

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบต่าง ๆ ของกล้วยทั้ง 2 ชนิด มีค่าใกล้เคียงกัน และองค์ประกอบหลักที่พบในกล้วย คือ น้ำ ดังนั้นน้ำจึงน่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของกล้วย

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า

องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณ (ร้อยละ)	กล้วยไข่	กล้วยน้ำว้า
ความชื้น	70.1536 ± 0.421	65.4182 ± 0.466
ไขมัน	0.2217 ± 0.014	0.2438 ± 0.011
เส้นใย	0.3886 ± 0.048	0.5296 ± 0.042
โปรตีน	1.4505 ± 0.133	1.2873 ± 0.086
คาร์โบไฮเดรต	27.7497 ± 0.348	32.4366 ± 0.577

4.2 สมบัติทางความร้อนและความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

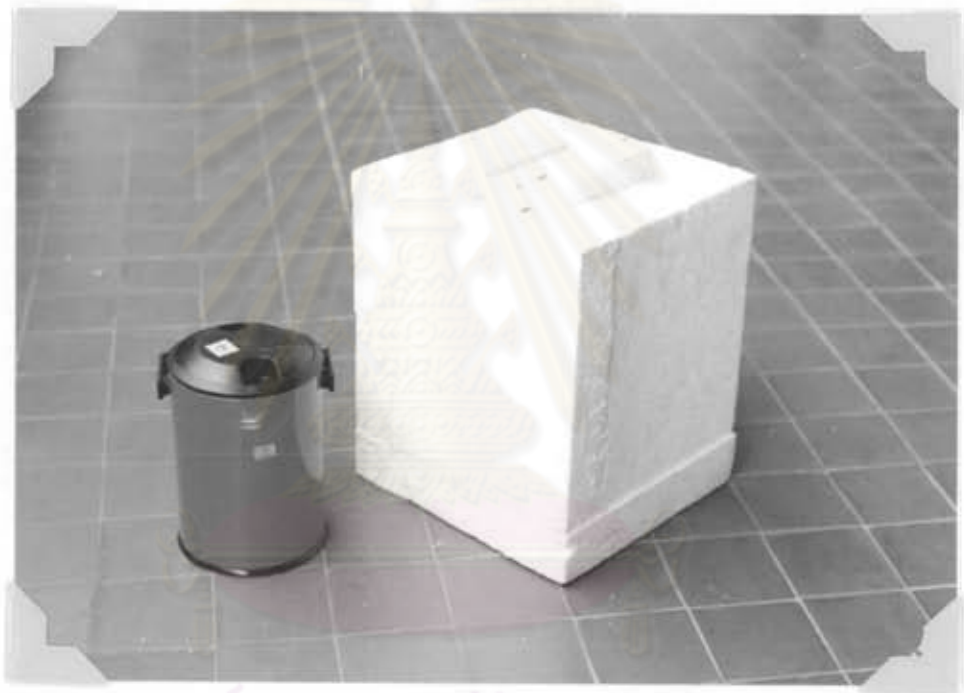
ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับสมบัติทางความร้อนมีหลายอย่างดังที่ได้กล่าวในบทที่ 2 แต่ปัจจัยที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ความชื้นและอุณหภูมิ เนื่องจากปัจจัยทั้งสองอย่างนี้เป็น

ปัจจัยหลักที่พบทั่วไปในกระบวนการผลิตอาหาร ในการวิเคราะห์ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสมบัติทางความร้อน ทำโดยการนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวที่ความชื้น และอุณหภูมิระดับต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกัน เพื่อพิจารณาถึงความแตกต่าง (t-test) (เจริญ จันทลักษณ์, 2527) และวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของอุณหภูมิและความชื้นต่อค่าสมบัติทางความร้อนของกล้วย พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิโดยใช้ multiple regression

4.2.1 ความร้อนจำเพาะ

จากการทดลองใช้แคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้น 2 ตัว (รูปที่ 4.1) วัดค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์โดยใช้น้ำ ซึ่งทราบค่าความร้อนจำเพาะเป็นสารอ้างอิง พบว่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานมีค่าเท่ากับ 48.0329 ± 2.835 และ 39.5115 ± 0.169 แคลอรี / องศาเซลเซียส ตามลำดับ ค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์ที่ได้แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าแคลอรีมิเตอร์ทั้งสองตัวมีการสูญเสียความร้อนไม่เท่ากัน อาจเนื่องมาจากการบรรจุอุณหภูมิของแคลอรีมิเตอร์แต่ละตัวไม่เท่ากัน (ในการทดลองนี้ใช้โฟม) ดังนั้นในการหาค่าความร้อนจำเพาะของตัวอย่าง จะต้องใช้ค่าความจุความร้อนของแคลอรีมิเตอร์เฉพาะตัวในการเป็น correction factor ต่อไป นำแคลอรีมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นมาทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมือ โดยทดสอบด้วยสารอ้างอิงที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะคือกลีเซอริน (ค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.555 แคลอรี / กรัม-องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส) โดยทดลองแต่ละแคลอรีมิเตอร์ 2 ซ้ำ พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของกลีเซอรินจากการทดลองที่อุณหภูมิ 15°C ทั้งสองแคลอรีมิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5731 ± 0.006 แคลอรี / กรัม-องศาเซลเซียส ซึ่งค่าที่หาได้แตกต่างจากค่าทางทฤษฎีเพียงร้อยละ 3.26 เท่านั้น

4.2.1.1 ผลของความชื้น และอุณหภูมิที่มีต่อค่าความร้อนจำเพาะ ในช่วงอุณหภูมิสูง ($60 - 100^{\circ}\text{C}$) ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4.1 แคลอริมิเตอร์ที่ประกอบขึ้นใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยไซ้ในช่วงอุณหภูมิสูงที่ความชื้น และอุณหภูมิ
ต่างๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
50 ± 2	0.6613 ± 0.008 a [*] , ก ^{**}	0.7121 ± 0.005 a, ข	0.7344 ± 0.003 a, ค
60 ± 2	0.6866 ± 0.005 b, ก	0.7306 ± 0.006 b, ข	0.7689 ± 0.004 b, ค
70 ± 2	0.7249 ± 0.002 c, ก	0.7715 ± 0.007 c, ข	0.8382 ± 0.003 c, ค

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงที่ความชื้นและอุณหภูมิ
ต่าง ๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ		
	60 -65 °C	80-85 °C	95-100 °C
45 ± 2	0.5831 ± 0.006 a [*] , ก ^{**}	0.6389 ± 0.002 a, ข	0.6724 ± 0.005 a, ค
55 ± 2	0.6248 ± 0.011 b, ก	0.6841 ± 0.008 b, ข	0.7277 ± 0.004 b, ค
65 ± 2	0.7015 ± 0.004 c, ก	0.7594 ± 0.010 c, ข	0.8154 ± 0.018 c, ค

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

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะ ในช่วงอุณหภูมิสูงของ กล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า (ตารางที่ 4.4 และ 4.5) พบว่าความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่า ความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 °C) อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนผลร่วมระหว่างความชื้นและอุณหภูมินั้นมีผลต่อค่า ความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่เท่านั้น

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ ในช่วง อุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F ค่าขนาด
อุณหภูมิ (T)	2	3.61×10^{-2}	1.81×10^{-2}	623.2212*
ความชื้น (M)	2	2.65×10^{-2}	1.33×10^{-2}	457.9141*
TM	4	1.92×10^{-2}	4.81×10^{-4}	16.6015*
Error	18	5.22×10^{-4}	2.89×10^{-5}	

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้า ในช่วง อุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F ค่าขนาด
อุณหภูมิ (T)	2	4.71×10^{-2}	2.36×10^{-2}	292.0743*
ความชื้น (M)	2	0.0746	0.0373	462.2819*
TM	4	5.75×10^{-4}	1.44×10^{-4}	1.7829
Error	18	1.45×10^{-3}	8.06×10^{-5}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.2 และ 4.3) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50-70 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45-65 สำหรับกล้วยน้ำว้า เนื่องจากน้ำมีค่าความร้อนจำเพาะสูง (1 แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส) ดังนั้นเมื่ออาหารมีความชื้นเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นด้วย (Mohsenin, 1980) และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับปริมาณความชื้นที่แต่ละระดับของอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

ผลการทดลองของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Haswell (1954) ซึ่งทดลองกับข้าวเจ้าในช่วงความชื้นร้อยละ 10 - 17 และสิรินาถ(2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60-85 ซึ่งพบว่าในช่วงอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็งของอาหาร ค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า ข้าวเจ้า และสับปะรดไม่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่านอกจากน้ำซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อค่าความร้อนจำเพาะแล้ว ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลอีกด้วย เช่น น้ำตาล แป้ง (Mohsenin, 1980)

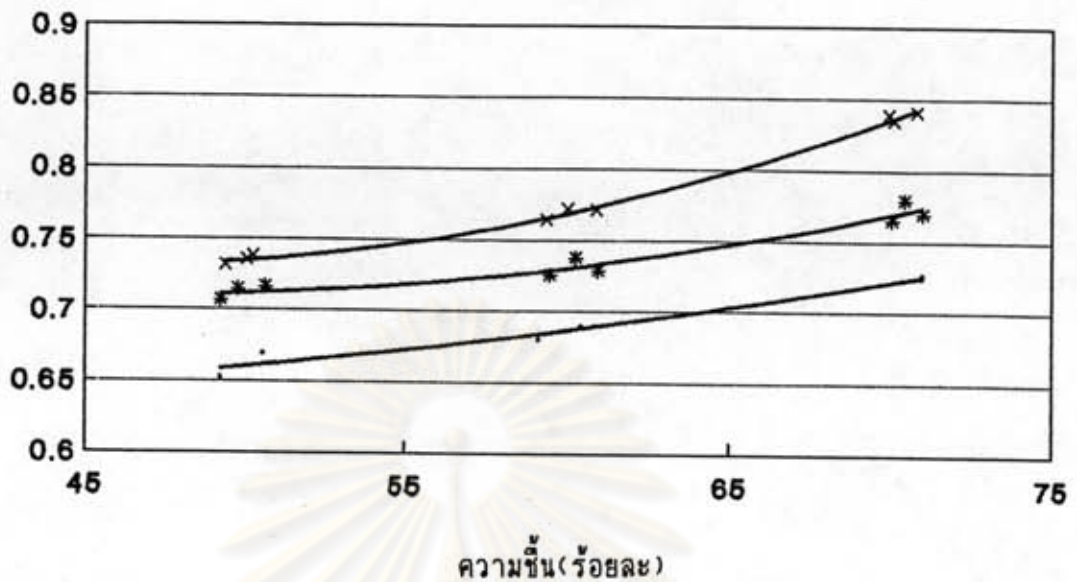
ตารางที่ 4.6 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูงและความชื้นในช่วงร้อยละ 50-70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination (R ²)
60 - 65	$C_p = 0.6555 - 0.0020M + 4.3 \times 10^{-5}M^2$	0.982
80 - 85	$C_p = 0.9196 - 0.0092M + 1.0 \times 10^{-4}M^2$	0.963
90 - 100	$C_p = 1.0589 - 0.0147M + 1.6 \times 10^{-4}M^2$	0.997

* C_p มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส

M คือร้อยละของความชื้น

ค่าความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส)

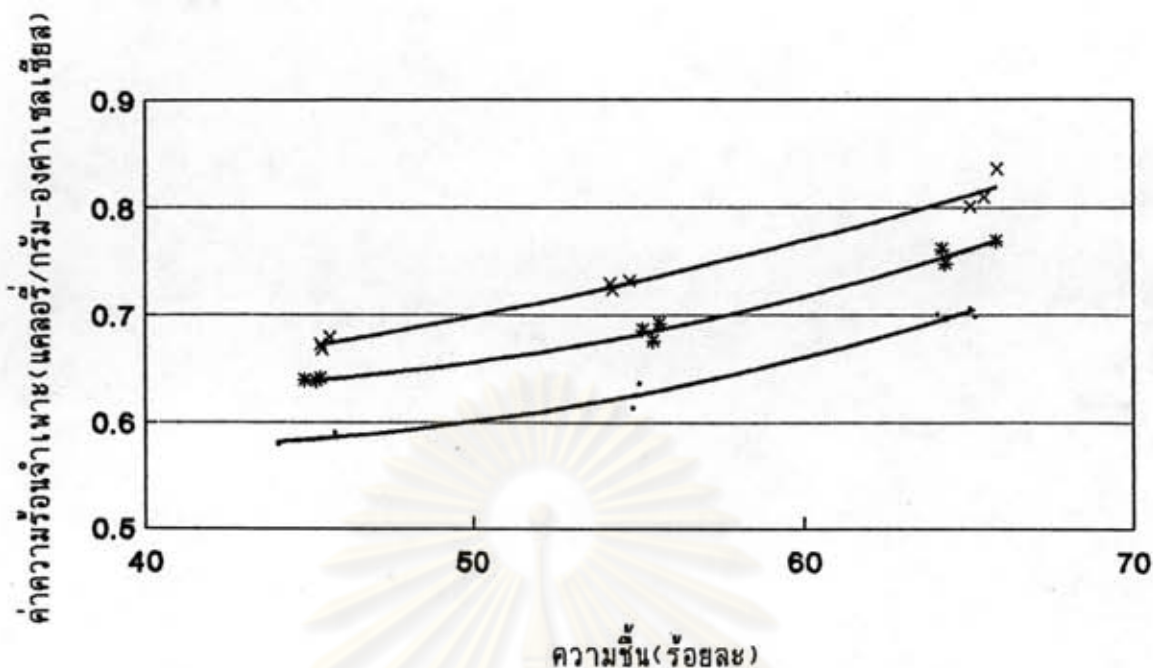


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 °C)
 • อุณหภูมิ 60 - 65 °C x อุณหภูมิ 95 - 100 °C
 * อุณหภูมิ 80 - 85 °C

