บทที่ 6

การวิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบกระดาษกล่องไม่เคลือบก่อนเติมแป้ง

1. น้ำหนักกระดาษ

น้ำหนักกระดาษที่วัดได้ เป็นไปตามมาตรฐาน มอก. คืออยู่ในช่วง ± 3% ในจำนวนนี้มีเพียงกระดาษ 270 กรัมต่อตารางเมตรที่มีน้ำหนักต่ำกว่าน้ำหนักมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 : เปรียบเทียบน้ำหนักมาตรฐานและน้ำหนักจริงของกระดาษ

น้ำหนักมาตรฐาน(กรัมต่อตารางเมตร)	230	250	270	290	310	350	400	450	500
น้ำหนักจริง(กรัมต่อตารางเมตร)	233.83	251.1	269.72	297.15	316.23	356.93	406.79	458.86	506.53
ความคลาดเคลื่อน	1.67	0.44	-0.1	2.47	2	1.98	1.7	1.97	1.31

2. ความต้านทานแรงดันทะลุ

ตารางที่ 5.1 เป็นข้อมูลที่ทดสอบภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐาน ตามมาตรฐาน TAPPI พบว่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่วัดได้ มีค่ามากกว่าข้อมูลความต้านทานแรงดันทะลุในตารางที่ 1.2 ทั้งนี้อาจเนื่องจาก

ก. สภาวะทดสอบที่ต่างกัน โดยทั่วไปสภาวะปกติมีความชื้นและ อุณหภูมิมากกว่าสภาวะมาตรฐาน ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงต่ำเพราะดูดความชื้นไว้มาก

ข. เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณภาพประจำวันไม่มีมาตรฐานเพียงพอ

ค. ข้อมูลในตารางที่ 1.2 เป็นข้อมูลที่รวบรวมไว้ในช่วงปี 2534 ถึง 2535 ส่วนข้อมูลในตารางที่ 5.1 เป็นข้อมูลของเดือน กันยายน - ตุลาคม 2536 อาจมีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการผลิตบางอย่าง เช่น วัตถุดิบ สารเคมี เป็นต้น ทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกัน

พิจารณาข้อมูลของกระดาษชุดเดียวกับที่ทดสอบในตาราง 5.1 แต่ทดสอบในสภาวะไม่มาตรฐาน พบว่าแตกต่างกัน โดยความต้านทานแรงดันทะลุที่ทดสอบในสภาวะไม่มาตรฐานมีค่ามากกว่าข้อมูลที่ทดสอบในสภาวะมาตรฐาน เมื่อกระดาษมีน้ำหนักต่ำในช่วง 230 ถึง 290 กรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีค่าน้อยกว่าเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมากในช่วง 400 ถึง 500 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ตารางที่ 6.2 แสดงความแตกต่างระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุที่วัดภายใต้สภาวะทดสอบมาตรฐานจากตารางที่ 5.1 ในสภาวะไม่มาตรฐาน ซึ่งเป็นข้อมูลจากตัวอย่างในช่วงเดียวกันกับในตาราง 5.1 ข้อมูลจากตาราง 1.2 และค่าตามมาตรฐาน มอก.

ตารางที่ 6.2 : เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกล่องไม่เคลือบ ซึ่งมาจากที่มาต่างๆ

ที่มาของข้อมูล	น้ำหนักมาตรฐาน(กรัมต่อตารางเมตร)								
	230	250	270	290	310	350	400	450	500
ข้อมูลจากตาราง 5.1	5.04	5.27	4.91	5.65	5.33	6.36	6.79	7.35	7.6
ข้อมูลทดสอบในสภาวะไม่มาตรฐาน	5.16	5.4	5.21	5.64	5.46	6.3	6.58	7.04	7.46
ข้อมูลจากตาราง 1.2	4.46	4.66	4.78	5.24	5.37	5.7	6.42	6.6	7.4
ค่ามาตรฐาน มอก.	4.6	5	5.4	-	6.2	7	8	9	10

หน่วย : กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุและน้ำหนักกระดาษ พบว่าความชันของกราฟลดลงเมื่อน้ำหนักกระดาษสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเนื่องจาก

