

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของกระบวนการทางกายภาพในขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟิล์มไคโตซาน โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันต่างๆ ที่มีต่อระยะเวลาในการอบแห้งและสมบัติทางกลและกายภาพของฟิล์มไคโตซาน มีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

4.1 ระยะเวลาการอบแห้งของฟิล์มไคโตซาน

งานวิจัยนี้กำหนดให้ฟิล์มไคโตซานที่ได้มีความหนา $15\text{ }\mu\text{m}$ และมีความชื้นสุดท้ายที่ร้อยละ 14 (d.b.) ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองทำเส้นโค้งการอบแห้ง (Drying curves) เพื่อนำมาใช้นานาระยะเวลาในการอบแห้งที่เหมาะสมในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งฟิล์มไคโตซานแสดงในตารางที่ 4.1 โดยความชื้นเริ่มต้นของฟิล์มไคโตซานมีค่าประมาณ $59.8 \pm 1.4\text{ kg/kg}$ (d.b.) เมื่อทำการอบแห้งพบว่ากรณีของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสมและไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันจะใช้เวลาในการอบแห้งประมาณ 730 นาที แต่เมื่อนำสารละลายฟิล์มเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง จะใช้เวลาลดลงเหลือประมาณ 660 นาที ซึ่งคาดว่ากระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงนี้อาจทำให้อนุภาคของกลีเซอรอลมีขนาดเล็กลง แต่อาจยังมีการกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานได้ไม่ดีพอ อย่างไรก็ตามการที่กลีเซอรอลมีขนาดอนุภาคที่เล็กลงจากเดิมนี้อาจส่งผลให้น้ำที่ติดกับกลีเซอรอลระเหยออกจากสารละลายฟิล์มได้ง่ายขึ้นในระหว่างการอบแห้ง

เมื่อเตรียมสารละลายฟิล์มโดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้น พบว่าต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นกว่า 2 กรณีแรกที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งคาดว่า การใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น อาจทำให้อนุภาคของกลีเซอรอลเล็กลง ส่งผลให้อนุภาคของกลีเซอรอลกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานได้อย่างทั่วถึง (Vargas และคณะ, 2011) นอกจากนี้ความคงตัวของอิมัลชัน (Emulsion stability) ยังอาจเพิ่มมากขึ้น ทำให้กลีเซอรอลรวมอยู่กับสารละลายไคโตซานได้ดีขึ้น โดยกลีเซอรอลนั้นเป็นพลาสติกไฮโดรฟิลิกที่มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) (Kang และ Min, 2010; Thakhiew และคณะ, 2010) ดังนั้นการที่จะดึงน้ำที่ติดกับอนุภาคของกลีเซอรอลที่เข้าไปกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานจึงทำได้ยากขึ้น ส่งผลให้ต้องใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้ความดันที่สูงขึ้นอาจจะส่งผลให้กลีเซอรอลมีขนาดอนุภาคเล็กลงไปอีกและอาจมีการกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่าง

สายโซ่ไคโตซานได้ดีขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะเวลาที่ต้องใช้ในการอบแห้งฟิล์มที่เตรียมโดยใช้กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความดันที่สูงขึ้น

ในกรณีของสารละลายฟิล์มไคโตซานที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสม พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงต้องการระยะเวลาในการอบแห้งไม่แตกต่างกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) โดยคาดว่ากระบวนการให้ความร้อนอาจก่อให้เกิดการเพิ่มระดับการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซานซึ่งเกิดที่พันธะไฮโดรเจนของสายโซ่ไคโตซาน อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีการเกิดพันธะเชื่อมโยงข้ามที่เชื่อมอยู่ระหว่างสายโซ่ไคโตซาน แต่แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงอาจทำให้เกิดการเกี่ยวพันกัน (Chain entanglement) ของสายโซ่ไคโตซาน การดึงน้ำออกจากสายโซ่ไคโตซานที่เกี่ยวข้องกันนั้นจึงทำได้ยากขึ้น ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกับฟิล์มที่ไม่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนฟิล์มที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น พบว่าใช้ระยะเวลาในการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น อาจทำให้ขนาดอนุภาคของกลีเซอรอลเล็กลงจึงกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานได้อย่างทั่วถึง ซึ่งมีความคงตัวของอิมัลชัน เช่นเดียวกับกรณีที่ไม่มีการให้ความร้อน อีกทั้งการให้ความร้อนซึ่งอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซานแต่พันธะเชื่อมโยงข้ามที่เกิดขึ้นนี้อาจจะไม่ส่งผลต่อการระเหยน้ำออกจากสารละลายฟิล์มมากพอ หรืออาจเกิดการขัดขวางการระเหยน้ำออกจากสารละลายฟิล์มได้บ้างเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 การทำนายระยะเวลาการอบแห้งฟิล์มไคโตซานที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

