บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลของขนาดและการเตรียมกากมันสำปะหลัง

4.1.1 ปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง เมื่อเปรียบเทียบกากมันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 25 เมช (U25) และเล็กกว่าตะแกรง 25 เมช (L25) พบว่ากากมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรง 25 เมช จะมีปริมาณแป้งมากกว่า เนื่องจากขนาดของแป้งมีขนาดเล็กกว่าตะแกรง ดังนั้นอาจจะทำให้แป้งผ่านตะแกรงไปได้มากกว่าติดอยู่ด้านบน และเมื่อเปรียบเทียบกากมันสำปะหลังที่ผ่านการตี (B) และไม่ผ่านการตี พบว่ากากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตี จะมีปริมาณแป้งมากกว่าเนื่องจากการตีกากจะทำให้แป้งหลุดออกมาจากกากได้และเมื่อทำการร่อนกากมันสำปะหลังอาจจะทำให้แป้งละลายไปกับน้ำขณะทำการร่อนกาก เนื่องจากการร่อนกากนี้เป็นการร่อนกากในน้ำ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง

ลักษณะกากมันสำปะหลัง	ปริมาณแป้งในกากมันสำปะหลัง (ร้อยละ)
OD	21.6
U25-OD	18.78
L25-OD	31.88
B-U25-OD	14.21
B-L25-OD	16.63

* OD = อบแห้ง, U25 = บน 25 เมช, L25 = ล่าง 25 เมช, B = ตีกาก

4.1.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

จากตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1 ซึ่งแสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผสมกากมันแบบต่างๆ พบว่าเมื่อมีปริมาณกากมันสำปะหลังกับในแผ่นกระดาษมากขึ้นจะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงลดลงและมีค่าต่ำกว่ากระดาษภาวะควบคุม (control) คือกระดาษที่ไม่ผสมกากมันสำปะหลังเลย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าเส้นใยของกากมันสำปะหลัง

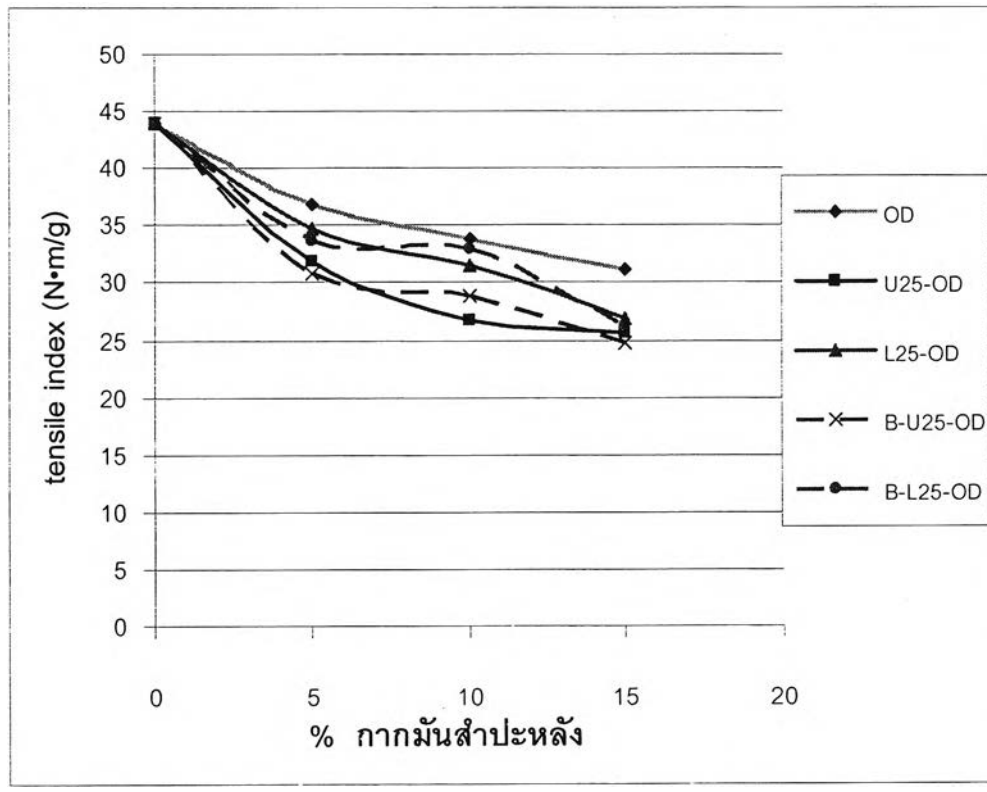
อาจจะมีสมบัติที่ไม่เหมาะสมและแข็งแรงพอต่อการสร้างพันธะของเส้นใยได้ดีเท่ากับเส้นใยที่เป็นเยื่อใยสั้น ถึงแม้ว่าในกากมันสำปะหลังยังคงมีปริมาณแป้งที่หลงเหลืออยู่ แต่แป้งที่อยู่ในกากมันสำปะหลังอาจจะมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีพอต่อการนำมาใช้ ซึ่งเห็นได้จากภาพที่ 4.2 พบว่ากากมันสำปะหลังยังคงจับตัวกันเป็นก้อน ทำให้แป้งอาจจะละลายออกมาช่วยสร้างพันธะของเส้นใยได้น้อยมาก อีกทั้งแป้งยังสามารถละลายในน้ำเย็นได้น้อย จึงทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีค่าลดลง

เมื่อเปรียบเทียบขนาดของกากมันสำปะหลังที่ใช้ พบว่ากากมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรง 25 เมช ทั้งที่ผ่านการตีกากและไม่ผ่านการตีกากจะให้กระดาษที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่ากากที่ติดอยู่บนตะแกรง เนื่องจากกากที่มีขนาดเล็กกว่า 25 เมช มีปริมาณแป้งมากกว่า เส้นใยจึงเกิดการสร้างพันธะได้มากกว่า ส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากมันสำปะหลังที่ผ่านการตีกากและไม่ผ่านการตีกาก พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการตีกากจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่ากากมันสำปะหลังที่ผ่านการตีกาก ซึ่งเป็นผลจากปริมาณแป้งที่ติดอยู่กับกากเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากมันสำปะหลังแบบต่างๆ

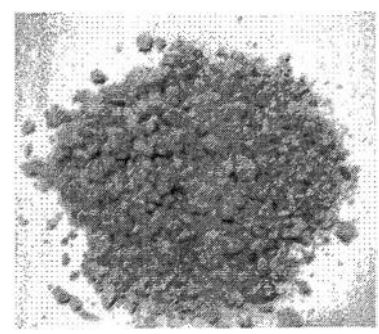
กากมัน-สำปะหลัง (ร้อยละ)	OD	U25-OD	L25-OD	B-U25-OD	B-L25-OD
0	43.97	43.97	43.97	43.97	43.97
5	36.91	31.93	34.75	30.77	33.66
10	33.73	26.78	31.56	28.74	32.92
15	31.20	25.70	26.81	24.80	26.23

* OD = อบแห้ง, U25 = บน 25 เมช, L25 = ล่าง 25 เมช, B = ตีกาก



* OD = อบแห้ง, U25 = บน 25 เมช, L25 = ล่าง 25 เมช, B = ตีกาก

ภาพที่ 4.1 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ (N·m/g) กับปริมาณกากมันสำปะหลังที่ใช้



ภาพที่ 4.2 ลักษณะของกากมันสำปะหลัง

4.1.3 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก

จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.3 ซึ่งแสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผสมกากมันแบบต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดของกากมันสำปะหลังที่ใช้ พบว่ากากมันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่กว่าตะแกรง 25 เมช ทั้งที่ผ่านการตีกากและไม่ผ่านการตีกากจะมีค่าดัชนี

ความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมากกว่ากากที่มีขนาดเล็กกว่าตะแกรง 25 เมช เนื่องจากค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ จะขึ้นอยู่กับความยาวของเส้นใยและความแข็งแรงของเส้นใย ซึ่งพบว่ากากที่มีขนาดใหญ่จะมีความยาวของเส้นใยที่ยาวกว่า ดังนั้นจึงส่งผลให้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมากกว่า

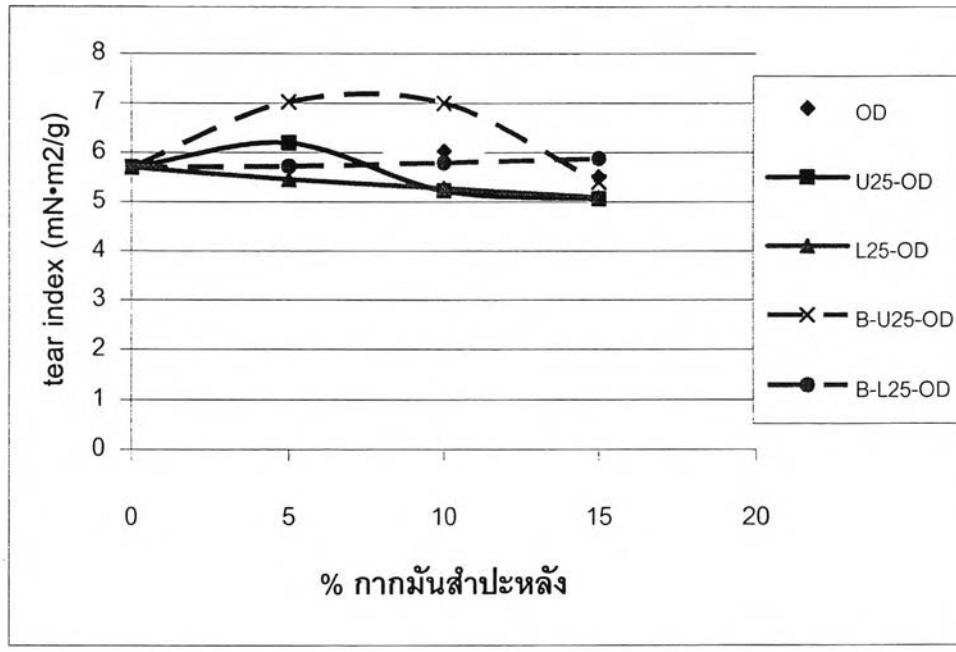
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากมันสำปะหลังที่ผ่านการตีกากและไม่ผ่านการตีกาก พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษของกากมันสำปะหลังที่ผ่านการตีกากมีจะค่ามากกว่า เนื่องจากการตีกากจะทำให้แป้งที่ติดอยู่กับกากหลุดออกมาได้ทำให้เส้นใยยึดติดเป็นกระจุกมากขึ้น เมื่อทำการอบแห้งจึงทำให้เส้นใยเป็นกลุ่มก้อน เมื่อทำการขึ้นแผ่นกระดาษจะพบว่ากระดาษมีลักษณะผิวขรุขระ เนื่องจากกากจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนกระจายทั่วกระดาษ ดังนั้นเมื่อนำกระดาษมาทดสอบความต้านทานแรงฉีก ขณะที่กระดาษฉีกเมื่อฉีกเจอกากที่เป็นก้อนอาจจะทำให้เครื่องออกแรงฉีกมากขึ้นส่งผลให้ค่าของกากที่ผ่านการตีกากมีค่าความต้านทานแรงฉีกขาดมากกว่า

ดังนั้น จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกใช้กากมันสำปะหลังที่มีขนาดเล็กกว่า 25 เมช ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากกากชนิดนี้เมื่อผสมกับเยื่อใยสั้นแล้วจะให้กระดาษที่มีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงดีที่สุด กอปรกับกากที่ใช้มีปริมาณแป้งอยู่มากที่สุดจึงเหมาะสมกับการนำไปปรับปรุงต่อไป สำหรับการตีกาก เนื่องจากพบว่าส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่า ดังนั้นจึงไม่นำไปใช้ในการทดลองในขั้นต่อไป โดยในการทดลองในขั้นต่อไปจะนำกากมันสำปะหลังมาดัดแปรเพื่อให้มีประจุเช่นเดียวกับการดัดแปรแป้ง เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงในกระดาษ

ตารางที่ 4.3 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ (tear index, $mN \cdot m^2/g$)ที่ผสมด้วยกากมันสำปะหลังแบบต่างๆ

% กากมันสำปะหลัง	OD	U25-OD	L25-OD	B-U25-OD	B-L25-OD
0	5.70	5.70	5.70	5.70	5.70
5	5.71	6.19	5.46	7.03	5.71
10	6.02	5.22	5.27	7.00	5.79
15	5.51	5.06	5.09	5.40	5.88

* OD = อบแห้ง, U25 = บน 25 เมช, L25 = ล่าง 25 เมช, B = ตีกาก



* OD = อบแห้ง, U25 = บน 25 เมช, L25 = ล่าง 25 เมช, B = ตีกาก

ภาพที่ 4.3 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษ (mN·m^2/g) กับปริมาณกากมันสำปะหลังที่ใช้

4.2 ผลการดัดแปรกากมันสำปะหลัง

4.2.1 คุณสมบัติต่างๆของแป้งและกากมันสำปะหลัง

4.2.1.1 ค่า alkalinity

จากตารางที่ 4.4 ค่า alkalinity เป็นค่าที่ใช้ตรวจสอบความเป็นด่างของแป้ง ที่แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาว่ามีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาหรือไม่ พบว่าในส่วนของแป้งจะสามารถทำการตรวจสอบได้ว่าแป้งมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาได้ ส่วนกากพบว่าไม่สามารถทำการตรวจสอบได้ เนื่องจากกากเมื่อนำมาละลายน้ำจะพบว่ามีกากไม่ละลายน้ำและน้ำที่ละลายอยู่มีสีน้ำตาลเหลือง เมื่อนำมาหยดฟีนอล์ฟทาลีน จะพบว่าไม่ทำให้สีของน้ำเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ทดสอบค่า alkalinity ไม่ได้

4.2.1.2 ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อทำการดัดแปรแป้งและกากมันสำปะหลังเพื่อให้ได้แป้งและกากชนิดประจุบวก และเมื่อนำมาหาปริมาณไนโตรเจนที่ติดอยู่กับแป้งและกาก พบว่า

แป้งและกากจะมีไนโตรเจนติดอยู่ แสดงว่า ปฏิกิริยาแทนที่ในการดัดแปร ทำให้โมเลกุลของไนโตรเจนที่ได้จากหมู่แอมโมเนียม (NH_2) สามารถเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) ของโมเลกุลของแป้งได้ ดังนั้นจึงทำให้แป้งและกากมีประจุบวกติดอยู่ที่โมเลกุลของแป้ง และเมื่อเพิ่มปริมาณ (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม (CHPT) ที่ใช้เพื่อให้แป้งและกากมีประจุบวกเพิ่มมากขึ้น จะพบว่าแป้งและกากมันสำปะหลังจะมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นเช่นกัน แสดงว่าหมู่แอมโมเนียมสามารถเข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลได้มากขึ้น ดังนั้นการที่มีประจุบวกเพิ่มมากขึ้นเมื่อนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษก็น่าจะทำให้เส้นใยสามารถสร้างพันธะให้กับกระดาษได้มากขึ้น และส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น

ส่วนแป้งและกากดัดแปรชนิดแอมโฟเทอริก พบว่าแป้งและกากมีโมเลกุลของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสติดอยู่เช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้แป้งและกากที่ทำการดัดแปรมีทั้งประจุบวกที่ได้จากโมเลกุลของไนโตรเจน และประจุลบเป็นประจุที่ได้จากโมเลกุลของฟอสฟอรัสติดอยู่ที่โมเลกุลของแป้ง และเมื่อเพิ่มปริมาณ CHPT ที่ใช้เพื่อให้แป้งและกากมีประจุบวกเพิ่มขึ้นจะพบว่าปริมาณไนโตรเจนที่ได้จะมากขึ้นเช่นเดียวกับการดัดแปรแป้งและกากประจุบวก

ตารางที่ 4.4 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง แป้งดัดแปร กากมันสำปะหลังและกากดัดแปร

ชนิดของแป้ง	alkalinity	ไนโตรเจน (ร้อยละ)		ฟอสฟอรัส(ร้อยละ)	
		bound	total	total	bound
native st	-	-	-	-	-
cat st 1%CHPT	0.11	0.033	0.083	-	-
cat st 2%CHPT	0.206	0.05	0.1	-	-
cat st 5%CHPT	0.24	0.15	0.22	-	-
cat st 8%CHPT	0.27	0.29	0.32	-	-
am st 1% CHPT	0.22	0.02	0.06	2.45	0.12
am st 2%CHPT	0.106	0.07	0.12	1.97	0.4
am st 5%CHPT	0.17	0.15	0.26	2.4	0.17
am st 8%CHPT	0.35	0.36	0.44	2.39	0.2
CR	-	-	-	-	-
cat CR 1%CHPT	0	0.21	0.26	-	-
cat CR 2%CHPT	0	0.23	0.33	-	-
cat CR 5%CHPT	0	0.25	0.48	-	-
cat CR 8%CHPT	0	0.32	0.62	-	-
am CR 1% CHPT	0	0.292	0.338	5.61	2.94
am CR 2%CHPT	0	0.299	0.388	6.25	2
am CR 5%CHPT	0	0.33	0.59	4.07	2.94
am CR 8%CHPT	0	0.41	0.777	3.86	3.04

* bound หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่ติดอยู่กับแป้งและกาก

total หมายถึง ปริมาณไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสทั้งหมดที่วัดได้

cat หมายถึง ประจุบวก, am หมายถึง แอมโฟเทอริก

st หมายถึง แป้ง, CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

native หมายถึง แป้งดิบ

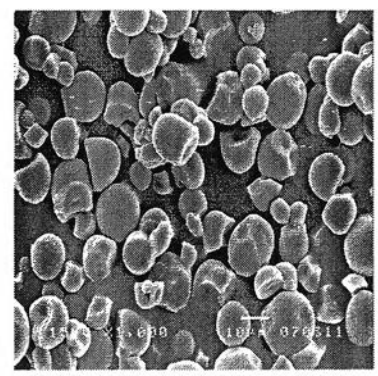
DS หมายถึง ค่าระดับการแทนที่ของหมู่ไนโตรเจนในหนึ่งหน่วยกลูโคส

%CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม

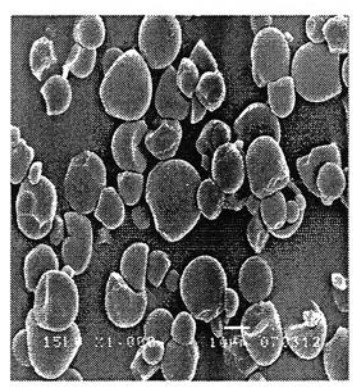
- หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

4.2.1.3 ลักษณะของแป้งและกากมันสำปะหลัง

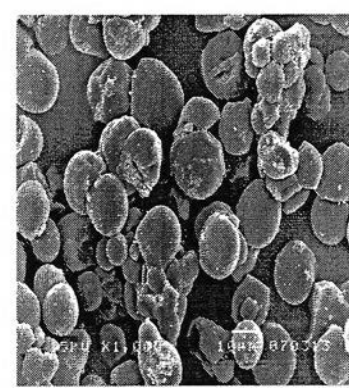
ภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า พบว่ารูปร่างของเม็ดแป้ง เป็นรูปไข่ ตัดปลายข้างหนึ่ง โดยผิวบริเวณที่ตัดจะเว้าเข้าข้างในหรือมีรอยบุ๋ม เมื่อทำการส่องดูเม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรเป็นแป้งประจุบวก ดังภาพที่ 4.4 (ข) พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงและยังคงสภาพของเม็ดแป้งและรูปร่างเหมือนแป้งมันสำปะหลังดิบ ดังภาพที่ 4.4 (ก) แต่แป้งแอมโฟเทอริกนั้นมีรูปทรงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (ดังภาพที่ 4.4 (ค)) อาจเนื่องมาจากในการทำปฏิกิริยาจะทำที่สภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูงและปริมาณน้ำน้อย ดังนั้นอาจเกิดการทำลายโครงสร้างบางส่วนของเม็ดแป้ง นอกจากนี้อาจเกิดจากแรงกลในกระบวนการเตรียมแป้งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของเม็ดแป้งภายหลังการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป [20]



(ก)



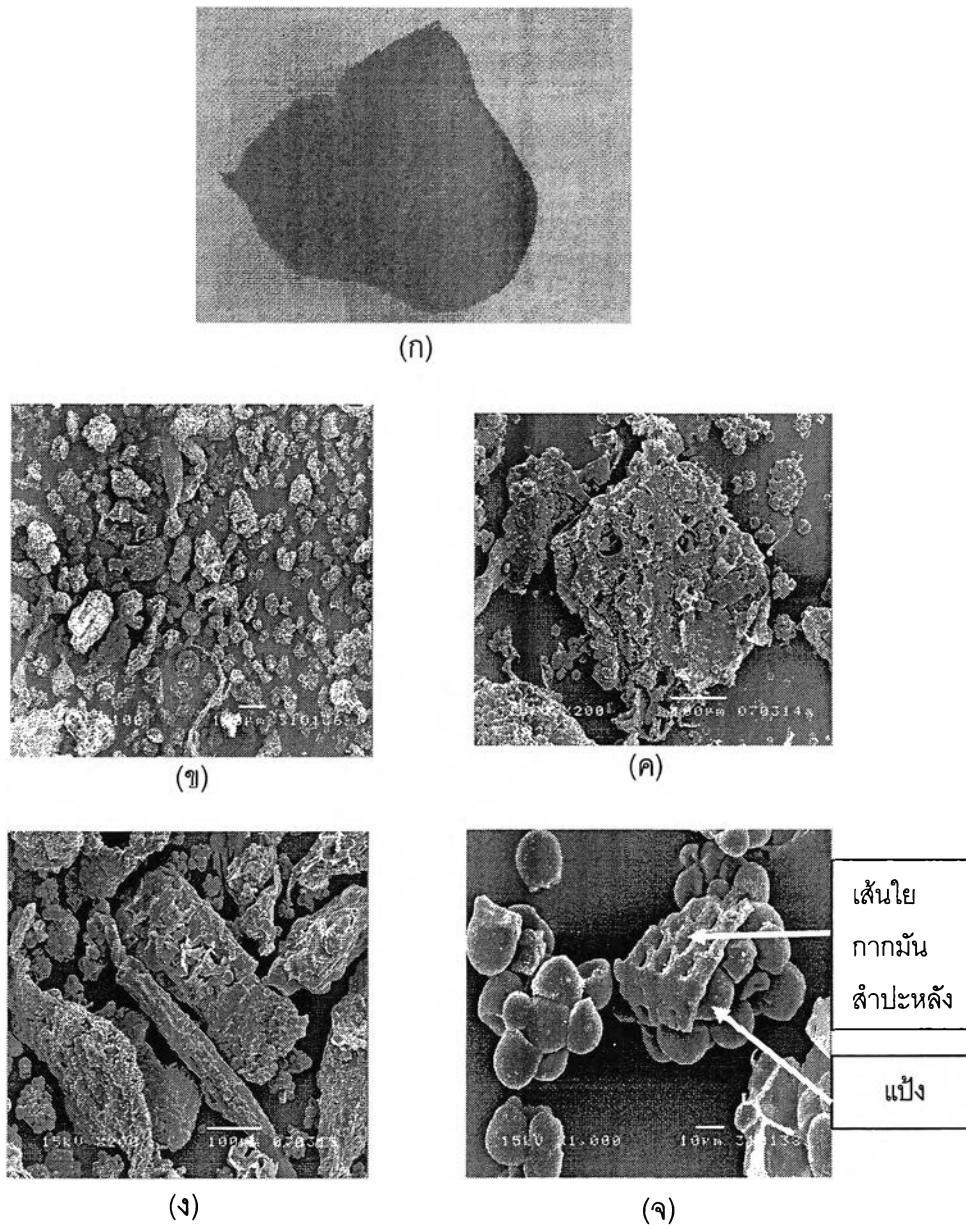
(ข)



