

บทที่ 4

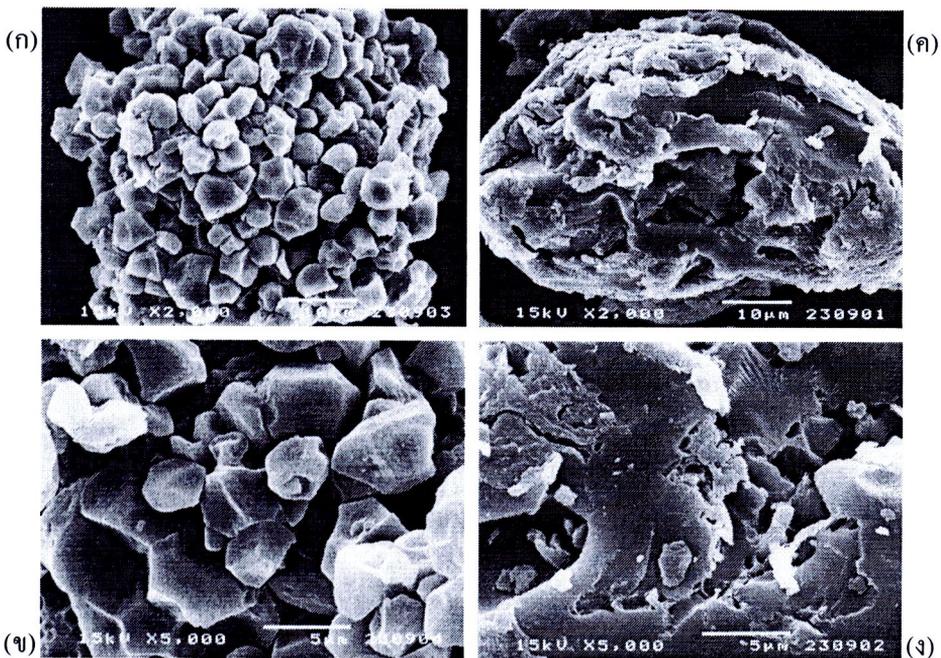
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาคุณสมบัติของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์

คุณสมบัติของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยด่างในสภาวะที่มีแอลกอฮอล์ ที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ลักษณะภายนอกโดยใช้กล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขนาดอนุภาคโดยใช้เทคนิควัดการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบอนุภาค คุณสมบัติด้านอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งไปเป็นเจล โครงสร้างผลึกโดยใช้วิธีการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ วิเคราะห์องค์ประกอบภายในของแป้งด้วยเทคนิค FT-IR ความเป็นประจุที่ผิว ความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆ และความสามารถในการพองตัว ความเป็นกรดต่ำ และความหนืดในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด คือ น้ำกลั่น (PW), 0.1 M HCl และ Phosphate Buffer pH 6.8 (PB 6.8) ได้ผลดังรายละเอียดที่แสดงต่อไปนี้

1.1 ลักษณะภายนอกของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

การศึกษาลักษณะภายนอกของแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร และแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรฯ ด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) (แสดงในภาพที่ 17)

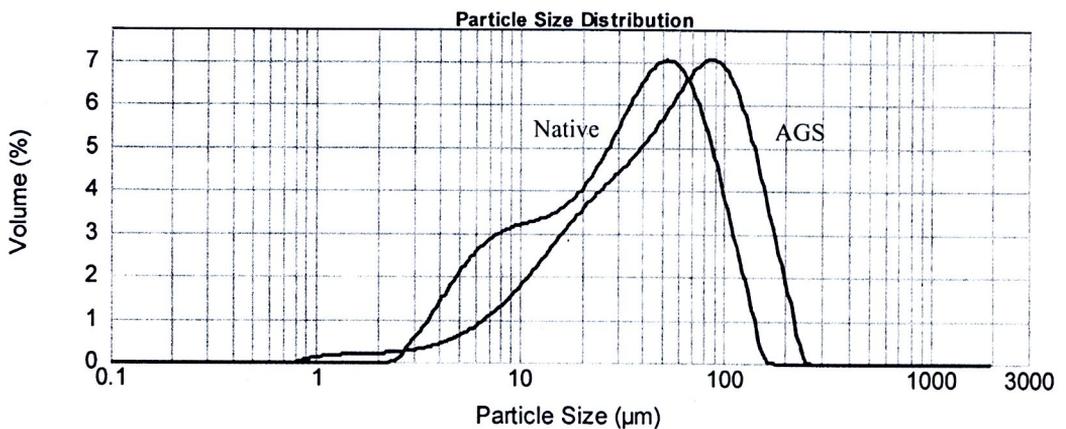


ภาพที่ 17 ลักษณะภายนอกของแป้งข้าวเหนียวก่อนดัดแปร (native) (ก และ ข) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS) (ค และ ง) ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า ตามลำดับ ด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

พบว่า แป้งข้าวเหนียวก่อนและหลังการตัดแปรมีลักษณะผิวแตกต่างกัน โดยแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรมีลักษณะเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมและเกาะกลุ่มกัน และเม็ดแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรมีขนาดอนุภาคประมาณ 4 ถึง 7 ไมครอน โดยวัดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้งจากภาพ SEM และเทียบกับ scale ด้านล่างของภาพ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Peerapattana et al. (2010) ที่วัดขนาดอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ พบแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5.60 ไมครอน มีการกระจายขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 9 ไมครอน สำหรับแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรแล้ว ไม่พบลักษณะของเม็ดแป้ง ทั้งนี้เกิดจากกระบวนการตัดแปรโดยการใช้ด่างทำให้ hydroxyl group ของพอลิเมอร์ภายในเม็ดแป้ง มีการแตกตัวให้ proton และ negative charge จึงเกิดการผลักกันของพอลิเมอร์ ทำให้เม็ดแป้งบวมพอง ลักษณะเกลียวคู่ (double helix) ของพอลิเมอร์ถูกทำลาย และเมื่อมีการสะเทินด้วยกรดทำให้เกิด single helix ของพอลิเมอร์ ซึ่งส่งผลให้ความเป็นผลึกของแป้งถูกทำลาย (Chan and Jane, 1994 A) และเกิดการรวมกันของเม็ดแป้งที่บวมพอง โดยภาพ SEM ที่ได้จากการศึกษานี้คล้ายคลึงกับ SEM ของแป้ง waxy maize starch ที่ตัดแปรด้วยหลักการเดียวกันจากงานวิจัยของ Chan and Jane (1994 B) เมื่อนำไปทำให้แห้งด้วยลมร้อนและลดขนาดโดยการบดด้วยเครื่องบดลดขนาดและนำไปคัดขนาดแรนจ์เบอร์ 100 mesh ซึ่งมีรูเปิด 150 ไมครอน จึงทำให้แป้งตัดแปรที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า และไม่พบลักษณะของเม็ดแป้ง

1.2 ขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวตัดแปร

ผลการศึกษานขนาดอนุภาค โดยใช้เทคนิควัดการกระเจิงของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบอนุภาค (Laser Light Scattering Particle Size Analyzer) ได้กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาค เปรียบเทียบระหว่างแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรและแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ดังแสดงในภาพที่ 18)



ภาพที่ 18 กราฟแสดงการกระจายขนาดอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร (Native) และแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS) ด้วยเครื่องวัดอนุภาค Master Sizer 2000

พบว่า แป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรมีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 140 ไมครอน จำนวนอนุภาคที่พบร้อยละ 10 (d0.1) อยู่ที่ขนาด 6.942 ไมครอน ร้อยละ 50 (d0.5) อยู่ที่ขนาด 34.036 ไมครอน และจำนวนร้อยละ 90 อยู่ที่ขนาด 87.361 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับภาพถ่าย SEM ที่แสดงให้เห็นถึงอนุภาคของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรที่ส่วนมากมีลักษณะเกาะกลุ่มกัน สำหรับแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรแล้วมีขนาดอนุภาคกระจายอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 220 ไมครอน จำนวนอนุภาคที่พบร้อยละ 10 (d0.1) อยู่ที่ขนาด 11.731 ไมครอน ร้อยละ 50 (d0.5) อยู่ที่ขนาด 54.117 ไมครอน และจำนวนร้อยละ 90 อยู่ที่ขนาด 137.859 ไมครอน เนื่องจากแป้งตัดแปรได้ผ่านการบดลดขนาดและนำไปผ่านตะแกรง เบอร์ 100 mesh ซึ่งมีช่องเปิดเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 ไมครอน มีความกว้างทแยงมุมเท่ากับ 212.13 ไมครอน ทำให้อนุภาคที่โตไม่เกิน 212.13 ไมครอนสามารถลอดผ่านตะแกรงในลักษณะทแยงมุมไปได้ อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีลักษณะยาว โดยมีความกว้างน้อยกว่าช่องเปิดแต่มีความยาวมากกว่าช่องเปิดดังกล่าว ซึ่งสามารถผ่านตะแกรงไปได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงพบอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 212.13 ไมครอน

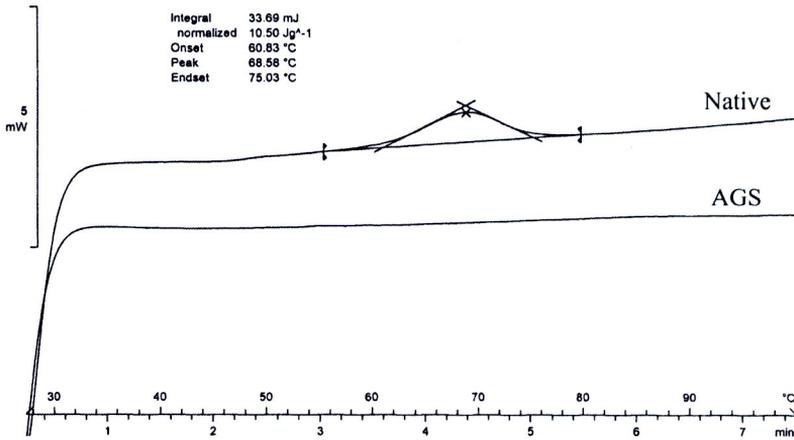
1.3 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปร

การศึกษาคุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากแป้งข้าวเหนียวที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งไปเป็นเจลของแป้งข้าวเหนียว (Gelatinization Temperature; Tg.) โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 25 ถึง 100 องศาเซลเซียส ในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ได้กราฟคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ (Thermogram) (ดังแสดงในภาพที่ 19) พบว่าเงลาทีไนซ์เซชันเอนโดเทอม (Gelatinization Endotherm) ของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร มีอุณหภูมิเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง (Onset Temperature; To) เท่ากับ 60.90 ± 0.07 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak Temperature; Tp) เท่ากับ 68.27 ± 0.28 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Endset หรือ Conclusion Temperature; Tc) เท่ากับ 76.12 ± 1.31 องศาเซลเซียส และเอนทัลปี (Enthalpy; ΔH) เท่ากับ 10.50 J/g. สอดคล้อง กับผลการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้เพื่อทำให้แป้งข้าวเหนียวเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสถานะของแข็งกลายเป็นเจลของ Laovachirasuwan, Peerapattana, Srijesaruk, Chitropas and Otsuka. (2010) ที่พบการเกิดเงลาทีไนซ์เซชันเอนโดเทอมที่ใกล้เคียงกัน สำหรับแป้งข้าวเหนียวตัดแปร เมื่อเม็ดแป้งได้รับการปรับสภาพด้วยด่างแก่ (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ทำให้โครงสร้างอะไมโลเพคตินของแป้งถูกทำให้คลายตัวแตกออก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายพอลิเมอร์ถูกทำลาย (Chen and Jane, 1994 A) การยึดเกาะทางพันธะมีความเป็นอิสระ มีลักษณะเดียวกันกับการทำให้ผ่านการเกิดเจลด้วยความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิเงลาทีไนซ์เซชันของแป้ง จึงไม่พบ endotherm peak ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen and Jane (1994 A)

1.4 คุณสมบัติโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเหนียวตัดแปร

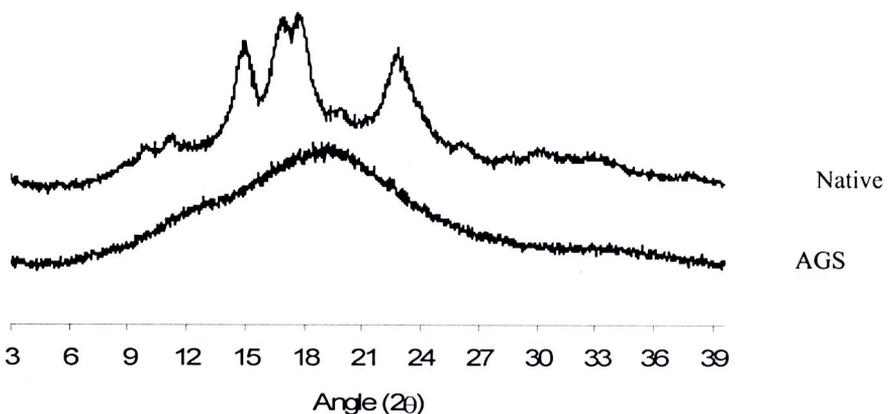
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร และแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้วิธีการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer; XRD (ดังแสดงในภาพที่ 20) พบว่าแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรมีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นแบบ A โดยมีพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 5.8 องศาองศา (15.1 องศา 2 θ) และ 3.8 องศาองศา (23.1 องศา 2 θ) และมีลักษณะ 2 พีคที่ซ้อนกันอยู่ที่ตำแหน่ง 5.2 องศาองศา (17.1 องศา 2 θ) และ 4.9 องศาองศา (17.8 องศา 2 θ) รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี

เอกซ์และตำแหน่งของพีคต่างๆ ดังกล่าวเป็นรูปแบบที่แสดงถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกของแป้งที่ได้จากข้าว ซึ่ง สอดคล้องกับการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งข้าวของ Iturriaga, Lopez and Anon (2004)



ภาพที่ 19 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเหนียวก่อนตัดแปร (Native) และแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างใน แอลกอฮอล์ (AGS) ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry; DSC

สำหรับแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นแบบ V ซึ่งยืนยันได้ว่าการสูญเสียโครงสร้างความเป็นผลึก เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายพอลิเมอร์ถูกทำลายไป โมเลกุลของแป้งมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) จึงจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แสดงให้เห็นว่าแป้งได้ผ่านการเปลี่ยนสภาพแล้ว และยังพบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ที่ทำการศึกษานี้ มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ waxy maize starch (Chen and Jane, 1994 A) อีกทั้งมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับการศึกษาคุณสมบัติความเป็นผลึกของแป้งข้าวเหนียวพรีเจลของ Nakorn, Tongdang and Sirivongpaisal (2009) ด้วย

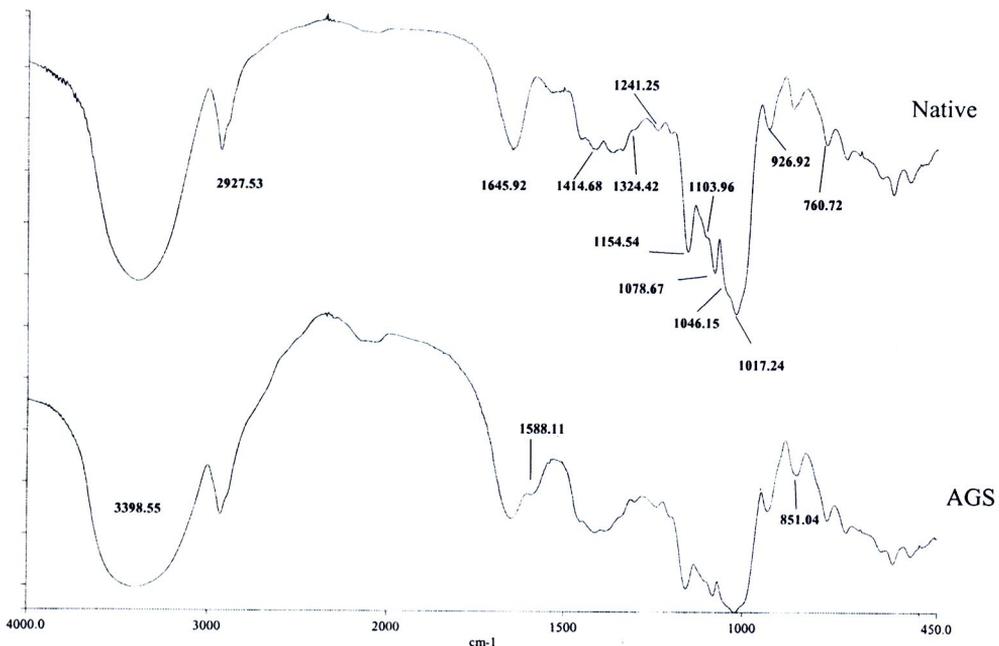


ภาพที่ 20 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งข้าวเหนียวก่อนตัดแปร (Native) และแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer; XRD

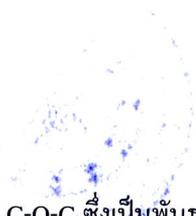


1.5 องค์ประกอบของแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

ผลการศึกษาร่องรอยองค์ประกอบภายในของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรฯ ด้วยเครื่องหาองค์ประกอบของสาร (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy; FT-IR) ได้สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร (Native) เปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS) (ดังแสดงในภาพที่ 21) พบว่า แป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรและที่ผ่านการดัดแปรฯ มีการ่องรอยองค์ประกอบภายในเป็นพอลิเมอร์กลูโคส มีโครงสร้างคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นอะมิโลเพคตินเกือบทั้งหมด จากการศึกษา พบยอดพีคการสั่นแบบยืดโครงสร้างของหมู่ O-H ที่ตำแหน่ง 3398.55 cm^{-1} (Xie, Liu and Cui, 2006) ในแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรแล้วพบหมู่ดังกล่าวลดลงเมื่อเทียบกับแป้งก่อนการดัดแปร แสดงให้เห็นว่า พันธะหมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนถูกทำลายไป สอดคล้องกับการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งยืนยันได้ว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายพอลิเมอร์ถูกทำลายไป พบพีคการสั่นแบบยืดของ โครงสร้างหมู่ C-H ที่ตำแหน่ง 2927.53 cm^{-1} (Xie, Liu and Cui, 2006) ในแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรและผ่านการดัดแปรแล้ว พบการสั่นที่ตำแหน่ง 1645.92 cm^{-1} ในแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรแล้วเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งก่อนการดัดแปร เป็นการยืดของ C=O เกิดจากการเติมกรดซิตริก ที่ตำแหน่งดังกล่าวยังเป็นการสั่นของโมเลกุลของน้ำในบริเวณโครงสร้างที่เป็นอสัณฐาน (water absorption in the amorphous regions) แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างภายในของแป้งดัดแปรฯ มีความเป็นผลึกลดลงและโมเลกุลของแป้งสามารถเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำได้ง่ายขึ้น (Kizil, Irudayaraj and Seetharaman, 2002) และสอดคล้องกับรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ซึ่งยืนยันว่า แป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ มีความเป็นผลึกลดลง พบการสั่นแบบงอของหมู่ C-O-H ซึ่งมีพีคอยู่ที่ตำแหน่ง 1342.42 cm^{-1} และ 1103.96 cm^{-1} โดยที่ตำแหน่ง 1342.42 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นแบบบิดงอของหมู่ CH_2 อีกด้วย (Kizil, Irudayaraj and Seetharaman, 2002)



ภาพที่ 21 FT-IR สเปกตรัมของแป้งข้าวเหนียวก่อนดัดแปร(Native) และแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS)



พบการสั่นของพันธะ C-O-C ซึ่งเป็นพันธะ α 1-4 glycosidic linkage ที่ตำแหน่ง 926.92 cm^{-1} การสั่นแบบของของหมู่ C-H ที่ตำแหน่ง 851.04 cm^{-1} การสั่นแบบยืดของหมู่ C-C ที่ตำแหน่ง 760.72 cm^{-1} (Kizil, Irudayaraj and Seetharaman, 2002) พบโครงสร้างหมู่ CH_2OH ที่ตำแหน่ง 1241.25 cm^{-1} เป็นพันธะ α 1-6 glycosidic linkage โดยในแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรแล้วพบว่ามียอดพีคลดต่ำลงเมื่อเทียบกับแป้งก่อนการตัดแปร แสดงถึงการเกิดการแทนในหมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนที่ตำแหน่งดังกล่าวด้วยหมู่คาร์บอกซิล และยังคงพบพีคที่ตำแหน่ง 1588.11 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิลของกรดเกลือคาร์บอกซิลิก (John Coates, 2000) ที่เกิดปฏิกิริยาจากกรดซัลฟิวริกในการเตรียมแป้ง ซึ่งในขั้นตอนการปรับสภาพแป้งด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสะเทินด้วยกรดไฮโดรคลอริกในสถานะแอลกอฮอล์ ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังกล่าวเกิดขึ้นในองค์ประกอบของแป้ง

1.6 คุณสมบัติความเป็นประจุที่ผิวของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