ก. สัดส่วนของชั้นขาวลดลงเมื่อน้ำหนักกระดาษสูงขึ้น เพราะในการผลิตกระดาษกล่องไม่เคลือบที่ผู้วิจัยศึกษานั้น กระดาษหนัก 230 ถึง 290 กรัมต่อตารางเมตร มีน้ำหนักชั้นขาวประมาณ 70 กรัมต่อตารางเมตร และกระดาษหนัก 310 ถึง 500 กรัมต่อตารางเมตรมีน้ำหนักชั้นขาวประมาณ 80 กรัมต่อตารางเมตร ในชั้นขาวมีเยื่อใยสั้นเป็นส่วนผสมประมาณ 35% จึงมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นน้ำตาลและฟิลเลอร์ซึ่งเป็นเศษกระดาษล้วนๆ ถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะเห็นได้ว่ากระดาษ 230 กรัมต่อตารางเมตร มีชั้นขาว(70/230)x100 = 30.4% ในขณะที่กระดาษ 500 กรัมต่อตารางเมตร มีชั้นขาว (80/500)x100=16%

ข. กระดาษชั้นน้ำตาลและฟิลเลอร์มีฟรีเนสสูงขึ้น เมื่อกระดาษมีน้ำหนักมากขึ้น โดยกระดาษ 230 ถึง 290 กรัมต่อตารางเมตรเยื่อมีค่าฟรีเนส 280-320 ซีเอสเอฟ (Canadian standard freeness : CSF) และกระดาษ 310 กรัมต่อตารางเมตรขึ้นไปมีค่าฟรีเนส 300-340 ซีเอสเอฟ นั่นคือการบดเยื่อน้อยลงเมื่อกระดาษมีน้ำหนักสูงขึ้น การบดเยื่อมีผลโดยตรงต่อจำนวนพันธะ เมื่อบดเยื่อน้อย จำนวนพันธะก็น้อยตามไปด้วย ทำให้ความต้านทานแรงดันทะลุไม่แปรผันโดยตรงกับน้ำหนักกระดาษ ถ้าเขียนความสัมพันธ์ของความต้านทานแรงดันทะลุและน้ำหนักกระดาษ ในรูปของดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุดังแสดงในรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักกระดาษยิ่งสูงขึ้น ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุยิ่งลดลง ซึ่งโดยปกติดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุควรจะมีค่าคงที่

รูปที่ 6.3 เป็นการเปรียบเทียบดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกล่องไม่เคลือบที่ผู้วิจัยศึกษากับค่าตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พบว่าเฉพาะกระดาษ 230 และ 250 กรัมต่อตารางเมตรเท่านั้นที่มีความต้านทานแรงดันทะลุเป็นไปตามมาตรฐานฯ และที่น้ำหนัก 270 กรัม ต่อตารางเมตรขึ้นไปมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานฯ

การทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุจะทดสอบทั้ง 2 ด้านคือด้านบนและด้านล่าง การทดสอบด้านบนคือการทดสอบโดยให้แรงดันจากทางด้านบนของตัวอย่างทดสอบ การทดสอบด้านล่างคือการทดสอบโดยให้แรงดันจากทางด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ ความต้านทานแรงดันทะลุด้านบนมีค่าต่ำกว่าด้านล่าง และจะแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อกระดาษมีน้ำหนักสูงขึ้น การที่ความต้านทานแรงดันทะลุด้านบนมีค่าต่ำกว่าด้านล่างเนื่องจากด้านบนของกระดาษซึ่งมีเยื่อใยสั้น 35% และมีการเติมสารเคมี เช่น แวกซ์ พีวีเอและแป้งแปรรูป สารเคมีเหล่านี้จะตกค้างอยู่บนผิวหน้าของกระดาษชั้นบน ช่วยให้กระดาษด้านบนเรียบ มีความแข็งแรงผิวสูงขึ้นรวมทั้งมีความแข็งสูงขึ้นด้วย เมื่อทดสอบแรงดันทะลุด้านบน เนื่องจากกระดาษด้านบนมีความแข็งมาก เมื่อแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นถึงจุดที่เส้นใยแยกจากกัน กระดาษจะขาดทันที ส่วนชั้นล่างประกอบด้วยเศษกระดาษล้วนๆ ไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ ด้านล่างของกระดาษจึงมีความหนาแน่นและมีความแข็ง (Hardness) ต่ำกว่า เมื่อกระดาษถูกดัน กระดาษจะยุบตัวลงไป การยุบตัวนี้ช่วยดูดซับพลังงานบางส่วนไว้ ทำให้ความต้านทานแรงดันทะลุด้านล่างสูงกว่าด้านบน

