

บทที่ 4

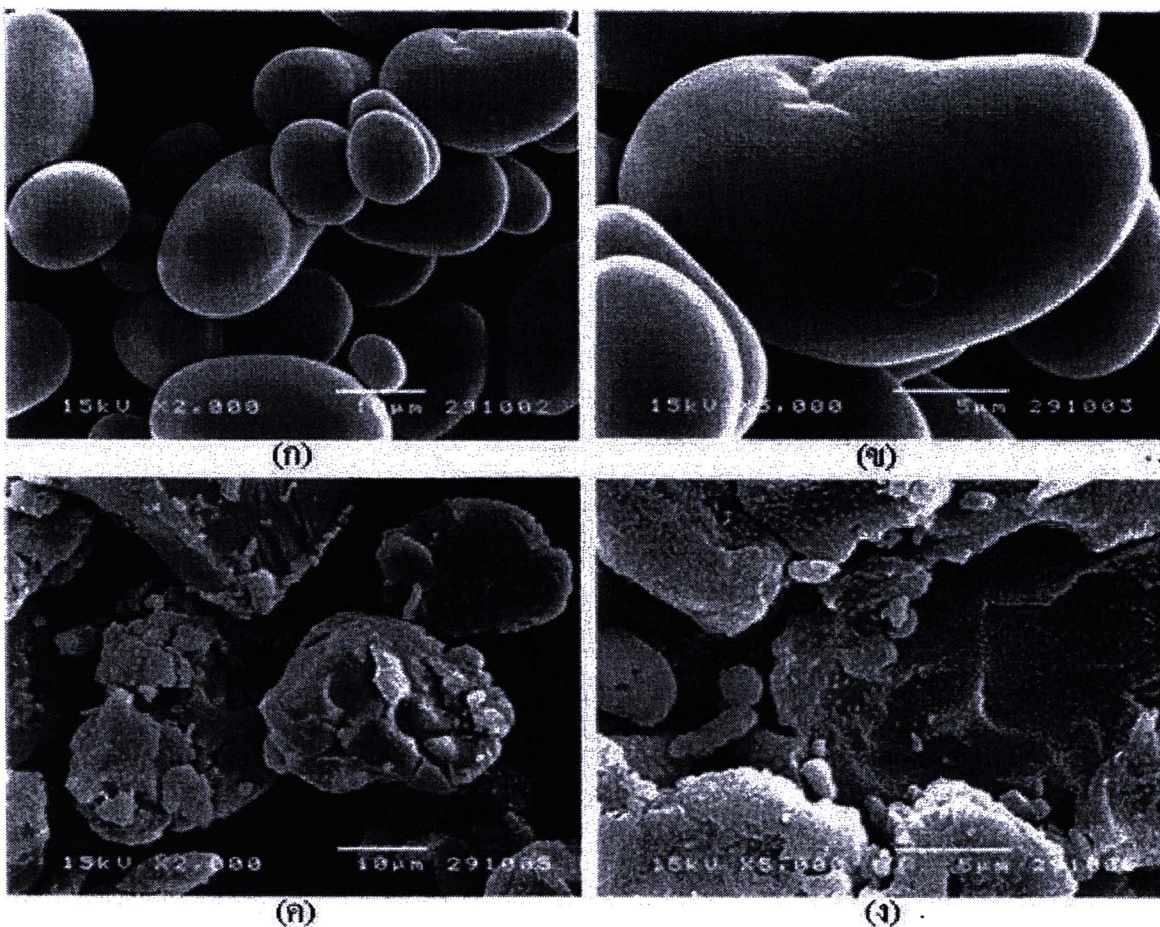
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกทำการศึกษาคูณสมบัติของแป้งถั่วเขียวดัดแปรด้วยต่างในแอลกอฮอล์ ต่อมาทำการศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีต่อความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวดัดแปร จากนั้นทำการศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีต่อฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร และทำการศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีต่อคุณสมบัติของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

1. คุณสมบัติของแป้งถั่วเขียวดัดแปร

1.1 ลักษณะภายนอกของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาลักษณะภายนอกของแป้งถั่วเขียวพบว่าแป้งถั่วเขียวเป็นผงละเอียด มีสีเขียวอ่อน และเมื่อส่องด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope; SEM) ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะภายนอกของแป้งถั่วเขียวก่อนการดัดแปรที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า (ก และ ข ตามลำดับ) และแป้งถั่วเขียวดัดแปร ที่กำลังขยาย 2,000 และ 5,000 เท่า (ค และ ง ตามลำดับ) ด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

จากภาพที่ 7 พบว่าเม็ดแป้งถั่วเขียวก่อนและหลังการตัดแปร โดยใช้ด่างในแอลกอฮอล์มีลักษณะผิวแตกต่างกัน โดยแป้งถั่วเขียวมีลักษณะเป็นรูปทรงกลมหรือกลมรีคล้ายไข่ มีผิวเรียบและรอยเว้าตามธรรมชาติ ซึ่งเม็ดแป้งถั่วเขียวขนาดใหญ่มีรูปร่างคล้ายไต ส่วนขนาดเล็กมีรูปร่างกลมมีขนาดประมาณ 7 - 24 ไมครอน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hoover และคณะ (1997) ที่พบว่าเม็ดแป้งถั่วเขียวมีขนาด 7.1 - 26.0 ไมครอน ผลการศึกษาของ Liu และ Shen (2007) พบว่าเม็ดแป้งถั่วเขียวมีขนาด 6.5 - 32.7 ไมครอน และผลการศึกษาของ Kim และคณะ (2007) พบว่าเม็ดแป้งถั่วเขียวมีขนาด 10 - 30 ไมครอน ซึ่งเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้งนั้นๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550)

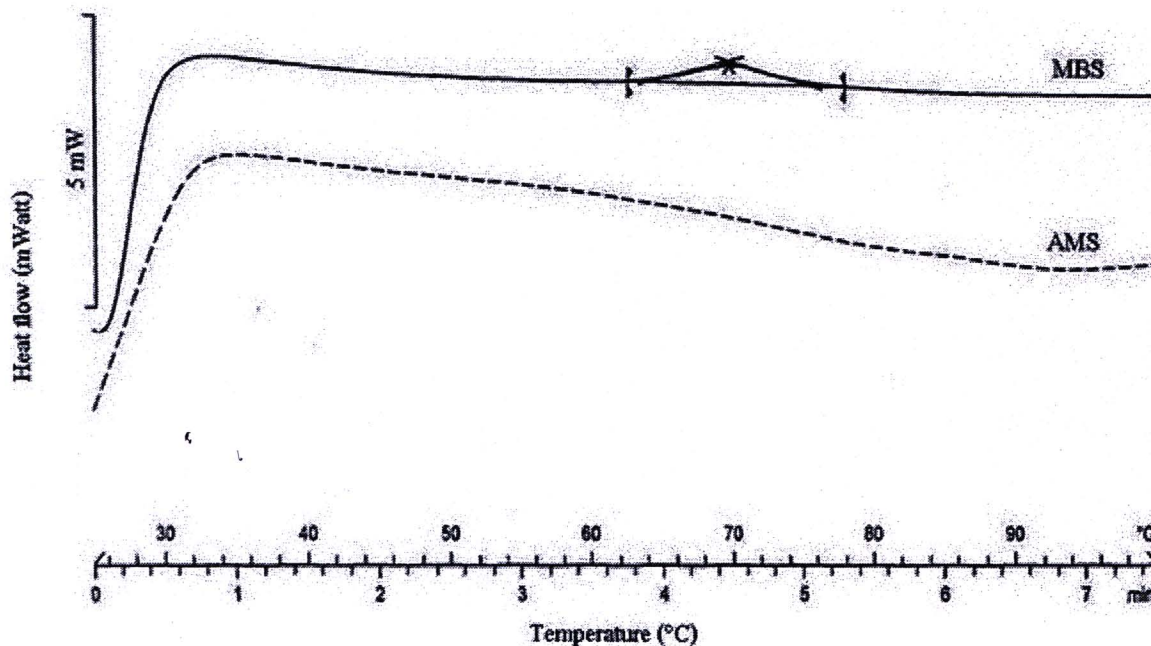
เมื่อทำการตัดแปรแป้งถั่วเขียวด้วยด่างในแอลกอฮอล์พบว่าสีของแป้งถั่วเขียวตัดแปรเปลี่ยนไปเป็นสีเขียวอมเหลืองอ่อนๆ และเมื่อส่องด้วยกล้องถ่ายภาพอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ภาพที่ 7) พบว่าลักษณะผิวของแป้งถั่วเขียวตัดแปรมีความแตกต่างจากแป้งถั่วเขียวก่อนตัดแปร คือ มีรูปร่างไม่แน่นอน ผิวมีรอยนูนและไม่เรียบ เนื่องจากเมื่อโมเลกุลของแป้งอยู่ในสารละลายด่างเข้มข้น โปรตรอน (proton) จากหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group; - OH group) แยกตัวออกทำให้โมเลกุลของแป้งมีประจุเป็นลบ (negative charge) เกิดการผลักกันทำให้เม็ดแป้งบวมพอง เกิดขลุ่ย (double - helical) ของอะมิโลเพกตินและอะมิโลสในแป้งที่ขดเป็นวงคล้ายตัวหรือแยกออกจากกันและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ส่งผลให้ความเป็นผลึกของแป้งถูกทำลาย เม็ดแป้งที่พองตัวเต็มที่จึงแตกตัวออก (Chen and Jane, 1994b) ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการศึกษาของจิราวุธ ปทุมชนทรัพย์ (2553) และ Chen และ Jane (1994a) ที่พบว่าแป้งข้าวเหนียว และ granular cold - water - soluble starch จากแป้งข้าวโพดซึ่งตัดแปร โดยใช้ด่างในแอลกอฮอล์ มีรูปร่างลักษณะเปลี่ยนไป คือ ไม่พบลักษณะเป็นเม็ดแป้งโดยมีการจับตัวกันเป็นก้อน และผิวไม่เรียบ

1.2 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวตัดแปร

โมเลกุลของแป้งมีโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (double - helical) ซึ่งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเรียงตัวอยู่ในร่างแห ซึ่งปกติในสารละลายตัวน้ำแป้ง เม็ดแป้งไม่ดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย จึงละลายในน้ำเย็นได้น้อย เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายตัวน้ำแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของแป้งถูกทำลายและสายพอลิเมอร์แยกออกจากกัน จึงมีการดูดน้ำแล้วพองตัวอย่างรวดเร็ว เกิดการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง ทำให้เปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งไปเป็นเจล เรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) โดยเกิดในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Kim et al., 2007)

จากผลการศึกษาคุณสมบัติด้านอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization temperature; Tg) ของแป้งถั่วเขียว ได้กราฟคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ (thermogram) โดยเริ่มพบการดูดความร้อน (onset temperature; To) ที่อุณหภูมิ 63.59 ± 2.12 °C มีการดูดความร้อนสูงสุด (peak temperature; Tp) ที่อุณหภูมิ 69.55 ± 0.78 °C และการดูดความร้อนสิ้นสุด (endset or conclusion temperature; Tc) ที่อุณหภูมิ 75.97 ± 0.53 °C และช่วงอุณหภูมิของการดูดความร้อนซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization Endotherm) ของแป้งถั่วเขียว เท่ากับ 12.38 ± 2.61 °C พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (enthalpy, ΔH) เท่ากับ 10.77 ± 0.79 J/g (ภาพที่ 8) โดยช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนเซชัน (Tc - To) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (ΔH) ยังมีค่ามากยิ่งแสดงถึงโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงมาก (Hoover et al., 1997) คล้ายกับผลการศึกษาของ Kim และคณะ (2007) ที่พบว่าแป้งถั่วเขียว 5 สายพันธุ์ในประเทศไทย มี To เท่ากับ 54.6 ± 0.14 ถึง 60.2 ± 0.49 °C มี Tp เท่ากับ 61.2 ± 0.14 ถึง 66.5 ± 0.28 °C มี Tc เท่ากับ 68.6 ± 0.07 ถึง 73.0 ± 0.78 °C และช่วงอุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้งถั่วเขียวเท่ากับ 12.1 - 14.4 °C มี

พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันเท่ากับ 11.56 ± 0.09 ถึง 13.15 ± 0.00 J/g นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hoover และคณะ (1997) และ Chang และคณะ (2006) ซึ่งมี T_p เท่ากับ 69°C และ 64.5°C ตามลำดับ



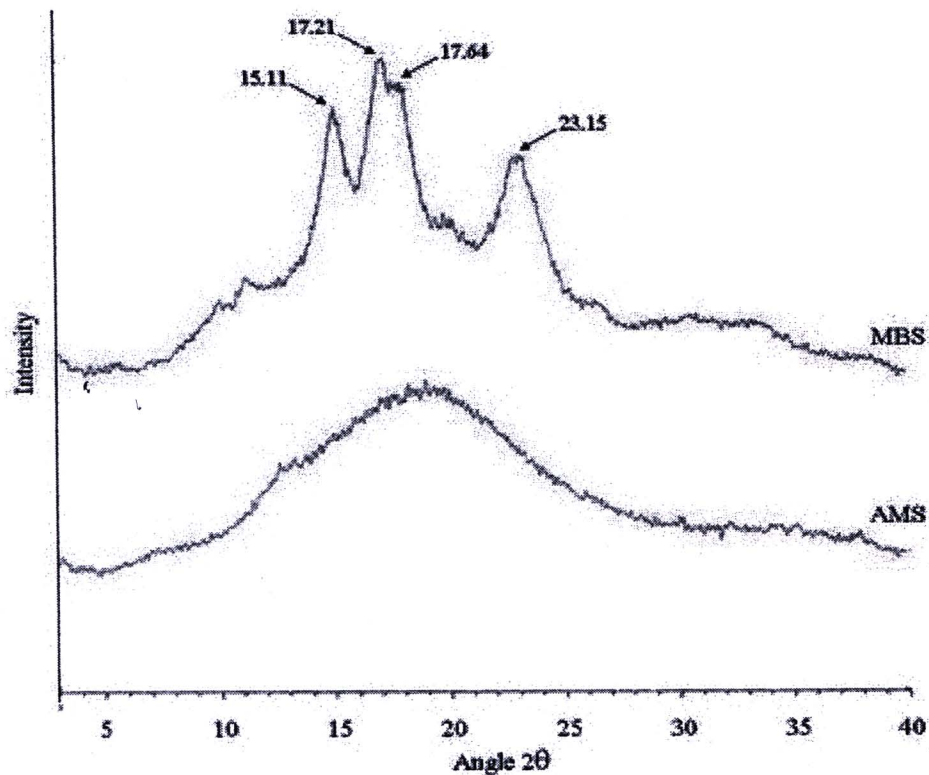
ภาพที่ 8 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งไปเป็นเจลของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวคัดแปร โดยมีอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับน้ำ (30: 70 w/v)

ผลการศึกษาคุณสมบัติด้านอุณหภูมิของแป้งถั่วเขียวคัดแปรซึ่งทดสอบที่อุณหภูมิระหว่าง $25 - 100^\circ\text{C}$ พบว่าไม่มีช่วงอุณหภูมิของเจลลาทีโนเซชัน (ภาพที่ 8) เนื่องจากการคัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ ทำให้โครงสร้างแบบเกลียวคู่ (double - helical) ของอะมิโลเพคตินและอะมิโลสในโครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำให้แยกออกจากกันด้วยแอลกอฮอล์ พันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเม็ดแป้งถูกทำลาย การยึดเกาะทางพันธะลดลง โครงสร้างผลึกหายไปเหลือแต่ส่วนอสัณฐาน เมื่อเม็ดแป้งที่คัดแปรแล้วสัมผัสกับน้ำจึงดูดน้ำแล้วพองตัวเหมือนกันกับการเกิดเจลลาทีโนเซชันด้วยความร้อนที่ทำให้พันธะที่อยู่ภายในและระหว่างโมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลาย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Chen and Jane, 1994b; Kaur et al., 2010) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chen และ Jane (1994b) ที่พบว่าไม่มีช่วงอุณหภูมิของเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization endotherm) แสดงในกราฟคุณสมบัติด้านอุณหภูมิ ของแป้งที่คัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ ช่วงอุณหภูมิระหว่าง $25 - 100^\circ\text{C}$ นอกจากนี้ Kaur และคณะ (2010) ยังพบว่าแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งที่คัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ไม่พบช่วงของอุณหภูมิเจลลาทีโนเซชันระหว่างอุณหภูมิ $30 - 120^\circ\text{C}$

1.3 คุณสมบัติโครงสร้างผลึกของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวคัดแปร

ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวคัดแปร โดยใช้วิธีการศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง x - ray diffractometer (XRD) พบว่าแป้งถั่วเขียวมีพีค (peak) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เกิดขึ้นชัดเจนที่ตำแหน่ง $15.11^\circ 2\theta$ มีพีคที่ไม่ชัดเจนซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง $17.21^\circ 2\theta$ และ $17.64^\circ 2\theta$ และมีพีคที่ตำแหน่ง $23.15^\circ 2\theta$ (ดังแสดงในภาพที่ 9) จากผลการทดลองนี้มีความคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Kim และคณะ (2007)

ที่พบว่าแป้งถั่วเขียวจาก 5 สายพันธุ์ในประเทศไทย มีพีคที่ตำแหน่ง $15.12^{\circ}2\theta$ มีพีคไม่ชัดเจนซ้อนทับกันที่ตำแหน่ง $17.24^{\circ}2\theta$ และ $17.96^{\circ}2\theta$ และมีพีคที่ตำแหน่ง $23.06^{\circ}2\theta$



ภาพที่ 9 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปร ด้วยเครื่อง x - ray diffractometer (XRD)