การศึกษาความเป็นประจุที่ผิวของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS) ด้วยเครื่อง Zetasizer (Zeta Potential; ZP) พบว่า แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรฯ มีการเปลี่ยนแปลงความเป็นประจุจากเดิมก่อนการตัดแปร โดยแป้งก่อนการตัดแปร มีค่าความเป็นประจุเท่ากับ -21.122 ± 0.129 มิลลิโวลต์ แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรฯ แล้ว มีค่าความเป็นประจุเท่ากับ -8.821 ± 1.513 มิลลิโวลต์ (ดังแสดงในตารางที่ 15) เนื่องจากปฏิกิริยาหลังการเติมกรดซัลฟิวริกในขั้นตอนการเตรียมแป้งตัดแปร สอดคล้องกับการศึกษาองค์ประกอบภายในของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ข้างต้น ที่พบการแทนที่ในหมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนในหมู่ CH_2OH ที่เป็นพันธะ α 1-6 glycosidic linkage ในโครงสร้างแป้ง ประกอบกับหมู่ไฮดรอกซิล ในโครงสร้างของแป้งตัดแปรฯ บางส่วนถูกทำลายไป เป็นผลให้ความเป็นประจุของแป้งตัดแปรฯ เป็นลบลดลง

ตารางที่ 15 ความเป็นประจุที่ผิวของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร (Native GRS) และแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ (AGS)

ชนิดของแป้ง	ZP (mV)
Native GRS	-21.122 ± 0.129
AGS	-8.821 ± 1.513

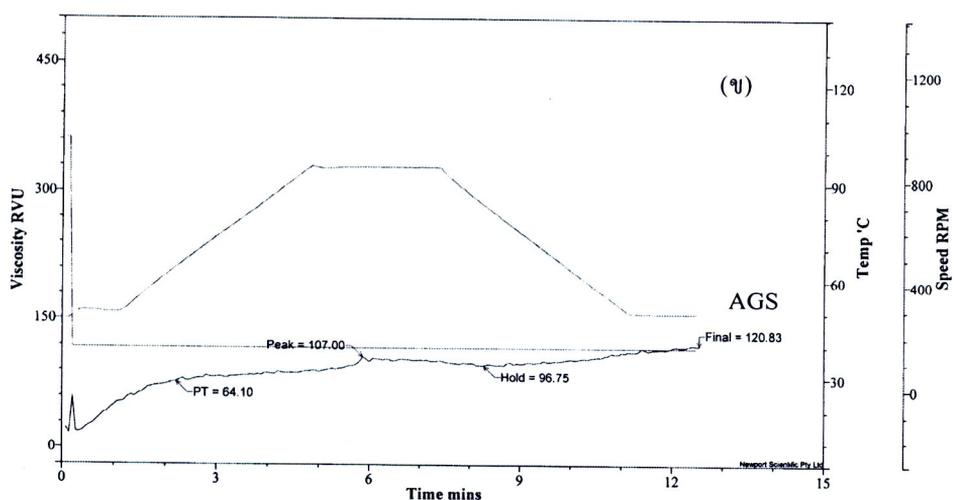
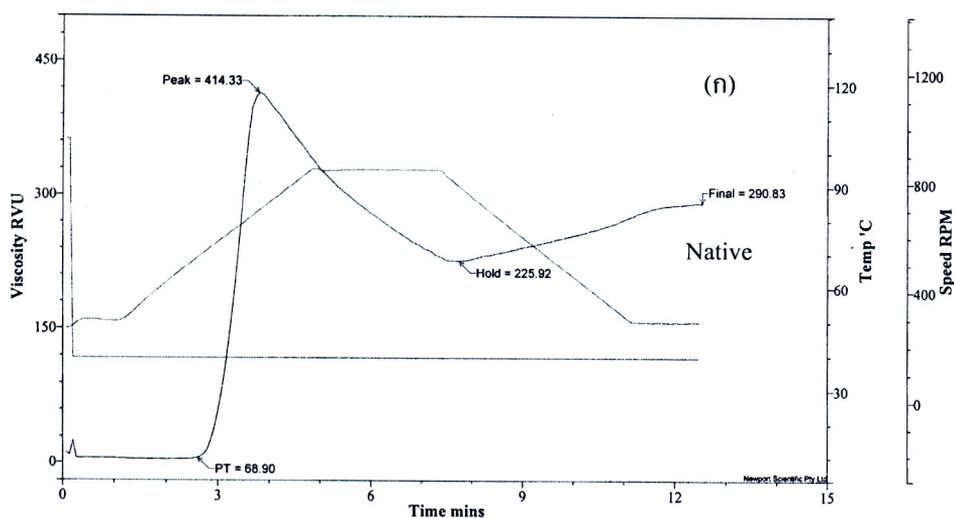
ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3

1.7 คุณสมบัติความหนืดของสารละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลการศึกษาความหนืดของสารละลายแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร และแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่อุณหภูมิต่างๆ (ดังแสดงในภาพที่ 22) พบว่าแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดความหนืด (pasting temperature) 69.5 องศาเซลเซียส ความหนืดสูงสุดเท่ากับ 414 RVU ที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส และความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 290.83 RVU โดยความหนืดของสารละลายแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรเกิดขึ้นเมื่อเม็ดแป้งเกิดการพองตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิ 69.5 องศาเซลเซียส ความหนืดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเม็ดแป้ง

พองตัวอย่างต่อเนื่องและมีการให้อุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้น
อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส

จนเมื่อบังพองตัวเต็มที่มีความหนืดมีค่าสูงสุดที่



ภาพที่ 22 คุณสมบัติความหนืดที่อุณหภูมิต่างๆของสารละลายแป้งข้าวเหนียวก่อนดัดแปร (native) (ก) และ แป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยค่างในแอลกอฮอล์ (AGS) (ข)

ถึงแม้มีการให้อุณหภูมิแก่สารละลายแป้งเพิ่มสูงขึ้น ก็ไม่ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นได้อีก แต่กลับจะไปทำให้แป้งที่พองตัวมีความคงทนลดต่ำลง เมื่อถูกแรงเฉือนต่อเนื่องที่เกิดจากการทดสอบด้วยเครื่อง RVA ทำให้เมื่อบังที่พองตัวแตกออก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดแป้งลดลง ความหนืดจึงลดลง ตลอดช่วงที่คงอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส ในช่วงที่ทำการลดอุณหภูมิลงจาก 95 ถึง 50 องศาเซลเซียส พบว่าความหนืดของสารละลายแป้งไม่ลดลงอีกต่อไป โดยมีค่าคงที่คือ 225.92 RVU เป็นระยะเวลาประมาณ 20 วินาที จากนั้นความหนืดมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

เนื่องจากแป้งได้ผ่านการเกิดเจลตาพิโนซ์เซชันแล้ว เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลของแป้งมีการเรียงตัวกันอีกครั้ง มีแรงยึดจับกันเพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายแป้งเพิ่มขึ้นอีก และผลจากการที่โมเลกุลของแป้งสามารถจับกับน้ำได้กลายเป็นสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงมีความหนืดสุดท้ายเท่ากับ 290.83 RVU สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen and Jane (1994 A) ที่คุณสมบัติของแป้งละลายในน้ำเย็นที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียว ที่ไม่ผ่านการตัดแปร ของพัลลภ ไพพงษ์ และ อรอนงค์ นัยวิกุล (2548) ที่พบว่า อุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดความหนืด (pasting temperature) และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับแป้งข้าวเหนียวตัดแปรให้ผลแตกต่างจากแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร เนื่องจากแป้งตัดแปรดังกล่าว มีความสามารถละลายได้ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยแป้งค่อยๆ พองตัวและได้เป็นของเหลวที่มีความหนืด ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น จึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดน้อยมาก และแป้งที่ตัดแปรโดยการใช้ด่างมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยทำให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chen and Jane (1994 A) ที่พบว่าคุณสมบัติของแป้งละลายในน้ำเย็นที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวตัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ มีการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

1.8 คุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสารละลายตัวกลาง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร และแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปร ได้แก่ ความสามารถในการพองตัว, ความสามารถในการละลาย, ความเป็นกรดด่าง และความหนืดของแป้งในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด คือ น้ำกลั่น(PW), 0.1 M HCl และ Phosphate Buffer pH 6.8 (PB 6.8) มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 16 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 16 คุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรและแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปร ในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด คือ น้ำกลั่น(PW), 0.1 M HCl และ Phosphate Buffer pH 6.8 (PB 6.8)

ชนิดของแป้ง	ชนิดของตัวกลาง	คุณสมบัติ			
		Swelling Power	Solubility (%)	pH	Viscosity (cps)
Native GRS	PW	1.66±0.12	0.48±3.61	5.37±0.09	N/A
	0.1 M HCl	1.60±0.12	0.38±1.66	1.00±0.02	N/A
	PB 6.8	1.66±0.24	0.46±4.77	6.85±0.03	N/A
AGS	PW	4.11±0.09	57.11±1.66	7.72±0.03	180.48±4.06
	0.1 M HCl	4.61±0.32	61.11±3.21	1.06±0.04	64.76±1.49
	PB 6.8	6.44±0.04	62.69±1.60	6.86±0.06	543.10±7.15

ค่าความเป็นกรดด่าง น้ำกลั่น เท่ากับ 5.56, สารละลายกรด 0.1 M HCl เท่ากับ 1.02 และ สารละลาย phosphate buffer pH 6.8 เท่ากับ 6.86

ความหนืดของสารละลาย 5% w/w HPMC E15LV ในน้ำกลั่น เท่ากับ 111.55±1.69 cps

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

1.8.1 ความสามารถในการพองตัว (swelling capacity)

ผลการศึกษาความสามารถในการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (0.1 M HCl) และ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 (PB 6.8) (ดังแสดงในตารางที่ 16) พบว่า แป้งข้าวเหนียวก่อนดัดแปรสามารถพองตัวน้อย เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้งจึงยึดเกาะกันแน่น โมเลกุลของสารละลายไม่สามารถแทรกยึดจับกับโมเลกุลของแป้งได้จึงพองตัวได้น้อย สำหรับความสามารถในการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปร ในสารละลายตัวกลางทั้งสามชนิดมีความสามารถในการพองตัวได้ดี และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรแล้ว พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลแป้ง จึงคูลน้ำและพองตัวได้ ในสารละลาย 0.1 M HCl แป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถพองตัวได้ดีขึ้น เนื่องจากแป้งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด กรดสามารถเข้าไปตัดสายพอลิเมอร์ของแป้งให้สั้นลง ตัวทำละลายสามารถแทรกจับพันธะกับโมเลกุลมากขึ้น ความสามารถในการพองตัวจึงเพิ่มขึ้น ในสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ แป้งข้าวเหนียวดัดแปรพองตัวดีกว่าในสารละลาย 0.1 M HCl เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตบัฟเฟอร์ได้ดี ความสามารถในการพองตัวจึงสูงขึ้น

1.8.2 ความสามารถในการละลาย (solubility)

ผลการศึกษาความสามารถในการละลายของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (0.1 M HCl) และ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 (PB 6.8) (ดังแสดงในตารางที่ 16) พบว่า ความสามารถในการละลายของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลางทั้งสามชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรสามารถละลายได้น้อยมาก เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งจึงยึดเกาะกันแน่น โมเลกุลของสารละลายไม่สามารถแทรกและยึดจับกับโมเลกุลของแป้งได้ จึงทำให้โมเลกุลของแป้งไม่ละลายได้น้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรที่พองตัวได้น้อยมาก แป้งจึงมีความสามารถในการละลายได้น้อย สำหรับแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรแล้ว พันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งถูกทำให้แตกออก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกและยึดจับกับโมเลกุลของแป้งแป้งดัดแปรจึงสามารถละลายในสารละลายได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) แป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถละลายในสารละลาย 0.1 M HCl ได้มากกว่าในน้ำกลั่น เนื่องจากแป้งที่ผ่านการดัดแปรมีความสามารถในการละลายในน้ำกลั่นได้และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด กรดสามารถเข้าไปตัดสายพอลิเมอร์ของแป้งให้สั้นลง ตัวทำละลายจึงสามารถเข้าแทรกจับพันธะกับโมเลกุลมากขึ้น ความสามารถในการละลายจึงเพิ่มขึ้น ในสารละลาย PB 6.8 แป้งข้าวเหนียวดัดแปรสามารถละลายได้ดีกว่าในน้ำ เนื่องจากสารละลาย PB 6.8 เป็นน้ำย่อยชนิดหนึ่งที่มีอยู่ในกระเพาะอาหารของคนเรา และทำปฏิกิริยากับได้ดีกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ทำให้ความสามารถในการละลายจึงสูงขึ้น แต่ความสามารถในการละลายของแป้งดัดแปรฯ ในสารละลาย PB 6.8 มีค่ามากกว่าในสารละลาย 0.1 M HCl เล็กน้อย

1.8.3 ความเป็นกรดต่างของสารละลายแป้งข้าวเหนียว

ผลการศึกษาความเป็นกรดต่างของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (0.1 M HCl) และ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 (PB 6.8) ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่า ความเป็นกรดต่างของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลางทั้งสามชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปรในสารละลายน้ำกลั่นมีความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5.37 ± 0.09 ซึ่งแป้งข้าวเหนียวมีความเป็นกลางทางกรดต่าง และค่าที่ทดสอบได้จึงเป็นค่าความเป็นกรดต่างของน้ำกลั่น ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรแล้วมีค่าเท่ากับ 7.72 ± 0.03 ซึ่งมีความเป็นด่างเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากกระบวนการตัดแปรมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และสะเทินแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริก และ กรดซิตริก จึงมีการตกค้างของโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ในแป้งตัดแปรที่เตรียมได้ (ผดุงขวัญ จิตโรภาส และ นุวัตร วิศว์รุ่งโรจน์, 2551) สำหรับแป้งข้าวเหนียวทั้งก่อนการตัดแปรและหลังการตัดแปรในสารละลายที่เป็น 0.1 M HCl และสารละลาย PB 6.8 มีค่าความเป็นกรดต่างที่วัดได้ใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายตัวกลางอาจเกิดจากความแรงของกรดต่างของสารละลายตัวกลาง

1.8.4 ความหนืดของสารละลายแป้งข้าวเหนียว

ผลการศึกษาความหนืดของแป้งข้าวเหนียวในสารละลายตัวกลาง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (0.1 M HCl) และ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ พีเอช 6.8 (PB 6.8) ดังแสดงในตารางที่ 16 พบว่า แป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร ไม่มีความหนืด ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับความสามารถในการละลายและกำลังการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวก่อนการตัดแปร โมเลกุลแป้งยังคงสภาพเดิมอยู่ แป้งเกิดการแยกตะกอนจากสารละลายตัวกลางจึงไม่เกิดความหนืดขึ้น สำหรับแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการตัดแปรฯ ในสารละลายตัวกลางทั้งสามชนิด ทำการทดสอบโดยกำหนดสภาวะของเครื่องวัดความหนืด Brookfield DVIII หัว spindle No. 34 ความเร็วในการหมุนตั้งแต่ 2 ถึง 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการไหลของสารละลาย HPMC E15LV มีลักษณะเป็นแบบ Newtonian ส่วนลักษณะการไหลของสารละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในตัวกลางทั้งสามชนิด เป็นแบบ Pseudoplastic จึงได้กำหนดสภาวะในการทดสอบเพื่อหาค่าความหนืด โดยใช้หัว spindle No. 34 ความเร็วในการหมุน 100 รอบต่อนาที อัตราการเฉือน (Shear rate) 28 sec^{-1} ที่อุณหภูมิห้อง 26 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า ความหนืดของของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสารละลายทั้งสามชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของแป้งตัดแปรฯ ถูกทำลายไปทำให้เม็ดแป้งละลายและพองตัวอูมตัวทำละลายไว้ โมเลกุลของตัวทำละลายอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนที่ได้ยากความหนืดจึงเกิดขึ้น แป้งตัดแปรฯ ในตัวทำละลายที่เป็นกรด 0.1 M HCl กรดได้เข้าไปตัดสายพอลิเมอร์ของแป้งให้ย่อยสั้นลง การเคลื่อนไหวของโมเลกุลเนื่องจากแรงเฉือนเป็นไปได้ง่าย ความหนืดจึงมีค่าลดลง ส่วนความหนืดของแป้งตัดแปรในตัวทำละลายที่เป็นฟอสเฟตบัฟเฟอร์ สอดคล้องกับการวิจัยของ Bonferoni, Rossi, Ferrari, Stavik, Pena-Romero and Caramella (2000) ที่ทำการศึกษาค่าความหนืดของคาร์ราจิน Viscarin GP 109 (low viscosity) ในสารละลายตัวกลางที่เป็นบัฟเฟอร์กรด pH 1.2 และ phosphate pH 6.8 ที่พบว่า ความหนืดในสารละลายตัวกลางฟอสเฟตบัฟเฟอร์มีค่ามากกว่าความหนืดในสารละลายบัฟเฟอร์กรด pH 1.2

2. การศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์

คุณสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์ที่ได้ศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ความเป็นกรดค่าและความหนืดของสารละลายฟิล์ม คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของแผ่นฟิล์ม ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ต่างกัน 3 ชนิด ซึ่งความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ โดยเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร แป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ได้ผลดังรายละเอียดที่แสดงต่อไปนี้

2.1 ความเป็นกรดค่าและความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

คุณสมบัติความเป็นกรดค่าและความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ซึ่งประกอบด้วยแป้งข้าวเหนียวดัดแปรความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) และใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร แป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (ดังแสดงในตารางที่ 17 และ 18)

2.1.1 ความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

คุณสมบัติด้านความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) และใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง และความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น แป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 17 พบว่า ความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 5.37 ± 0.09 ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำกลั่น และความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 7.72 ± 0.03 ความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจาก HPMC E15LV มีค่าเท่ากับ 8.03 ± 0.01 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีค่าอยู่ในช่วง 8.05 ± 0.01 ถึง 8.16 ± 0.01 ซึ่งสารเพิ่มความยืดหยุ่นเหล่านี้มีความเป็นกลางทางกรดค่า จึงไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรดค่าของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียว

ตารางที่ 17 คุณสมบัติความเป็นกรดต่างของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งก่อนการดัดแปร แป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความเป็นกรดต่าง		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	8.11±0.01	8.06 ±0.01	8.07 ±0.01
Sorbitol	8.05 ±0.01	8.16 ±0.01	8.12 ±0.01
Polyethylene glycol 400	8.08 ±0.01	8.07 ±0.00	8.08 ±0.01

ค่าความเป็นกรดต่าง น้ำกลั่น เท่ากับ 5.56

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.72±0.03

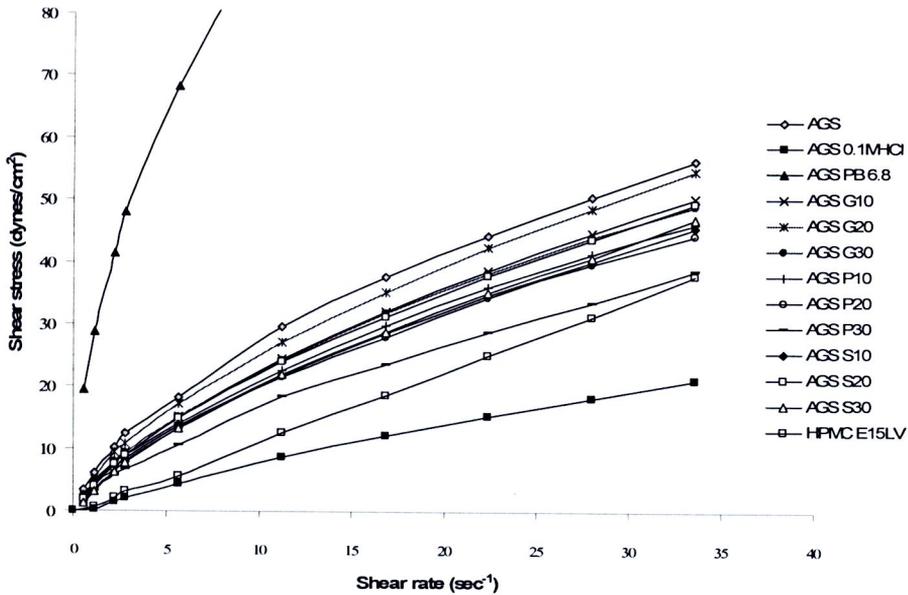
แป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 5.37±0.09

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 8.03±0.01

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

2.1.2 ความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

คุณสมบัติด้านความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างชนิดกัน 3 ชนิด คือ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) และใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับความหนืดของสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น แป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่า การไหลของสารละลายฟิล์ม HPMC E15LV มีลักษณะเป็นแบบ Newtonian ส่วนลักษณะการไหลของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสามชนิดและทุกระดับเป็นแบบ Pseudoplastic ดังแสดงในภาพที่ 23 ดังนั้นจึงได้กำหนดสถานะในการทดสอบเพื่อหาค่าความหนืด โดยใช้หัว spindle No. 34 ความเร็วในการหมุน 100 รอบต่อนาที อัตราการเฉือน (Shear rate) 28 sec⁻¹ ที่อุณหภูมิห้อง 26 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 18 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิดต่างๆ และความเข้มข้นต่างๆ กับความหนืดที่เกิดขึ้น ได้แสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 23 คุณสมบัติการไหลของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (AGS) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับสารละลายฟิล์มจากแป้งก่อนดัดแปร แป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ตารางที่ 18 คุณสมบัติด้านความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งก่อนการดัดแปร แป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความหนืด (cps)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	159.40±5.81	173.57±6.61	156.90±6.60
Sorbitol	143.33±1.69	155.95±1.03	145.24±0.55
Polyethylene glycol 400	147.50±2.50	141.90±3.60	119.88±1.65