(ค)

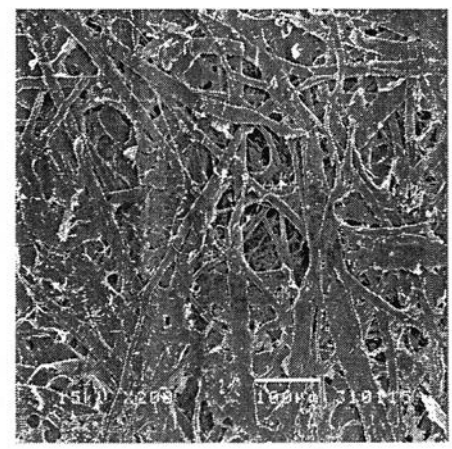
ภาพที่ 4.4 ลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) แป้งมันสำปะหลังดิบ (ข) แป้งประจุบวก (ค) แป้งแอมโฟเทอริก

ภาพที่ 4.5 (ก) แสดงให้เห็นลักษณะของกากมันสำปะหลังที่ไม่ได้ทำการดัดแปร เมื่อมองด้วยตาเปล่า พบว่ากากจะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆคล้ายเม็ดทราย แต่เมื่อนำมาส่องด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังภาพที่ 4.5 (ข) พบว่ากากมันสำปะหลังจะมีลักษณะเป็นก้อนแตกต่างกันและมีขนาดที่ไม่เท่ากัน เมื่อทำการขยายกำลังขนาดของภาพให้มีขนาด 200 เท่า พบว่า มีส่วนที่เป็นเม็ดแป้งอยู่ภายในและภายนอกกากมันสำปะหลัง และพบว่าส่วนที่เป็นเส้นใยมีลักษณะรูปร่างแตกต่างกันออกไป อาจเนื่องจากในกระบวนการร่อนกากจะมีการปั่นกากเพื่อให้ได้กากที่มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรง 25 เมช จึงส่งผลเส้นใยมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันและผิวของเส้นใยของกากมีลักษณะที่ฉีกขาดไม่สมบูรณ์ เมื่อพิจารณาที่เม็ดแป้งจะพบว่าเม็ดแป้งมีลักษณะเป็นรูปไข่ และมีรอยบุ๋มที่ปลายข้างหนึ่งเช่นเดียวกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ดังภาพขยาย 200 เท่า (ภาพที่ 4.5 (ค)) และเมื่อนำกากประจุบวกมาทำการส่องที่กำลังขนาด 200 เท่า (ภาพที่ 4.5 (ง)) พบว่ากากประจุบวกมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับกากมันสำปะหลังที่ไม่ได้ทำการดัดแปร คือพบว่ากากมีลักษณะแตกต่างกันออกไป และพบว่ามีแป้งติดอยู่ที่บริเวณภายในกากมันสำปะหลังและภายนอกกากมันสำปะหลัง ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแป้งดิบเช่นเดียวกับกากมันสำปะหลังดิบ และเมื่อนำกากแอมโฟเทอริกมาส่องที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังภาพที่ 4.5 (จ) พบว่าส่วนที่เป็นเม็ดแป้งจะมีส่วนที่ยึดติดกับส่วนที่เป็นเส้นใยของกากมันสำปะหลังและอยู่ภายนอกเส้นใยกากมันสำปะหลัง ซึ่งก็คือมีลักษณะเป็นกลุ่มของเม็ดแป้งเกาะกันอยู่ และพบว่าลักษณะของเม็ดแป้งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับเม็ดแป้งที่ได้จากการดัดแปรแป้งแอมโฟเทอริก

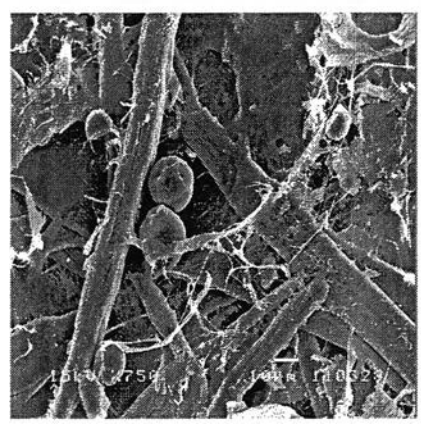


ภาพที่ 4.5 ลักษณะของกากมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยายต่างๆ (ก) มองด้วยตาเปล่า (ข) กากมันสำปะหลังที่ X100 เท่า
(ค) กากมันสำปะหลังที่ X200 เท่า (ง) กากประจุบวกที่ X 200 เท่า
(จ) กากแอมโฟเทอริกที่ X1,000 เท่า

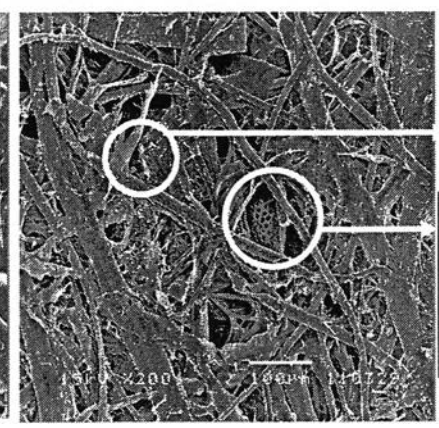
จากภาพที่ 4.6 (ก) แสดงให้เห็นลักษณะของกระดาษภาวะควบคุมที่มีเฉพาะเยื่อกล่องลูกฟูกพบว่าเส้นใยของเยื่อกล่องลูกฟูกจะมีการสร้างพันธะระหว่างกันเอง และเมื่อนำแป้งและกากมันสำปะหลังมาผสมกับเยื่อกล่องลูกฟูก จากนั้นนำมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ พบว่าเมื่อใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ แป้งที่เติมลงไปจะไปช่วยยึดติดระหว่างเส้นใยดังภาพที่ 4.6 (ข) ส่วนกากมันสำปะหลังที่ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง พบว่าจะมีส่วนที่เป็นเส้นใยกากมันสำปะหลังและแป้งแทรกอยู่ระหว่างเส้นใยของเยื่อกล่องลูกฟูก ดังภาพที่ 4.6 (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4.6 ลักษณะของกระดาษเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนที่กำลังขยายต่างๆ (ก) กระดาษควบคุมที่ X200 เท่า

(ข) กระดาษที่ผสมด้วยแป้ง ที่ X750 เท่า

(ค) กระดาษที่ผสมด้วยกากมันสำปะหลัง ที่ X200 เท่า

4.2.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength)

4.2.2.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่แป้ง

ตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.7 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่แป้งประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.8 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่แป้งแอมโฟเทอริก โดยปกติความแข็งแรงต่อแรงดึงเป็นค่าความแข็งแรงที่ขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยเป็นสำคัญ ซึ่งพบว่าเมื่อใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ จะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษภาวะควบคุม (กระดาษที่ไม่เติมแป้ง) และกระดาษที่ผสมด้วยแป้งดิบ เนื่องจากแป้งทั้ง 2 ชนิดเป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุบวก ซึ่งประจุบวกของแป้งจะไปช่วยจับประจุลบของเส้นใยทำให้เส้นใยสร้างพันธะได้มากกว่ากระดาษที่ไม่ได้เติมแป้ง และกระดาษที่ใช้แป้งดิบที่ไม่มีประจุ จึงทำให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่า และค่าความต้านแรงดึงจะมีค่าสูงขึ้นถึงจุดๆ หนึ่งแล้วจะมีค่าลดลง เนื่องจากการมีปริมาณแป้งในระบบมากเกินไป แป้งจะทำให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกัน (flocculation) จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงลดลง

นอกจากนี้ยังพบว่ากระดาษที่มีแป้งประจุบวกที่มีปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม (CHPT) ที่ระดับต่างๆ กันจะส่งผลต่อปริมาณในการเติมแป้งเพื่อให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงสุดต่างกัน ดังนี้ คือ ร้อยละของ CHPT ที่ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 1, 2, 1 และ 1.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.96±0.76, 37.19±2.61, 36.43±1.01 และ 34.74±1.33 N·m/g ตามลำดับ และพบว่าการเติมแป้งประจุบวกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 เป็นปริมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษจะทำให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด

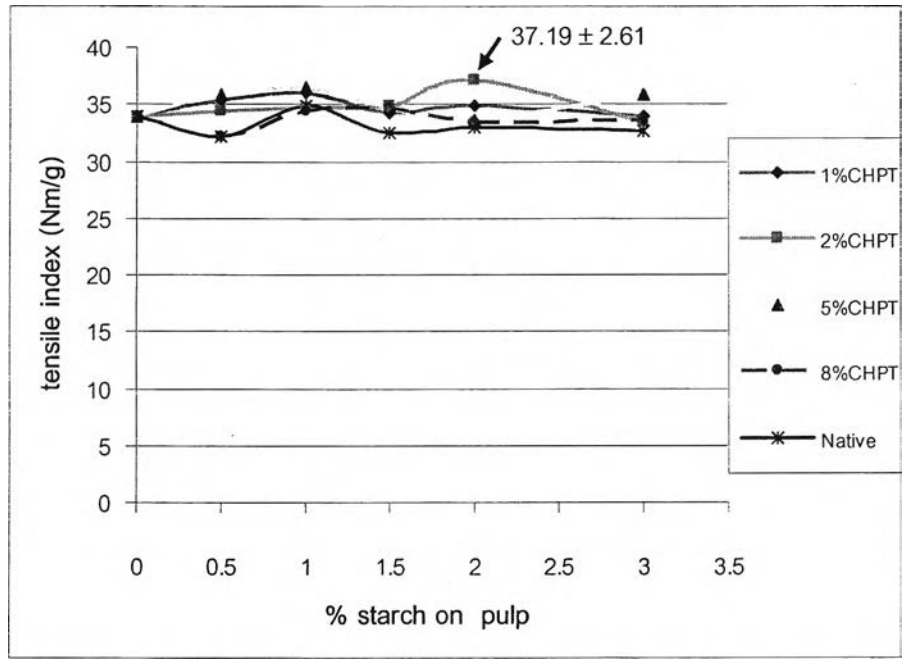
ส่วนกระดาษที่ใช้แป้งแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 3, 1, 0.5 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 37.1±2.04, 37.25±0.49, 36.39±1.33 และ 36.48±1.34 N·m/g ตามลำดับ และพบว่าการเติมแป้งแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 ในปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษ จะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งทั้ง 2 ชนิด จะพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของแป้งแอมโฟเทอริกจะมีค่ามากกว่าแป้งประจุบวก

ตารางที่ 4.5 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	native
0	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85± 1.99
0.50	35.41±1.41	34.33±1.31	35.78±0.38	32.16±2.15	32.24±1.76
1	**35.96±0.76**	34.78±1.02	**36.43±1.01**	34.41±0.91	**34.87±1.05**
1.5	34.20±1.20	34.84±0.61	34.8±0.76	**34.74±1.33**	32.44±1.95
2	34.87±0.83	***37.19±2.61***	33.54±0.81	33.47±0.82	32.93±3.58
3	33.91±1.33	33.5±0.9	35.77±2.08	33.54±1.07	32.61±2.19