ในขณะที่แป้งถั่วเขียวดัดแปร มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นแบบ V (ภาพที่ 9) มีลักษณะเป็นเกลียวเดี่ยว เนื่องจากโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (double - helical) ของอะมิโลเพกตินและอะมิโลสในแป้งถูกทำให้แยกออกจากกันด้วยแอลกอฮอล์เหมือนกับการให้ความร้อน โครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งถูกทำลายเหลือเพียงส่วนอสัณฐาน โมเลกุลของแป้งมีรูปแบบไม่แน่นอนและเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ แสดงให้เห็นว่าแป้งมีการเปลี่ยนสภาพแล้ว ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ ชีราวุธ ปทุมธนทรัพย์ (2553) ที่ศึกษาผลของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์, Chen และ Jane (1994) ที่ศึกษาคุณสมบัติของแป้งละลายในน้ำเย็นที่เตรียมด้วยด่างในแอลกอฮอล์ และ Kaur และคณะ (2010) ที่ศึกษาผลของวิธีดัดแปรแป้งสาธูด้วยด่างในแอลกอฮอล์ พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นแบบ V

1.4 การพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาการพองตัวของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปรในน้ำกลั่น พบว่าแป้งถั่วเขียวก่อนการดัดแปรไม่พองตัวและไม่ละลายในน้ำเย็น แต่แป้งถั่วเขียวดัดแปรสามารถละลายในน้ำได้สารกระจายตัวที่มีความหนืดลักษณะค่อนข้างข้นสีเหลืองจางๆ ซึ่งแป้งถั่วเขียวมีโมเลกุลของแป้งที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน เรียงตัวแบบเกลียวคู่ในร่างแหของโครงสร้างผลึกทำให้เม็ดแป้งมีความแข็งแรง จึงดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย ทำให้ละลายในน้ำเย็นได้ยาก (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Hoover et al.,

1997; Kim et al., 2007) โดยผลการศึกษาการพองตัวและการละลายของแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปรแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความสามารถในการพองตัวและการละลายของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปร

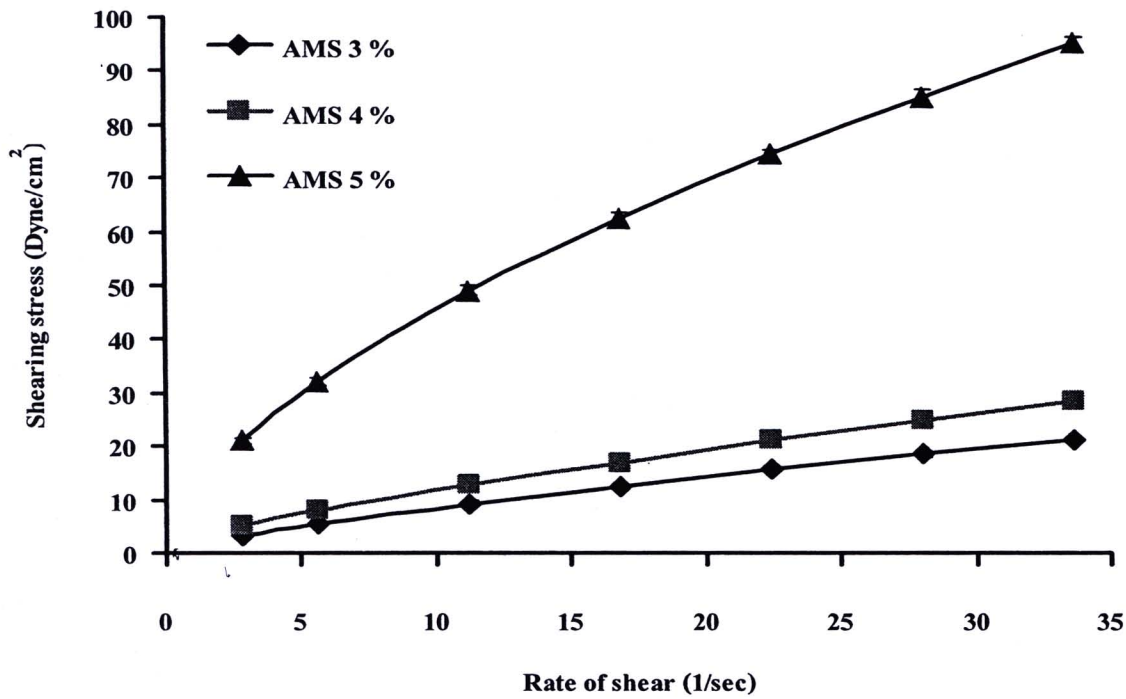
ชนิดของแป้ง	การพองตัว (เท่า)	การละลาย (%)
แป้งถั่วเขียว	N/A	0.27 ± 0.13
แป้งถั่วเขียวดัดแปร	5.17 ± 0.26	27.91 ± 6.83

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

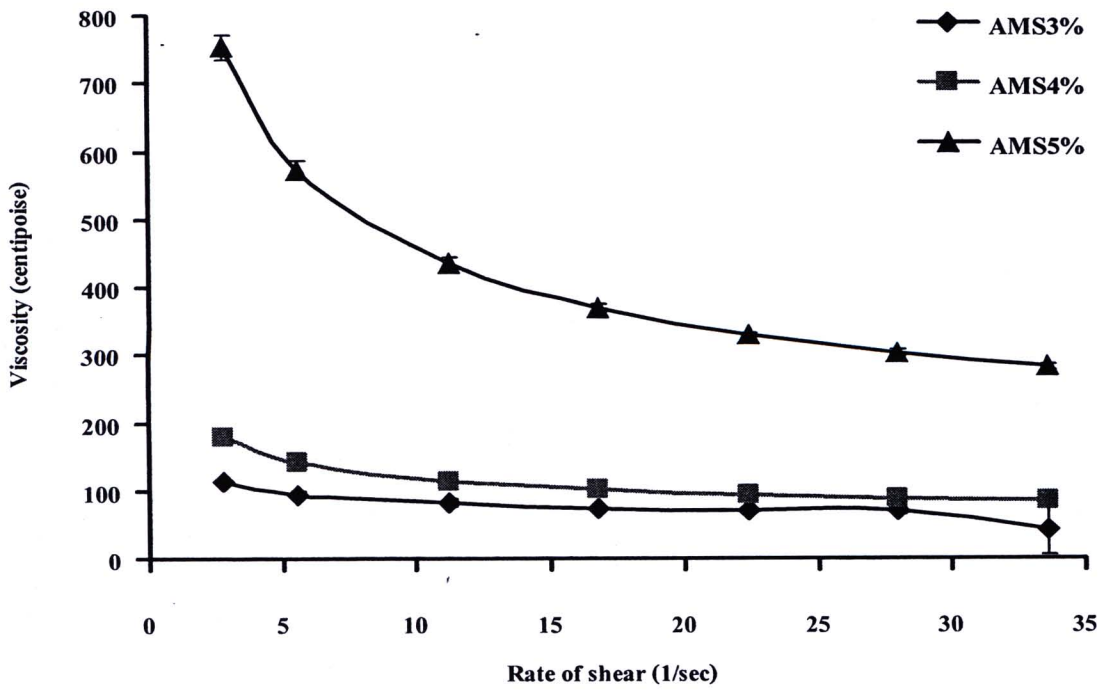
แต่แป้งถั่วเขียวดัดแปรสามารถละลายน้ำได้เนื่องจากการดัดแปรแป้งโดยใช้ด่างในแอลกอฮอล์ทำให้โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในเม็ดแป้งแยกออกจากกัน พันธะไฮโดรเจนถูกทำลายเหมือนกับการให้ความร้อน เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำ พองตัวขยายใหญ่ขึ้น และบางส่วนของแป้งสามารถละลายออกมา เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ (กล้านรงค์ ศรีวรรค และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Chen and Jane, 1994b) คล้ายกับผลการศึกษาของ Chen และ Jane (1994a) ที่พบว่าแป้งที่ดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์มีการพองตัวและละลายในน้ำเย็นได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง, ความเข้มข้นของเอทานอล ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยแป้งที่ดัดแปรแล้วสามารถละลายในน้ำเย็นได้ 70 - 90 % เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูง และอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาสูง คล้ายคลึงกับผลการศึกษาของชिरารู ปทุมธนทรัพย์ (2553) ที่พบว่าแป้งข้าวเหนียวมีการพองตัว 1.66 ± 0.12 เท่า และละลายในน้ำกลั่น 0.48 ± 3.61 % ในขณะที่แป้งข้าวเหนียวดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์มีการพองตัวและการละลายในน้ำกลั่น 4.11 ± 0.09 เท่า และ 57.11 ± 1.66 % ตามลำดับ และคล้ายกับผลการศึกษาของ Kaur และคณะ (2010) ที่พบว่าแป้งสาธูและแป้งข้าวโพดไม่ละลายน้ำ ในขณะที่แป้งสาธูและแป้งข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยด่างในแอลกอฮอล์สามารถละลายในน้ำได้ 91.4 ± 0.5 % และ 15.4 ± 1.0 % ตามลำดับ

1.5 ความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ความเข้มข้น 3 %, 4 % และ 5 % (w/w) ในน้ำกลั่น พบว่าสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวไม่สามารถวัดความหนืดได้ เนื่องจากแป้งถั่วเขียวในสารกระจายตัวมีการดูดซึมน้ำและพองตัวได้น้อย ทำให้ละลายในน้ำเย็นได้ยาก (กล้านรงค์ ศรีวรรค และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Hoover et al., 1997; Kim et al., 2007) สำหรับสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวดัดแปรพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) ทำให้แรงต้าน (shearing stress) ของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ลดลงด้วยเช่นกัน แสดงถึงการไหลของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวดัดแปรเป็นแบบ pseudoplastic ทุกความเข้มข้น โดยสารกระจายตัวที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าจะมีลักษณะการไหลเป็นแบบ newtonion มากกว่า (Bertuzzi, Armada and Gottifredi, 2007) ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การไหลของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร 3 %, 4 % และ 5 % (w/w) ที่อุณหภูมิห้อง (26 °C) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง



ภาพที่ 11 ความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร 3 %, 4 % และ 5 % (w/w) ที่อุณหภูมิห้อง (26 °C) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

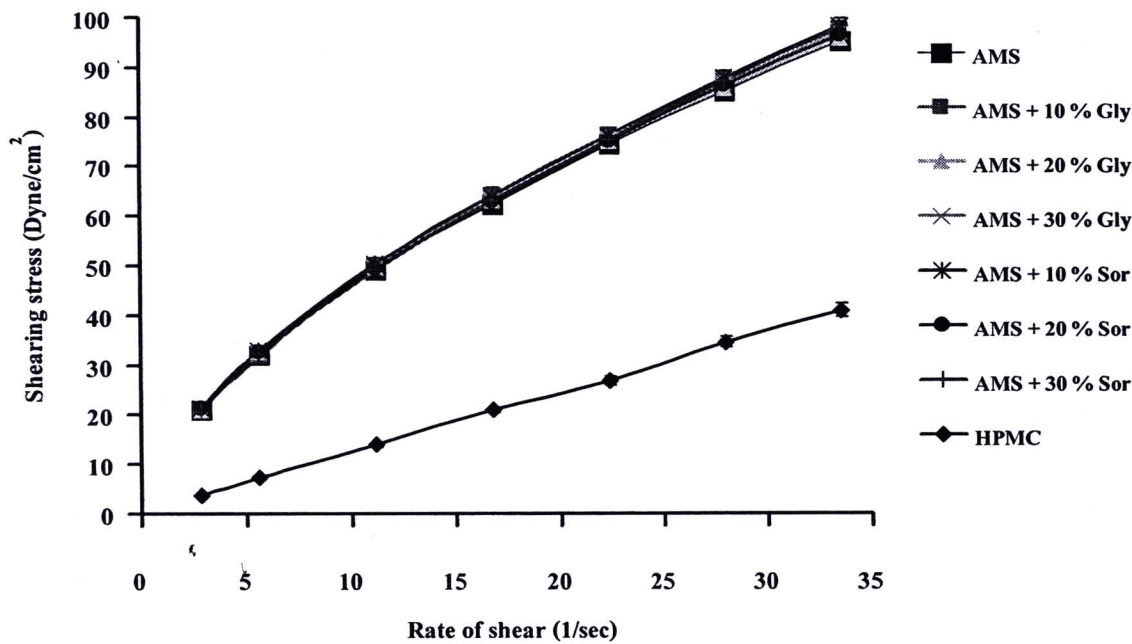
ภาพที่ 11 แสดงการความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนทำให้ความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรผกผัน ดังนั้นจึงได้กำหนดสภาวะเพื่อหาค่าความหนืดของสารละลายแป้งถั่วเขียวคั่วโดยใช้เครื่องวัดความหนืด Brookfield DVIII หัว spindle No. 34 ความเร็วในการหมุน 100 รอบ/นาที อัตราการเฉือน 28 sec^{-1} ที่อุณหภูมิห้อง 26°C พบว่าสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปร 3 %, 4 % และ 5 % มีค่าความหนืด 69.52 ± 4.19 , 88.45 ± 1.15 และ 304.17 ± 5.08 centipoise ตามลำดับ การที่สารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคั่วด้วยคั่วในแอลกอฮอล์ ทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของเม็ดแป้งถูกทำลาย การยึดเกาะทางพันธะลดลง โครงสร้างผลึกหายไปเหลือแต่ส่วนอสัณฐาน เมื่อแป้งที่คั่วแล้วสัมผัสกับน้ำโมเลกุลของน้ำจึงเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ แป้งมีการดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆ สายพอลิเมอร์ของแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เคลื่อนไหวได้ยากจึงเกิดความหนืดขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของแป้งถั่วเขียวคั่วเพิ่มขึ้น สารกระจายตัวจะมีโมเลกุลของน้ำรอบๆ สายพอลิเมอร์ของแป้งน้อยกว่าทำให้เคลื่อนไหวได้ยากกว่า จึงมีความหนืดเพิ่มขึ้น (กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550; Chen and Jane, 1994b; Bertuzzi et al., 2007; Kaur et al., 2010) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bertuzzi และคณะ (2007) ที่พบว่าสารกระจายตัวที่เตรียมฟิล์มจากแป้งข้าวโพดที่มีอะมิโลสสูง ด้วยวิธีลดอุณหภูมิและเติมด้วย 0.125 M โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยเตรียมเป็นสารกระจายตัวที่ 5 %, 7.5 % และ 10 % มีการไหลเป็นแบบ pseudoplastic และปริมาณความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น

เนื่องจากสารกระจายตัวที่มีความหนืดสูงมีแนวโน้มลดความสามารถในการเปียก เพราะสามารถกระจายตัวได้ดีเมื่อนำไปเคลือบกระดาษ ทำให้การแผ่กระจายของหยดน้ำที่อยู่บนกระดาษลดลง (Khan and Nasef, 2009) ดังนั้นจึงทำการเลือกสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปร 5 % เพื่อนำไปเคลือบกระดาษ โดยศึกษาผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอลต่อความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปร 5 % และคุณสมบัติของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรต่อไป

2. ผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปร

คุณสมบัติด้านความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรความเข้มข้น 5 % ที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล โดยใช้ความเข้มข้นของแต่ละชนิด 3 ระดับ คือ 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้งแห้ง เปรียบเทียบกับสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าการไหลของสารละลาย HPMC E15LV 5% มีลักษณะเป็นแบบ newtonian โดยความหนืดของสารละลาย HPMC E15LV วัดที่ความเร็วในการหมุน 100 รอบ/นาที เท่ากับ 124.71 ± 3.36 cps ส่วนลักษณะการไหลของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่มีเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลทุกระดับความเข้มข้นเป็นแบบ pseudoplastic ดังแสดงในภาพที่ 12

นอกจากนี้สารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรทุกสภาวะ ที่ทดสอบด้วยความเร็วในการหมุนเท่ากันที่อุณหภูมิห้อง (26°C) มีค่าความหนืดไม่แตกต่างกัน จึงสรุปว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้ง 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง ไม่มีผลต่อความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4



ภาพที่ 12 การไหลของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร 5 % ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น สารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร 5 % ที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 % 20 % และ 30 % ของน้ำหนักรแป้ง และสารละลาย HPMC E15LV 5% แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 4 ความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร (AMS) 5 % ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น สารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร 5 % ที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักรแป้ง และสารละลาย HPMC E15LV 5%