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความหนืดเท่ากับ 180.48±4.06 cps

แป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความหนืด เท่ากับ N/A

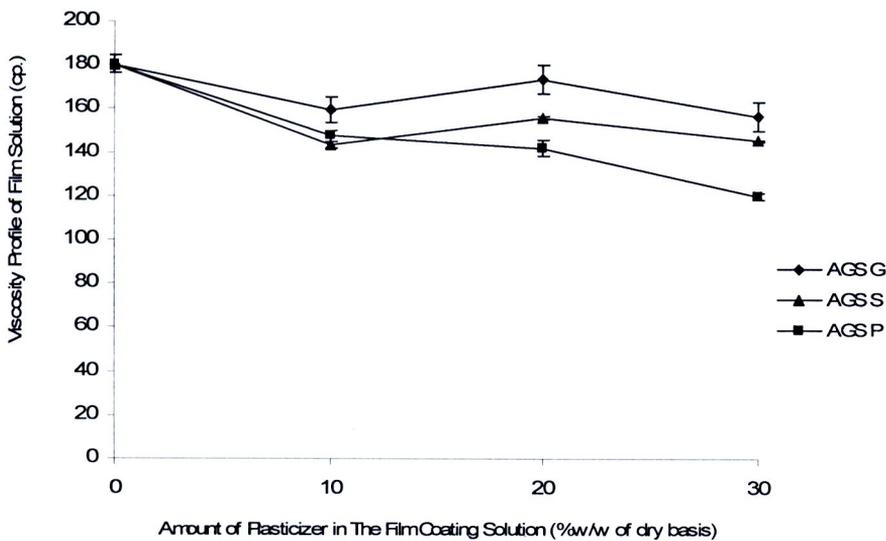
HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความหนืด เท่ากับ 111.55±1.69 cps

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

จากผลการทดสอบ พบว่า ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีผลต่อความเหนียวของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปร พบว่า ความเหนียวของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนี้ glycerol, sorbitol และ PEG400 ซึ่งความเหนียวมีค่าแปรผกผันกับน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่น เนื่องจาก สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก การเข้าไปแทรกในสายพอลิเมอร์ของแป้งได้ไม่ดี ขัดขวางสายพอลิเมอร์ จึงทำให้ความเหนียวลดลง การใช้ PEG400 เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของ PEG400 ที่ระดับร้อยละ 10 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง ทำให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ลดลง แต่ที่ร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง ทำให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ลดลง เนื่องจาก PEG มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (molecular weight ของ PEG400 เท่ากับ 400) โมเลกุลสามารถจับกับโมเลกุลของแป้งจึงจับได้น้อยลง สัมพันธ์กับปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความเหนียวลดลง

สำหรับการใช้ glycerol และ sorbitol เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่น 2 ชนิดนี้ มีผลต่อความเหนียวของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ กล่าวคือความเหนียวของสารละลายฟิล์มที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ มีค่าน้อยกว่าความเหนียวของสารละลายฟิล์มที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ทำให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ส่งผลให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มกลับมีค่าลดลงอีกครั้ง จากผลดังกล่าว อาจเกิดเนื่องจากการแทรกตัวของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเข้าไปสู่สายพอลิเมอร์มีความแตกต่างกัน กล่าวคือการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเหนียวของสารละลายฟิล์มมีค่าลดลงเนื่องจากการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณน้อยเกินไปทำให้ไปแทรกตัวในโมเลกุลของแป้งไม่สม่ำเสมอ จึงเป็นการขัดขวางการยึดเกาะของโมเลกุลแป้งทำให้ความเหนียวลดลง เมื่อใช้ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ทำให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณมากเพียงพอ โมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นสามารถเข้ายึดจับกับโมเลกุลของแป้งเกิดโครงข่ายพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากขึ้น ความเหนียวจึงสูงขึ้น ในกรณีที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ทำให้ความเหนียวของสารละลายฟิล์มมีค่าลดลง เนื่องจากการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นมากเกินไป ทำให้สารเพิ่มความยืดหยุ่นไปแทรกในโมเลกุลของแป้ง และขัดขวางการยึดเกาะของโมเลกุลแป้งจึงทำให้ความเหนียวลดลง



ภาพที่ 24 ความหนืดของสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (AGS) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาและน้ำหนักของแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปร และคุณสมบัติทางกลฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ที่เตรียมจากสารละลายฟิล์มที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแตกต่างกัน นำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มจากสารละลายฟิล์มน้ำหนัก 200 กรัม ในขนาดพื้นที่ 200x150 มิลลิเมตร (คิดเป็นน้ำหนักแป้งข้าวเหนียวดัดแปร 33.33 mg./cm².) และอบด้วยลมร้อนที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ได้ผลแสดงในตารางที่ 19 ถึง 22 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ความหนาของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

ผลการศึกษาความหนาของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (n=10) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 19 พบว่าความหนาของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกันทั้ง 3 ชนิด ทุกระดับความเข้มข้น มีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อาจเนื่องจากปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสารอื่นในตำรับ จึงไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม หากพิจารณาถึงลักษณะผิวของแผ่นฟิล์ม พบว่าแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ใช้ glycerol เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีลักษณะผิวเรียบอาจเกิดจาก glycerol มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงแทรกตัวในโมเลกุลของแป้งได้ดีกว่าและยึดจับกับ โมเลกุลของแป้งได้ดี แต่การใช้ sorbitol และ PEG เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้ฟิล์มที่ได้มีลักษณะผิวขรุขระ ซึ่งอาจจะอธิบายได้ว่า

sorbitol ที่ใช้อยู่ในรูปของแข็ง เวลาใช้ต้องนำมาละลายน้ำและนำไปผสมในสารละลายฟิล์ม เมื่อนำไปทำให้แห้ง จึงอาจเกิดเป็นผลึกของ sorbitol เกิดขึ้น ในกรณีของ PEG400 เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีโมเลกุลใหญ่และมีความสามารถในการยึดจับกับโมเลกุลของแป้งได้น้อย

ตารางที่ 19 คุณสมบัติความหนาของฟิล์ม จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความหนา (mm)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	0.25±0.019	0.24±0.019	0.25±0.025
Sorbitol	0.27±0.017	0.26±0.021	0.25±0.029
Polyethylene glycol 400	0.25±0.019	0.27±0.022	0.27±0.033

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความหนาเท่ากับ 0.24±0.016 มิลลิเมตร

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าความหนาเท่ากับ 0.27±0.011 มิลลิเมตร

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 10

2.2.2 น้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

ผลการศึกษาน้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (n=10) ดังแสดงในตารางที่ 20 พบว่า น้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าเท่ากับ 32.32 ± 0.55 mg./cm² ซึ่งใกล้เคียงกับค่าปริมาณแป้งดัดแปรฯ ต่อพื้นที่ที่เตรียมที่ได้จากการคำนวณ ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีต่อน้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) กล่าวคือน้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ แปรผันตามกับความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นส่งผลให้น้ำหนักของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในการศึกษานี้ มีคุณสมบัติการระเหยได้ยาก (Methew and Dufresne, 2002) เมื่อฟิล์มผ่านการทำให้แห้งด้วยความลมร้อน สารเพิ่มความยืดหยุ่นจึงยังคงอยู่ในส่วนของแผ่นฟิล์ม ส่วนน้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างชนิดเทียบความเข้มข้นเดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เนื่องจากผลของปริมาณที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในสัดส่วนเดียวกัน

ตารางที่ 20 คุณสมบัติน้ำหนักของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับเปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	น้ำหนัก (mg./cm ²)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	34.19±0.66	35.96±1.17	37.86±1.38
Sorbitol	34.58±1.04	36.87±1.15	39.10±1.30
Polyethylene glycol 400	34.50±1.33	36.71±1.33	38.75±1.45

แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าน้ำหนัก เท่ากับ 32.32±0.55 mg./cm²

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าน้ำหนัก เท่ากับ 32.34±0.33 mg./cm²

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 10

2.2.3 Puncture strength ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงเจาะ (Puncture Strength; PS) ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (n=3) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพที่ 25

ตารางที่ 21 Puncture strength ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับเปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

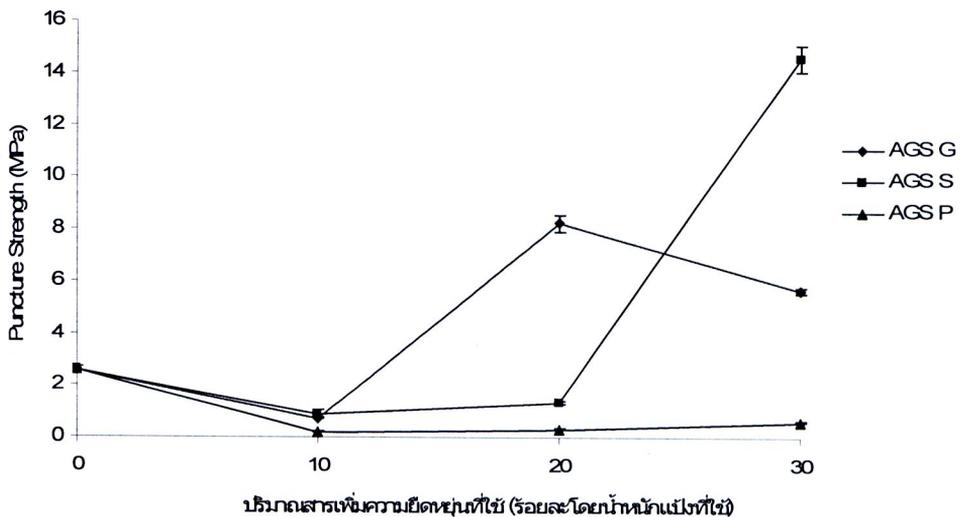
ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	Puncture strength (MPa)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	0.71±0.02	8.21±0.31	5.64±0.13
Sorbitol	0.88±0.15	1.34±0.05	14.56±0.52
Polyethylene glycol 400	0.19±0.01	0.32±0.02	0.60±0.03

แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า Puncture strength เท่ากับ 2.59±0.09 MPa

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า Puncture strength เท่ากับ 74.72±2.33 MPa

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

พบว่า ความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะ ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ใช้ ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะเพิ่มขึ้น ยกเว้นแผ่นฟิล์มที่ใช้ glycerol ความเข้มข้นร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้ง มีค่าการต้านทานแรงเฉาะน้อยกว่าแผ่นฟิล์มที่ใช้ glycerol ความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักแห้ง เนื่องจากฟิล์มสามารถยึดได้มากขึ้น จึงใช้แรงเฉาะลดลง



ภาพที่ 25 Puncture strength ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูป เตรียมจากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูป ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปรรูป และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูป ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง พบว่าฟิล์มมีความต้านทานแรงเฉาะลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูป ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น เนื่องจากโมเลกุลของสารเพิ่มความยึดหยุ่นแทรกจับพันธะระหว่างสายโมเลกุลของแป้ง ทำให้ปริมาณของแป้งต่อพื้นที่ลดลง ความแข็งแรงของฟิล์มจึงลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Bangyekan และคณะ (2006) ที่พบว่าการใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่นในปริมาณที่ต่ำ มีผลทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มที่ได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติลดลง และเมื่อพิจารณาแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรรูปที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักแห้ง พบว่าแผ่นฟิล์มมีความต้านทานแรงเฉาะมากกว่าแผ่นฟิล์มที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง เนื่องจากพันธะโมเลกุลของแป้งสามารถเคลื่อนไหวได้อิสระมากขึ้น จึงสามารถรับแรงกระทำที่มีต่อฟิล์มได้เพิ่มขึ้น โดยแผ่นฟิล์มที่ใช้ glycerol เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่นทำให้มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะมากกว่าการใช้ sorbitol และ PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น และมากกว่าฟิล์มแป้งที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ทั้งนี้เนื่องจาก glycerol มีโมเลกุลเล็กกว่าและความเข้ากันได้กับโครงสร้างโมเลกุลของแป้งได้ดี โครงสร้างจึงมีความแข็งแรง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Sothornvit and Krochto (2001) ที่ศึกษาผลของสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่อความสามารถในการต้านทานแรงดึงของฟิล์ม β -lactoglobulin ซึ่งพบว่าสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากน้อยต่างกันทั้ง 3 ชนิด คือ PEG400, sorbitol และ glycerol ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลง สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น ตามลำดับ สำหรับแผ่นฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง พบว่าฟิล์มแป้งที่มี glycerol มีความสามารถทนแรงได้ลดลง เนื่องจาก glycerol มีคุณสมบัติทำให้ฟิล์มมีความอ่อนตัวและความยึดหยุ่นมากขึ้น หากมีการใช้ในปริมาณมากเกินไปอาจทำให้เกิดแรงต้านการเจาะลดลง และฟิล์มแป้งที่มี sorbitol เป็นฟิล์มมีความแข็งแรงมากที่สุด เมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้ง 3 ชนิดและ 3 ความเข้มข้น ทั้งนี้อาจเป็นปริมาณที่มีความเหมาะสมกับชนิดของแป้งที่ใช้เป็นสารก่อฟิล์ม แต่อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาประกอบกับคุณสมบัติอื่นๆ ด้วย

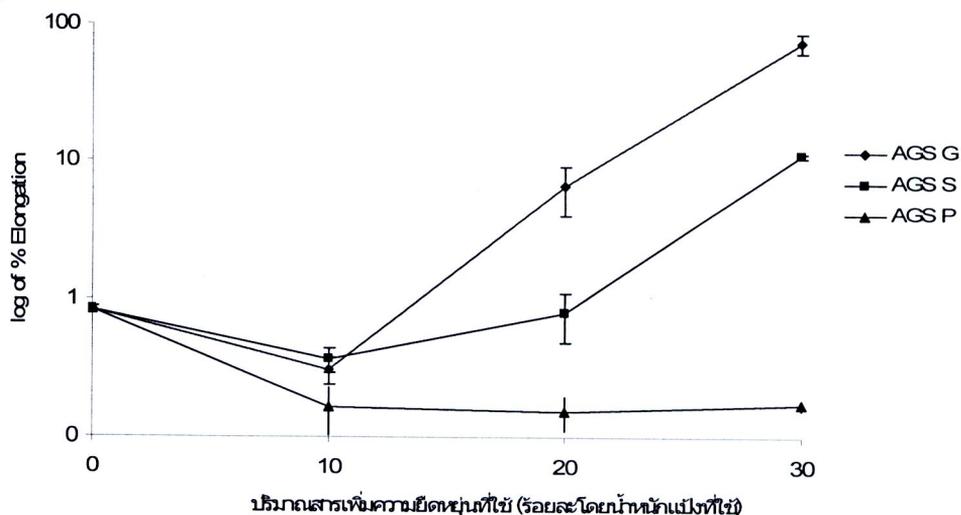
2.2.4 % Elongation ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร

ผลการศึกษาศักยภาพในการยืดตัว (Elongation; %Elong) ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น (n=3) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 22 และภาพที่ 26

ตารางที่ 22 Elongation ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	Elongation (%)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	0.31±0.07	6.62±2.60	73.94±12.09
Sorbitol	0.36±0.07	0.79±0.31	11.10±0.46
Polyethylene glycol 400	0.17±0.06	0.15±0.04	0.17±0.01

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า %Elong เท่ากับ 0.84±0.03 %
 HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า %Elong เท่ากับ 30.35±3.09 %
 ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

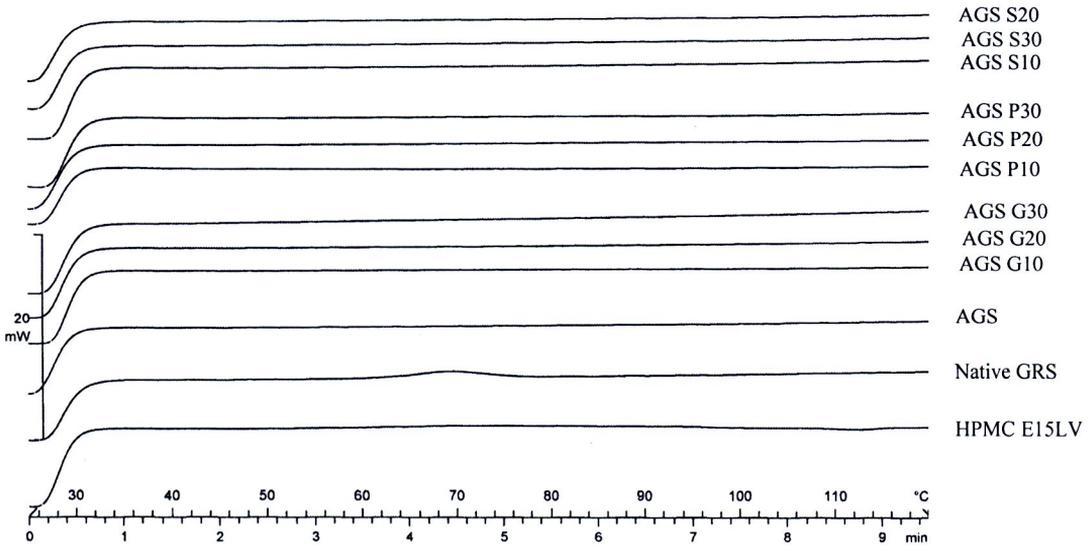


ภาพที่ 26 Elongation ของฟิล์มแข็งข้าวเหนียวคัดแปร^๔ จากสารละลายที่มีแข็งข้าวเหนียวคัดแปร^๔ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแห้ง เปรียบเทียบกับแข็งคัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ผลการศึกษพบว่า ผลของชนิดและปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อความสามารถในการยึดตัวของฟิล์ม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสามชนิดที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง ทำให้ความสามารถในการยึดของฟิล์มลดลง เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีปริมาณต่ำ ทำให้การแทรกตัวในโครงสร้างของโมเลกุลของแข็งลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ฟิล์มเกิดการแตกง่ายขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการยึดของฟิล์มน้อยลง การเพิ่มระดับปริมาณความเข้มข้นของ PEG400 ในฟิล์มแข็งทำให้ความสามารถในการยึดตัว มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับฟิล์มแข็งที่มี glycerol และ sorbitol เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแห้งพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่น ทำให้ความสามารถในการยึดตัวเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Bourtoom (2008) ซึ่งพบว่า การเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ระดับร้อยละ 20 ถึง 60 ของน้ำหนักฟิล์มข้าวเจ้า-โคโคซาน มีผลทำให้ฟิล์มความสามารถในการยึดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสองชนิดมีขนาดโมเลกุลที่เล็กจึงสามารถแทรกจับกับโมเลกุลของแข็งได้ดี และมีความเข้ากันได้กับแข็งข้าวเหนียวคัดแปร^๔ โครงสร้างมีความยืดหยุ่นดีขึ้น ฟิล์มจึงมีความสามารถในการยึดเพิ่มขึ้น

