บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมะละกอและมะม่วงที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักที่พบในผลไม้คือ น้ำ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของมะละกอ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	90.16 $\pm$ 0.34
โปรตีน	0.58 $\pm$ 0.03
ไขมัน	0.18 $\pm$ 0.03
เส้นใย	0.79 $\pm$ 0.02
เถ้า	0.19 $\pm$ 0.05
คาร์โบไฮเดรต	8.10

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของมะม่วง

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (ร้อยละ)
ความชื้น	80.58 $\pm$ 0.19
โปรตีน	0.63 $\pm$ 0.02
ไขมัน	0.12 $\pm$ 0.11
เส้นใย	0.66 $\pm$ 0.02
เถ้า	0.13 $\pm$ 0.03
คาร์โบไฮเดรต	17.88

4.2 เครื่องมือสำหรับหาสมบัติทางความร้อนของมะละกอและมะม่วง

4.2.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

ค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอและมะม่วง หาโดยใช้วิธี modified method of mixture วิธีนี้ใช้ได้ดีกับมะละกอและมะม่วงซึ่งมีความชื้นสูง โดยใช้ถุงโพลีเอทธิลีนบรรจุตัวอย่างเพื่อไม่ให้ตัวอย่างกับสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน และมีการป้องกันการสูญเสียความร้อนในขณะทดลอง โดยมีเม็ดโฟมและโฟมหนา 2 นิ้ว ทำหน้าที่เป็นฉนวนหุ้มอยู่ และในการหาเวลาสมดุล (t_e) ใช้ตำแหน่งบนเส้นของกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์ที่มีค่า R^2 สูงสุด เนื่องจากจากการทดลองพบว่าตำแหน่งที่มีค่า R^2 สูงสุด มีแนวโน้มเป็นตำแหน่งเดียวกับเวลาที่มีผลต่างของความชันสูงที่สุด

ในการทดลองหาค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้น้ำกลั่นเป็นสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาค่าความจุความร้อนของแคลอริมิเตอร์ พบว่าแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมีค่าความจุความร้อนเท่ากับ 39.594 $\pm$ 0.731 แคลอรี/องศาเซลเซียส และเมื่อนำแคลอริมิเตอร์มาทดสอบด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะ คือกลีเซอรีนซึ่งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

พบว่าค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองของกลีเซอรีนมีค่าเท่ากับ 0.580 $\pm$ 0.010 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าทางทฤษฎีร้อยละ 4.50 และเมื่อใช้แคลอริมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอสดที่มีความชื้นร้อยละ 89-91 ที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.920 $\pm$ 0.010 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับค่าความร้อนจำเพาะที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ Siebel (1982) คือ

$$C_p = 0.20 + 0.008M \quad .....(30)$$

โดยพบว่ามะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 90.5 มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.924 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อใช้แคลอริมิเตอร์หาค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงสดที่มีความชื้นร้อยละ 79-81 ที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีค่าเท่ากับ 0.908 $\pm$ 0.009 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงที่รายงานไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง (Polley, Snyder และ Kotnour, 1980) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.901 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ประมาณร้อยละ 0.78 ดังนั้นแคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าความร้อนจำเพาะได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.1.2 ค่าสภาพนำความร้อน

ใช้ thermal conductivity probe หาค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอและมะม่วง จากการทดลองได้เลือกใช้กลีเซอรีนเป็นสารอ้างอิงเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ให้แก่ probe เนื่องจากสะดวกและหาง่าย นอกจากนี้ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความต่างศักย์คงที่ โดยใช้เครื่องแปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับ 220 โวลต์ เป็นกระแสตรง 1.5 โวลต์ เพื่อให้กระแสที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง และในการหาค่าสภาพนำความร้อน จะพิจารณาเฉพาะผลการทดลองที่กราฟเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิกับ ln (t) มีค่า R^2 ตั้งแต่ 0.975 ขึ้นไปเพื่อให้ข้อมูลระหว่างอุณหภูมิกับ ln (t) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างดีทำให้ค่าสภาพนำความร้อนที่ได้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น (Sweat, 1974)

จากการทดสอบ thermal conductivity probe โดยหาค่าสภาพนำความร้อนของสารละลาย agar เข้มข้นร้อยละ 0.4 ที่มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.626 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน พบว่าสภาพนำความร้อนของสารละลาย agar ที่ได้จากการทดลองมี

ค่าเท่ากับ 0.650 $\pm$ 0.025 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ซึ่งต่างจากค่าทางทฤษฎีร้อยละ 3.85