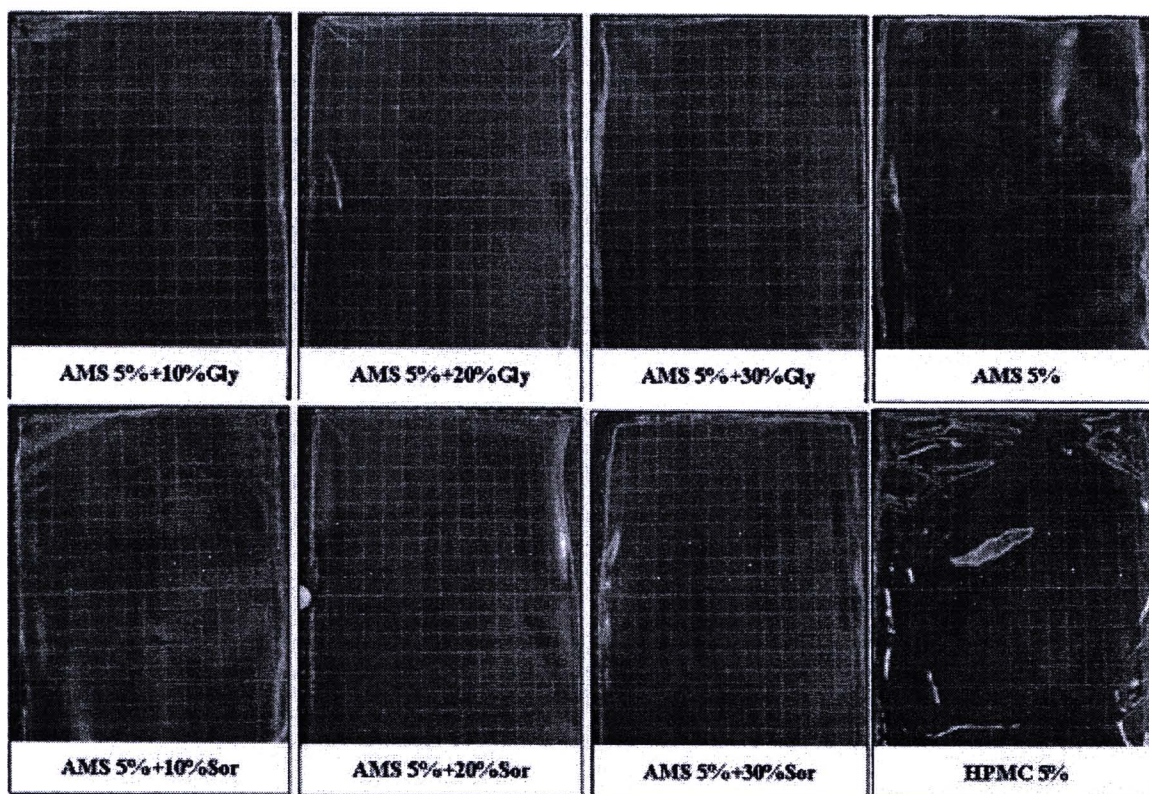
ความหนืดของสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคัดแปร (cps)							
RPM	AMS	AMS + Glycerol (%)			AMS + Sorbitol (%)		
		10 %	20 %	30 %	10 %	20 %	30 %
10	753.57±18.56	753.57±18.90	752.38±14.43	759.52±16.10	765.48±4.12	758.33±2.06	745.24±10.31
20	572.62±13.64	568.45±22.68	581.55±21.30	577.38±4.12	588.10±2.73	583.93±6.44	576.19±10.31
40	437.80±8.25	447.02±9.29	442.86±11.68	441.67±2.25	448.51±1.36	440.77±3.72	438.10±8.10
60	370.83±6.21	380.95±8.40	375.99±8.67	376.19±1.03	380.95±1.19	374.40±2.15	375.60±6.19
80	331.85±4.15	339.88±6.47	334.38±7.59	336.46±1.12	340.63±1.61	335.12±0.68	336.61±6.61
100	304.17±5.08	312.62±4.88	306.43±4.83	309.29±0.94	313.21±1.79	308.33±1.25	311.19±5.54
120	283.23±4.00	290.38±3.35	285.02±5.23	288.10±0.79	291.77±1.79	286.81±0.75	292.06±4.82

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

3. ผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

3.1 ลักษณะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน มีลักษณะค่อนข้างใส โปร่งแสง ผิวเรียบ ผิวของฟิล์มด้านที่สัมผัสกับพลาสติกมีความเรียบและมันวาวมากกว่าผิวด้านที่สัมผัสกับอากาศ (ภาพที่ 13) เนื่องจากคุณสมบัติของแป้งถั่วเขียว ซึ่งเป็นแป้งจากธัญพืช มีปริมาณอะมิโลสสูง มีแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่ต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึกและบริเวณอสัณฐานของเม็ดแป้ง มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำ ทำให้เกิดการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิลของอะมิโลสระหว่างเย็นตัวหรือรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) โมเลกุลของอะมิโลสจึงเกิดเป็นผลึกที่ไม่ละลายทำให้ฟิล์มขุ่น (กล้านรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) สอดคล้องกับจุพาลักษณ์และคณะ (2552ก) ซึ่งศึกษาเทคนิคการทำให้แห้งต่อคุณสมบัติของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้าผสมไคโตแซน และปานทิพย์ บุญส่ง (2548) ที่พบว่าแป้งข้าวเจ้าซึ่งมีอะมิโลสสูงเมื่อเตรียมเป็นฟิล์มจึงมีความขุ่น โปร่งแสงด้านหนึ่งเรียบมันวาว ส่วนอีกด้านหนึ่งไม่มันวาว มีผิวที่สม่ำเสมอทั้งทั้งแผ่น ผิวของแผ่นฟิล์มด้านที่สัมผัสกับอากาศมีลักษณะหยาบและเรียบน้อยกว่าอีกด้านหนึ่ง



ภาพที่ 13 ลักษณะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร (AMS) ที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์ม HPLC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น (AMS คือ แป้งถั่วเขียวดัดแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 % พบว่าทำให้ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร เปราะ แตกหักง่ายขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่ม

ความยืดหยุ่น เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีปริมาณต่ำ ทำให้การแทรกตัวในโมเลกุลของแป้งมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แป้ง มีความสามารถในการยึดจับทางพันธะกับโมเลกุลของแป้งลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง ฟิล์มเกิดการแตกง่ายขึ้น (จิราวุธ ปทุมธนทรัพย์, 2553) แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 20 % และ 30 % ทำให้ฟิล์มแป้ง ถั่วเขียวคัดแปรมีผิวเรียบ มีความอ่อนตัวและความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่เติมสารเพิ่มความ ยืดหยุ่น 30 % มีผิวเรียบ มีความอ่อนตัวและความยืดหยุ่นมากกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น 20 % เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นเข้าไปแทรกยึดจับกับโมเลกุลของแป้ง เกิดการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลของสารเพิ่มความ ยืดหยุ่นกับสายพอลิเมอร์ของแป้งที่อยู่ใกล้เคียงกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสายพอลิเมอร์ที่อยู่ใกล้ กันอ่อนลง เกิดเป็นโครงสร้างของโมเลกุลที่ยืดหยุ่น (Laohakunjit and Noomhorm, 2004) สอดคล้องกับการศึกษาของ ปานทิพย์ บุญส่ง (2548) ที่พบว่าสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ กลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีผลทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเจ้ามีความ อ่อนตัวเพิ่มขึ้น นุ่มมือมากขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งข้าวเจ้าที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น แต่ถ้าใช้ความเข้มข้นต่ำทำให้ ฟิล์มเปราะ แตกหักง่าย และสอดคล้องกับการศึกษาของ Bangyekan และคณะ (2006) ที่พบว่าการใช้สารเพิ่มความ ยืดหยุ่นในปริมาณที่ต่ำมีผลทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มที่ได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติลดลง

3.2 ความหนาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปร

จากผลการศึกษาความหนาของฟิล์มพบว่าความหนาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปร (ไม่มีสารเพิ่มความ ยืดหยุ่น) เท่ากับ 136.13 ± 15.12 ไมครอน และความหนาของฟิล์ม HPMC E15LV (ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น) เท่ากับ 125.97 ± 17.28 ไมครอน และความหนาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ความเข้มข้น 10 % 20 % และ 30 % แสดงในตารางที่ 5 โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรทุกสูตรและฟิล์ม HPMC E15LV มีความหนาไม่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) อาจเนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงสามารถ แทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดี นอกจากนี้ยังมีการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณน้อย ซึ่งคล้ายคลึงกับ ผลการศึกษาของจิราวุธ ปทุมธนทรัพย์ (2553) ที่พบว่าความหนาของฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคัดแปรด้วยด่างในสภาวะที่มี แอลกอฮอล์ ในสภาวะที่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่างกัน 3 ชนิด คือ กลีเซอรอล ซอร์บิทอล และ PEG 400 ทุกระดับความ เข้มข้น คือ 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้งแห้ง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และคล้ายกับ ผลการศึกษาของปานทิพย์ บุญส่ง (2548) ที่พบว่าชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นไม่มีผลต่อความหนา ของฟิล์มจากแป้งข้าวเจ้า โดยความหนาของฟิล์มขึ้นอยู่กับน้ำหนักของแป้งแห้งที่เตรียมเป็นฟิล์ม (Moller, Yamashita and Laurindo, 2008)

ตารางที่ 5 ความหนาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรและแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่ใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณ ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ความหนา (ไมครอน)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
กลีเซอรอล	134.30 ± 13.24	133.87 ± 17.56	139.60 ± 19.30
ซอร์บิทอล	133.30 ± 17.80	139.03 ± 15.29	139.73 ± 15.46

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

3.3 ความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปร

ผลการศึกษาความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอล เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปร เท่ากับ 48.33 ± 1.44 MPa และค่าความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์ม HPMC E15LV เท่ากับ 51.79 ± 4.62 MPa โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรและฟิล์ม HPMC E15LV มีความสามารถในการต้านทานแรงเฉาไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) นอกจากนี้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉายังขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมซอร์บิทอลมีความสามารถในการต้านทานแรงเฉาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq0.05$)

ตารางที่ 6 ความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

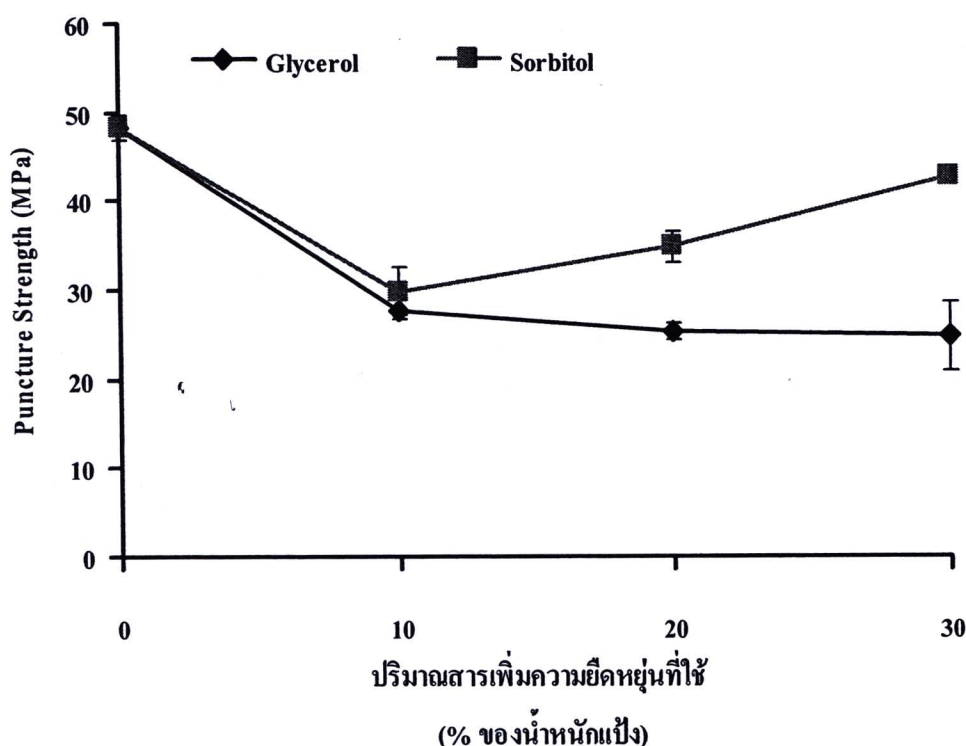
ชนิดสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ค่าความสามารถในการต้านแรงเฉา (MPa)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10 %	20 %	30 %
กลีเซอรอล	27.71 ± 1.04	25.26 ± 0.90	24.77 ± 3.94
ซอร์บิทอล	29.81 ± 2.70	34.88 ± 1.77	42.66 ± 0.48

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นทำให้ความสามารถในการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรลดลง เนื่องจากโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเข้าไปแทรกจับพันธะระหว่างสายโมเลกุลของแป้ง สอดคล้องกับการศึกษาของ Bangyekan และคณะ (2006) ที่พบว่าการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่ต่ำทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มที่ได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติลดลง โดยค่าการต้านแรงเฉาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 %, 20 % และ 30 % เท่ากับ 27.71 ± 1.04 MPa, 25.26 ± 0.90 MPa และ 24.77 ± 3.94 MPa ตามลำดับ (ตารางที่ 6) แสดงถึงความสามารถในการต้านแรงเฉามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลมีมีขนาดโมเลกุลเล็ก มีโครงสร้างสายสั้นและมีความชอบน้ำสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์ได้ดี (Cuq et al., 1997; Mali et al., 2008; Sothornvit and Krochta, 2001) ส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้นจึงใช้แรงในการทำให้ฟิล์มขาดน้อยลง คล้ายกับผลการศึกษาของ Yang และ Paulson (2000) ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณกลีเซอรอลในฟิล์มเจลเลนทำให้ความสามารถในการต้านแรงเฉาลดลง

ในขณะที่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 10 % มีค่าความสามารถในการต้านแรงเฉา เท่ากับ 29.81 ± 2.70 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับกลีเซอรอล แต่เมื่อเพิ่มปริมาณซอร์บิทอลเป็น 20 % และ 30 % ค่าความสามารถในการต้านแรงเฉา กลับเพิ่มสูงขึ้นเป็น 34.88 ± 1.77 MPa และ 42.66 ± 0.48 MPa ตามลำดับ (ตารางที่ 6) เนื่องจากขนาดโมเลกุล โครงสร้าง จำนวนหมู่ไฮดรอกซิล และการเข้ากัน ได้กับพอลิเมอร์มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารเพิ่มความ

ยืดหยุ่นและพอลิเมอร์ (Yang and Paulson, 2000) ซึ่งซอร์บิทอลเป็นของแข็งมีหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมากกว่ากลีเซอรอล (Mali et al., 2008) จึงน่าจะมีความเหมาะสมกับชนิดของแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่ใช้เป็นสารก่อฟิล์ม



ภาพที่ 14 ความสามารถในการต้านแรงเจาะของแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล (ภาพที่ 14) พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมซอร์บิทอลมีความสามารถในการต้านแรงเจาะมากกว่าแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นเดียวกัน เนื่องจากกลีเซอรอลมีโมเลกุลเล็กกว่า มีโครงสร้างสายสั้นสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์ได้มากกว่าและมีความชอบน้ำมากกว่า สามารถดูดความชื้นได้มากกว่าทำให้มีความยืดหยุ่นมากกว่าซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นเดียวกัน (Cuq et al., 1997; Mali et al., 2008; Sothornvit and Krochta, 2001) จึงสามารถต้านแรงเจาะได้น้อยกว่า โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีค่าการต้านทานแรงเจาะสูงที่สุด แต่น้อยกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์ม HPMC E15LV สอดคล้องกับการศึกษาของจิราวุธ ปทุมธนทรัพย์ (2553) ที่พบว่าฟิล์มแป้งข้าวเหนียวคั่วแปรรูปด้วยด่างในแอลกอฮอล์ที่เติมซอร์บิทอลมีความสามารถในการต้านทานแรงเจาะมากกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอล

3.4 ความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูป

ผลการศึกษาความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอล เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักรีด เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียว

ดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่าความสามารถในการยึดตัวของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร เท่ากับ $17.88 \pm 0.18 \%$ และความสามารถในการยึดตัวของฟิล์ม HPMC E15LV เท่ากับ $12.84 \pm 1.15 \%$

และความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรและฟิล์ม HPMC E15LV มีค่าความสามารถในการยึด เท่ากับ $17.88 \pm 0.18 \%$ และ $12.84 \pm 1.15 \%$ ตามลำดับ โดยเมื่อเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล 10 % ของน้ำหนักแป้ง พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรมีความสามารถในการยึดของลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น (ตารางที่ 7) เนื่องจากการเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่ต่ำมีการแทรกตัวของสารเพิ่มความยืดหยุ่น ไม่เป็นเนื้อเดียวกับแป้ง ทำให้ความสามารถในการยึดจับทางพันธะกับโมเลกุลของแป้งลดลง และความสามารถในการยึดของฟิล์มจึงน้อยลง (จิราวุธ ปทุมธนทรัพย์, 2553) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mali และคณะ (2008) ที่พบว่าการใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลในปริมาณที่ต่ำ ($\leq 15 \text{ g} / 100 \text{ g starch}$) ไม่ทำให้ความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น

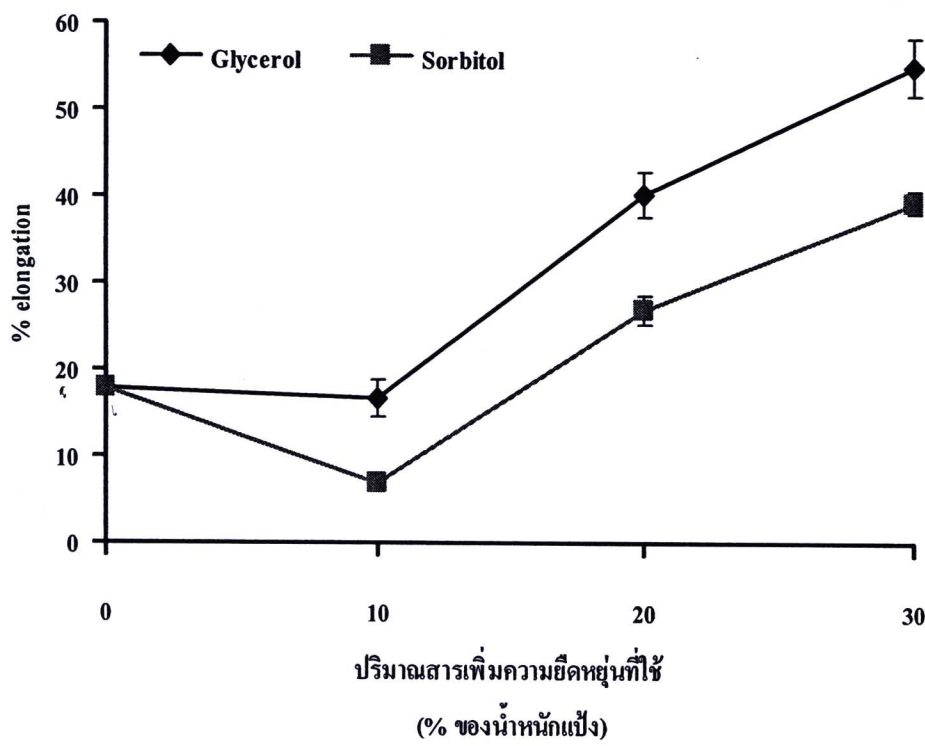
ตารางที่ 7 ความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์ม HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ค่าความสามารถในการยึด (%)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10	20	30
กลีเซอรอล	16.73 ± 2.18	40.18 ± 2.61	55.02 ± 3.29
ซอร์บิทอล	6.82 ± 0.30	26.90 ± 1.55	39.34 ± 1.31