กระบวนการผสมสารละลาย		ไม่ให้ความร้อน (นาท)	ให้ความร้อน (นาท)
ไม่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน		730 ± 42^b	711 ± 8^{ab}
การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง		662 ± 16^a	677 ± 30^{ab}
การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น	10/5 MPa	880 ± 17^c	884 ± 35^c
	20/5 MPa	915 ± 35^{cd}	952 ± 18^{df}
	30/5 MPa	962 ± 39^{df}	1001 ± 3^f

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน อยู่ภายในสดมภ์และแถวเดียวกัน หมายถึงค่าที่ระบุไว้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

4.2 สมบัติทางกลและทางกายภาพของฟิล์มไคโตซาน

4.2.1 สมบัติทางกลของฟิล์มไคโตซาน

การทดสอบสมบัติทางกลในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการยืด ซึ่ง เป็นสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเลือกใช้งานของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ หากพิจารณาผลใน ตารางที่ 4.2 สำหรับกรณีที่ไม่มีการให้ความร้อนจะพบว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่าน กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในขั้นตอนการผสมมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการยืด ไม่แตกต่างจากฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) เนื่องจากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงอาจทำ ให้อนุภาคของกลีเซอรอลมีขนาดเล็กลงได้แต่ไม่สามารถก่อให้เกิดความคงตัวของอิมัลชันที่มาก เพียงพอ อนุภาคของกลีเซอรอลจึงอาจกลับมารวมตัวกันได้อีก นอกจากนี้ขนาดของอนุภาค กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงอาจจะไม่เล็กมากพอที่จะ กระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ของไคโตซานได้ ดังนั้นกระบวนการทำให้เป็นเนื้อ เดียวกันที่ความเร็วรอบสูงนี้จึงไม่ส่งผลใดๆ ต่อความยืดหยุ่นของสายโซ่ (Chain flexibility) และไม่ ส่งผลต่อสมบัติการยืดของฟิล์ม ในทางตรงกันข้ามเมื่อนำสารละลายฟิล์มเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็น เนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น กลับพบว่าที่ความดัน 10/5 MPa ฟิล์มจะมีค่าความแข็งแรง ดึงและร้อยละการยืดเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้คาดว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงในกระบวนการทำให้เป็น เนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้นนี้อาจก่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซาน (Vargas และคณะ, 2011) รวมถึงอาจเกิดการตัดสายโซ่ สายโซ่ไคโตซานจึงมีขนาดสั้นลงและอาจกลับมา จัดเรียงตัวชิดกันมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น (Fu และคณะ, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Hu และคณะ (2013) ที่พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้ความดันสูงจะมีความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์สั้นลง ในส่วนของค่าร้อยละการยืดที่เพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกันนั้น อาจเนื่องจากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้นนี้อาจทำให้ขนาดอนุภาคของกลีเซอรอลมีขนาดเล็กลงมากพออีกทั้งยังก่อให้เกิดความคงตัว ของอิมัลชัน ซึ่งอนุภาคกลีเซอรอลที่มีขนาดเล็กลงนี้จึงสามารถกระจายและแทรกตัวในช่องว่าง ระหว่างสายโซ่ไคโตซานได้อย่างทั่วถึง จึงสามารถช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างสายโซ่ไคโตซาน ซึ่งช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานที่เพิ่มขึ้นนี้ อาจส่งผลให้สายโซ่ไคโตซานเกิดการเคลื่อนตัวได้ง่าย ขึ้นฟิล์มจึงมีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้นและส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น (Sablani และ คณะ, 2009; Kang และ Min, 2010) อย่างไรก็ตามเมื่อความดันเพิ่มขึ้นเป็น 20/5 MPa และ 30/5 MPa กลับพบว่าค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มมีค่าลดลง ทั้งนี้คาดว่าเมื่อเพิ่มความรุนแรงของกระบวนการ

การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยการเพิ่มความดัน แรงเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้นอาจตัดสายโซ่โพลีโธซานให้สั้นลงมากเกินไป จึงอาจส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างมีค่าลดลง ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มโพลีโธซานจึงมีค่าลดลง ส่วนการที่ค่าร้อยละการยืดมีค่าไม่แตกต่างกันกับกรณีที่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดัน 10/5 MPa ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลมีปริมาณจำกัดและสามารถกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่โพลีโธซานได้ในปริมาณหนึ่งเท่านั้น

จากผลในตารางที่ 4.2 พบว่ากรณีของฟิล์มที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีการให้ความร้อน จะมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการยืดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม เนื่องจากการให้ความร้อนอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่โพลีโธซาน (Micard et al., 2000) ทำให้เกิดพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โพลีโธซานที่เพิ่มมากขึ้น ฟิล์มจึงมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งการให้ความร้อนอาจเพิ่มการเคลื่อนที่ (mobility) ของกลีเซอรอล จึงอาจทำให้อนุภาคกลีเซอรอลเคลื่อนที่เข้าไปแทรกตัวในช่องว่างของสายโซ่โพลีโธซานได้ดีขึ้นเล็กน้อย ค่าร้อยละการยืดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ให้ความร้อน ส่วนกรณีของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่มีการให้ความร้อนและเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง พบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น แต่มีค่าร้อยละการยืดที่ไม่แตกต่างจากฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้คาดว่ากระบวนการให้ความร้อนที่อาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่โพลีโธซานซึ่งอาจส่งผลให้ฟิล์มมีโครงสร้างภายในที่แข็งแรงขึ้น เนื่องจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างสายโซ่โพลีโธซานเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงดึงจึงเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าร้อยละการยืดที่ไม่แตกต่างกันกับฟิล์มที่ไม่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันอาจเกิดจากการที่กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงนี้อาจทำให้ขนาดอนุภาคของกลีเซอรอลเล็กลง แต่ไม่ก่อให้เกิดความคงตัวของอิมัลชันมากเพียงพอ ดังนั้นอนุภาคของกลีเซอรอลจึงอาจกลับมารวมตัวกันได้อีก นอกจากนี้อนุภาคของกลีเซอรอลอาจกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่โพลีโธซานได้ไม่ดีพอดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

ส่วนกรณีที่สารละลายฟิล์มผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น ที่ความดัน 10/5 MPa พบว่าฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกันแต่มีค่าร้อยละการยืดที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง (ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 95) ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้นที่ความดัน 10/5 MPa นี้ อาจทำให้ขนาดอนุภาคของกลีเซอรอลเล็กลงและสามารถกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่โพลีโธซานได้ดี ส่งผลให้ค่าร้อยละการยืดเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 20/5 และ 30/5 MPa กลับพบว่าฟิล์มมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นและมีค่าร้อยละการยืดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดัน 10/5 MPa ทั้งนี้คาดว่ากระบวนการให้ความร้อนทำให้

เกิดการเชื่อมโยงข้ามสายระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น ที่ความดัน 20/5 และ 30/5 MPa นี้ส่งผลให้เกิดการเกี่ยวพันกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ส่วนการที่ค่าร้อยละการยืดลดลงนั้น คาดว่าถึงแม้กลีเซอรอลจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กและมีการกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ได้ดีแต่ค่าที่ไม่สามารถเอาชนะแรงของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการเกี่ยวพันกันได้ ดังนั้น ค่าร้อยละการยืดจึงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.2 ค่าการทดสอบสมบัติทางกลของฟิล์มไคโตซานที่เตรียมโดยวิธีการต่างๆ