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



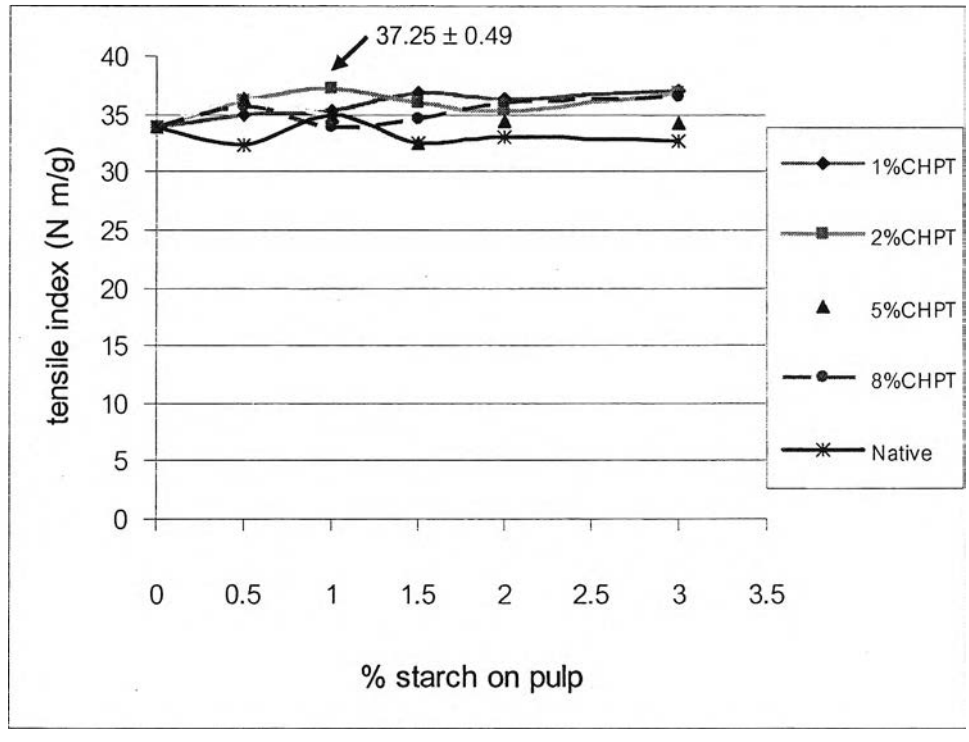
ภาพที่ 4.7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวก ที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.6 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	native
0	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85±1.99	33.85± 1.99	33.85± 1.99
0.50	34.85±1.37	36.16±1.45	**36.39±1.33**	35.57±0.33	32.24±1.76
1	35.28±1.26	***37.25±0.49***	34.83±1.55	33.97±1.70	**34.87±1.05**
1.5	36.79±2.33	36.02±0.93	32.46±1.94	34.66±1.17	32.44±1.95
2	36.29±1.29	35.27±1.63	34.4±1.17	36.01±0.99	32.93±3.58
3	**37.1±2.04**	36.93±3.31	34.21±1.16	**36.48±1.34**	32.61±2.19

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.8 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.2.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่กาก

ตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.9 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่กากประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.10 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใส่กากแอมโฟเทอริก พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษจะมีค่าลดลงเมื่อใช้กากมันสำปะหลังมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากตัวเส้นใยกากมันสำปะหลังที่อยู่ในระบบอาจจะไปสร้างพันธะกับเส้นใยของกระดาษกล่องลูกฟูกไม่ดีเท่ากับการสร้างพันธะระหว่างเส้นใยด้วยกันเอง เมื่อใส่กากมากเกินไปจึงทำให้ไปเป็นตัวขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใย ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบการใช้กากดัดแปรกับกากมันสำปะหลังธรรมดา พบว่า กระดาษที่ผสมกากดัดแปรจะมีค่าความต้านทานแรงดึงมากกว่า แสดงว่าประจุที่เกิดจากการดัดแปรจะทำให้มีประจุติดอยู่ที่แป้งที่อยู่ในกากมันสำปะหลัง ซึ่งจะไปช่วยจับกับประจุของเส้นใยทำให้เส้นใยสร้างพันธะต่อกันได้มากกว่ากากที่ไม่มีประจุ

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่มีกากประจุบวกผสมอยู่กับกระดาษภาวะควบคุม พบว่ากระดาษที่มีกากประจุบวกผสมอยู่ทั้งหมดจะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงน้อยกว่ากระดาษภาวะควบคุม และกระดาษที่ใช้กากประจุบวกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุดเมื่อมีสัดส่วนแป้งในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.5, 1 และ 0.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.59±1.45, 33.73±1.91, 30.06±2.99 และ 29.34±1.44 N·m/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการเติมกากที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุด

ส่วนกระดาษที่ใช้กากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากที่สุดเมื่อมีสัดส่วนแป้งในปริมาณร้อยละ 0.5 ทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31.89±1.68, 31.81±0.75, 33.98±1.28 และ 34.22±0.51 N·m/g ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษภาวะควบคุม พบว่าแป้งที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 5 และ 8 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 0.5 จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากระดาษควบคุม ซึ่งค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่มีค่าสูงที่สุดคือกากที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากทั้ง 2 ชนิด จะพบว่ากากแอมโฟเทอริกจะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่ากากประจุบวก

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งและกากมันสำปะหลังเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ พบว่าการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงจะให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงมากกว่าการใช้กาก ถึงแม้ว่าจะมีการดัดแปรกาก

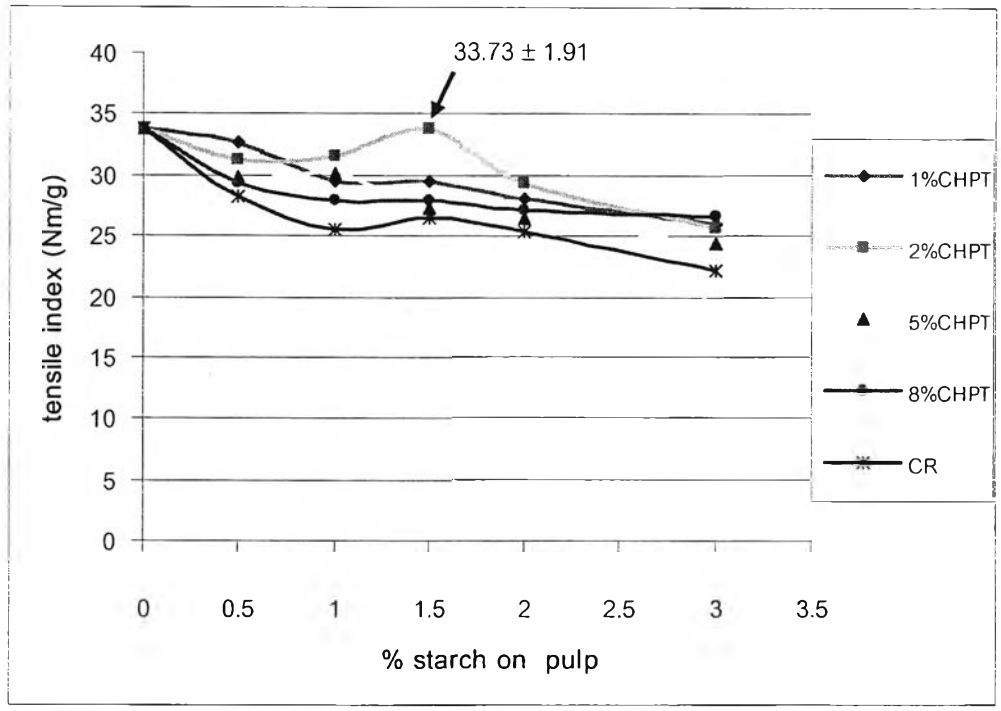
มันสำปะหลังเพื่อให้แป้งที่อยู่ในกากมันสำปะหลังมีคุณสมบัติในการสร้างพันธะกับเส้นใยได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาดูที่ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จากตารางที่ 4.4 พบว่า กากมันสำปะหลังดัดแปรจะมีค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมากกว่าแป้งดัดแปร ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งให้กับกระดาษก็น่าจะให้ค่าความแข็งแรงที่มากกว่า เนื่องจากการมีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะช่วยให้กากมันสำปะหลังมีประจุมากขึ้น ดังนั้นน่าจะส่งผลให้เส้นใยของกระดาษสามารถสร้างพันธะกันได้มากขึ้น แสดงว่าในการใช้กากมันสำปะหลัง ตัวที่เป็นเส้นใยในกากมันสำปะหลังอาจจะเป็นตัวที่เข้าไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใยกระดาษ จึงส่งผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษที่ใช้กากมันสำปะหลังดัดแปรมีความแข็งแรงน้อยกว่าการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้ง

ตารางที่ 4.7 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

%แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85±1.99	33.85±1.99	33.85±1.99
0.50	**32.59±1.45**	31.18±1.53	29.85±2.23	**29.34±1.44**	**28.24±2.34**
1	29.55±2.39	31.57±1.88	**30.06±2.99**	27.83±0.92	25.5±1.92
1.5	29.51±1.46	***33.73±1.91***	27.23±2.46	27.91±1.27	26.44±0.47
2	28.03±1.14	29.33±2.72	26.43±0.85	27.05±1.05	25.3±1.08
3	26.03±1.02	25.6±2.10	24.34±1.14	26.57±1.22	**22.21±0.79**

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



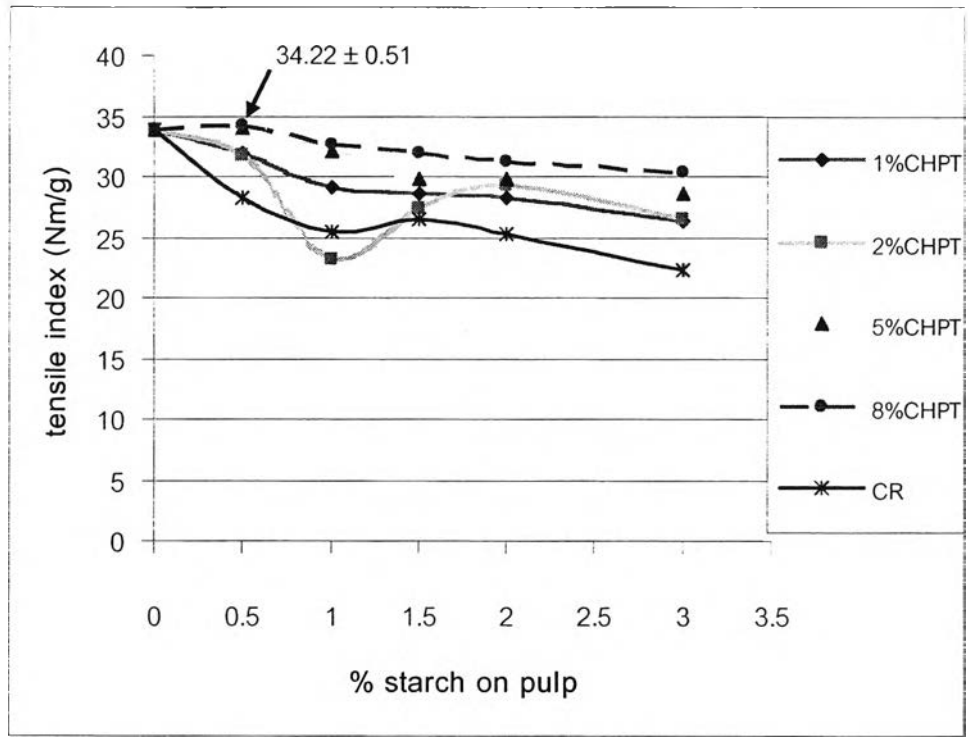
ภาพที่ 4.9 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวก ที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับสัดส่วนแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

%แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85± 1.99	33.85±1.99	33.85±1.99
0.50	31.89±1.68	31.81±0.75	33.98±1.28	*34.22±0.51*	28.24±2.34
1	29.11±1.60	23.18±1.90	32.16±0.89	32.65±1.27	25.50±1.92
1.5	28.62±1.14	27.39±0.47	29.89±2.62	31.91±1.02	26.44±0.47
2	28.16±1.07	29.3±0.78	29.74±1	31.22±0.63	25.3±1.08
3	26.3±0.93	26.41±1.25	28.53±1.16	30.33±1.47	22.21±0.79

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.10 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile index, N·m/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับสัดส่วนแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.3 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear strength)