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณ 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง ทำให้ความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bourtoom (2008) ที่พบว่า การเพิ่มปริมาณของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ระดับความเข้มข้น 20 % - 60 % ของน้ำหนักแป้งแห้ง ทำให้ฟิล์มแป้งข้าวเจ้า - ไคโตซาน มีความสามารถในการยึดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารเพิ่มความยืดหยุ่นทั้งสองชนิดมีขนาดโมเลกุลเล็กจึงแทรกจับกับโมเลกุลของแป้งถั่วเขียวดัดแปร ได้ดีทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการยึดเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ใช้กลีเซอรอล 20 % และ 30 % มีค่าความสามารถในการยึด $40.18 \pm 2.61 \%$ และ $55.02 \pm 3.29 \%$ ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ใช้ซอร์บิทอลในปริมาณ 20 % และ 30 % มีค่าความสามารถในการยึด $26.90 \pm 1.55 \%$ และ $39.34 \pm 1.31 \%$ ตามลำดับ (ตารางที่ 7) เนื่องจากกลีเซอรอลมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า มีโครงสร้างสายสั้นกว่า จึงแทรกเข้าไปในโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์ได้มากกว่า มีความชอบน้ำมากกว่าและดูดความชื้นได้มากกว่า ทำให้มีความยืดหยุ่นมากกว่าซอร์บิทอล (Cuq et al., 1997; Mali et al., 2008; Sothornvit and Krochta, 2001) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sothornvit และ Krochta (2001) ที่พบว่าความสามารถในการยึดของฟิล์มลดลง

สัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น โดยฟิล์ม B - lactoglobulin ที่เติมกลีเซอรอลซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่ามีความสามารถในการยึดของฟิล์มสูงกว่าซอร์บิทอล



ภาพที่ 15 ความสามารถในการยึดของแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น ในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

นอกจากนี้ความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลมีค่าสูงกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ใช้ซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นเท่ากัน (ภาพที่ 15) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sothornvit และ Krochta (2001); Bourtoom (2008b) และ Mali และคณะ (2008) ที่พบว่าความสามารถในการยึดของฟิล์มที่ใช้กลีเซอรอลมีค่าสูงกว่าฟิล์มที่ใช้ซอร์บิทอลที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากันและสัมพันธ์กับความสามารถในการต้านทานแรงเจาะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลในปริมาณ 20 % และ 30 % มีค่าความสามารถในการต้านแรงเจาะน้อยกว่าแผ่นฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ใช้ซอร์บิทอลในปริมาณ 20 % และ 30 % ตามลำดับ

3.5 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปร

ผลการศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ที่ความเข้มข้น 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และHPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น (ตารางที่ 8) พบว่าคุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปร เท่ากับ $0.151 \pm 0.004 \text{ g.mm/m}^2.\text{day.kPa}$ และค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม HPMC E15LV เท่ากับ $0.184 \pm 0.005 \text{ g.mm/m}^2.\text{day.kPa}$

การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น ซึ่งฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 %, 20 % และ 30 % มีค่าการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ 0.187 ± 0.005 , 0.267 ± 0.011 และ 0.349 ± 0.027 g.mm/m².day.kPa ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น คือ 0.151 ± 0.004 g.mm/m².day.kPa เนื่องจากเมื่อกลีเซอรอลมีปริมาณความเข้มข้นสูงขึ้นจะรวมกลุ่มและแทรกเข้าไปในโครงสร้างพอลิเมอร์ของฟิล์มทำให้ความหนาแน่นของฟิล์มลดลง เนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างโครงร่างตาข่ายของสายพอลิเมอร์ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำ การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น (Bourtoom, 2008b อ้างจาก Gennadios et al., 1993 และ Lieberman and Gilbert, 1973; Yang and Paulson, 2000) สอดคล้องกับการศึกษาของ Mali และคณะ (2004), Bangyekan และคณะ (2006) และ Lopez และคณะ (2008) ที่พบว่าปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในฟิล์มแป้งมันมือเสือ ฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เคลือบด้วยไคโตซาน และแป้งข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี ทำให้คุณสมบัติการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้น

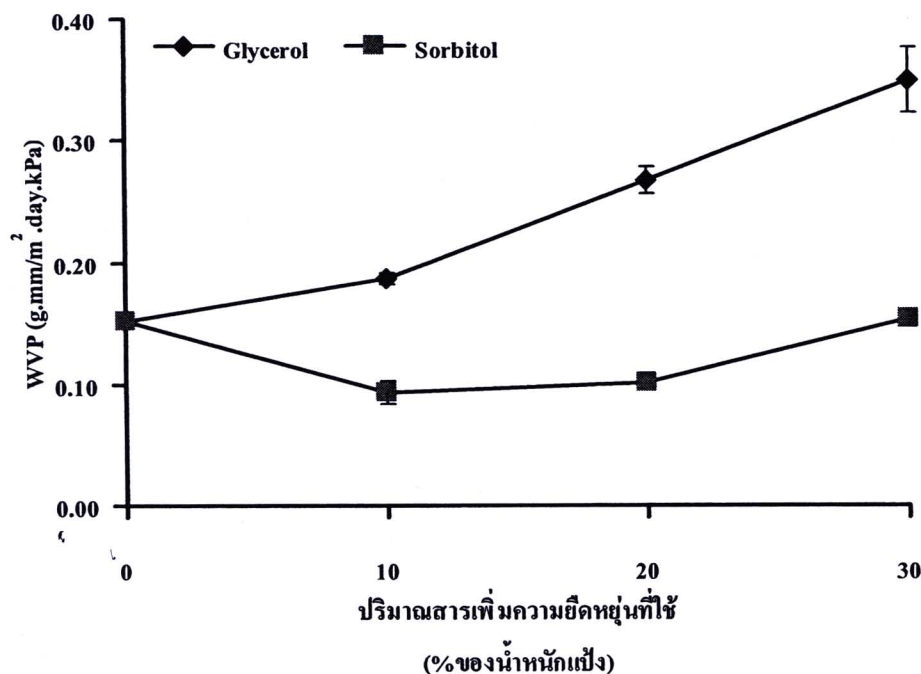
ตารางที่ 8 การซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล 10 %, 20 % และ 30 % ของน้ำหนักแป้ง เปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และ HPMC E15LV ที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น

ชนิดของสารเพิ่มความยืดหยุ่น	ค่าการซึมผ่านไอน้ำ (g.mm/m ² .day.kPa)		
	ปริมาณสารเพิ่มความยืดหยุ่น (% ของน้ำหนักแป้ง)		
	10 %	20 %	30 %
กลีเซอรอล	0.187 ± 0.005	0.267 ± 0.011	0.349 ± 0.027
ซอร์บิทอล	0.093 ± 0.010	0.101 ± 0.005	0.153 ± 0.005

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

ส่วนการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอลปริมาณ 10 %, 20 %, และ 30 % มีค่าเท่ากับ 0.093 ± 0.010 , 0.101 ± 0.005 และ 0.153 ± 0.005 g.mm/m².day.kPa ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล อาจเกิดจากการที่ซอร์บิทอลมีหมู่ไฮดรอกซิลมากแต่มีการดูดซับน้ำน้อยกว่ากลีเซอรอล (Mali et al., 2008 อ้างจาก Leung, 1986) นอกจากนี้ยังมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารเพิ่มความยืดหยุ่นและพอลิเมอร์มากกว่า (Mali et al., 2008; Yang and Paulson, 2000) จึงเกิดช่องว่างระหว่างโครงร่างตาข่ายของสายพอลิเมอร์น้อยทำให้มีการดูดซับโมเลกุลของน้ำและการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มต่ำ แต่อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของซอร์บิทอลที่มากขึ้นก็ทำให้ค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Bourtoom (2008b) ที่พบว่าฟิล์มข้าวเจ้า - ไคโตซานมีค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มสูงขึ้นจาก 5.45 g.mm/m².day.kPa ถึง 8.68 g.mm/m².day.kPa เมื่อปริมาณของซอร์บิทอลเพิ่มขึ้นจาก 20 % - 60 %

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอลและที่เติมซอร์บิทอล พบว่ากลีเซอรอลทำให้ฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วมีค่าการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มสูงกว่าซอร์บิทอลทุกระดับความเข้มข้น (ภาพที่ 16) คล้ายคลึงกับการศึกษาของ Bourtoom (2008b) ที่พบว่าฟิล์มแป้งข้าวเจ้า - ไคโตซานที่เติมกลีเซอรอลมีค่าการซึมผ่านไอน้ำสูงกว่าฟิล์มที่เติมซอร์บิทอล เนื่องจากกลีเซอรอลมีความชอบน้ำมากกว่าจึงมีการดูดซับโมเลกุลของน้ำได้ดีกว่า ซึ่งทำให้มีการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มเพิ่มขึ้นสูงกว่า (Bourtoom, 2008b อ้างจาก Gennadios et al., 1993)

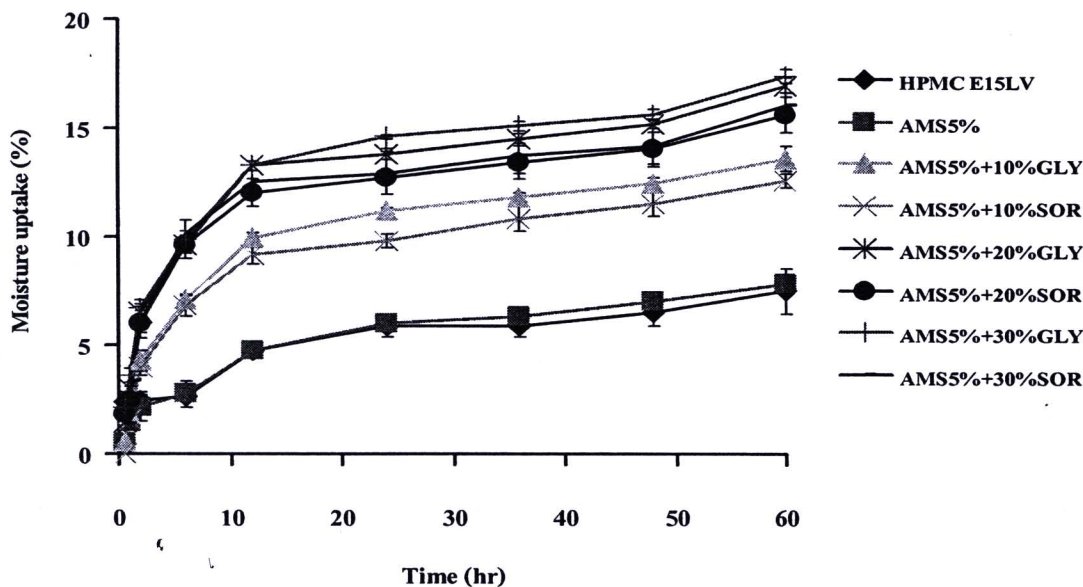


ภาพที่ 16 การซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

3.6 การดูความชื้นของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาพบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและที่เติมซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน และฟิล์ม HPMC E15LV มีการดูความชื้นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและฟิล์ม HPMC E15LV มีค่าการดูความชื้นใกล้เคียงกัน ซึ่งการเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลทำให้การดูความชื้นของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรเพิ่มสูงขึ้น โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลมีค่าการดูความชื้นมากกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมซอร์บิทอลที่ความเข้มข้นเดียวกัน ซึ่งผลการศึกษาการดูความชื้นของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน และฟิล์ม HPMC E15LV แสดงในภาพที่ 17

เนื่องจากการดูความชื้นของฟิล์มจากแป้งมีความสัมพันธ์กับขนาดโมเลกุลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ใช้ โดยกลีเซอรอลมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าซอร์บิทอล มีการดูความชื้นมากกว่าซอร์บิทอล (Mali et al., 2008; Mathew and Dufresne, 2002; Sothornvit and Křochta, 2001) กลีเซอรอลมีคุณสมบัติในการดูความชื้นมากกว่าซอร์บิทอล และพบว่าความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่สูงขึ้นทำให้การดูความชื้นของฟิล์มเพิ่มมากขึ้นทั้งฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ใช้กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mali และคณะ (2008) ที่พบว่าค่าการดูความชื้นของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเพิ่มขึ้น และฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมกลีเซอรอลมีการดูความชื้นมากกว่าฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เติมซอร์บิทอล

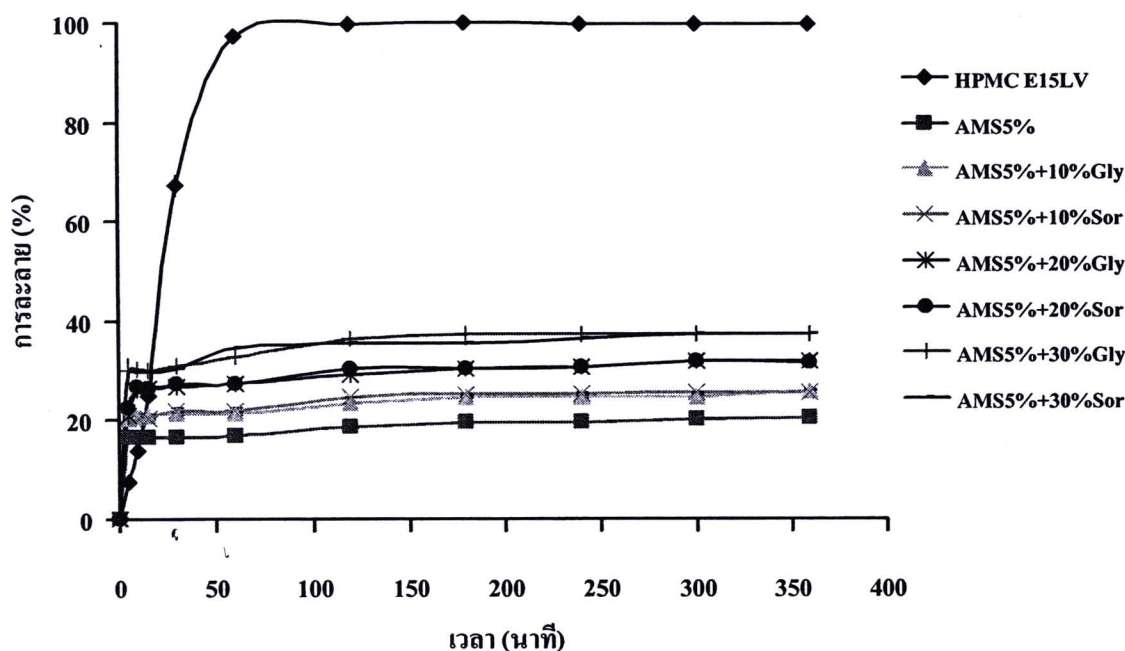


ภาพที่ 17 การดูดความชื้นของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน และฟิล์ม HPMC E15L แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

3.7 การละลายของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาการละลายในน้ำกลั่นของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและที่เติมซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน และฟิล์ม HPMC E15LV พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

และพบว่าฟิล์ม HPMC E15LV มีการละลายสูง สามารถละลายหมดเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาที ในขณะที่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรฯ มีการละลายค่อนข้างต่ำ การเติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล ซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำมีคุณสมบัติดูดความชื้น (Mathew and Dufresne, 2002) จึงทำให้ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรมีความสามารถละลายในน้ำได้ดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น โดยฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมและเติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นมีการละลายที่สูงใน 5 นาทีแรก หลังจากนั้นมีการละลายน้อยลงมาก นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมีการละลายที่เวลาเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทุกระดับความเข้มข้น (ภาพที่ 18) ซึ่งการใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นที่มีความชอบน้ำในความเข้มข้นสูงขึ้นช่วยเพิ่มคุณสมบัติการละลายให้มากขึ้น ทำให้การละลายในน้ำของฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น (Bourtoom, 2008b) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Müller และคณะ (2008) ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลทำให้การละลายของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น และการศึกษาของ Bourtoom (2008b) ที่พบว่าฟิล์มข้าวเจ้า - โคลโคซานที่เติมกลีเซอรอลซอร์บิทอล และโพลีเอทิลีน ไกลคอล (PEG) 20 % - 60 % มีการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารเพิ่มความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มแป้งข้าวเจ้า - โคลโคซานที่เติมซอร์บิทอลมีการละลายมากกว่าฟิล์มที่เติม PEG และกลีเซอรอลตามลำดับ



ภาพที่ 18 การละลายของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน และฟิล์ม HPMC E15LV แต่ค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

3.8 การต้านการซึมผ่านน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาต้านการซึมผ่านน้ำของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 51.67 ± 7.64 นาที น้ำสามารถซึมผ่านฟิล์ม HPMC E15LV ได้ จึงไม่มีคุณสมบัติในการต้านการซึมผ่านของน้ำ แต่น้ำไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกันได้ เนื่องจากฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรจะดูดซับน้ำและมีการพองตัวเกิดขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรมีการละลายน้ำค่อนข้างต่ำแป้งจึงละลายน้ำออกมาน้อย ทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านฟิล์มไปได้ แตกต่างจากฟิล์ม HPMC E15LV ที่มีการละลายสูง ฟิล์มจึงมีการละลายออกไปเมื่อสัมผัสกับน้ำ ทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้

3.9 การต้านการซึมผ่านน้ำมันของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

ผลการศึกษาต้านการซึมผ่านน้ำมันของฟิล์มพบว่าทั้งฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และฟิล์ม HPMC E15LV น้ำมันไม่สามารถซึมผ่านได้ เนื่องจากก่อนฟิล์มดังกล่าวมีความชอบน้ำเมื่อเตรียมเป็นฟิล์มจึงมีความสามารถต้านการซึมผ่านของน้ำมันได้