ตารางที่ 4.7 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงและความชื้นในช่วงร้อยละ 45 - 65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression [*]	coefficient of determination (R ²)
60 - 65	$C_p = 0.8247 - 0.0132M + 1.8 \times 10^{-4}M^2$	0.984
80 - 85	$C_p = 0.8960 - 0.0139M + 1.8 \times 10^{-4}M^2$	0.989
90 - 100	$C_p = 0.6305 - 0.0034M + 9.6 \times 10^{-5}M^2$	0.985

* Cp มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส
 M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 °C)

• อุณหภูมิ 60 - 65 °C

x อุณหภูมิ 95 - 100 °C

* อุณหภูมิ 80 - 85 °C

ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะ พบว่าค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ความชื้นคงที่ แต่ละระดับ (ระดับความชื้นร้อยละ 50₊₂, 60₊₂, 70₊₂ สำหรับกล้วยไข่และร้อยละ 45₊₂, 55₊₂, 65₊₂ สำหรับกล้วยน้ำว้า) ดังตารางที่ 4.2 และ 4.3 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 60 - 100 °C เนื่องจากค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้นสำหรับ กล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

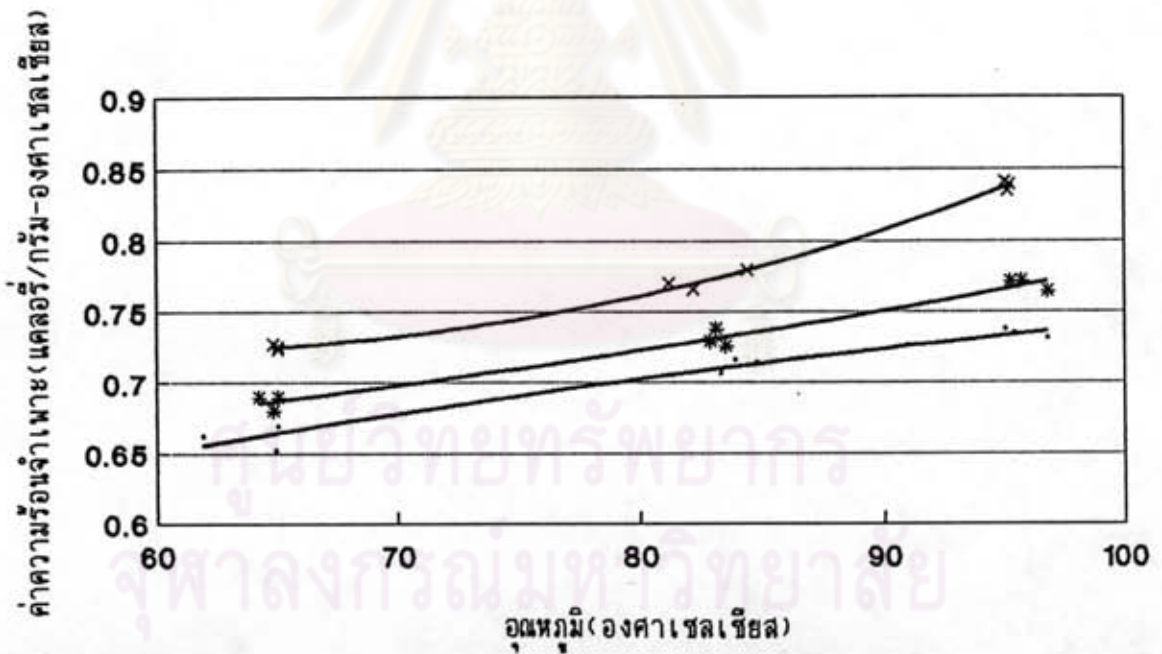
ผลการทดลองของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chowdary (1988) ซึ่งทดลองกับมะม่วงในช่วงอุณหภูมิ 15 - 55 °C และสิรินาด (2533) ซึ่งทดลองกับ สับปะรดในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C ซึ่งพบว่าค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R ²)
50 ± 2	$C_p = 0.4143 + 0.0049T + 1.7 \times 10^{-5}T^2$	0.966
60 ± 2	$C_p = 0.6226 - 0.0001T + 1.7 \times 10^{-5}T^2$	0.976
70 ± 2	$C_p = 1.0365 - 0.0106T + 9.0 \times 10^{-5}T^2$	0.997

* Cp มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C

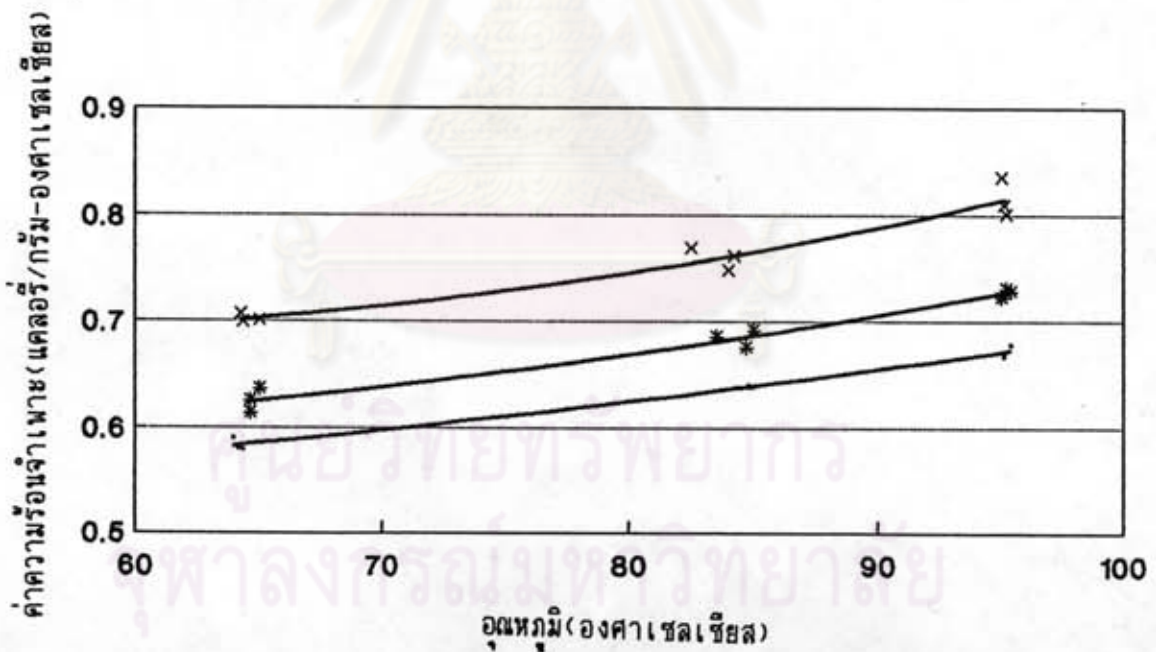
- ความชื้นร้อยละ 50 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 70 ± 2
- * ความชื้นร้อยละ 60 ± 2

ตารางที่ 4.9 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกลีวบน้ำวานและอุณหภูมิ ในช่วง 60 - 100 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R ²)
45 ± 2	$C_p = 0.4995 + 0.0003T + 1.6 \times 10^{-5}T^2$	0.989
55 ± 2	$C_p = 0.6041 - 0.0018T + 3.2 \times 10^{-5}T^2$	0.975
65 ± 2	$C_p = 0.8135 - 0.0054T + 5.7 \times 10^{-5}T^2$	0.948

* Cp มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของกลีวบน้ำวาน ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C

• ความชื้นร้อยละ 45 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 65 ± 2

* ความชื้นร้อยละ 55 ± 2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นและอุณหภูมิพบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น และอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า เป็นดังสมการที่ 4.1 ($R^2 = 0.951$) และ 4.2 ($R^2 = 0.981$) ตามลำดับ

$$C_p = 1.0132 - 0.0098M - 0.0053T + 6.8 \times 10^{-5}TM \\ + 6.7 \times 10^{-5}M^2 + 2.5 \times 10^{-5}T^2 \quad \dots(4.1)$$

$$C_p = 0.7788 - 0.0111M - 0.0028T + 1.6 \times 10^{-4}M^2 \\ + 3.7 \times 10^{-5}T^2 \quad \dots(4.2)$$

จากสมการ (4.1) และ (4.2) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นร้อยละ 50 และอุณหภูมิ 85 °C โดยใช้สมการทั้งสองพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 0.7098 และ 0.6531 แคลอรี / กรัม-องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่มีค่าสูงกว่ากล้วยน้ำว้าอยู่ร้อยละ 8.7 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกล้วยไข่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.722 ± 0.001 และ 0.867 ± 0.002 กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร จึงเป็นเหตุให้กล้วยไข่ต้องใช้ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า

4.2.1.2 ผลของความชื้น และอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 °C) ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิระดับต่างๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ		
	$-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$	$-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$	$-30 \pm 1^{\circ}\text{C}$
50 ± 2	$0.3336 \pm 0.004\text{a}^*$, ก^{**}	0.3376 ± 0.002 a, ก	0.3404 ± 0.002 a, ก
60 ± 2	$0.3621 \pm 0.006\text{b}$, ก	0.3725 ± 0.001 b, ข	0.3805 ± 0.004 b, ค
70 ± 2	$0.5029 \pm 0.006\text{c}$, ก	0.5274 ± 0.008 c, ข	0.5287 ± 0.001 c, ข

ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะ (แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ		
	$-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$	$-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$	$-30 \pm 1^{\circ}\text{C}$
45 ± 2	$0.3179 \pm 0.004\text{a}^*$, ก^{**}	0.3285 ± 0.007 a, ข	0.3377 ± 0.009 a, ค
55 ± 2	$0.3654 \pm 0.002\text{b}$, ก	0.3755 ± 0.003 b, ข	0.3844 ± 0.002 b, ค
65 ± 2	$0.4864 \pm 0.002\text{c}$, ก	0.5008 ± 0.008 c, ข	0.5152 ± 0.004 c, ค

- * ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ** ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ พบว่าความชื้น อุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 °C) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนผลร่วมระหว่างความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่เท่านั้น และพบว่าทั้งกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่า F ของความชื้นมากกว่าของอุณหภูมิมาก แสดงว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยขึ้นอยู่กับความชื้นมากกว่าอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F คำนวณ
อุณหภูมิ (T)	2	1.42×10^{-3}	7.09×10^{-4}	42.1274*
ความชื้น (M)	2	0.1691	8.46×10^{-2}	5018.4910*
TM	4	4.32×10^{-4}	1.08×10^{-4}	6.4033*
Error	18	3.03×10^{-4}	1.68×10^{-5}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F ค่าขาด
อุณหภูมิ (T)	2	2.29×10^{-3}	1.14×10^{-3}	91.8957*
ความชื้น (M)	2	0.1436	7.18×10^{-2}	5767.8130*
TM	4	9.06×10^{-5}	2.26×10^{-5}	1.8191
Error	18	2.24×10^{-4}	1.25×10^{-5}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าความร้อนจำเพาะ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิต่ำของแต่ละระดับ (ตารางที่ 4.10 และ 4.11) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 °C) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50-70 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนจำเพาะในช่วงอุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากน้ำแข็งมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.465 แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ -20 °C ขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.999 แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส (Mohsenin, 1980) และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับปริมาณความชื้นของแต่ละระดับของอุณหภูมิ สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

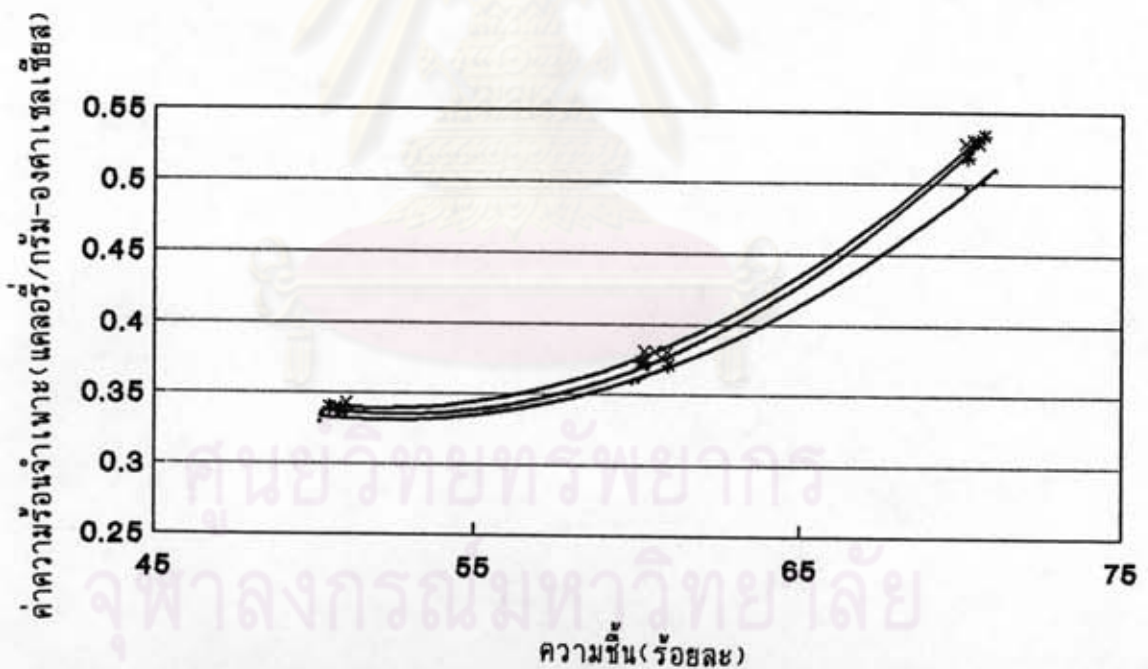
ผลการทดลองของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของสิรินาถ (2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60 - 85 ซึ่งพบว่าค่าความร้อนจำเพาะมีความสัมพันธ์กับความชื้นเช่นเดียวกับในช่วงอุณหภูมิสูง คือค่าความร้อนจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความชื้นที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.14 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกลีวไฮโซในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 50 -70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R^2)
-10 ± 1	$C_p = 1.7404 - 0.0539M + 5.2 \times 10^{-4}M^2$	0.998
-18 ± 1	$C_p = 2.0284 - 0.0643M + 6.1 \times 10^{-4}M^2$	0.998
-30 ± 1	$C_p = 1.8843 - 0.0593M + 5.7 \times 10^{-4}M^2$	0.998