4.1.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

ใช้ thermal diffusivity tube หาค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยในการทดลองหาค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิสูง (60-101 องศาเซลเซียส) ใช้น้ำมันปาล์มผ่านกรรมวิธี (น้ำมันพืชมรกต) เป็นสารตัวกลางให้ความร้อน เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้มีจุดเดือดสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ สำหรับในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง 0 องศาเซลเซียส) ได้ใช้ propylene glycol เป็นสารตัวกลาง เนื่องจาก propylene glycol ไม่แข็งตัวในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง ทำให้ยังคงมีสถานะเป็นของเหลวในขณะทดลอง

จากการทดลองใช้ thermal diffusivity tube หาค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอสด (ความชื้นร้อยละ 89-91) ที่อุณหภูมิ 60-66 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเท่ากับ $1.463 \times 10^{-7} \pm 0.086$ เมตร^2/วินาที ซึ่งมีค่าต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอที่ Hayes (1984) ได้รายงานไว้คือ 1.52×10^{-7} เมตร^2/วินาที ประมาณร้อยละ 3.75 ดังนั้น thermal diffusivity tube ที่ประกอบขึ้นจึงสามารถหาค่าสภาพแพร่ความร้อนได้ถูกต้อง

4.3 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อสมบัติทางความร้อนของตัวอย่าง

จากการหาค่าความร้อนจำเพาะ สภาพนำความร้อน และสภาพแพร่ความร้อน และคำนวณสมบัติทางความร้อน ดังตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ก ได้ผลดังแสดงในภาคผนวก ค จากนั้นวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อน โดยนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกัน เพื่อพิจารณาถึงความแตกต่าง และหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับอุณหภูมิและความชื้นโดยใช้ multiple regression

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของมะละกอ

4.3.1.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

4.3.1.1.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ (ตารางที่ 4.3) พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	8.8×10^{-2}	4.4×10^{-2}	84.90*
ความชื้น (M)	2	0.10	5.1×10^{-2}	99.20*
TM	4	1.3×10^{-2}	3.4×10^{-3}	6.52*
Error	18	9.4×10^{-3}	5.2×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนจำเพาะซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจาก 3 ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.4) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 60-100 องศาเซลเซียส มีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 ถึง 85 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงที่อุณหภูมิ 95-100 องศาเซลเซียส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากน้ำบางส่วนกลายเป็นไอ ทำให้มะละกอมีค่าความร้อนจำเพาะลดลง กล่าวคือน้ำที่อุณหภูมิ 81 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 1.003 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ในขณะที่ไอน้ำที่ 100 องศาเซลเซียส มีค่า 0.485

แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้ค่าความร้อนจำเพาะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่แต่ละช่วงอุณหภูมิเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าสูงถึง 1 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อมะละกอมีความชื้นสูงขึ้นจึงทำให้มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย (Mohsenin, 1980) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kazarian และ Hall (1965) ซึ่งทดลองเกี่ยวกับข้าวสาลีและข้าวโพด โดยพบว่าข้าวสาลีที่ความชื้นร้อยละ 0.68-20.3 อุณหภูมิ 10.7-32.2 องศาเซลเซียส และข้าวโพดที่มีความชื้นร้อยละ 0.91-30.2 อุณหภูมิ 12.2-28.8 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
69-71	0.798 ± 0.003 ก,a	0.823 ± 0.014 ก,a	0.742 ± 0.051 ก,a
79-81	0.839 ± 0.013 ก,a	0.935 ± 0.012 ข,b	0.799 ± 0.016 ค,ab
89-91	0.920 ± 0.010 ก,a	1.051 ± 0.011 ข,c	0.848 ± 0.033 ค,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 ในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ และสมการแสดงความสัมพันธ์ (R^2= 0.882) เป็น

$$C_p = -2.650 + 0.076T + 9.1 \times 10^{-3}M - 1.5 \times 10^{-5}TM - 4.8 \times 10^{-4}T^2 \quad ..(31)$$