3.10 การคัดเลือกฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรเพื่อนำไปเคลือบกระดาษ

ผลการให้คะแนนฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอล (แสดงในตารางที่ 9) เมื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรแล้วให้คะแนนคุณสมบัติที่สำคัญและเหมาะสมเพื่อทำการคัดเลือกฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลอย่างละ 1 ความเข้มข้นในการนำไปใช้เคลือบกระดาษ ซึ่งพบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % มีค่าคะแนนโดยรวมสูงที่สุด แต่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมซอร์บิทอลมี

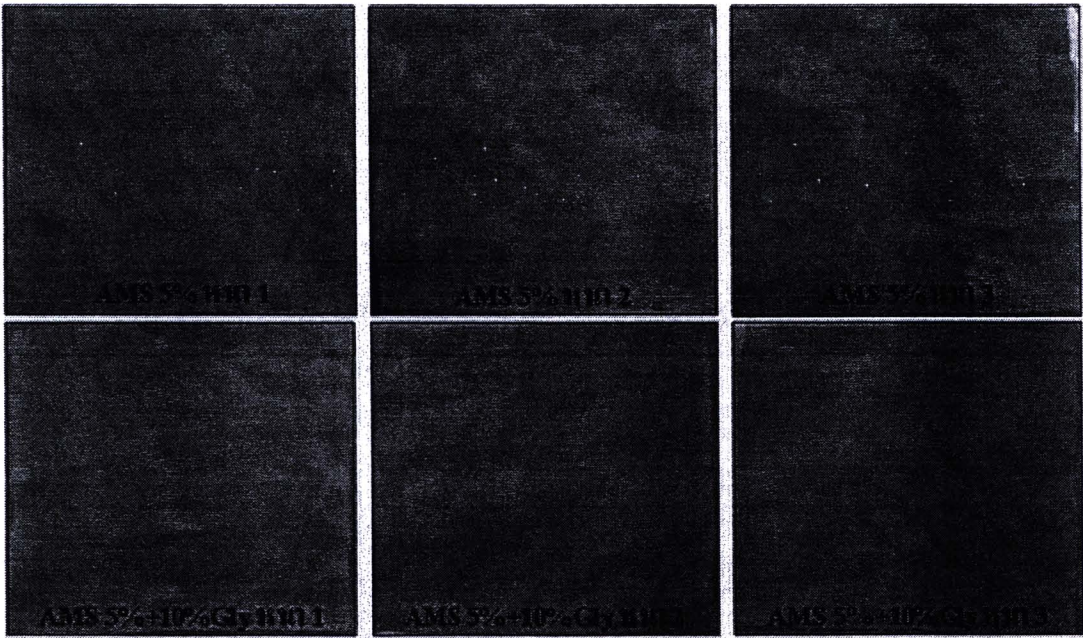
คะแนนเท่ากันทั้ง 3 ความเข้มข้น จึงพิจารณาจากคุณสมบัติที่สำคัญอันดับแรกคือการต้านแรงเจาะ พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีคะแนนสูงที่สุดนอกจากนี้ความสามารถในการยึดของฟิล์มก็มีคะแนนสูงที่สุดด้วย ดังนั้นจึงคัดเลือกฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และที่เติมซอร์บิทอล 30 % เพื่อนำไปใช้เคลือบกระดาษ โดยเปรียบเทียบกับกระดาษเคลือบแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นและกระดาษเคลือบพลาสติกที่ใช้ห่ออาหารที่มีจำหน่ายในท้องตลาดต่อไป

ตารางที่ 9 การให้คะแนนเพื่อคัดเลือกฟิล์มจากแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอลและซอร์บิทอลอย่างละ 1 ความเข้มข้น เพื่อนำไปใช้เคลือบกระดาษ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวดัดแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

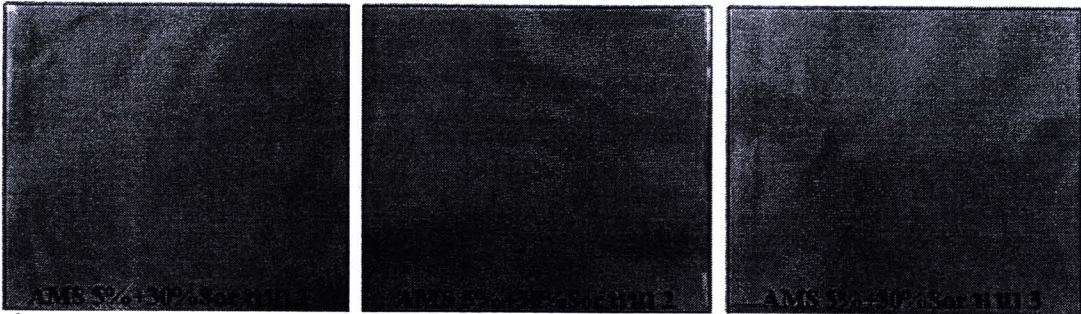
ฟิล์ม	PS	คะแนน	E (%)	คะแนน	WVP	คะแนน	ละลาย	คะแนน	รวม
AMS 5 %+10 % Gly	27.71	3	16.73	1	0.187	3	21.31	3	10
AMS 5 %+20 % Gly ^f	25.26	2	40.18	2	0.267	2	27.27	2	8
AMS 5 %+30 % Gly	24.77	1	55.02	3	0.349	1	32.76	1	6
AMS 5 %+10 % Sor	29.81	1	6.82	1	0.093	3	22.03	3	8
AMS 5 %+20 % Sor	34.88	2	26.90	2	0.101	2	27.36	2	8
AMS 5 %+30 % Sor	42.66	3	39.34	3	0.153	1	34.55	1	8

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

4. ผลของสารเพิ่มความยืดหยุ่นต่อคุณสมบัติของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร
ลักษณะของกระดาษเคลือบฟิล์มจากแป้งถั่วเขียวดัดแปรแสดงในภาพที่ 19 และ 20



ภาพที่ 19 ลักษณะกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ



ภาพที่ 20 ลักษณะของกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ

4.1 ความหนาของกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว

ผลการศึกษาความหนาของกระดาศพบว่าความหนากระดาศก่อนเคลือบ เท่ากับ 53.33 ± 3.39 ไมครอน ความหนากระดาศเคลือบพลาสติก เท่ากับ 64.00 ± 3.94 ไมครอน และความหนาของกระดาศเมื่อเคลือบด้วยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว แสดงในตารางที่ 10

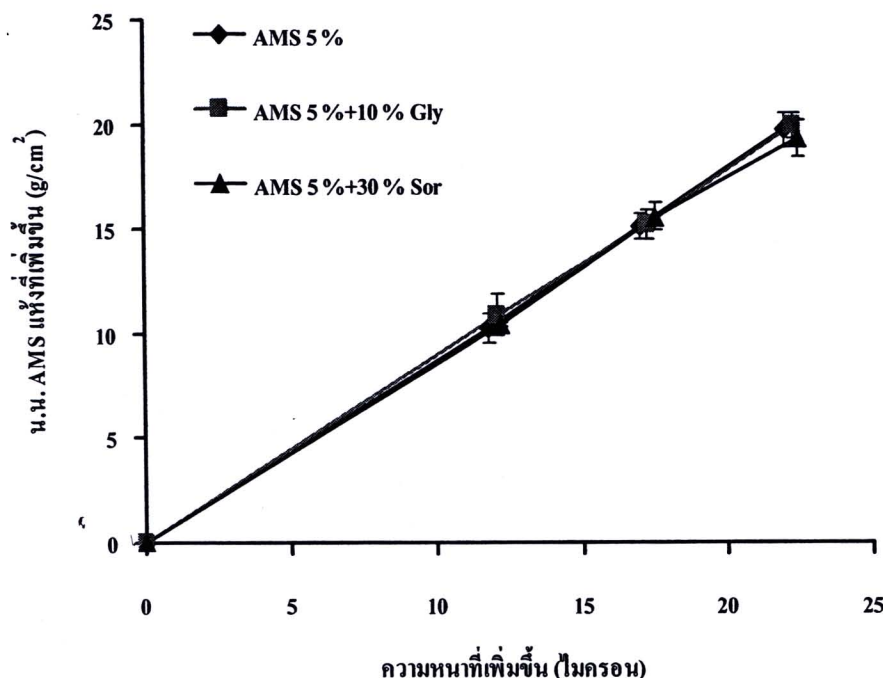
ตารางที่ 10 ความหนาของกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่ว, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

ชนิดของกระดาศ	ความหนาของกระดาศเคลือบ (ไมครอน)		
กระดาศเคลือบฟิล์ม AMS	65.10 ± 4.75	70.37 ± 6.42	75.33 ± 6.15
กระดาศเคลือบฟิล์ม AMS+10 % Gly	65.43 ± 4.35	70.57 ± 5.02	75.63 ± 5.55
กระดาศเคลือบฟิล์ม AMS+30 % Sor	65.53 ± 5.01	70.90 ± 5.09	75.80 ± 6.49

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การเคลือบกระดาศด้วยแป้งถั่วเขียวคั่วทำให้กระดาศมีความหนาเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 21) เนื่องจากสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วที่ใช้เคลือบบนกระดาศเมื่อแห้งจะมีลักษณะเป็นฟิล์มเคลือบปิดช่องรูพรุนของกระดาศ ซึ่งสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วที่เมื่อนำไปอบจนแห้งทำให้เหลือปริมาณของแป้งถั่วเขียวคั่วที่เป็นของแข็งเคลือบอยู่บนกระดาศนอกจากทำให้กระดาศมีความหนาเพิ่มขึ้นแล้ว การใช้ปริมาณสารกระจายตัวในการเคลือบที่มากขึ้นปริมาณของแข็งในสารกระจายตัวก็เพิ่มมากขึ้นด้วย และเมื่อนำไปอบจนแห้งจึงทำให้เหลือปริมาณของแข็งต่อพื้นที่มากขึ้นส่งผลให้กระดาศมีความหนาเพิ่มขึ้น

คล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Rhim, Lee และ Hong (2006) ที่พบว่าการเคลือบกระดาศแข็งด้วย alginate และ soy protein isolate ทำให้กระดาศแข็งมีความหนาเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาของ Gastaldi และคณะ (2007) ที่พบว่าผลของการเคลือบกระดาศด้วย wheat gluten ทำให้ความหนาของกระดาศเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งที่อยู่บนผิวกระดาศ นอกจากนี้ Guillaume, Pinte, Gontard และ Gastaldi (2010) ยังศึกษาการเคลือบ wheat gluten บนกระดาศที่ผ่านการเคลือบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) และแป้ง (starch) กับกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลือบพบว่า การเคลือบด้วย wheat gluten ทำให้กระดาศทั้ง 2 ชนิดมีความหนาเพิ่มขึ้น



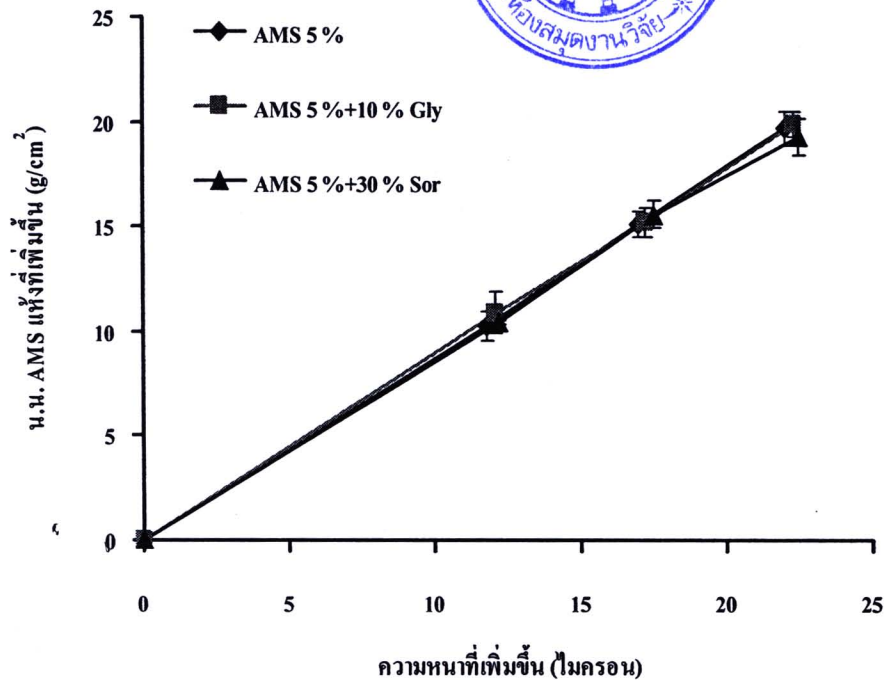
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระดาษเคลือบแป้งถั่วเขียวคั่วที่เพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของแป้งถั่วเขียวคั่วที่เคลือบกระดาษเพิ่มขึ้น (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่ว, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

อย่างไรก็ตามนอกจากปริมาณสารที่ใช้แล้ว ความเข้มข้นและชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เคลือบก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของกระดาษ (Rhim et al., 2006; Gastaldi et al., 2007)

4.2 ความสามารถในการต้านทานการเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว

ผลการศึกษาพบว่าค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษที่ไม่เคลือบ เท่ากับ 7.16 ± 0.14 Mpa และค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษที่เคลือบด้วยพลาสติก เท่ากับ 7.86 ± 0.17 Mpa โดยค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแสดงในตารางที่ 11

กระดาษที่ไม่เคลือบมีความสามารถในการต้านทานการเจาะแตกต่างจากกระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกและกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือกระดาษเคลือบด้วยพลาสติกมีความสามารถในการต้านทานการเจาะมากกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ แต่กระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกมีความสามารถในการต้านทานการเจาะใกล้เคียงกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ความหนา 65 ไมครอน สำหรับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ความหนาระดับเดียวกันพบว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วมีความสามารถในการต้านทานการเจาะมากกว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ตามลำดับ (ภาพที่ 22) ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการต้านทานการเจาะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่พบว่าแรงต้านทานการเจาะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วมีค่าสูงกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % และฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ตามลำดับ



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระดาษเคลือบแป้งถั่วเขียวคั่วที่เพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักของแป้งถั่วเขียวคั่วที่เคลือบกระดาษเพิ่มขึ้น (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่ว, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

อย่างไรก็ตามนอกจากปริมาณสารที่ใช้แล้ว ความเข้มข้นและชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้เคลือบก็เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความหนาของกระดาษ (Rhim et al., 2006; Gastaldi et al., 2007)

4.2 ความสามารถในการต้านทานการเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว

ผลการศึกษาพบว่าค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษที่ไม่เคลือบ เท่ากับ 7.16 ± 0.14 Mpa และค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษที่เคลือบด้วยพลาสติก เท่ากับ 7.86 ± 0.17 Mpa โดยค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแสดงในตารางที่ 11

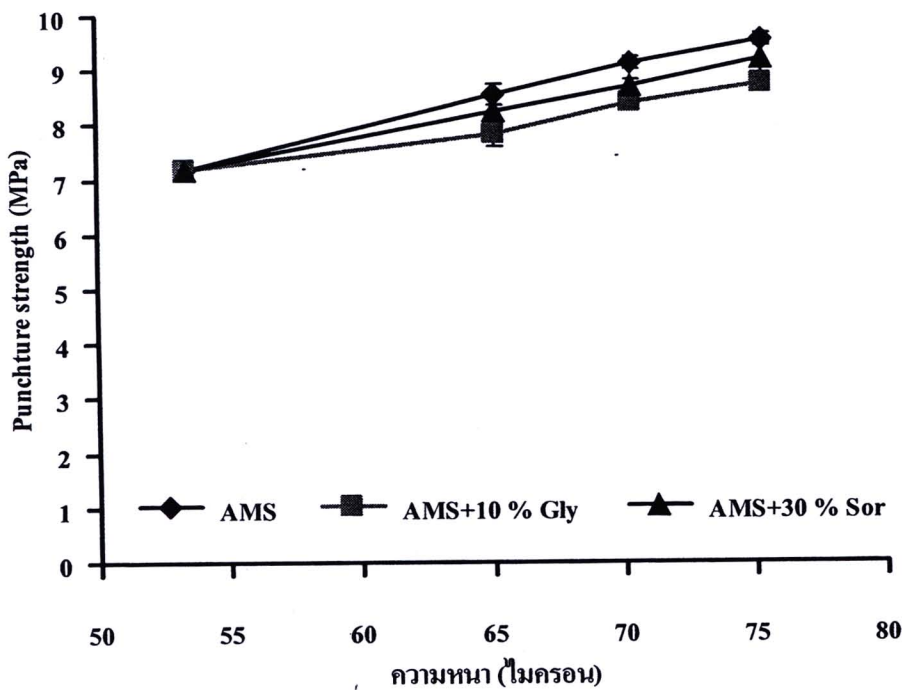
กระดาษที่ไม่เคลือบมีความสามารถในการต้านทานการเจาะแตกต่างจากกระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกและกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือกระดาษเคลือบด้วยพลาสติกมีความสามารถในการต้านทานการเจาะมากกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ แต่กระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกมีความสามารถในการต้านทานการเจาะใกล้เคียงกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ความหนา 65 ไมครอน สำหรับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่ความหนาระดับเดียวกันพบว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วมีความสามารถในการต้านทานการเจาะมากกว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ตามลำดับ (ภาพที่ 22) ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการต้านทานการเจาะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นที่พบว่าแรงต้านทานการเจาะของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว มีค่าสูงกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % และฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ตามลำดับ