3. ความสามารถในการทรงรูป

ในรูปที่ 6.4 ความทรงรูปของกระดาษเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักกระดาษเพิ่มขึ้น โดยทฤษฎีแล้ว ความทรงรูปจะแปรตาม (ความหนา)^3 และค่ายังโมดูลัส (Young modulus) ตามสมการ

$$\text{Stiffness} = \frac{ET^3}{12} \times \frac{W}{L^2} \qquad (6.1)$$

โดย

E = Young's Modulus

T = ความหนาของกระดาษ

W = ความกว้างของตัวอย่างกระดาษทดสอบ

L = ความยาวของตัวอย่างกระดาษทดสอบ

การหาค่า E สามารถหาได้จากความชันกราฟของความเครียด-ความเค้น (Stress-Strain) ขณะทดสอบความต้านทานแรงดึง

สมการที่ 6.1 ใช้ได้เมื่อกระดาษมีความหนาแน่นคงที่ จากสมการแสดงว่าที่ความหนาแน่นเท่ากัน กระดาษที่มีน้ำหนักสูงกว่าจะมีความสามารถในการทรงรูปสูงกว่ากระดาษที่มีน้ำหนักต่ำกว่าตามค่าความหนายกกำลัง 3 แต่ถ้าน้ำหนักกระดาษท่ากัน ความสามารถในการทรงรูปจะแปรตามความหนายกกำลัง 2 ซึ่งสามารถสังเกตุได้จากในการผลิต กระดาษก่อนเข้าชุดลูกรีดจะมีความสามารถในการทรงรูปสูงกว่ากระดาษที่ผ่านชุดลูกรีด โดยที่ความต้านทานแรงดันทะลุไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากลูกรีดจะรีดกระดาษให้มีความหนาลดลงแต่ไม่ได้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใย แต่กระดาษก่อนผ่านลูกรีดจะมีความเรียบ (Smoothness) และความมัน (Gross) ต่ำจนไม่สามารถใช้ในงานพิมพ์ได้

การทดสอบความสามารถในการทรงรูปในการทดลองที่ 4.1 ทดสอบเฉพาะความสามารถในการทรงรูปในแนวขนานเครื่องและงอจากด้านบนของกระดาษ รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Log(ความสามารถในการทรงรูป)และความหนา เห็นได้ว่าความสามารถในการทรงรูปของกระดาษกล่องไม่เคลือบมีความสัมพันธ์เป็นกำลัง 3 ถึง 4 ของความหนา โดยที่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ความชันของกราฟ Log(ความสามารถในการทรงรูป)จะลดลง ในขณะที่ความสามารถใน

การทรงรูปของกระดาษสำหรับพับกล่องแปรตามความหนายกกำลัง 2.6 (Casey, 1981)

De Clerk (1992) อธิบายว่าความสามารถในการทรงรูปจะขึ้นกับความหนาของกระดาษและความแข็งแรงของของกระดาษชั้นบนและชั้นล่าง โดยไม่คำนึงถึงความแข็งแรงของชั้นกระดาษตรงกลาง เช่นเดียวกับเหล็กตัวไอ (I-beam) ที่ใช้ในการก่อสร้าง ซึ่งสามารถรับแรงได้โดยอาศัยปัจจัยเนื่องจากความแข็งแรงของความสูงและความกว้างของเหล็กด้านบนและด้านล่าง การทำกระดาษให้มีความสามารถในการทรงรูปสูงจึงควรพิจารณาความหนาและความแข็งแรงของกระดาษชั้นบนและชั้นล่าง