4.3.1.1.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.5) พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	8.7×10^{-3}	4.3×10^{-3}	24.77*
ความชื้น (M)	2	3.6×10^{-3}	1.8×10^{-3}	10.24*
TM	4	9.1×10^{-5}	2.2×10^{-5}	0.13
Error	18	3.1×10^{-3}	1.7×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของมะละกอที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ที่ระดับอุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.6) พบว่าการลดอุณหภูมิของมะละกอจาก -10 องศาเซลเซียส เป็น -30 องศาเซลเซียส ทำให้มะละกอที่มีระดับความชื้นต่างกัน (ร้อยละ 69-91) มีค่าความร้อนจำเพาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Ramaswamy และ Tung (1981) ซึ่งพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของแอปเปิลที่ความชื้นร้อยละ 85.8 และ 87.3 มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงในช่วง -10 ถึง -80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มความชื้นจากร้อยละ 69 จนถึงร้อยละ 91 ทำให้ค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานวิจัยของสิรินาถ เมฆมณี (2533) ที่พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของสับปะรดที่มีความชื้นร้อยละ 60-85 ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-30 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-10 ± 1 °C
69-71	0.418 ± 0.009 ก,a	0.442 ± 0.013 กข,a	0.456 ± 0.015 ข,a
79-81	0.431 ± 0.013 ก,a	0.462 ± 0.005 ข,a	0.476 ± 0.008 ข,ab
89-91	0.441 ± 0.012 ก,a	0.471 ± 0.024 กข,a	0.488 ± 0.012 ข,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูง (ตารางที่ 4.4) และในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (ตารางที่ 4.6) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.472 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส (Rohsenow, Hartnett และ Ganic, 1973) ในขณะที่ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำจะสูงขึ้นถึง 1.001 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส (Kreith และ Bohn, 1986) ดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูงมีค่าสูงกว่าในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Ramaswamy และ Tung (1981) ที่รายงานว่าแอปเปิลที่มีความชื้นร้อยละ 85.8 และ 87.3 มีค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

สูงกว่าที่ -50 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะละกอที่ความชื้นร้อยละ 69-91 ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ แต่ผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นไม่มีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งสมการแสดงความสัมพันธ์ (R^2= 0.799) เป็น

$$C_p = 0.387 + 2.2 \times 10^{-3}T + 1.4 \times 10^{-3}M \quad .....(32)$$

4.3.1.2 ค่าสภาพนำความร้อน

4.3.1.2.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 องศาเซลเซียส) จากตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	0.15	7.5×10^{-2}	253.06*
ความชื้น (M)	2	0.19	9.9×10^{-2}	336.04*
TM	4	0.02	4.9×10^{-3}	16.82*
Error	18	5.3×10^{-3}	2.9×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิในช่วง 60-85 องศาเซลเซียส และมีค่าเกือบคงที่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 85-100 องศาเซลเซียส การที่ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นในลักษณะดังกล่าว อาจเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในมะละกอมีค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้นด้วย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกือบถึง 100 องศาเซลเซียส ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำมีการเพิ่มขึ้นน้อยมาก (Rohsenow และคณะ, 1973) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวคล้ายคลึงกับค่าสภาพนำความร้อนของน้ำมะเขือเทศที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 4.8-80.0 อุณหภูมิ 30-150 องศาเซลเซียส (Choi และ Okos, 1983) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความชื้นเป็นองค์ประกอบหลักในมะละกอ ดังนั้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนจึงสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Kazarian และ Hall (1965) ที่รายงานว่าค่าสภาพนำความร้อนของข้าวโพดที่อุณหภูมิ 20.8-52.6 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.1 ถึงร้อยละ 30.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
69-71	0.572 ± 0.026 ก,a	0.735 ± 0.025 ข,a	0.797 ± 0.019 ค,a
79-81	0.654 ± 0.026 ก,b	0.843 ± 0.005 ข,b	0.855 ± 0.007 ข,b
89-91	0.857 ± 0.010 ก,c	0.930 ± 0.009 ข,c	0.943 ± 0.010 ข,c

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 ในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส พบว่าผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้น และอุณหภูมิยกกำลังสองมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.960$) เป็น

$$k = -2.624 + 0.045T + 0.027M - 2.0 \times 10^{-4}TM - 1.5 \times 10^{-4}T^2 \quad ....(33)$$

4.3.1.2.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	0.13	6.5×10^{-2}	180.09*
ความชื้น (M)	2	0.16	8.1×10^{-2}	225.36*
TM	4	1.8×10^{-2}	4.6×10^{-3}	12.88*
Error	18	6.5×10^{-3}	3.6×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนจากการทดลอง 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.10) พบว่า การลดอุณหภูมิในช่วง -10 ถึง -30 องศาเซลเซียส หรือการเพิ่มความชื้นของมะละกอในช่วงร้อยละ 69 ถึงร้อยละ 91 ทำให้ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองเกี่ยวกับเนื้อวัวที่มีความชื้นร้อยละ 76.0-78.9 ที่อุณหภูมิ -17.6 ถึง -4.1 องศาเซลเซียส ที่ค่าสภาพนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Hill, Leitman และ Sunderland, 1967) การที่ค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นในมะละกอสูงขึ้น อาจเนื่องจากน้ำมีค่าสภาพนำความร้อนสูง ดังนั้นมะละกอที่มีความชื้นสูงจึงมีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่ามะละกอที่มีความชื้นต่ำ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับค่าสภาพนำความร้อนของข้าวสาลี ที่อุณหภูมิ -27 ถึง -6 องศาเซลเซียส โดยพบว่าค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 4.4 ถึง 22.5 (Mohsenin, 1980)