กระบวนการผสมสารละลาย		ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	ค่าร้อยละการยืด	ค่าร้อยละการบวม ตัวของฟิล์ม	ค่าระดับความ เป็นผลึก	ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยน สถานะคล้ายแก้ว (°C)
ไม่ให้ความร้อน	ไม่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน	37.8 ± 1.3^b	28.7 ± 2.2^a	88.2 ± 2.4^{bc}	13.9 ± 1.1^c	200 ± 4^a
	การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง	38.5 ± 2.9^b	29.1 ± 1.5^a	89.4 ± 2.2^c	13.7 ± 0.3^c	201 ± 4^{ab}
	การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดย ใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น	10/5 MPa	46.4 ± 2.9^{cd}	35.9 ± 2.6^{de}	95.6 ± 3.7^d	208 ± 3^{bc}
		20/5 MPa	34.6 ± 3.1^{ab}	36.3 ± 0.8^e	95.4 ± 1.4^d	212 ± 3^b
		30/5 MPa	33.1 ± 5.2^a	37.0 ± 3.8^e	97.4 ± 1.3^d	204 ± 5^{abc}
ให้ความร้อน	ไม่มีการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน	44.9 ± 2.1^c	33.2 ± 1.5^{cd}	84.5 ± 3.4^{ab}	2.8 ± 0.5^a	204 ± 1^{abc}
	การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูง	49.4 ± 2.9^{de}	32.2 ± 3.8^{bc}	85.1 ± 3.4^{abc}	2.6 ± 0.1^a	207 ± 5^{abc}
	การทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดย ใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น	10/5 MPa	46.2 ± 5.8^{cd}	37.2 ± 2.0^c	84.7 ± 1.2^{ab}	208 ± 1^{abc}
		20/5 MPa	52.9 ± 2.0^c	29.9 ± 2.0^{ab}	85.4 ± 0.7^{abc}	209 ± 4^c
		30/5 MPa	59.2 ± 4.4^f	30.7 ± 2.9^{abc}	81.0 ± 3.2^a	212 ± 2^c

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกัน อยู่ภายในสดมภ์เดียวกัน หมายถึงค่าที่ระบุไว้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

4.2.2 การบวมตัวของฟิล์มไคโตซาน

ค่าร้อยละการบวมตัว (Swelling) ของฟิล์มสามารถชี้ให้เห็นถึงระดับการเกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซาน โดยหากพิจารณาผลในตารางที่ 4.2 กรณิของฟิล์มที่ไม่มีการให้ความร้อนจะพบว่าค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มในกรณีที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกับฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงโดยมีค่าประมาณร้อยละ 88 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง และค่าร้อยละการยืด แต่เมื่อนำฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้น ที่ความดัน 10/5, 20/5 และ 30/5 MPa กลับพบว่าค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) โดยมีค่าประมาณร้อยละ 95 ทั้งนี้คาดว่ากระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงอาจทำให้อนุภาคของกลีเซอรอลมีขนาดเล็กลงและเกิดการกระจายและแทรกตัวในช่องว่างระหว่างสายโซ่ไคโตซานได้ดี อีกทั้งกลีเซอรอลเองมีสมบัติชอบน้ำจึงส่งผลให้มีค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น (Thakhiew และคณะ, 2010) ซึ่งผลที่ได้ยังสอดคล้องกับระยะเวลาการอบแห้งที่นานขึ้นและค่าร้อยละการยืดเพิ่มสูงขึ้นด้วย