4. ความต้านทานแรงดึง

ความต้านทานแรงดึงซึ่งวัดกันทั่วไปไม่ใช่ความต้านทานแรงดึงที่แท้จริง เพราะวัดเป็นภาระที่ทำให้กระดาษขาดต่อความกว้าง แทนที่จะเป็นต่อพื้นที่เหมือนที่ใช้กับวัสดุอื่น เนื่องเพราะกระดาษมีความหนาน้อยมากเมื่อเทียบกับความกว้าง โดยปกติความต้านทานแรงดึงจะแปรผันโดยตรงตามน้ำหนักกระดาษ มักใช้ความต้านทานแรงดึงทดสอบกระดาษที่มีน้ำหนักไม่สูง เช่น กระดาษทิชชู่ กระดาษพิมพ์เขียน หรือกระดาษผิวกล่องซึ่งปกติมีน้ำหนักไม่เกิน 250 กรัมต่อตารางเมตร สำหรับกระดาษที่มีน้ำหนักมาก เช่น กระดาษชิพบอร์ดซึ่งอาจมีน้ำหนักสูงถึง 650 กรัมต่อตาราง-เมตร มักจะทดสอบความแข็งแรงอย่างอื่นมากกว่าความต้านทานแรงดึง รูป 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและน้ำหนักกระดาษ เส้นกราฟมีความชันมากขึ้นเมื่อน้ำหนักกระดาษมากขึ้น น่าจะมาจาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

ก. กระดาษที่มีน้ำหนักมากขึ้น จะมีความหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทำให้ความหนามีความสำคัญมากขึ้น แรงที่ใช้ดึงให้กระดาษขาดจะมากขึ้น เนื่องจากส่วนที่รับแรงดึงเปลี่ยนจากความกว้างกลาย เป็นพื้นที่หน้าตัด

ข. กระดาษที่มีน้ำหนักมากขึ้นมีชั้นขาวมากขึ้นทำให้มีความต้านทานแรงดึงมากขึ้น

ในขณะทดสอบสังเกตุได้ว่าตัวอย่างทดสอบน้ำหนักตั้งแต่ 400 กรัมต่อตารางเมตรขึ้นไปหลายตัวอย่างขาดที่ตัวจับ เนื่องจากเมื่อกระดาษมีน้ำหนักมากขึ้นจะมีความต้านทานแรงดึงสูงขึ้นไม่สามารถใช้ตัวจับชิ้นงานปกติในเครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงได้ เพราะจะจับไม่อยู่ ต้องเปลี่ยนตัวจับเป็นแบบพิเศษและใช้แรงจับสูงขึ้น เนื่องจากกระดาษมีความหนามาก การใช้แรงใน

การจับตัวอย่างทดสอบสูงทำให้ ชิ้นงานทดสอบถูกบีบจนความหนาลดลง บริเวณที่ถูกบีบจะมีความเครียดสูง ชิ้นงานทดสอบจึงขาดบริเวณที่จับ อีกประการหนึ่ง ชิ้นงานทดสอบอาจเกิดการเสียรูปเมื่อถูกบีบ ทำให้ความต้านทานแรงดึงเสียไป ชิ้นงานทดสอบจึงขาดที่ตัวจับ นี่อาจเป็นสาเหตุหนึ่งมาตรฐาน มอก. ไม่ระบุความต้านทานแรงดึง แต่ระบุเป็นความต้านทานแรงดันทะลุแทน