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-30 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-10 ± 1 °C
69-71	1.069 ± 0.021 ก,a	0.939 ± 0.020 ข,a	0.834 ± 0.017 ค,a
79-81	1.107 ± 0.014 ก,b	1.022 ± 0.026 ข,b	0.914 ± 0.003 ค,b
89-91	1.177 ± 0.005 ก,c	1.136 ± 0.034 ก,c	1.093 ± 0.006 ข,c

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง (ตารางที่ 4.8) และในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (ตารางที่ 4.10) พบว่าค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำมีค่าสูงกว่าค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากน้ำที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.606 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ในขณะที่น้ำแข็งที่ -23 องศาเซลเซียส มีค่า 2.42 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน (Rohsenow และคณะ, 1973) ดังนั้นค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำจึงมีค่าสูงกว่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ในช่วงของอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิและความชื้นยกกำลังสองมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ (R^2= 0.965) เป็น

$$k = 1.127 - 0.039T - 0.024M + 3.8 \times 10^{-4}TM + 2.5 \times 10^{-4}M^2 \quad .....(34)$$

4.3.1.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

4.3.1.3.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง (60-101 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.11) พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ 60-101 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	2.35	1.17	102.98*
ความชื้น (M)	2	1.47	0.73	64.37*
TM	4	9.9×10^{-2}	2.4×10^{-2}	2.17
Error	18	0.20	1.1×10^{-2}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.12) พบว่ามะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 60 เป็น 101 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Choi และ Okos (1983) ที่พบว่าน้ำมะเขือเทศเข้มข้นที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 4.8-80.0 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 150 องศาเซลเซียส ส่วนมะละกอที่อุณหภูมิ 60-101 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มความชื้นในช่วงร้อยละ 69-91 มีผลให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการที่ค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงขึ้นตามปริมาณความชื้น อาจเนื่องจากน้ำมีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูง ดังนั้นเมื่อมะละกอมีความชื้นสูง ทำให้มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wallapapan และคณะ (1984) ที่พบว่าสภาพแพร่ความร้อนของแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 9.2 เป็นร้อยละ 39.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-66 °C	80-86 °C	95-101 °C
69-71	1.463 ± 0.086 ก,a	1.941 ± 0.099 ข,a	2.293 ± 0.177 ค,a
79-81	1.761 ± 0.098 ก,b	2.338 ± 0.130 ข,b	2.472 ± 0.000 ข,ab
89-91	2.119 ± 0.080 ก,c	2.632 ± 0.147 ข,c	2.666 ± 0.000 ข,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ (60-101 องศาเซลเซียส) และความชื้น (ร้อยละ 69-91) ต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอ โดยใช้ multiple regression พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอ และสมการความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.922$) เป็น

$$\alpha \times 10^7 = -1.900 + 0.021T + 0.030M \qquad .....(35)$$

นอกจากทำการทดลองแล้ว ค่าสภาพแพร่ความร้อนยังหาได้จากการคำนวณ โดยนำค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพนำความร้อนแทนลงในสมการ (12) ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความหนาแน่นของมะละกอมีค่าเท่ากับ 1.037 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้ง 3 ระดับความชื้น เนื่องจากความหนาแน่นที่ทั้ง 3 ระดับ

ความชื้น แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อน หาได้โดยใช้สมการ (31) และ (33) ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณปรากฏดังแสดงในตารางที่ 4.13 และค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่างจากค่าที่ได้จากการทดลองร้อยละ 4.87-27.78 ซึ่งอาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อน

ตารางที่ 4.13 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (12) ในช่วงอุณหภูมิสูง

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 ที่อุณหภูมิ		
	63 °C	83 °C	98 °C
70	1.839	2.140	2.930
80	2.049	2.214	2.856
90	2.223	2.276	2.796

4.3.1.3.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง 0 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.14) พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง 0 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	4.29	2.14	62.47*
ความชื้น (M)	2	4.28	2.14	62.38*
TM	4	0.40	0.10	2.93*
Error	18	0.61	3.4×10^{-2}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.15) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก -30 เป็น 0 องศาเซลเซียส ทำให้มะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nesvadba (1982) ที่พบว่าปลาค็อดที่มีความชื้นร้อยละ 80 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -25 เป็น -7 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ -30 ถึง 0 องศาเซลเซียส สภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69 ถึง 91