2.3 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ดังแสดงในภาพที่ 27



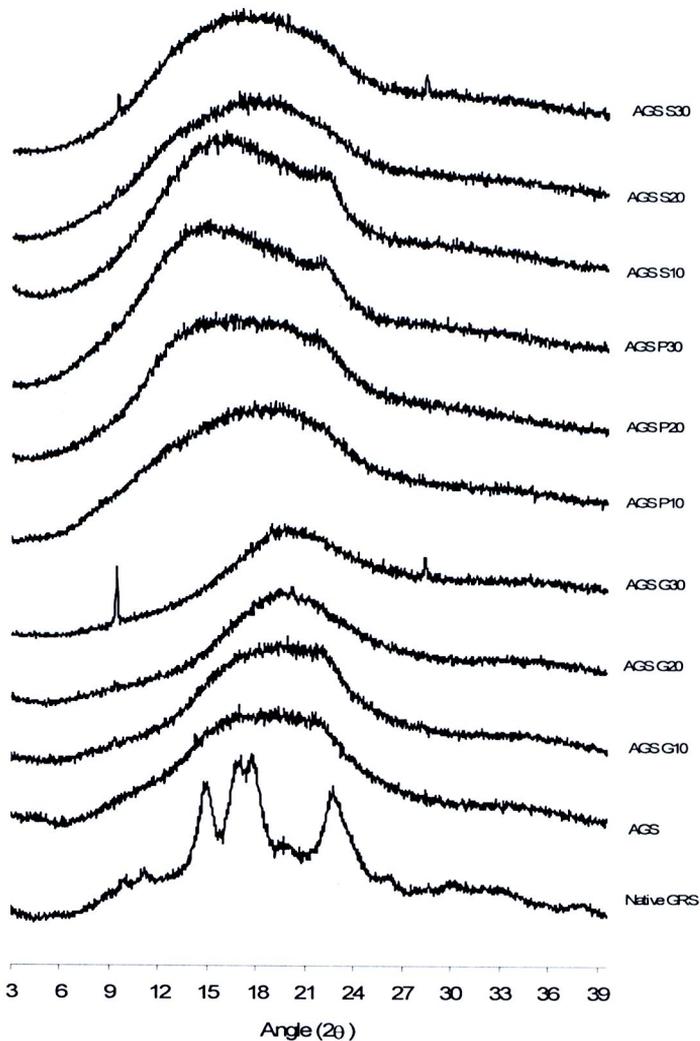
ภาพที่ 27 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (AGS) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิจากฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในช่วง 25 ถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้ในการทดสอบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสามชนิดและทุกระดับความเข้มข้น ไม่ทำให้คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสามชนิดมีความคงตัวทางด้านความร้อน (heat stability) ที่สูงกว่าอุณหภูมิจากฟิล์ม 160 องศาเซลเซียส (Mathew and Dufresne, 2002) จึงไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของฟิล์มในช่วงอุณหภูมิจากฟิล์มที่ใช้ทดสอบ แต่ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวก่อนการดัดแปร มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านอุณหภูมิจากฟิล์มโดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นเปลี่ยนแปลง (Onset Temperature; T_o) เท่ากับ 60.96 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak Temperature; T_p) เท่ากับ 69.29 องศาเซลเซียส อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง (Conclusion Temperature; T_c) เท่ากับ 76.11 องศาเซลเซียส และเอนทัลปี (Enthalpy; ΔH) เท่ากับ 11.16 J/g. ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิจากฟิล์มที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแป้งข้าวเหนียวที่ได้จากการศึกษาข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มแป้งก่อนการดัดแปร ถูกทำให้ผ่านความร้อนจากลมร้อนที่อุณหภูมิจากฟิล์ม 45 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิจากฟิล์มในซัสน้ำของแป้ง ฟิล์มแป้งยังไม่ผ่านการเกิดเจล เมื่อทำการศึกษาจึงพบเจลในซัสน้ำ

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิดังที่กล่าวมาแล้ว ส่วนฟิล์ม HPMC E15LV จากเทอร์โมแกรมมีความคงตัวต่อความร้อน เนื่องจากกราฟคุณสมบัติมีความเรียบตลอดอุณหภูมิในช่วงทดสอบ

2.4 คุณสมบัติโครงสร้างผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น โดยใช้วิธีการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer; XRD ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 คุณสมบัติโครงสร้างผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (AGS) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

จากผลการศึกษาพบว่า รูปแบบโครงสร้างผลึกของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างชนิดและระดับการใช้ที่ต่างกัน มีรูปแบบโครงสร้างและมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกที่ต่างกัน แป้งข้าวเหนียวจัดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูง มีอัตราการคืนตัว (retrogradation) ที่ต่ำ (กล้าณรงค์ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) เมื่อผ่านการเกิดเจลาทิโนเซชันเกิดการคืนตัว หรือการเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งใหม่เป็นไปได้ช้า จึงมีลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) ความเป็นผลึกจึงลดลง สอดคล้องกับการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ก่อนหน้านี้ ที่พบว่า ความเป็นผลึกลดลงเช่นกัน ในฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมฟิล์ม โมเลกุลของแป้งมีระยะเวลาในการคืนตัวมากขึ้น ทั้งจากการอบฟิล์มที่อุณหภูมิไม่สูงมาก (ต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทิโนเซชันของแป้ง) และการเก็บฟิล์ม ทำให้พบว่าฟิล์มมีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นกว่าเดิมเล็กน้อย ฟิล์มแป้งตัดแปรฯ ที่มี glycerol หรือ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้ง พบว่า ฟิล์มที่ได้มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น เนื่องจาก พันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งถูกแทรกด้วยสารเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้มีความอิสระมากขึ้น สอดคล้องกับความหนืดของสารละลายแป้งตัดแปรฯ ก่อนหน้านี้ ที่พบว่าที่ระดับดังกล่าวความหนืดของสารละลายแป้งตัดแปรฯ มีค่าลดลง อัตราการคืนตัวและการเรียงตัวเพิ่มขึ้น จึงเกิดโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง ฟิล์มมีความเป็นผลึกลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น เนื่องจาก พันธะระหว่างโมเลกุลของแป้งถูกแทรกด้วยโมเลกุลของ glycerol หรือ sorbitol จำนวนมาก มีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งตัดแปรฯ ในสถานะดังกล่าวที่เพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างโมเลกุลของแป้งไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ ความเป็นผลึกจึงลดลง ส่วนฟิล์มที่มี PEG400 ระดับการใช้ร่วมในฟิล์มที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความเป็นผลึกในฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEG400 มีความเข้ากันได้กับแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ต่ำไม่สามารถแทรกยึดจับทางพันธะกับโมเลกุลของแป้งได้ หรือได้น้อย ทำให้การจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกได้มากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sothornvit and Krochto (2001) ที่พบว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด PEG400 ที่มีน้ำหนักโมเลกุลมาก ทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดึงของฟิล์มลดลง เนื่องจากมีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์จากธรรมชาติต่ำ ดังนั้นจึงพบความเป็นผลึกในฟิล์มแป้งตัดแปรฯ ในสถานะดังกล่าวเพิ่มขึ้น

2.5 การซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม และการดูดความชื้น ของฟิล์ม

ผลการศึกษาการซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม (Water Vapor Permeability of Films) และการดูดความชื้น (Water Uptake) ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (n=3) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 29 และตารางที่ 23

2.5.1 การซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

ผลการศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์ม (Water Vapor Permeability of Films; WVP) ของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 23

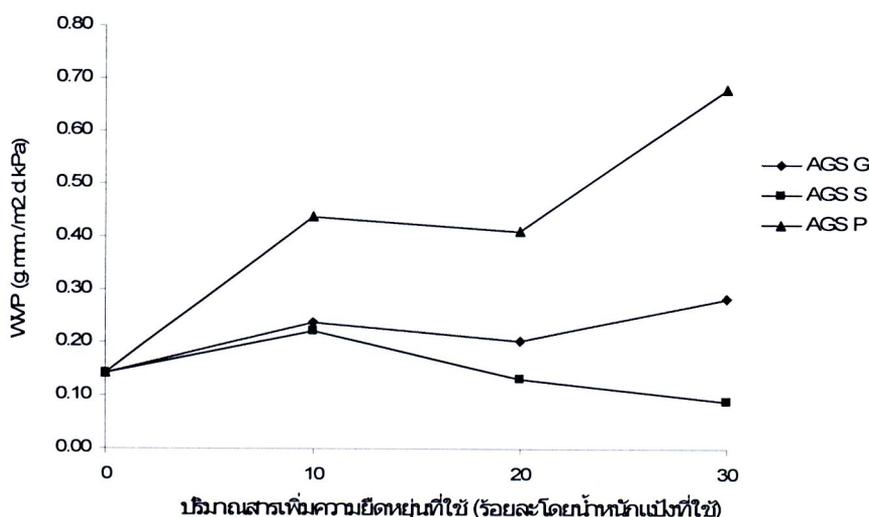
ตารางที่ 23 การซึมผ่านไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV และแป้งตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	Water Vapor Permeability (g.mm/m ² .d.kPa.)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	0.2375±0.0030	0.2015±0.0027	0.2828±0.0039
Sorbitol	0.2209±0.0042	0.1322±0.0034	0.0885±0.0050
Polyethylene glycol 400	0.4365±0.0065	0.4112±0.0062	0.6821±0.0098

แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า WVP เท่ากับ 0.1428±0.0040 g.mm/m².d.kPa.
 HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า WVP เท่ากับ 0.1533±0.0027 g.mm/m².d.kPa.
 ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3

จากการศึกษาพบว่า ผลชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มี glycerol และ PEG400 มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ glycerol และ PEG400 ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mali et al. (2004), Bangyekan et al. (2006) และ Lopez et al. (2008) ที่พบว่า ปริมาณของ glycerol ที่ใช้ในฟิล์มแป้งมันมือเสือ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เคลือบด้วยไคโตซาน และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีทางเคมี มีผลทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก glycerol มีคุณสมบัติ hygroscopic สูง เมื่อนำไปผสมกับสารก่อฟิล์ม ทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการดูดความชื้นได้เพิ่มขึ้น และ Silica gel ซึ่งถูกใช้ในการดูดความชื้น จึงอาจจะมีโอกาสที่ความชื้นซึมผ่านแผ่นฟิล์มเข้ามาได้ สำหรับฟิล์มที่มี PEG400 เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นนั้นจัดเป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงของฟิล์มน้อย เมื่อฟิล์มได้รับแรงดันที่ดันระหว่างสถานะภายในโถทดสอบกับภายในขวดทดสอบ จึงเกิดการแตก (crack) ภายในโครงข่ายของฟิล์มแป้งขึ้น ไอน้ำจึงซึมผ่านแผ่นฟิล์มที่มี PEG400 ได้มากกว่าแผ่นฟิล์มที่มี glycerol และ sorbitol นอกจากนี้ การซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มที่มี PEG400 เพิ่มขึ้นตามปริมาณ PEG400 ที่เพิ่มขึ้น และการศึกษาของ Mathew and Dufresne (2002), Pongjanyakul and Puttipipatkachorn (2007) และ Panda et al. (2009) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับ

คุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มแป้งข้าวโพดข้าวเหนียว ฟิล์มอัลจินต-แมกเนเซียมอัลลูมินัมซิลิเกต และฟิล์มจากเมือกโมรินกาโอลิเฟียรา ตามลำดับ โดยศึกษาเกี่ยวกับการใช้ PEG400 และ maltital ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกับ PEG400 ทำให้ไอน้ำสามารถซึมผ่านฟิล์มได้มากกว่าการใช้ glycerol เมื่อพิจารณาถึงการใช้ PEG400 ที่ระดับร้อยละ 10 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง อาจมีเป็นไปได้ว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นดังกล่าว มีความสามารถในการแทรกจับกับพันธะไฮโดรเจนในสายพอลิเมอร์ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์มดังกล่าวแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

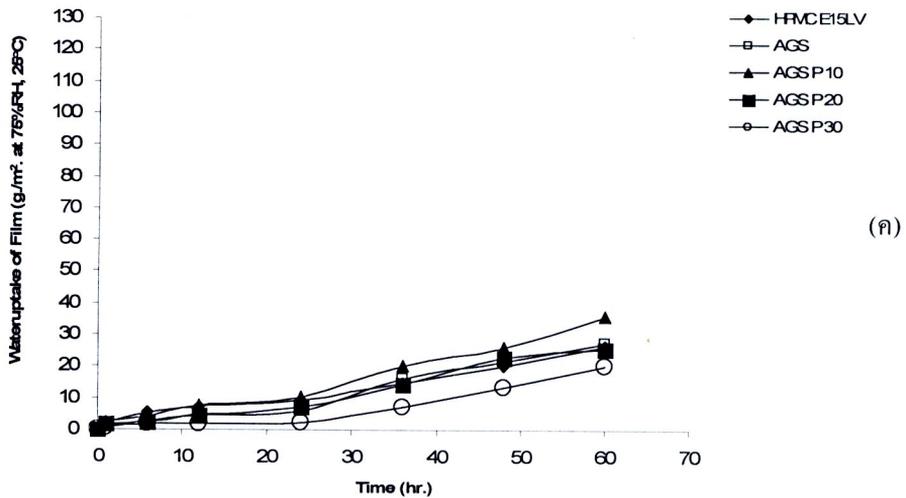
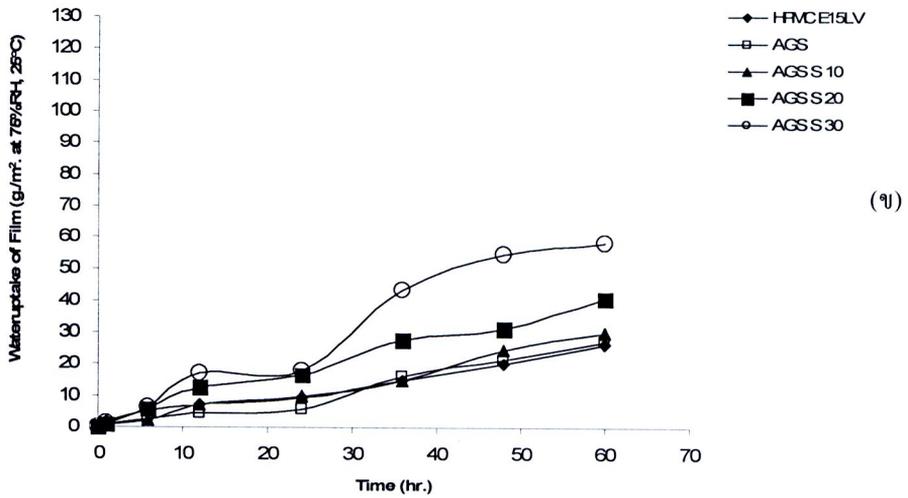
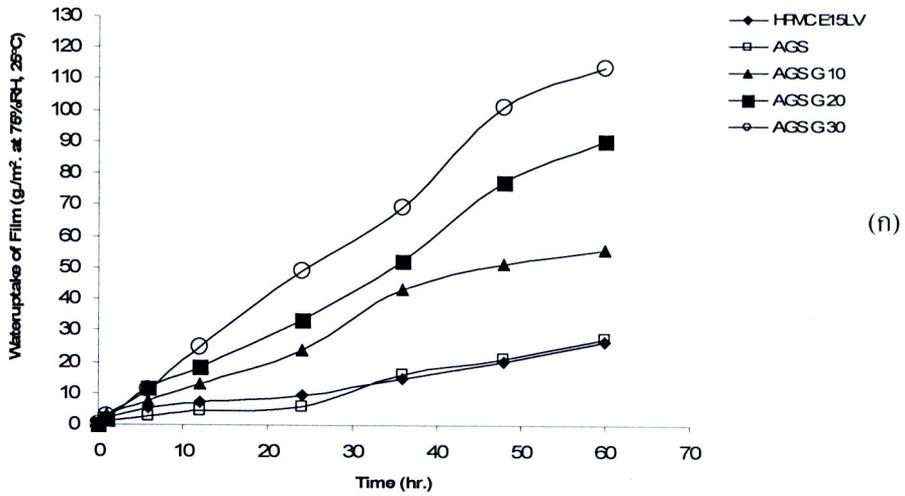


ภาพที่ 29 คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (AGS) ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน (glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P)) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

สำหรับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มี sorbitol ร่วมด้วย พบว่า มีค่าคุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านฟิล์มลดลงตามปริมาณของ sorbitol ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Talja et al. (2007) ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณของ sorbitol ในฟิล์มแป้งมันฝรั่ง ถึงระดับร้อยละ 40 ของน้ำหนักแป้ง ทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำสามารถผ่านฟิล์มได้ลดลง แต่เมื่อใช้ในระดับที่สูงกว่าขึ้นไป ทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำสามารถผ่านฟิล์มเพิ่มขึ้น และผลดังกล่าวยังสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานแรงเจาะ PS ของฟิล์มที่มี sorbitol ที่ระดับเพิ่มขึ้นฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากโครงข่ายภายในฟิล์มมีความแข็งแรงขึ้น ทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำสามารถผ่านฟิล์มได้ลดลง

2.5.2 การดูความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ

ผลการศึกษาคุณสมบัติในการดูความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น จำนวนตัวอย่าง n=3 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 24 และภาพที่ 30 ถึง 31



ภาพที่ 30 คุณสมบัติการดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (AGS) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความชื้นหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

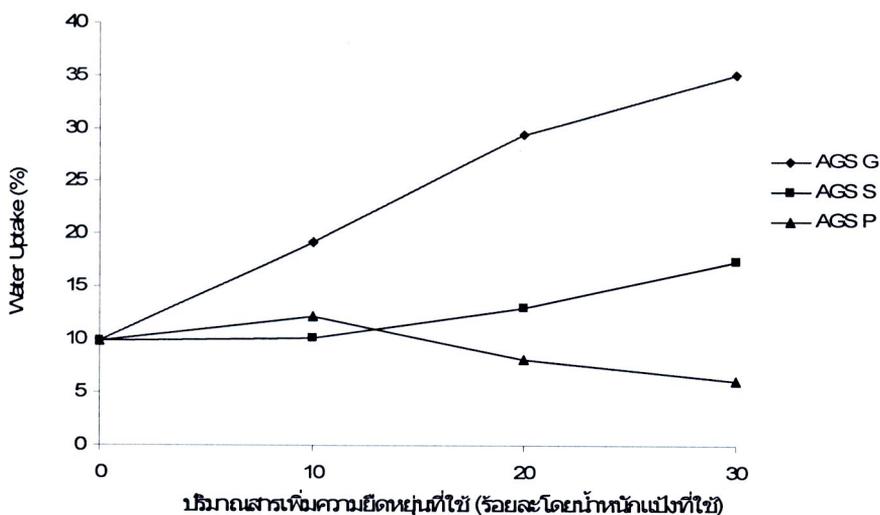
ตารางที่ 24 การดูดซับไอน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ที่เวลา 60 ชั่วโมง

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	Water Uptake (%)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	19.18±0.91	29.42±0.50	35.08±1.70
Sorbitol	10.17±0.34	12.91±0.66	17.47±1.05
Polyethylene glycol 400	12.20±0.90	8.09±0.37	6.04±0.30

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า Water Uptake เท่ากับ 9.90±0.21 %

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่า Water Uptake เท่ากับ 9.66±0.42 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3



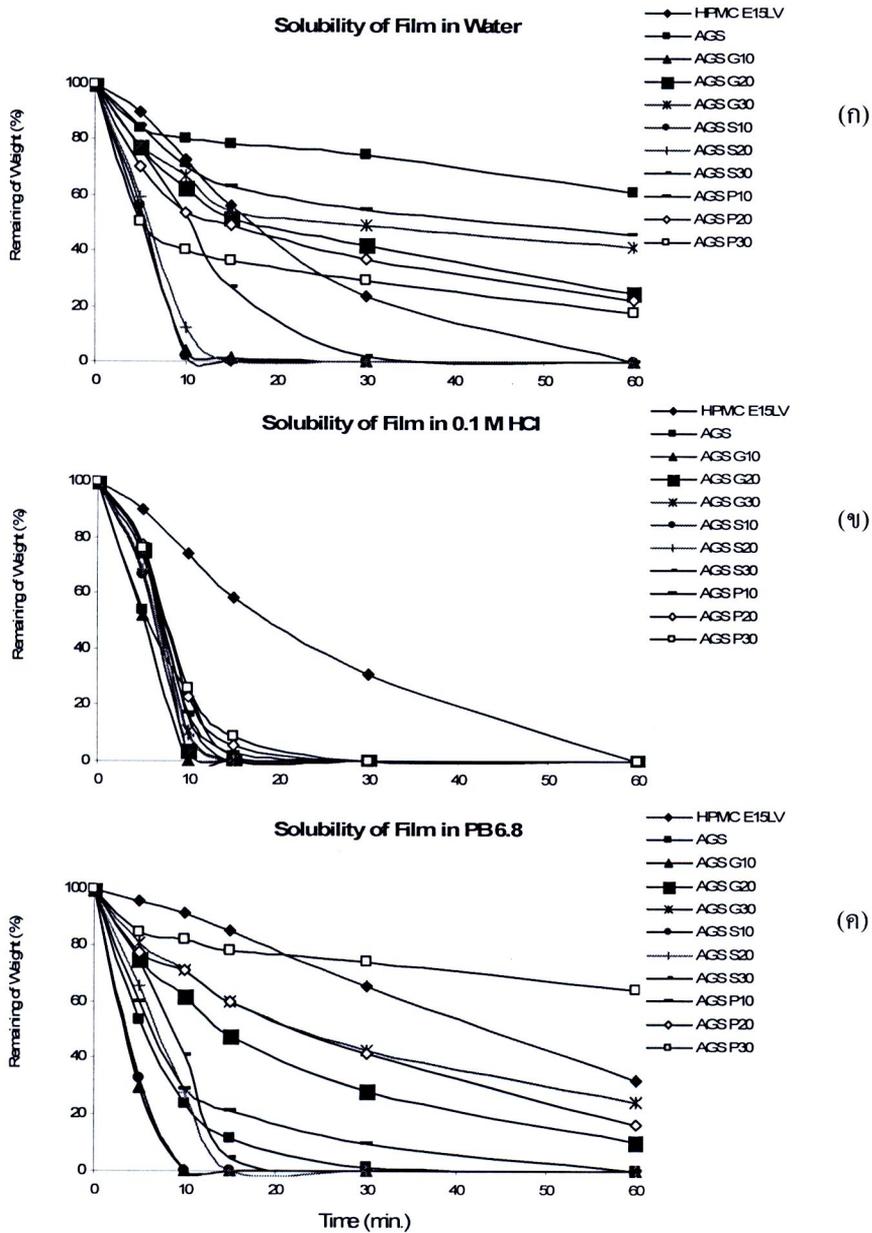
ภาพที่ 31 คุณสมบัติการดูดซับน้ำของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (AGS) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ที่เวลา 60 ชั่วโมง

ผลการศึกษาพบว่า ผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อความสามารถในการดูดความชื้นของฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การดูดความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มี glycerol และ sorbitol เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น และฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มี glycerol เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น

มีความสามารถในการดูดความชื้นมากกว่า sorbitol และ PEG400 เนื่องจาก glycerol มีคุณสมบัติ hygroscopic มากกว่า sorbitol และ PEG400 (Mathew and Dufresne, 2002) จึงทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้นได้มากกว่า ส่งผลให้น้ำหนักของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น ผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Bangyekan et al. (2006), Talja et al. (2007) และ Hu et al. (2009) ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณของ glycerol ในฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เคลือบด้วยไคโตซาน ฟิล์มแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อน และฟิล์มแป้งมันฝรั่งที่ตัดแปรด้วยวิธีการออกซิไดซ์ ทำให้การดูดความชื้นของเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติในการดูดความชื้นของฟิล์มแป้ง ยังสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้อีกด้วย ซึ่งพบว่า glycerol ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า sorbitol และ PEG400 ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดความชื้นมากกว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสองชนิดดังกล่าวตามลำดับ และผลดังกล่าวยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Mathew and Dufresne (2002) และ Bourtoom (2007) ที่พบว่า น้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่ำ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับความชื้น (hygroscopic) มากกว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่การดูดความชื้นของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี PEG400 เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีค่าลดลงตามความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PEG มีคุณสมบัติด้าน hygroscopic น้อย ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ PEG ทำให้การดูดความชื้นของฟิล์มลดลง

2.6 คุณสมบัติการละลายของแผ่นฟิล์ม

การศึกษการละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (Solubility of Films) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ใช้ความเข้มข้นต่างกัน 3 ระดับ คือ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (n=3) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 32 และตารางที่ 25 ถึง 27



ภาพที่ 32 การละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (AGS) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ในสารละลายตัวกลาง น้ำกลั่น (ก), 0.1 M HCl (ข) และ phosphate pH 6.8 (ค) เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งดัดแปร และฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ตารางที่ 25 การละลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ ในน้ำกลั่น ที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ร้อยละของการละลายของฟิล์ม ในน้ำกลั่น ที่เวลา 5 นาที		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	47.475 ±2.376	22.760 ±2.806	22.528 ±2.066
Sorbitol	43.672 ±1.880	40.671 ±2.789	23.261 ±1.587
Polyethylene glycol 400	15.386 ±1.386	29.736 ±1.501	49.554 ±0.857

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 15.879±2.00 %

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 10.166±1.852 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3

ตารางที่ 26 การละลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ ใน 0.1 M HCl ที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ร้อยละของการละลายของฟิล์ม ใน 0.1 M HCl ที่เวลา 5 นาที		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	48.269±16.85	24.874±1.851	25.134±1.00
Sorbitol	33.385±0.290	31.925±0.759	22.532±2.340
Polyethylene glycol 400	26.950±3.817	22.529±0.610	24.267±0.984

แป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 45.941±0.968 %

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 10.180±0.673 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3

ตารางที่ 27 การละลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ ใน phosphate pH 6.8 ที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ร้อยละของการละลายของฟิล์ม Phosphate pH 6.8 ที่เวลา 5 นาที		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	70.795±0.805	25.060±0.555	19.662±1.087
Sorbitol	67.185±1.912	34.727±0.977	25.991±0.388
Polyethylene glycol 400	39.995±0.625	22.366±0.398	15.653±1.550

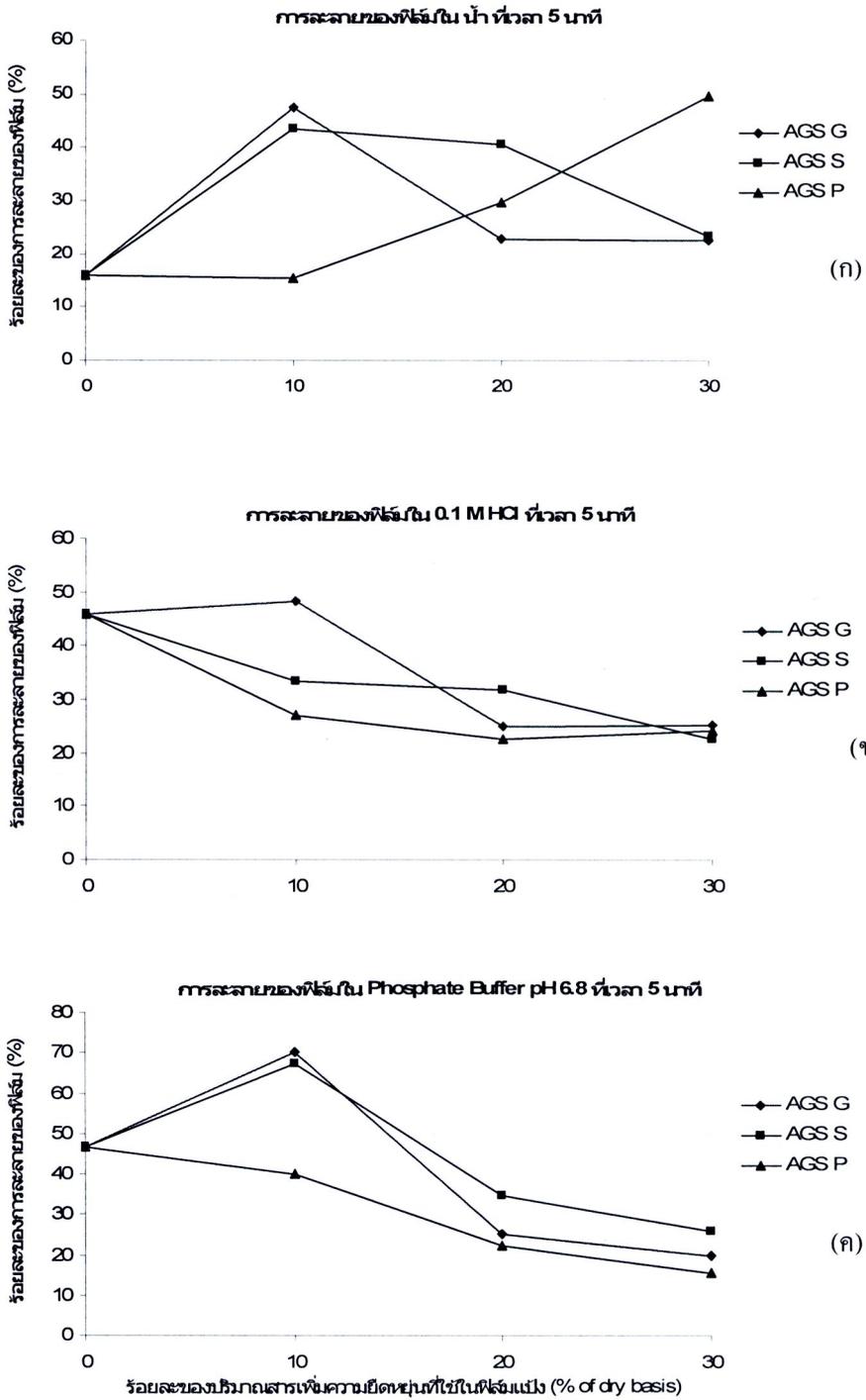
แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 46.795±0.712 %

HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) มีค่า Solubility at 5 mins เท่ากับ 4.462±0.588 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3

จากการศึกษาพบว่า ผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่อคุณสมบัติการละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสารละลายตัวกลางทั้งสามชนิด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรสามารถละลายในสารละลาย 0.1 M HCl ได้มากกว่าน้ำกลั่น เนื่องจากในสารละลาย 0.1 M HCl นั้น กรดสามารถตัดพันธะ โครงสร้างของสายพอลิเมอร์ของแป้ง ทำให้ความสามารถในการละลายของแป้งดีขึ้น ฟิล์มแป้งจึงมีความสามารถในการละลายได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาคุณสมบัติการละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ข้างต้น และการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดมีผลทำให้ความสามารถในการละลายของฟิล์มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรง ดังนั้นการละลายจึงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์มในข้างต้น พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น ฟิล์มมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะและความสามารถในการยึดเพิ่มขึ้น

ถึงแม้ว่าแป้งข้าวเหนียวตัดแปรมีการละลายในสารละลาย phosphate buffer pH 6.8 ได้ดีกว่าในสารละลาย 0.1 M HCl แต่ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรในสารละลาย phosphate buffer pH 6.8 มีการละลายน้อยกว่าในสารละลาย 0.1 M HCl ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรในสารละลายบัฟเฟอร์ดังกล่าวมีความหนืดสูงกว่าสารละลายแป้งข้าวเหนียวในกรด ดังนั้นเมื่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรสัมผัสกับสารละลายบัฟเฟอร์จึงเกิดการอู๋มของเหลวไว้และมีความหนืดเกิดขึ้น ทำให้การละลายของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์ลดลง เมื่อเทียบกับการละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรในสารละลายกรด และการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดในฟิล์มแป้งตัดแปรฯ มีผลทำให้ความสามารถในการละลายของฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นการละลายของฟิล์มในบัฟเฟอร์ดังกล่าวจึงลดลง



ภาพที่ 33 การละลายของฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (AGS) ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแห้ง ในสารละลายตัวกลาง น้ำกลั่น (ก), 0.1 M HCl (ข) และ phosphate pH 6.8 (ค) ที่เวลา 5 นาที เปรียบเทียบกับฟิล์มแข็งตัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

เมื่อพิจารณา ผลของชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่อความสามารถในการละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรในสารละลายตัวกลาง พบว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี glycerol เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้ง มีผลทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นมาก ผลดังกล่าวเกิดจากความแข็งแรงของฟิล์มต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่น จากการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของฟิล์มข้างต้น ที่ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นดังกล่าวทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงลดลง เมื่อฟิล์มสัมผัสกับสารละลายตัวกลาง น้ำจึงสามารถแทรกเข้าทำลายโครงสร้างของฟิล์มได้ง่าย ทำให้ฟิล์มสามารถละลายได้ดีขึ้น สำหรับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี glycerol ความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง มีการละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจาก glycerol มีคุณสมบัติ hygroscopic มาก (Mathew and Dufresne, 2002) จึงช่วยทำให้ฟิล์มมีการละลายมากขึ้น เมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่น

ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี sorbitol เป็นสารเพิ่มปริมาณที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง มีผลทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากความแข็งแรงของฟิล์มที่ต่ำลง เมื่อฟิล์มสัมผัสกับสารละลายตัวกลาง น้ำจึงสามารถแทรกเข้าทำลายโครงสร้างของฟิล์มได้ง่าย ฟิล์มที่มี sorbitol ที่ความเข้มข้นดังกล่าวจึงละลายได้ดีขึ้น สำหรับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี sorbitol เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง เป็นฟิล์มที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก คาดว่าน่าจะมี ความทนทานต่อการทำลายได้มากขึ้น แต่มีอิทธิพลของ hygroscopic ของสารเพิ่มความยึดหยุ่น จึงทำให้ฟิล์มดังกล่าวมีความสามารถละลายได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่น

สำหรับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น พบว่าการเพิ่มปริมาณ PEG400 มีผลทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่น อาจเป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติในการดูดซับน้ำของฟิล์ม กล่าวคือ PEG400 ช่วยลดการแทรกจับพันธะของน้ำกับแป้งลงเมื่อปริมาณ PEG400 เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มดูดซับน้ำได้ลดลง ส่งผลให้การละลายของฟิล์มลดลง

3. การศึกษาคุณสมบัติของยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์

การศึกษาคงสมบัติของยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์ โดยใช้ โพรปรานอลอลไฮโดรคลอไรด์ (propranolol hydrochloride) เป็นตัวยาดันแบบ (model drug) ในเม็ดยาแกน เนื่องจากคุณสมบัติความคงตัวต่ออุณหภูมิที่ดี และมีคุณสมบัติในการละลายของตัวยาคือ ในการศึกษานี้ได้เคลือบยาเม็ดด้วยสารเคลือบที่มีสารก่อฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น 3 ชนิด ได้แก่ glycerol, sorbitol และ PEG400 แต่ละชนิด 3 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ในการเคลือบจะใช้เม็ดยาแกน 1,500 กรัม ด้วยเครื่องเคลือบ Thai Coater 15" ที่ปริมาณระดับของสารก่อฟิล์มคิดเป็นร้อยละ 3 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน และเปรียบเทียบกับกรณีเคลือบยาเม็ดด้วยฟิล์มจาก HPMC ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ศึกษาคุณสมบัติของยาเม็ดเคลือบ ได้แก่ คุณสมบัติด้านความหนาและน้ำหนักของยาเม็ดเคลือบ การแตกตัวของยาเม็ดเคลือบ ศึกษาความแข็งของยาเม็ดเคลือบ, คุณสมบัติการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (Moisture Absorption of film coated tablets) ลักษณะของยาเม็ดเคลือบ ศึกษาอัตราการปลดปล่อยตัวยาคือสำคัญจากยาเม็ด การหาปริมาณตัวยาคือสำคัญในยาเม็ดเคลือบ ด้วยวิธี UV Spectrophotometry อ้างอิงมาตรฐานตาม United State Pharmacopiea (USP 32/2009)

3.1 ความหนา น้ำหนัก ความแข็ง และการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม

ผลการศึกษาคุณสมบัติของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์ม โดยใช้สารเคลือบที่เตรียมจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น 3 ชนิด ได้แก่ glycerol, sorbitol และ PEG400 แต่ละชนิด 3 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งสารเคลือบที่ใช้คิดเป็นน้ำหนักแป้งแห้งร้อยละ 3 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน ซึ่งคุณสมบัติด้านความหนาของเม็ดยาเคลือบ น้ำหนักเม็ดยาเคลือบ การแตกตัวของยาเม็ดเคลือบ และความแข็งของเม็ดยาเคลือบ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 28 ถึง 31

ตารางที่ 28 ความหนาของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (3 % weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งคัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความหนาของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม (mm.)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	4.274±0.021	4.318±0.030	4.358±0.033
Sorbitol	4.320±0.013	4.332±0.019	4.328±0.019
Polyethylene glycol 400	4.332±0.039	4.290±0.036	4.280±0.034

ความหนายาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าเท่ากับ 4.296±0.042 mm.

ความหนายาเม็ดเคลือบฟิล์มจาก HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าเท่ากับ 4.310±0.033 mm.

ความหนายาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม มีค่าเท่ากับ 4.240±0.016 mm.

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 10

ผลการศึกษาความหนาของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ได้แสดงผลในตารางที่ 28 พบว่า ยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ หรือ HPMC E15LV มีความหนามากกว่ายาเม็ดแกน โดยชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ มีผลต่อความหนาของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ยาเม็ดที่เคลือบฟิล์มแป้งฯ ที่มี glycerol ที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้ง มีความหนาน้อยกว่ายาเม็ดที่เคลือบด้วยแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น แม้ว่าจากการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงเจาะของฟิล์มที่พบว่า ฟิล์มที่มี glycerol ที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้ง จะมีความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น แต่เนื่องจากในขั้นตอนการเคลือบมีการควบคุมอุณหภูมิในระบบเคลือบ ที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งฟิล์ม ทำให้ฟิล์มเกิดการแตกร้าวง่ายกว่าฟิล์มแป้งที่มี glycerol ที่ระดับดังกล่าวได้ ดังนั้น ในการเคลือบยาเม็ดด้วยฟิล์มแป้งที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น จึงพบผิวของยาเม็ดที่ผ่านการเคลือบแล้วมีลักษณะที่ขรุขระไม่เรียบ ในขณะที่เคลือบอยู่นั้น

ฟิล์มเกิดการแตก บางส่วนหลุดร่อนออกไป ละอองของสารเคลือบจึงไปเกาะพอกอยู่บริเวณที่หนากว่าบนผิวยาเม็ด ซึ่งเป็นบริเวณที่ละอองสัมผัสได้มากกว่าบริเวณที่ต่ำกว่าบนผิวยาเม็ด จึงทำให้ ความหนาของยาเม็ดเคลือบดังกล่าวหนามากขึ้น ส่วนยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งที่มี glycerol ฟิล์มบนผิวยาเม็ดยึดติดกับผิวได้ดี จึงมีความสม่ำเสมอ ฟิล์มมีผิวเรียบ จึงทำให้มีความหนาน้อยกว่าสำหรับยาเม็ดที่เคลือบด้วยฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรง ที่มี PEG400 ที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแข็ง พบว่า มีความหนาที่มากกว่ายาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งๆ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น เนื่องจาก PEG ไปทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มแข็งๆ ลดลง และเหตุผลของความเข้ากันได้กับแข็งๆ ต่ำกว่า สารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิดอื่น ดังผลการศึกษาที่ผ่านมาแล้วข้างต้น ขณะทำการเคลือบ ฟิล์มเกิดการแตกที่ละเอียดมากกว่า บางส่วนมีการหลุดร่อนออกไป เกิดรอยนูน-ต่ำ ที่กระจายตัวมากกว่า ละอองของสารเคลือบไปเกาะพอกอยู่บริเวณที่หนากว่าบนผิวยาเม็ด ซึ่งเป็นบริเวณที่ละอองสัมผัสได้มากกว่าบริเวณที่ต่ำกว่าบนผิวยาเม็ด และมีโพรงอากาศเกิดขึ้นในชั้นของฟิล์มที่หุ้มยาเม็ด จึงทำให้ความหนาของยาเม็ดเคลือบที่มี PEG ที่ระดับดังกล่าวหนาขึ้น ส่วนยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งๆ ที่มี PEG400 ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแข็ง มีความหนาลดลงตามระดับปริมาณ PEG ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจาก PEG ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง โพรงอากาศที่อยู่บนผิวยาเม็ดเกิดการแตกร่อนออกไปได้มากขึ้น ความหนาจึงลดลง สอดคล้องกับน้ำหนักของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งๆ ที่มี PEG400 ที่ลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 29 น้ำหนักของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรง (3 % weight increased) จากสารละลายที่มีแข็งข้าวเหนียวตัดแปรง ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแข็งตัดแปรง และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	น้ำหนักของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม (mg)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแข็ง)		
	10	20	30
Glycerol	314.66±4.78	315.86±4.50	317.00±4.12
Sorbitol	314.23±5.44	317.64±3.38	316.98±6.09
Polyethylene glycol 400	311.66±2.98	311.45±4.75	309.38±4.72

น้ำหนักของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรง (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าเท่ากับ 308.04±3.24 mg

น้ำหนักของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีค่าเท่ากับ 313.90±4.92 mg

น้ำหนักของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม มีค่าเท่ากับ 311.20±4.30 mg

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 10

ผลการศึกษา น้ำหนักของยาเม็ดโพพรานอลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรงฯ ดังแสดงในตารางที่ 29 พบว่า ชนิดและระดับปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรงฯ มีผลต่อน้ำหนักของยาเม็ดโพพรานอลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์ม ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเคลือบยาเม็ดด้วยฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรงฯ ที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด glycerol และ sorbitol

เมื่อระดับของสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ใช้เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เม็ดยามีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก สารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสองชนิด ทำให้ฟิล์มแข็งมีความแข็งแรงและยึดหยุ่นมากขึ้น ฟิล์มสามารถคงตัวอยู่กับเม็ดยาได้นาน น้ำหนักของเม็ดยาเคลือบจึงเพิ่มขึ้น สารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด PEG400 เมื่อระดับที่ใช้เพิ่มขึ้น มีผลทำให้น้ำหนักของเม็ดยาลดลง เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงต่ำ เมื่อเกิดแรงกระแทกระหว่างเม็ดยาคู่ด้วยกันเองและผนังของหม้อเคลือบ ทำให้ฟิล์มบนผิวเม็ดยากร่อนหลุดไป น้ำหนักเม็ดยาเคลือบดังกล่าวจึงมีน้ำหนักลดลงตามปริมาณ PEG400 ที่เพิ่มขึ้น สัมพันธ์กับความหนาที่ลดลงเช่นกัน ส่วนเม็ดยาเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น มีน้ำหนักลดลงเมื่อเทียบกับเม็ดยาที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ เนื่องจากเม็ดยาเคลือบ มีการกระแทกกันระหว่างเม็ดยาคู่ด้วยกันเองหรือเม็ดยากับผนังหม้อเคลือบทำให้เกิดการกร่อนของเม็ดยา น้ำหนักจึงลดต่ำลง

ตารางที่ 30 เวลาในการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (3 % weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งดัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	เวลาที่ใช้ในการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (นาท)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	8.84±1.44	7.97±2.27	8.28±3.95
Sorbitol	7.73±0.39	8.53±2.23	8.24±1.83
Polyethylene glycol 400	8.74±2.13	8.86±1.44	10.34±1.37

เวลาการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 12.58±2.15 นาที

เวลาการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 12.79±3.05 นาที

เวลาการแตกตัวของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม

เท่ากับ 4.92±1.35 นาที

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6

ผลการศึกษาเวลาในการแตกตัวของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ (Disintegration Time) (ดังแสดงในตารางที่ 30) พบว่า ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ใช้ในฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ มีผลต่อเวลาในการแตกตัวของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเคลือบเม็ดยาด้วยฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น และที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิดและความเข้มข้นต่างๆ มีผลทำให้เวลาในการแตกตัวของเม็ดยาเคลือบเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดยาที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม เนื่องจากยาเม็ดได้ถูกฟิล์มห่อหุ้มเอาไว้ ทำให้น้ำเข้าไปภายในยาเม็ดช้าลง เม็ดยาจึงแตกตัวได้ช้าลง ส่งผลให้เวลาในการแตกตัวเพิ่มขึ้น สำหรับยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรที่ใช้ sorbitol และ PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่นนั้น พบว่าการเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่นทำให้เวลาที่ใช้ในการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการเพิ่มความเข้มข้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่น มีผลทำให้ความสามารถในการละลายของฟิล์มลดลง นอกจากนี้ยัง

พบว่า ยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้ง 3 ชนิด และ 3 ระดับความเข้มข้น มีผลทำให้ยาเม็ดแตกตัวได้เร็วกว่าเม็ดยาเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาระยะเวลาของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่พบว่าสารเพิ่มความยึดหยุ่นทั้งสามชนิดทุกความเข้มข้นมีผลทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ สามารถละลายได้เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 31 ความแข็งของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (3 % weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ความแข็งของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (กิโลกรัม)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	20.42±0.87	20.63±0.90	19.05±0.37
Sorbitol	18.77±0.29	20.07±0.30	20.32±0.63
Polyethylene glycol 400	18.22±0.49	18.17±0.23	18.10±0.21

ความแข็งยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 19.15±0.45 กิโลกรัม

ความแข็งยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 27.87±1.11 กิโลกรัม

ความแข็งยามัดก่อนเคลือบฟิล์ม เท่ากับ 18.02±0.86 กิโลกรัม

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6

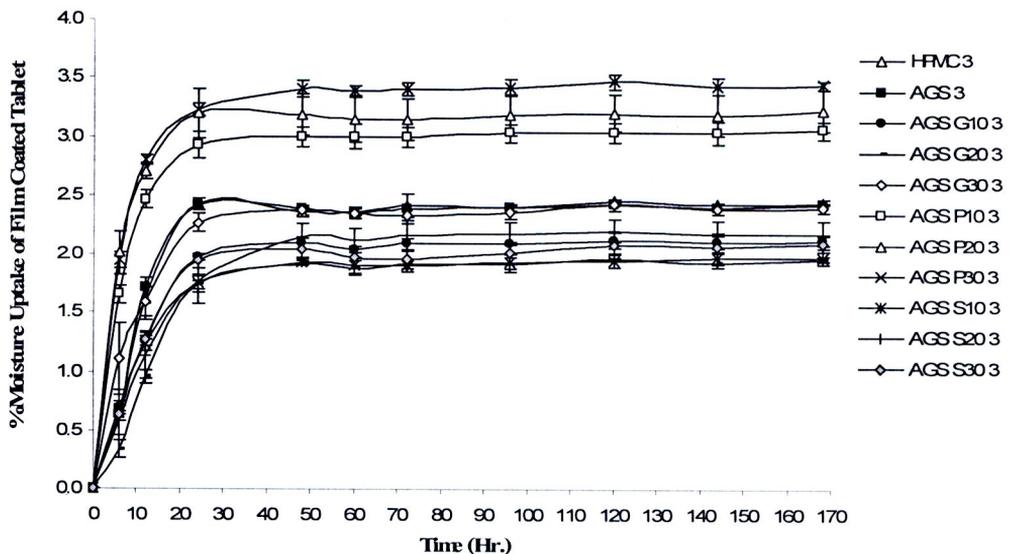
ผลการศึกษาความแข็งของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ดังแสดงในตารางที่ 31 พบว่า ชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่ใช้ในฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีผลต่อความแข็งของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเคลือบยาเม็ดด้วยฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น และที่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่นทุกชนิด ทุกความเข้มข้น มีผลต่อความแข็งของยาเม็ดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ยาเม็ดได้ถูกฟิล์มห่อหุ้มเอาไว้ ฟิล์มจึงไปเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ยาเม็ด สามารถทนแรงกระทำที่มีต่อเม็ดยาได้มากขึ้น ความแข็งของยาเม็ดจึงเพิ่มขึ้น ส่วนผลของระดับที่เพิ่มขึ้นของสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol และ sorbitol ต่อฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ทำให้ความแข็งของเม็ดยาเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น สอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่พบว่า ระดับสารเพิ่มความยึดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น สามารถต้านทานแรงเฉาะได้เพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ใช้ PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น มีผลทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะน้อยกว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการต้านทานแรงเฉาะของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

ที่พบว่า ระดับสารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด PEG400 ที่เพิ่มขึ้น ไม่มีผลทำให้ฟิล์มแข็งตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง มีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของยาเม็ดเคลือบดังกล่าวจึงไม่แตกต่างจากยาเม็ดที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม

3.2 การดูดซับความชื้นของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม

ผลการศึกษาการดูดซับความชื้นของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม (Moisture Absorption of Film Coated Tablets) ในสภาวะที่ควบคุมความชื้นที่ $75 \pm 2\%RH$ ที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม คิดเป็นร้อยละของการดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มที่เคลือบอยู่บนเม็ดยา โดยเปรียบเทียบกับเม็ดยาที่ไม่ได้เคลือบฟิล์ม และเม็ดยาที่เคลือบด้วยฟิล์ม HPMC E15LV ได้ผลดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 34

จากการศึกษาการดูดซับความชื้นของเม็ดยาแกนที่ไม่ได้ถูกเคลือบ และเม็ดยาแกนที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์ม พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงเวลาประมาณ 48 ถึง 60 ชั่วโมง และหลังจากชั่วโมงที่ 60 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก แสดงว่าเม็ดยามีการดูดซับความชื้นไว้เต็มที่แล้ว สำหรับการดูดซับความชื้นของฟิล์มที่อยู่บนเม็ดยาหาได้โดยการหาความแตกต่างน้ำหนักของเม็ดยาเคลือบฟิล์มกับเม็ดยาแกน พบว่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มที่อยู่บนเม็ดยาแกนมีค่าคงที่ ตั้งแต่เวลา 60 ชั่วโมง เป็นต้นไป ดังแสดงผลในกราฟภาพที่ 34 และค่าการดูดซับความชื้นของฟิล์มที่อยู่บนเม็ดยาที่เวลา 60 ชั่วโมง ได้ผลแสดงในตารางที่ 32



ภาพที่ 34 คุณสมบัติการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งตัวเร็วขึ้นหรือช้าลง (AGS) (3% weight increased) ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับ ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแห้ง ที่ 75%RH อุณหภูมิห้อง เปรียบเทียบกับฟิล์ม AGS และฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่น

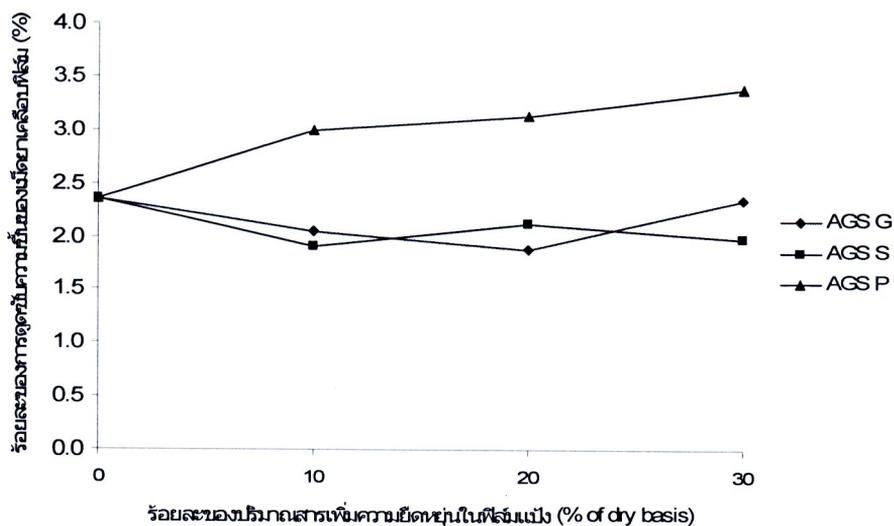
ตารางที่ 32 การดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (3% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความชื้นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ ที่เวลา 60 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับแป้งคัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความชื้น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความชื้น	การดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มที่ 75 % RH, 60 hr (%)		
	ปริมาณสารเพิ่มความชื้น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	2.05±0.07	1.88±0.06	2.35±0.05
Sorbitol	1.90±0.06	2.12±0.11	1.97±0.09
Polyethylene glycol 400	3.00±0.10	3.14±0.20	3.39±0.04

ยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความชื้น) เท่ากับ 2.36±0.17 %

ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความชื้น) เท่ากับ 2.36±0.03 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 3



ภาพที่ 35 คุณสมบัติการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (AGS) (3% weight increased) ที่มีสารเพิ่มความชื้นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ที่ 75%RH อุณหภูมิห้อง ที่เวลา 60 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งคัดแปรที่ไม่ใช้สารเพิ่มความชื้น

จากภาพที่ 35 และตารางที่ 32 พบว่า ชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ในฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ มีผลต่อการดูดซับความชื้นของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเคลือบเม็ดยาด้วยฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด PEG400 มีการดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มมากที่สุด ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งในสภาวะเดียวกัน ที่พบว่ามีการดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มน้อยกว่า glycerol และ sorbitol ตามลำดับ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการที่เม็ดยาเคลือบฟิล์มแป้ง PEG 400 มีลักษณะผิวที่ขรุขระไม่เรียบ ทำให้มีพื้นที่สัมผัสที่ผิวมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับกับความชื้นไว้ได้มากขึ้น

ส่วนการเคลือบเม็ดยาด้วยฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด glycerol และ sorbitol ที่ความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน มีผลต่อการดูดซับความชื้นที่แตกต่างกันอย่างไรไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งขัดแย้งกับการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับความชื้นของฟิล์มแป้งในสภาวะเดียวกัน glycerol มีความสามารถในการดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มมากกว่า sorbitol แต่เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับวิธีการทดสอบพบว่ามี ความแตกต่างกัน กล่าวคือ วิธีการทดสอบความสามารถในการดูดซับความชื้นของฟิล์ม ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 สามารถสัมผัสกับฟิล์มได้ทั้งสองด้าน ขนาดและความหนาของฟิล์มที่มากกว่า การทดสอบการดูดซับความชื้นของเม็ดยาเคลือบ ซึ่งฟิล์มที่เคลือบเม็ดยานั้นมีเพียงด้านหน้าเท่านั้นที่สัมผัสกับความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 75 ส่วนด้านในสัมผัสกับผิวเม็ดยาที่ความชื้นต่ำกว่า และฟิล์มบนผิวเม็ดยามีความหนาที่น้อยกว่า ทำให้ฟิล์มบนผิวเม็ดยาเมื่อดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มเต็มที่แล้วทั้งสองสภาวะจึงมีค่าการดูดซับความชื้นที่ต่างกันน้อยมาก

3.3 การคัดเลือกชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเพื่อนำไปใช้ศึกษาผลของความหนาของฟิล์มที่เคลือบบนเม็ดยา

ทำการคัดเลือกสูตรสารเคลือบจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ โดยพิจารณาจากคุณสมบัติที่ 4 ประการตามลำดับ ได้แก่ คุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม (WVP) คุณสมบัติการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (Moisture absorption of film coated tablets) การละลายของแผ่นฟิล์ม (Solubility of Films) ในสภาวะที่เป็นกรด และคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ความสามารถในการต้านทานการเจาะ (Puncture Strength; PS) และความสามารถในการยืด (%Elongation) คัดเลือกมาจำนวน 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 33 จากผลการคัดเลือกตามวิธีการดังกล่าว พบว่าคุณสมบัติการซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มที่ดี หมายถึงฟิล์มยอมให้ไอน้ำซึมผ่านฟิล์มได้น้อย ซึ่งฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด sorbitol ที่ระดับร้อยละ 30 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง และ glycerol ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง ยอมให้ไอน้ำซึมผ่านได้น้อย ตามลำดับ คุณสมบัติการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่ดี หมายถึงฟิล์มที่เคลือบอยู่บนยาเม็ดดูดซับความชื้นไว้ได้น้อย ซึ่งยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นชนิด glycerol ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 10 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง มีการดูดซับความชื้นไว้ได้น้อย ตามลำดับ การละลายของแผ่นฟิล์มในสภาวะที่เป็นกรดที่ดี ซึ่งฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นทุกชนิดและทุกระดับความเข้มข้น มีความสามารถในการละลายในกรด 0.1 M HCl ที่ดี และเนื่องจากการศึกษาในช่วงต่อไปนี้จะเป็นการศึกษาผลของการเคลือบยาเม็ดด้วยโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ ชนิดปลดปล่อยตัวยารวดเร็ว (fast release) โดยทดสอบในสารละลายที่เป็นกรด ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติในการละลายของฟิล์มเป็นตัวคัดเลือกคุณสมบัติของสภาวะของฟิล์ม

การคัดเลือกจากความสามารถในการต้านทานการเจาะ และความสามารถในการยึดที่ดี เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการต้านทานการเจาะของฟิล์มที่สูงแล้ว พบว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด sorbitol ที่ระดับร้อยละ 30 glycerol ที่ระดับร้อยละ 20, 30 และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง มีความสามารถในการต้านทานการเจาะของฟิล์มที่ดี ตามลำดับ ส่วนความสามารถในการยึดของฟิล์มที่ดี พบว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol ที่ระดับร้อยละ 30 sorbitol ที่ระดับร้อยละ 30 glycerol ที่ระดับร้อยละ 20 และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง มีความสามารถในการยึดของฟิล์มที่ดี ตามลำดับ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทั้งหมดข้างต้นโดยรวมแล้ว พบว่า สภาวะของสารเคลือบจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol ที่ระดับร้อยละ 20, 30 sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เป็นสภาวะที่ดี แต่เนื่องจากคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม และการดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม ที่ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol ที่ระดับร้อยละ 30 ที่ไอน้ำซึมผ่านฟิล์ม และดูดซับความชื้นไว้ที่ฟิล์มได้สูง การศึกษานี้จึงคัดเลือกสูตรสารเคลือบจากแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol ที่ระดับร้อยละ 20 sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เพื่อนำไปศึกษาผลของระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายแป้งข้าวเหนียวดัดแปรฯ ต่อไป

นำสูตรที่คัดเลือกจำนวน 3 สูตรดังกล่าว ทำการเคลือบยาเม็ดด้วยสารเคลือบที่แตกต่างระดับกัน โดยคิดจากน้ำหนักของสารเคลือบ 3 ระดับ คือ ที่ระดับของสารก่อฟิล์มคิดเป็นร้อยละ 2, 3 และ 4 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน เปรียบเทียบกับการเคลือบเม็ดยาด้วย HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น โดยสภาวะที่ใช้ในการเคลือบอื่นๆ กระทำเช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น

ตารางที่ 33 ตารางการคัดเลือกสถานะของสารเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรๆ ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างชนิดกัน ได้แก่ glycerol (G), sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

ตัวอย่าง	คุณสมบัติ											
	การซึมผ่านไอน้ำผ่านฟิล์ม (g.mm/m ² .D.kPa.)			การดูดซับความชื้นของยาเม็ด เคลือบ (%) (3% weight increased)			ความสามารถในการต้านทาน แรงเงาะ (MPa)			ความสามารถในการยึด		
	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย	ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เรียงตามลำดับ ตีมาก ถึง น้อย
AGS G10	0.237 ± 0.003	5	2.047 ± 0.070	4	0.71 ± 0.02	6	0.31 ± 0.07	6	6.62 ± 2.60	3	73.94 ± 12.09	1
AGS G20	0.202 ± 0.003	3	1.878 ± 0.061	1	8.21 ± 0.31	2	0.17 ± 0.06	9	0.15 ± 0.04	7	0.17 ± 0.01	7
AGS G30	0.283 ± 0.004	6	2.347 ± 0.047	6	5.64 ± 0.13	3	0.32 ± 0.02	8	0.60 ± 0.03	7	0.88 ± 0.15	5
AGS P10	0.437 ± 0.007	8	2.997 ± 0.102	7	0.19 ± 0.01	9	0.36 ± 0.07	5	1.34 ± 0.05	4	0.79 ± 0.31	4
AGS P20	0.411 ± 0.006	7	3.142 ± 0.196	8	0.32 ± 0.02	8	11.10 ± 0.46	1	14.56 ± 0.52	1		
AGS P30	0.682 ± 0.010	9	3.388 ± 0.042	9	0.60 ± 0.03	7						
AGS S10	0.221 ± 0.004	4	1.904 ± 0.064	2	0.88 ± 0.15	5						
AGS S20	0.132 ± 0.003	2	2.120 ± 0.106	5	1.34 ± 0.05	4						
AGS S30	0.089 ± 0.005	1	1.975 ± 0.094	3	14.56 ± 0.52	1						

การละลายของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรๆ ที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นแตกต่างกันและความเข้มข้นแตกต่างกันในสารละลายกรด 0.1 M HCl ที่เวลา 30 นาที มีค่า 100 %

3.4 ผลของระดับของการเคลือบเม็ดยาด้วยสารละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

จากตารางการคัดเลือกสูตรของสารเคลือบ จำนวน 3 สูตร ได้แก่ ฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นชนิด glycerol (G) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง และ sorbitol (S) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เตรียมสารเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ 5 โดยน้ำหนัก ทำการเคลือบเม็ดยาด้วยสารเคลือบตามที่กำหนดข้างต้น โดยคิดจากน้ำหนักของสารเคลือบ 3 ระดับ คือ ที่ระดับของสารก่อฟิล์มคิดเป็นร้อยละ 2, 3 และร้อยละ 4 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน เปรียบเทียบกับการเคลือบเม็ดยาด้วย HPMC E15LV สถานะในการเคลือบอื่นๆ กระทำเช่นเดียวกับการศึกษาข้างต้น นำไปศึกษาการศึกษาผลของระดับของการเคลือบยาเม็ด ด้วยสารละลายแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 34 ถึง 39

ตารางที่ 34 ความหนาของเม็ดยาเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ความหนาของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม (mm)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	4.252±0.023	4.318±0.030	4.372±0.027
AGS + Sorbitol 20 %	4.300±0.033	4.332±0.019	4.362±0.027
AGS + Sorbitol 30 %	4.318±0.022	4.328±0.019	4.360±0.025
HPMC E15LV	4.280±0.028	4.310±0.033	4.322±0.020

ความหนาของเม็ดยาก่อนเคลือบฟิล์ม มีค่าเท่ากับ 4.240±0.016 mm

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 10

ผลการศึกษาระดับของการเคลือบเม็ดยาด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีผลต่อความหนาของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ดังแสดงในตารางที่ 34 พบว่า ชนิดและระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีผลต่อความหนาของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระดับการเคลือบของสารเคลือบจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทุกสถานะ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดยามีความหนาเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเคลือบที่เกาะอยู่บนผิวของเม็ดยาที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 35 น้ำหนักของเม็ดยาเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4 % weight increased) จากสารละลายที่มี แป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	น้ำหนักของเม็ดยาเคลือบฟิล์ม (mg)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	310.92±4.53	315.86±4.50	319.86±5.91
AGS + Sorbitol 20 %	311.43±3.60	317.64±3.38	319.17±4.52
AGS + Sorbitol 30 %	313.60±4.74	316.98±6.09	321.86±5.37
HPMC E15LV	311.69±2.62	313.90±4.92	315.31±2.35

น้ำหนักของเม็ดยาก่อนเคลือบฟิล์ม มีค่าเท่ากับ 311.20±4.30 mg

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 10

ผลการศึกษาระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีผลต่อน้ำหนักของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ ที่เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (ดังแสดงในตารางที่ 35) พบว่า ชนิดและระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีผลต่อน้ำหนักของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระดับการเคลือบของสารเคลือบจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทุกสภาวะ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดยามีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณสารเคลือบที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

ผลการศึกษาระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีผลต่อเวลาในการแตกตัวของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ดังแสดงในตารางที่ 36 พบว่า ชนิดและระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีผลต่อเวลาในการแตกตัวของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระดับของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้น ทำให้เม็ดยามีความหนาเพิ่มมากขึ้น เมื่อเม็ดยาสัมผัสกับน้ำจึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการละลายชั้นของฟิล์มหรือทำให้บางส่วนของฟิล์มละลายเพื่อให้ น้ำสามารถเข้าไปสู่เม็ดยาและเกิดการแตกตัวของยาได้ ดังนั้นจึงทำให้เวลาที่ใช้ในการแตกตัวของเม็ดยาเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 36 เวลาการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งเปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	เวลาในการแตกตัวของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (นาที)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	7.42±0.44	7.97±2.27	9.06±0.68
AGS + Sorbitol 20 %	7.57±0.59	8.53±2.23	8.72±0.64
AGS + Sorbitol 30 %	6.35±0.56	8.24±1.83	8.57±0.99
HPMC E15LV	9.33±0.57	12.79±3.05	15.17±0.40

เวลาในการแตกตัวของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม เท่ากับ 4.92±1.35 นาที

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 6

ตารางที่ 37 ความแข็งของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งเปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความแข็งของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (กิโลกรัม)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	20.28±0.81	20.63±0.90	19.78±0.70
AGS + Sorbitol 20 %	20.00±0.58	20.07±0.30	20.15±0.67
AGS + Sorbitol 30 %	20.30±0.64	20.32±0.63	20.45±0.94
HPMC E15LV	23.05±0.77	27.87±1.11	29.80±0.79

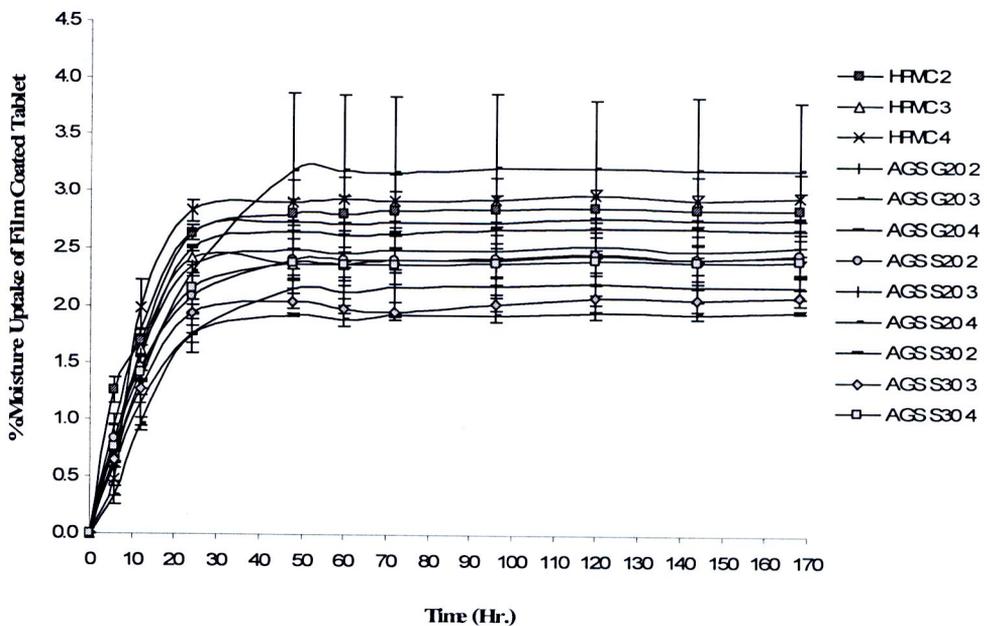
ความแข็งของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม เท่ากับ 18.02±0.86 กิโลกรัม

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 6

ผลการศึกษาระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีผลต่อความแข็งของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ดังแสดงในตารางที่ 37 พบว่าชนิดและระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ระดับการเคลือบคิดเป็นสารก่อฟิล์มร้อยละ 2, 3 และ 4 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน มีผลต่อความแข็งของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์

เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากความแข็งแรงของฟิล์มแข็งในสภาวะต่างๆ ดังกล่าว มีระดับของความแข็งแรงในระดับต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ HPMC E15LV การเพิ่มระดับของการเคลือบ จึงส่งผลต่อความแข็งของยาเม็ดที่แตกต่างกันน้อยมาก ต่างจากเม็ดยาเคลือบด้วยฟิล์ม HPMC E15LV ซึ่งฟิล์มมีความแข็งแรงสูง การเพิ่มระดับการเคลือบจึงส่งผลต่อความแข็งของยาเม็ดที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันมาก สอดคล้องกับการศึกษาความสามารถในการต้านแรงเฉาะของฟิล์ม ที่พบว่า ฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสภาวะที่มี glycerol ที่ระดับร้อยละ 20 sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแข็ง มี PS เท่ากับ 8.21 ± 0.31 , 1.34 ± 0.05 และ 14.56 ± 0.52 MPa. ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์ม HPMC E15LV มี PS เท่ากับ 74.72 ± 2.33 MPa.

ผลการศึกษาระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีผลต่อการดูดซับความชื้นของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ดังแสดงในภาพที่ 36 และตารางที่ 38



ภาพที่ 36 การดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความชื้นยูนต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแข็ง เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความชื้นยูน ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ตารางที่ 38 การดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้งเปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ที่เวลา 60 ชั่วโมง

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	การดูดซับความชื้นของยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่เวลา 60 ชั่วโมงของฟิล์ม(%)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	2.46±0.04	1.88±0.06	2.62±0.13
AGS + Sorbitol 20 %	2.40±0.22	2.12±0.11	3.20±0.67
AGS + Sorbitol 30 %	2.72±0.04	1.97±0.03	2.36±0.94
HPMC E15LV	2.81±0.15	2.36±0.03	2.93±0.12

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

จากการศึกษาพบว่า ชนิดและระดับของการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ มีผลต่อการดูดซับความชื้นของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทุกสถานะ ที่ระดับการเคลือบคิดเป็นสารก่อฟิล์มร้อยละ 2 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน การดูดซับความชื้นของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์ม ที่เวลา 60 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าการเคลือบที่ระดับร้อยละ 3 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน เนื่องจาก ระดับการเคลือบที่ต่ำกว่า ทำให้ความหนาของฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่น้อยกว่าที่ระดับการเคลือบร้อยละ 3 ดังนั้นความชื้นจึงสามารถเข้าไปยังเม็ดยาแกนได้มากกว่า ยาเม็ดเคลือบดังกล่าวจึงดูดซับความชื้นไว้สูงกว่าที่ร้อยละ 3 ส่วนการเคลือบยาเม็ดด้วยสารละลายฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นทุกสถานะ ที่ระดับการเคลือบคิดเป็นสารก่อฟิล์มร้อยละ 4 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน การดูดซับความชื้นของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มที่เวลา 60 ชั่วโมง จะมีค่าสูงกว่าการเคลือบที่ระดับร้อยละ 3 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน เนื่องจาก ระดับการเคลือบที่สูงกว่า ความหนาของฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่มากกว่าที่ระดับการเคลือบร้อยละ 3 ดังนั้นความชื้นที่สะสมหรือฟิล์มดูดซับไว้ได้มากกว่าที่ระดับอื่นๆ

3.5 ลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างชนิด ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) แต่ละชนิด 3 ระดับความเข้มข้น ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น (AGS) และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ได้แสดงในตารางที่ 39

จากตารางลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่ระดับร้อยละ 3 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน เมื่อพิจารณาจากลักษณะผิวยาเม็ดเคลือบ ความเรียบ ขรุขระ ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV มีความเรียบมากที่สุด เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงและคงตัวมากบนผิวเม็ดยา แต่ยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มี

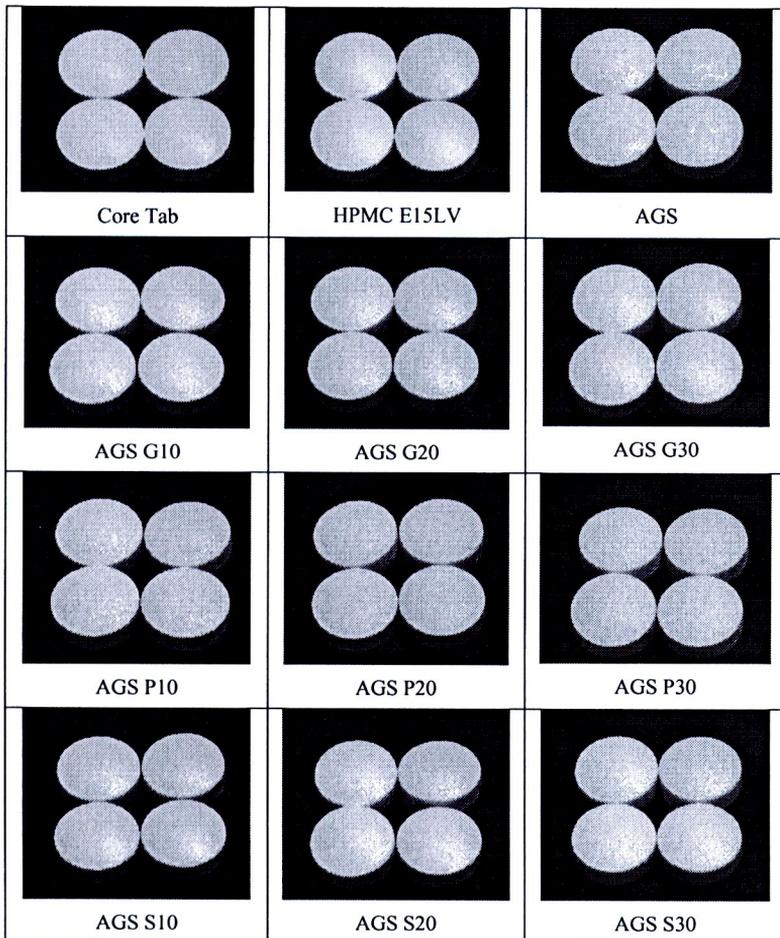
สารเพิ่มความยึดหยุ่นมีลักษณะผิวที่ขรุขระมาก เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงต่ำ ในขณะที่ยาเม็ดถูกเคลือบอยู่ฟิล์มเกิดการแตกและทับถมกันอยู่บนผิวของเม็ดยา จึงมีลักษณะผิวที่ขรุขระ เมื่อศึกษาถึงยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปร ที่มี glycerol และ sorbitol ทุกความเข้มข้น มีความเรียบปานกลาง เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงและความยึดหยุ่นเพิ่มขึ้น ทนทานต่อกระทบกระแทกระหว่างยาเม็ดในขั้นตอนการเคลือบ ได้ดีกว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ผิวยาเม็ดจึงมีความเรียบขึ้นในระดับปานกลาง สำหรับยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี PEG400 มีลักษณะผิวที่ขรุขระ โดยการเพิ่มความเข้มข้นของ PEG400 ทำให้ลักษณะผิวของยาเม็ดมีความขรุขระมากขึ้น

ตารางที่ 39 ลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (3% weight increased) ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง

สูตรยาเม็ดเคลือบ	ลักษณะทางกายภาพ (3 ระดับของแต่ละลักษณะ)			
	ผิวเรียบ/ขรุขระ	ความมันเงา	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ลักษณะสัมผัส
HPMC E15LV	เรียบมาก	ปานกลาง	มาก	เนียนมาก
AGS	ขรุขระมาก	-	-	กระด้างมาก
AGS G10	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS G20	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS G30	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เหนียวติดกัน
AGS P10	ขรุขระ	ต่ำ	ต่ำ	กระด้าง
AGS P20	ขรุขระปานกลาง	-	ต่ำ	กระด้าง
AGS P30	ขรุขระมาก	-	ต่ำ	กระด้าง
AGS S10	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS S20	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS S30	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เหนียวติดกันง่าย

เมื่อพิจารณาที่ลักษณะความมันเงาของผิวยาเม็ด พบว่า ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV มีความมันเงาในระดับปานกลาง อาจเป็นคุณสมบัติของฟิล์ม HPMC E15LV สำหรับยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี glycerol และ sorbitol ทุกความเข้มข้น มีลักษณะความมันเงามาก เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง ฟิล์มที่ได้จากแป้งที่มีอะไมโลเพกตินสูงมีความใสและเป็นมันเงามากกว่าฟิล์มจากแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) แต่ยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นไม่มีความมันเงาหรือมีความมันเงาต่ำ เนื่องจากผิวยาเม็ดเกิดการขรุขระและผิวไม่เรียบ ทำให้สูญเสียความมันเงาไป ในกรณีของยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรที่มี PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่น จึงไม่มีความมันเงาหรือมีความมันเงาต่ำ และพิจารณาจากลักษณะ

สัมผัสยาเม็ดด้วยนิ้วมือ พบว่า ยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV มีความเนียนมากซึ่งสัมพันธ์กับผิวที่มีความเรียบของยาเม็ดดังกล่าวเอง ส่วนยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น และมี PEG400 เป็นสารเพิ่มความยึดหยุ่นมีลักษณะผิวสัมผัสที่กระด้าง เนื่องจากลักษณะผิวยาเม็ดมีความขรุขระของยาเม็ดเอง ยาเม็ดเคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวคัดแปรที่มี glycerol และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 10 และ 20 ของน้ำหนักแป้ง สัมพันธ์กับผิวที่มีความเรียบในระดับปานกลางของยาเม็ดเอง และที่ระดับร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง เมื่อวางไว้ที่อากาศ ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาระยะเวลาหนึ่งเมื่อสัมผัสกับยาเม็ด มีลักษณะติดมือ หรือเกาะติดยาเม็ดด้วยตนเอง อาจมีสาเหตุจาก ความชื้นในอากาศ เมื่อฟิล์มได้รับความชื้นก็จะเก็บความชื้นไว้ที่ฟิล์ม ฟิล์มมีลักษณะที่อ่อนนุ่มขึ้นจึงเกิดการเกาะติดได้ง่ายขึ้น อาจมีสาเหตุจากการที่ฟิล์มที่มีส่วนผสมของ glycerol และ sorbitol ซึ่งมีคุณสมบัติทาง hygroscopic จึงทำให้ฟิล์มดูดความชื้นได้ง่าย



ภาพที่ 37 ภาพลักษณะของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯฯ (3% weight increased) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol (G) sorbitol (S) และ PEG400 (P) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯฯ และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

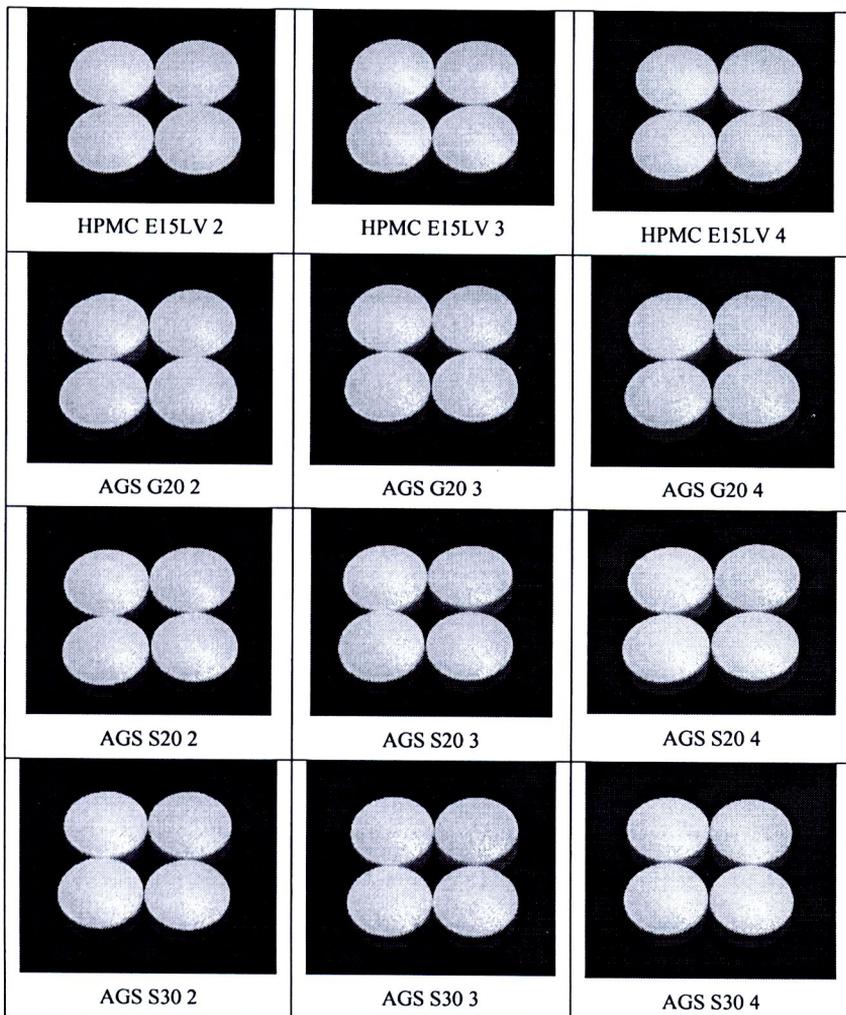
ตารางที่ 40 ลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

สูตรยาเม็ดเคลือบ	ลักษณะทางกายภาพ (3 ระดับของแต่ละลักษณะ)			
	ผิวเรียบ/ขรุขระ	ความมันเงา	ความเป็นเนื้อเดียวกัน	ลักษณะสัมผัส
HPMC E15LV 2	เรียบปานกลาง	ปานกลาง	มาก	เนียนปานกลาง
HPMC E15LV 3	เรียบมาก	ปานกลาง	มาก	เนียนมาก
HPMC E15LV 4	เรียบปานกลาง	ปานกลาง	มาก	เนียนปานกลาง
AGS G20 2	เรียบปานกลาง	มาก	น้อย	เนียน
AGS G20 3	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS G20 4	เรียบปานกลาง	มาก	มาก	เนียนปานกลาง
AGS S20 2	เรียบปานกลาง	มาก	น้อย	เนียน
AGS S20 3	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เนียนปานกลาง
AGS S20 4	เรียบปานกลาง	มาก	มาก	เนียนปานกลาง
AGS S30 2	เรียบปานกลาง	มาก	น้อย	เนียน
AGS S30 3	เรียบปานกลาง	มาก	ปานกลาง	เหนียวติดกันง่าย
AGS S30 4	เรียบปานกลาง	มาก	มาก	เหนียวติดกันง่าย

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของยาเม็ดโพรพราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ ที่ผ่านการเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างชนิด ได้แก่ glycerol (G) ที่ระดับความเข้มข้น ที่ร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง และ sorbitol (S) ที่ระดับความเข้มข้น ที่ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มจากแป้งตัดแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น (AGS) และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ระดับการเคลือบยาเม็ด โดยคิดจากสารก่อฟิล์มที่ร้อยละ 2, 3 และ 4 ของน้ำหนักยาเม็ดแกนที่ใช้ แสดงในตารางที่ 40 และภาพที่ 38

พบว่า ยาเม็ดที่ผ่านการเคลือบด้วย HPMC E15LV ที่ระดับการเคลือบสารก่อฟิล์มที่ร้อยละ 3 ของน้ำหนักยาเม็ดแกน มีลักษณะที่เหมาะสมกว่าที่ระดับร้อยละ 2 และ 4 เนื่องจาก ที่ระดับร้อยละ 2 ละอองหรืออนุภาคของสารเคลือบที่พอกชั้นห่อหุ้มอยู่บนผิวของยาเม็ดยังกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทำให้ลักษณะผิวที่มีความเรียบเนียนระดับปานกลางอยู่ ที่ระดับร้อยละ 3 ละอองหรืออนุภาคของสารเคลือบที่พอกชั้นห่อหุ้มอยู่บนผิวของยาเม็ดกระจายตัวสม่ำเสมอ และอยู่ในระบบการเคลือบที่พอเหมาะ จึงทำให้มีลักษณะผิวที่มีความเรียบเนียนในระดับสูงมาก และที่ระดับร้อยละ 4 ละอองหรืออนุภาคของสารเคลือบที่พอกชั้นห่อหุ้มอยู่บนผิวของยาเม็ดมีความหนาแน่นมาก และอยู่ในระบบการเคลือบเป็นเวลานานขึ้น ยาเม็ดมีการกระแทกกับผนังของหม้อเคลือบและยาเม็ดด้วยกันเอง ทำให้มีลักษณะผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น จึงมีความเรียบเนียนลดลง จนมีระดับปานกลาง

การเคลือบยาเม็ดด้วยแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ระดับร้อยละ 2, 3 และ 4 ของน้ำหนักเม็ดยาแกน ในสภาวะที่มี glycerol และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง พบว่า ยาเม็ดที่เคลือบด้วยแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ระดับร้อยละ 4 ของน้ำหนักยาเม็ดในสภาวะที่มี glycerol และ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 20 ของน้ำหนักแป้ง เม็ดยามีลักษณะผิวเนียนปานกลาง เรียบมันเงามาก และมีความเป็นเนื้อเดียวกันมาก เนื่องจาก การเคลือบที่สภาวะและระดับดังกล่าว เป็นระดับที่ปริมาณของฟิล์มจากแป้งเพียงพอ การพอกชั้นฟิล์มที่ห่อหุ้มอยู่บนผิวของยาเม็ดมีความสม่ำเสมอ ยาเม็ดที่เคลือบด้วยแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ที่ระดับร้อยละ 4 ของน้ำหนักยาเม็ดในสภาวะที่มี sorbitol ที่ระดับร้อยละ 30 ของน้ำหนักแป้ง เม็ดยามีลักษณะผิวที่เหนียวติดกัน เนื่องจาก ปริมาณของ sorbitol ที่มีสูง การดูดความชื้นไว้ที่ฟิล์มจึงมากขึ้น ฟิล์มที่หุ้มผิวยาเม็ดอ่อนนุ่ม จึงเกิดการเกาะติดกันระหว่างเม็ดหรือกับวัสดุอื่นๆ ที่สัมผัสได้ง่าย



ภาพที่ 38 ภาพลักษณะของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (2,3,4 % weight increased) ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

3.6 ผลการหาปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบฟิล์ม

ผลการหาปริมาณด้วยยาสำคัญโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ในเม็ดยาแกน การหาปริมาณด้วยยาสำคัญดังกล่าว ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวยาโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์มาตรฐาน ตั้งแต่ 5, 10, 20 40 และ 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร กับค่าการดูดกลืนแสงยูวี ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 289 นาโนเมตร ได้กราฟและสมการความสัมพันธ์ $y = 0.02036x + 0.01971$, ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.99995 และนำสมการไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของตัวยาโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ในเม็ดยาแกน ในสถานะต่างๆ โดยการแทนที่ด้วยค่าการดูดกลืนแสงยูวีของยาเม็ด ดังแสดงในตารางที่ 41 และ 42

ตารางที่ 41 ปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (3% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ด (%LA)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	106.74±1.94	104.28±2.74	106.25±1.89
Sorbitol	110.42±1.16	101.66±1.79	107.31±7.63
Polyethylene glycol 400	104.12±0.84	104.69±2.71	98.80±3.96

แป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดเท่ากับ 98.23±1.72 %
 HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) มีปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดเท่ากับ 103.59±1.72 %
 ยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม มีปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดเท่ากับ 110.83±1.94 %
 ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

จากผลในตารางที่ 41 และ 42 พบว่าปริมาณด้วยยาสำคัญในยาเม็ดทุกสถานะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 98.23 ถึง 110.83 จากที่ระบุไว้ 40 มิลลิกรัมต่อเม็ด ซึ่งตามข้อกำหนดระบุว่า ปริมาณด้วยยาสำคัญที่ตรวจพบ จะต้องอยู่ในช่วงร้อยละ 90 ถึง 110 จากที่ระบุไว้ และจากผลการทดลอง พบว่า มียาเม็ดแกนก่อนการเคลือบฟิล์ม และยาเม็ดเคลือบฟิล์มในสถานะ sorbitol ที่ระดับร้อยละ 10 ของน้ำหนักแป้งฟิล์ม ที่มีปริมาณด้วยยาสำคัญเกินกำหนด โดยเฉลี่ยอยู่ร้อยละ 110.42 ± 1.16 และ 110.83 ± 1.94 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องจากยาเม็ดที่ตอกได้มีน้ำหนักมากกว่าที่กำหนดไว้ที่ 300 มิลลิกรัม โดยน้ำหนักเม็ดยาแกนที่ตอกเม็ดยาได้มีน้ำหนักต่อเม็ดเฉลี่ย 311 มิลลิกรัม ทำให้ปริมาณด้วยยาสำคัญเกินข้อกำหนดไปเล็กน้อย

ตารางที่ 42 ปริมาณตัวยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบฟิล์มแข็งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแข็งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแข็งเปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

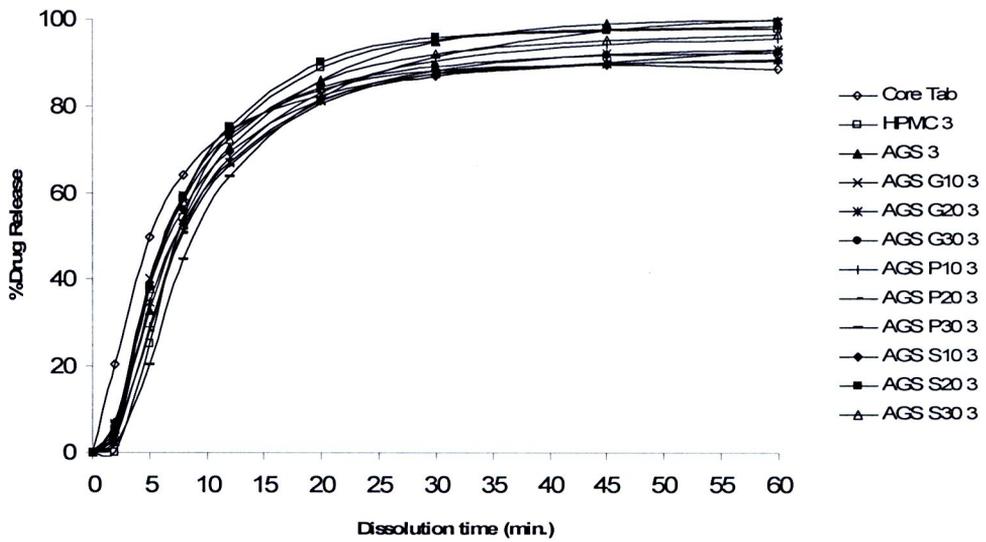
ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	ปริมาณตัวยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบฟิล์ม (%LA)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	104.78±5.12	104.28±2.74	100.64±0.51
AGS + Sorbitol 20 %	103.59±5.10	101.66±1.79	101.58±3.29
AGS + Sorbitol 30 %	101.91±4.87	107.31±7.63	103.71±4.98
HPMC E15LV	106.78±2.88	103.59±1.72	109.65±2.15

ปริมาณตัวยาสำคัญในยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม มีค่าเท่ากับ 110.83±1.94 %

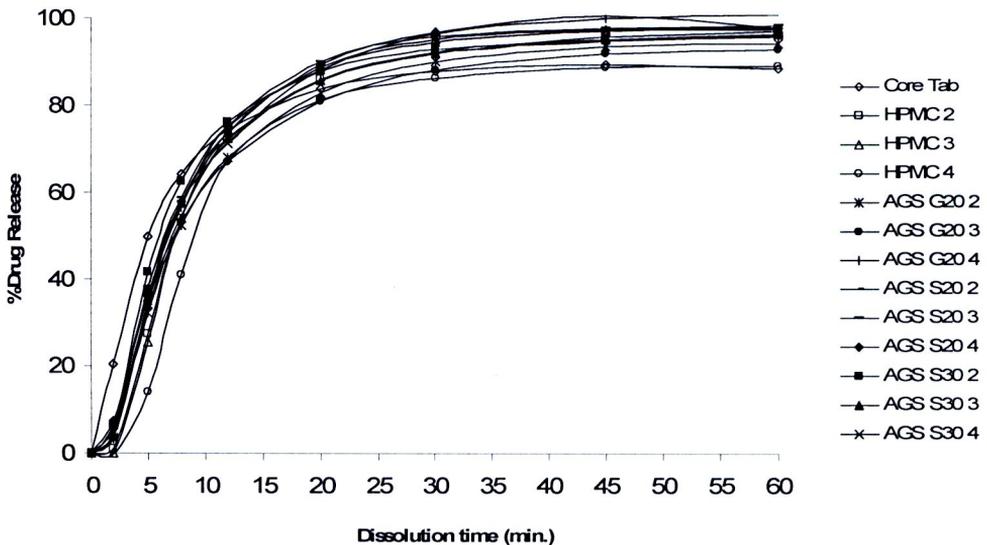
ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 3

3.7 ผลศึกษาการปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากยาเม็ดเคลือบฟิล์ม

ผลการศึกษาการปลดปล่อยตัวยาสำคัญโพพรานอลอลไฮโดรคลอไรด์ในเม็ดยาแกน ในการหาปริมาณตัวยาสำคัญดังกล่าว ได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวยาโพพรานอลอลไฮโดรคลอไรด์มาตรฐาน ตั้งแต่ 0.2, 1, 5, 10, 20 40 และ 50 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร กับค่าการดูดกลืนแสงยูวี ที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 289 นาโนเมตร ได้กราฟและสมการความสัมพันธ์ $y = 0.01983x + 0.00664$, ค่าสัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.99989 และนำสมการไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณของตัวยาโพพรานอลอลไฮโดรคลอไรด์ในเม็ดยาแกนเคลือบฟิล์มในสถานะต่างๆ ที่ปลดปล่อยจากเม็ดยา ในสถานะ medium สารละลายกรดเจือจางไฮโดรคลอริก 1 ต่อ 100 (dilute hydrochloric acid 1:100) ที่เวลาต่างๆ โดยการแทนที่ด้วยค่าการดูดกลืนแสงยูวีของยาเม็ดในสมการดังกล่าวได้ความสัมพันธ์ร้อยละของการปลดปล่อยตัวยาที่เวลาต่างๆ ผลดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 39 และ 40 และผลร้อยละของการปลดปล่อยตัวยาสำคัญที่เวลา 30 นาที ดังแสดงในตารางที่ 43 และ 44



ภาพที่ 39 กราฟการปลดปล่อยด้วยสำคัญจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (3% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ (glycerol, sorbitol และ PEG400) 3 ระดับ (ร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง) ที่เวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับแป้งคัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน



ภาพที่ 40 กราฟการปลดปล่อยด้วยสำคัญจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวคัดแปรความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ที่เวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ตารางที่ 43 ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (3% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ ที่เวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่เวลา 30 นาที (%)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	87.62±2.60	88.28±4.92	89.30±3.30
Sorbitol	86.93±2.69	95.79±3.76	92.02±3.49
Polyethylene glycol 400	90.42±3.76	87.55±4.66	91.49±4.23

ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น)

ที่เวลา 30 นาที เท่ากับ 94.83±1.47 %

ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น)

ที่เวลา 30 นาที เท่ากับ 95.10±3.15 %

ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม ที่เวลา 30 นาที

เท่ากับ 88.08±1.88 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 6

ตารางที่ 44 ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2,3,4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง ที่เวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่เวลา 30 นาที (%)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	90.02±2.76	88.28±4.92	96.56±2.33
AGS + Sorbitol 20 %	92.01±3.69	95.79±3.76	96.88±4.01
AGS + Sorbitol 30 %	93.01±2.04	92.02±3.49	94.63±4.68
HPMC E15LV	92.24±4.76	95.10±3.15	86.43±1.74

ปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยจากยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม ที่เวลา 30 นาที

เท่ากับ 88.08±1.88 %

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน , n = 6

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงในภาพที่ 39 และตารางที่ 43 พบว่า การปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากเม็ดยาเคลือบ ในทุกสภาวะ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เม็ดยาสามารถปลดปล่อยยาออกมาได้เป็นไปตามข้อกำหนดคือไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณที่ระบุไว้เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 30 นาที โดยมีร้อยละของการปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากเม็ดยาอยู่ในช่วง 87.55 ± 4.66 ถึง 95.79 ± 3.76 ซึ่งถือว่าเม็ดยาเคลือบฟิล์มแข็งทุกสภาวะ และ HPMC E15LV ผ่านข้อกำหนด และผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่น ไม่มีต่อคุณสมบัติการปลดปล่อยตัวยาของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้ง และปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่นมีต่อคุณสมบัติการปลดปล่อยตัวยาของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้ง อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก การที่เม็ดยาอยู่ในสภาวะสารละลายที่เป็นกรด จึงทำให้การละลายของฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดยาไว้ สามารถละลายออกมาได้เร็ว จึงส่งผลต่อการชะลอการปลดปล่อยที่น้อยมาก จากกราฟจะพบว่า เม็ดยาก่อนการเคลือบในช่วงที่เวลา 0 ถึง 10 นาที การปลดปล่อยตัวยามีมากกว่าเม็ดยาเคลือบฟิล์ม แต่หลังจากเวลาผ่านไป 10 นาที นั้น เม็ดยาทุกสภาวะสามารถปลดปล่อยยาออกมาได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในช่วง 10 นาทีแรกของการปลดปล่อยยา ฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดยาไว้ได้ขบวนการปลดปล่อยยาให้ช้าลง แต่เมื่อฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดยาไว้ละลายออกหมด การปลดปล่อยก็มีอัตราเร็วเป็นปกติเหมือนเม็ดยาก่อนการเคลือบ และมีข้อสังเกตว่า เม็ดยาก่อนการเคลือบจะมีปริมาณตัวยาสำคัญที่ปลดปล่อยออกมา ที่เวลา 60 นาที น้อยกว่า เม็ดยาเคลือบ อาจมีสาเหตุจากการที่เม็ดยามีสารเพิ่มปริมาณ (filler) ชนิด Novacell[®] ซึ่งเป็น microcrystalline cellulose ชนิดหนึ่ง มีการกัก (tapping) ตัวยาสำคัญเอาไว้ ทำให้การปลดปล่อยยาออกมาได้ต่ำกว่าที่ควร และเนื่องจากเม็ดยาเคลือบถูกกึ่งอยู่ในหม้อเคลือบและถูกความร้อนเป็นเวลานาน ตลอดจนขั้นตอนการเคลือบ ทำให้โครงสร้างของเม็ดยามีการคลายตัวจับกันหลวมขึ้น การละลายของเม็ดยาจึงเพิ่ม การปลดปล่อยตัวยาจึงมากกว่าเม็ดยาก่อนการเคลือบ

และผลการทดลองดังกล่าวแสดงในภาพที่ 40 และตารางที่ 44 พบว่า การปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากเม็ดยาเคลือบ ในทุกสภาวะ เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที เม็ดยาสามารถปลดปล่อยยาออกมาได้เป็นไปตามข้อกำหนดคือไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ของปริมาณที่ระบุไว้เมื่อเวลาผ่านไปแล้ว 30 นาที โดยมีร้อยละของการปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากเม็ดยาอยู่ในช่วง 86.43 ± 1.74 ถึง 96.88 ± 4.01 ซึ่งถือว่าเม็ดยาเคลือบฟิล์มแข็งทุกสภาวะ และ HPMC E15LV ผ่านข้อกำหนดเช่นเดียวกัน และระดับของการเคลือบต่อคุณสมบัติการปลดปล่อยตัวยาของยาเม็ดโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์เคลือบฟิล์มจากแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ทุกสภาวะมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจาก การที่เม็ดยาอยู่ในสภาวะสารละลายที่เป็นกรด จึงทำให้การละลายของฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดยาไว้ สามารถละลายออกมาได้เร็ว จึงส่งผลต่อการชะลอการปลดปล่อยที่น้อยมาก

3.7.1 เวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญจากยาเม็ดเคลือบ ที่ร้อยละ 50 (Drug Release at $T_{50\%}$)

การศึกษาเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญโพรพาราโนลอลไฮโดรคลอไรด์ในยาเม็ดเคลือบที่สามารถปลดปล่อยออกมาได้ร้อยละ 50 ($T_{50\%}$) ดังแสดงในตารางที่ 45 และ 46

การศึกษา พบว่า ยาเม็ดเคลือบด้วยฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด (glycerol, sorbitol และ PEG400) ที่ระดับร้อยละ 10, 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง มีการปลดปล่อยตัวยาสำคัญที่ $T_{50\%}$ ที่แตกต่างกัน ยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นมีเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญในยาเม็ด $T_{50\%}$ เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของฟิล์มที่ห่อหุ้มบนผิวของยาเม็ดป้องกันการเข้าทำลายของ medium ทำให้การละลายของยาเม็ดช้าลงเมื่อเทียบกับยาเม็ดที่ไม่ได้ทำการเคลือบ

ตารางที่ 45 เวลาที่ยาสำคัญสามารถปลดปล่อยได้ร้อยละ 50 ($T_{50\%}$) จากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (3% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด และ 3 ระดับ เปรียบเทียบกับแป้งตัดแปร และ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	เวลาที่ยาสำคัญสามารถปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่ $T_{50\%}$ (นาที)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยึดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
Glycerol	6.79±0.52	7.59±0.53	6.82±0.83
Sorbitol	7.38±1.48	6.86±0.52	7.05±1.11
Polyethylene glycol 400	7.87±0.97	8.22±1.77	9.72±3.43

$T_{50\%}$ ของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 7.65±1.31 min.

$T_{50\%}$ ของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 7.60±1.42 min.

$T_{50\%}$ ของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม เท่ากับ 5.06±0.40 min.

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6

ตารางที่ 46 เวลาที่ยาสำคัญสามารถปลดปล่อยได้ร้อยละ 50 ($T_{50\%}$) จากยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ (2, 3, 4% weight increased) จากสารละลายที่มีแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในสถานะที่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่นต่างกัน ได้แก่ glycerol ร้อยละ 20 sorbitol ร้อยละ 20 และ 30 ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับ HPMC E15LV ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน

ชนิดของสารก่อฟิล์ม และชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น	เวลาที่ยาสำคัญสามารถปลดปล่อยจากยาเม็ดเคลือบฟิล์มที่ $T_{50\%}$ (นาที)		
	ปริมาณสารก่อฟิล์มที่ใช้ในการเคลือบ (% weight increased)		
	2	3	4
AGS + Glycerol 20 %	7.67±0.61	7.59±0.53	7.20±1.07
AGS + Sorbitol 20 %	7.59±1.66	6.86±0.52	6.99±0.85
AGS + Sorbitol 30 %	6.47±0.70	7.05±1.11	7.09±0.99
HPMC E15LV	7.95±2.46	7.60±1.42	11.20±4.96

$T_{50\%}$ ของยาเม็ดเคลือบฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น) เท่ากับ 7.65±1.31 min.

$T_{50\%}$ ของยาเม็ดก่อนเคลือบฟิล์ม เท่ากับ 5.06±0.40 min.

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน, n = 6

ผลของชนิดและปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่น ที่มีต่อเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญในยาเม็ดได้ ร้อยละ 50 ($T_{50\%}$) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ผลของปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่น ชนิด glycerol และ sorbitol ต่อเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญ $T_{50\%}$ ลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กล่าวคือ ตัวยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบปลดปล่อยออกมาได้เร็วขึ้น จากการศึกษาการละลายของแผ่นฟิล์มแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่พบว่าค่าการละลายของฟิล์มมีการเพิ่มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะตัวทำละลายที่เป็นกรด 0.1 M HCl และการใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่นร่วมในฟิล์มแป้งจะทำให้ค่าการละลายลดลง เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ในการทดสอบการปลดปล่อยตัวเวลาที่ $T_{50\%}$ ที่ทดสอบในสภาวะตัวทำละลายที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก 1:100 ซึ่งเป็นกรดที่เข้มข้นกว่า glycerol และ sorbitol สามารถละลายได้ดี (Material Safety Data Sheet (MSDS) for glycerol and sorbitol) ค่าการละลายจึงเพิ่มขึ้น

ผลของปริมาณของสารเพิ่มความยึดหยุ่น ชนิด PEG400 ต่อเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญ $T_{50\%}$ เพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) กล่าวคือ ตัวยาสำคัญในยาเม็ดเคลือบปลดปล่อยออกมาได้ช้าลง เนื่องจาก ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ หรือมีความเป็นกรดสูง คุณสมบัติในการละลายของ PEG ลดลง (Material Safety Data Sheet (MSDS) for PEG400) ดังนั้น ในการทดสอบในสภาวะตัวทำละลายที่เป็นกรดไฮโดรคลอริก 1:100 จึงพบว่า ยาเม็ดเคลือบด้วยแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่มี PEG400 เมื่อปริมาณ PEG เพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มที่ห่อหุ้มเม็ดยาแกนไว้ละลายได้ช้าลง การปลดปล่อยตัวยาสำคัญที่ $T_{50\%}$ จึงใช้เวลาเพิ่มขึ้น

ผลของชนิดของสารเพิ่มความยึดหยุ่น และระดับของการเคลือบ โดยคิดจากร้อยละสารก่อก่อฟิล์มที่ใช้ต่อน้ำหนักยาเม็ดแกนที่ใช้ ต่อเวลาในการปลดปล่อยตัวยาสำคัญในยาเม็ด $T_{50\%}$ มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ระดับของการเคลือบโดยคิดจากร้อยละสารก่อก่อฟิล์มที่ใช้ต่อน้ำหนักยาเม็ดแกนที่ใช้ ไม่มีผลต่อเวลา $T_{50\%}$ เนื่องจากผลของความหนาของยาเม็ดเคลือบที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และปริมาณของ glycerol หรือ sorbitol มีความแตกต่างกันน้อยมาก จึงไม่ส่งผลต่อเวลา $T_{50\%}$ เมื่อเปรียบเทียบกับกรเคลือบด้วยแป้งข้าวเหนียวตัดแปรฯ ที่ไม่มีสารเพิ่มความยึดหยุ่น ส่วนระดับของการเคลือบโดยคิดจากร้อยละสารก่อก่อฟิล์ม HPMC E15LV ที่ใช้ต่อน้ำหนักยาเม็ดแกนที่ใช้ มีผลต่อเวลา $T_{50\%}$ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระดับของการเคลือบที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อเวลา $T_{50\%}$ ที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากความหนาที่เพิ่มขึ้น และในสภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นสูง ค่าการละลายของ HPMC E15LV มีค่า (Material Safety Data Sheet (MSDS) for HPMC) ในตัวทำละลายกรดไฮโดรคลอริก 1:100 การละลายจึงลดลง จึงพบว่า เมื่อระดับการเคลือบเพิ่มขึ้น เวลา $T_{50\%}$ ของยาเม็ดเคลือบฟิล์ม HPMC E15LV เพิ่มขึ้น ความสามารถในการปลดปล่อยจึงช้าลง