* C_p มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม - องศาเซลเซียส

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะของกลีวไฮโซ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C)

• อุณหภูมิ $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ x อุณหภูมิ $-30 \pm 1^{\circ}\text{C}$

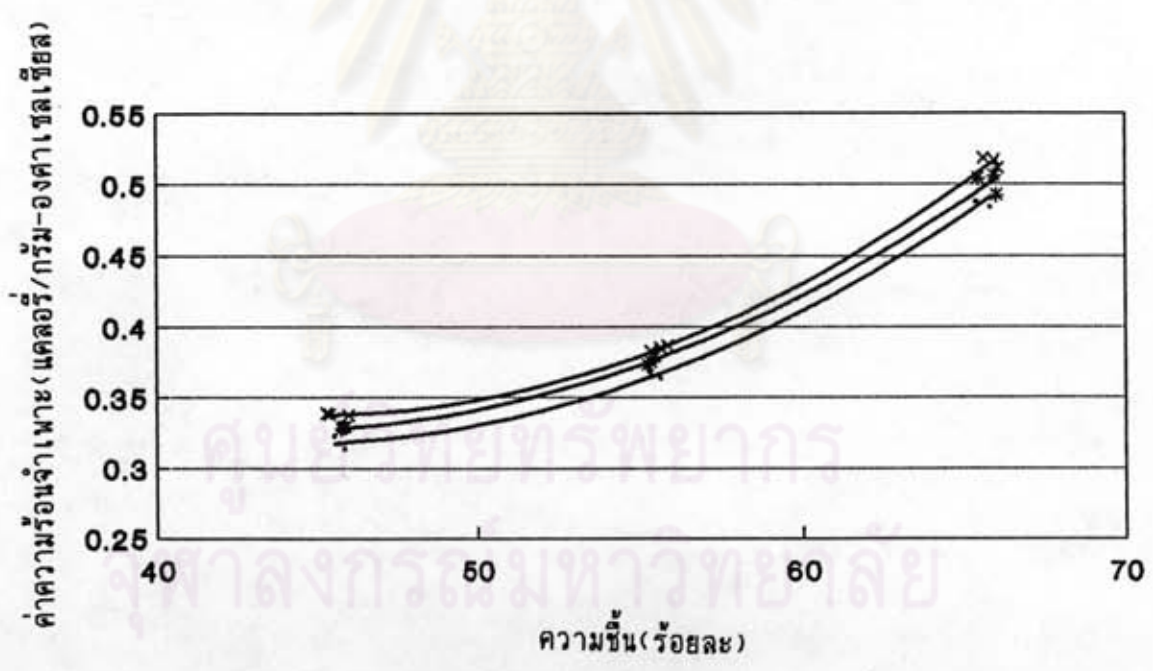
* อุณหภูมิ $-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 4.15 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกลี๋ยงน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 45 - 65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R ²)
-10 ± 1	$C_p = 1.0107 - 0.0317M + 3.6 \times 10^{-4}M^2$	0.997
-18 ± 1	$C_p = 0.9905 - 0.0305M + 3.5 \times 10^{-4}M^2$	0.995
-30 ± 1	$C_p = 1.1400 - 0.0359M + 4.0 \times 10^{-4}M^2$	0.998

* Cp มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม - องศาเซลเซียส

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าความร้อนจำเพาะของกลี๋ยงน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 °C)

- อุณหภูมิ -10 ± 1 °C x อุณหภูมิ -30 ± 1 °C
- * อุณหภูมิ -18 ± 1 °C

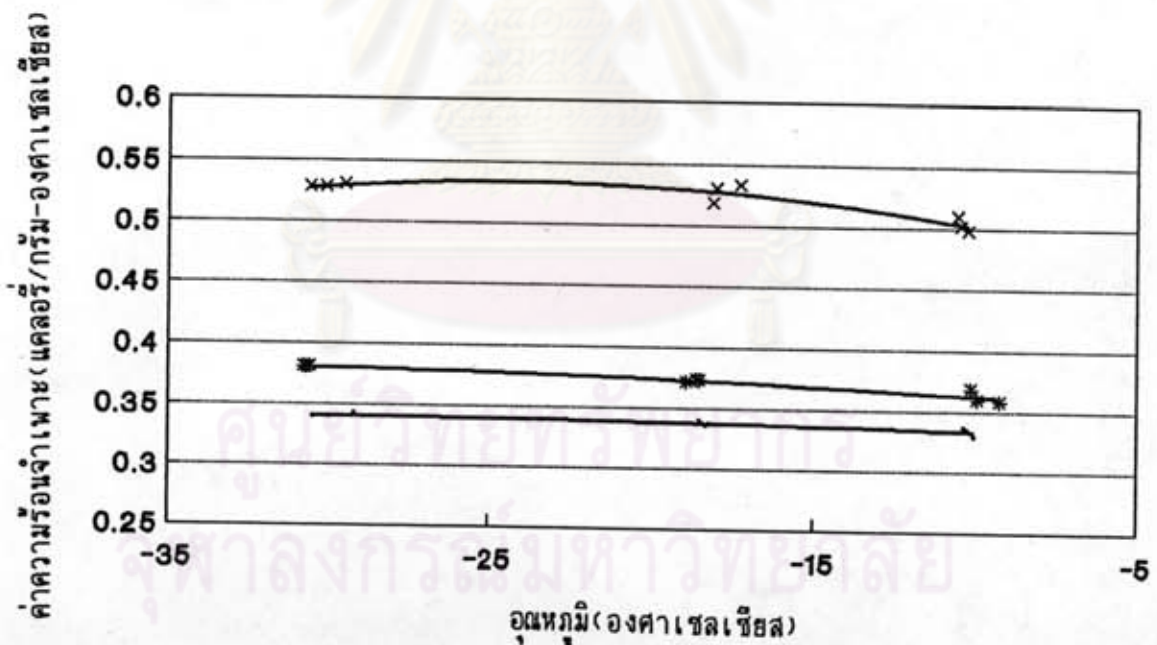
ผลของอุณหภูมิต่อค่าความร้อนจำเพาะ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความร้อนจำเพาะที่ความชื้นคงที่แต่ละระดับ สำหรับกล้วยไข่ดังตารางที่ 4.10 ที่ระดับความชื้นร้อยละ 50 ค่าความร้อนจำเพาะจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ระดับความชื้นร้อยละ 60-70 ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก -10 เป็น -18°C แต่เมื่อลดอุณหภูมิ ลงถึง -30°C ที่ระดับความชื้นร้อยละ 60 ± 2 เท่านั้นที่ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับกล้วยน้ำว่า ระดับความชื้นร้อยละ 45 - 65 ดังตารางที่ 4.11 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อลดอุณหภูมิลงจาก -10 เป็น -30°C ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ปริมาณของตัวถูกละลายที่มีอยู่ในกล้วย เมื่อลดอุณหภูมิลงปริมาณน้ำแข็งจะมีมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีมากขึ้น ระบบไม่อยู่ในสมดุล ดังนั้นน้ำแข็งบางส่วนจะกลายเป็นน้ำเพื่อไปละลายตัวถูกละลายทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิของจุดเยือกแข็งลดต่ำลงจนกระทั่งถึง eutectic point (Zemansky and Dittman, 1987) จากปรากฏการณ์นี้ทำให้ต้องใช้ปริมาณความร้อนมากขึ้น เพื่อทำให้อุณหภูมิของกล้วยสูงขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้นสำหรับกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว่าดังแสดงในตารางที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

จากการหาความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของกล้วย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ พบว่าค่าความร้อนจำเพาะที่อุณหภูมิ -30 ถึง -10°C มีความสัมพันธ์เป็นพาราโบลา สำหรับกล้วยไข่ (ความชื้นร้อยละ 50 - 70) และสำหรับกล้วยน้ำว่า (ความชื้นร้อยละ 45 - 65)

ตารางที่ 4.16 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกลีวโซไลต์และอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10°C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression ^a	coefficient of determination (R^2)
50 ± 2	$C_p = 0.3249 - 0.0010T - 1.6 \times 10^{-6}T^2$	0.655
60 ± 2	$C_p = 0.3449 - 0.0020T - 2.7 \times 10^{-6}T^2$	0.906
70 ± 2	$C_p = 0.4374 - 0.0080T - 1.7 \times 10^{-4}T^2$	0.859

- ^a C_p มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส
 T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของกลีวโซไลต์ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C)

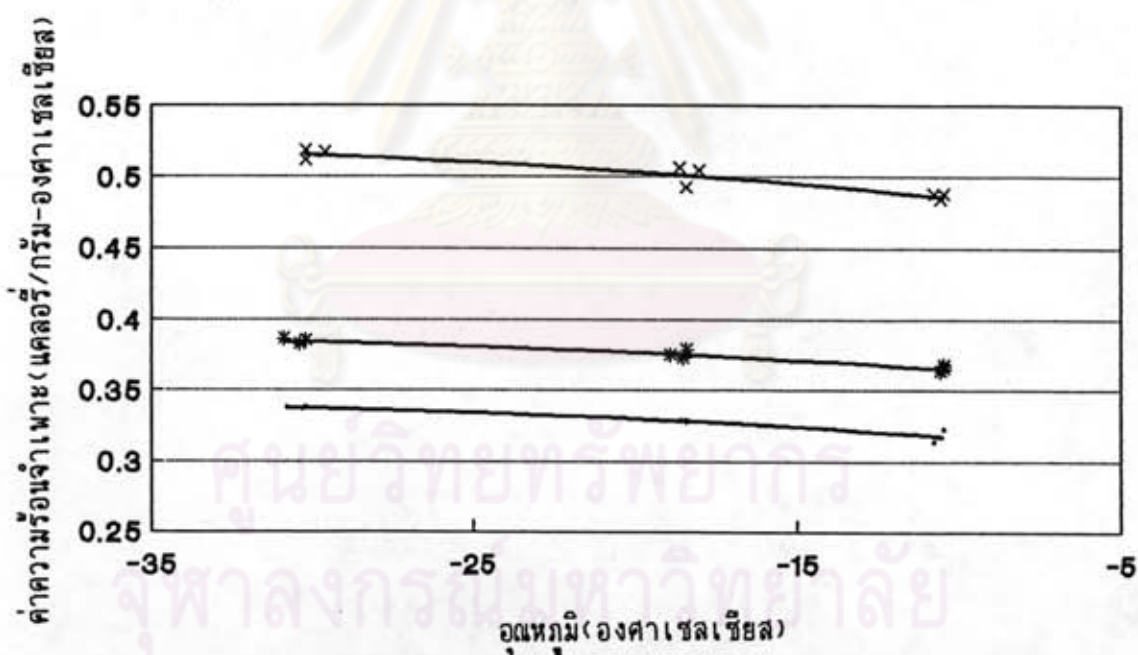
- ความชื้นร้อยละ 50 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 70 ± 2
- * ความชื้นร้อยละ 60 ± 2

ตารางที่ 4.17 สมการ regression ของค่าความร้อนจำเพาะของกลีวบน้ำวุ้นและอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination (R ²)
45 ± 2	$C_p = 0.2981 - 0.0022T - 2.8 \times 10^{-5}T^2$	0.929
55 ± 2	$C_p = 0.3478 - 0.0019T - 2.4 \times 10^{-5}T^2$	0.941
65 ± 2	$C_p = 0.4597 - 0.0029T - 3.4 \times 10^{-5}T^2$	0.890

* Cp มีหน่วยเป็นแคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความร้อนจำเพาะของกลีวบน้ำวุ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10 °C)

- ความชื้นร้อยละ 45±2 x ความชื้นร้อยละ 65±2
- * ความชื้นร้อยละ 55±2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้นและอุณหภูมิพบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าความร้อนจำเพาะกับความชื้น และอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้า เป็นดังสมการที่ 4.3 ($R^2 = 0.996$) และ 4.4 ($R^2 = 0.996$) ตามลำดับ

$$C_p = 1.9304 - 0.0602M + 0.0025T + 5.5 \times 10^{-5}TM + 5.6 \times 10^{-4}M^2 \quad \dots(4.3)$$

$$C_p = 1.0322 - 0.0329M + 0.001T + 3.7 \times 10^{-4}M^2 \quad \dots(4.4)$$

จากสมการที่ (4.3) และ (4.4) พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ที่ความชื้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ -10°C โดยใช้สมการทั้งสองพบว่าค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 0.3942 และ 0.4669 แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะของกล้วยไข่มีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าร้อยละ 18.44 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนจำเพาะนอกจากจะขึ้นปริมาณความชื้นและอุณหภูมิแล้วยังขึ้นกับองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ อีกด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกล้วยไข่มีปริมาณน้ำตาลน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า

4.2.2 ค่าสภาพนำความร้อน

จากการทดลองใช้ Thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้น (รูปที่ 4.10) หาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้โดยเลือกใช้กลีเซอรินเป็นสารอ้างอิง เนื่องจากกลีเซอรินเป็นสารที่มีความหนืดค่อนข้างสูง ทำให้สภาวะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการนำความร้อน พลังงานความร้อนที่ probe ได้รับจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับ 220 โวลต์มาเป็นกระแสตรง 1.5 โวลต์ มีค่า 2.1-2.6 วัตต์/เมตร ซึ่งการใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าเป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนจะให้กระแสไฟที่ค่อนข้างคงที่ นำ probe ที่หาค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ได้แล้วไปใช้หาค่าสภาพนำความร้อนของกล้วย ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะผลการทดลองที่กราฟเป็นเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ มีค่า R^2 ตั้งแต่ 0.985 ขึ้นไป เพื่อให้ข้อมูลระหว่างอุณหภูมิกับ $\ln(t)$ ที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอย่างดี