4.2.3.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่แป้ง

ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับตัวของเส้นใย คือ ความยาวของเส้นใย และความแข็งแรงของเส้นใยเป็นหลัก จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.11 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่แป้งประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.12 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่แป้งแอมโฟเทอริก พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากในการใส่แป้งประจุที่เกิดจากการดัดแปรที่ติดอยู่ที่แป้งจะส่งผลให้เส้นใยเกิดการรวมตัวกันเป็นกระจุก (flocculation) เมื่อมีการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงฉีก ในกรณีที่ทดสอบฉีกโดนบริเวณที่มีกระจุกมากจะส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงมาก แต่เมื่อฉีกโดนบริเวณที่มีเส้นใยกระจุกอยู่น้อยจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่มีแป้งประจุบวกในแต่ละชุด กล่าวคือในแต่ละปริมาณร้อยละ CHPT ที่ใช้ ได้แก่ ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุดเมื่อ

ใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 1.5, 2, 1 และ 0.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.56±0.36, 6.49±0.3, 6.42±0.43 และ 7.56±0.15 mN·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการเติมแป้งที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 ในปริมาณร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงที่สุด

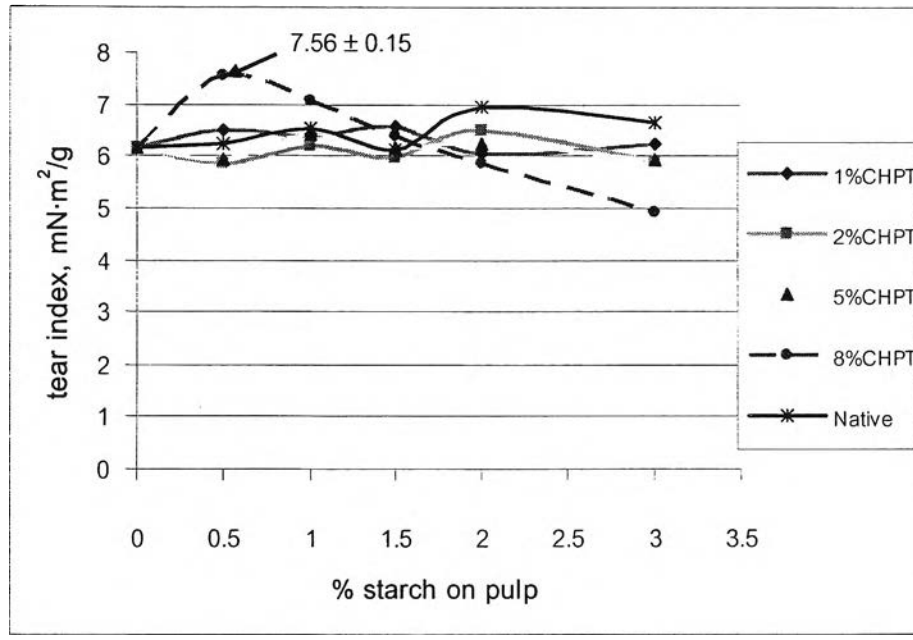
ส่วนกระดาษที่ใช้แป้งแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 2, 1, 1 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.93±0.56, 6.58±0.54, 7.52±0.58 และ 6.85±0.94 mN·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีการเติมแป้งที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 5 ในปริมาณร้อยละ 1 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริก พบว่าแป้งแอมโฟเทอริกจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมากกว่า

ตารางที่ 4.9 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, mN·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, mN·m^2/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	native
0	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23
0.50	6.50±0.26	5.85±0.25	5.95±0.33	*7.56±0.15*	6.22±0.40
1	6.37±0.23	6.20±0.23	**6.42±0.43**	7.06±0.59	6.53±0.74
1.5	**6.56±0.36**	5.99±0.27	6.17±0.27	6.38±0.71	6.14±0.25
2	6.05±0.19	**6.49±0.31**	6.22±0.45	5.87±0.46	**6.94±0.71**
3	6.24±0.17	5.89±0.32	5.92±0.37	4.91±0.22	6.64±0.48

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



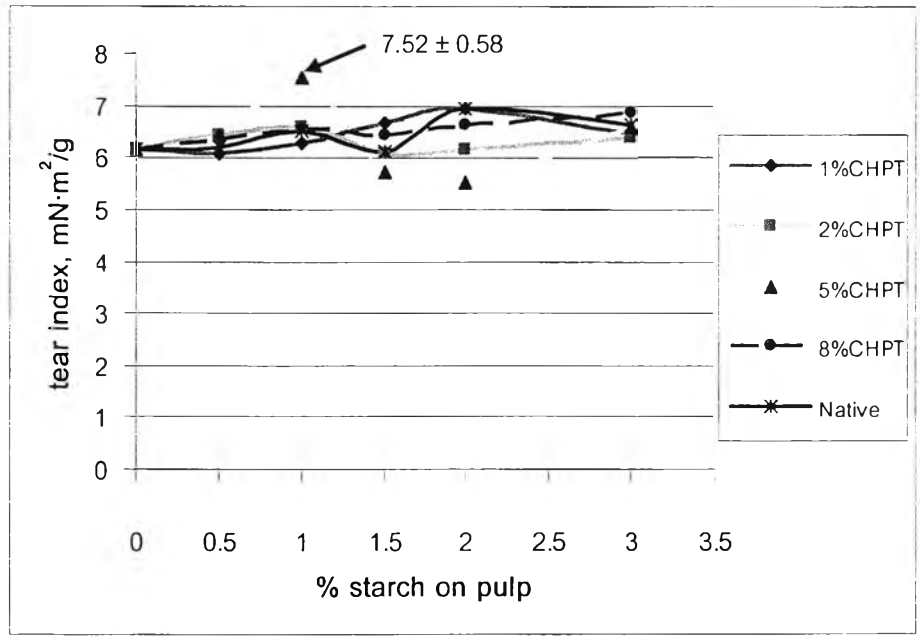
ภาพที่ 4.11 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวก ที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.10 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	native
0	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23
0.50	6.09±0.18	6.42±0.29	6.44±0.27	6.36±0.33	6.22±0.40
1	6.3±0.33	**6.58±0.54**	*7.52±0.58*	6.55±0.21	6.53±0.74
1.5	6.66±2.98	6.1±0.27	5.75±0.55	6.45±0.39	6.14±0.25
2	**6.93±0.56**	6.15±0.41	5.56±0.34	6.62±0.91	**6.94±0.71**
3	6.47±0.16	6.39±0.34	6.6±1.25	**6.85±0.94**	6.64±0.48

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.12 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.3.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่กาก

ตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.13 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่กากประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.14 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใส่กากแอมโฟเทอริก พบว่าค่าความต้านทานแรงฉีกของกระดาษมีความแปรปรวนสูง เช่นเดียวกับการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง เนื่องจากอิทธิพลของแป้งจะส่งผลให้เส้นใยมีการรวมตัวกันเป็นกระจุกเช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษที่มีกากประจุบวกในปริมาณร้อยละ CHPT ที่ใช้ ได้แก่ ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.5, 2 และ 0.5 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.31±0.51, 6.68±0.36, 6.37±0.31 และ 6.99±0.53 $mN \cdot m^2/g$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่มีกากที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักกระดาษ จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงที่สุด ดังตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.13

ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่เติมกากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 2, 1, 1 และ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.36±0.63, 7.27±0.65, 6.56±0.76 และ 5.78±0.59 $mN \cdot m^2/g$ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากที่มี

ปริมาณ CHPT ร้อยละ 1 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 2 ของน้ำหนักกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบการใช้กากระหว่างกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก พบว่ากากแอมโฟเทอริกจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมากกว่ากากประจุบวก เช่นเดียวกับการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้ง

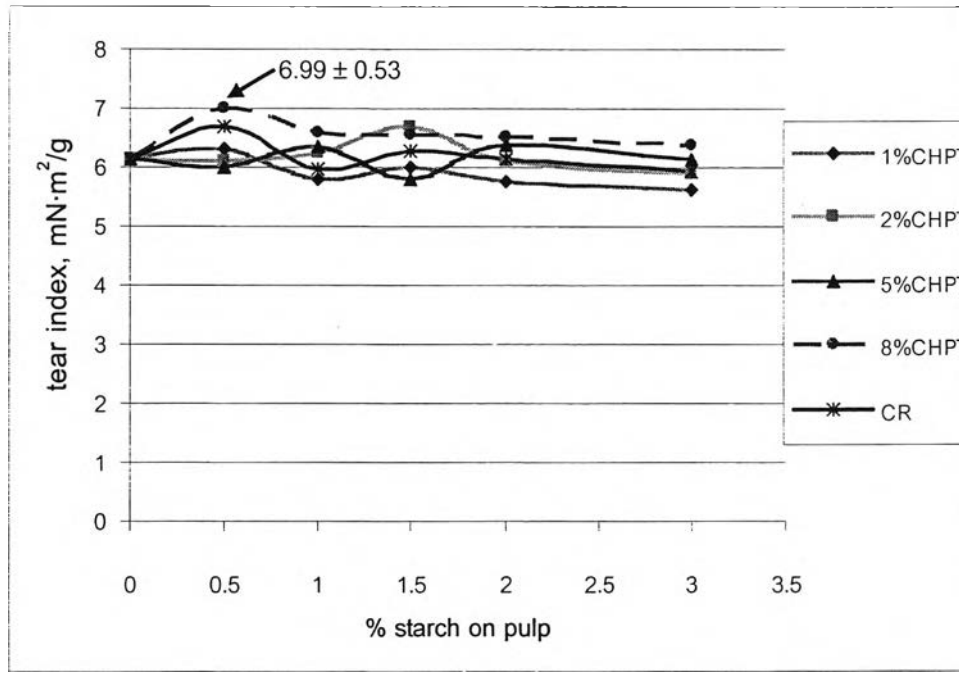
เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกระหว่างกระดาษที่ผสมด้วยแป้งดัดแปรและกากดัดแปร พบว่า แป้งดัดแปรจะส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมากกว่าการใช้กากดัดแปร เนื่องจากการใช้แป้งจะส่งผลให้เส้นใยของกระดาษสร้างพันธะกันได้มากกว่าและรวมตัวเป็นกระจุกได้มากกว่าการใช้กาก อาจเป็นเพราะว่าส่วนที่เป็นเส้นใยของกากมันสำปะหลังไม่ได้ไปสร้างพันธะกับเส้นใยของกระดาษ จึงส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของแป้งมีค่ามากกว่า

ตารางที่ 4.11 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23
0.50	6.31±0.51	6.11±0.28	5.99±0.46	6.99±0.53	6.69±0.4
1	5.8±0.78	6.23±0.32	6.33±0.67	6.59±0.3	5.96±0.12
1.5	6.01±0.4	6.68±0.36	5.8±0.31	6.55±0.49	6.28±0.29
2	5.75±0.26	6.09±0.34	6.37±0.31	6.53±0.29	6.14±0.33
3	5.63±0.18	5.88±0.56	6.13±0.36	6.38±0.42	5.94±0.19