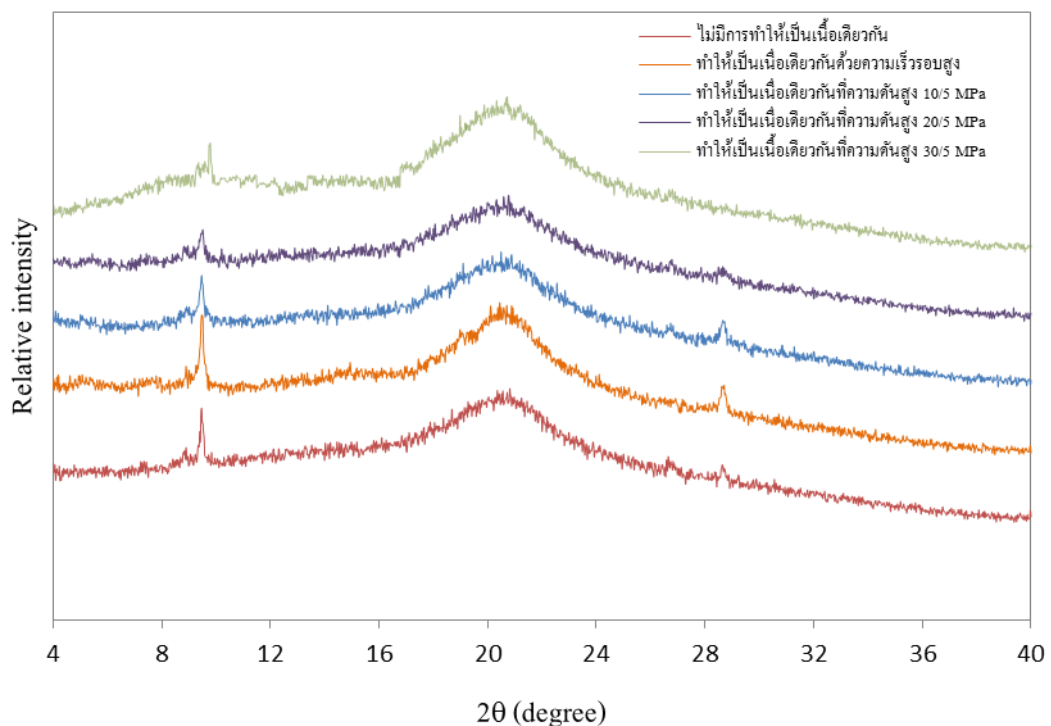
กรณีของฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านการให้ความร้อน พบว่าค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในทุกกรณี มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ทั้งนี้เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เท่ากันนี้อาจก่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่ไคโตซานในระดับที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะเตรียมสารละลายฟิล์มโดยมีหรือไม่มีการบวมตัวให้เป็นเนื้อเดียวกันก็ตาม ดังนั้นค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มในกรณีที่มีการให้ความร้อนจึงมีค่าไม่ต่างกันในทุกกรณี แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่มีการให้และไม่ให้ความร้อนในขั้นตอนการผสมสารละลายฟิล์มพบว่า ค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มที่มีการให้ความร้อนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) โดยคาดว่ากระบวนการให้ความร้อนอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่ไคโตซาน เมื่อนำฟิล์มไปแช่น้ำพันธะเชื่อมโยงข้ามที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ไคโตซานจะทำให้โครงสร้างของฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น ฟิล์มจึงขยายตัวได้น้อยลง ส่งผลให้โครงสร้างของฟิล์มสามารถรับน้ำได้น้อยลง ค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์มจึงมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในทุกกรณีที่มีการให้ความร้อน (Li และคณะ, 2013; Mayachiew และคณะ, 2010)