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.10 Thermal conductivity probe ที่ประกอบขึ้นใช้ในการทดลอง

4.2.2.1 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อน ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 °C) ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูง ที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-65 °C	80-85 °C	95-100 °C
50 ± 2	0.6133 ± 0.014 a*, ก**	0.4530 ± 0.015 a, ข	0.2893 ± 0.012 a, ค
60 ± 2	0.7777 ± 0.053 b, ก	0.5947 ± 0.021 b, ข	0.3730 ± 0.005 b, ค
70 ± 2	0.9513 ± 0.039 c, ก	0.7933 ± 0.023 c, ข	0.6107 ± 0.025 c, ค

ตารางที่ 4.19 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60 -65 °C	80-85 °C	95-100 °C
45 ± 2	0.5840 ± 0.018 a*, ก**	0.5017 ± 0.019 a, ข	0.4103 ± 0.013 a, ค
55 ± 2	0.7633 ± 0.028 b, ก	0.6357 ± 0.017 b, ข	0.4610 ± 0.004 b, ค
65 ± 2	0.9667 ± 0.023 c, ก	0.9413 ± 0.060 c, ก	0.7800 ± 0.021 c, ข

- * ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ** ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง ของ กล้วยไข่และกล้วยน้ำว่า (ตารางที่ 4.20 และ 4.21) พบว่าความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่า สภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 °C) อย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนผลร่วมระหว่างความชื้นและอุณหภูมินั้นมีผลต่อค่า สภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว่าเท่านั้น

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วง อุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F คำนวณ
อุณหภูมิ (T)	2	0.5714	0.2857	393.4262*
ความชื้น (M)	2	0.5079	0.2539	349.6888*
TM	4	5.63×10^{-3}	1.41×10^{-3}	1.9383
Error	18	1.31×10^{-2}	7.26×10^{-4}	

ตารางที่ 4.21 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว่า ในช่วง อุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F คำนวณ
อุณหภูมิ (T)	2	0.2323	0.1166	157.4783*
ความชื้น (M)	2	0.7342	0.3671	497.7535*
TM	4	1.91×10^{-2}	4.78×10^{-3}	6.4851*
Error	18	0.0131	7.38×10^{-4}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำ-ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.18 และ 4.19) พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า ค่าสภาพนำ-ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60 - 65 °C , 80 - 85 °C และ 95 - 100 °C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณความชื้นที่แต่ละระดับของอุณหภูมิ สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

ผลการทดลองของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของสิรินาถ (2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60-85 และงานวิจัยของ Hori (1983) ซึ่งทดลองกับนมพร้อมมันเนยในช่วงความชื้นร้อยละ 60-95

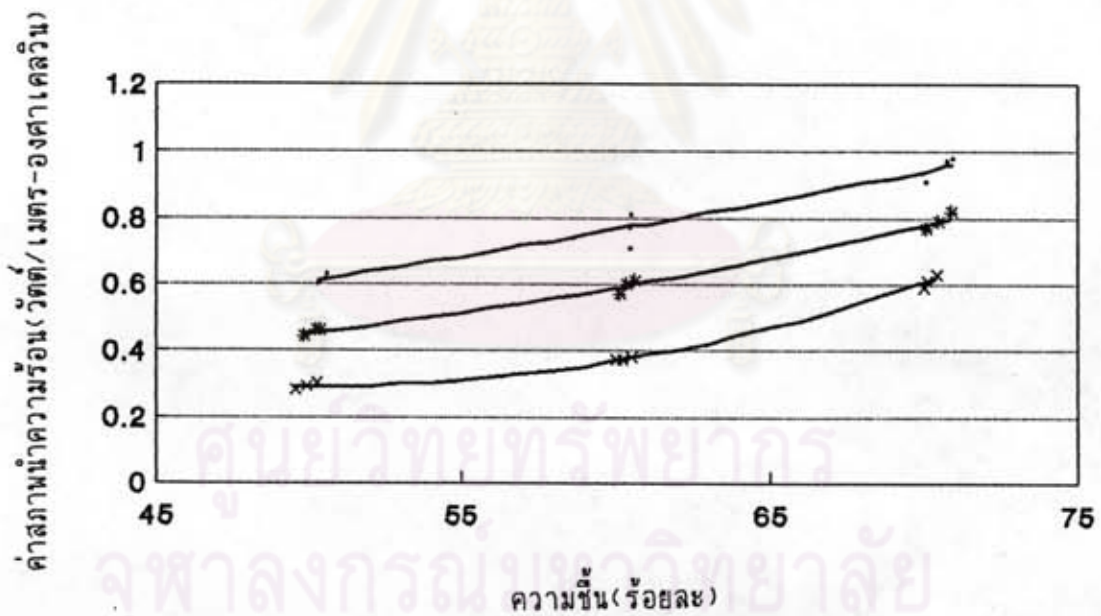
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.22 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูง และความชื้นในช่วงร้อยละ 50-70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R^2)
60 - 65	$k = 0.0630 + 0.007M + 8.0 \times 10^{-5}M^2$	0.957
80 - 85	$k = 0.6570 - 0.019M + 3.0 \times 10^{-4}M^2$	0.993
90 - 100	$k = 2.2610 - 0.079M + 7.9 \times 10^{-4}M^2$	0.994

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิสูง (60-100 °C)

• อุณหภูมิ 60 - 65 °C

x อุณหภูมิ 95 - 100 °C

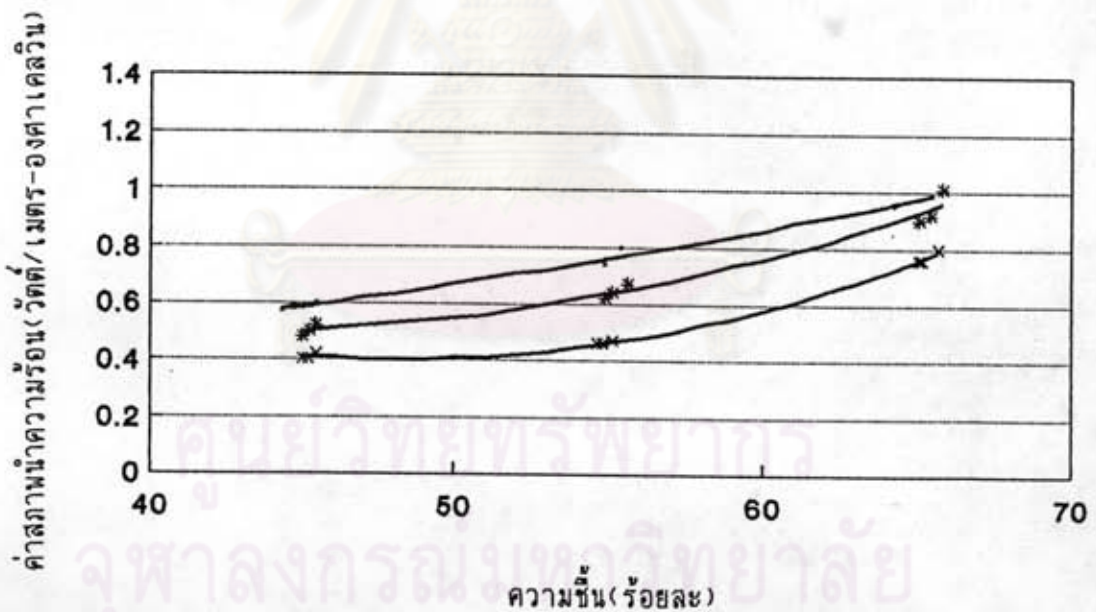
* อุณหภูมิ 80 - 85 °C

ตารางที่ 4.23 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงและความชื้นในช่วงร้อยละ 45-65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R^2)
60 - 65	$k = 0.2710 - 1.6 \times 10^{-3} M + 1.9 \times 10^{-4} M^2$	0.994
80 - 85	$k = 1.7440 - 6.2 \times 10^{-2} M + 7.5 \times 10^{-4} M^2$	0.982
90 - 100	$k = 3.2130 - 1.2 \times 10^{-1} M + 1.2 \times 10^{-3} M^2$	0.998

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 100 °C)

o อุณหภูมิ 60 - 65 °C

x อุณหภูมิ 95 - 100 °C

* อุณหภูมิ 80 - 85 °C

ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน ที่ความชื้นคงที่แต่ละระดับ (ระดับความชื้น 50-70 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45-55 สำหรับกล้วยน้ำว้า) (ตารางที่ 4.18 และ 4.19) พบว่าค่าสภาพนำความร้อนจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 60-100 °C ส่วนที่ระดับความชื้นร้อยละ 65+2 สำหรับกล้วยน้ำว้า นั้น ค่าสภาพนำความร้อนจะมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 80-100 °C เท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างบริเวณแกนกลางของกล้วยมีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อได้รับความร้อนอากาศจะเคลื่อนที่ออกไปเกิดเป็นช่องว่าง ทำให้ความหนาแน่นลดลง จึงเป็นเหตุให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าลดลง และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้นสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ดังแสดงในตารางที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ



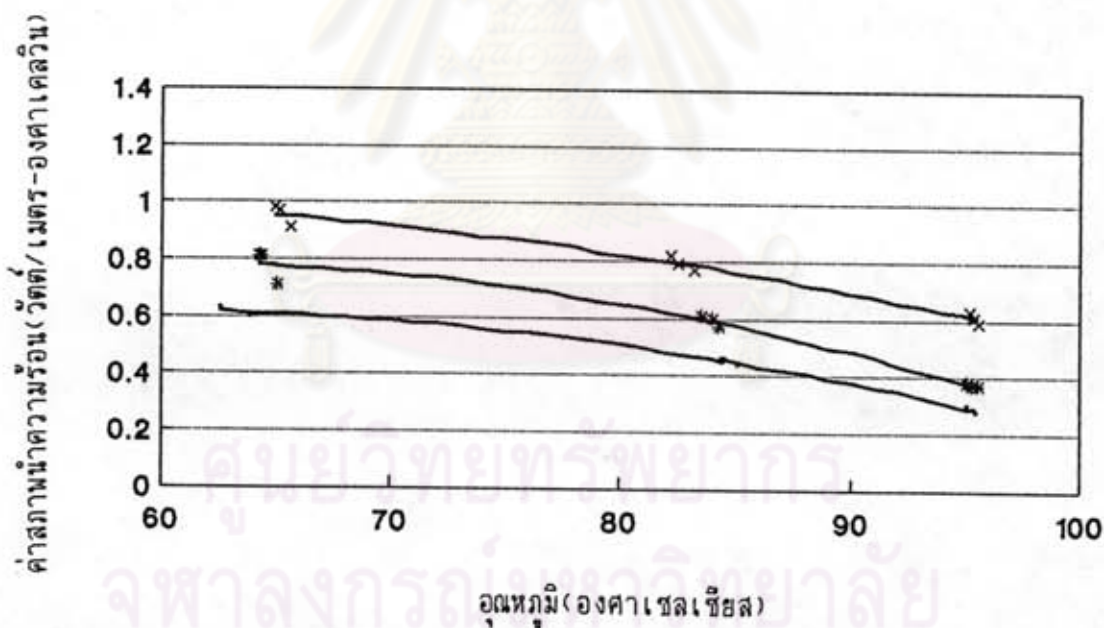
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.24 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination(R ²)
50 ± 2	$k = 0.2270 + 0.029T - 2.5 \times 10^{-4}T^2$	0.996
60 ± 2	$k = -0.3420 + 0.038T - 3.2 \times 10^{-4}T^2$	0.976
70 ± 2	$k = 0.6120 + 0.017T - 1.7 \times 10^{-4}T^2$	0.976

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C

• ความชื้นร้อยละ 50 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 70 ± 2

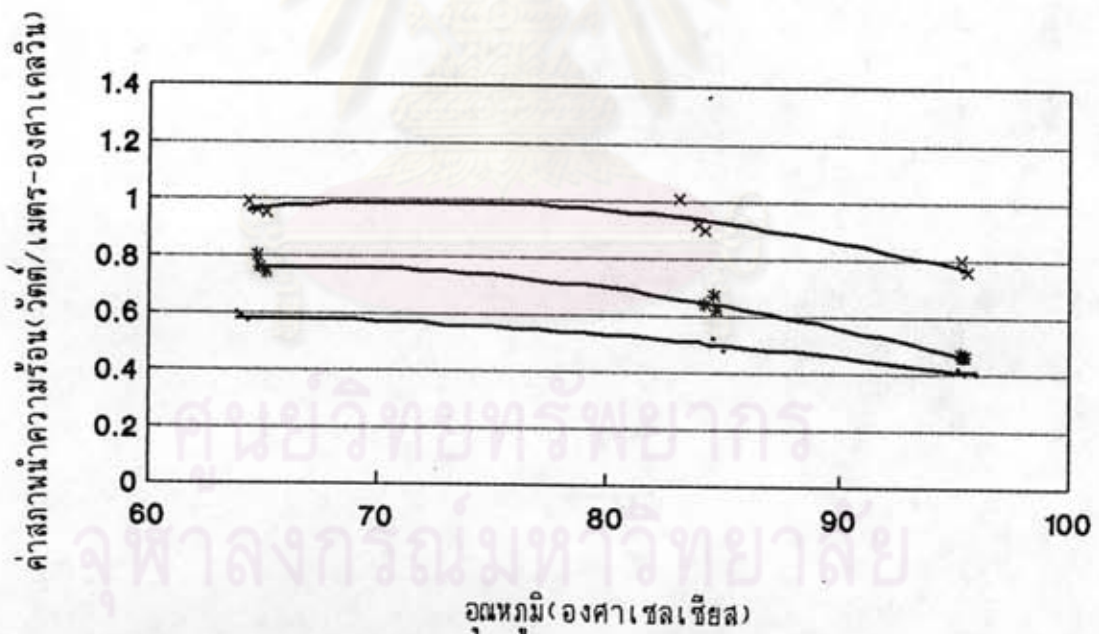
* ความชื้นร้อยละ 60 ± 2

ตารางที่ 4.25 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกลี๋ยงน้ำว่าและอุณหภูมิในช่วง 60 - 100 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (R^2)
45 ± 2	$k = 0.0700 + 0.017T - 1.4 \times 10^{-4}T^2$	0.969
55 ± 2	$k = -0.7890 + 0.047T - 3.6 \times 10^{-4}T^2$	0.977
65 ± 2	$k = -1.2820 - 0.063T - 4.3 \times 10^{-4}T^2$	0.902