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



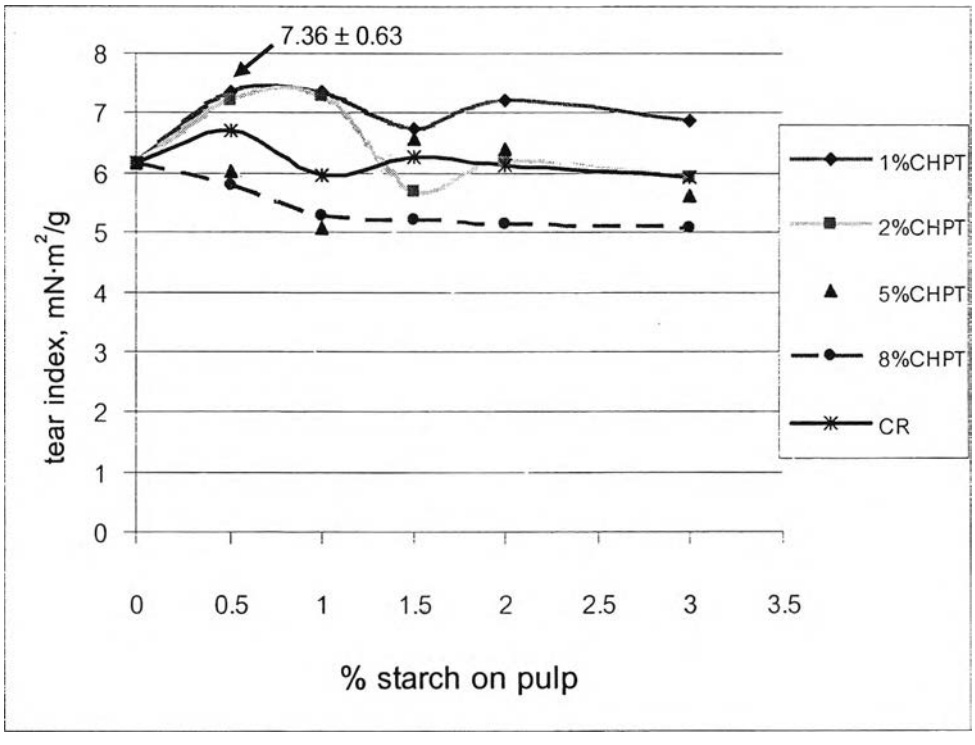
ภาพที่ 4.13 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวก ที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับสัดส่วนแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าความต้านทานแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23	6.15±0.23
0.50	*7.36±0.63*	7.22±0.7	6.03±0.67	**5.78±0.59**	**6.69±0.4**
1	7.34±0.59	**7.27±0.65**	5.08±0.52	5.29±0.35	5.96±0.12
1.5	6.75±0.59	5.68±0.61	**6.56±0.76**	5.22±0.54	6.28±0.29
2	7.22±0.48	6.18±0.97	6.4±0.69	5.14±0.4	6.14±0.33
3	6.87±0.22	5.91±0.4	5.62±0.28	5.06±0.43	5.94±0.19

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.14 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tear index, $mN \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ กับสัดส่วนแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.4 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst strength)

4.2.4.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่แป้ง

ค่าความต้านทานแรงดันทะลุเป็นค่าความแข็งแรงของกระดาษที่ขึ้นอยู่กับพันธะของเส้นใยเป็นหลัก จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.15 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่แป้งประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.16 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่แป้งแอมโฟเทอริก เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แป้งดิบ พบว่าแป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุที่มากกว่า แสดงว่าประจุบวกที่เกิดจากการดัดแปรแป้งจะช่วยจับประจุลบของเส้นใยทำให้เส้นใยของกระดาษสร้างพันธะกันได้มากขึ้น จึงทำให้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงกว่า

นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้ปริมาณแป้งประจุบวกในระบบมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และพบว่ากระดาษที่มีแป้งที่มีปริมาณร้อยละของสาร CHPT เท่ากับ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 2, 3, 2 และ 2 และมีค่าเท่ากับ 1.97±0.05, 1.98±0.04, 1.81±0.2

และ 1.72±0.04 kPa·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากระดาษที่เติมแป้งที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 ในปริมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงที่สุด

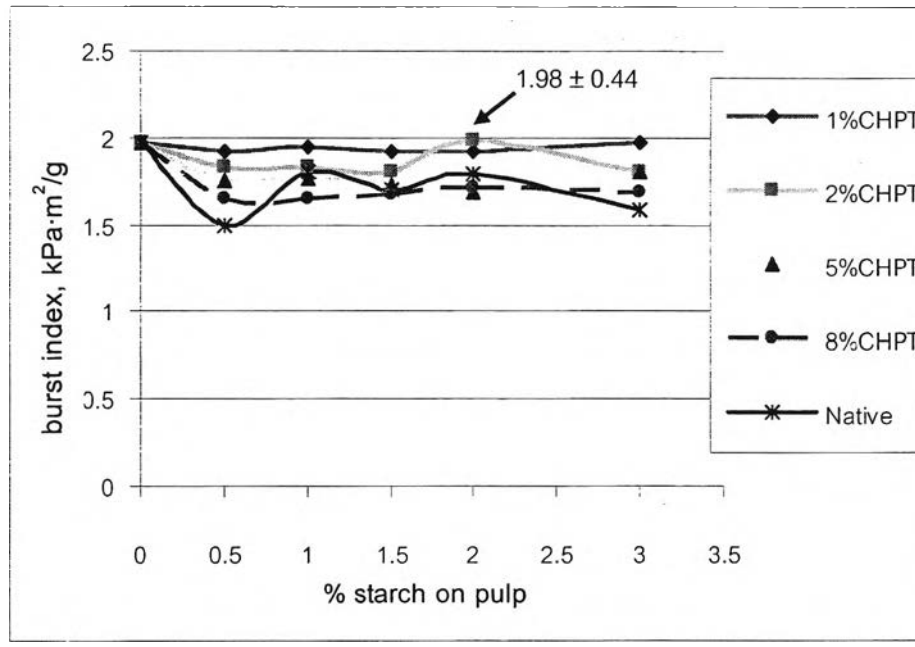
ส่วนกระดาษกล่องที่ใช้แป้งแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุด เมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 2, 1.5, 2 และ 3 และมีค่าเท่ากับ 2.01±0.06, 1.84±0.02, 1.85±0.07 และ 1.93±0.15 kPa·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากระดาษที่เติมแป้งที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 ในปริมาณร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแผ่นกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งทั้ง 2 ชนิด จะพบว่าแป้งแอมโฟเทอริกจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษกล่องลูกฟูกมากกว่าแป้งประจุบวก

ตารางที่ 4.13 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	Native
0	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13
0.50	1.92±0.03	1.83±0.11	**1.75±0.05**	1.65±0.05	1.49±0.67
1	1.94±0.03	1.83±0.05	1.77±0.1	1.65±0.05	**1.8±0.14**
1.5	1.92±0.08	1.8±0.05	1.73±0.03	1.67±0.05	1.7±0.1
2	1.92±0.16	*1.98±0.04*	1.69±0.05	**1.72±0.04**	1.79±0.11
3	**1.97±0.05**	1.8±0.11	1.81±0.2	1.69±0.05	1.58±0.31

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



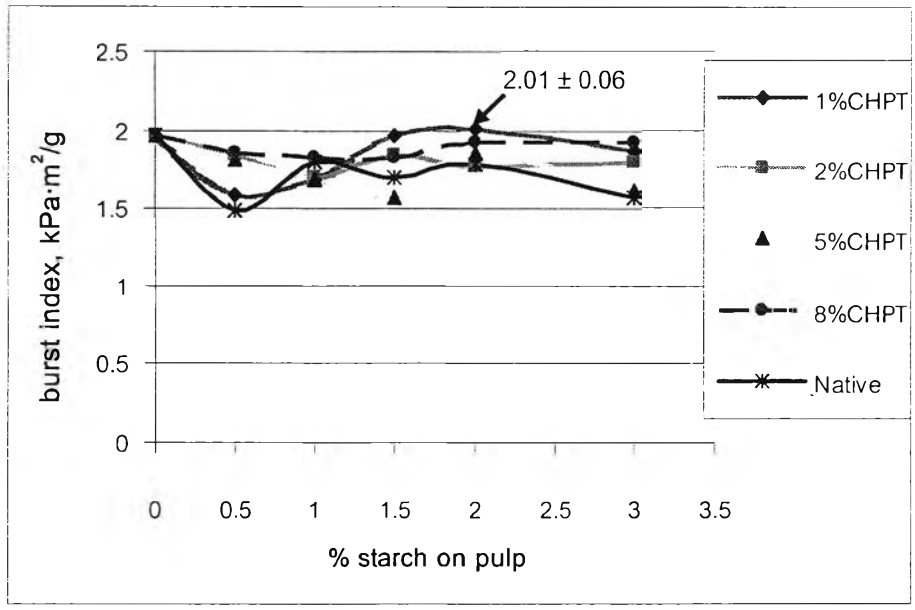
ภาพที่ 4.15 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	Native
0	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13
0.50	1.59±0.19	**1.84±0.04**	1.81±0.04	**1.86±0.04**	1.49±0.67
1	1.68±0.13	1.7±0.2	1.68±0.08	1.83±0.05	**1.8±0.14**
1.5	1.97±0.88	1.84±0.02	1.58±0.14	1.83±0.05	1.7±0.1
2	*2.01±0.06*	1.77±0.05	**1.85±0.07**	1.92±0.1	1.79±0.11
3	1.87±0.09	1.8±0.24	1.61±0.34	1.93±0.15	1.58±0.31

* native หมายถึง แป้งดิบ

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.16 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งแอมโฟเทอริกที่มีCHPTในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.4.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่กาก

ตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.17 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่กากประจุบวก ส่วนตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.18 แสดงค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใส่กากแอมโฟเทอริกจากตารางที่ พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจะมีค่าลดลงเมื่อใช้กากมันสำปะหลังมากขึ้น เนื่องจากกากมันสำปะหลังที่มีอยู่ในระบบมากเกินจะไปขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใย ทำให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษลดลง แต่เมื่อเปรียบเทียบการใช้กากดัดแปรกับกากมันสำปะหลังธรรมดา พบว่ากระดาษที่ผสมกากดัดแปรจะมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่า แสดงว่าประจุบวกที่เกิดจากการดัดแปรจะไปช่วยจับกับประจุลบของเส้นใยของกระดาษทำให้เส้นใยสร้างพันธะต่อกันได้มากกว่ากากที่ไม่มีประจุ

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษกล่องที่มีกากประจุบวกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 0.5, 1.5, 0.5 และ 1.5 และมีค่าเท่ากับ 1.61±0.09, 1.68±0.18, 1.47±0.12 และ 1.44±0.11 kPa·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงที่สุด

ส่วนกากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1, 2, 5 และ 8 จะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากที่สุดเมื่อใช้แป้งในปริมาณร้อยละ 0.5, 0.5, 0.5 และ 1.5 และมีค่าเท่ากับ 1.73±0.2, 1.56±0.03, 1.65±0.02 และ 1.62±0.1 kPa·m^2/g ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษกล่องลูกฟูกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 1 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 0.5 ของน้ำหนักกระดาษจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากทั้ง 2 ชนิด จะพบว่ากากแอมโฟเทอริกจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมากกว่ากากประจุบวก

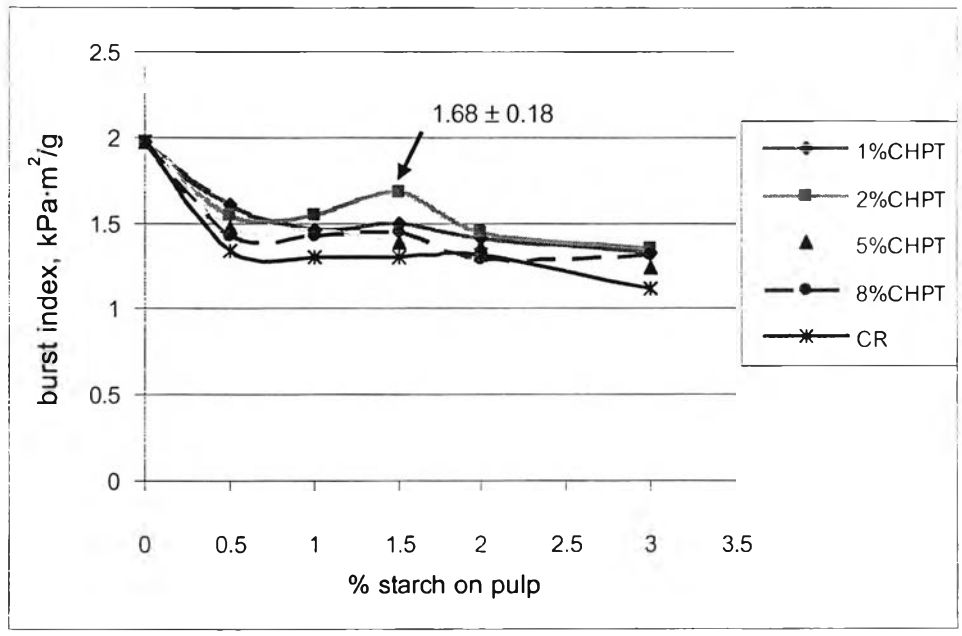
เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ เมื่อใช้แป้งและกากมันสำปะหลังเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้ง พบว่าการใช้แป้งจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมากกว่า เนื่องจากการใช้กากมันสำปะหลังส่วนที่เป็นตัวกากมันอาจจะทำให้กระดาษมีความแข็งแรงลดลงกว่าการใช้แป้งเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 4.15 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13
0.50	**1.61±0.09**	1.55±0.09	**1.47±0.12**	1.42±0.13	**1.34±0.09**
1	1.46±0.12	1.54±0.08	1.46±0.12	1.42±0.13	1.3±0.03
1.5	1.49±0.09	*1.68±0.18*	1.38±0.08	**1.44±0.11**	1.3±0.14
2	1.41±0.05	1.45±0.11	1.36±0.03	1.29±0.07	1.31±0.15
3	1.32±0.05	1.35±0.11	1.24±0.06	1.31±0.05	1.12±0.04

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



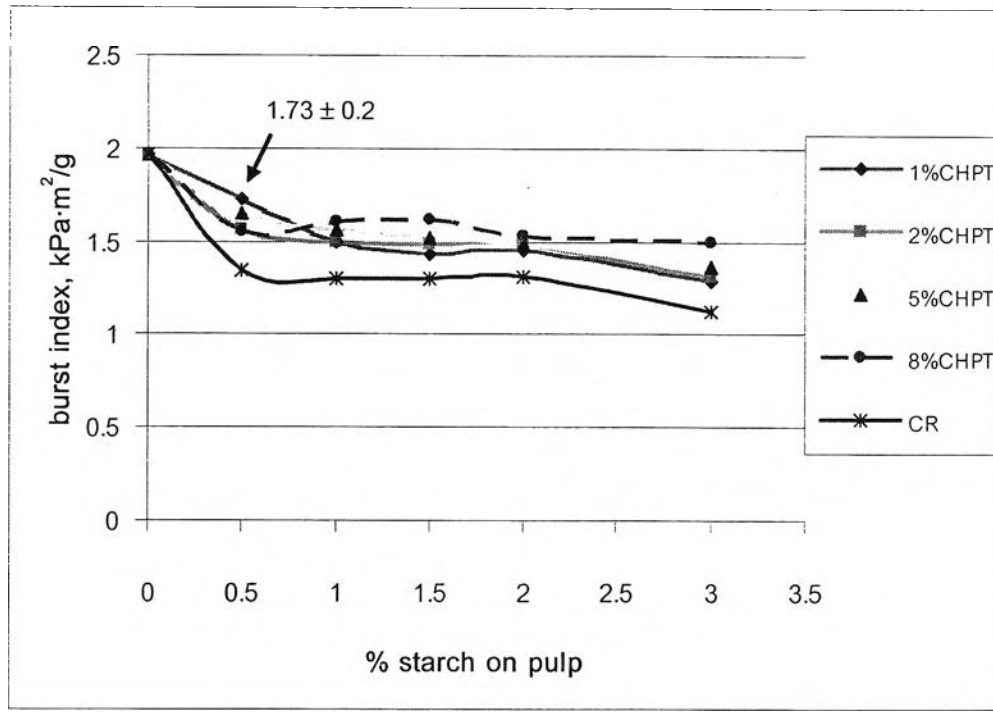
ภาพที่ 4.17 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกที่มี CHPTในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

ตารางที่ 4.16 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, kPa·m^2/g) ± SD				
	1% CHPT	2% CHPT	5% CHPT	8% CHPT	CR
0	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13	1.97±0.13
0.50	*1.73±0.2*	1.56±0.03	1.65±0.02	1.55±0.15	1.34±0.09
1	1.5±0.05	1.5±0.02	1.56±0.06	1.61±0.02	1.3±0.03
1.5	1.43±0.04	1.49±0.07	1.52±0.07	1.62±0.1	1.3±0.14
2	1.45±0.05	1.49±0.11	1.49±0.06	1.53±0.05	1.31±0.15
3	1.29±0.06	1.31±0.06	1.37±0.03	1.5±0.07	1.12±0.04

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.18 ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (burst index, $kPa \cdot m^2/g$) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากแอมโฟเทอริกที่มีCHPTในปริมาณร้อยละต่างๆกับปริมาณแป้ง (ร้อยละ) ที่ใช้

4.2.5 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก

ในการทดลองค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก จะเลือกกระดาษที่มีความแข็งแรงสูงสุด จากผลการทดลองที่ 4.2.2 และ 4.2.4 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่แสดงความต้านทานแรงดึงและความต้านทานแรงดันทะลุ ตามลำดับ เนื่องจากความแข็งแรง 2 ชนิดนี้เป็นค่าที่ใช้วัดความแข็งแรงที่ส่วนมากใช้ทดสอบความแข็งแรงของกระดาษลอนลูกฟูก โดยการทดลองนี้จะเลือกภาวะที่ใช้กากดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงมากที่สุด ได้แก่ ภาวะที่มีกากดัดแปรที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 และ 8 และมีปริมาณแป้งผสมอยู่ร้อยละ 0.5-1.5 มาทำการทดสอบความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก ได้ดังนี้

เมื่อเปรียบเทียบกระดาษลอนลูกฟูกที่มีกากดัดแปรผสมอยู่กับกากที่ไม่ได้ทำการดัดแปร และกระดาษภาวะควบคุม พบว่ากระดาษลอนลูกฟูกที่มีกากดัดแปรผสมจะให้ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกมากกว่ากากที่ไม่ได้ทำการดัดแปรและกระดาษควบคุม เนื่องจากการมีประจุบวกติดอยู่ที่บริเวณผิวของแป้งจะไปช่วยจับประจุลบของเส้นใยทำให้เส้นใยสร้างพันธะกันได้มากขึ้น ส่งผลให้พันธะระหว่างเส้นใยมีมากขึ้น กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกระหว่างกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT เท่ากัน พบว่า กากแอมโฟเทอริกจะส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานกดลอนลูกฟูกมากกว่ากากประจุบวก และเมื่อเรียงลำดับค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกที่มีกากแอมโฟเทอริกและกากประจุบวกผสมอยู่ พบว่ากากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1 ของน้ำหนักกระดาษจะให้ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูงที่สุด (157±10.8 N) รองลงมาคือกากประจุบวกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1 ของน้ำหนักกระดาษ (155±2.36 N) กากแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 2 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักกระดาษ (154±4.71 N) และกากประจุบวกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 และมีสัดส่วนแป้งร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักกระดาษ (123±6.6 N) ตามลำดับดังตารางที่ 4.17 และภาพที่ 4.19 ซึ่งแสดงค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ และพบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.18 และภาพที่ 4.20 แสดงค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษที่ใช้แป้งดัดแปรชนิดแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกที่มีปริมาณ CHPT ร้อยละ 8 พบว่าแป้งแอมโฟเทอริกจะให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงเช่นกัน

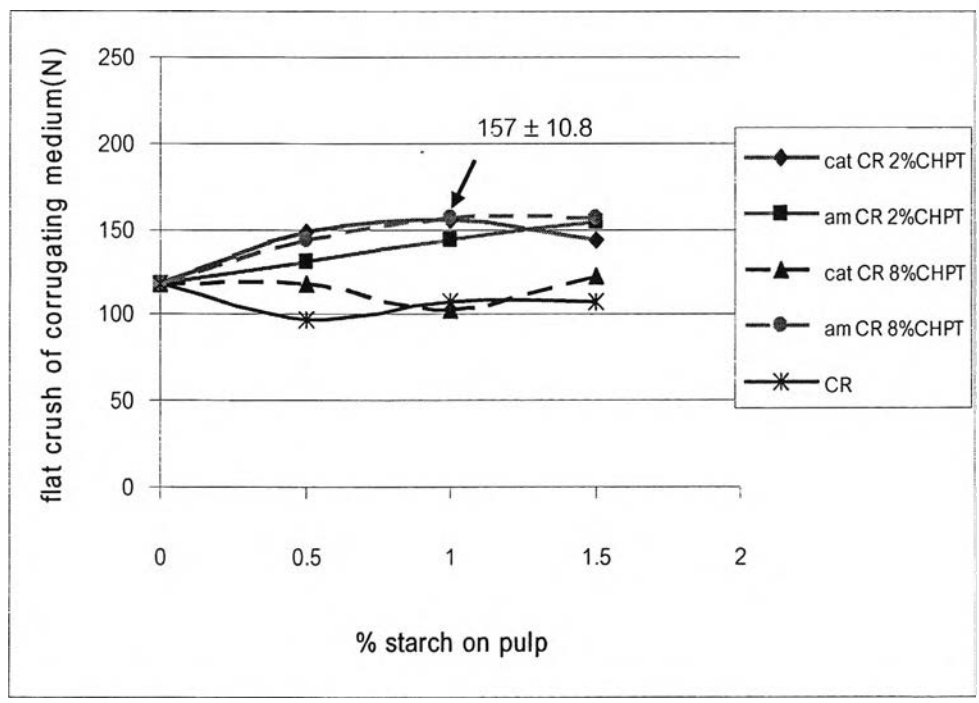
เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษที่ใช้แป้งและกากดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้ง พบว่า แป้งดัดแปรทั้ง 2 ชนิดจะให้ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกสูงกว่าการใช้กากดัดแปร เนื่องจากตัวกากอาจจะมีการสร้างพันธะกับเส้นใยได้ไม่ดีและอาจจะเป็นตัวขัดขวางการสร้างพันธะของเส้นใย จึงส่งผลให้มีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกน้อยกว่าการใช้แป้งดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง ดังตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.21 แต่ถึงแม้ว่าค่าความต้านทานแรงดึงของกระดาษที่ใช้กากจะน้อยกว่าการใช้แป้ง แต่ก็ยังพบว่ามีค่าที่สูงกว่ากระดาษภาวะควบคุม ดังนั้นในการทดลองนี้แสดงว่ากระดาษที่ผลิตได้โดยใช้กากมันสำปะหลังดัดแปรเหมาะแก่การนำไปทำกระดาษลอนลูกฟูก

ตารางที่ 4.17 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก(N) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละต่างๆ

% แป้ง	ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก(N) ± SD				
	cat2% CHPT	cat8% CHPT	am2% CHPT	am8% CHPT	CR
0	118±0	118±0	118±0	118±0	118±0
0.50	149±17	118±0	131±11.31	144±4.71	96±2.31
1	**155±2.36**	103±4.04	144±13.12	***157±10.8***	**108±0**
1.5	144±16.67	**123±6.6**	**154±4.71**	157±12.25	108±8.12

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง, cat หมายถึง ประจุบวก, am หมายถึง แอมโฟเทอริก

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



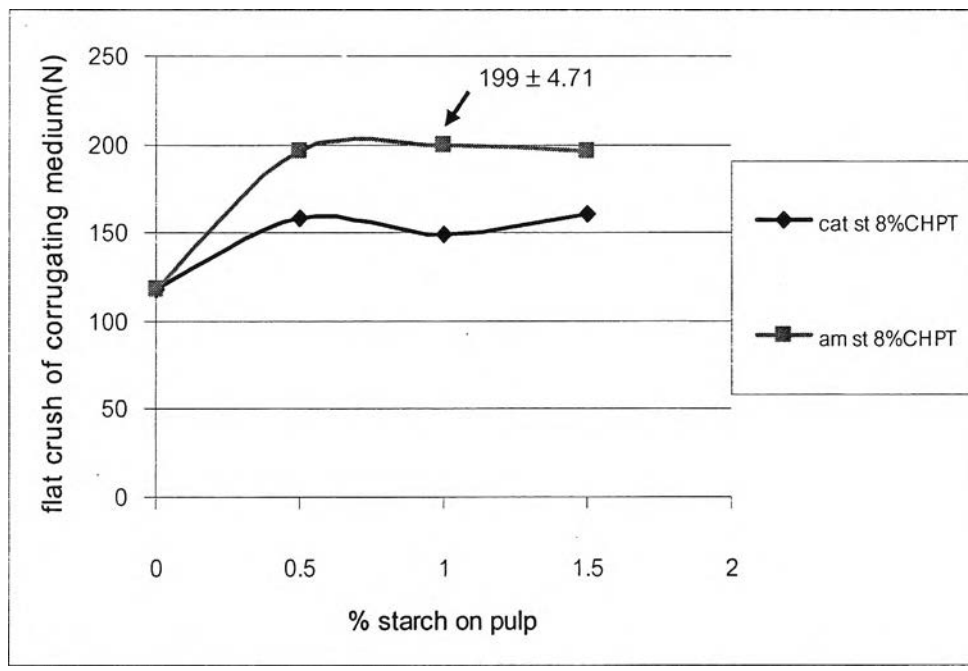
ภาพที่ 4.19 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (N) ของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก

ตารางที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก(N) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกที่มี CHPT ในปริมาณร้อยละ 8

% แป้ง	ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก(N) ± SD	
	cat8% CHPT	am8% CHPT
0	118±0	118±0
0.50	159±10.27	196±8.16
1	149±16.5	*199±4.71*
1.5	**160±4.71**	196±14.14

* cat หมายถึง ประจุบวก, am หมายถึง แอมโฟเทอริก

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



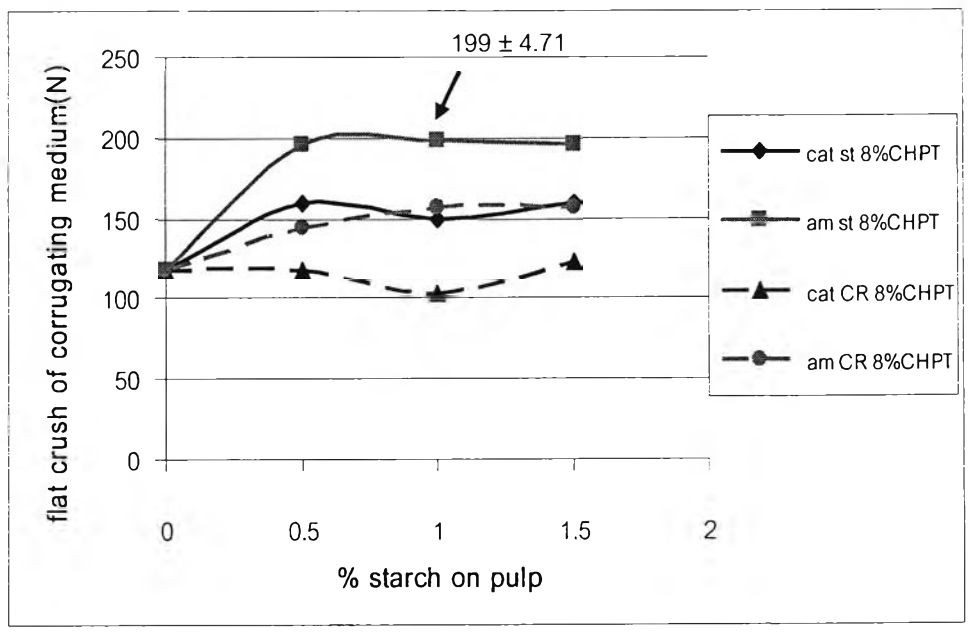
ภาพที่ 4.20 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (N) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริก

ตารางที่ 4.19 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (N) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวก แป้งแอมโฟเทอริก กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก

% แป้ง	ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก(N) ± SD				
	starch		CR		CR
	cat8% CHPT	am8% CHPT	cat8% CHPT	am8% CHPT	
0	118±0	118±0	118±0	118±0	118±0
0.50	159±10.27	196±8.16	118±0	144±4.71	96±2.31
1	149±16.5	*199±4.71*	103±4.04	**157±10.8**	**108±0**
1.5	**160±4.71**	196±14.14	**123±6.6**	157±12.25	108±8.12

* CR หมายถึง กากมันสำปะหลัง, cat หมายถึง ประจุบวก, am หมายถึง แอมโฟเทอริก

% CHPT หมายถึง ปริมาณร้อยละของสาร (3-คลอโร-2-ไฮดรอกซีโพรพิล)ไตรเมทิล แอมโมเนียม



ภาพที่ 4.21 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (N) ของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวก แป้งแอมโฟเทอริก กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก

4.2.6 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

นำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ two - way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณการเติมแป้ง ความสัมพันธ์ของปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (ร้อยละ) และความสัมพันธ์ของปริมาณการเติมแป้งและปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (ร้อยละ) ในแต่ละกลุ่มการทดลอง ที่มีผลต่อความแข็งแรงของกระดาษ

4.2.6.1 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง

ตารางที่ 4.20 ค่า p-value สำหรับค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง

กระดาษตัวอย่างที่ผสมด้วยแป้ง/กากดัดแปร	ปริมาณการเติมแป้ง (A)	ปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (B)	ความสัมพันธ์ระหว่าง A และ B
แป้งประจุบวก	0.3053	0.0048	0.6377
แป้งแอมโฟเทอริก	0.7640	0.0000	0.6634
กากประจุบวก	0.0000	0.0000	0.0604
กากแอมโฟเทอริก	0.0000	0.0000	0.0031

จากตารางที่ 4.20 แสดงค่า p-value ของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึง พบว่ากระดาษที่ใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกที่มีการเติมแป้งในปริมาณต่างๆ จะส่งผลให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) ส่วนการใช้ปริมาณสารละลาย CHPT ที่ระดับต่างๆ พบว่าแป้งดัดแปรและกากดัดแปรทุกประเภทจะให้ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) และที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมแป้งและปริมาณการใช้สารละลาย CHPT พบว่ากากแอมโฟเทอริกจะมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) แสดงว่าการใช้กากแอมโฟเทอริกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่มีปริมาณ CHPT ต่างๆ และใช้ในปริมาณสัดส่วนต่างๆ จะส่งผลให้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกัน

เมื่อนำค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกมาทำการวิเคราะห์โดยใช้ one-way ANOVA ดังตารางแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข พบว่า

ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริก จะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากทั้ง 2 ชนิด คือกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก จะพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกัน เช่นกัน

ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษ เมื่อเปรียบเทียบการใช้แป้งดัดแปรและกากมันสำปะหลังดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้แป้งดัดแปรและกากดัดแปรส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดึงแตกต่างกัน

4.2.6.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก

ตารางที่ 4.21 ค่า p-value สำหรับค่าความแข็งแรงต่อแรงฉีก

กระดาษตัวอย่างที่ผสมด้วยแป้ง/กากดัดแปร	ปริมาณการเติมแป้ง (A)	ปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (B)	ความสัมพันธ์ระหว่าง A และ B
แป้งประจุบวก	0.0015	0.0206	0.0000
แป้งแอมโฟเทอริก	0.0384	0.1067	0.0020
กากประจุบวก	0.0340	0.0000	0.1221
กากแอมโฟเทอริก	0.0011	0.0000	0.0002

จากตารางที่ 4.21 แสดงค่า p-value ของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีก พบว่าการเติมแป้งดัดแปรและกากดัดแปรทุกประเภทในปริมาณต่างๆ จะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาการใช้ปริมาณสารละลาย CHPT ที่ระดับต่างๆ พบว่าแป้งแอมโฟเทอริกจะให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p\text{-value} > 0.05$) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมแป้งและปริมาณการใช้สารละลาย CHPT พบว่ากระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกจะมีค่าความ

แข็งแรงต่อแรงฉีกแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value > 0.05) แสดงว่าการใช้กากประจุบวกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่มีปริมาณ CHPT ต่างๆ และ ใช้ในปริมาณสัดส่วนต่างๆ จะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกระหว่างกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริก โดยใช้ one-way ANOVA ดังตารางแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข จะพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากทั้ง 2 ชนิด คือ กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกากแอมโฟเทอริกและกากประจุบวกมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ผสมด้วยกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ส่วนการเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้แป้งดัดแปรและกากมันสำปะหลังดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงฉีกของกระดาษที่ใช้กากดัดแปรมีค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มความแข็งแรง

4.2.6.2 ค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

ตารางที่ 4.22 ค่า p-value สำหรับค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ

กระดาษตัวอย่างที่ผสมด้วยแป้ง/กากดัดแปร	ปริมาณการเติมแป้ง (A)	ปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (ร้อยละ) (B)	ความสัมพันธ์ระหว่าง A และ B
แป้งประจุบวก	0.1613	0.0000	0.0888
แป้งแอมโฟเทอริก	0.0283	0.0000	0.0022
กากประจุบวก	0.0000	0.0000	0.2271
กากแอมโฟเทอริก	0.0000	0.0000	0.0119

จากตารางที่ 4.22 แสดงค่า p-value ของค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ พบว่า ค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ผสมด้วยแป้งประจุบวกมีความแตกต่างกันอย่างมีไม่มีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value > 0.05) เมื่อเติมแป้งในปริมาณต่างๆ กัน ส่วนการใช้ปริมาณสารละลาย CHPT ที่ระดับต่างๆ พบว่าการเติมแป้งดัดแปรและกากดัดแปรทุกประเภท จะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมแป้งและปริมาณการใช้สารละลาย CHPT พบว่าการใช้แป้งแอมโฟเทอริกและกากแอมโฟเทอริกจะส่งผลให้กระดาษมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value ≤ 0.05) แสดงว่าการใช้กากแอมโฟเทอริกเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงที่มีปริมาณ CHPT ต่างๆ และใช้ในปริมาณสัดส่วนต่างๆ จะส่งผลให้มีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษระหว่างเติมแป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริก โดยใช้ one-way ANOVA ดังตารางแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของแป้งทั้ง 2 ชนิดจะไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใช้แป้งประจุบวกและแป้งแอมโฟเทอริกมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกากทั้ง 2 ชนิด จะพบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกจะส่งผลให้มีกระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุแตกต่างกัน

ส่วนค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษที่ใช้แป้งดัดแปรและกากมันสำปะหลังดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ พบว่าค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุของกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้แป้งดัดแปรและกากดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงภายในกระดาษจะส่งผลให้กระดาษมีค่าดัชนีความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุแตกต่างกัน

4.2.6.2 ค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก

ตารางที่ 4.23 ค่า p-value สำหรับค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก

กระดาษตัวอย่างที่ผสมด้วยแป้ง/กากดัดแปร	ปริมาณการเติมแป้ง (A)	ปริมาณการใช้สารละลาย CHPT (ร้อยละ) (B)	ความสัมพันธ์ระหว่าง A และ B
กากประจุบวก	0.7409	0.0000	0.1102
กากแอมโฟเทอริก	0.0106	0.0000	0.5204

จากตารางที่ 4.22 แสดงค่า p-value ของค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก พบว่า การใช้กากแอมโฟเทอริกเป็นสารเพิ่มความแข็งโดยมีการเติมแป้งในระดับต่างๆ จะส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value $\leq$ 0.05) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารละลาย CHPT ที่ระดับต่างๆ พบว่าค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษเมื่อผสมด้วยกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value $\leq$ 0.05) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเติมแป้งและปริมาณการใช้สารละลาย CHPT พบว่าการใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p-value $\leq$ 0.05) แสดงว่าการใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริกส่งผลให้มีกระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษของกากประจุบวกและกากแอมโฟเทอริก โดยใช้ one-way ANOVA ดังตารางแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข จะพบว่าค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่าการใช้การใช้กากประจุบวกและกากแอมโฟทอริกจะส่งผลให้กระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษที่ใช้แป้งดัดแปรและกากมันสำปะหลังดัดแปรเป็นสารเพิ่มความแข็งแรงชนิดแห้งในกระดาษ พบว่าค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกของกระดาษจะมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เช่นเดียวกัน แสดงว่าการใช้แป้งดัดแปรและกากดัดแปรจะส่งผลให้มีกระดาษมีค่าความต้านทานแรงกดลอนลูกฟูกแตกต่างกัน