ตารางที่ 11 ค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

ชนิดของกระดาษ	ค่าการต้านทานแรงเจาะของกระดาษเคลือบ (MPa)		
	ความหนา 65 μm	ความหนา 70 μm	ความหนา 75 μm
กระดาษเคลือบ AMS	8.56 $\pm$ 0.19	9.12 $\pm$ 0.12	9.54 $\pm$ 0.13
กระดาษเคลือบ AMS+10 % Gly	7.82 $\pm$ 0.22	8.39 $\pm$ 0.16	8.74 $\pm$ 0.03
กระดาษเคลือบ AMS+30 % Sor	8.24 $\pm$ 0.36	8.68 $\pm$ 0.12	9.19 $\pm$ 0.26

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การที่ความสามารถในการต้านทานการเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรสูงกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ เนื่องจากการเคลือบกระดาษสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรเมื่อแห้งจะเป็นฟิล์มปิดรูพรุนของกระดาษซึ่งเป็นโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลส ปริมาณของแข็งที่เคลือบบนกระดาษและการเพิ่มความหนาของการเคลือบฟิล์มทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Morsy and Sherbiny, 2004)



ภาพที่ 22 การต้านแรงเจาะของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การเพิ่มปริมาณสารกระจายตัวที่ใช้เคลือบทำให้ปริมาณของแป้งถั่วเขียวคั่วที่เคลือบบนกระดาษเพิ่มขึ้นส่งผลให้กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วมีความหนาและความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นทุกสภาวะ โดยกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วและกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % ความหนา 65 ไมครอน มีค่าการต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าที่ความหนา 70 และ 75 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนา 65 และ 70 ไมครอน มีค่าการต้านทานแรงเฉือนน้อยกว่าความหนาระดับ 75 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Park และคณะ (2000) ที่พบว่า isolated soy protein การเคลือบกระดาษทำให้กระดาษมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และคล้ายคลึงกับ Morsy และ Sherbiny (2004) ที่ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษโดยใช้เคลย์ (clay) และ ground calcium carbonate (GCC) ต่อคุณสมบัติเชิงกลของกระดาษโดยพบว่าการเพิ่มปริมาณของแป้งที่เคลือบบนกระดาษและการเพิ่มความหนาของการเคลือบฟิล์มทำให้ความแข็งแรงของกระดาษเพิ่มสูงขึ้น

นอกจากนี้ยังคล้ายคลึงกับ Fernandes, Freire, Silvestre, Neto และ Gandini (2010) ที่ศึกษากระดาษเคลือบด้วยไคโตซานและ water soluble chitosan quaternary derivative (WSCH) โดยทำการเคลือบกระดาษแตกต่างกัน 1 - 5 ชั้น พบว่าทั้งการเพิ่มปริมาณสารที่ใช้เคลือบและจำนวนชั้นของการเคลือบที่เพิ่มขึ้นทำให้กระดาษเคลือบไคโตซานและกระดาษเคลือบ WSCH แข็งแรงขึ้น

อย่างไรก็ดีการที่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วเคลือบอยู่บนกระดาษซึ่งมีโครงสร้างเป็นเส้นใยเซลลูโลสที่มีความแข็งแรงแต่น้อยกว่าแป้งถั่วเขียวคั่ว นอกจากนี้นี้ยังมีแรงยึดเกาะระหว่าง 2 พันธะ คือ แป้งถั่วเขียวคั่วและเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ และยังมีความหนาน้อยกว่าฟิล์ม อาจทำให้ความสามารถในการต้านทานการเฉือนของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วต่ำกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว

4.3 ความสามารถในการยึดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่ว

ผลการศึกษาพบว่าค่าความสามารถในการยึดของกระดาษที่ไม่เคลือบและกระดาษที่เคลือบด้วยฟิล์มพลาสติก เท่ากับ 1.37 ± 0.12 % และ 1.75 ± 0.12 % ตามลำดับ และค่าความสามารถในการยึดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแสดงในตารางที่ 12

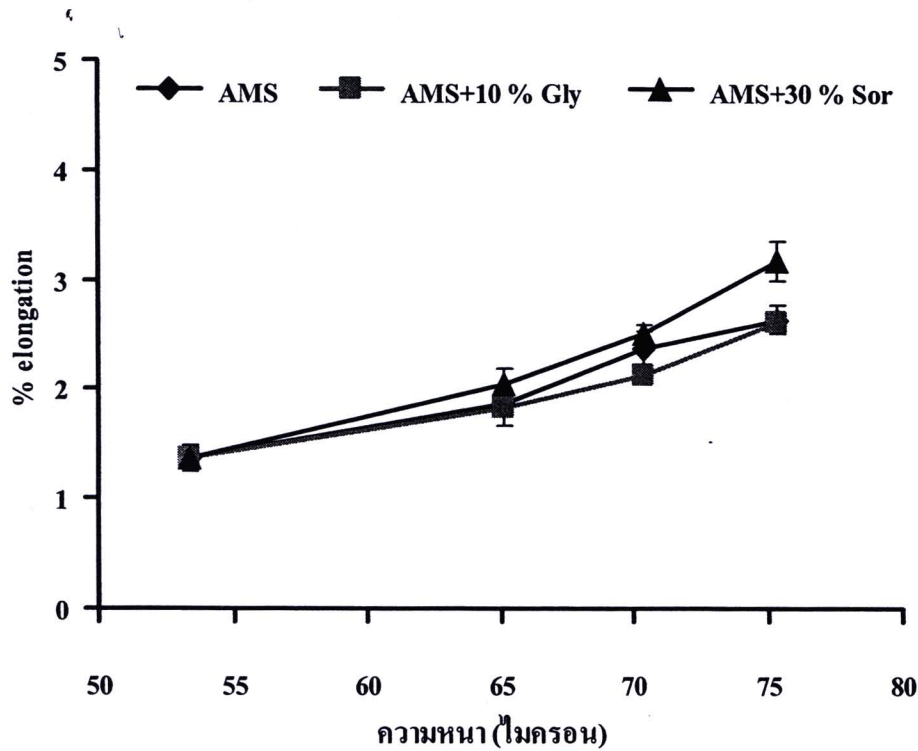
ตารางที่ 12 ความสามารถในการยึดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่ว, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

ชนิดของกระดาษเคลือบ	ความสามารถในการยึด (%)		
	ความหนา 65 μm	ความหนา 70 μm	ความหนา 75 μm
กระดาษเคลือบ AMS	1.87 ± 0.12	2.36 ± 0.17	2.64 ± 0.13
กระดาษเคลือบ AMS+10%Gly	1.82 ± 0.16	2.13 ± 0.07	2.62 ± 0.02
กระดาษเคลือบ AMS+30%Sor	2.04 ± 0.15	2.52 ± 0.07	3.18 ± 0.18

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

โดยกระดาษที่ไม่เคลือบมีความสามารถในการยืดแตกต่างจากกระดาษที่เคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกและกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกมีความสามารถในการยืดมากกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ แต่กระดาษเคลือบด้วยฟิล์มพลาสติกมีความสามารถในการยืดใกล้เคียงกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % ที่ความหนา 65 ไมครอน

การเพิ่มระดับความหนาของการเคลือบกระดาษทำให้ความสามารถในการยืดเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 23) อาจเนื่องเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษมีลักษณะแข็ง ไม่ยืดหยุ่น (Fernandes et al., 2010). ซึ่งการเคลือบสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรจะเป็นฟิล์มเคลือบปิดรูพรุนซึ่งเป็นโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลส ส่งเสริมให้ความยืดหยุ่นระหว่างเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษเพิ่มขึ้น (Guillaume et al., 2010, Park et al., 2000; Rhim et al., 2006; Sothornvit, 2009; Fernandes et al., 2010) จึงทำให้ความสามารถในการยืดของกระดาษเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 23 ความสามารถในการยืดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่ระดับความหนา 65 ไมครอน และ 70 ไมครอน มีความสามารถในการยืดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร ที่เติมซอร์บิทอล 30 % ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) อาจเนื่องจากความหนาของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรทั้ง 2 ระดับ มีค่าใกล้เคียงกันทำให้ไม่มีผลต่อ

ความสามารถในการยึดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วทั้ง 3 ชนิด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Park และคณะ (2000) ที่พบว่ากระดาษเคลือบด้วย isolate soy protein ที่ระดับความหนาดังกันคือ 10.9 - 23.0 μm มีความสามารถในการยึดเท่ากับ 5.8 - 6.9 % ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ

สำหรับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนา 75 ไมครอน มีความสามารถในการยึดมากกว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อาจเนื่องจากความหนาของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เพิ่มขึ้นทำให้กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีความสามารถในการยึดสูงกว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % สอดคล้องกับความสามารถในการยึดของฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมและไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น ซึ่งฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีความสามารถในการยึดมากกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % และฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่ไม่มีสารเพิ่มความยืดหยุ่น

อย่างไรก็ตามการที่ฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วเคลือบอยู่บนกระดาษซึ่งเป็นโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสที่มีลักษณะแข็ง ไม่ยืดหยุ่น นอกจากนี้ยังมีแรงยึดเกาะระหว่าง 2 พันธะ คือ แป้งถั่วเขียวคั่วคั่วและเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ และมีความหนาน้อยกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว อาจทำให้ความสามารถในการยึดของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วต่ำกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว

4.4 การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว
ผลการศึกษาพบว่ากระดาษที่ไม่เคลือบมีการซึมผ่านไอน้ำเท่ากับ $0.239 \pm 0.002 \text{ g.mm/m}^2.\text{day.kPa}$ กระดาษเคลือบพลาสติก ไม่มีการซึมผ่านไอน้ำ และการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาดังกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วคั่ว, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

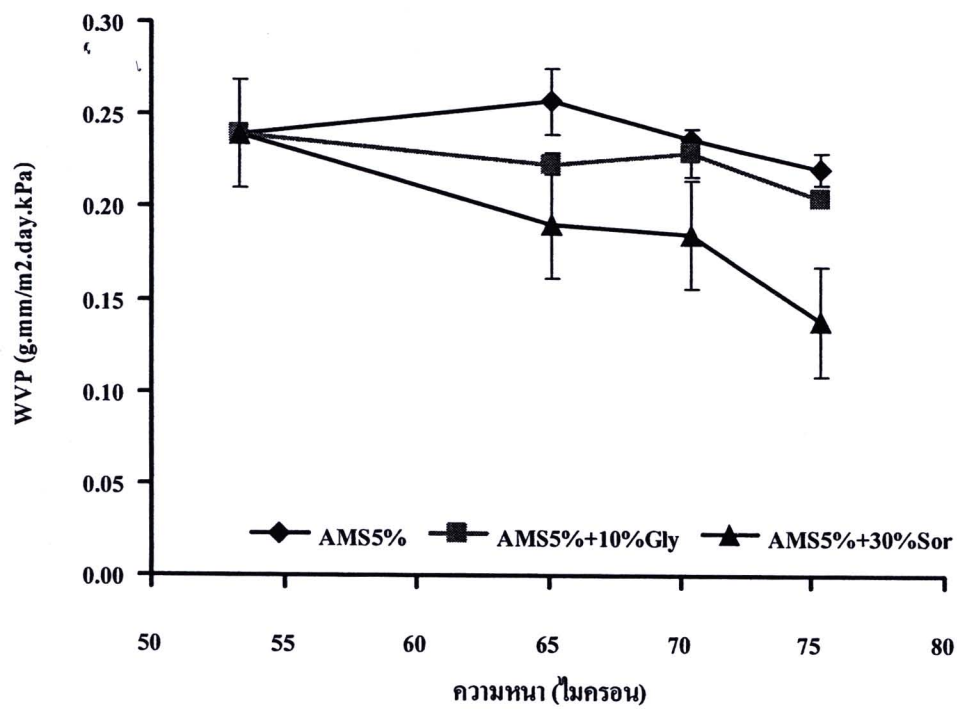
กระดาษ	ค่าการซึมผ่านไอน้ำ ($\text{g.mm/m}^2.\text{day.kPa}$)		
	ความหนา 65 μm	ความหนา 70 μm	ความหนา 75 μm
กระดาษเคลือบAMS	0.257 ± 0.018	0.237 ± 0.001	0.211 ± 0.009
กระดาษเคลือบAMS+10 % Gly	0.224 ± 0.006	0.230 ± 0.001	0.204 ± 0.003
กระดาษเคลือบAMS+30 % Sor	0.191 ± 0.029	0.185 ± 0.017	0.138 ± 0.015

แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วในแต่ละระดับความหนาพบว่ากระดาษไม่เคลือบฟิล์มมีการซึมผ่านไอน้ำไม่แตกต่างจากกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วและกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมกลีเซอรอล 10 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่แตกต่างจากกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่เติมซอร์บิทอล 30 % อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วที่ใช้เคลือบเป็น

ฟิล์มบนกระดาษ มีผิวเรียบและสามารถปิดรูพรุนทำให้ลดการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษได้ (Han and Krochta, 2001 อ้างจาก Han and Krochta, 1999) ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ Sothornvit (2009) ที่พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย HPMC และ HPMC - lipid มีการซึมผ่านไอน้ำลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ นอกจากนี้การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษด้านที่เคลือบและด้านที่ไม่เคลือบฟิล์ม ไม่มีความแตกต่างกัน เนื่องจากสารละลายที่ใช้เคลือบสามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างเซลล์ของกระดาษได้ ทำให้การเคลือบกระดาษเพียงด้านเดียวก็ทำให้มีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำได้

ค่าการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความหนาของการเคลือบเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนาต่างกัน 3 ระดับ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

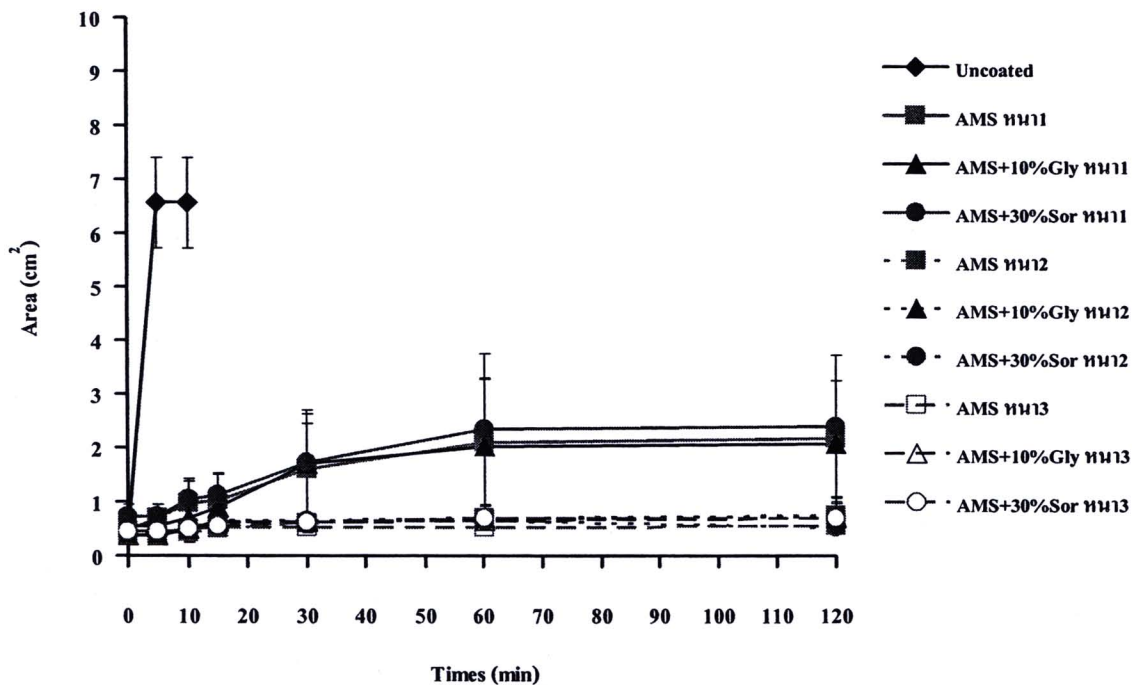
เนื่องจากการใช้ปริมาณสารกระจายตัวในการเคลือบมากกว่าทำให้มีปริมาณของแข็งบนผิวกระดาษมากกว่าเมื่อนำไปอบจนแห้งจึงเหลือปริมาณของแข็งต่อพื้นที่มากกว่าทำให้แทรกปิดรูพรุนของกระดาษได้ดีกว่า ผิวของกระดาษเคลือบจึงเรียบมากกว่า โดยคล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Han และ Krochta (2001) ที่ใช้ whey - protein ความเข้มข้น 10 % ปริมาณ 10.2 g/m² และ 17.9 g/m² เคลือบกระดาษ พบว่าผิวของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลาย whey - protein 17.9 g/m² มีความเรียบกว่าเป็นอย่างมาก ซึ่งปริมาณที่ใช้ไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำของ

กระดาษ เนื่องจากชนิดของไบโอพอลิเมอร์ การเตรียมและวิธีเคลือบต่างก็มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบเช่นกัน โดยวัสดุที่นำมาเคลือบเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบมากที่สุด (Rhim et al., 2006)

การเคลือบกระดาษด้วยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร ที่ความหนาระดับเดียวกันพบว่ากระดาษซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีค่าน้อยกว่ากระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาความสามารถในการซึมผ่านไอน้ำของแผ่นฟิล์มที่พบว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีค่าการซึมผ่านไอน้ำน้อยกว่าฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 %