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลเซียส

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพนำความร้อนของกลี๋ยงน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิ 60 - 100 °C

• ความชื้นร้อยละ 45 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 65 ± 2

* ความชื้นร้อยละ 55 ± 2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิพบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า เป็นดังสมการ 4.5 ($R^2 = 0.986$) และ 4.6 ($R^2 = 0.980$) ตามลำดับ

$$k = 0.3880 - 0.0290M + 0.0280T + 3.8 \times 10^{-4}M^2 - 2 \times 10^{-4}T^2 \dots (4.5)$$

$$k = 0.5690 - 0.0600M + 0.0380T - 5.4 \times 10^{-5}TM + 7.2 \times 10^{-4}M^2 - 2 \times 10^{-4}T^2 \dots (4.6)$$

จากสมการ (4.5) และ (4.6) พบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงมีทิศทางเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ 65°C โดยใช้สมการทั้งสองพบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 1.0835 และ 1.1079 วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน โดยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่มีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าอยู่ร้อยละ 2.25 ซึ่งอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกล้วยไข่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า

4.2.2.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพนำความร้อน ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C) ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิระดับต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.26 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-10 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-30 ± 1 °C
50 ± 2	0.4837 ± 0.022 a*, ก**	0.7046 ± 0.012 a, ข	0.8410 ± 0.029 a, ค
60 ± 2	0.6857 ± 0.014 b, ก	0.9013 ± 0.030 b, ข	1.0187 ± 0.021 b, ค
70 ± 2	1.0660 ± 0.053 c, ก	1.5323 ± 0.033 c, ข	1.9327 ± 0.121 c, ค

ตารางที่ 4.27 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ความชื้นและอุณหภูมิต่างๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน (วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน) ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	-10 ± 1 °C	-18 ± 1 °C	-30 ± 1 °C
45 ± 2	0.5117 ± 0.022 a*, ก**	0.5747 ± 0.010 a, ข	0.7917 ± 0.015 a, ค
55 ± 2	0.7290 ± 0.036 b, ก	0.8007 ± 0.027 b, ข	1.0073 ± 0.056 b, ค
65 ± 2	1.1290 ± 0.073 c, ก	1.5457 ± 0.020 c, ข	2.2290 ± 0.136 c, ค

- * ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ** ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า (ตารางที่ 4.28 และ 4.29) ตามลำดับพบว่า ความขึ้น อุณหภูมิและผลร่วมระหว่างความขึ้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และพบว่าทั้งกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่า F ของความขึ้นมากกว่าของอุณหภูมิมาก แสดงว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยขึ้นน้อยกว่าความขึ้นมากกว่าอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.28 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F ค่าตาม
อุณหภูมิ (T)	2	1.2225	0.6112	257.2828*
ความขึ้น (M)	2	3.4325	1.7162	722.4094*
TM	4	0.2727	6.82×10^{-2}	28.6932*
Error	18	4.28×10^{-2}	2.38×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F _{ค่าขาด}
อุณหภูมิ (T)	2	1.4265	0.7132	213.2780*
ความชื้น (M)	2	5.0634	2.5317	757.0309*
TM	4	0.6788	0.1697	50.7466*
Error	18	6.02×10^{-2}	3.34×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าสภาพนำความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อนที่อุณหภูมิคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.26 และ 4.27) พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า ค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิ $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$, $-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และ $-30 \pm 1^{\circ}\text{C}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างน้อยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งมีค่าสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นกล้วยที่มีปริมาณความชื้นสูงชันจะมีปริมาณผลึกน้ำแข็งมากขึ้นจึงทำให้ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับปริมาณความชื้นที่แต่ละระดับของอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.30 และ 4.31 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

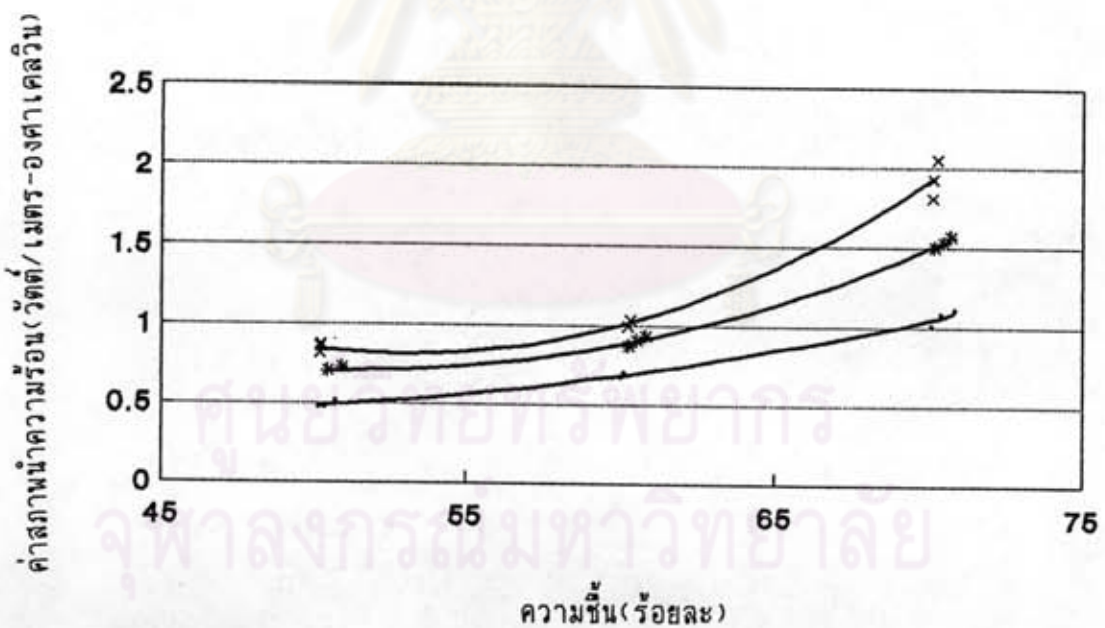
ผลการทดลองของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของสิรินาด (2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60 - 85 ที่อุณหภูมิ $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิ $-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$ แต่ค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ กล้วยน้ำว้า และสับปะรดที่ระดับความชื้นเดียวกันมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากค่าสภาพนำความร้อนนอกจากจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างของเนื้อเยื่ออีกด้วย

ตารางที่ 4.30 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของแก้วโซ่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 50-70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
-10 ± 1	$k = 1.8810 - 0.0680M + 8.1 \times 10^{-4}M^2$	0.993
-18 ± 1	$k = 6.5100 - 0.2270M + 2.2 \times 10^{-3}M^2$	0.998
-30 ± 1	$k = 11.474 - 0.4030M + 3.8 \times 10^{-3}M^2$	0.987

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพนำความร้อนของแก้วโซ่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C)

• อุณหภูมิ $-10 \pm 1^\circ\text{C}$

x อุณหภูมิ $-30 \pm 1^\circ\text{C}$

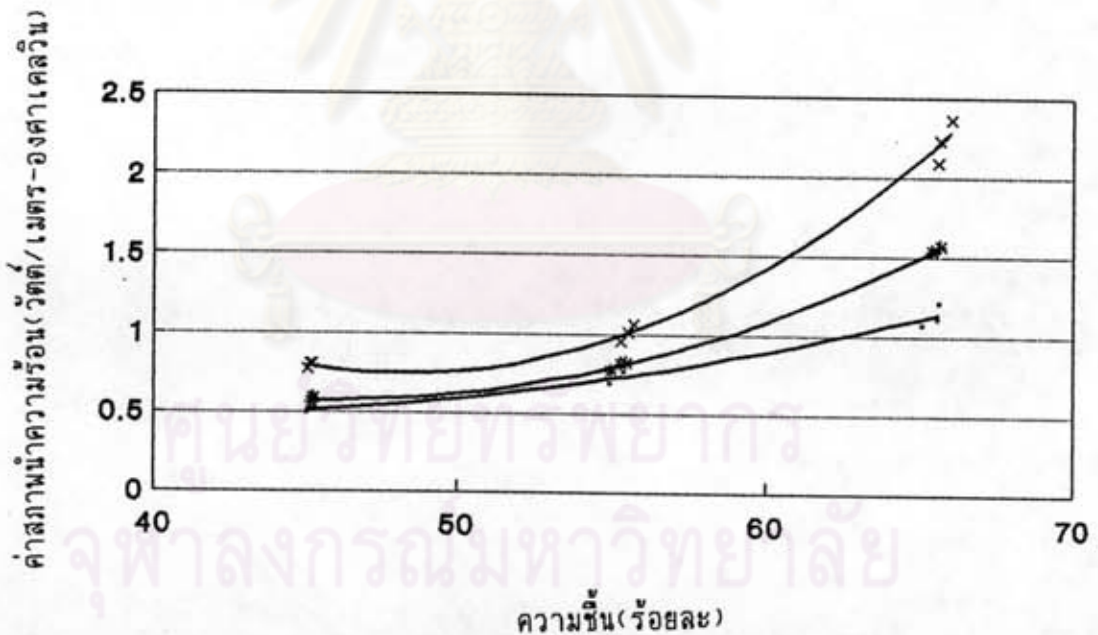
* อุณหภูมิ $-18 \pm 1^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.31 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 45-65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
-10 ± 1	$k = 1.7930 - 0.0690M + 9.0 \times 10^{-4}M^2$	0.983
-18 ± 1	$k = 5.8490 - 0.2300M + 2.5 \times 10^{-3}M^2$	0.999
-30 ± 1	$k = 12.091 - 0.4710M + 4.9 \times 10^{-3}M^2$	0.993

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30 ถึง -10°C)

• อุณหภูมิ $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$

x อุณหภูมิ $-30 \pm 1^{\circ}\text{C}$

* อุณหภูมิ $-18 \pm 1^{\circ}\text{C}$

ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพนำความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพนำความร้อน ที่ความชื้นคงที่แต่ละระดับ (ระดับความชื้นร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า) (ตารางที่ 4.26 และ 4.27) พบว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่ออุณหภูมิลดลงในช่วง -10 ถึง -30 °C เนื่องจากในช่วงของการแช่แข็งจะเกี่ยวข้องกับสัดส่วนของน้ำที่เป็นน้ำแข็งซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งสูงกว่าน้ำถึง 4 เท่า ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในช่วงต้นของการแช่แข็งน้ำบางส่วนยังไม่เป็นน้ำแข็งจึงมีค่าสภาพนำความร้อนต่ำกว่าช่วงหลังจากที่น้ำเป็นน้ำแข็งหมดแล้ว นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับผลึกของตัวถูกละลายที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ ซึ่งดูได้จากค่าสภาพนำความร้อนของน้ำตาลจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง (Mohsenin, 1980) และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้น สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ

ผลการทดลองของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sweat และคณะ (1973) ซึ่งได้ทดลองกับเนื้อไก่ในช่วงอุณหภูมิ -75 ถึง -10 °C

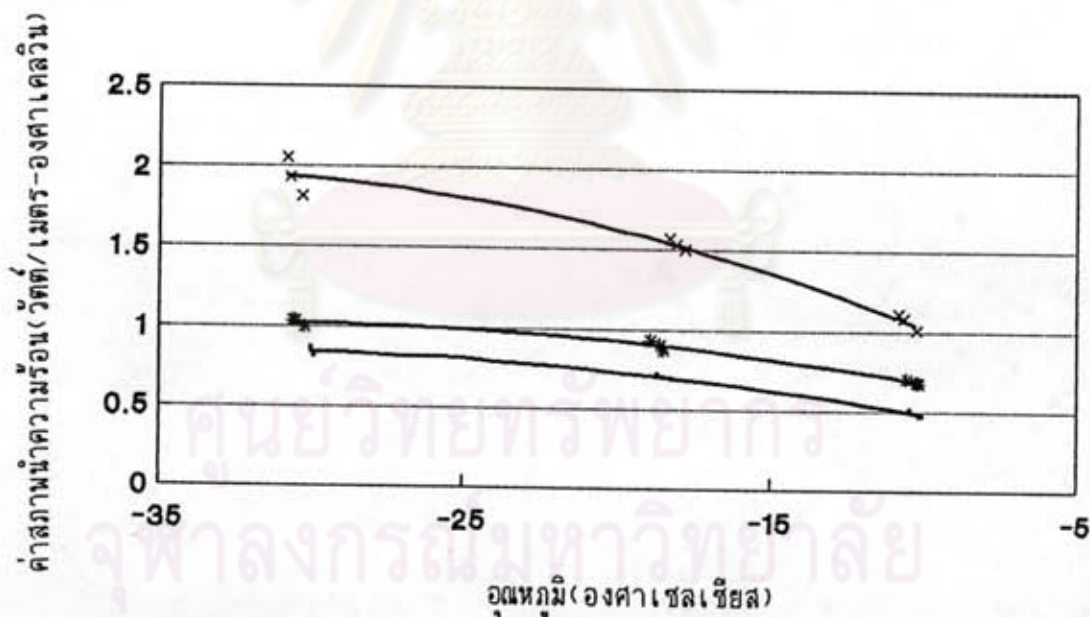
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.32 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
50 ± 2	$k = 0.0650 - 0.0480T - 1.0 \times 10^{-3}T^2$	0.988
60 ± 2	$k = 0.2620 - 0.0490T - 1.0 \times 10^{-3}T^2$	0.987
70 ± 2	$k = 0.1150 - 0.1050T - 2.0 \times 10^{-3}T^2$	0.974

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 °C

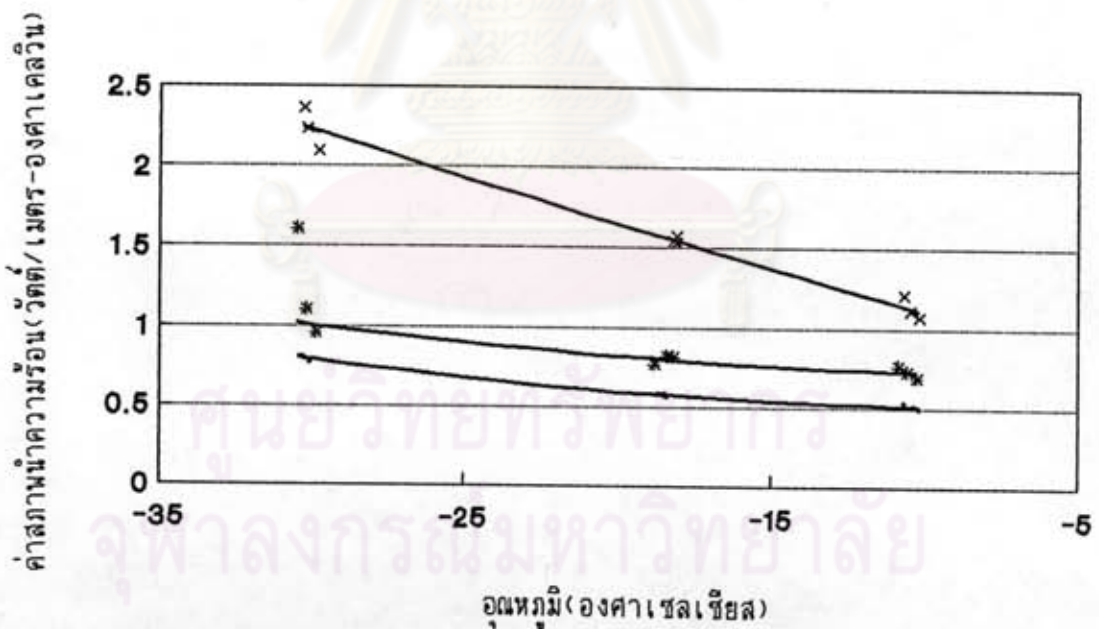
- ความชื้นร้อยละ 50 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 70 ± 2
- * ความชื้นร้อยละ 60 ± 2

ตารางที่ 4.33 สมการ regression ของค่าสภาพนำความร้อนของกลี๋ยน้ำว่าและอุณหภูมิในช่วง -30 ถึง -10 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (R^2)
45 ± 2	$k = 0.5310 + 0.0070T + 5.3 \times 10^{-4}T^2$	0.989
55 ± 2	$k = 0.7210 + 0.0040T + 4.5 \times 10^{-4}T^2$	0.934
65 ± 2	$k = 0.5960 - 0.0490T + 1.7 \times 10^{-4}T^2$	0.980

* k มีหน่วยเป็นวัตต์/เมตร-องศาเซลวิน

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพนำความร้อนของกลี๋ยน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง -10 °C

• ความชื้นร้อยละ 45 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 65 ± 2

* ความชื้นร้อยละ 55 ± 2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิพบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพนำความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า เป็นดังสมการ 4.7 ($R^2 = 0.976$) และ 4.8 ($R^2 = 0.972$) ตามลำดับ

$$k = 7.4790 - 0.2620M + 0.0190T - 1.3 \times 10^{-3}TM + 2.3 \times 10^{-3}M^2 - 9.0 \times 10^{-4}T^2 \quad \dots(4.7)$$

$$k = 8.5020 - 0.3040M + 0.0930T - 1.9 \times 10^{-3}TM + 2.8 \times 10^{-3}M^2 + 3.0 \times 10^{-4}T^2 \quad \dots(4.8)$$

จากสมการ (4.7) และ (4.8) พบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำมีทิศทางการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ -10°C โดยใช้สมการทั้งสองพบว่าค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 0.7315 และ 0.9070 วัตต์/เมตร-องศาเซลวิน ตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพนำความร้อนของกล้วยไข่มีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าอยู่ร้อยละ 23.99 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกล้วยไข่มีความหนาแน่นน้อยกว่ากล้วยน้ำว้าเช่นเดียวกับในช่วงอุณหภูมิสูง

4.2.3 ค่าสภาพแพร่ความร้อน

จากการทดลองใช้ thermal diffusivity tube ที่ประกอบขึ้น (รูปที่ 4.19) และใช้น้ำมันปาล์มผ่านกรรมวิธี (น้ำมันพืชมรกต) เป็นสารให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้มีจุดเดือดสูงประมาณ 200°C และไม่เกิดควันในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ ($60 - 101^\circ\text{C}$) สำหรับการทดลองในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำใช้ propylene glycol เป็นสารถ่ายโอนความร้อน เนื่องจาก propylene glycol เป็นสารที่มีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (-30.1 ถึง 0°C) จึงมีสถานะเป็นของเหลวในระหว่างการทดลอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 รูปที่ 4.19 Thermal diffusivity tube ที่ประกอบขึ้นใช้ในการทดลอง

4.2.3.1 ผลของความชื้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 101 °C) ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลแสดงในตารางที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.34 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิสูงที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อน [$(\text{เมตร}^2/\text{วินาที}) \times 10^7$] ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-70 °C	80-90 °C	95-101 °C
50 ± 2	2.2626±0.026 a*, ก**	1.5507 ± 0.043 a, ข	0.9617 ± 0.033 a, ค
60 ± 2	2.7597±0.200 b, ก	1.9866 ± 0.071 b, ข	1.1840 ± 0.017 b, ค
70 ± 2	3.2008±0.138 c, ก	2.5091 ± 0.086 c, ข	1.7763 ± 0.077 c, ค

ตารางที่ 4.35 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิสูงที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อน [$(\text{เมตร}^2/\text{วินาที}) \times 10^7$] ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	60-70 °C	80-90 °C	95-101 °C
45 ± 2	2.4430±0.073 a*, ก**	1.9143 ± 0.069 a, ข	1.4881 ± 0.049 a, ค
55 ± 2	2.9801±0.083 b, ก	2.2977 ± 0.125 b, ข	1.5457 ± 0.025 a, ค
65 ± 2	3.3604±0.059 c, ก	3.0190 ± 0.154 c, ข	2.3069 ± 0.096 b, ค

- * ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึงค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ** ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 101 °C) (ตารางที่ 4.36 และ 4.37) พบว่าความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนผลร่วมระหว่างความชื้นและอุณหภูมินั้นไม่มีผลต่อค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าเท่านั้น

ตารางที่ 4.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F _{คำนวณ}
อุณหภูมิ (T)	2	9.2503	4.6252	511.0115*
ความชื้น (M)	2	3.7022	1.8511	204.5176*
TM	4	6.5×10^{-2}	1.6×10^{-2}	1.8005
Error	18	0.1629	9.1×10^{-3}	

ตารางที่ 4.37 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูง

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F _{คำนวณ}
อุณหภูมิ (T)	2	5.9500	2.9700	370.9344*
ความชื้น (M)	2	4.1700	2.0800	259.8995*
TM	4	0.2498	6.2×10^{-2}	7.7915*
Error	18	0.1443	8.0×10^{-3}	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพ-
 แพร่ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.34 และ 4.35) พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น
 ในช่วงร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า ค่าสภาพ-
 แพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 60 - 70 °C และ 80 - 90 °C มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทาง
 สถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่ในช่วงอุณหภูมิ 95 - 101 °C สำหรับกล้วยไข่ที่ทุกระดับ
 ความชื้นและกล้วยน้ำว้าช่วงความชื้นร้อยละ 55 - 65 เท่านั้น ที่การเพิ่มความชื้นทำให้ค่าสภาพ
 แพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากน้ำมี
 ค่าสภาพแพร่ความร้อน 1.43×10^{-7} เมตร²/วินาที ที่อุณหภูมิ 20 °C (Mohsenin, 1980)
 ดังนั้นเมื่อกล้วยมีความชื้นสูงขึ้นจะทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าสูงขึ้นด้วย และเมื่อวิเคราะห์
 ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับปริมาณความชื้นที่แต่ละ
 ช่วงของอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.38 และ 4.39
 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

ผลการทดลองของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wratten
 และคณะ (1969) ซึ่งทดลองกับข้าวเปลือกในช่วงความชื้นร้อยละ 9.9 - 19.3 และสิรินาด
 (2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60 - 85 ซึ่งพบว่าในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า
 จุดเยือกแข็งของน้ำ ค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น

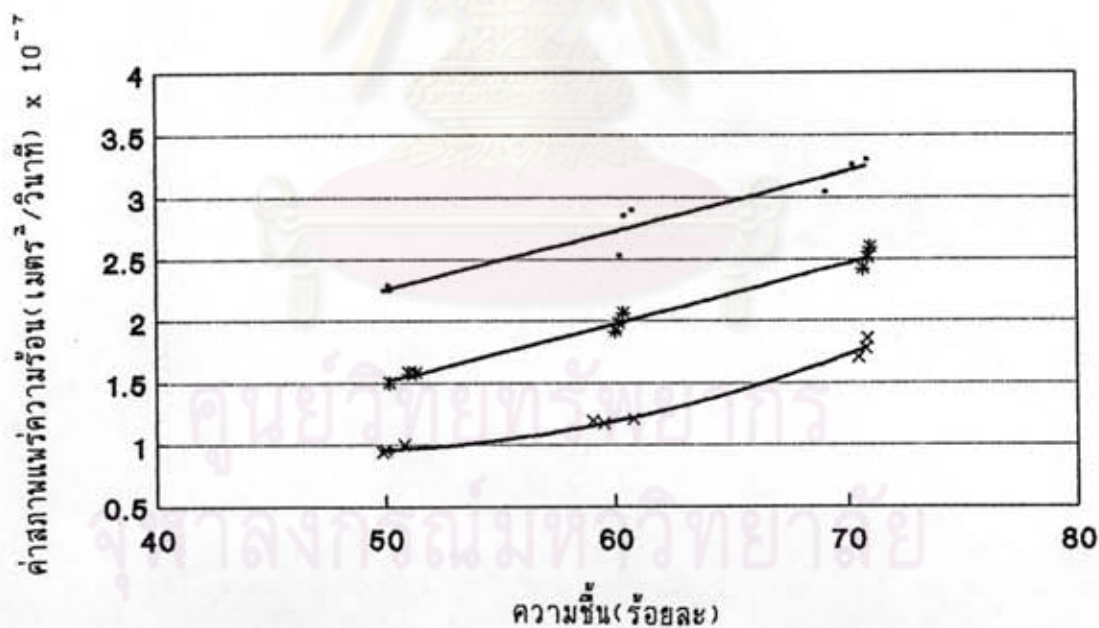
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.38 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูง และความชื้นในช่วงร้อยละ 50 - 70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
60 - 70	$\alpha \times 10^7 = 0.1398 + 0.0388M + 7.1 \times 10^{-5} M^2$	0.937
80 - 90	$\alpha \times 10^7 = -0.4333 + 0.0326M + 1.3 \times 10^{-4} M^2$	0.985
95 - 101	$\alpha \times 10^7 = 4.3368 - 0.1432M + 1.5 \times 10^{-3} M^2$	0.989

* α มีหน่วยเป็นเมตร²/วินาที

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 101 °C)

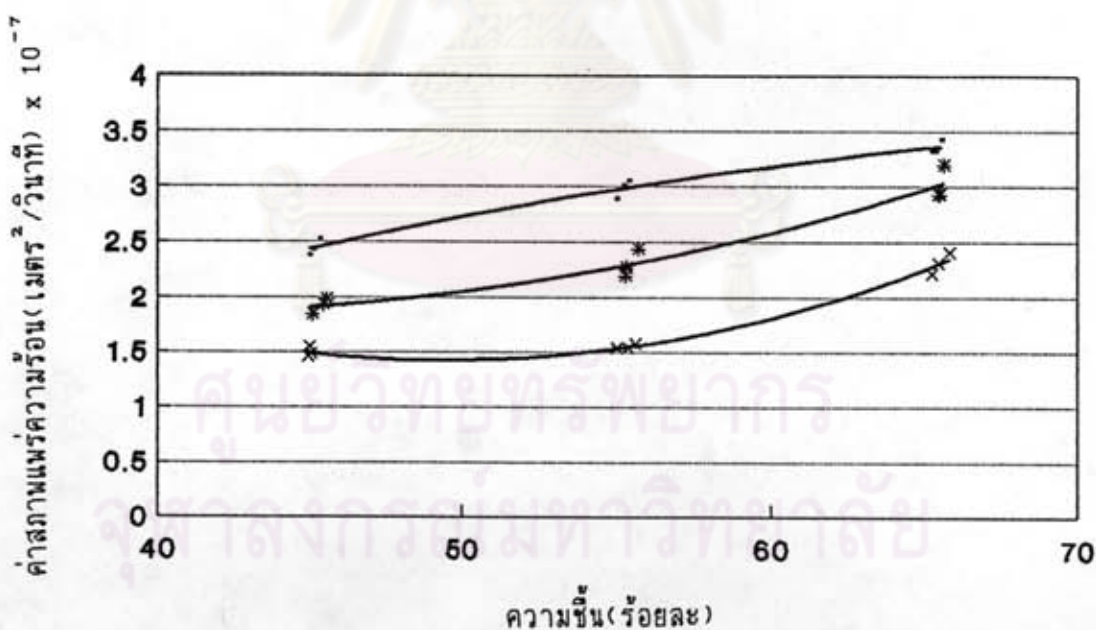
- อุณหภูมิ 60 - 70 °C x อุณหภูมิ 95 - 101 °C
- * อุณหภูมิ 80 - 90 °C

ตารางที่ 4.39 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูงและความชื้นในช่วงร้อยละ 45 - 65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
60 - 70	$\alpha \times 10^7 = -1.9128 + 0.1317M - 7.8 \times 10^{-4} M^2$	0.981
80 - 90	$\alpha \times 10^7 = 4.4069 - 0.1312M + 1.8 \times 10^{-3} M^2$	0.962
95 - 101	$\alpha \times 10^7 = 9.7911 - 0.3389M + 3.4 \times 10^{-5} M^2$	0.989

* α มีหน่วยเป็นเมตร²/วินาที

M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิสูง (60 - 101 °C)

- อุณหภูมิ 60 - 70 °C x อุณหภูมิ 95 - 101 °C
- * อุณหภูมิ 80 - 90 °C

ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.34 และ 4.35) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วง $60 - 101^{\circ}\text{C}$ ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อน (ที่ระดับความชื้นร้อยละ 50 ± 2 , 60 ± 2 และ 70 ± 2 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45 ± 2 , 55 ± 2 และ 65 ± 2 สำหรับกล้วยน้ำว้า) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้อาจเนื่องจากค่าสภาพแพร่ความร้อนขึ้นกับค่าสภาพนำความร้อน ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่น ตามสมการ(2.4) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าลดลงและความหนาแน่นมีค่าคงที่ จึงทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้นสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.40 และ 4.41 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23 ตามลำดับ

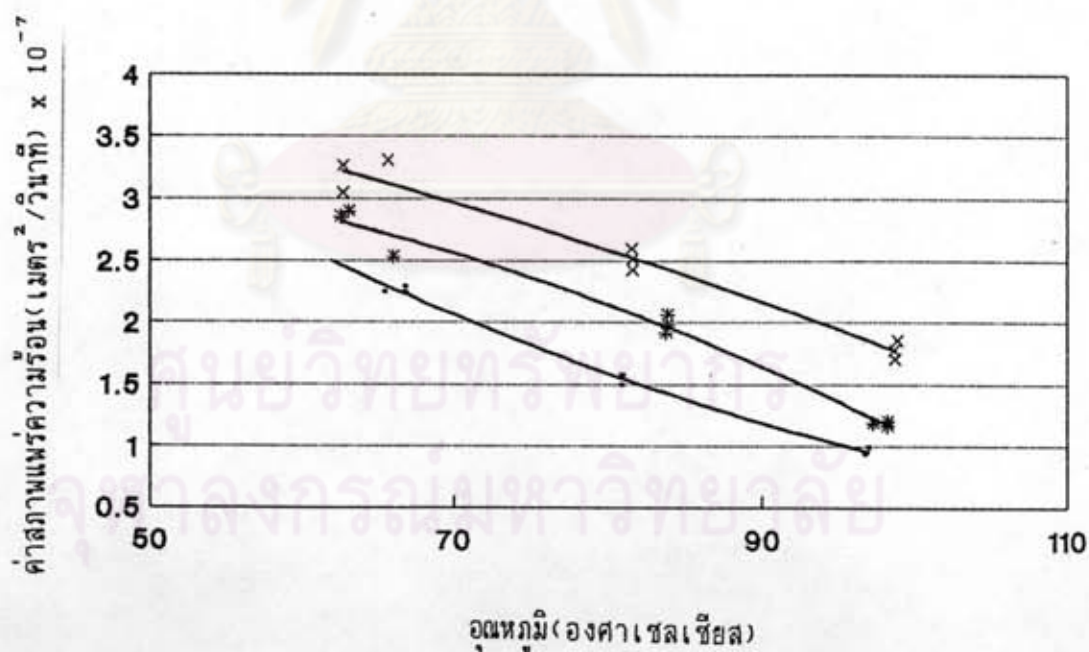


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.40 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และอุณหภูมิในช่วง 60 - 101 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination (R ²)
50 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 7.4163 - 0.1018T + 3.6 \times 10^{-4}T^2$	0.995
60 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 3.0316 + 0.0239T - 4.4 \times 10^{-4}T^2$	0.985
70 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 4.4846 - 0.0073T - 2.1 \times 10^{-4}T^2$	0.970

- * α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที
T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 101 °C

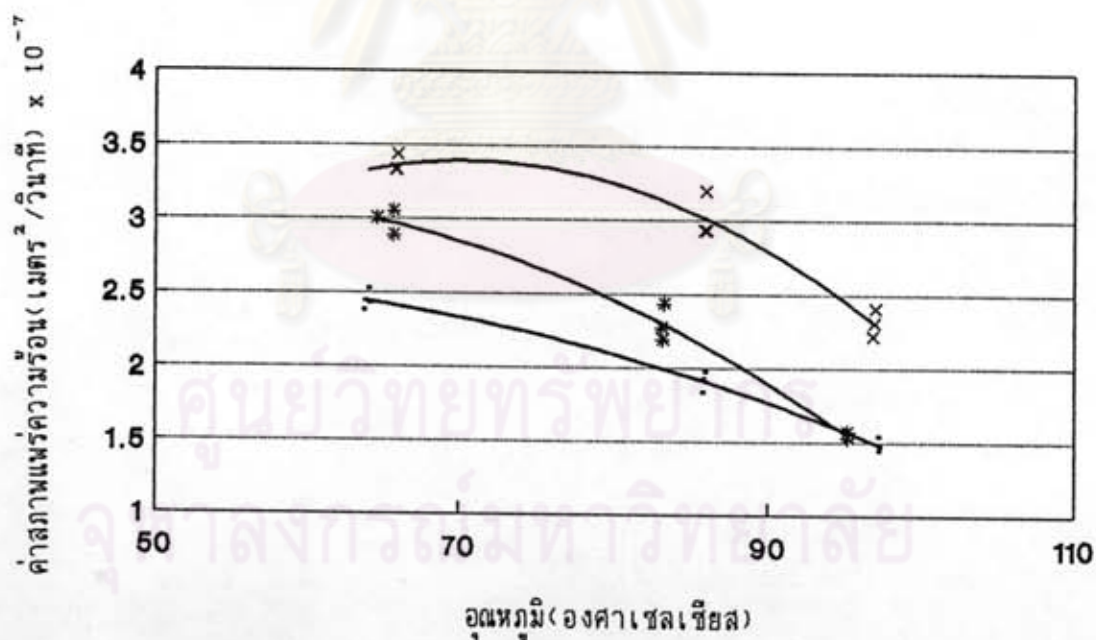
- ความชื้นร้อยละ 50±2 x ความชื้นร้อยละ 70±2
* ความชื้นร้อยละ 60±2

ตารางที่ 4.41 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าและอุณหภูมิในช่วง 60 - 101 °C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (R ²)
45 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 1.7486 + 0.0369T - 4.1 \times 10^{-4}T^2$	0.981
55 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 0.9496 + 0.0853T - 8.3 \times 10^{-4}T^2$	0.985
65 ± 2	$\alpha \times 10^7 = -4.2532 + 0.2173T - 1.5 \times 10^{-3}T^2$	0.958

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิ 60 - 101 °C

- ความชื้นร้อยละ 45±2 x ความชื้นร้อยละ 65±2
- * ความชื้นร้อยละ 55±2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้น และอุณหภูมิ พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพแพร่ความร้อน กับความชื้นและอุณหภูมิ สำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า เป็นดังสมการที่ 4.9 ($R^2 = 0.986$) และ 4.10 ($R^2 = 0.953$) ตามลำดับ

$$\alpha \times 10^7 = 3.9008 - 0.0060M - 0.0322T + 4.2 \times 10^{-4}M^2 - 6.8 \times 10^{-5}T^2 \quad \dots(4.9)$$

$$\alpha \times 10^7 = 3.5257 - 0.1862M + 0.1039T - 1.7 \times 10^{-4}TM + 0.0022M^2 - 8.1 \times 10^{-4}T^2 \quad \dots(4.10)$$

จากสมการ (4.9) และ (4.10) พบว่าแนวโน้มของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ 65 °C โดยใช้สมการทั้งสอง พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 2.91×10^{-7} และ 3.33×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่น้อยกว่ากล้วยน้ำว้าร้อยละ 14.65 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มเหมือนกับค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิสูง กล่าวคือในช่วงอุณหภูมิสูงที่ระดับความชื้นและอุณหภูมิเดียวกันค่าสมบัติทางความร้อนของกล้วยไข่จะมีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่าสมบัติทางความร้อนนอกจากจะขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิแล้วยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วย

4.2.3.2 ผลของความชื้นและอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30.1 ถึง 0 °C) ค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ได้ผลดังตารางที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.42 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อน [$(\text{เมตร}^2/\text{วินาที}) \times 10^7$] ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	0 - (-11) °C	-5.5 - (-18.5) °C	-16.1 - (-30.1) °C
50 ± 2	3.5368±0.154 a*, ก**	5.0250 ± 0.162 a, ข	6.0283 ± 0.208 a, ค
60 ± 2	4.6179±0.154 b, ก	5.9039 ± 0.204 b, ข	6.5298 ± 0.136 b, ค
70 ± 2	5.1695±0.235 c, ก	7.0887 ± 0.198 c, ข	8.9159 ± 0.558 c, ค

ตารางที่ 4.43 ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้า ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ความชื้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ปริมาณ ความชื้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อน [$(\text{เมตร}^2/\text{วินาที}) \times 10^7$] ที่ช่วงอุณหภูมิ		
	0 - (-11) °C	-5.5 - (-18.5) °C	-16.1 - (-30.1) °C
45 ± 2	3.9272±0.116 a*, ก**	4.2692 ± 0.078 a, ข	5.7197 ± 0.119 a, ค
55 ± 2	4.8658±0.258 b, ก	5.2022 ± 0.186 b, ก	6.3936 ± 0.352 b, ข
65 ± 2	5.6618±0.390 c, ก	7.5313 ± 0.214 c, ข	10.5534 ± 0.705 c, ค

- * ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
- ** ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า (ตารางที่ 4.44 และ 4.45) พบว่าความชื้น อุณหภูมิและผลรวมระหว่างความชื้นและอุณหภูมิ มีผลต่อค่าสภาพแพร่-ความร้อนของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (-30.1 ถึง 0 °C) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.44 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ ในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F _{คำนวณ}
อุณหภูมิ (T)	2	33.4700	16.7300	258.1800 [*]
ความชื้น (M)	2	22.1300	11.0700	107.7700 [*]
TM	4	2.7200	0.6800	10.5000 [*]
Error	18	1.1700	6.48x10 ⁻²	

ตารางที่ 4.45 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้า ในช่วง อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean of Square	F _{คำนวณ}
อุณหภูมิ (T)	2	35.3366	17.6683	166.7174 [*]
ความชื้น (M)	2	52.0623	26.0311	245.6291 [*]
TM	4	10.5209	2.6302	24.8187 [*]
Error	18	1.9076	0.1059	

^{*} แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลของปริมาณความชื้นต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพ-
 แพร่ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.26 และ 4.27) พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น
 ในช่วงร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่และร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า ค่าสภาพ-
 แพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 0 - (-11), -5.5 - (-18.5) และ -16.1 - (-30.1) °C
 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น
 ทำให้มีปริมาณผลึกน้ำแข็งมากขึ้น ค่าสภาพนำความร้อนมีค่าสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าสภาพแพร่ความ-
 ร้อนมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่าง
 ค่าสภาพแพร่ความร้อน กับปริมาณความชื้นที่แต่ละระดับของอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้า
 ดังแสดงในตารางที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.24 และ 4.25
 ตามลำดับ

ผลการทดลองของกล้วยไข่ และกล้วยน้ำว้าที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของสิรินาก
 (2533) ซึ่งทดลองกับสับปะรดในช่วงความชื้นร้อยละ 60-85 และพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อน
 มีความสัมพันธ์กับความชื้นเช่นเดียวกับในช่วงอุณหภูมิสูง

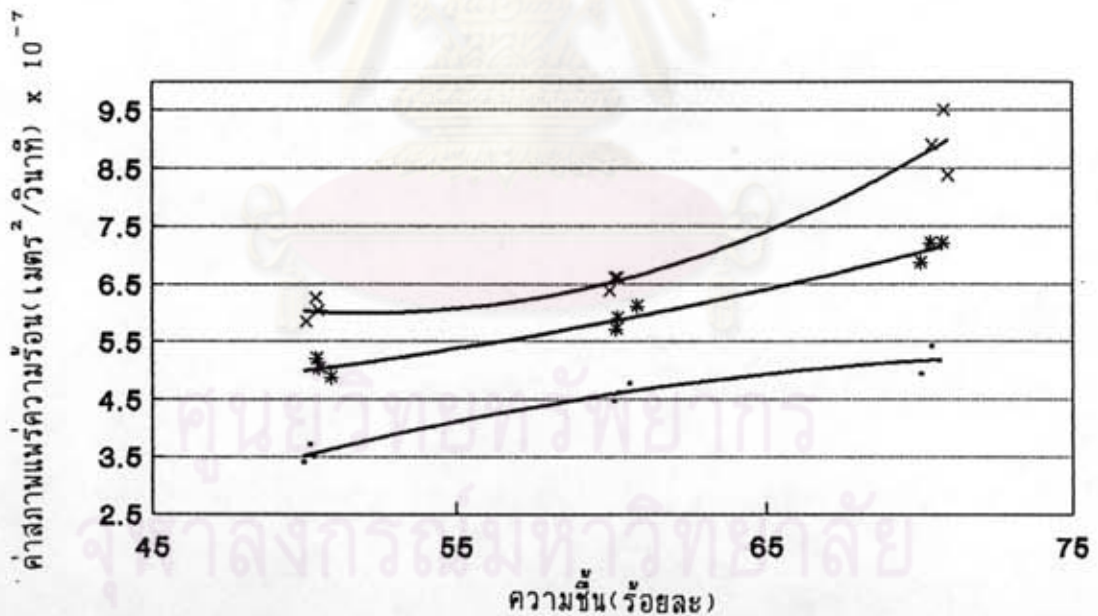
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.46 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 50 - 70