4.2.3 ค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มไคโตซาน

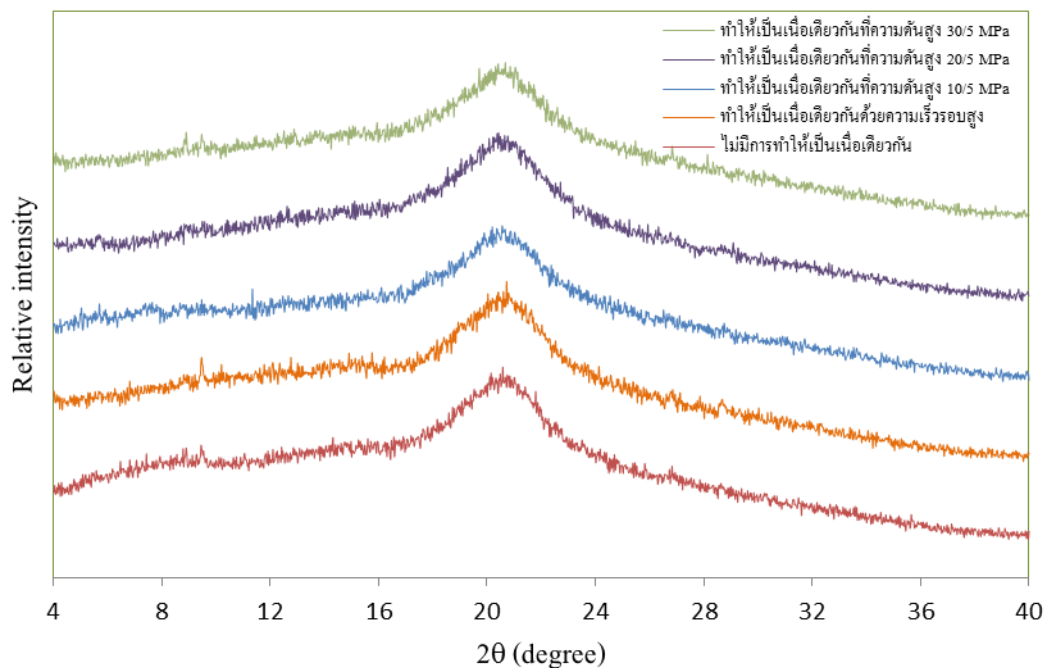
ค่าระดับความเป็นผลึกของฟิล์มไคโตซานสามารถวิเคราะห์ได้จาก X-ray diffraction pattern (XRD pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยตัวอย่างฟิล์มไคโตซานในทุกกรณีมีพีคหลักใกล้เคียงกันที่ประมาณ $2\theta = 20^\circ$ โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสม (รูปที่ 4.1) มีพีค 2 ตำแหน่ง อยู่ที่ประมาณ $2\theta = 10^\circ$ และ 20° ซึ่งพีคในช่วงดังกล่าวนี้จะแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มไคโตซาน ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 13 (Mayachiew และ Devahastin, 2008) แต่ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายไคโตซานที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (รูปที่ 4.2) มีพีคเพียง 1 ตำแหน่ง เนื่องจากสายโซ่ไคโตซานมีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจเนื่องมาจากในขณะที่มีการให้ความร้อนจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามสายระหว่างสายโซ่ไคโตซาน ซึ่งนำไปสู่การขัดขวางความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของสายโซ่ไคโตซาน ส่งผลให้การเคลื่อนตัวของสายโซ่ไคโตซาน (Chain movement) ลดลงขณะแผ่นฟิล์มเย็นตัว

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่มีการให้ความร้อน ฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยความเร็วรอบสูงจะมีค่าระดับความเป็นผลึกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) เนื่องจากการจัดเรียงตัวและการเคลื่อนตัวของสายโซ่ไคโตซานมีลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงและค่าร้อยละการยืดที่ทั้ง 2 กระบวนการให้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้น ที่ความดัน 10/5, 20/5 และ 30/5 MPa พบว่าฟิล์มมีค่าความเป็นผลึกลดลงเหลือประมาณร้อยละ 8 ซึ่งทั้ง 3 กระบวนการมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมีนัยสำคัญ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) โดยคาดว่าแรงเหวี่ยงจากกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ความดันสูงแบบ 2 ชั้นนี้อาจทำให้เกิดการตัดสายโซ่ไคโตซานให้สั้นลงและอาจก่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามสายระหว่างสายโซ่ไคโตซานขึ้น (Vargas และคณะ, 2011) ซึ่งการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซานที่เกิดขึ้นอาจจะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของสายโซ่ไคโตซาน ส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีค่าความเป็นผลึกลดลง นอกจากนี้การเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่ไคโตซานที่เกิดขึ้นอาจทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น (Thakhiew และคณะ, 2013) จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในกรณีผ่านความดัน 10/5 MPa แต่เมื่อเพิ่มความดันเป็น 20/5, 30/5 MPa พบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีค่าลดลงอาจเกิดแรงเหวี่ยงที่ความดันสูงนี้ทำให้เกิดการตัดสายโซ่ไคโตซานให้สั้นลงมากเกินไป ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงขณะที่ค่าระดับความเป็นผลึกมีค่าเท่ากรณี 10/5 MPa