ตารางที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-30 ถึง -14 °C	-18 ถึง -4 °C	-10 ถึง 0 °C
69-71	5.821 ± 0.129 ก,a	5.230 ± 0.038 ข,a	4.459 ± 0.221 ค,a
79-81	6.208 ± 0.226 ก,b	5.897 ± 0.287 กข,b	5.378 ± 0.291 ข,b
89-91	6.388 ± 0.088 ก,b	6.283 ± 0.103 ก,c	5.700 ±0.000 ข,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง (ตารางที่ 4.12) และในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (ตารางที่ 4.15) พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำมีค่าสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากน้ำในสถานะของแข็งมีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงกว่าน้ำในสถานะของเหลว (Rohsenow และคณะ, 1973) และค่าสภาพแพร่ความร้อนยังขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่น โดยในช่วงอุณหภูมิต่ำมะละกอมีค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้น แต่มีค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นลดลง ดังนั้นค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมีค่าสูงกว่าในช่วงอุณหภูมิสูง

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 69-91 ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง 0 องศาเซลเซียส พบว่าความชื้น และอุณหภูมิยกกำลังสอง มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน และสมการความสัมพันธ์ (R^2 = 0.933) เป็น

$$\alpha \times 10^{7} = -11.269 - 0.306T + 0.325M + 1.8 \times 10^{-3}TM - 3.7 \times 10^{-3}T^{2} - 1.6 \times 10^{-3}M^{2} \quad .....(36)$$

จากการหาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพนำความร้อน (สมการ (12)) พบว่ามะละกอที่มีค่าความหนาแน่น 0.988 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้ง 3 ระดับความชื้น และค่าความร้อนจำเพาะกับค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำหาจากสมการ (32) และ (34) ตามลำดับ มีค่าสภาพแพร่ความร้อนที่คำนวณได้ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ซึ่งพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการคำนวณแตกต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการทดลองเพียงร้อยละ 0.25-13.96 แสดงว่าวิธีวัดค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

ตารางที่ 4.16 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะละกอที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (12) ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 ที่อุณหภูมิ		
	-30 °C	-18 °C	-10 °C
70	6.075	4.934	4.245
80	6.013	5.150	4.627
90	6.225	5.608	5.234

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของมะม่วง

4.3.2.1 ค่าความร้อนจำเพาะ

4.3.2.1.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.17 ซึ่งปรากฏว่าอุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	5.2×10^{-3}	2.6×10^{-3}	49.02*
ความชื้น (M)	2	3.9×10^{-3}	1.9×10^{-3}	36.99*
TM	4	9.1×10^{-5}	2.2×10^{-5}	0.42
Error	18	9.6×10^{-4}	5.3×10^{-5}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.18) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 60 เป็น 100 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chowdary (1988) ที่รายงานว่ามะม่วงพันธุ์แรดที่มีความชื้นร้อยละ 80.9 มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10 ถึง 40 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับรายงานของ Rice, Selman และ Abdul-Rezzak (1988) ที่กล่าวว่ามันฝรั่ง (ความชื้นร้อยละ 72-79) มีค่า

ความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 40 ถึง 90 องศาเซลเซียส นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ 60-85 องศาเซลเซียส มะม่วงมีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้น (ในช่วงร้อยละ 59-81) สูงขึ้น ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะจึงเพิ่มขึ้นตามความชื้น เช่นเดียวกับค่าความร้อนจำเพาะของน้ำแอปเปิลใสที่มีความเข้มข้น 12-70 °Brix อุณหภูมิ 20-90 องศาเซลเซียส (Constenla, Lozano และ Crapiste, 1989) และข้าวโอ๊ตที่มีความชื้นร้อยละ 11.7-17.8 (Haswell, 1954)

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
59-61	0.873 ± 0.005 ก,a	0.886 ± 0.011 ก,a	0.912 ± 0.008 ข,a
69-71	0.890 ± 0.008 ก,b	0.902 ± 0.005 ก,b	0.924 ± 0.009 ข,a
79-81	0.908 ± 0.009 ก,c	0.915 ± 0.005 ก,b	0.936 ± 0.004 ข,a

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 ในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.905$) เป็น

$$C_p = 0.926 - 4.3 \times 10^{-3}T + 1.4 \times 10^{-3}M + 3.3 \times 10^{-5}T^2 \quad ....(37)$$

4.3.2.1.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.19) พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	7.3×10^{-3}	3.6×10^{-3}	12.25*
ความชื้น (M)	2	6.6×10^{-3}	3.3×10^{-3}	11.11*
TM	4	5.4×10^{-4}	1.3×10^{-4}	0.46
Error	18	5.3×10^{-3}	2.9×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลอง 3 ซ้ำ ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.20 พบว่ามะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-61 มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -30 เป็น -10 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับค่าความร้อนจำเพาะของสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2-35 มีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -40 ถึง -5 องศาเซลเซียส (Keppeler และ Arboleda, 1981) นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ -10 และ -18 องศาเซลเซียส มะม่วงมีค่าความร้อนจำเพาะสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 59 เป็นร้อยละ 81 เช่นเดียวกับงานวิจัยของสิรินาถ เมฆมณี (2533) ที่รายงานว่าความร้อนจำเพาะของสับปะรด ที่อุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มจาก

ร้อยละ 60 ถึงร้อยละ 85

ตารางที่ 4.20 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-30 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-10 ± 1 °C
59-61	0.411 ± 0.014 ก,a	0.422 ± 0.010 กข,a	0.441 ± 0.003 ข,a
69-71	0.426 ± 0.025 ก,a	0.446 ± 0.018 ก,ab	0.465 ± 0.010 ก,b
79-81	0.434 ± 0.033 ก,a	0.470 ± 0.014 ก,b	0.485 ± 0.006 ก,c

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะ และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.700$) เป็น

$$C_p = 0.350 + 2.0 \times 10^{-3} T + 1.9 \times 10^{-3} M \quad .....(38)$$

4.3.2.2 ค่าสภาพนำความร้อน

4.3.2.2.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.21 พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	0.12	6.2×10^{-2}	26.92*
ความชื้น (M)	2	0.21	0.10	46.49*
TM	4	2.9×10^{-2}	7.3×10^{-3}	3.18*
Error	18	4.1×10^{-2}	2.3×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.22) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 60 เป็น 100 องศาเซลเซียส ทำให้มะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 69-81 มีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพนำความร้อนของนมผงที่มีความหนาแน่น 0.512-0.605 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 11.8-43.2 องศาเซลเซียส (MacCarthy, 1985) และมะม่วงพันธุ์แรดที่มีความชื้นร้อยละ 80.9 ที่อุณหภูมิ 10-40 องศาเซลเซียส (Chowdary, 1988) ที่สภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่าที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส มะม่วงที่มีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 59

เป็นร้อยละ 81 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนของแอปเปิลที่อุณหภูมิ 22 และ 60 องศาเซลเซียส ที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มจากร้อยละ 44.75 ถึงร้อยละ 87.56 (Lozano และคณะ, 1979)

ตารางที่ 4.22 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
59-61	0.507 ± 0.024 ก,a	0.533 ± 0.032 ก,a	0.569 ± 0.031 ก,a
69-71	0.550 ± 0.026 ก,a	0.674 ± 0.071 กข,b	0.803 ± 0.079 ข,b
79-81	0.675 ± 0.054 ก,b	0.726 ± 0.022 ก,b	0.855 ± 0.052 ข,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 ในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.823$) เป็น

$$k = 0.459 - 7.2 \times 10^{-3}T - 2.5 \times 10^{-3}M + 1.7 \times 10^{-4}TM \quad ....(39)$$

4.3.2.2.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 องศาเซลเซียส) จากตารางที่ 4.23 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	0.25	0.12	71.84*
ความชื้น (M)	2	0.19	9.7×10^{-2}	56.01*
TM	4	1.0×10^{-2}	2.5×10^{-3}	1.45
Error	18	3.1×10^{-2}	1.7×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของมะม่วงที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.24 พบว่าการลดอุณหภูมิของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-61, 69-71 และ 79-81 จาก -10 เป็น -30 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับผลงานวิจัยของ Sweat และคณะ (1973) ซึ่งรายงานว่าเนื้อไก่ที่มีความชื้นร้อยละ 74.4 มีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงในช่วง -10 ถึง -75 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส มะม่วงมีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นสูงขึ้นจากร้อยละ 59 เป็นร้อยละ 81 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นค่าสภาพนำความร้อนของมะม่วงจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้น เช่นเดียวกับค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุด

เยือกแข็งของน้ำ

ตารางที่ 4.24 ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร องศาเคลวิน)* ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	$-30 \pm 1\ ^{\circ}C$	$-18 \pm 1\ ^{\circ}C$	$-10 \pm 1\ ^{\circ}C$
59-61	0.906 ± 0.035 ก,a	0.715 ± 0.035 ข,a	0.677 ± 0.044 ข,a
69-71	0.951 ± 0.060 ก,a	0.802 ± 0.018 ข,b	0.793 ± 0.042 ข,b
79-81	1.134 ± 0.008 ก,b	0.925 ± 0.041 ข,c	0.860 ± 0.062 ข,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 องศาเซลเซียส พบว่าผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นไม่มีผลต่อค่าสภาพนำความร้อน แต่ค่าสภาพนำความร้อนขึ้นกับความชื้น และอุณหภูมิยกกำลังสอง และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.908$) เป็น

$$k = 0.099 + 9.0 \times 10^{-3}T + 0.010M + 4.9 \times 10^{-4}T^2 \quad .....(40)$$

4.3.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

4.3.2.3.1 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ (ตารางที่ 4.25) พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.25 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	0.40	0.20	76.45*
ความชื้น (M)	2	0.39	0.19	73.89*
TM	4	0.08	2.0×10^{-2}	7.91*
Error	18	4.7×10^{-2}	2.6×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.26 ซึ่งพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 จาก 60 เป็น 100 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kent และคณะ (1984) ที่รายงานว่านมผงที่มีความหนาแน่น 0.591-0.640 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 10-50 องศาเซลเซียส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chowdary (1988) ที่รายงานว่ามะม่วงพันธุ์แรดที่มีความชื้นร้อยละ 80.9 ที่อุณหภูมิ 10-40 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพแพร่ความร้อนสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นของมะม่วงสูงขึ้น เช่นเดียวกับ

ผลการทดลองของ Nesvadba และ Eunson (1984) ที่รายงานว่าปลาค็อดที่มีอุณหภูมิ 10-35 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นสูงขึ้นในช่วงร้อยละ 35 ถึงร้อยละ 90

ตารางที่ 4.26 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-67 °C	80-87 °C	95-100 °C
59-61	1.433 $\pm$ 0.015 ก,a	1.492 $\pm$ 0.020 ก,a	1.576 $\pm$ 0.053 ข,a
69-71	1.502 $\pm$ 0.028 ก,b	1.606 $\pm$ 0.067 ก,b	1.784 $\pm$ 0.067 ข,b
79-81	1.584 $\pm$ 0.025 ก,c	1.750 $\pm$ 0.055 ข,c	2.052 $\pm$ 0.083 ค,c

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการวิเคราะห์ด้วย multiple regression ของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 ในช่วงอุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส พบว่าผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน และสมการแสดงความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.943$) เป็น

$$\alpha \times 10^7 = 3.921 - 0.058T - 0.024M + 4.7 \times 10^{-4}TM + 2.1 \times 10^{-4}T^2 \quad ..(41)$$

ค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการคำนวณ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าสภาพนำความร้อน (สมการ (12)) โดยค่าความหนาแน่นของมะม่วงเท่ากับ 1.046 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ทั้ง 3 ระดับความชื้น เนื่องจากที่ความชื้นทั้ง 3 ระดับนี้มีค่าความหนาแน่นแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อนหาได้โดยใช้สมการ (37) และ (39) ตามลำดับ สำหรับผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.27 ซึ่งพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการคำนวณมีค่าแตกต่างกับค่าจากการทดลองร้อยละ 0.25-13.50 แสดงว่า thermal diffusivity tube ที่ใช้ในงานวิจัยให้ค่าค่อนข้างถูกต้อง

ตารางที่ 4.27 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (12) ในช่วงอุณหภูมิสูง

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 ที่อุณหภูมิ		
	63 °C	83 °C	98 °C
60	1.307	1.447	1.521
70	1.498	1.721	1.849
80	1.684	1.986	2.168

4.3.2.3.2 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -2 องศาเซลเซียส) จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.28 พบว่าอุณหภูมิ ความชื้น และผลร่วมของอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -2 องศาเซลเซียส

SOV	df	SS	MS	F
อุณหภูมิ (T)	2	9.95	4.97	292.28*
ความชื้น (M)	2	3.45	1.72	101.43*
TM	4	0.35	8.8×10^{-2}	5.22*
Error	18	0.30	1.70	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.29) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของมะม่วงที่มีความชื้นร้อยละ 59-81 จาก -30 เป็น -2 องศาเซลเซียส ทำให้สภาพแพร่ความร้อนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nesvadba และ Eunson (1984) ที่พบว่าปลาค็อดที่มีความชื้นร้อยละ 33-90 มีค่าสภาพแพร่ความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -40 เป็น -10 องศาเซลเซียส นอกจากนี้มะม่วงที่อุณหภูมิ -30 ถึง -2 องศาเซลเซียส สภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 59 เป็นร้อยละ 81

ตารางที่ 4.29 ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่อุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 * ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-30 ถึง -13 °C	-18 ถึง -6 °C	-10 ถึง -2 °C
59-61	5.246 ± 0.109 ก,a	4.649 ± 0.120 ข,a	3.904 ± 0.196 ค,a
69-71	5.612 ± 0.110 ก,b	4.765 ± 0.081 ข.a	4.034 ± 0.208 ค,a
79-81	6.033 ± 0.111 ก,c	5.758 ± 0.017 ข,b	4.527 ± 0.119 ค,b

* - ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

- ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิ (-30 ถึง -2 องศาเซลเซียส) และความชื้น (ร้อยละ 59-81) ต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วง โดยใช้ multiple regression พบว่าความชื้น และอุณหภูมิยกกำลังสองมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน และสมการความสัมพันธ์ ($R^2 = 0.932$) เป็น

$$\alpha \times 10^7 = 0.026 - 0.232T + 0.041M - 1.3 \times 10^{-4}TM - 5.3 \times 10^{-3}T^2 \quad ..(42)$$

การคำนวณค่าสภาพแพร่ความร้อนจากสมการ (12) โดยแทนค่าความหนาแน่นของมะม่วง (เฉลี่ยทั้ง 3 ระดับความชื้น) เท่ากับ 0.994 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และค่าความร้อนจำเพาะกับค่าสภาพนำความร้อนซึ่งได้จากการแทนค่าในสมการ (38) และสมการ (40) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.30 ซึ่งพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ได้จากการคำนวณต่างจากค่าสภาพแพร่ความร้อนจากการทดลองเพียงร้อยละ 0.40-18.35 แสดงว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

ตารางที่ 4.30 ค่าสภาพแพร่ความร้อนของมะม่วงที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (12) ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าสภาพแพร่ความร้อน (เมตร^2/วินาที) x 10^7 ที่อุณหภูมิ		
	-30 °C	-18 °C	-10 °C
60	5.246	3.974	3.626
70	5.590	4.353	4.007
80	5.904	4.701	4.357

4.3.3 ค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อนที่ได้จากการคำนวณ

ค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารกับปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารนั้น ดังสมการ (4) และเมื่อคำนวณค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส มะม่วงมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.886 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วง (ความชื้นร้อยละ 79-81 ที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส) ที่ได้จากการทดลองคือ 0.908 $\pm$ 0.009 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ประมาณร้อยละ 2.54 ดังนั้นค่าความร้อนจำเพาะของมะม่วงสามารถคำนวณได้จากองค์ประกอบต่าง ๆ ในมะม่วง

นอกจากนี้ค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณได้เช่นกันจากความสัมพันธ์ดังสมการ (6) แต่เมื่อคำนวณค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.629 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส ซึ่งต่างจากค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอที่มีความชื้นร้อยละ 89-91 อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียสที่ได้จากการทดลองคือ 0.857 $\pm$ 0.010 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน ประมาณร้อยละ 35.76 ที่ค่าสภาพนำความร้อนของมะละกอจากการคำนวณมีค่าต่างจากค่าสภาพนำความร้อนจากการทดลองค่อนข้างมาก อาจเนื่องมาจากสมการคำนวณค่าสภาพนำความร้อน (สมการ (6)) พิจารณาเฉพาะค่าสภาพนำความร้อนขององค์ประกอบบริสุทธิ์ (thermal conductivity of pure components หรือ k_i) แต่ไม่ได้พิจารณาถึงการจัดเรียงตัวทางกายภาพขององค์ประกอบต่าง ๆ ซึ่งอาหารโดยทั่วไปมีโครงสร้างที่แตกต่างกันมาก (Toledo, 1991)

4.3.4 ผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารต่าง ๆ

อาหารต่าง ๆ ส่วนใหญ่มีค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าสภาพแพร่ความร้อนเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิหรือความชื้นสูงขึ้น ยกเว้นค่าสภาพนำความร้อนและค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในช่วงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำสูงขึ้น ดังตัวอย่างผลการวิจัยในหัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 แต่อาหารบางชนิดมีสมบัติทางความร้อนไม่สอดคล้องกับแนวโน้มผลของอุณหภูมิและความชื้นดังกล่าวข้างต้น อาทิเช่น ถั่วลิสงที่มีความชื้นร้อยละ 26 มีค่าความร้อนจำเพาะลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 4.4 เป็น 15.6 องศาเซลเซียส (Suter และคณะ, 1975) และแป้งถั่วเหลืองพร่องไขมันมีค่าสภาพนำความร้อนลดลง เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 ถึงร้อยละ 28 ที่อุณหภูมิ 20-22 องศาเซลเซียส (Wallapapan และ Sweat, 1975)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย