

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด และผลของการเตรียมตัวอย่างน้ำส้มที่มีต่อสมบัติของโพนน้ำส้ม

4.1.1 ผลของค่าอุณหภูมิที่ตั้ง และระยะห่างจากหลอดอินฟราเรดที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด

การศึกษาผลของปัจจัย ได้แก่ ค่าอุณหภูมิของเครื่องอบ (oven temperature) ที่ตั้ง (set point, SP) จำนวน 3 อุณหภูมิ (40, 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส) และระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด (ตำแหน่งถาดชั้นบน 7.1 เซนติเมตร และตำแหน่งถาดชั้นล่าง 20.1 เซนติเมตร ห่างจากหลอดอินฟราเรด) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด โดยการวัดอุณหภูมิบนพื้นถาดอบแห้ง (พื้นที่รับรังสี) ที่ใช้ในการทดลอง สามารถใช้อธิบายแทนระดับความเข้มของการแผ่รังสีอินฟราเรดได้ (จักรมาศ, 2551) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดในระหว่างปฏิบัติการเป็นเวลา 60 นาที โดยทำการบันทึกข้อมูลทุกๆ 15 วินาที (ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 6 ซ้ำ) ดังภาพ 4.1-4.6 (แสดงค่าทุก 1 นาที)

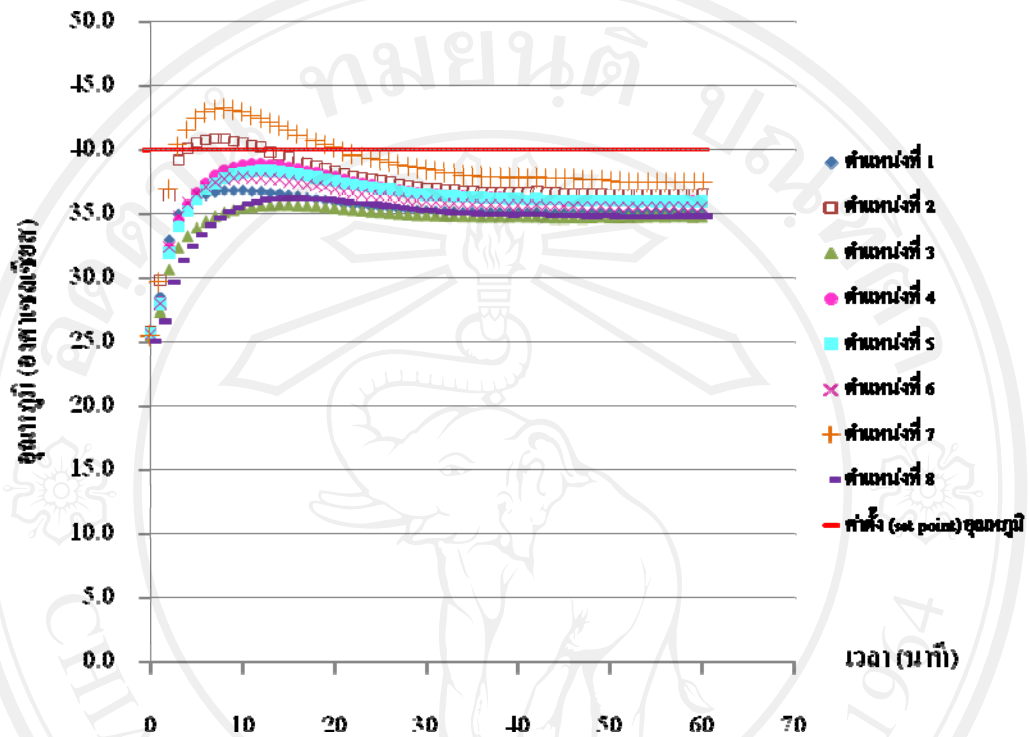
1) ค่าอุณหภูมิที่ตั้ง 40 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง แสดงในภาพ 4.1 และภาพ 4.2 เมื่อวางถาดให้มีระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ชั้นบน) และที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง) ตามลำดับ โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งถาดชั้นบนมีค่าเท่ากับ 36.2 องศาเซลเซียส ส่วนถาดชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 35.7 องศาเซลเซียส และพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของผิวถาดซึ่งได้รับพลังงานความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีของหลอดรังสีอินฟราเรดไปสู่พื้นถาดอบแห้งตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนกับถาดอบแห้งจนเข้าสู่ระดับคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งอาจ

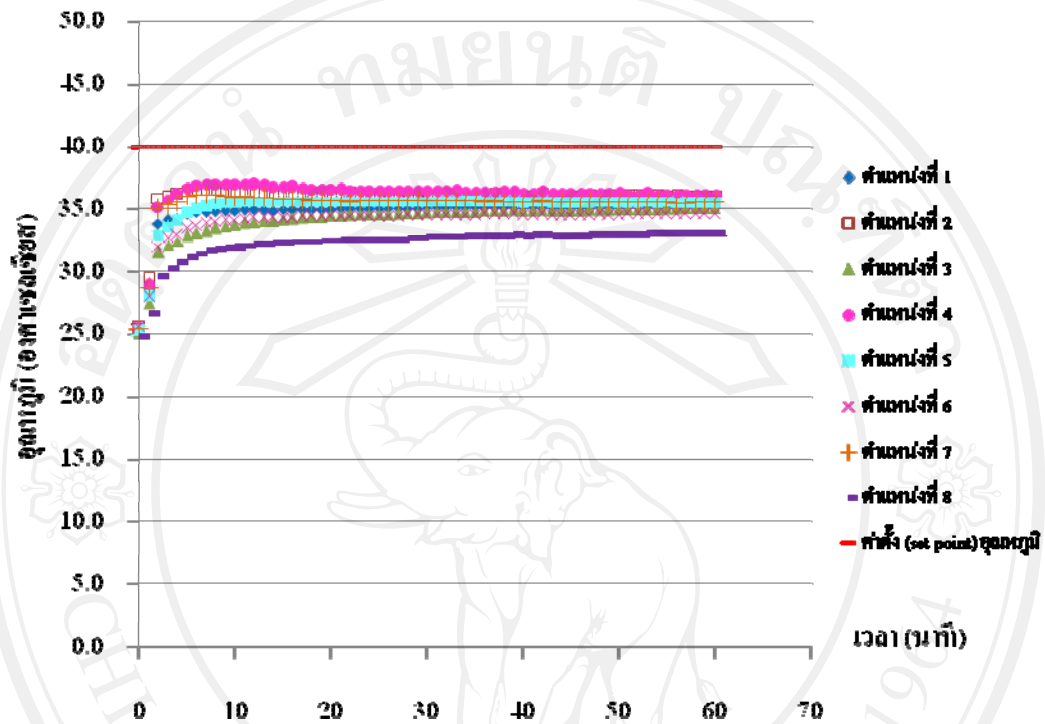
แบ่งออกได้เป็น “ช่วงขึ้น” ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากอุณหภูมิเริ่มต้น จากนั้นจะเป็น “ช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่” ตามค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยในช่วงแรก (อุณหภูมิมีค่าตั้งแต่อุณหภูมิห้อง หรือ ambient temperature ในขณะที่ทำการทดสอบ) พบว่าที่ตำแหน่งตามแนวกึ่งกลางของหลอดอินฟราเรด คือ ตำแหน่งที่ 2 และ 7 (หลอดซ้าย และหลอดขวา ตามลำดับ) จะเพิ่มสูงขึ้น และอุณหภูมิก็สามารถเข้าสู่ค่าที่ตั้งได้ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส ได้ที่เวลา 4 และ 3 นาที ตามลำดับ ส่วนที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง) อุณหภูมิที่ตำแหน่งทั้งสองไม่สามารถเข้าสู่ค่าที่ตั้งได้เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส แต่มีค่าอุณหภูมิในช่วงขึ้นได้สูงสุด เท่ากับ 36.6 และ 36.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

สำหรับอุณหภูมิที่ตำแหน่งแนวกึ่งกลางหลอดอินฟราเรดทั้งที่ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 7 ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ชั้นบน) หลังจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงขึ้น และเข้าสู่ค่าที่ตั้งได้แล้ว พบว่าอุณหภูมิยังมีค่าสูงขึ้นไปอีกจนถึงค่าสูงสุดที่ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 7 มีอุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 40.9 และ 43.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ลักษณะพุ่งเกิน หรือ overshoot ซึ่งเป็นลักษณะที่อุณหภูมิมีค่าสูงเกินค่าที่ตั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่งก่อนช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งของระบบควบคุมแบบ PID (วโรคม, 2550) หลังจากอุณหภูมิพุ่งเกิน อุณหภูมิที่ตำแหน่งทั้งสองจะค่อยๆ ลดลง และเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ จนกระทั่งที่เวลา 60 นาที ที่ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 7 มีอุณหภูมิ เท่ากับ 36.5 และ 37.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง) หลังจากมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงขึ้นแล้ว พบว่าอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลง และเข้าสู่สภาวะคงที่ที่อุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 36.1 และ 35.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และไม่พบการเกิดลักษณะพุ่งเกินไปจากค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้

บริเวณตำแหน่งอื่นๆ บนถาดอบแห้ง ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร อุณหภูมิมีค่าสูงสุดต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส แต่ยังสามารถมีช่วงเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยที่ตำแหน่งที่ 1, 3, 4, 5, 6 และ 8 ในช่วงขึ้นมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงสุด เท่ากับ 36.9, 35.7, 38.8, 38.3, 37.8 และ 36.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้นอุณหภูมิก็เริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ โดยที่ตำแหน่งที่ 1, 3, 4, 5, 6 และ 8 มีอุณหภูมิสุดท้าย เท่ากับ 35.0, 34.7, 35.9, 35.9, 35.5 และ 34.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งที่ 1, 3, 4, 5, 6 และ 8 ในช่วงขึ้นมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงสุด และสามารถเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ มีที่ตำแหน่งที่ 4 และ 5 เท่านั้น ซึ่งเป็นตำแหน่งบริเวณแนวกลางถาด และอยู่ระหว่างหลอดอินฟราเรด



ภาพ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส)

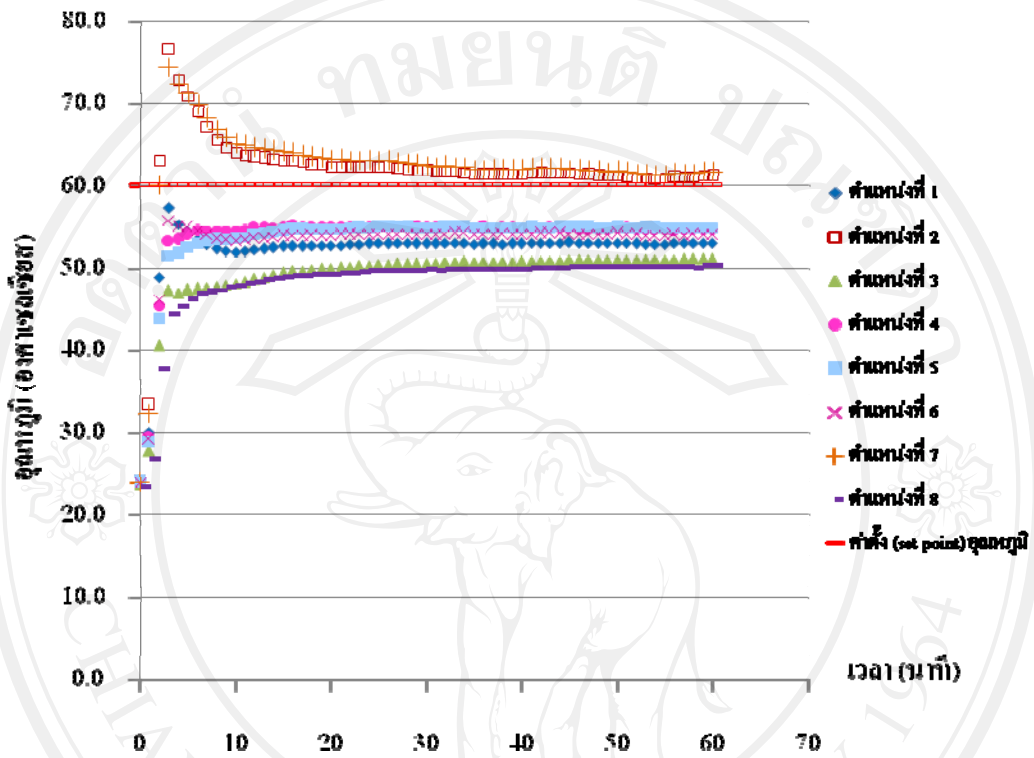


ภาพ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของอนุทภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอนุทภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 40 องศาเซลเซียส)

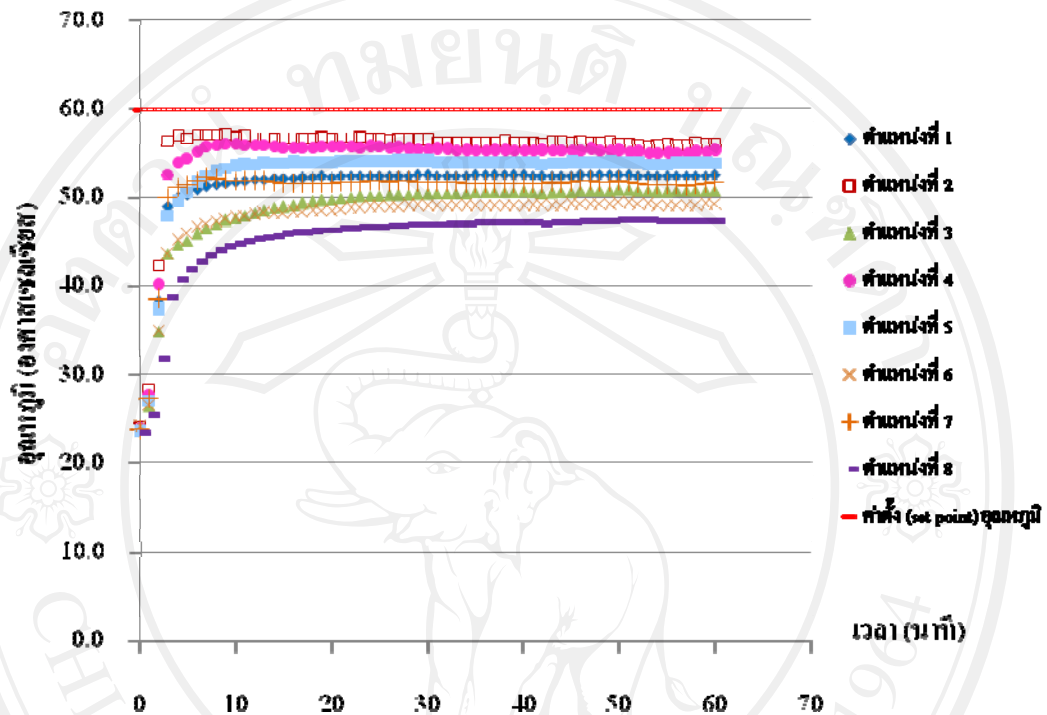
ทั้งสองหลอด มีค่าอุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 37.0 และ 35.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้น อุณหภูมิลดลง จนกระทั่งมีอุณหภูมิต่ำสุด เท่ากับ 36.2 และ 35.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่ตำแหน่งอื่น ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 และ 3 ซึ่งเป็นบริเวณหลอดอินฟราเรดด้านซ้ายส่วนหลัง และส่วนหน้า ตามลำดับ และตำแหน่งที่ 6 และ 8 ซึ่งเป็นบริเวณหลอดอินฟราเรดด้านขวา ส่วนหลัง และส่วนหน้า ตามลำดับ ในช่วงเวลาทดสอบ 60 นาที พบว่าเป็นบริเวณที่อุณหภูมิยังไม่เข้าสู่สภาวะคงที่ และมีแนวโน้มการเพิ่มของอุณหภูมิที่เข้ามา โดยค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต่ำกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ ด้วย

2) ค่าอุณหภูมิที่ตั้ง 60 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งถาดมีค่าเท่ากับ 55.7 และ 53.0 องศาเซลเซียส เมื่อถาดมีระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ชั้นบน) และ 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง) ตามลำดับ ดังภาพ 4.3 และภาพ 4.4 ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขึ้นแบบโค้งที่ตำแหน่งที่ 1, 2, 6 และ 7 แต่ที่ตำแหน่งที่ 2 และ 7 มีอุณหภูมิลักษณะพุ่งเกิน คือมีอุณหภูมิขึ้นไปสูงสุดถึง 76.8 และ 74.5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะเป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงแนวกึ่งกลางของหลอดอินฟราเรดทั้งสองหลอด และประกอบกับถาดอบแห้งอยู่ในตำแหน่งที่มีระยะใกล้กับแหล่งกำเนิดพลังงานมากกว่า ในขณะที่ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขึ้นที่ตำแหน่ง 2 และ 7 ในแบบลักษณะพุ่งเกิน ทั้งนี้ การที่พื้นที่รับรังสีอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมากกว่าย่อมทำให้มีโอกาสได้รับพลังงานอินฟราเรดได้มากกว่าด้วย และอาจเป็นไปได้ว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวหลอดอินฟราเรดทั้งสองหลอดเองนั้น มีความเข้มในการแผ่รังสีเมื่อได้รับพลังงานกระตุ้นเข้ามาที่หลอดที่สูงกว่าบริเวณอื่นของแหล่งหลอดเองด้วย



ภาพ 4.3 การเปลี่ยนแปลงของอนุกรมที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอนุกรมของเครื่องอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส)

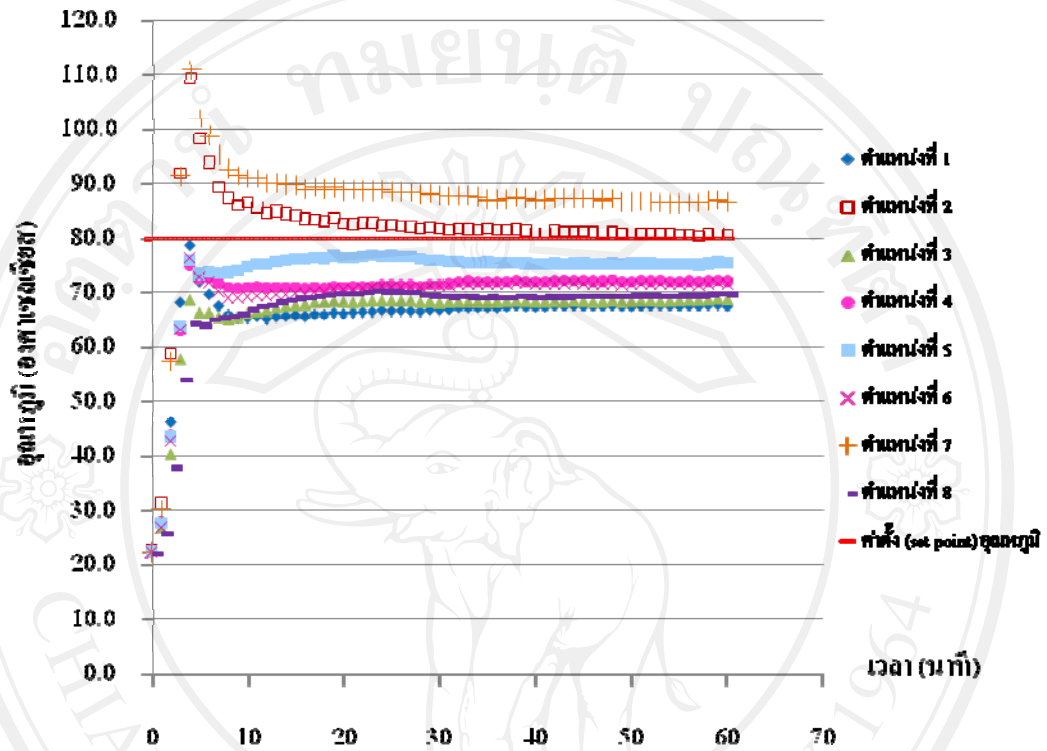


ภาพ 4.4 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส)

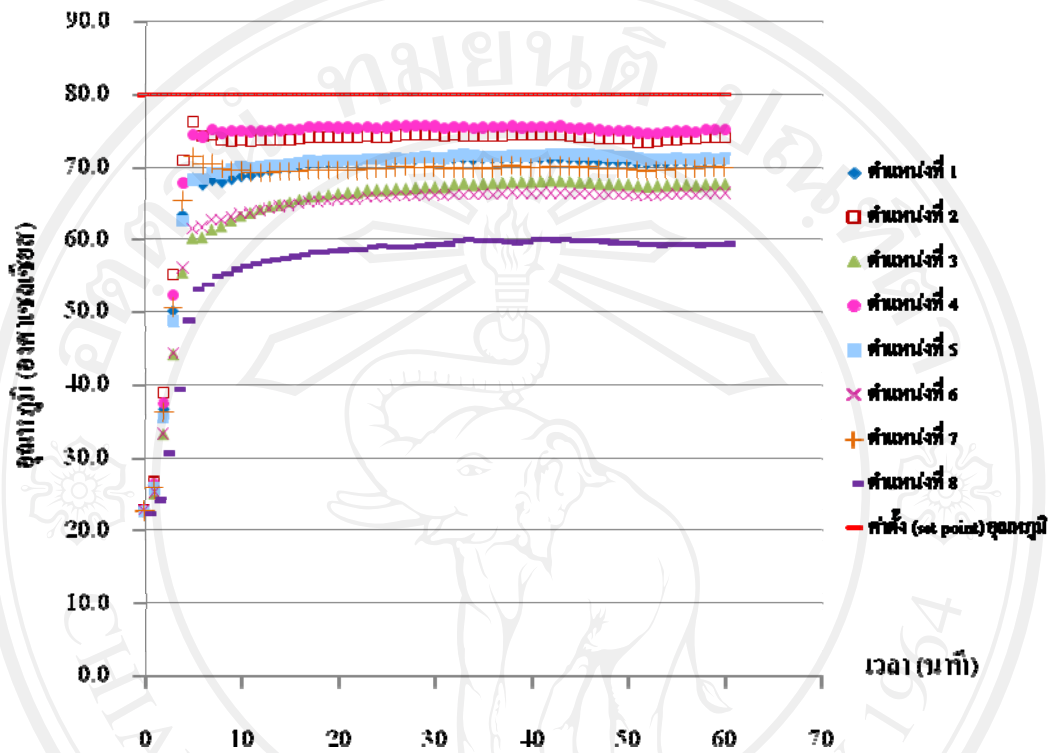
ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร ที่ตำแหน่งที่ 1 และ 6 มีลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไปที่ค่าสูงสุด (เท่ากับ 57.4 และ 55.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) แล้วจึงค่อยๆ ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยอุณหภูมิสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 53.1 และ 54.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนที่ตำแหน่ง 3, 4, 5 และ 8 มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 51.1, 54.7, 55.0 และ 50.3 เซนติเมตร ตามลำดับ และที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร ทุกตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในลักษณะเดียวกับตำแหน่งที่ 1, 3, 4, 5, 6 และ 8 (เมื่อถาดอยู่ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร) แต่อุณหภูมิสุดท้ายส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า โดยที่ตำแหน่ง 1, 3, 4, 5, 6 และ 8 มีอุณหภูมิสุดท้ายเท่ากับ 52.5, 50.8, 55.3, 53.9, 49.3 และ 47.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากถาดอบแห้งอยู่ในระยะที่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดมากกว่า จึงรับพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนพื้นที่รับรังสีส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในช่วงขึ้น และเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่าที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร

3) ค่าอุณหภูมิที่ตั้ง 80 องศาเซลเซียส

เมื่อทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้ง แสดงในภาพ 4.5 และภาพ 4.6 เมื่อวางถาดให้มีระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ชั้นบน) และที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง) ตามลำดับ โดยค่าอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งถาดชั้นบนมีค่าเท่ากับ 74.7 องศาเซลเซียส ส่วนถาดชั้นล่างมีค่าเท่ากับ 70.5 องศาเซลเซียส โดยภาพรวมแล้วมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจนเข้าใกล้ค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ได้ทั้งสองระยะห่างที่ทำการทดสอบ โดยที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขึ้นแบบโด่งเกือบทุกตำแหน่งบนถาดอบแห้ง (ยกเว้นที่ตำแหน่งที่ 5 และ 8) คือมีอุณหภูมิขึ้นไปถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง แล้วค่อยๆ ลดลงในระยะเวลาสั้นๆ จึงค่อยเข้าสู่สภาวะคงที่ได้ และใช้เวลาในช่วงขึ้นประมาณ 4 นาที นอกจากนี้ที่ตำแหน่ง 2 และ 7 ก็ยังพบลักษณะพุ่งเกินไปจากค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ (80 องศาเซลเซียส) เช่นเดียวกับกรณีที่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่าง 7.1 เซนติเมตรด้วย ส่วนที่ตำแหน่งที่ 5 และ 8 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในลักษณะเดียวกัน คืออุณหภูมิในช่วงขึ้นมีค่าขึ้นไปถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่งแล้วค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกันกับการทดสอบที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร ที่เกือบทุกตำแหน่ง ยกเว้นตำแหน่งที่ 2 และที่ 7 นอกจากนี้ยังพบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงขึ้นใกล้เคียงกับการทดสอบที่ตำแหน่งส่วนใหญ่ของระยะห่าง 7.1 เซนติเมตร



ภาพ 4.5 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ตั้งอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส)



ภาพ 4.6 การเปลี่ยนแปลงของอนุกรมที่ตำแหน่งต่างๆ บนถาดอบแห้งที่วางอยู่ห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ตั้งอนุกรมของเครื่องอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส)

เพียงแต่การขึ้นไปถึงค่าอุณหภูมิสูงสุด และลดลงมานั้นมีช่วงเวลาที่สั้นมากเพียงประมาณ 1 นาที แล้วจึงค่อยๆ เข้าสู่สภาวะคงที่ได้ในเวลาที่รวดเร็วกว่าการทดสอบที่ระยะห่าง 7.1 เซนติเมตร อย่างไรก็ตาม ที่ระยะห่าง 20.1 เซนติเมตร ไม่พบการเกิดลักษณะพุ่งเกินไปจากค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ เช่นเดียวกับการทดสอบที่ระยะห่างเดียวกันนี้ แต่ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ดังกล่าวมาแล้ว

บริเวณที่มีค่าอุณหภูมิลักษณะพุ่งเกินไปจากค่าที่ตั้งไว้ที่ระยะห่าง 7.1 เซนติเมตร ได้แก่ ตำแหน่งที่ 2 และ 7 โดยมีค่าอุณหภูมิเท่ากับ 109.4 และ 110.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่เกิดลักษณะพุ่งเกินนั้น สูงกว่าค่าอุณหภูมิพุ่งเกินเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งไว้ที่ 40 และ 60 องศาเซลเซียสค่อนข้างมาก ทั้งนี้จะเป็นเพราะอุณหภูมิที่ใช้ตั้งค่าสูงกว่า ทำให้มีการจ่ายพลังงานเข้าสู่หลอดอินฟราเรดมากขึ้น หลอดอินฟราเรดเกิดการแผ่รังสีออกมาด้วยความเข้มรังสีที่สูงกว่าสู่พื้นผิวดูด วัสดุที่รับรังสีจึงมีการดูดซับพลังงานความร้อนไว้ได้ปริมาณที่มากกว่า ดังนั้น เมื่อทำการวัดอุณหภูมิบนพื้นผิวดูดซึ่งเป็นพื้นที่รับรังสีดังกล่าวจึงมีค่าที่สูงกว่าการทดสอบที่ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งที่ต่ำกว่า

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดด้วยเครื่องต้นแบบนี้ โดยภาพรวมแล้วพบว่า ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่ใช้เป็นหลอดอินฟราเรดที่มีแหล่งพลังงานเป็นไฟฟ้า ค่าอุณหภูมิที่ตั้ง และตำแหน่งบนผิวดูดอบแห้งซึ่งเป็นพื้นที่ผิวทดสอบที่ใช้รับรังสีอินฟราเรด ล้วนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งในลักษณะต่างๆ กันได้ และรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น อาจส่งผลกระทบต่อวัสดุที่ต้องการนำมาทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนี้ทั้งในระหว่างปฏิบัติการ และ/หรือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ภายหลังจากที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งนี้ภายใต้สภาวะที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

โดยภาพรวมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องอบแห้ง มีลักษณะที่พอจะสรุปได้ดังนี้ ได้แก่ ลักษณะที่หนึ่ง คือระยะเวลาในช่วงขึ้นและการเข้าสู่สภาวะคงที่ของอุณหภูมิ พบว่าที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร ที่พื้นที่ผิวดูดส่วนใหญ่ใช้ระยะเวลาในช่วงขึ้นและเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วกว่าที่ระยะห่าง 20.1 เซนติเมตร ลักษณะที่สอง คืออุณหภูมิเฉลี่ยทั้งผิวดูดภายหลังจากที่อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายของการทดสอบ ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตรมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระยะห่าง 20.1 เซนติเมตรเสมอ ลักษณะที่สาม คือการเกิดลักษณะพุ่งเกิน (overshoot) ของอุณหภูมิ พบว่าระบบควบคุม

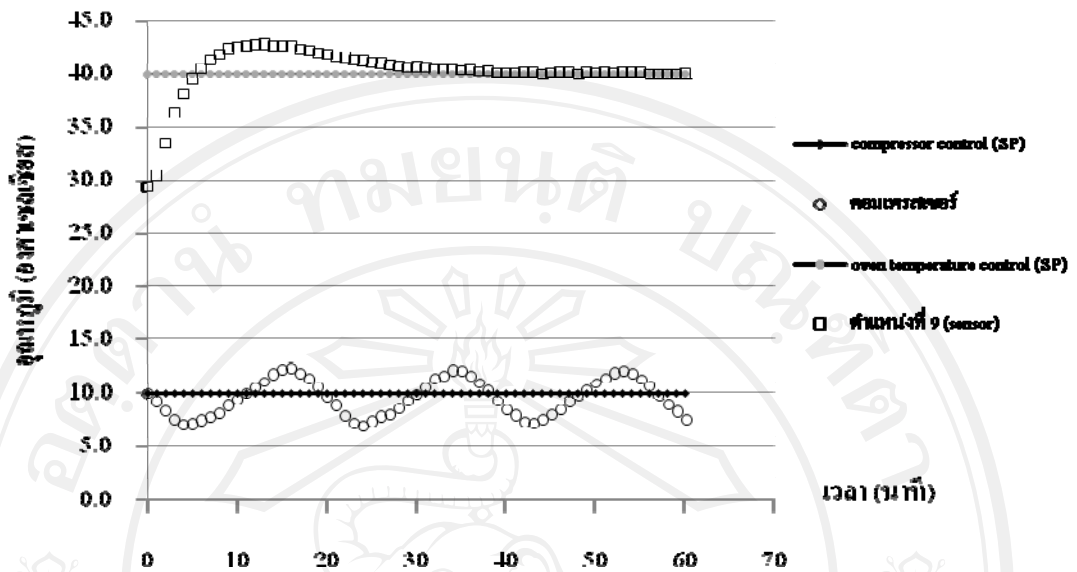
อุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศซึ่งวัดค่าอุณหภูมิด้วยแท่งวัดอุณหภูมิเกิดลักษณะพุ่งเกินเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส และที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร และลักษณะสุดท้าย คือการเกิดลักษณะพุ่งเกินของอุณหภูมิมบนภาคทดสอบ พบว่าเมื่อทดสอบด้วยอุณหภูมิที่ตั้งค่าทุกระดับ ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร และเป็นตำแหน่งที่อยู่บริเวณกึ่งกลางตามความยาวของหลอดอินฟราเรดทั้งสองหลอด ทำให้เกิดลักษณะพุ่งเกินของอุณหภูมิในช่วงขึ้นได้เสมอ

4) ระบบควบคุมของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด

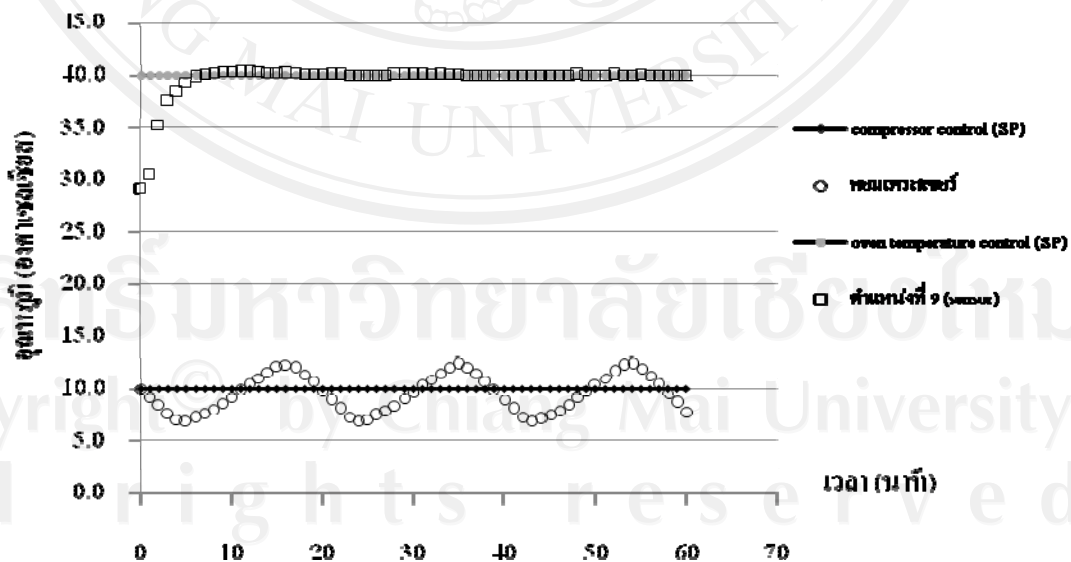
การทดสอบระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ได้แก่ ระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง (oven temperature) และอุณหภูมิระบบทำความเย็น (compressor temperature) โดยผันแปรค่าของอุณหภูมิที่ตั้ง (SP) ของเครื่องอบแห้งเป็น 40, 60 หรือ 80 องศาเซลเซียส โดยตั้งค่าอุณหภูมิ (SP) ของเครื่องทำความเย็น เท่ากับ 10 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดสอบ แสดงดังภาพ 4.7-4.12

ก. ระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด

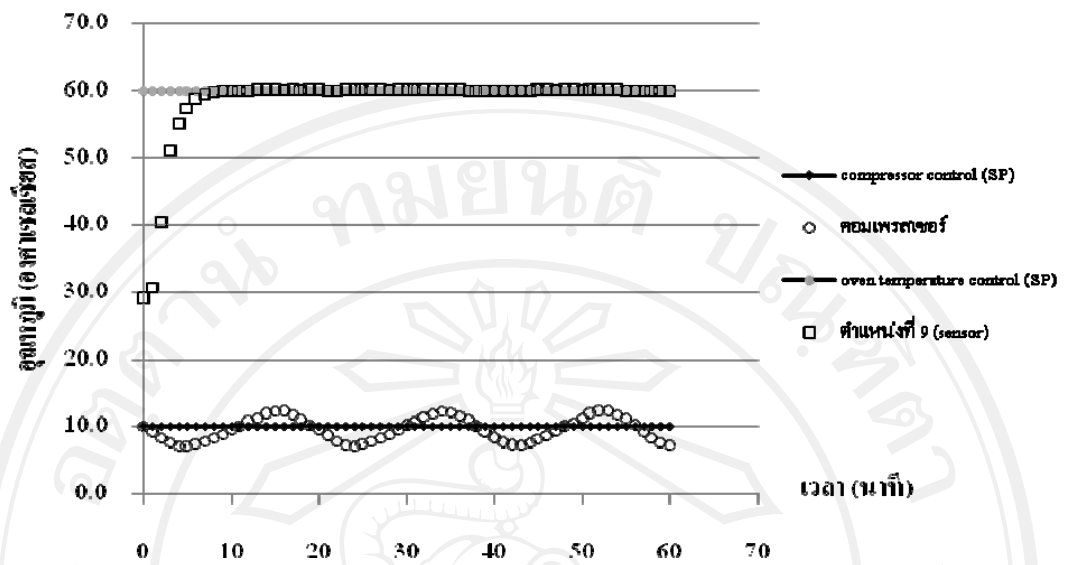
เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.7) อุณหภูมิของเครื่องอบแห้ง (อ่านจากแท่งวัดอุณหภูมิ ตำแหน่งที่ 9) จะเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ใช้เวลาเท่ากับ 6 นาที ส่วนที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 (ภาพ 4.8) ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ เท่ากับ 7 นาที เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.9) ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ เท่ากับ 11 นาที ส่วนที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 (ภาพ 4.10) ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ เท่ากับ 9 นาที ในขณะที่เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 80 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่างจากหลอดรังสีอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.11) ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ เท่ากับ 6 นาที ส่วนที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 (ภาพ 4.12) ใช้เวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ เท่ากับ 8 นาที



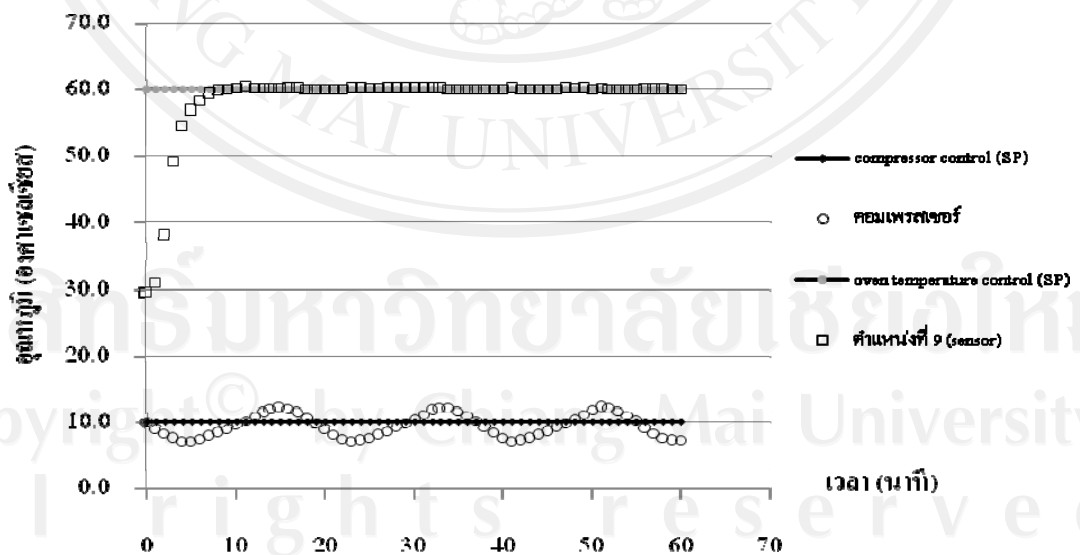
ภาพ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณถาดบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 40 องศาเซลเซียส



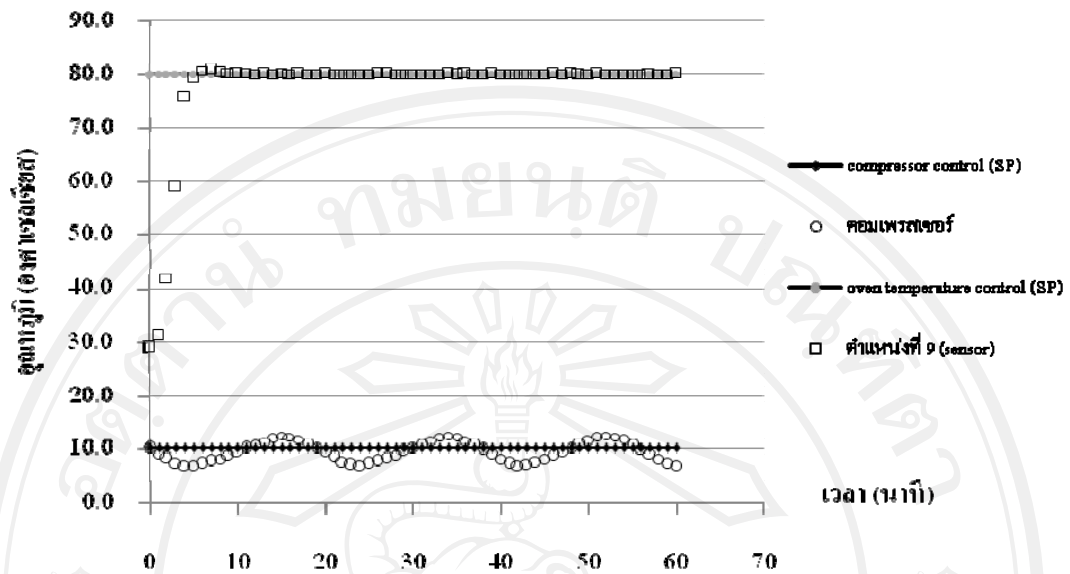
ภาพ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณถาดล่าง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 40 องศาเซลเซียส



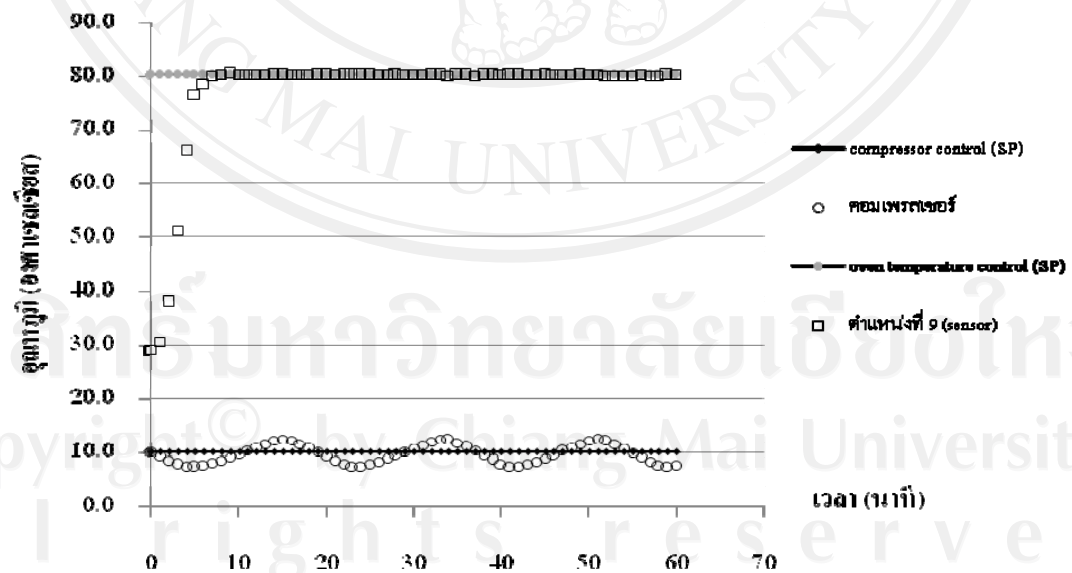
ภาพ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณถาดบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส



ภาพ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณถาดล่าง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 60 องศาเซลเซียส



ภาพ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณด้านบน และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 80 องศาเซลเซียส



ภาพ 4.12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเครื่องอบแห้งบริเวณกึ่งกลาง และอุณหภูมิของระบบทำความเย็น (คอมเพรสเซอร์) เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอบแห้งเป็น 80 องศาเซลเซียส

ค่าของอุณหภูมิเครื่องอบแห้งที่ตั้ง และระยะห่างจากหลอดอินฟราเรดที่ต่างกัน ส่งผลต่อการควบคุมอุณหภูมิของระบบควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้ง โดยเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้กับหลอดอินฟราเรดมากกว่า เกิดการตอบสนองในลักษณะพุ่งเกิน ไปจากค่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ โดยมีอุณหภูมิสูงถึง 42.9 องศาเซลเซียส (ภาพ 4.7) ทั้งนี้สิ่งที่กล่าวไว้ในตอนต้น การเกิดลักษณะพุ่งเกินนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID (วโรคม, 2550) การควบคุมสัญญาณป้อนกลับให้ถูกต้องด้วยค่าตอบสนองในช่วงเวลาสั้นก็ทำได้ยาก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของระยะห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรดที่อยู่ในระยะใกล้ จึงอาจส่งผลให้การควบคุมของระบบ PID ทำงานได้ยากขึ้น ในขณะที่เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.8) และเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ทุกระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด (ภาพ 4.9-4.12) พบว่าไม่เกิดการพุ่งเกินของอุณหภูมิในช่วงขึ้น

สำหรับลักษณะพุ่งเกินของอุณหภูมิที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม PID ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบวงปิด (closed-loop control) ที่ออกแบบให้เป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบ PID ระบบควบคุมจะนำเอาสัญญาณควบคุมต่างๆ มารวมกัน ทำให้ได้ผลตอบสนองที่มีความรวดเร็ว แม่นยำ และมีความเสถียรในสภาวะคงตัวดีมากกว่าการใช้ระบบควบคุมเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งอันเดียว (สรารุณี, 2546 ; สุมาลี, 2545 ; สุวลัย, 2539 ; อนุชา, 2549 ; อภิรักษ์, มปป.) ในกรณีการทดสอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ทำให้มีค่าผลต่างของข้อผิดพลาด (error) ที่น้อยกว่าการตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ค่า error ที่น้อยกว่าจึงเป็นแรงขับ (driving force) และส่งสัญญาณกลับไปให้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้น้อยกว่า ประกอบกับที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร น่าจะเกิดความร้อนสะสมได้มากกว่า เพราะมีระยะใกล้กับหลอดอินฟราเรด ดังนั้นจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่แท่งวัดอุณหภูมิวัดค่าได้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางถาดที่มีระยะใกล้กับหลอดอินฟราเรดเกิดอุณหภูมิลักษณะพุ่งเกิน อีกทั้งยังต้องใช้เวลานาน (ประมาณ 30 นาที หลังจากมีอุณหภูมิสูงสุด เท่ากับ 42.9 องศาเซลเซียส) ในการเข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบควบคุมอุณหภูมิที่สภาวะการทดสอบดังกล่าว นอกจากนี้เนื่องจากระบบควบคุมอุณหภูมิซึ่งเป็นระบบควบคุมชนิดหนึ่งของกระบวนการในทางวิศวกรรมโดยทั่วไปมักจะมีเวลาเฉื่อยเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ทำให้ความเร็วในการตอบสนอง (response time) ของระบบควบคุมรวมอาจช้าลง และการควบคุมกระบวนการทำได้ยาก เพราะอาจไม่สามารถปรับสภาพของกระบวนการที่กำลังเกิดขึ้นให้เข้าสู่สภาวะที่ต้องการ (set point) ได้ทันที (สุเชียร, 2540) ดังนั้นการเข้าสู่สภาวะคงที่ของระบบควบคุม เมื่อทำการทดสอบเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส หลังจากเกิด

ลักษณะฟุ้งเกินของอุณหภูมิ จึงใช้เวลานาน แต่เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่ภาวะคงที่ได้แล้ว พบว่าอุณหภูมิ มีความเสถียรดี

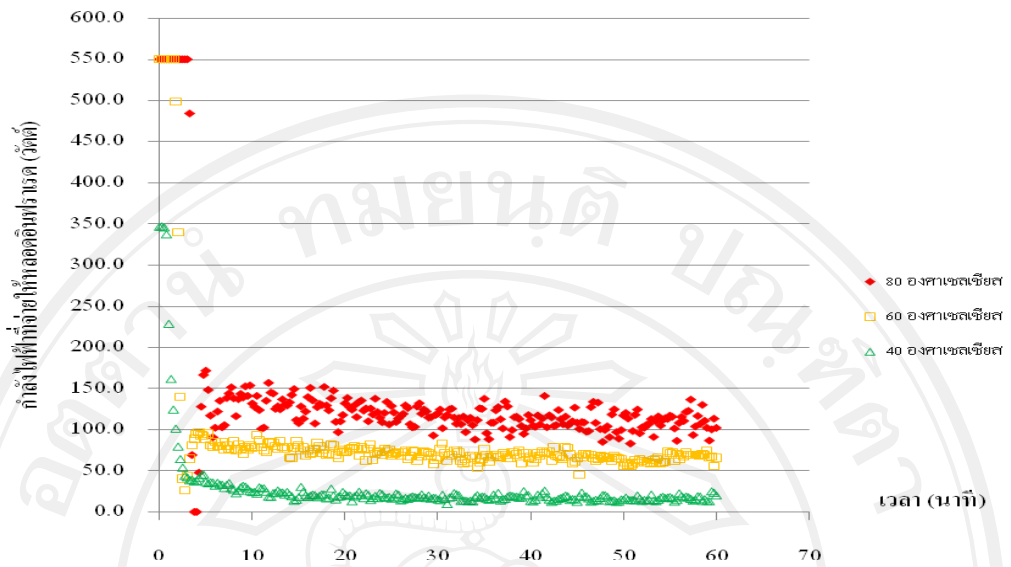
ข. ระบบควบคุมอุณหภูมิของระบบทำความเย็น

เมื่อพิจารณาจากภาพ 4.7-4.12 ที่แต่ละระดับของอุณหภูมิที่ตั้งค่า คือ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเส้นกราฟอุณหภูมิการทำงานของระบบทำความเย็น (มีค่าตั้งเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส) ของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดนั้น มีช่วงเวลากการตอบสนองค่อนข้างคงที่ ช่วงขึ้นของอุณหภูมิไปสู่ค่าสูงสุด และการลดลงของอุณหภูมิไปยังค่าต่ำสุดนั้น อยู่ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน และมีความสม่ำเสมอค่อนข้างมาก ลักษณะนี้เกิดจากการควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ด้วยระบบการควบคุมแบบเปิด-ปิด ซึ่งมีการตั้งค่าสูงสุด (maximum) และค่าต่ำสุด (minimum) ของค่าตอบสนองไว้เพื่อกำหนดตำแหน่งปิด และตำแหน่งเปิดของตัวควบคุมระบบ (อิเล็กทรอนิกส์, มปป.) ข้อมูลที่ได้จึงแสดงถึงระบบควบคุมอุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นที่สามารถทำงานได้ตามปกติ

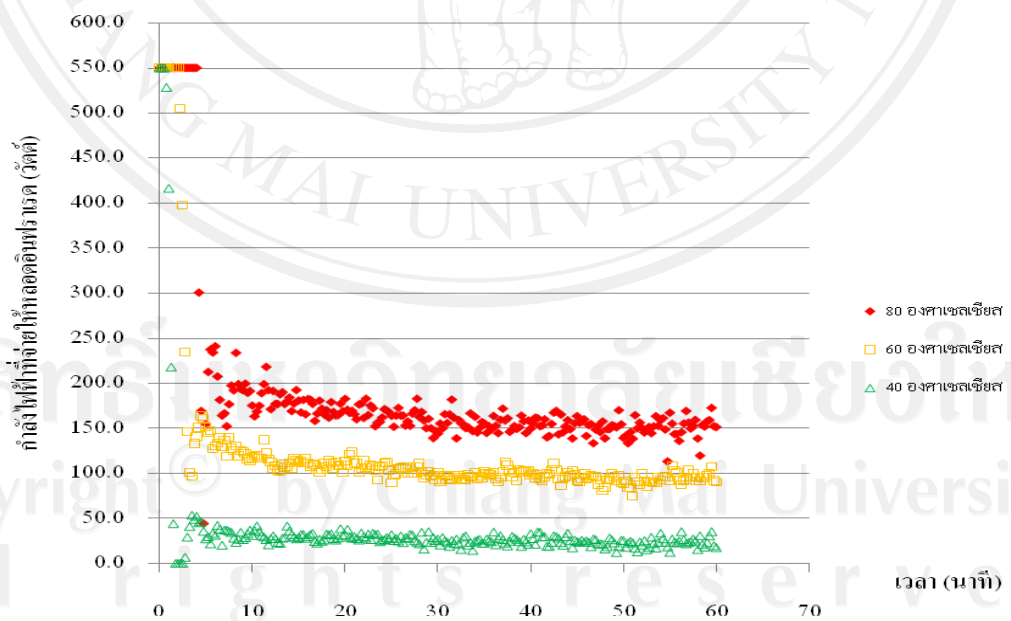
5) ระดับพลังงานที่จ่ายให้แก่หลอดอินฟราเรด

พลังงานที่จ่ายให้แก่แหล่งกำเนิดรังสีอินฟราเรด (หลอดอินฟราเรด) เมื่อผันแปรระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดพลังงานกับพื้นที่รับรังสี และระดับของค่าอุณหภูมิที่ตั้งของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด แสดงในภาพ 4.13-4.14

การทดสอบโดยวางถาดอบแห้งไว้ที่ชั้นบน ซึ่งมีระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.13) ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนช่วงต้น พบว่ากำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดมีค่าสูง หรืออาจสูงสุดเท่ากับค่ากำลังไฟฟ้าของหลอดอินฟราเรด คือ 550 วัตต์ สำหรับค่าตั้งที่อุณหภูมิ 60 และ 80 องศาเซลเซียส ค่ากำลังไฟฟ้า (วัตต์) เฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดตั้งแต่เริ่มต้นจนครบระยะเวลาทดสอบ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 28.19, 87.56 และ 141.01 วัตต์ สำหรับค่าตั้งที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตาราง 4.1)



ภาพ 4.13 กำลังไฟฟ้า (วัตต์) เหลือที่จ่ายให้หลอดรีดิวท์ไฟราเรดในขณะที่แผ่รังสีโดยตรงสู่ ถาดอบแห้งชั้นบน เป็นเวลา 60 นาที



ภาพ 4.14 กำลังไฟฟ้า (วัตต์) เหลือที่จ่ายให้หลอดรีดิวท์ไฟราเรดในขณะที่แผ่รังสีโดยตรงสู่ ถาดอบแห้งชั้นล่าง เป็นเวลา 60 นาที

สำหรับการทดสอบเมื่อวางถาดอบแห้งไว้ที่ชั้นล่าง ซึ่งมีระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ภาพ 4.14) ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดตั้งแต่เริ่มต้นจนครบระยะเวลาทดสอบ 60 นาที มีค่าเท่ากับ 37.60, 124.77 และ 190.65 วัตต์ สำหรับค่าตั้งที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตาราง 4.1)

เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าตั้งอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ ได้แก่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดนั้นเพิ่มขึ้นตามระดับค่าตั้งของอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นไปตามกฎของโอห์ม เมื่อความต้านทาน (R) มีค่าคงที่แล้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) จะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้า (I) ในขณะเดียวกัน จะได้ว่ากำลังไฟฟ้า (P) จะแปรผันตามกระแสไฟฟ้า (I^2) (อภิรักษ์, 2551) จากภาพ 4.13 และภาพ 4.14 จะเห็นว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดที่มีค่าตั้งอุณหภูมิผิวนร้อนเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสนั้น มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดที่มีค่าตั้งอุณหภูมิผิวนร้อนเท่ากับ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นการตั้งค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ย่อมส่งผลโดยตรงให้หลอดรังสีอินฟราเรดทำงานมากขึ้น และมีปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้กับการทำงานของหลอดอินฟราเรดที่สูงกว่าการใช้ค่าตั้งอุณหภูมิที่ระดับต่ำกว่า

ตาราง 4.1 กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดรังสีอินฟราเรดของเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด (IRVD)

ค่ากำลังไฟฟ้า (ระหว่าง ปฏิบัติการ 60 นาที)	กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรดของเครื่อง IRVD (วัตต์)					
	ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 7.1 เซนติเมตร (ชั้นบน)			ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร (ชั้นล่าง)		
	อุณหภูมิปฏิบัติการที่ใช้กำหนดอุณหภูมิผิวนร้อนของถาดอบแห้ง (องศาเซลเซียส)					
	80	60	40	80	60	40
ผลรวม	33,983.8	21,102.2	6,792.6	45,946.3	30,068.9	9,061.4
ค่าเฉลี่ย	141.0	87.6	28.2	190.6	124.8	37.6
ค่ามากที่สุด	550.00	550.0	347.3	550.0	550.0	550.0
ค่าน้อยที่สุด	0.0	26.2	9.4	44.6	75.2	0.0

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางนี้เป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 6 ซ้ำ และบันทึกค่าทุกๆ 15 วินาที

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผิววัสดุร้อน (ในที่นี้คือพื้นถาดอบแห้ง) ด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร มีความสม่ำเสมอค่อนข้างดีกว่าที่ระยะห่าง 7.1 เซนติเมตร และเนื่องจากไม่พบการเกิดลักษณะฟุ้งเกินของอุณหภูมิในบางตำแหน่งบนถาดอบแห้งที่ทำการทดสอบในช่วงระยะเวลา 60 นาที Sakai and Hanzawa (1994) รายงานว่าการควบคุมอุณหภูมิผิวหน้าของอาหารเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับกระบวนการทำแห้ง หากเกิดการเพิ่มของอุณหภูมิที่บริเวณผิวของอาหารจนถึงระดับสูงเกินไป ย่อมส่งผลทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายด้อยลง ดังนั้นในการศึกษาต่อไป จึงเลือกใช้การทำแห้งที่ระยะห่างจากหลอดอินฟราเรด 20.1 เซนติเมตร หรือชั้นล่าง แม้ว่าอาจต้องใช้พลังงานไฟฟ้ารวมในปริมาณที่สูงกว่าการทำแห้งที่ชั้นบน เพื่อให้อาหารที่ต้องการทำแห้งมีโอกาสได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดทั้งถาดอย่างสม่ำเสมอให้มากที่สุดในช่วงกระบวนการทำแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.1.2 ผลของการเตรียมตัวอย่างน้ำส้มที่มีต่อสมบัติของโฟมน้ำส้ม

การเตรียมโฟมน้ำส้มก่อนนำไปทำแห้งให้เป็นผงโดยวิธีโฟมเมต โดยการใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟม และสารที่ทำให้โฟมคงตัวที่ระดับความเข้มข้นต่ำ ได้แก่ สารละลาย methocel ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ผสมกับสารละลาย whipping agent ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก เติมน้ำในส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 25, 30 หรือ 35°Brix ด้วยอัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมต่อส่วนผสมน้ำส้ม เท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนัก ปริมาณการใช้ methocel และ whipping agent สามารถคำนวณเป็นน้ำหนักของสารที่ใช้ได้ ดังแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ปริมาณการใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟม 2 ชนิด

อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมต่อส่วนผสมน้ำส้ม (ปริมาณโดยน้ำหนัก)	ปริมาณการใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟม, กรัม (ในส่วนผสมทั้งหมด 100 กรัม)		
	methocel type A	whipping agent	รวม 2 ชนิด
1 : 1	0.750	2.500	3.250
1 : 2	0.5	1.670	2.170
1 : 3	0.375	1.250	1.625
1 : 4	0.300	1.0	1.300

หลังจากนำส่วนผสมทั้งหมดมาตีปั่นให้เป็นโฟม เป็นเวลา 5-20 นาที โดยเก็บตัวอย่าง โฟมทุกๆ 5 นาที นำไปวิเคราะห์สมบัติทางด้านกายภาพของโฟม ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.3-4.5 (ภาพ ซ-1 ภาพ ซ-2 และภาพ ซ-3)

ตาราง 4.3 ความคงตัวของโฟมน้ำส้มวัดจากอัตราการแยกตัวของของเหลวจากโฟม (syneresis of foam) โดยใช้สารก่อโฟมร่วม 2 ชนิด

อัตราส่วนของ สารก่อโฟมต่อ ส่วนผสมน้ำส้ม (ปริมาณโดย น้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ ตีปั่น (นาที)	อัตราการแยกตัวของของเหลว (มิลลิลิตรต่ออนาที)		
		ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำส้ม (°Brix)		
		น้ำส้ม 25°Brix	น้ำส้ม 30°Brix	น้ำส้ม 35°Brix
1 : 1	5	0.007 ^{aA} ± 0.006	0.014 ^{aAB} ± 0.006	0.025 ^{aB} ± 0.010
	10	0.008 ^{aA} ± 0.007	0.016 ^{abAB} ± 0.005	0.023 ^{aB} ± 0.007
	15	0.008 ^{aA} ± 0.007	0.016 ^{abAB} ± 0.006	0.022 ^{aB} ± 0.007
	20	0.009 ^{aA} ± 0.007	0.017 ^{abAB} ± 0.005	0.023 ^{aB} ± 0.007
1 : 2	5	0.027 ^{bA} ± 0.017	0.023 ^{abcA} ± 0.003	0.033 ^{aA} ± 0.010
	10	0.027 ^{bA} ± 0.014	0.025 ^{abcdA} ± 0.002	0.035 ^{aA} ± 0.011
	15	0.028 ^{bA} ± 0.011	0.025 ^{abcdA} ± 0.002	0.037 ^{aA} ± 0.009
	20	0.027 ^{bA} ± 0.011	0.029 ^{abcdeA} ± 0.006	0.037 ^{aA} ± 0.011
1 : 3	5	0.038 ^{bcA} ± 0.008	0.030 ^{bcdA} ± 0.005	0.034 ^{aA} ± 0.007
	10	0.034 ^{bcA} ± 0.008	0.035 ^{cdeA} ± 0.008	0.037 ^{aA} ± 0.007
	15	0.036 ^{bcA} ± 0.009	0.037 ^{cdefA} ± 0.012	0.037 ^{aA} ± 0.008
	20	0.036 ^{bcA} ± 0.009	0.039 ^{defA} ± 0.014	0.038 ^{aA} ± 0.010
1 : 4	5	0.051 ^{cA} ± 0.007	0.044 ^{efA} ± 0.006	0.057 ^{bB} ± 0.016
	10	0.045 ^{bcA} ± 0.008	0.051 ^{fA} ± 0.011	0.033 ^{aA} ± 0.006
	15	0.050 ^{cA} ± 0.008	0.044 ^{efA} ± 0.009	0.034 ^{aA} ± 0.006
	20	0.049 ^{cA} ± 0.013	0.042 ^{efA} ± 0.013	0.030 ^{aA} ± 0.001

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแนวนอนเดียวกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตาราง 4.4 ค่าความหนาแน่นของโฟมน้ำส้ม (foam density) โดยใช้สารก่อโฟมร่วม 2 ชนิด

อัตราส่วนของ สารก่อโฟมต่อ ส่วนผสมน้ำส้ม (ปริมาณโดย น้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ ตีขึ้น (นาที)	ค่าความหนาแน่นของโฟม (กรัมต่อมิลลิลิตร)		
		ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำส้ม (°Brix)		
		น้ำส้ม 25°Brix	น้ำส้ม 30°Brix	น้ำส้ม 35°Brix
1 : 1	5	0.225 ^{aA} ± 0.020	0.247 ^{aAB} ± 0.035	0.312 ^{aCD} ± 0.058
	10	0.247 ^{abAB} ± 0.023	0.272 ^{abcABCD} ± 0.035	0.317 ^{aD} ± 0.030
	15	0.256 ^{abcABC} ± 0.020	0.286 ^{abcdBCD} ± 0.029	0.318 ^{aD} ± 0.022
	20	0.262 ^{abcdABCD} ± 0.022	0.287 ^{abcdBCD} ± 0.024	0.320 ^{aD} ± 0.024
1 : 2	5	0.276 ^{abcdeA} ± 0.055	0.265 ^{abA} ± 0.009	0.309 ^{aA} ± 0.015
	10	0.280 ^{abcdeA} ± 0.045	0.274 ^{abcA} ± 0.017	0.317 ^{aA} ± 0.025
	15	0.278 ^{abcdeA} ± 0.029	0.282 ^{abcdA} ± 0.015	0.327 ^{aA} ± 0.023
	20	0.275 ^{abcdeA} ± 0.023	0.283 ^{abcdA} ± 0.023	0.312 ^{aA} ± 0.027
1 : 3	5	0.316 ^{cdefA} ± 0.043	0.284 ^{abcdA} ± 0.006	0.329 ^{aA} ± 0.011
	10	0.302 ^{bcdefA} ± 0.016	0.290 ^{abcdA} ± 0.020	0.326 ^{aA} ± 0.014
	15	0.303 ^{bcdefA} ± 0.018	0.315 ^{bcdeA} ± 0.047	0.335 ^{aA} ± 0.012
	20	0.297 ^{bcdefA} ± 0.024	0.306 ^{bcdeA} ± 0.044	0.326 ^{aA} ± 0.017
1 : 4	5	0.346 ^{fA} ± 0.060	0.325 ^{cdeA} ± 0.007	0.452 ^{bB} ± 0.002
	10	0.321 ^{defA} ± 0.012	0.348 ^{eA} ± 0.019	0.344 ^{aA} ± 0.002
	15	0.328 ^{efA} ± 0.005	0.335 ^{deA} ± 0.011	0.332 ^{aA} ± 0.006
	20	0.333 ^{efA} ± 0.035	0.319 ^{cdeA} ± 0.032	0.322 ^{aA} ± 0.008

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

All rights reserved

ตาราง 4.5 ค่าไอเวอร์รันของโพนน้ำส้ม โดยใช้สารก่อโพนร่วม 2 ชนิด

อัตราส่วนของ สารก่อโพนต่อ ส่วนผสมน้ำส้ม (ปริมาณโดย น้ำหนัก)	เวลาที่ใช้ ตีปั่น (นาที)	ค่าไอเวอร์รันของโพน (ร้อยละ)		
		ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำส้ม (°Brix)		
		น้ำส้ม 25°Brix	น้ำส้ม 30°Brix	น้ำส้ม 35°Brix
1 : 1	5	386.61 ^{fd} ± 42.19	357.91 ^{ecd} ± 63.90	273.42 ^{bab} ± 66.38
	10	344.55 ^{efbcd} ± 42.63	314.85 ^{cdeabcd} ± 52.66	262.41 ^{bab} ± 34.19
	15	327.6 ^{defabcd} ± 34.44	292.91 ^{abcdeabc} ± 40.04	261.06 ^{bab} ± 25.54
	20	318.15 ^{cdefabcd} ± 35.84	291.15 ^{abcdeabc} ± 33.29	257.84 ^{ba} ± 26.75
1 : 2	5	305.98 ^{bcdA} ± 78.23	320.89 ^{deA} ± 13.47	269.77 ^{ba} ± 18.00
	10	296.07 ^{abcdeA} ± 63.67	308.42 ^{cdeA} ± 26.31	261.78 ^{ba} ± 28.96
	15	294.67 ^{abcdeA} ± 42.86	295.05 ^{bcdA} ± 21.72	250.69 ^{ba} ± 23.54
	20	297.90 ^{abcdeA} ± 34.62	295.61 ^{bcdA} ± 32.63	267.79 ^{ba} ± 30.70
1 : 3	5	249.17 ^{abcdA} ± 44.42	293.52 ^{abcdeA} ± 7.66	247.38 ^{ba} ± 11.78
	10	261.95 ^{abcdA} ± 18.50	286.57 ^{abcdeA} ± 27.89	251.08 ^{ba} ± 15.00
	15	260.46 ^{abcdA} ± 21.07	260.14 ^{abcdA} ± 58.69	241.16 ^{ba} ± 11.70
	20	268.05 ^{abcdeA} ± 28.26	270.32 ^{abcdA} ± 58.33	251.27 ^{ba} ± 18.06
1 : 4	5	220.89 ^{ab} ± 50.85	243.47 ^{abcB} ± 7.47	152.94 ^{aA} ± 1.19
	10	239.48 ^{abcB} ± 12.43	221.62 ^{ab} ± 17.07	232.47 ^{bb} ± 2.06
	15	232.32 ^{abB} ± 5.36	233.04 ^{abB} ± 11.06	244.03 ^{bb} ± 5.86
	20	229.54 ^{abB} ± 36.73	251.90 ^{abcdB} ± 36.80	254.78 ^{bb} ± 9.35

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ลิขสิทธิ์ © by Chiang Mai University
All rights reserved

1) ความคงตัวของโพนน้ำส้ม

การทดสอบความคงตัวของโพนน้ำส้ม โดยการวัดอัตราการแยกตัวของของเหลวจากโพน (syneresis rate) พบว่าอัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้ม ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และเวลาที่ใช้ตีปั่น โพน ส่งผลต่อความคงตัวของโพนน้ำส้ม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงในตาราง 4.2 โดยจะเห็นว่าปัจจัยที่ใช้เตรียมโพนซึ่งส่งผลค่อนข้างมากต่อความคงตัวของโพนน้ำส้ม ได้แก่ การใช้อัตราส่วน 1:1 และ 1:4 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25 และ 35°Brix โดยที่การใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อน้ำส้ม 1:1 โดยน้ำหนัก และมีส่วนผสมน้ำส้ม 25°Brix ที่ใช้เวลาตีปั่น 5 นาที ทำให้ได้โพนที่มีความคงตัวดีที่สุด คือมีอัตราการแยกตัวของของเหลวที่วัดได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.007 มิลลิลิตรต่อ นาที ซึ่งใกล้เคียงกับโพนที่ใช้เวลาตีปั่น 10-20 นาที และโพนที่ใช้ส่วนผสมน้ำส้ม 30°Brix ด้วย ($P > 0.05$) ในขณะที่โพนน้ำส้มดังกล่าวมีอัตราการแยกตัวของของเหลวแตกต่างจากการเตรียมที่สถานะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

หากพิจารณาที่อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้ม พบว่าการใช้ในอัตราสูง คือมีการใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้โพนคงตัวในปริมาณมาก พบว่าโพนน้ำส้มมีความคงตัวดีในระดับสูงกว่าการใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้มที่ต่ำ หรือการใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้โพนคงตัวในปริมาณน้อยกว่า ปริมาณของสารที่ก่อให้เกิดโพนที่มีปริมาณมาก หรือมีความเข้มข้นสูงกว่า ช่วยลดแรงดึงผิวของฟองอากาศที่เกิดขึ้นได้มากกว่า ทำให้ฟองมีความเสถียร ไม่ยุบตัว และไม่แตกออกได้ง่าย (Thuwapanichayanan *et al.*, 2006) การแยกตัวของของเหลวจึงมีน้อยกว่า ผลการศึกษาในครั้งนี้ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Karim and Wai (1999b) ที่รายงานว่า การทำโพนน้ำส้ม หรือโพนน้ำมะม่วง (mango puree) เมื่อใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนมากขึ้น ทำให้มีอัตราการแยกตัวของของเหลวของโพนน้ำส้ม หรือน้ำมะม่วงที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Karim and Wai (1999a ; 1999b) ที่รายงานว่า อัตราการแยกตัวของของเหลวของโพนน้ำมะม่วงมีค่าต่ำลงเมื่อใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้โพนคงตัวที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาการใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่างกัน โดยภาพรวมพบว่า การที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมดเพิ่มขึ้น โดยการเติมมอลโตเดกซ์ทรินเพื่อปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในน้ำส้ม ส่งผลให้โพนน้ำส้มมีอัตราการแยกตัวของ

ของเหลวมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุจากการเพิ่มปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดทำให้ ส่วนผสมน้ำส้มมีความหนืดมากขึ้น เมื่อตีปั่นส่วนผสมน้ำส้มที่มีความหนืดสูงจนก่อ โฟมจะทำให้ ได้โฟมที่มีลักษณะเปียก (wet foam) คือมีของเหลวอยู่ในโฟมมากขึ้น เมื่อวิเคราะห์ค่าความคงตัวของ โฟมน้ำส้ม โดยการวัดอัตราการแยกตัวของของเหลว ซึ่งสามารถไหลแยกตัวออกจาก โครงสร้าง โฟมผ่านไปตาม Plateau borders ด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity) (Mccarthy *et al.*, 1990) ลงไปสู่ลักษณะ ด้านล่างที่รองรับอยู่ จึงวัดปริมาณของเหลวที่แยกตัวออกจาก โฟมหลังจากตีปั่นส่วนผสมที่มี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดต่อหน่วยเวลาได้มากกว่าการวัดอัตราการแยกตัวของของเหลวที่ ใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดน้อยกว่า นอกจากนี้ความหนืดของ ส่วนผสมที่มากขึ้นอาจมีระดับความหนืดที่เพิ่มขึ้นจนเกินระดับที่ปริมาตรของอากาศที่จะเข้ามา รวมตัว (Karim and Wai, 1999a) ทำให้เกิดฟองที่มีขนาดใหญ่ และฟองมีโอกาสรวมตัวเป็นขนาดที่ ใหญ่ขึ้นหลังจากตีปั่นแล้วได้ง่าย แรงตึงผิวของฟองอากาศเพิ่มสูงขึ้น ฉะนั้นฟองจึงมีความแข็งแรง น้อยลง

ระยะเวลาที่ใช้ตีปั่น โฟมน้ำส้ม ส่งผลเป็นอย่างมากต่อโฟมน้ำส้มที่เตรียมจากน้ำส้มที่มี ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 35°Brix ที่ได้จากการใช้ปริมาณสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้ โฟมคงตัวระดับต่ำสุด คือที่อัตราส่วน 1:4 โดยน้ำหนัก ($P \leq 0.05$) โดยที่เวลาตีปั่น 5 นาที ทำให้ได้ โฟมที่มีอัตราการแยกตัวของของเหลวสูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 0.057 มิลลิลิตรต่อนาที และมีอัตรา การแยกตัวของของเหลวลดลงเมื่อใช้เวลาตีปั่นมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Falade *et al.* (2003) ในการทำแห้ง cowpea paste ด้วยวิธีโฟมเมตโดยใช้ egg albumin เป็นสารที่ก่อให้เกิดโฟม ซึ่งรายงานว่าการใช้เวลาตี โฟมนานขึ้นทำให้โฟมที่ได้มีความเสถียรดีขึ้น

2) ความหนาแน่นของโฟมน้ำส้ม

การทดสอบความหนาแน่นของ โฟมน้ำส้ม ที่เตรียมจากส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณ ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ปริมาณสารที่ก่อให้เกิดโฟม และใช้เวลาตีปั่นต่างกัน พบว่าปัจจัย เหล่านี้มีผลต่อความหนาแน่นของ โฟมน้ำส้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังตาราง 4.4 สภาวะที่ใช้ในการทดลองต่างๆ ทำให้ได้โฟมน้ำส้มที่มีความหนาแน่นระหว่าง 0.225-0.452 กรัมต่อ มิลลิลิตร และระดับของปัจจัยที่ใช้เตรียม โฟมน้ำส้มที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของ โฟมค่อนข้างมาก ได้แก่ การใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมที่อัตราส่วนสูง (อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) และ การใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในปริมาณมาก

เมื่อใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมต่อส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25°Brix ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาตีปั่น 5 นาที จะทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด เท่ากับ 0.225 กรัมต่อมิลลิลิตร ใกล้เคียงกับการใช้เวลาตีโฟมที่เวลาอื่นๆ และการใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 30°Brix ที่ใช้เวลาตีปั่น 5 และ 10 นาที ($P>0.05$) ความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมที่ได้จากการใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวที่อัตราส่วนสูงขึ้น หรือใช้ในปริมาณมากขึ้น ส่งผลทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Karim and Wai (1999a ; 1999b) ในการเตรียมโฟมน้ำมะเฟือง ที่รายงานว่าเมื่อใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟมที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ได้โฟมที่มีความหนาแน่นลดลง และสอดคล้องกับการรายงานของ Karim and Wai (1999b) ที่รายงานว่าในการเตรียมโฟมน้ำส้ม และโฟมน้ำมะม่วงที่มีความหนาแน่นลดลง เมื่อใช้วัตถุเจือปนอาหารเป็นสารก่อโฟมที่มากขึ้น

โดยภาพรวมแล้วเวลาที่ใช้ในการตีปั่นให้เกิดโฟมจะส่งผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมน้ำส้ม กล่าวคือ เมื่อใช้เวลาตีปั่น โฟมนานขึ้นทำให้โฟมที่ได้มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องจากการตีปั่น โฟมนานขึ้น เป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่สูงอย่างต่อเนื่องให้กับโฟมน้ำส้ม ส่งผลให้ผนังฟองอากาศมีความบางมากยิ่งขึ้น ทำให้ปริมาตรต่อหน่วยของโฟมลดลง และค่าความหนาแน่นจึงสูงขึ้น Windhab and Tiemeier (1990) รายงานไว้ว่า การตีปั่น โฟมนานอาจส่งผลทำให้โปรตีนบริเวณผิวของฟอง (foam laminae หรือ thin liquid films) เกิดการเสียหายได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการเสียหายโครงสร้างโฟม และโฟมไม่มีความคงตัว ทำให้ยุบตัว และแตกออกได้ง่าย หากใช้เวลาตีปั่นโฟมมากขึ้น

โฟมน้ำส้มที่มีส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 35°Brix และใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมที่อัตราส่วนต่ำสุด จะมีความหนาแน่นลดลงตามระยะเวลาในการตีปั่น โดยพบว่าที่เวลาตีปั่น 5 นาที โฟมน้ำส้มมีค่าความหนาแน่นสูงสุด แตกต่างจากความหนาแน่นของโฟมที่ใช้เวลาตีปั่น 10-20 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P\leq 0.05$) การใช้เวลาตีปั่นนานขึ้น ทำให้โฟมน้ำส้มที่มีส่วนผสมสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวกับส่วนผสมน้ำส้ม 35°Brix จะมีความหนาแน่นลดลง ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาของ Falade *et al.* (2003) ในการทำโฟม cowpea paste โดยใช้ egg albumin เป็นสารที่ก่อให้เกิดโฟม เมื่อตีปั่นโฟมเป็นเวลา 3-21 นาที พบว่าโฟมมีความหนาแน่นเป็นสัดส่วนผกผันกับเวลาที่ใช้ตีปั่น ทั้งนี้เนื่องจากการตีปั่น โฟมเป็นการเติมอากาศให้กับระบบโฟม ในช่วงแรกของการตีโฟม (ตีปั่น 5 นาที) ช่วยลดแรงตึงผิวของส่วนที่เป็นของเหลว (liquid phase) ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุน และมีความหนาแน่นน้อยลง เมื่อ

ดีโฟมต่อไปจึงเป็นการยิ่งช่วยลดแรงตึงผิวได้มากขึ้น ฟองมีความแข็งแรงมากขึ้น และสามารถกักอากาศได้มากขึ้น ทำให้ได้โฟมที่ได้มีอัตราการแยกตัวของของเหลวลดลง ความหนาแน่นลดลง และมีโอเวอร์รันเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาตีปั่นโฟมนานขึ้น

การใช้มอลโตเดกซ์ทรินในการปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวในปริมาณมาก ส่งผลให้โฟมมีความหนาแน่นมาก และอาจส่งผลให้โฟมมีความหนืดเพิ่มขึ้นด้วย จะเห็นได้จากตาราง 4.4 ว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 35°Brix มีค่ามากกว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของโฟมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25 และ 30°Brix คุ่มเกล้า (2551) รายงานว่าการศึกษากการผลิตน้ำกระเทียมดองผงโดยวิธีอบแห้งแบบโฟมแมต พบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารก่อโฟม methocel และ maltodextrin นั้นมีผลต่อค่าความหนืดของของผสม และคุณสมบัติของโฟมน้ำกระเทียมดอง Duthathai (2005) รายงานว่า การผลิตโฟมนมข้าวโพด โดยใช้มอลโตเดกซ์ทรินที่มีความเข้มข้นสูงส่งผลให้โฟมที่ได้มีความหนาแน่น และอัตราการแยกตัวของของเหลวสูงขึ้น รวมทั้งมีค่าโอเวอร์รันที่ลดลง เนื่องจากมอลโตเดกซ์ทรินเป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสายโพลีเมอร์ของแซคคาไรด์ เมื่อนำมาใช้เป็นวัตถุเจือปนเติมลงในอาหาร ทำให้ช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางด้านความเป็นเนื้อ (body) ของอาหารได้ด้วย (อรทัย, 2547) จึงน่าจะทำให้มีความหนาแน่น และความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Falade *et al.* (2003) ที่รายงานว่าความหนาแน่นของโฟม cowpea paste ลดลง เมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดของ cowpea paste ลดลง และมีความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดของ cowpea paste สูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟมจนถึงระดับที่อาจส่งผลให้ความหนืดของส่วนผสมที่ดีให้เกิดโฟมเพิ่มขึ้นมากเกินไปเกินกว่าขอบเขตของปริมาตรสูงสุดของอากาศจะสามารถแทรกเข้าไปรวมตัวได้ ทำให้ความสามารถในการเก็บกักอากาศในโฟมลดลง ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของโฟมมีมากขึ้น (Karim and Wai, 1999b) นอกจากนี้แล้ว เมื่อของเหลวมีความหนืดเพิ่มขึ้น เวลาปั่นให้เกิดโฟมจะทำให้ได้โฟมที่มีของเหลวอยู่ในโครงสร้างมากขึ้น ย่อมส่งผลทำให้ปริมาตรของฟองอากาศลดลง ดังนั้นความหนาแน่นของโฟมน้ำส้มจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น

3) โอเวอร์รันของโฟมน้ำส้ม

การทดสอบค่าโอเวอร์รันของโฟมน้ำส้ม เมื่อใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด $25-35^{\circ}\text{Brix}$ โดยใช้ปริมาณสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวในระดับ

ต่างๆ และใช้เวลาตีปั่นต่างกัน พบว่าปัจจัยที่ศึกษาส่งผลต่อค่าโอเวอร์รันของโพนน้ำส้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังแสดงในตาราง 4.5 โพนน้ำส้มที่ได้มีค่าโอเวอร์รันอยู่ระหว่างร้อยละ 152.94-386.61 โดยภาพรวมแล้ว เมื่อใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพนต่อส่วนผสมน้ำส้มที่สูงขึ้น หรือใช้ปริมาณสารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้คงตัวมากขึ้น ใช้ส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดน้อยลง และใช้เวลาตีปั่นน้อยลง จะทำให้ได้โพนน้ำส้มที่มีค่าโอเวอร์รันเพิ่มสูงขึ้น

โพนน้ำส้มที่เตรียมจากน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25°Brix ที่ใช้อัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโพน 1:1 โดยน้ำหนัก (มีความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้โพนคงตัวสูงที่สุด) จะทำให้ได้โพนน้ำส้มมีค่าโอเวอร์รันสูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 386.61 และเวลาที่ใช้ในการตีปั่นโพนไม่มีผลต่อค่าโอเวอร์รันของโพน ($P > 0.05$) ซึ่งค่าโอเวอร์รันที่ได้มีความแตกต่างจากโพนน้ำส้มที่เตรียมจากน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25°Brix ที่ใช้อัตราส่วนการใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนที่ 1:4 โดยน้ำหนัก ที่ใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนและทำให้โพนคงตัวที่มีความเข้มข้นต่ำที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Karim and Wai (1999a) ในการทำแห้งน้ำมะเฟืองด้วยวิธีโพนแมต ที่รายงานว่าเมื่อใช้ methocel เป็นสารก่อโพนที่ระดับความเข้มข้นสูงทำให้โพนมีโอเวอร์รันสูงขึ้นด้วย

ค่าโอเวอร์รันของโพนน้ำส้มมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่ใช้ในการตีปั่น แสดงว่าวัฏภาคอากาศในโครงสร้างโพนมีน้อยลงเมื่อใช้เวลาตีปั่น โพนนานขึ้น (ตีปั่นมากกว่า 5 นาที) โดยเฉพาะเมื่อใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนที่ความเข้มข้นสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Falade *et al.* (2003) ที่รายงานว่าการทำแห้ง cowpea paste ด้วยวิธีการทำโพนแมต พบว่าการใช้สารที่ก่อให้เกิดโพนเป็น glyceryl monostearate (GMS) เตรียมโพน cowpea paste นั้น การใช้เวลาตีปั่นโพนที่นานขึ้น ทำให้โพนเกิดการยุบตัวมากขึ้น เมื่อฟองยุบตัวทำให้ปริมาตรของอากาศลดลง การแยกตัวของของเหลวมีมากขึ้น ค่าโอเวอร์รันของโพนน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25°Brix เมื่อใช้เวลาตีปั่นโพนมากกว่า 5 นาที มีค่าลดลง ปรากฏการณ์การยุบตัวของโพน หรือเรียกว่า “fatigue phenomena” (ครุณี, 2550) เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้เวลาตีปั่นโพนนานขึ้น ทำให้ผนังฟองที่เป็นชั้นของของเหลวบางลงเมื่อได้รับแรงเฉือนอย่างสูงจากการตีปั่น ทำให้ทนต่อแรงกระทำทางกลได้น้อยลง (Karim and Wai, 1999b) ฟองจึงแตก ปริมาตรของโพนต่อหน่วยน้ำหนักสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความหนาแน่นของโพนที่มากขึ้นด้วย (ตาราง 4.4)

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการใช้สารที่ก่อให้เกิดโฟม 1:4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีการใช้ปริมาณสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวในปริมาณที่น้อยที่สุด พบว่าเมื่อใช้เวลาตีปั่นให้เกิดโฟมเป็นเวลา 5 นาที จะทำให้ได้โฟมที่มีค่าโอเวอร์รันของโฟมที่เตรียมจากน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 35°Brix มีค่าต่ำที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 152.94 หลังจากนั้นเมื่อใช้เวลาตีปั่นเป็นเวลา 10 นาที ค่าโอเวอร์รันของโฟมจึงเพิ่มขึ้น และมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อใช้เวลาตีปั่นให้เกิดโฟมต่อไปเป็นเวลา 20 นาที อย่างไรก็ตามระยะเวลาการตีโฟมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของอาหาร และคุณสมบัติของสารที่ก่อให้เกิดโฟมและสารที่ทำให้โฟมคงตัว และอาจรวมถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของส่วนผสมก่อนตีโฟม (นิธิยา และ ไพโรจน์, 2547)

เมื่อพิจารณาจากปริมาณการใช้มอลโตเดกซ์ทรินเพื่อปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในส่วนผสมน้ำส้ม (ตาราง 4.5) พบว่าส่วนผสมน้ำส้มที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินที่มากกว่า จะทำให้ได้โฟมที่มีค่าโอเวอร์รันที่ต่ำกว่า โฟมที่มีค่าโอเวอร์รันที่ต่ำกว่า โดยค่าโอเวอร์รันจะแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของโฟม น้ำส้ม ทั้งนี้เนื่องจากจากการเติมมอลโตเดกซ์ทรินน่าจะส่งผลให้โฟมมีความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับศึกษาของ Karim and Wai (1999b) ที่รายงานว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟมจนอาจถึงระดับที่ค่าความหนืดเพิ่มสูงเกินขอบเขตของปริมาตรสูงสุดของอากาศที่จะเข้าไปรวมตัว ทำให้โฟมที่ได้มีค่าโอเวอร์รันลดลง ในขณะที่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเตรียมโฟมน้ำมะเฟืองด้วย methocel ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 40 กรัมต่อกิโลกรัม (โดยน้ำหนัก) หากเปรียบเทียบค่าโอเวอร์รันของโฟมที่มีค่าโอเวอร์รันของโฟมที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวในปริมาณมากที่สุด ทำให้ได้โฟมที่มีค่าโอเวอร์รันสูงสุดเท่ากับร้อยละ 386.61 แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวที่ใช้ น่าจะยังอยู่ในระดับที่ส่งผลให้ส่วนผสมทั้งหมดมีความหนืดไม่เกินขอบเขตของปริมาตรสูงสุดของอากาศที่เข้าไปรวมตัวได้

จากการศึกษาสมบัติด้านความคงตัวของโฟมน้ำส้ม พบว่าการเตรียมน้ำส้มโดยใช้ส่วนผสมที่มีอัตราส่วนของสารที่ก่อให้เกิดโฟมและทำให้โฟมคงตัวต่อส่วนผสมน้ำส้มที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด 25°Brix ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก และใช้เวลาตีปั่น 5 นาที ทำให้ได้โฟมที่มีค่าโอเวอร์รันที่ดีที่สุด ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจึงเตรียมตัวอย่างของโฟมน้ำส้มตามสภาวะ และวิธีการดังกล่าวนี้

4.2 ผลของสถานะปฏิบัติการทำแห้งน้ำส้มด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดที่มีต่อสมบัติบางประการของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผง

เมื่อนำโพน้ำส้มที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีโพนุ่มตามสถานะที่ได้จากการศึกษาตอนที่ 4.2 นำมาทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 2 ระดับ ได้แก่ ที่อุณหภูมิ 40 หรือ 60 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 3 ระดับ ได้แก่ ความดันบรรยากาศปกติ (1.0 บาร์) หรือสถานะสุญญากาศที่ 0.5 หรือ 0.1 บาร์ โดยโพน้ำส้มตัวอย่างมีความหนาคงที่ 5 มิลลิเมตร นำน้ำส้มผงที่ได้จากแต่ละสถานะการทำแห้งมาทำการวิเคราะห์คุณลักษณะทางด้านเคมีและกายภาพ ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.6-4.9

4.2.1 ปริมาณน้ำอิสระ (ค่า a_w) ของน้ำส้มผง

จากการวิเคราะห์ค่า a_w ของน้ำส้มผง (ตาราง 4.6) พบว่าสถานะที่ใช้ทำแห้งโพน้ำส้มนั้นมีผลต่อค่า a_w ของน้ำส้มผงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับสถานะทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w สูงที่สุด เท่ากับ 0.572 แตกต่างจากสถานะที่ใช้ทำแห้งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แสดงว่าน้ำส้มผงยังคงมีความชื้นเหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการทำแห้งมาก จากการสังเกต พบว่าลักษณะโพน้ำส้มยังมีความชื้น (ภาพ 4.15) อยู่มากกว่าโพน้ำส้มที่ผ่านการทำแห้งด้วยสถานะอื่นๆ (ภาพ 4.16-4.20) แม้ว่าผิวหนังโพน้ำส้มจะค่อนข้างแห้ง แต่เมื่อขูดเส้นโพน้ำส้มเพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ พบว่าภายในเนื้อโพน้ำส้มนั้นยังมีความชื้นอยู่สูงกว่าบริเวณผิวหนัง (ภาพ 4.21) ส่วนสถานะทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้สถานะสุญญากาศที่ความดัน 0.5 และ 0.1 บาร์ (ภาพ 4.17 และภาพ 4.19 ตามลำดับ) ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยที่ความดัน 0.1 บาร์นั้น ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w เฉลี่ยต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 0.438

สำหรับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติ (ภาพ 4.16) ทำให้ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w เท่ากับ 0.421 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกับน้ำส้มผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิเดียวกันภายใต้สถานะสุญญากาศ (ความดัน 0.5 และ 0.1 บาร์ ดังภาพ 4.18 และภาพ 4.20 ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) นอกจากนี้ ยังพบว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.1 บาร์นั้น ทำให้ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w ใกล้เคียงกับการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ที่ทุกระดับความดัน ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตาม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ความดัน 0.1 บาร์นั้น น้ำส้มผงที่ได้มีค่า a_w เฉลี่ยต่ำสุด คือมีค่าเท่ากับ 0.411 และมีค่าที่ต่ำกว่าน้ำส้มผงที่ได้จากสภาวะการทำแห้งอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตาราง 4.6 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำอิสระ (ค่า a_w) ในน้ำส้มผงที่ได้จากการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดต้นแบบที่สภาวะต่างๆ

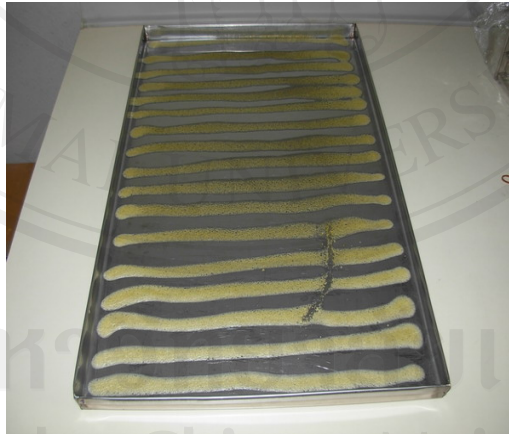
ความดันในการทำแห้ง (บาร์)	ปริมาณน้ำอิสระ (ค่า a_w) ในน้ำส้มผง	
	ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
0.1	0.438 ^{ab} ± 0.041	0.411 ^a ± 0.003
0.5	0.486 ^b ± 0.016	0.432 ^{ab} ± 0.025
1.0	0.572 ^c ± 0.061	0.421 ^{ab} ± 0.034

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างของโฟมน้ำส้ม จะเห็นว่าภายหลังการทำแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการทำแห้งที่ความดันต่ำสุด (เท่ากับ 0.1 บาร์) ทั้งที่ใช้อุณหภูมิทำแห้ง 40 และ 60 องศาเซลเซียส ทำให้ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w น้อยกว่าน้ำส้มผงที่ผ่านการทำแห้งที่ความดันระดับอื่นๆ ที่อุณหภูมิเดียวกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่โฟมยุบตัวหมดหลังจากให้ความร้อนประมาณ 10 นาที (ภาพ 4.19 และภาพ 4.20) เมื่อใช้อุณหภูมิทำแห้ง 40 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) จึงมีของเหลวที่แยกตัวออกมา จนมีลักษณะที่บางแนบติดกับพื้นถาดได้มากกว่าการทำแห้งที่ใช้ความดันระดับอื่นๆ ทำให้ได้รับพลังงานความร้อนจากการส่งผ่านของรังสีอินฟราเรดโดยตรงไปสู่โมเลกุลของน้ำในอาหารบริเวณผิวหน้าที่บางๆ ของน้ำส้มได้มากกว่าการทะลุทะลวงไปสู่วัสดุที่มีความหนาหรือความลึกเป็นกอง ส่วนที่สภาวะความดันอื่นๆ คือที่ความดันบรรยากาศปกติ และความดัน 0.5 บาร์นั้น โฟมน้ำส้มที่ได้หลังการทำแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้ว ยังคงมีลักษณะเป็นเส้นโฟม และมีความหนายิ่งกว่าโฟมน้ำส้มที่ผ่านการทำแห้งที่ความดัน 0.1 บาร์ เนื่องจากการระเหยของน้ำจากภายในออกไปที่ผิวหน้าอาจเกิดขึ้นได้ยาก และช้าลง ผลก็คือจึงยังมีความชื้นเหลืออยู่มากกว่า ดังภาพ 4.15-4.16 (ที่ความดัน 1.0 บาร์) และภาพ 4.17-4.18 (ที่ความดัน 0.5 บาร์) ทั้งนี้อำนาจทะลุทะลวงของรังสีอินฟราเรดอาจลดลงได้เมื่อวัสดุมีความหนามากขึ้น (ฉัตรชัย และคณะ, 2549)



ภาพ 4.15 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพ 4.16 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่ความดันบรรยากาศปกติ และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



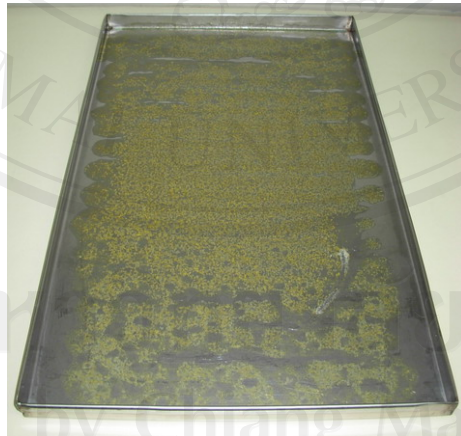
ภาพ 4.17 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.5 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพ 4.18 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.5 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพ 4.19 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.1 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพ 4.20 โฟมน้ำส้มหลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.1 \text{ bar}$) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพ 4.21 ฟองน้ำส้มที่เก็บได้หลังการทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศปกติ ($P = 1.0 \text{ bar}$) และภายใต้สภาวะสุญญากาศ ($P = 0.5$ และ 0.1 bar)

4.2.2 ค่าสีของน้ำส้มผง

การวิเคราะห์ค่าความสว่างของสี (ค่าสี L*) ของน้ำส้มผงหลังการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งอินฟราเรดแบบอินฟราเรดต้นแบบ (ตาราง 4.7) พบว่าค่าสี L* มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทำแห้งโพน้ำส้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับน้ำส้มที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศปกติมีค่าสี L* ต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 79.48 โดยค่าที่ได้มีความแตกต่างจากน้ำส้มที่ผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยสภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) แต่มีค่าใกล้เคียงกับน้ำส้มที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.5 บาร์ ($P > 0.05$)

เมื่อทำแห้งโพน้ำส้มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าความดันที่ใช้ไม่มีผลต่อค่าสี L* ของน้ำส้มผงที่ได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าที่สภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสูญญากาศ ($P = 0.5$ หรือ 0.1 บาร์) ค่าสี L* ของน้ำส้มผงที่ได้ไม่แตกต่างกับสภาวะการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตาราง 4.7 การเปรียบเทียบค่าสี L* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

ความดันในการทำแห้ง (บาร์)	ค่าสี L* ของผงน้ำส้ม	
	ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
0.1	90.47 ^b ± 0.27	87.67 ^b ± 1.31
0.5	85.30 ^{ab} ± 1.61	87.80 ^b ± 1.50
1.0	79.48 ^a ± 8.60	87.26 ^b ± 1.74

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตาราง 4.8 การเปรียบเทียบค่าสี a* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

ความดันในการทำแห้ง (บาร์)	ค่าสี a* ของผงน้ำส้ม	
	ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
0.1	-1.22 ^{ns} ± 0.55	-0.16 ^{ns} ± 0.53
0.5	0.98 ^{ns} ± 0.33	-0.98 ^{ns} ± 0.56
1.0	1.08 ^{ns} ± 3.55	-1.60 ^{ns} ± 1.19

หมายเหตุ: ns แสดงว่าข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ตาราง 4.9 การเปรียบเทียบค่าสี b^* ของผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ

ความดันในการทำแห้ง (บาร์)	ค่าสี b^* ของผงน้ำส้ม	
	ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
0.1	43.22 ^{ab} ± 0.28	48.41 ^{cd} ± 1.76
0.5	51.44 ^d ± 4.03	48.26 ^{cd} ± 1.75
1.0	39.51 ^a ± 2.09	47.16 ^{bc} ± 1.68

หมายเหตุ: ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกัน แสดงว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตาราง 4.8 แสดงค่าสีแดงและสีเขียว (ค่าสี a^*) ของน้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะต่างๆ โดยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด จากตาราง 4.8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำแห้ง ไม่มีผลต่อค่าสี a^* ของน้ำส้มผง ($P > 0.05$) ในขณะที่การทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศปกติ นั้น ค่าสี a^* ของน้ำส้มหลังผ่านกระบวนการทำแห้งมีค่ามากที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.08 ส่วนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศปกติ นั้น ค่าสี a^* ของน้ำส้มหลังผ่านกระบวนการทำแห้งมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ -1.60

ค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (ค่าสี b^*) ของน้ำส้มผงหลังผ่านกระบวนการทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรด แสดงดังตาราง 4.9 พบว่าค่าสี b^* มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการทำแห้ง โฟมน้ำส้มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สำหรับสภาวะในการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศปกติ นั้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสี b^* ต่ำที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 39.51 โดยมีค่าแตกต่างจากค่าสี b^* ของน้ำส้มผงที่เตรียมที่สภาวะอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) และน้ำส้มผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะสุญญากาศที่ความดัน 0.5 บาร์ มีค่าสี b^* สูงที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 51.44 แตกต่างจากสภาวะการทำแห้งอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เช่นกัน สำหรับน้ำส้มผงที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าสี b^* ไม่แตกต่างกันที่ทุกระดับความดันที่ใช้ในการทำแห้ง ($P > 0.05$) โดยการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศปกติ น้ำส้มผงที่ได้จะมีค่าสี b^* ก่อนข้างต่ำกว่าน้ำส้มผงที่ผ่านการทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาการทำแห้งที่ความดันบรรยากาศปกติ ที่อุณหภูมิทำแห้ง 40 และ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำไม่ได้มีอุณหภูมิสูงจนถึงระดับจุดเดือดของน้ำ (100 องศาเซลเซียส) การระเหย

ของน้ำน่าจะเกิดจากการระเหยของน้ำที่บริเวณผิวหนังเป็นส่วนใหญ่ เพราะอิทธิพลของการแผ่รังสีอินฟราเรดทำให้โมเลกุลของเหลวบริเวณผิวหนังสามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดโดยรอบไว้ได้มาก จนสามารถเอาชนะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลได้ จึงระเหยออกไปภายนอก การระเหยของน้ำ หรือความชื้นจากตัวโพน้ำสัมผัสลักษณะนี้จึงต่างจากการเดือดของเหลว และกลายเป็นไอ ณ อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ จากการศึกษาพบว่าการทำแห้งที่ความดัน 1.0 บาร์ และใช้อุณหภูมิทำแห้ง 40 และ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ภายหลังจากการทำแห้งโพนีมีการยุบตัวน้อย ของเหลวที่แยกตัวออกมาจากโพนแต่ละเส้นไม่ไหลมารวมกัน และยังคงรูปร่างของเส้นโพนที่บีบใกล้เคียงกับลักษณะเส้นโพนก่อนนำไปทำแห้ง โดยทั้งที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส เส้นโพนมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่สีของผิวโพนที่ผ่านการทำแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีสีค่อนข้างเข้มกว่า (ภาพ 4.15 และภาพ 4.16) อุณหภูมิที่ใช้ทำแห้งที่สูงกว่า จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิว และภายในเนื้อวัสดุมากขึ้น จึงเกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลได้มากขึ้น (สมชาติ, 2540) จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทำให้น้ำสัมผัสที่ได้มีค่า a_w ต่ำกว่าน้ำสัมผัสที่ผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ศิริโรตม์ (2545) ที่รายงานว่าการลดความชื้นของผักถั่วลิสงด้วยเครื่องอินฟราเรดเมื่อใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากัน การใช้อุณหภูมิมอบแห้งที่สูงกว่าทำให้ความชื้นของผักถั่วลิสงคงเหลืออยู่น้อยกว่า

การทำแห้งภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยเฉพาะที่ความดันต่ำ เท่ากับ 0.1 บาร์ พบว่าการขยายตัวของฟองอากาศขึ้นในช่วงแรกของการทำแห้งนั้น น่าจะเกิดจากการระเหยของของเหลวบางส่วนที่อยู่ภายใน ซึ่งที่ความดันต่ำ น้ำจะระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำลงด้วย ประกอบกับเมื่อน้ำภายในโพนมีการดูดซับพลังงานความร้อนจากรังสีอินฟราเรดได้มาก จึงเกิดการระเหยกลายเป็นไอจากภายในโพนอาหารภายใต้ความดันระดับต่ำได้ นอกจากนี้อากาศภายในโครงสร้างโพนมีการขยายตัวเนื่องจากเกิดความแตกต่างของความดันของฟองอากาศในโพนกับความดันภายนอก รวมทั้งการได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่องภายใต้ความดันคงที่ จึงเกิดการขยายปริมาตรออก ด้วยกลไกของการเกิดพลังงานจลน์ของโมเลกุลภายในวัตถุจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลลดลง และช่องว่างระหว่างโมเลกุลจะมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งเรียกว่า “การขยายตัวเชิงความร้อน” (โยชิอิโกะ, 2543) จึงเห็นฟองที่มีการค่อยขยายขนาดโตขึ้นในช่วงการทำแห้งประมาณ 10 นาทีแรก ของการทำแห้งที่ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 0.1 บาร์ ประกอบกับโพนที่เตรียมได้ก่อนทำแห้งอาจมีความเสถียรของโพนไม่มากพอ ส่งผลให้มีความต้านทานน้อยที่จะทนต่อสภาวะดังกล่าว โพนจึงแตกออกได้หมดภายใต้สภาวะการทำแห้งที่

ความดันต่ำ ดังนั้น เมื่อได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีอินฟราเรดโดยตรงสู่ตัวอาหารจึงเป็นการถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอาหารที่มีลักษณะชั้นบาง (ชั้นของของเหลว) ซึ่งเหมาะแก่การทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรด ทำให้น้ำระเหยได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งการเคลื่อนที่ของของเหลวในรูปน้ำที่ผิวหน้า และชั้นบางเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการระเหยน้ำจากภายในออกสู่ผิวหน้า (เรียวโซ, 2529 ; สมชาติ, 2540) และเมื่อน้ำระเหยได้มาก จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มฝงที่มีค่า a_w ที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Staack *et al.* (2007) ที่รายงานว่า การให้ความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดแก่พริกหยวกฝงซึ่งมีค่า a_w เท่ากับ 0.5 โดยกองพริกที่มีความหนา 8 มิลลิเมตรจะทำให้การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นอิทธิพลของการนำความร้อน ในขณะที่กองพริกที่มีความบางกว่า คือที่ 3 มิลลิเมตร จะเกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีอินฟราเรดได้มากกว่า

สำหรับการทำแห้งโพนน้ำส้มที่ใช้ความดันสูงกว่าทั้งที่ความดัน 0.5 และ 1.0 บาร์นั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของโพน หรือการขยายตัวเชิงความร้อนของฟองอากาศนั้นมีน้อยกว่าเมื่อได้รับความร้อนที่ระดับเท่ากัน ซึ่งเป็นไปตามกฎของบอยล์ที่ว่า เมื่ออุณหภูมิคงที่ การเพิ่มความดันเป็น 2 เท่า ทำให้ปริมาตรของก๊าซมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรที่ขยายตัวออกไปที่ความดันต่ำกว่า (โยชิโกะ, 2543)

ในด้านความคงตัวของโพนน้ำส้มภายใต้สภาวะการทำแห้งนั้น แม้ว่า methocel และ whipping agent จะช่วยทำให้เกิดโพน และทำให้โครงสร้างของโพนมีความคงตัวในสภาวะปกติได้ แต่น่าจะยังทำให้ได้โพนที่ยังมีความคงตัวไม่มากพอ โพนที่ได้อาจมีความหนืดไม่สูงพอทำให้ผนังของของเหลวที่บริเวณผิวสัมผัส (interface) ไม่แข็งแรงมากพอ (คัมเกล้า, 2551) จึงไม่สามารถพยุงโครงสร้างให้คงทนภายใต้สภาวะสุญญากาศได้ ($P = 0.1$ บาร์) ประกอบกับในระหว่างการทำแห้ง เมื่อปั๊มสุญญากาศทำงาน โดยมีแรงดูดอากาศออกสู่ภายนอกเครื่องอบแห้งนั้น อาจเป็นแรงกลภายนอกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ผนังฟองอากาศแตกออกได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาการใช้อุณหภูมิในการทำแห้ง พบว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงนั้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มฝงหลังการทำแห้งที่มีสีเข้มมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากโพนน้ำส้มได้รับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีอินฟราเรดที่ 60 องศาเซลเซียสมากกว่า (ภาพ 4.15 และภาพ 4.16) และผลการทดลองในตอนที่ 4.1 (ภาพ 4.13 และภาพ 4.14) ที่แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิทำแห้งที่สูงกว่าทำให้มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้หลอดอินฟราเรดสูงกว่าด้วย นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ อ่ำไพศักดิ์ และคณะ (2549) ที่รายงานว่า การ

ทำแห้งเนื้อด้วยวิธีลมร้อนร่วมกับรังสีอินฟราเรด เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หลอดอินฟราเรด และลดความเร็วลมส่งผลให้สีของเนื้อมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาเมื่อกระบวนการทำแห้งด้วยรังสีอินฟราเรดโดยใช้ความดันต่ำ หรือมีความเป็นสุญญากาศมากขึ้น น่าจะเป็นสภาวะรุนแรงต่อการทำแห้งอาหารที่เป็นโฟม ซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูพรุน หรือโครงสร้างลักษณะเปิด (open foam structure) ที่มีความคงตัวของโฟมไม่ดีพอ ผนังฟองมีความแข็งแรงน้อย จึงส่งผลให้โฟมยุบตัว และเสียสภาพในระหว่างการทำแห้งได้ง่าย รวมทั้งเมื่อมีการแยกตัวของของเหลวออกจากโฟม (drainage) ในระหว่างการทำแห้ง ก็ยังส่งผลต่อการเก็บผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงซึ่งทำได้ยากขึ้นอีกด้วย ในกรณีของการทำแห้งโดยการใช้อุณหภูมิที่ 40 หรือ 60 องศาเซลเซียส และใช้ความดัน 0.1 บาร์ (ภาพ 4.19 และภาพ 4.20 ตามลำดับ) แม้ว่าจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มผงที่มีค่า a_w ต่ำ (60 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1 บาร์ ได้น้ำส้มผงที่มีค่า a_w ต่ำที่สุด) แต่พบว่าในการดูดเก็บผลิตภัณฑ์ออกจากถาดอบแห้งภายหลังการทำแห้งนั้น ทำได้ค่อนข้างยากกว่าการเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งที่ระดับอุณหภูมิเดียวกัน แต่ใช้ระดับความดันอื่น ทั้งนี้โครงสร้างโฟมควรมีลักษณะที่เป็นรูพรุนมากเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว และเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของน้ำด้วยแรงผ่านช่องแคบ (capillary effect) จากภายในออกมาสู่ผิวหน้าโฟมได้มากขึ้น นอกจากนี้โฟมควรมีความคงตัว มีผนังฟองที่แข็งแรง และคงทนภายใต้กระบวนการทำแห้ง (Karim and Wai, 1999a) เพื่อต้านทานการเปลี่ยนแปลงของความดันไอกายในฟองให้ได้ในระหว่างการทำแห้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งอุณหภูมิ และความดันภายในเครื่องอบแห้งสุญญากาศแบบอินฟราเรดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้