ส่วนกรณีที่มีกระบวนการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสมสารละลายในทุกกรณี พบว่าฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน มีค่าความเป็นผลึกลดลง โดยมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ทั้งนี้คาดว่าอาจเกิดจากการให้ความร้อนแก่สารละลายฟิล์มที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เท่ากันนี้ อาจก่อให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามของสายโซ่โพลีเอทานสูงซึ่งเกิดในระดับที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถชดเชยความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ในระดับใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ค่าความเป็นผลึกของฟิล์มมีค่าลดลง (Jurkin และ Pucic, 2012) โดยในทุกกรณีที่ผ่านการให้ความร้อนนี้มีผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึงที่มีค่าเพิ่มสูงกว่ากรณีที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ซึ่งสามารถดูได้จากการที่ฟิล์มมีค่าร้อยละการบวมตัวที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.2)



รูปที่ 4.1 X-ray diffraction pattern (XRD pattern) ของฟิล์มโพลีเอทานในกรณีที่สารละลายไม่ผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสม



รูปที่ 4.2 X-ray diffraction pattern (XRD pattern) ของฟิล์มไคโตซานในกรณีที่สารละลายผ่านการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสม

4.2.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของฟิล์มไคโตซาน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ในกรณีที่ไม่มีกระบวนการให้ความร้อนพบว่าทุกกรณีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ทั้งนี้อาจเนื่องจากกรณีสารละลายที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันและผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยความเร็วรอบสูง ทั้งนี้ 2 กรณีนี้มีโครงสร้างที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยสามารถดูได้จากฟิล์มที่ผลิตที่ 2 สถานะนี้มีค่าความแข็งแรงดึง ค่าร้อยละการยืด ค่าร้อยละการบวมตัวของฟิล์ม และค่าระดับความเป็นผลึกที่ไม่แตกต่างกัน อีกทั้งอาจไม่เกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่ไคโตซาน แต่มีค่าระดับความเป็นผลึกสูง ส่วนกรณีของสารละลายที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้ความดันสูงแบบ 2 ชั้น ทั้ง 3 ความดัน (10/5 MPa, 20/5 MPa, 30/5 MPa) อาจเกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่ไคโตซาน แต่ค่าระดับความเป็นผลึกลดลง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ดังนั้นจึงอาจเกิด Counterbalancing effect (Thakhiew และคณะ, 2013) ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่แตกต่างกันทางสถิติ

กรณีที่มีการให้ความร้อนพบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของฟิล์มในทุกกรณีมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเกิดการเชื่อมโยงข้ามในระดับใกล้เคียงกันดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ส่งผลให้สายโซ่ไคโตซานเกิดการเคลื่อนตัว

ระหว่างกันได้ยากขึ้น ก่อให้เกิดโครงสร้างของฟิล์มที่มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน โดยสามารถดูได้จากการที่ฟิล์มในทุกกรณีมีค่าร้อยละการบวมตัว และค่าระดับความเป็นผลึกที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกรณีที่มีและไม่มีกระบวนการให้ความร้อนพบว่าฟิล์มโคโตะซานที่เตรียมจากสารละลายที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่แตกต่างกันทางสถิติจากกรณีสารละลายที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95) ทั้งนี้ กรณีที่ไม่มีการให้ความร้อนการเกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่โคโตะซานอาจเกิดน้อยมาก แต่มีค่าระดับความเป็นผลึกสูง ส่วนกรณีที่มีการให้ความร้อนในขั้นตอนการผสมอาจมีการเกิดการเชื่อมโยงข้ามระหว่างสายโซ่โคโตะซานสูง แต่ค่าระดับความเป็นผลึกลดลง ดังนั้นจึงอาจเกิด Counterbalancing effect ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วไม่แตกต่างกันทางสถิติ