4.5 การด้านการซึมผ่านน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร

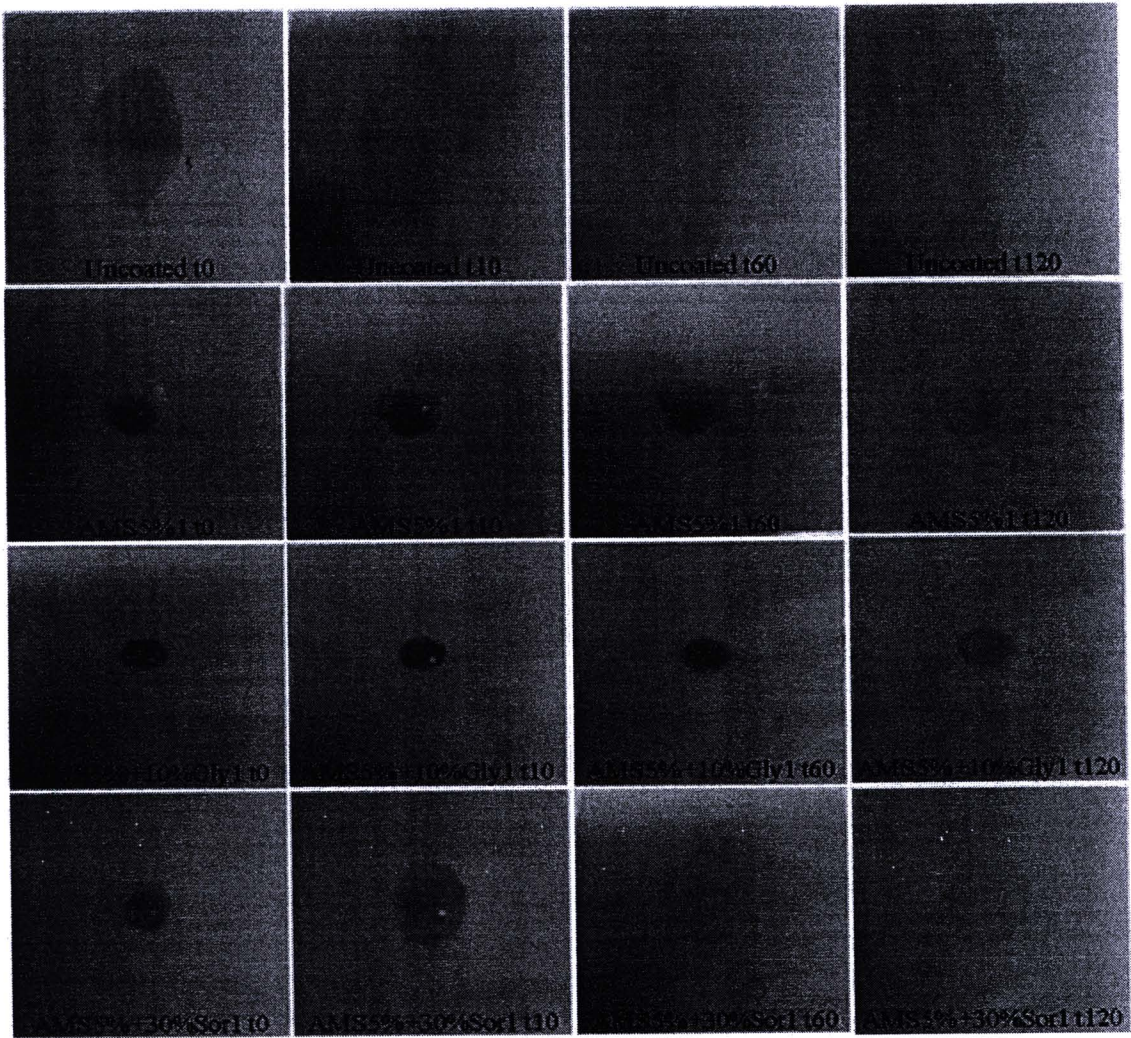
ผลการศึกษากการด้านการซึมผ่านน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร พบว่ากระดาษไม่เคลือบมีความสามารถในการด้านการซึมผ่านน้ำแตกต่างจากกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % (ภาพที่ 25) โดยมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษที่ไม่เคลือบแตกต่างกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรทุกสูตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกระดับความหนา (p≤0.05)



ความหนา 1, 2 และ 3 เท่ากับ 65, 70 และ 75 ไมครอน ตามลำดับ

ภาพที่ 25 พื้นที่การแพร่กระจายของน้ำบนกระดาษที่ไม่เคลือบ กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 1, 2 และ 3 (65, 70 และ 75 ไมครอน ตามลำดับ) และที่เวลา 0–120 นาที (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล) แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

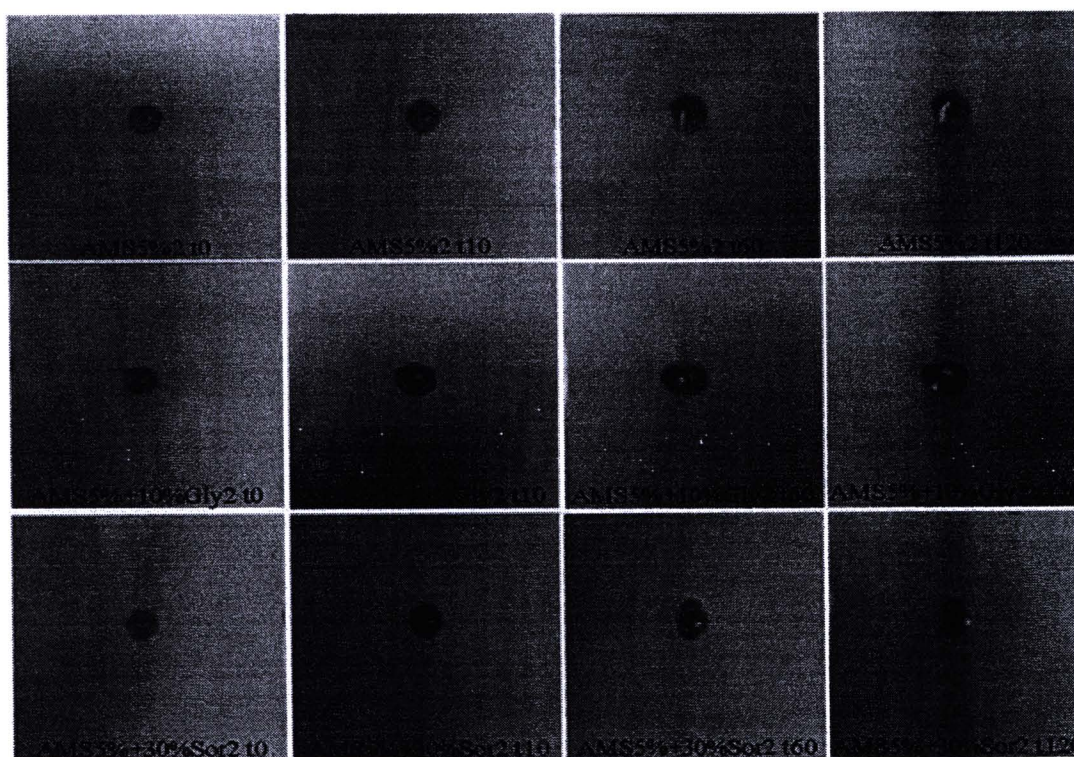
กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ระดับความหนาเดียวกันมีความสามารถในการด้านการซึมผ่านน้ำไม่แตกต่างกัน โดยกระดาษไม่เคลือบน้ำสามารถซึมผ่านได้ทันทีและมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่เวลาเริ่มต้นถึง 10 นาที เท่ากับ $0.44 \pm 0.06 - 6.57 \pm 0.84 \text{ cm}^2$ แล้วระเหยหมดไปเมื่อเวลา 13.67 ± 0.58 นาที ส่วนกระดาษที่เคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรทั้ง 3 ชนิด ที่ความหนา 65 ไมครอน น้ำสามารถซึมผ่านได้แต่พื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษน้อยกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ ในขณะที่กระดาษที่เคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรทั้ง 3 ชนิด ที่ความหนา 70 และ 75 ไมครอน น้ำไม่สามารถซึมผ่านกระดาษได้



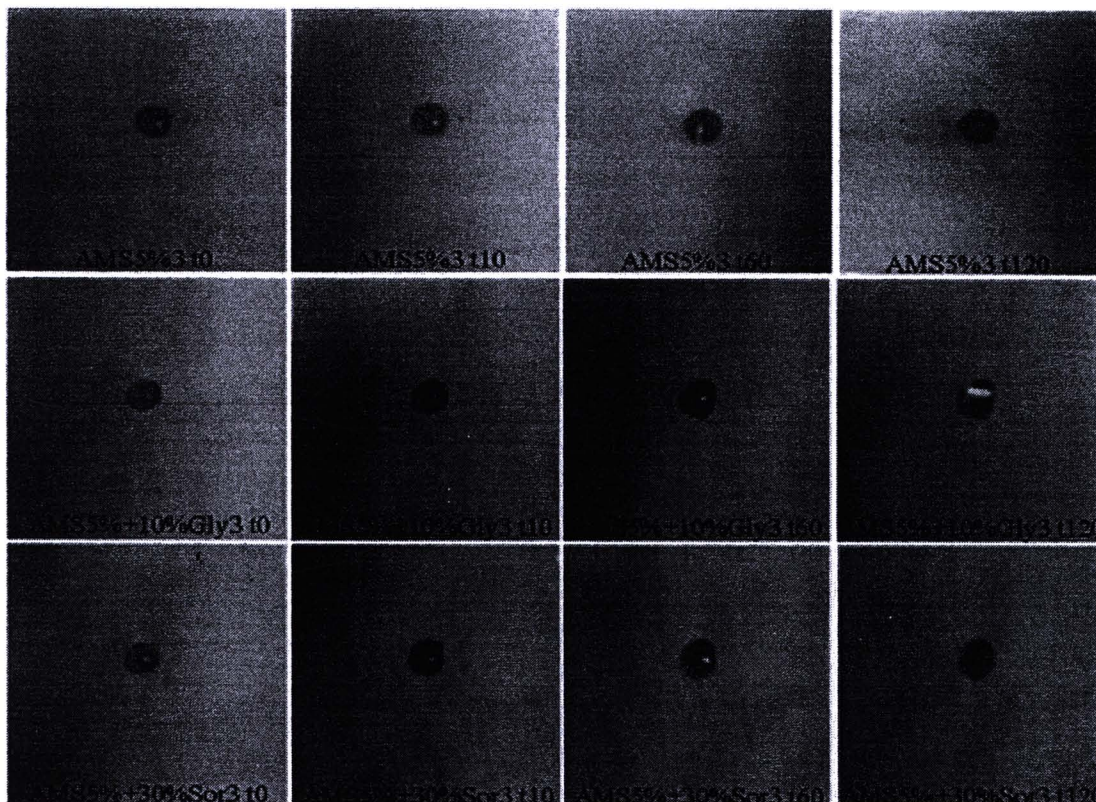
ภาพที่ 26 การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 1 (65 ไมครอน) เวลาที่ 0, 10, 60 และ 120 นาที (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วดัดแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

ภาพที่ 26 แสดงพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 65 ไมครอน เมื่อหยดน้ำลงบนกระดาษเคลือบ น้ำมีลักษณะเป็นหยดบนกระดาษเคลือบแต่ค่อยๆ ซึมผ่านกระดาษและแพร่กระจายอย่างช้าๆ โดยมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เกิดจากการที่น้ำแพร่ผ่านรูเล็กๆ รอยแตก ของกระดาษที่เคลือบไม่สม่ำเสมอ (Park et al., 2000) ซึ่งกระดาษที่เคลือบมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำระหว่างเวลาเริ่มต้น เท่ากับ 0.46 ± 0.07 - 2.17 ± 1.09 cm², 0.42 ± 0.07 - 2.07 ± 1.17 cm² และ 0.48 ± 0.04 - 2.41 ± 1.31 cm² ตามลำดับ และระเหยหมดไปใช้เวลา 113 ± 46 , 114 ± 41 และ 113 ± 42 นาที ส่วนกระดาษที่เคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรทั้ง 3 ชนิด ที่ความหนา 70 ไมครอน น้ำไม่สามารถซึมผ่านกระดาษได้

กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 70 ไมครอน น้ำจะซึมเข้าไปในกระดาษเคลือบอย่างช้าๆ โดยแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เคลือบบนกระดาษจะดูดซับน้ำไว้ ทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านทะลุไปได้ โดยกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % มีพื้นที่ของน้ำบนกระดาษที่เวลา 120 นาที เท่ากับ 0.75 ± 0.23 , 0.73 ± 0.08 และ 0.52 ± 0.32 cm² ตามลำดับ และระเหยจนแห้งหมดไปเมื่อเวลาผ่านไป 160 ± 35 , 179 ± 12 และ 155 ± 32 นาที ตามลำดับ (ภาพที่ 27)



ภาพที่ 27 การแพร่กระจายของน้ำบนกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวตัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 2 (70 ไมครอน) เวลาที่ 0, 10, 60 และ 120 นาที (AMS คือ แป้งถั่วเขียวตัดแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)



ภาพที่ 28 การแพร่กระจายของน้ำบนกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 3 (75 ไมครอน) เวลาที่ 0, 10, 60 และ 120 นาที (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

เช่นเดียวกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนา 75 ไมครอน ที่น้ำไม่ซึมผ่านกระดาษ โดยมีพื้นที่ของน้ำบนกระดาษที่เวลา 120 นาที เท่ากับ 0.55 ± 0.08 , 0.69 ± 0.16 และ $0.70 \pm 0.30 \text{ cm}^2$ ตามลำดับ (ภาพที่ 28) และน้ำระเหยหมดไปเมื่อเวลาผ่านไป 159 ± 18 , 167 ± 16 และ 165 ± 19 นาที ตามลำดับ (ภาพที่ 28) ซึ่งการที่น้ำมีระยะเวลาการระเหยเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรที่เคลือบบนกระดาษมีการดูดซับน้ำไว้ และพื้นที่ผิวของน้ำที่สัมผัสกับอากาศมีน้อย น้ำจึงต้องค่อยๆ แพร่ออกมาที่ผิวแล้วจึงระเหยออกสู่บรรยากาศได้

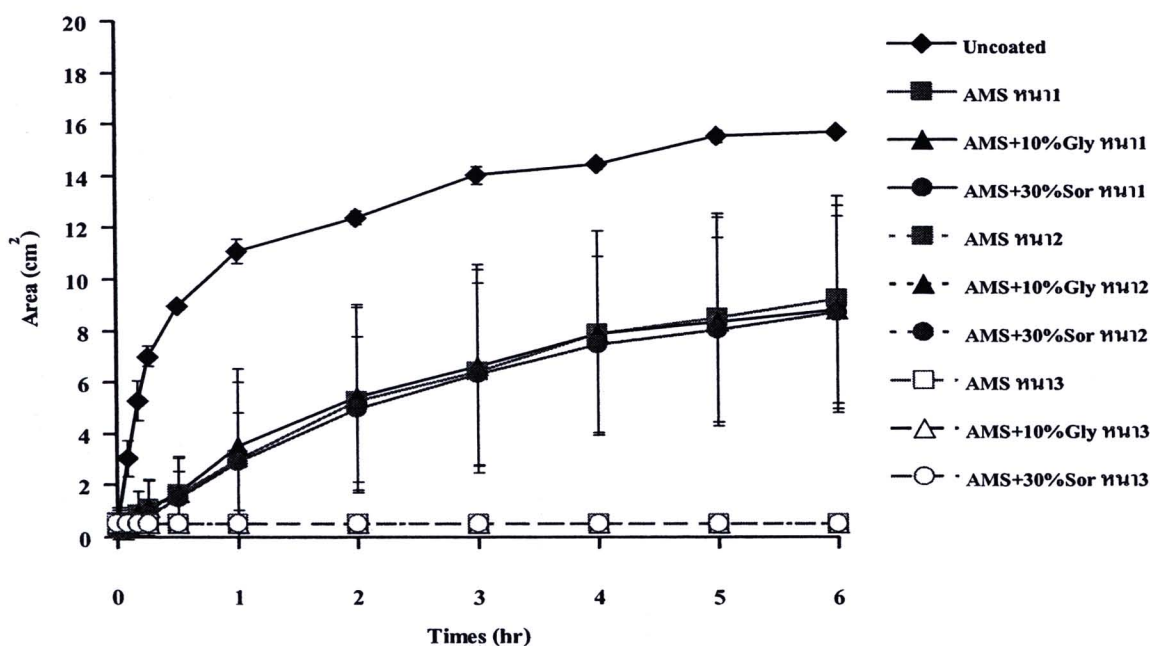
อย่างไรก็ตามการที่น้ำสามารถซึมผ่านกระดาษเนื่องจากกระดาษประกอบด้วยเส้นใยเซลลูโลสและมีลักษณะเป็นรูพรุนซึ่งทำให้กระดาษมีคุณสมบัติดูดซับน้ำ (Kjellgren et al., 2006) และการดูดซับน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น แต่การเคลือบกระดาษด้วยฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร สามารถลดการซึมผ่านของน้ำได้เนื่องจากฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรมีการละลายน้ำค่อนข้างต่ำ เมื่อเตรียมเป็นฟิล์มจึงมีการดูดซับและละลายน้ำได้น้อย เมื่อนำสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปร มาเคลือบกระดาษทำให้สารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วแปรมีลักษณะเป็นฟิล์มปิดรูพรุนของกระดาษ ลดการซึมผ่านของน้ำได้ นอกจากนี้ความหนาของการเคลือบกระดาษที่เพิ่มขึ้นทำให้ช่วยลดการซึมผ่านของน้ำอีกด้วย สอดคล้องกับการซึมผ่านไอน้ำของกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปร มีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับความหนาของการเคลือบเพิ่มขึ้น

ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ Guillaume และคณะ (2010) ที่พบว่ากระดาศเคลือบ wheat gluten มีความสามารถในการเป็กลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาศไม่เคลือบ โดยมีการดูดซึมน้ำของกระดาศเคลือบและกระดาศไม่เคลือบมีค่าน้อยกว่า 0.001 และเท่ากับ $0.07 \pm 0.02 \mu\text{l s}^{-1}$ ตามลำดับ และมีการแพร่กระจายของน้ำของกระดาศเคลือบและกระดาศไม่เคลือบมีค่าน้อยกว่า 0.001 และเท่ากับ $0.06 \pm 0.02 \text{ mm s}^{-1}$ ตามลำดับ เนื่องจากมีความชอบน้ำมากกว่า นอกจากนี้กระดาศเคลือบ wheat gluten มีความหนา 154.0 ± 2.7 ไมครอน แต่กระดาศไม่เคลือบมีความหนา 73.5 ± 4.0 ไมครอน จึงทำให้กระดาศเคลือบมีการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า