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R^2)
0 - (-11)	$\alpha \times 10^7 = -9.3028 + 0.3807M - 2.5 \times 10^{-3} M^2$	0.958
-5.5 - (-18.5)	$\alpha \times 10^7 = 5.7882 - 0.1012M + 1.7 \times 10^{-3} M^2$	0.974
-16.1 - (-30.1)	$\alpha \times 10^7 = 28.7747 - 0.8752M + 8.4 \times 10^{-3} M^2$	0.947

* α มีหน่วยเป็นเมตร²/วินาที

M คือร้อยละของความชื้น



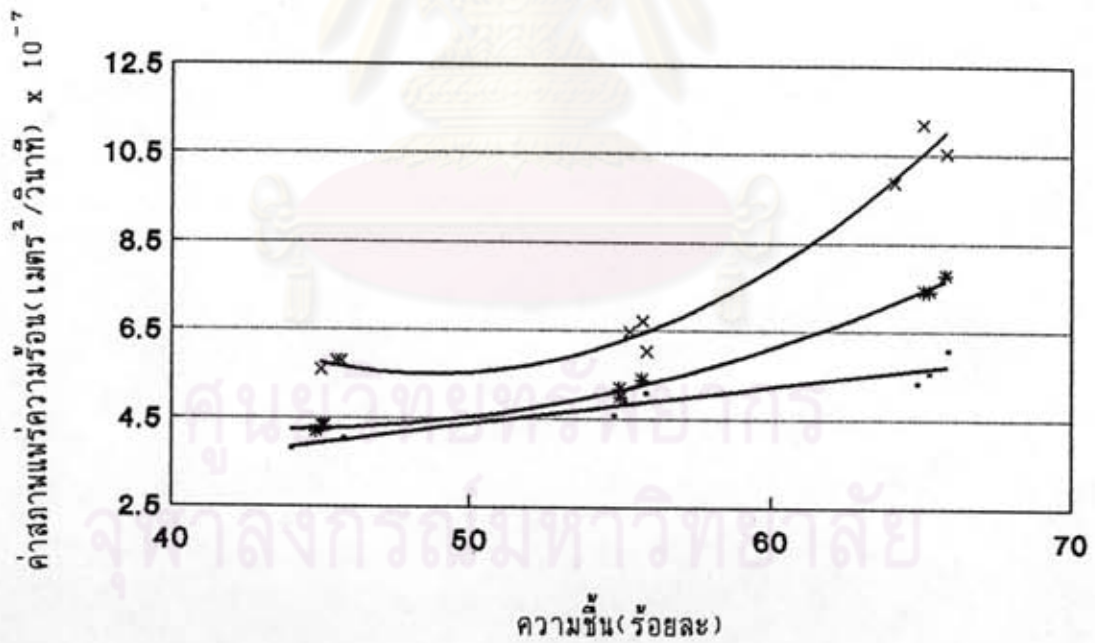
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

- อุณหภูมิ 0 - (-11) °C x อุณหภูมิ -16.1 - (-30.1) °C
- * อุณหภูมิ -5.5 - (-18.5) °C

ตารางที่ 4.47 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้าในช่วงอุณหภูมิ ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำและความชื้นในช่วงร้อยละ 45 - 65

ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression*	coefficient of determination(R ²)
0 - (-11)	$\alpha \times 10^7 = -0.7556 + 0.1167M - 2.7 \times 10^{-4} M^2$	0.931
-5.5 - (-18.5)	$\alpha \times 10^7 = 17.3056 - 0.5999M + 6.9 \times 10^{-3} M^2$	0.995
-16.1 - (-30.1)	$\alpha \times 10^7 = 49.9398 - 1.8265M + 1.9 \times 10^{-2} M^2$	0.975

* α มีหน่วยเป็นเมตร²/วินาที
 M คือร้อยละของความชื้น



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยน้ำว้า ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ

• อุณหภูมิ 0 - (-11) °C x อุณหภูมิ -16.1 - (-30.1) °C
 * อุณหภูมิ -5.5 - (-18.5) °C

ผลของอุณหภูมิต่อค่าสภาพแพร่ความร้อน เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยค่าสภาพแพร่ความร้อนที่ความชื้นคงที่แต่ละระดับ (ตารางที่ 4.42 และ 4.43) พบว่าเมื่อลดอุณหภูมิลงจาก 0 ถึง -30.1°C ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อน (ที่ระดับความชื้นร้อยละ 50 \pm 2, 60 \pm 2 และ 70 \pm 2 สำหรับกล้วยไข่ และร้อยละ 45 \pm 2, 65 \pm 2 สำหรับกล้วยน้ำว้า) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และสำหรับกล้วยน้ำว้าความชื้นร้อยละ 55 \pm 2 การลดลงของอุณหภูมิในช่วง $-5.5 - (-18.5)$ และในช่วง $-16.1 - (-30.1)^{\circ}\text{C}$ ทำให้ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าสภาพแพร่ความร้อนของน้ำตาลในกล้วย ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของน้ำตาลจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง ทั้งนี้ผลการทดลองยังสอดคล้องกับสมการ (2.4) กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิลดลงค่าสภาพนำความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นมาก ในขณะที่ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่ จึงส่งผลให้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งค่าสภาพแพร่ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง และเมื่อวิเคราะห์ด้วย multiple regression ได้สมการระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับอุณหภูมิที่แต่ละระดับความชื้นสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าดังแสดงในตารางที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ และมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วย ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำพบว่า ค่าสภาพแพร่ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง -30.1°C มีความสัมพันธ์เป็นพาราโบลาเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในช่วงอุณหภูมิสูง 60 ถึง 101°C ในช่วงความชื้นร้อยละ 50 - 70 สำหรับกล้วยไข่และช่วงความชื้นร้อยละ 45 - 65 สำหรับกล้วยน้ำว้า

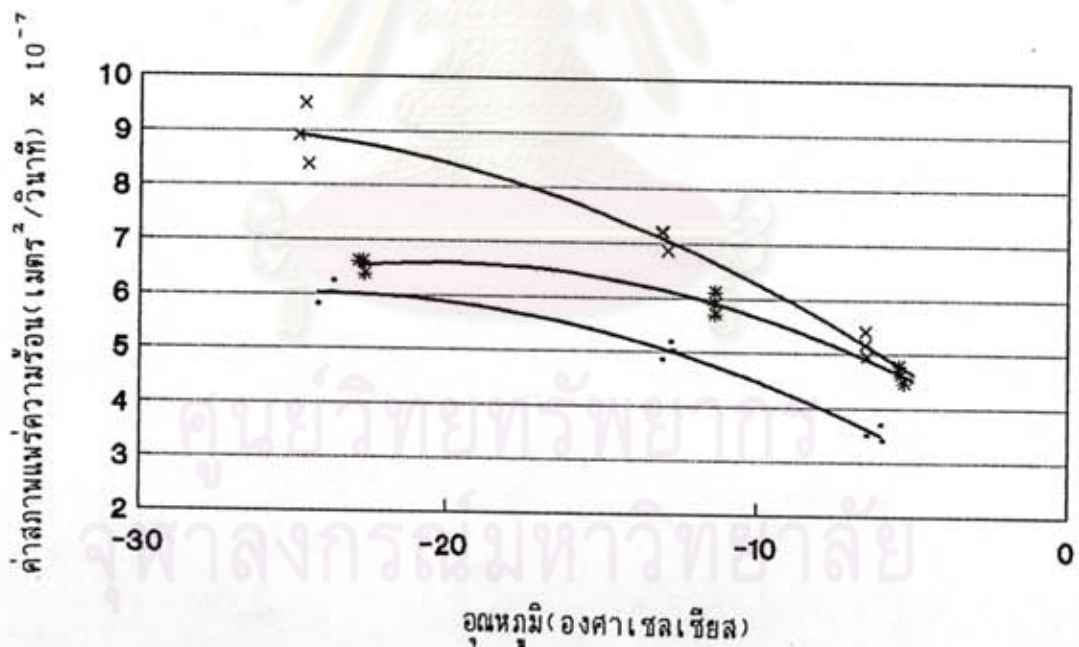
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.48 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และอุณหภูมิในช่วง 0 ถึง -30.1°C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression [*]	coefficient of determination (R^2)
50 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 1.5592 - 0.3667T - 7.5 \times 10^{-3}T^2$	0.977
60 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 2.8918 - 0.3703T - 9.2 \times 10^{-3}T^2$	0.973
70 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 2.5865 - 0.4453T - 7.6 \times 10^{-3}T^2$	0.964

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (0 ถึง -30.1°C)

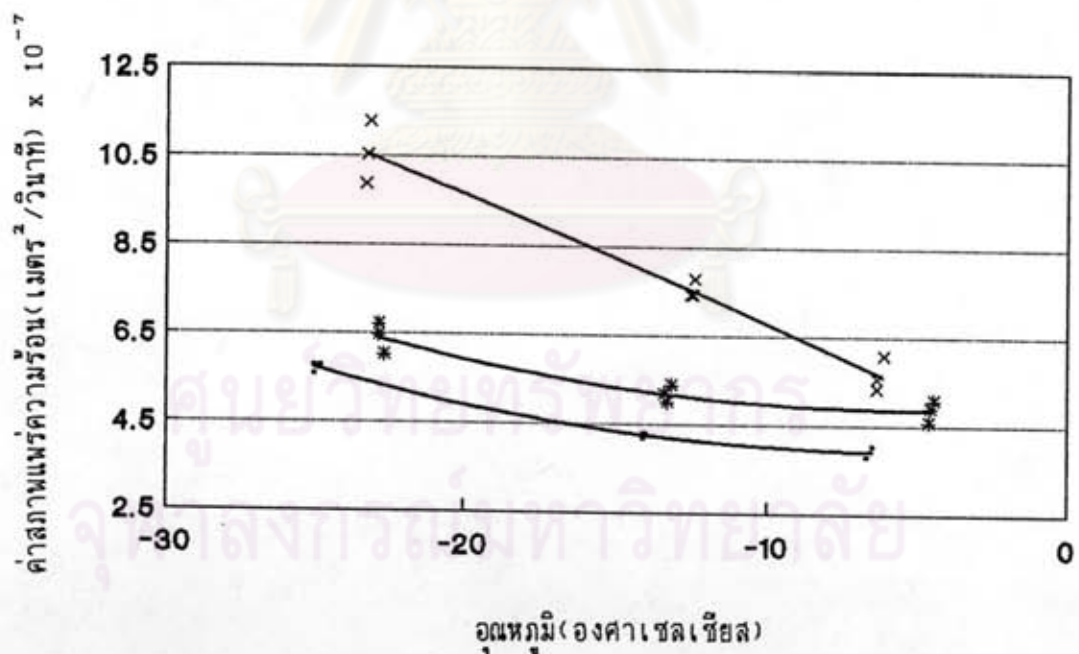
- ความชื้นร้อยละ 50 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 70 ± 2
- * ความชื้นร้อยละ 60 ± 2

ตารางที่ 4.49 สมการ regression ของค่าสภาพแพร่ความร้อนของกลี๋ยงน้ำว่าและอุณหภูมิในช่วง 0 ถึง -30.1°C

ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	coefficient of determination (R^2)
45 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 4.0670 + 0.0524T + 4.7 \times 10^{-3} T^2$	0.986
55 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 4.9950 + 0.0496T + 4.9 \times 10^{-3} T^2$	0.901
65 ± 2	$\alpha \times 10^7 = 3.6464 - 0.3288T - 1.3 \times 10^{-3} T^2$	0.959

* α มีหน่วยเป็น เมตร²/วินาที

T มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าสภาพแพร่ความร้อนของกลี๋ยงน้ำว่าในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ (0 ถึง -30.1°C)

- ความชื้นร้อยละ 45 ± 2 x ความชื้นร้อยละ 65 ± 2
- * ความชื้นร้อยละ 55 ± 2

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพแพร่ความร้อนกับความชื้นและอุณหภูมิ พบว่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่าสภาพแพร่ความร้อน กับความชื้น และอุณหภูมิสำหรับกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าเป็นดังสมการที่ 4.11 ($R^2 = 0.948$) และ 4.12 ($R^2 = 0.950$) ตามลำดับ

$$\alpha \times 10^7 = -0.5759 + 0.0548M - 0.127T - 0.0036TM - 0.0059T^2 \quad \dots (4.11)$$

$$\alpha \times 10^7 = 24.9763 - 0.7770M + 0.5829T - 0.0099TM + 0.0073M^2 + 0.0063T^2 \quad \dots (4.12)$$

จากสมการ (4.11) และ (4.12) พบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อประมาณค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้าที่ความชื้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ -10°C โดยใช้สมการทั้งสองพบว่าค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่และกล้วยน้ำว้ามีค่าเท่ากับ 5.8×10^{-7} และ 6.5×10^{-7} เมตร²/วินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนของกล้วยไข่น้อยกว่ากล้วยน้ำว้าร้อยละ 11.17 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มเหมือนกับค่าความร้อนจำเพาะและค่าสภาพนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ กล่าวคือในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำที่ระดับความชื้นและอุณหภูมิเดียวกันค่าสมบัติทางความร้อนของกล้วยไข่จะมีค่าน้อยกว่ากล้วยน้ำว้า ซึ่งเป็นการยืนยันว่าค่าสมบัติทางความร้อนนอกจากจะขึ้นกับความชื้นและอุณหภูมิแล้ว ยังขึ้นกับปัจจัยอื่น ๆ อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย