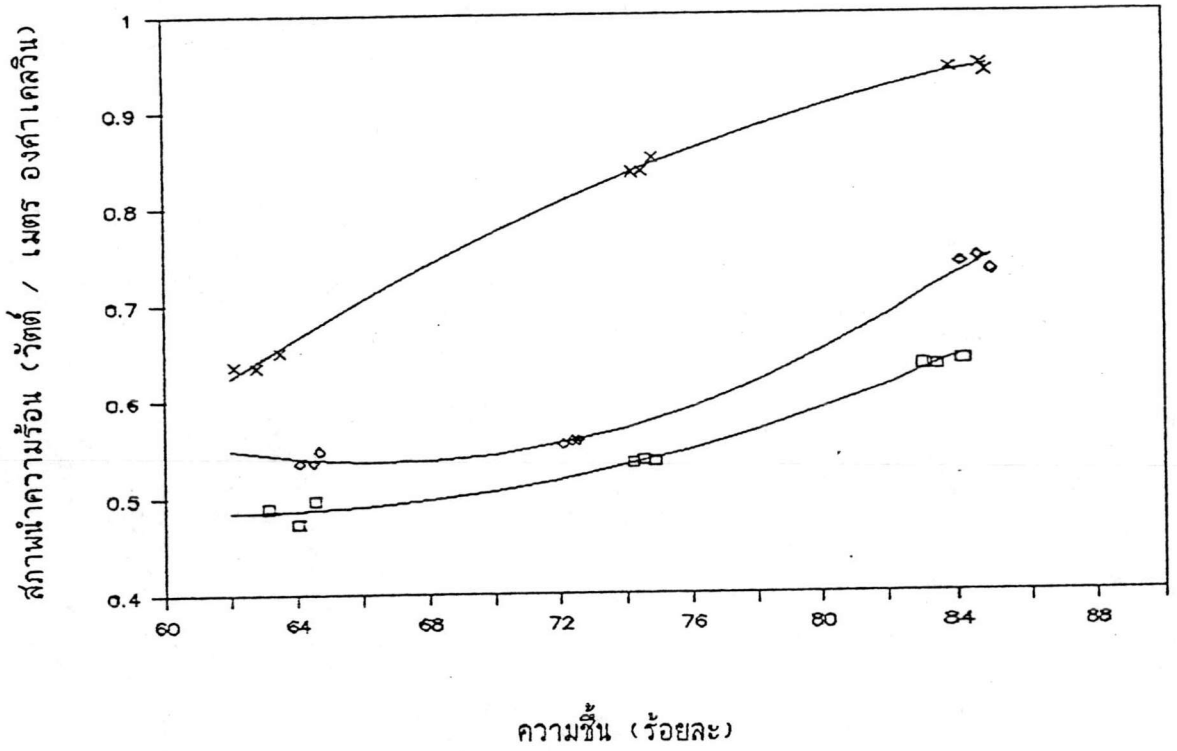
อุณหภูมิ 60 - 65, 80 - 85 และ 100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนของนมพว่องมันเนย ที่ช่วงความชื้นร้อยละ 60 - 95 (26) และยาสูบ ที่ช่วงความชื้นร้อยละ 20 - 90 (37) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับความชื้น ขณะที่มะพร้าวเส้นที่ช่วงความชื้นร้อยละ 2.4 - 51.2 (9) มีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงกับความชื้น แต่จากกราฟ และสมการของค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำความร้อนนั้น จะเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลาในแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น (พาราโบลาคว่ำ) ซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อความชื้นสูงขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในสัปดาห์ไปเป็นไอ จึงมีผลทำให้การนำความร้อนของสัปดาห์มีแนวโน้มการเพิ่มแบบลดลง เมื่อความชื้นของสัปดาห์สูงขึ้น

ตารางที่ 4.8 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของสัปดาห์ในช่วงอุณหภูมิสูงกับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
60 - 65	$k = 1.694 - 0.0391M + 0.0003M^2$	0.990
80 - 85	$k = 3.315 - 0.0834M + 0.0006M^2$	0.993
100 ± 1	$k = -1.871 + 0.0594M - 0.0003M^2$	0.998

* k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของสลิปแปรกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

- อุณหภูมิ 60 - 65 องศาเซลเซียส
- ◇ อุณหภูมิ 80 - 85 องศาเซลเซียส
- × อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส

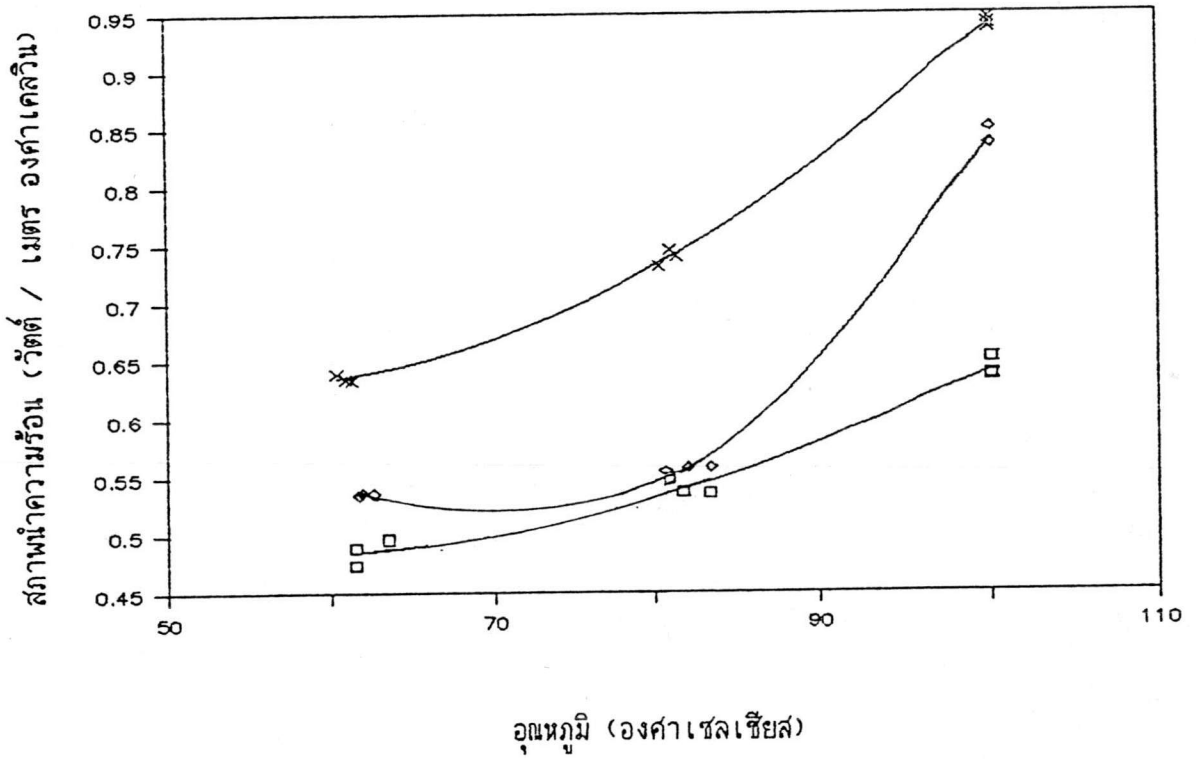
จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสร้างกราฟระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ (รูปที่ 4.8) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อน กับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ (ตารางที่ 4.9) พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับอุณหภูมิของสับปะรด การที่ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำมีค่าสูงขึ้นด้วย และจากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าสภาพนำความร้อนของมะพร้าวเส้น ที่ความชื้นร้อยละ 8 - 40 อุณหภูมิ 32 - 57 องศาเซลเซียส (9) มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิเช่นกัน แต่เป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรง ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะสับปะรดมีความชื้นสูงกว่ามะพร้าวเส้น ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจึงมีผลทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดมีลักษณะการเพิ่มขึ้นในแนวโน้มที่สูงกว่าอาหารที่มีความชื้นต่ำ

ตารางที่ 4.9 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดกับอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส

ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
60 - 65	$k = 0.691 - 0.0079T + 7.3 \times 10^{-5}T^2$	0.983
70 - 75	$k = 2.456 - 0.0551T + 0.0004T^2$	0.998
80 - 85	$k = 1.025 - 0.0150T + 0.0001T^2$	0.999

* k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเซลวิน

T มีหน่วยเป็น องศาเซลวิน



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของสัปปะรดกับอุณหภูมิที่ความขึ้นต่างๆ

- ปริมาณความขึ้นร้อยละ 60 - 65
- ◇ ปริมาณความขึ้นร้อยละ 70 - 75
- × ปริมาณความขึ้นร้อยละ 80 - 85

จากการศึกษาผลของทั้งความชื้น (ร้อยละ 60-- 85) และ อุณหภูมิ (60 - 100 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อน โดยการใช้ multiple regression พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ เป็น ดังสมการที่ 19 โดยมีค่า $r^2 = 0.975$ จากสมการจะเห็นว่า interaction ระหว่างอุณหภูมิ กับความชื้น (TM) และอุณหภูมิกำลังสอง มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน แต่ความชื้นกำลังสองไม่มี ผลต่อค่าสภาพนำความร้อน

$$k = 1.577 - 0.0376T - 0.0030M + 1.68 \times 10^{-4}TM + 1.96 \times 10^{-4}T^2 \dots (19)$$

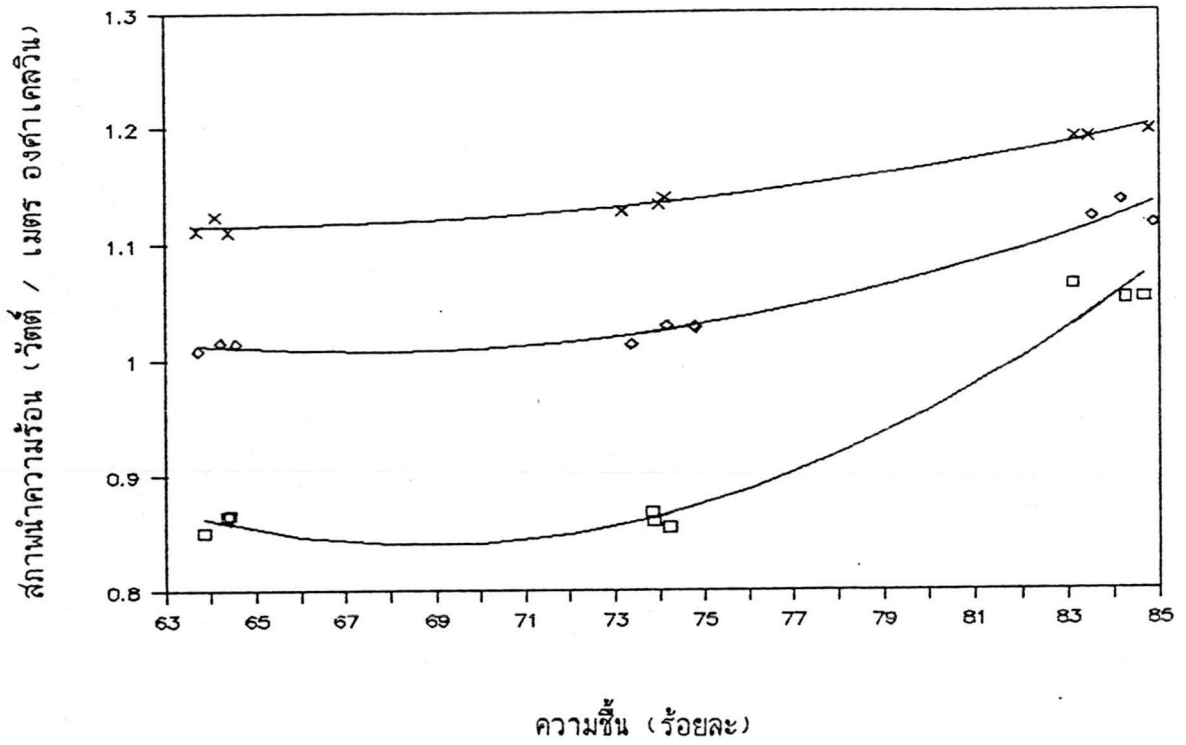
4.3.2.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อนในช่วง อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากการหาค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.10) พบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าสภาพนำ ความร้อนของสัปะรดที่ความชื้นร้อยละ 60 - 85 ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง แต่พบว่าความชื้นของ สัปะรดในช่วงร้อยละ 60 - 75 ไม่มีผลทำให้ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิ -10 ถึง -18 องศาเซลเซียส มีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ อุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนมากกว่าความชื้น ซึ่งเป็นเพราะการนำความร้อนของน้ำแข็งในสัปะรด ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของผลึกน้ำแข็ง (7) จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นไม่ค่อยมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนของสัปะรดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จุดเยือกแข็ง และยังพบว่าค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ มีค่าสูง กว่าในช่วงอุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งมีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 2.440 วัตต์/ เมตร องศาเซลวิน ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำ ความร้อนเท่ากับ 0.654 วัตต์/ เมตร องศาเซลวิน (7) ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของ สัปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ มีค่าสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเซลเซียส) * ที่อุณหภูมิ		
	$-10 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-18 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$-30 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
60 - 65	0.861 ± 0.008 a,ก	1.012 ± 0.004 a,ข	1.115 ± 0.007 a,ค
70 - 75	0.861 ± 0.007 a,ก	1.023 ± 0.009 a,ข	1.133 ± 0.006 b,ค
80 - 85	1.055 ± 0.007 b,ก	1.124 ± 0.010 b,ข	1.192 ± 0.003 c,ค

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรด ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.9) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.11) พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความชื้นกำลังสอง และจากกราฟพบว่า ค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นร้อยละ 80 - 85 มีค่าสูงกว่าที่ความชื้นร้อยละ 60 - 75 ที่เป็นเช่นนั้นอาจเป็นเพราะน้ำแข็งในสับปะรดที่ความชื้นร้อยละ 80 - 85 มีปริมาณสูง ซึ่งน้ำแข็งมีค่าสภาพนำความร้อนสูง จึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดที่ความชื้นร้อยละ 80 - 85 มีค่าสูงกว่าที่ความชื้นร้อยละ 60 - 75



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของสลับปะรดกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จุดเยือกแข็ง

- อุณหภูมิ -10 ± 1 องศาเซลเซียส
- ◇ อุณหภูมิ -18 ± 1 องศาเซลเซียส
- × อุณหภูมิ -30 ± 1 องศาเซลเซียส

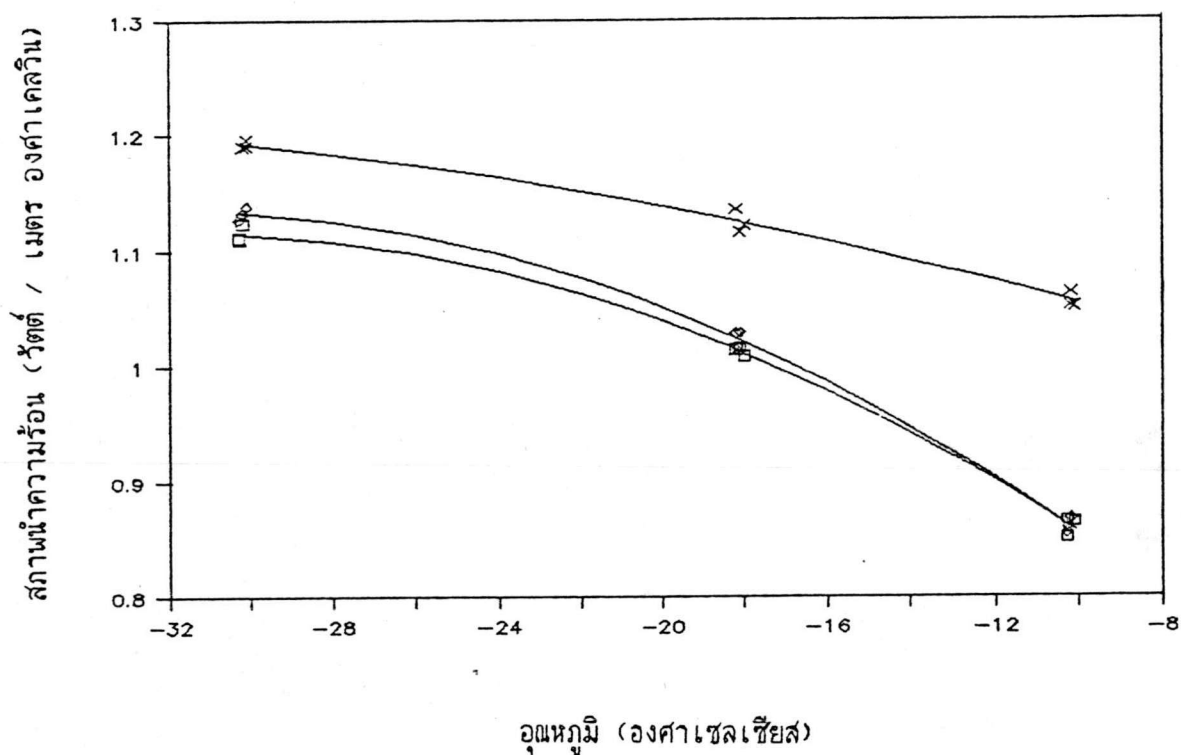
ตารางที่ 4.11 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของสัปะรดในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
-10 ± 1	$k = 5.191 - 0.1265M + 9.18 \times 10^{-4}M^2$	0.972
-18 ± 1	$k = 2.943 - 0.0573M + 4.23 \times 10^{-4}M^2$	0.972
-30 ± 1	$k = 1.947 - 0.0259M + 2.01 \times 10^{-4}M^2$	0.983

* k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพนำความร้อนของสัปะรด ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.10) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ (ตารางที่ 4.12) พบว่า ค่าสภาพนำความร้อนของสัปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนของเนื้อไก่ ที่ช่วงอุณหภูมิ -75 ถึง -10 องศาเซลเซียส (1) และค่าสภาพนำความร้อนของสารละลายน้ำตาลแช่แข็ง ที่ช่วงอุณหภูมิ -40 ถึง -5 องศาเซลเซียส (38)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของสับปะรดกับอุณหภูมิ ในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

- ปริมาณความชื้นร้อยละ 60 - 65
- ◇ ปริมาณความชื้นร้อยละ 70 - 75
- × ปริมาณความชื้นร้อยละ 80 - 85

ตารางที่ 4.12 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของลึบปะรดกับอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (r^2)
60 - 65	$k = 0.563 - 0.0346T + 0.00054T^2$	0.997
70 - 75	$k = 0.543 - 0.0369T + 0.00057T^2$	0.997
80 - 85	$k = 0.939 - 0.0129T + 0.00015T^2$	0.989

* k มีหน่วยเป็น วัตต์/เมตร องศาเซลวิน

T มีหน่วยเป็น องศาเซลวิน

จากการศึกษาผลของทั้งความชื้น (ร้อยละ 60 - 85) และ อุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ต่อค่าสภาพนำความร้อนของลึบปะรด โดยการหา สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนของลึบปะรด กับ ความชื้นและอุณหภูมิ โดยใช้ multiple regression พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและ อุณหภูมิ เป็นดังสมการที่ 20 โดยมีค่า $r^2 = 0.942$ จากสมการจะเห็นว่า interaction ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้น (TM) ไม่มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ดังเช่นในช่วงอุณหภูมิสูง และค่าสภาพนำความร้อนจะขึ้นกับอุณหภูมิกำลังสองและความชื้นกำลังสอง ของลึบปะรด

$$k = 3.082 - 0.0270T - 0.0719M - 0.0004T^2 + 0.0005M^2 \dots\dots(20)$$

4.3.3 สภาพแพร่ความร้อน

4.3.3.1 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 องศาเซลเซียส) จากการหาค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง และ เปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.13) พบว่า ความชื้นของสับปะรดในช่วงร้อยละ 60 - 85 และอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นและอุณหภูมิของสับปะรด เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน

ตารางที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) x 10 ⁷ * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60 - 65 °C	80 - 85 °C	100 ± 1 °C
60 - 65	1.323 ± 0.036 a,ก	1.437 ± 0.005 a,ข	1.629 ± 0.039 a,ค
70 - 75	1.394 ± 0.034 b,ก	1.537 ± 0.048 b,ข	2.285 ± 0.087 b,ค
80 - 85	1.633 ± 0.009 c,ก	2.056 ± 0.032 c,ข	2.741 ± 0.072 c,ค

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

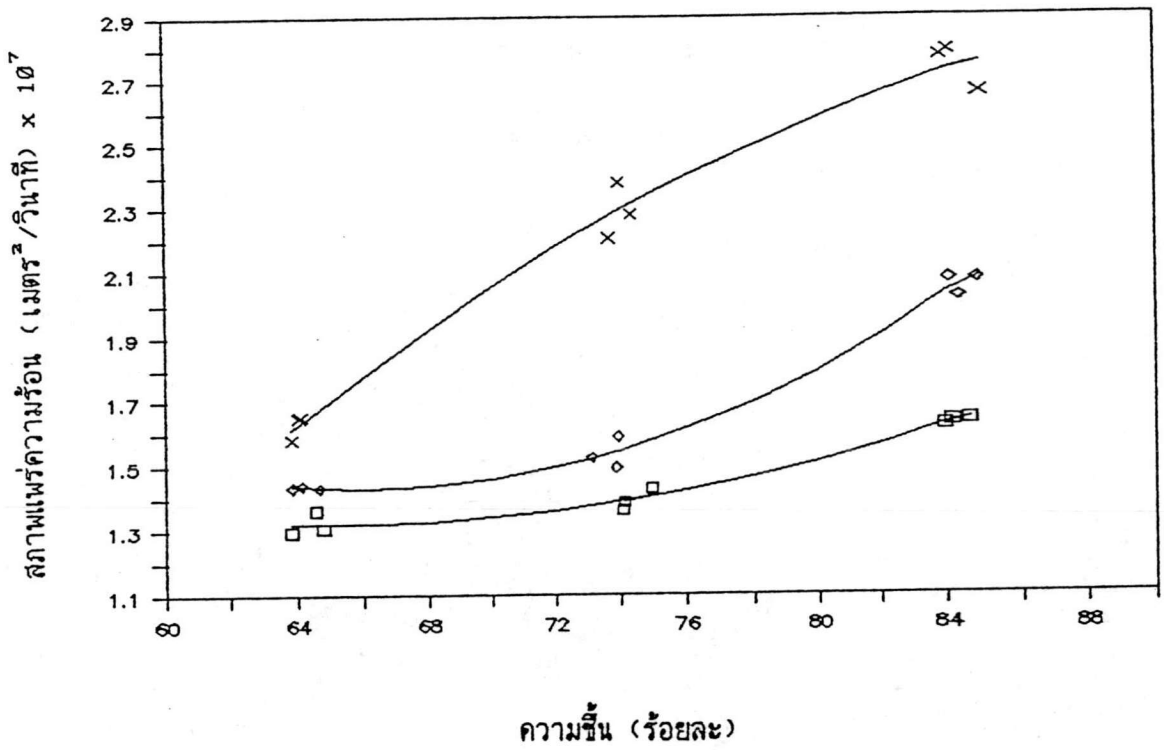
จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด ในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.11) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.14) พบว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดเพิ่มแบบพาราโบลากับความชื้น ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของข้าวโพด ที่ความชื้นร้อยละ 8 - 45 (39) และแบ่งถั่วเหลือง ที่ความชื้นร้อยละ 9.2 - 39.1 (15) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าสภาพแพร่ความร้อน นอกจากจะขึ้นกับความชื้นยังขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่นของตัวอย่างอีกด้วย จากกราฟและสมการที่ 100 ± 1 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน มีลักษณะเช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนคือ มีลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลานในแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความชื้นสูงขึ้น ซึ่งเป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในสับปะรดไปเป็นไอ เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน

ตารางที่ 4.14 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูงกับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination
60 - 65	$\alpha \times 10^7 = 4.910 - 0.1103M + 0.0008M^2$	0.975
80 - 85	$\alpha \times 10^7 = 9.517 - 0.2448M + 0.0019M^2$	0.990
100 ± 1	$\alpha \times 10^7 = -8.057 + 0.2247M + 0.0011M^2$	0.984

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

- อุณหภูมิ 60 - 65 องศาเซลเซียส
- ◇ อุณหภูมิ 80 - 85 องศาเซลเซียส
- × อุณหภูมิ 100 ± 1 องศาเซลเซียส

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิสูง โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.12) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ (ตารางที่ 4.15) พบว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับอุณหภูมิของสับปะรด

ตารางที่ 4.15 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดกับอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 องศาเซลเซียส

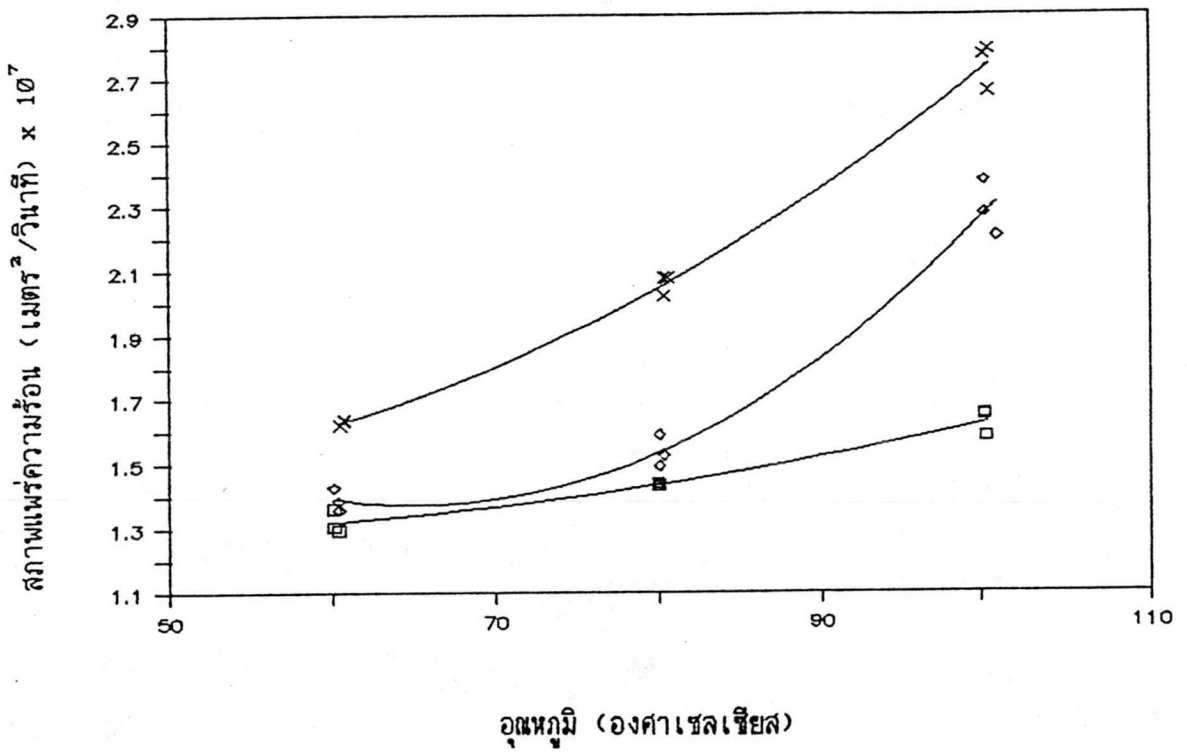
ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination(r^2)
60 - 65	$\alpha \times 10^7 = 1.426 - 0.0073T + 9.3 \times 10^{-5}T^2$	0.961
70 - 75	$\alpha \times 10^7 = 4.499 - 0.0957T + 0.0007T^2$	0.979
80 - 85	$\alpha \times 10^7 = 1.929 - 0.0247T + 0.0003T^2$	0.993

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของทั้งความชื้น (ร้อยละ 60 - 85) และอุณหภูมิ (60 - 100 องศาเซลเซียส) ต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด โดยการใช้ multiple regression หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดกับความชื้นและอุณหภูมิ พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ เป็นดังสมการที่ 21 โดยมีค่า $r^2 = 0.971$ จากสมการจะเห็นว่าผลของความชื้นและอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนเป็นลักษณะเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน ในช่วงอุณหภูมิสูง คือ interaction ระหว่างอุณหภูมิกับความชื้น (TM) มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน แต่จากสมการจะเห็นว่าความชื้นกำลังสองไม่มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เช่นเดียวกับสมการรวมของค่าสภาพนำความร้อน และ ค่าความร้อนจำเพาะ ในช่วงอุณหภูมิสูง

$$\alpha \times 10^7 = 5.906 - 0.1141T - 0.0448M + 9.74 \times 10^{-4}TM + 3.8 \times 10^{-4}T^2 \dots (21)$$



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของสลับปะรดกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ

- ปริมาณความชื้นร้อยละ 60 - 65
- ◇ ปริมาณความชื้นร้อยละ 70 - 75
- × ปริมาณความชื้นร้อยละ 80 - 85

ค่าสภาพแพร่ความร้อนนอกจากจะหาได้จากการทดลองแล้ว ยังสามารถคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนได้โดยตรงจากสมการที่ 6 โดยใช้ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ที่ได้จากสมการที่ 19 และสมการที่ 17 ตามลำดับ และสมมติให้ความหนาแน่นของสปีปะรดมีค่าคงที่เท่ากับ 1.041 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งใน 3 ระดับความชื้น ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความชื้นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสปีปะรด จากการคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อน (ตารางที่ 4.16) พบว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการคำนวณ มีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองประมาณร้อยละ 4.47

ตารางที่ 4.16 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของสปีปะรดที่ได้จากการคำนวณในช่วงอุณหภูมิสูง

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) $\times 10^7$ ที่อุณหภูมิ		
	62 °C	82 °C	100 °C
63	1.285	1.343	1.734
73	1.457	1.602	2.059
83	1.623	1.850	2.372

4.3.3.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากการหาค่าเฉลี่ยของ 3 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.17) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนของสปีปะรดที่ความชื้นร้อยละ 60 - 85 มีค่าต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และพบว่าที่แต่ละอุณหภูมิ ความชื้นของสปีปะรดในช่วงร้อยละ 60 - 75 ไม่มีผลทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ขณะที่สภาพแพร่ความร้อนในช่วงความชื้นร้อยละ 80 - 85 มีค่าสูงกว่าในช่วงความชื้นร้อยละ 60 - 75 เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำแข็งมีค่าสภาพแพร่ความร้อน

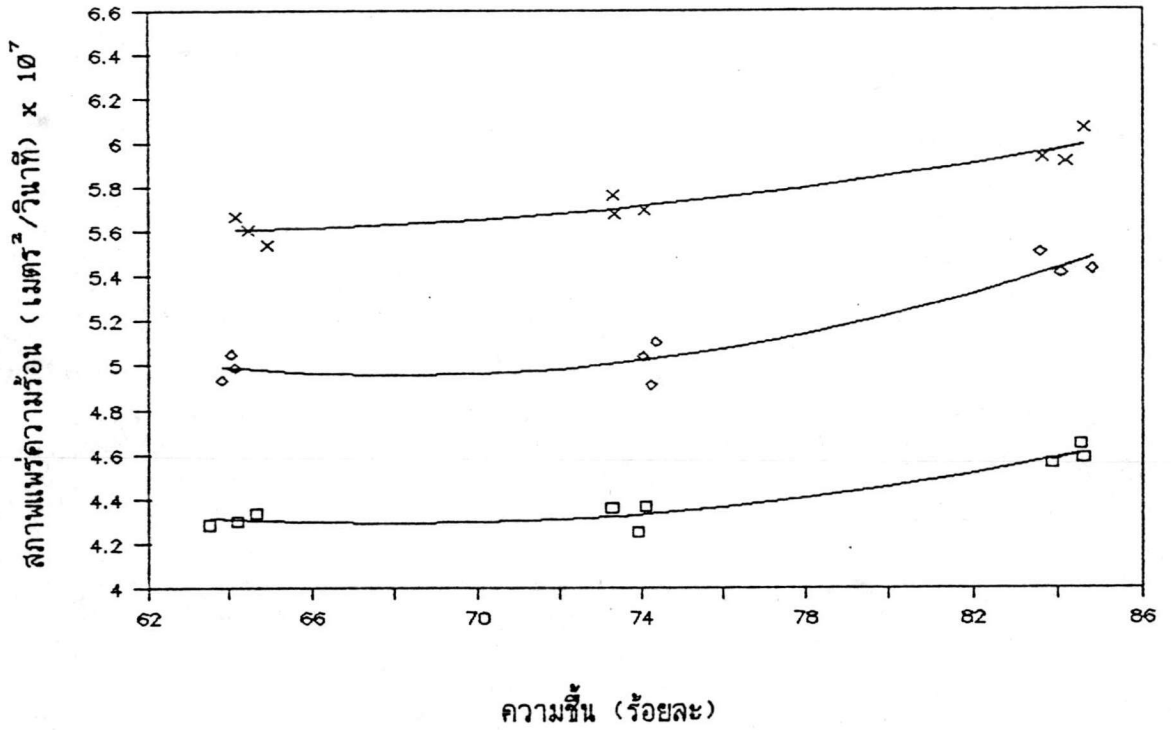
สูง จึงทำให้สัปดาห์ที่ความชื้นร้อยละ 80 - 85 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าสัปดาห์รอบแห่ง (40) นอกจากนี้จะเห็นว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่าสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำในสถานะของน้ำแข็งมีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าน้ำในสถานะของเหลว (7) และค่าสภาพแพร่ความร้อนยังขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่น ซึ่งในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ค่าสภาพนำความร้อนของสัปดาห์มีค่าสูงขึ้น ขณะที่ค่าความร้อนจำเพาะ และความหนาแน่น มีค่าลดลง ดังนั้นจึงทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง มีค่าสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง (40)

ตารางที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของสัปดาห์ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) x 10 ⁷ * ที่อุณหภูมิ		
	-10 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-30 ± 1 °C
60 - 65	4.309 ± 0.027 a,ก	4.988 ± 0.058 a,ข	5.602 ± 0.063 a,ค
70 - 75	4.327 ± 0.063 a,ก	5.017 ± 0.097 a,ข	5.710 ± 0.046 a,ค
80 - 85	4.595 ± 0.043 b,ก	5.445 ± 0.049 b,ข	5.967 ± 0.083 b,ค

- * - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของสัปดาห์ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.13) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (ตารางที่ 4.18) พบว่า สภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลากับความชื้น เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของลัษปะรดกับความชื้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่า จุดเยือกแข็ง

- อุณหภูมิ -10 ± 1 องศาเซลเซียส
- ◇ อุณหภูมิ -18 ± 1 องศาเซลเซียส
- × อุณหภูมิ -30 ± 1 องศาเซลเซียส

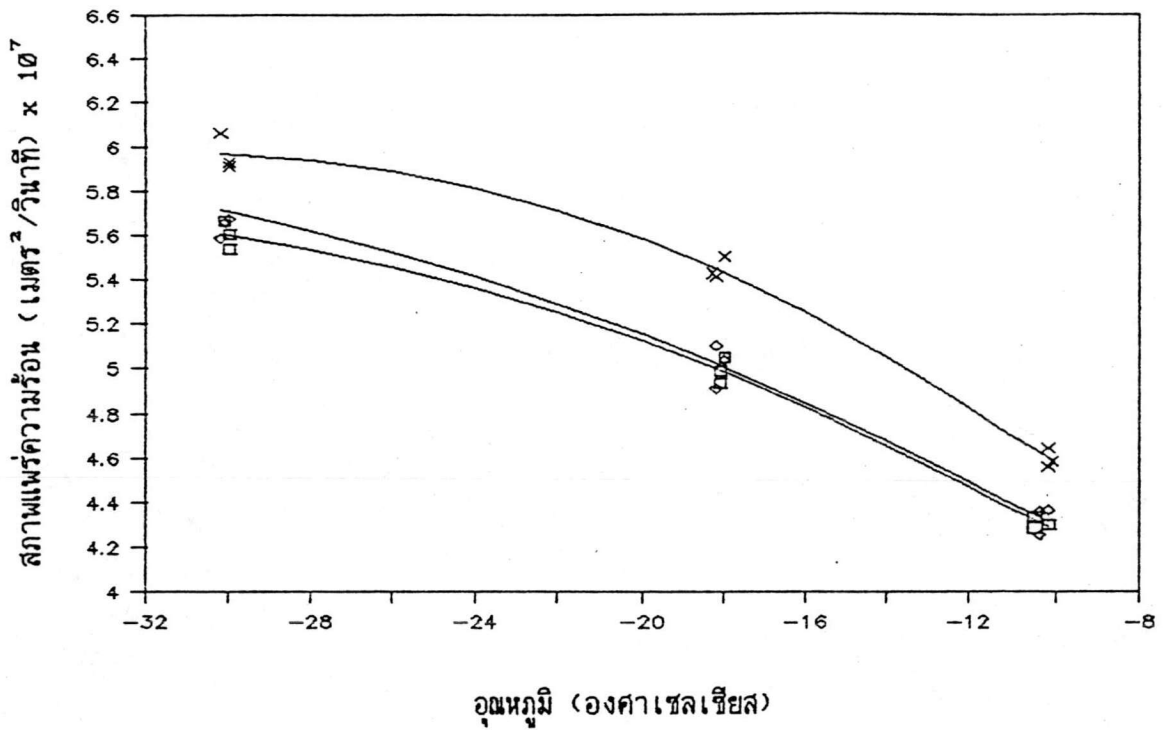
ตารางที่ 4.18 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง กับความชื้นในช่วงร้อยละ 60 - 85

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination
-10 ± 1	$\alpha \times 10^7 = 9.563 - 0.1551M + 0.0011M^2$	0.924
-18 ± 1	$\alpha \times 10^7 = 13.742 - 0.2580M + 0.0019M^2$	0.908
-30 ± 1	$\alpha \times 10^7 = 8.374 - 0.0900M + 0.0007M^2$	0.901

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

M คือร้อยละของความชื้น

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง โดยการสร้างกราฟ (รูปที่ 4.14) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิ ที่ความชื้นต่างๆ (ตารางที่ 4.19) พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่าลดลงแบบพาราโบลา เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับสารละลายน้ำตาลแซ่แข็ง (38)



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแปรความร้อนของสับปะรดกับอุณหภูมิ ในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

- ปริมาณความชื้นร้อยละ 60 - 65
- ◇ ปริมาณความชื้นร้อยละ 70 - 75
- × ปริมาณความชื้นร้อยละ 80 - 85

ตารางที่ 4.19 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดกับอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination(r^2)
60 - 65	$\alpha \times 10^7 = 3.036 - 0.1421T - 0.0019T^2$	0.993
70 - 75	$\alpha \times 10^7 = 3.128 - 0.1319T - 0.0015T^2$	0.988
80 - 85	$\alpha \times 10^7 = 2.943 - 0.1942T - 0.0031T^2$	0.992

- * α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที
T มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

จากการศึกษาผลของทั้งความชื้น (ร้อยละ 60 - 85) และ อุณหภูมิ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด โดยใช้ multiple regression หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรด กับความชื้นและอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ เป็นดังสมการที่ 22 โดยมีค่า $r^2 = 0.988$ จากสมการจะเห็นว่า ความชื้นกำลังสอง และ อุณหภูมิกำลังสอง มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

$$\alpha \times 10^7 = 8.586 - 0.1562T - 0.1706M - 0.0022T^2 + 0.0013M^2 \dots\dots(22)$$

จากการคำนวณหาค่าสภาพแพร่ความร้อน (ตารางที่ 4.20) โดยใช้ค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ ที่ได้จากสมการที่ 20 และสมการที่ 18 ตามลำดับ โดยใช้ความหนาแน่นของสับปะรดแช่แข็งเท่ากับ 0.990 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้งใน 3 ระดับความชื้น (เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความชื้นไม่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของสับปะรด) พบว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการคำนวณ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง โดยมีค่าต่างกันประมาณร้อยละ 3.14

ตารางที่ 4.20 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของสับปะรดที่ได้จากการคำนวณ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร ² /วินาที) $\times 10^7$ ที่อุณหภูมิ		
	-10 °C	-18 °C	-30 °C
64	4.487	5.143	5.644
74	4.462	5.107	5.600
84	4.961	5.595	6.079