นอกจากนี้ Kjellgren และคณะ (2006) ได้ศึกษากระดาศเคลือบด้วยไคโตซานพบว่าไคโตซานเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำของกระดาศโดยกระดาศชนิดที่มีการดูดซึมน้ำน้อย (25 g/m^2) เมื่อเคลือบด้วยไคโตซานทำให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 30 g/m^2 เนื่องจากการดูดซึมน้ำของไคโตซานมีมากกว่าการดูดซึมน้ำของเซลลูโลสในกระดาศ แต่การเคลือบบนกระดาศชนิดที่มีการดูดซึมน้ำสูง ($40 - 50 \text{ g/m}^2$) ด้วยไคโตซานทำให้กระดาศมีการดูดซึมน้ำลดลงเหลือ 30 g/m^2 เนื่องจากไคโตซานเข้าไปอุดรูพรุนของกระดาศลดการดูดซึมน้ำที่เกิดจากรูพรุนซึ่งมีมากกว่าการดูดซึมน้ำของไคโตซาน ดังนั้นการเลือกไบโอพอลิเมอร์มาเป็นวัสดุเคลือบกระดาศและวิธีการดัดแปลงที่เหมาะสมสามารถทำให้กระดาศมีคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของน้ำได้ (Rhim et al., 2006)

4.6 การต้านการซึมผ่านน้ำมันของกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปร

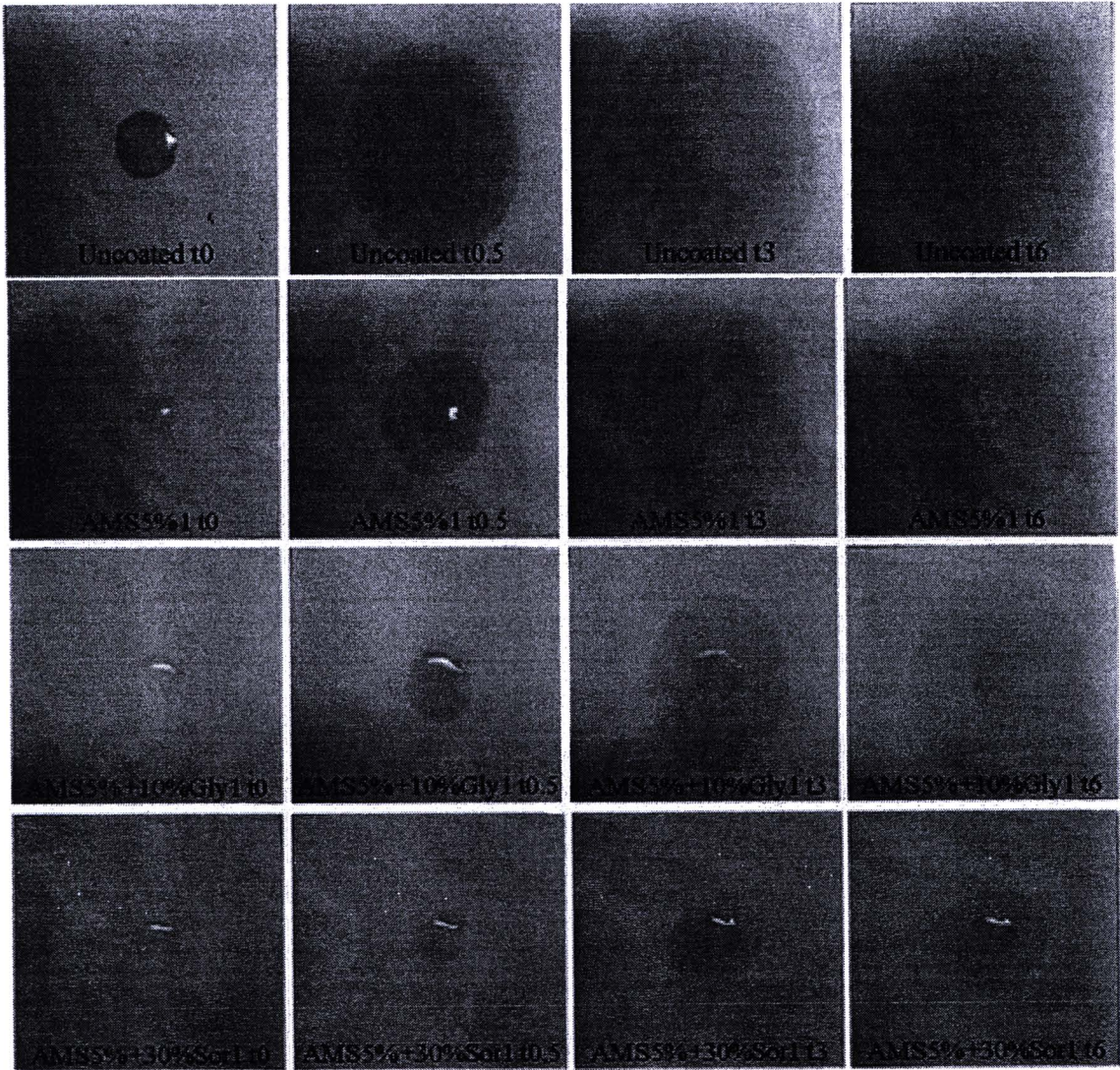
ผลการศึกษาการต้านการซึมผ่านน้ำมันของกระดาศที่ไม่เคลือบและกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรแสดงในภาพที่ 29



ความหนา 1, 2 และ 3 เท่ากับ 65, 70 และ 75 ไมครอน ตามลำดับ

ภาพที่ 29 พื้นที่การแพร่กระจายของน้ำมันบนกระดาศเคลือบที่ไม่เคลือบ กระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาศเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวดัดแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ที่ความหนา 1, 2 และ 3 (65, 70 และ 75 ไมครอน ตามลำดับ) และที่เวลา 0 – 6 ชั่วโมง แต่ละค่าแสดงในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานค่าละ 3 ตัวอย่าง

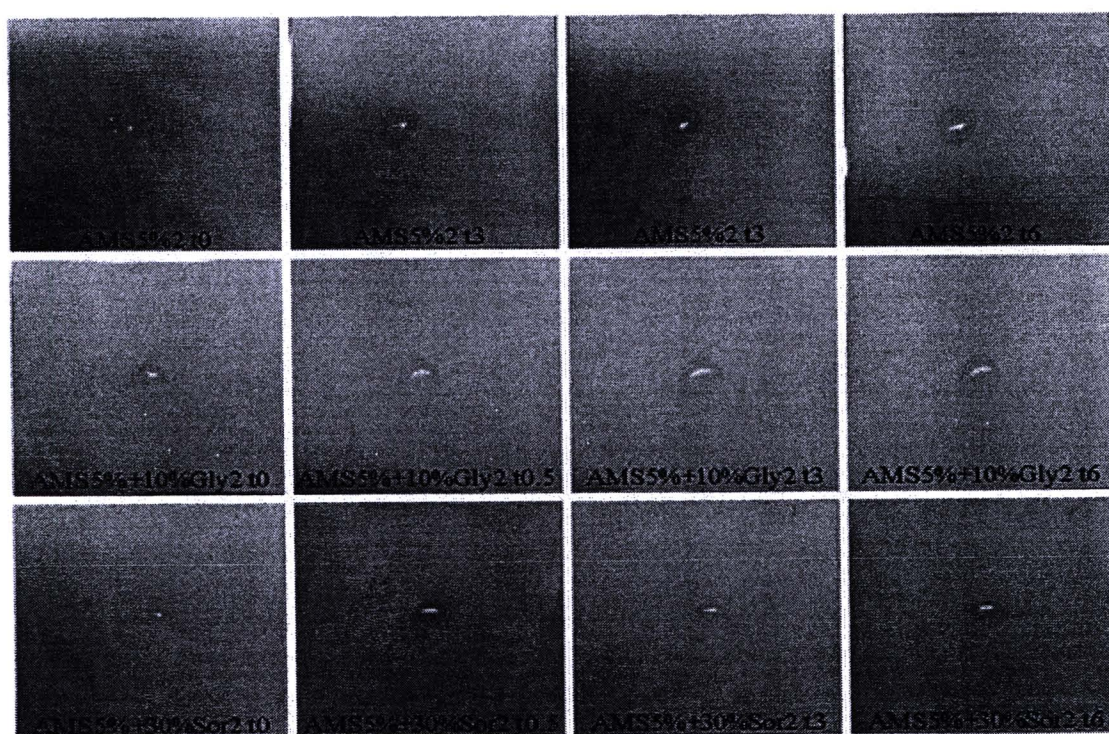
พบว่ากระดาษไม่เคลือบมีความสามารถในการต้านการซึมผ่านน้ำมันแตกต่างจากกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูป กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมซอร์บิทอล 30 % โดยมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำที่ซึมผ่านกระดาษแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทุกระดับความหนา ($p \leq 0.05$) โดยกระดาษไม่เคลือบน้ำมันสามารถซึมผ่านได้ทันทีและมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำมันที่เวลา 5 นาที และ 6 ชั่วโมง เท่ากับ 2.99 ± 0.68 และ $15.71 \pm 0.00 \text{ cm}^2$ ตามลำดับ เนื่องจากกระดาษไม่เคลือบไม่มีคุณสมบัติกั้นการซึมผ่านน้ำมัน (Han and Krochta, 2001)



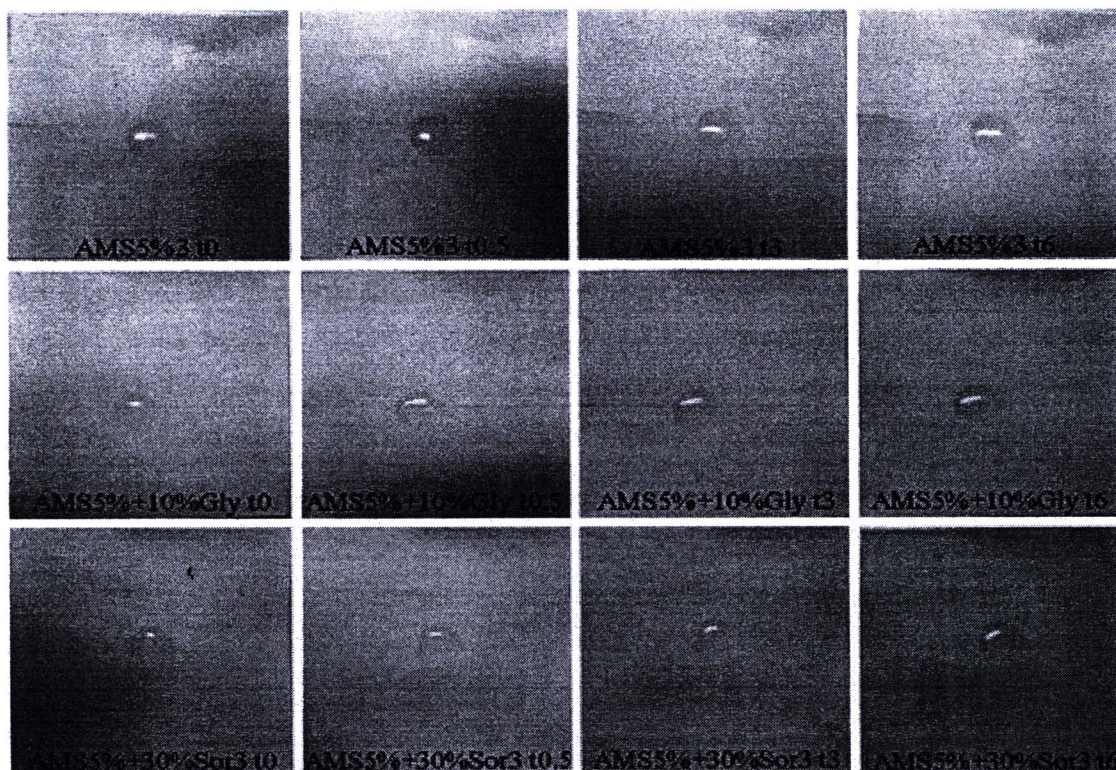
ภาพที่ 30 การแพร่กระจายของน้ำมันที่ซึมผ่านกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูปที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนาระดับที่ 1 (65 ไมครอน) ที่เวลา 0, 0.5, 3 และ 6 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่เคลือบ (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วแปรรูป, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

จากภาพที่ 30 น้ำมันสามารถซึมผ่านกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนา 65 ไมครอน ได้ โดยมีพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำมันที่เวลา 5 นาที เท่ากับ $0.57 \pm 0.57 \text{ cm}^2$, $0.48 \pm 0.64 \text{ cm}^2$ และ $0.25 \pm 0.24 \text{ cm}^2$ ตามลำดับ และที่เวลา 6 ชั่วโมงมีพื้นที่เท่ากับ $9.20 \pm 4.03 \text{ cm}^2$, $8.82 \pm 3.89 \text{ cm}^2$ และ $8.71 \pm 3.73 \text{ cm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งพื้นที่การแพร่กระจายของน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เกิดจากการที่น้ำมันแพร่ผ่านรูเล็กๆ รอยแตกของกระดาษที่เคลือบไม่สม่ำเสมอ (Park et al., 2000) เนื่องจากสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร ที่นำมาเคลือบกระดาษมีปริมาณน้อยเกินไป

แต่เมื่อใช้ปริมาณสารละลายมากขึ้นผิวของกระดาษเคลือบจะเรียบขึ้น (Han and Krochta, 2001 อ้างจาก Han and Krochta, 1999) ทำให้การต้านทานการซึมน้ำมันเพิ่มขึ้น โดยน้ำมันไม่สามารถซึมผ่านกระดาษกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10% และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30% ความหนา 70 และ 75 ไมครอน ได้ เนื่องจากสารกระจายตัวแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร มีปริมาณมากพอเมื่อนำมาเคลือบกระดาษ ทำให้สามารถปิดรูพรุนของกระดาษได้ (Guillaume et al., 2010) โดยกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนา 70 ไมครอน มีพื้นที่น้ำมันบนกระดาษที่เวลา 6 ชั่วโมง ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) (ภาพที่ 31)



ภาพที่ 31 การแพร่กระจายของน้ำมันบนกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปรที่เติมซอร์บิทอล 30 % ความหนาระดับที่ 2 (70 ไมครอน) ที่เวลา 0, 0.5, 3 และ 6 ชั่วโมง (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคั่วคั่วแปร, Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)



ภาพที่ 32 การแพร่กระจายของน้ำมันที่ซึมผ่านกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่ไม่เติมสารเพิ่มความยืดหยุ่น
กระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่เติมกลีเซอรอล 10 % และกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรที่เติม
ซอร์บิทอล 30 % ความหนาระดับที่ 3 (75 ไมครอน) ที่เวลา 0, 0.5, 3 และ 6 ชั่วโมง (AMS คือ แป้งถั่วเขียวคัดแปร,
Gly คือ กลีเซอรอล และ Sor คือ ซอร์บิทอล)

เช่นเดียวกับกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัดแปรความหนา 75 ไมครอน ที่มีพื้นที่น้ำมันบนกระดาษที่
เวลา 6 ชั่วโมง ของกระดาษทั้ง 3 ชนิด ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) (ภาพที่ 32) โดยกระดาษเคลือบฟิล์มแป้งถั่วเขียวคัด
แปรที่มีความหนา 70 และ 75 ไมครอน ทั้ง 3 ชนิด น้ำมันไม่สามารถซึมผ่านได้เป็นเวลามากกว่า 72 ชั่วโมง

คล้ายคลึงกับผลการศึกษาของ Kjellgren และคณะ (2006) ที่พบว่าการต้านทานการซึมน้ำมันของ
กระดาษที่เคลือบไคโตซานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารที่ใช้เคลือบเพิ่มขึ้น และผลการศึกษาของ Butkinaree, Jinkam และ
Yoksan (2008) พบว่าการใช้ hydrophobic starch เคลือบกระดาษแข็งพบว่าทำให้การซึมน้ำมันลดลงจาก 75.66
 g/m^2 เป็น 28.8 - 36.62 g/m^2 นอกจากนี้ Guillaume และคณะ (2010) ยังพบว่ากระดาษเคลือบ wheat gluten มีคุณสมบัติ
ต้านทานการซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อการเคลือบกระดาษมีความหนาเพียงพอที่สามารถปิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของ
กระดาษที่เคลือบ

นอกจากนี้ Park และคณะ (2000) ได้ศึกษาการเคลือบกระดาษ isolated soy protein (ISP) เปรียบเทียบกับ
กระดาษเคลือบ polyethylene พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วย ISP น้ำมันไม่ซึมผ่านใน 2 ชั่วโมงแรก โดยกระดาษที่เคลือบ
ด้วย ISP มีพื้นที่คราบน้ำมันน้อยกว่ากระดาษเคลือบ polyethylene ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ความร้อนในกระบวนการ
เคลือบกระดาษด้วย polyethylene อาจทำให้เกิดรูเล็กๆ รอยแตก ความไม่สม่ำเสมอของกระดาษเคลือบ ซึ่งเป็นสาเหตุ
ทำให้บางครั้งกระดาษที่เคลือบด้วยกระบวนการต่างกัน มีคุณสมบัติต่างกัน นอกจากนี้การใช้สารเพิ่มความยืดหยุ่นคือ

กลีเซอรอลและ PEG 400 (NF grade) อัตราส่วน 50: 50 w/w ทำให้ผิวของกระดาษมีความเรียบมากกว่า แยกออกจากกระดาษง่ายกว่าและด้านการซึมผ่านน้ำมันได้ดีกว่ากระดาษที่ไม่เคลือบ โดยกระดาษเคลือบ ISP ที่ไม่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่นมีพื้นที่ของคราบน้ำมันสูงกว่ากระดาษเคลือบ ISP ที่ใช้สารเพิ่มความยึดหยุ่น 0.2, 0.6 และ 1.0 g/g ของ ISP ตามลำดับ