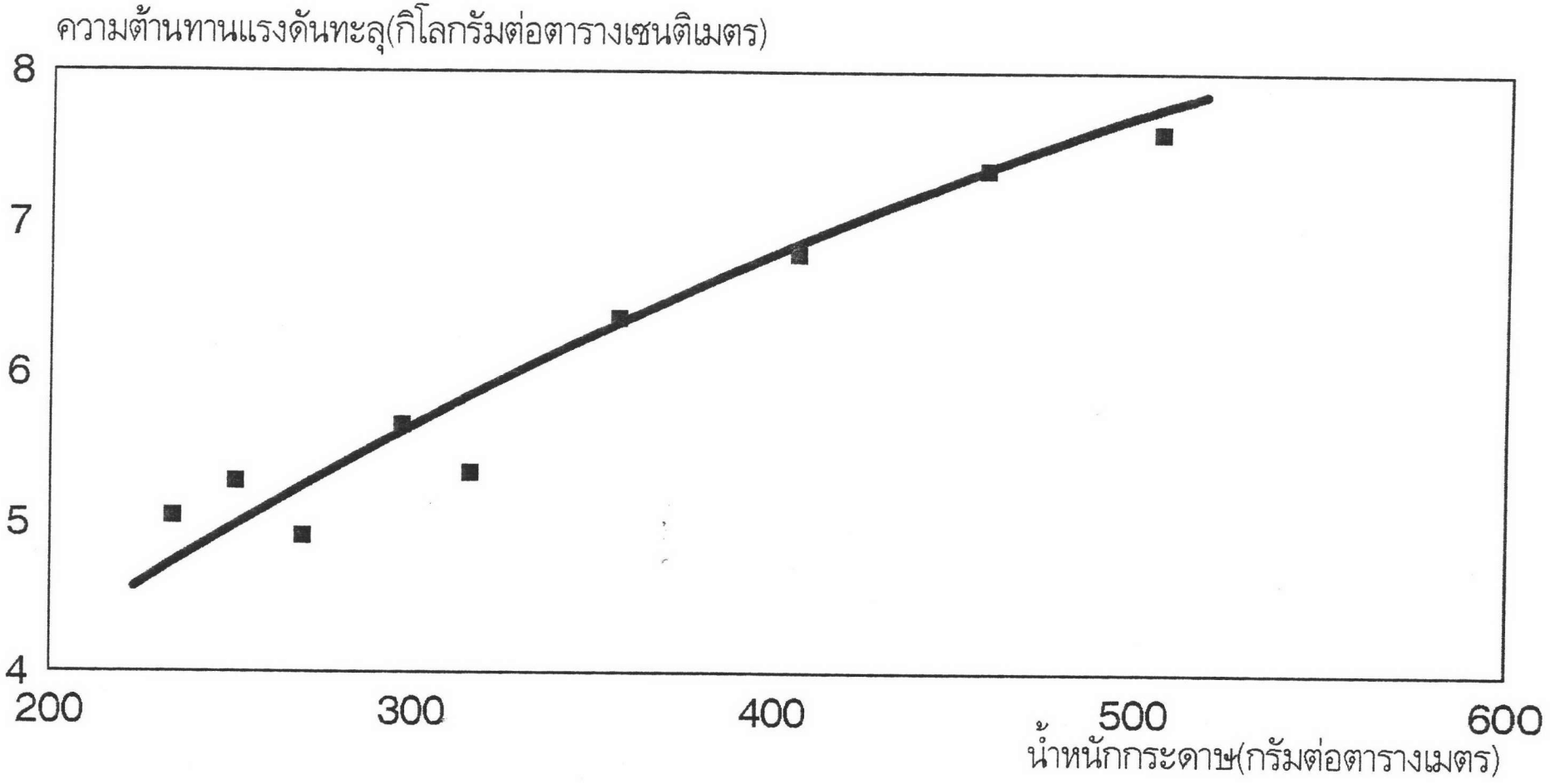
ความต้านทานแรงดึงมีค่าในแนวขนานเครื่องมากกว่าแนวขวางเครื่อง เนื่องจากเส้นใยจะเรียงตัวในแนวขนานเครื่องมากกว่าแนวขวางเครื่อง การดึงตัวอย่างทดสอบในแนวขนานเครื่องเป็นการดึงในแนวขนานกับเส้นใยส่วนใหญ่ จึงต้องใช้แรงดึงมากกว่าการดึงในแนวขวางเครื่อง อัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงในแนวขนานเครื่องและแนวขวางเฉลี่ยเครื่องเท่ากับ 1.84

5. ความยืดตัว

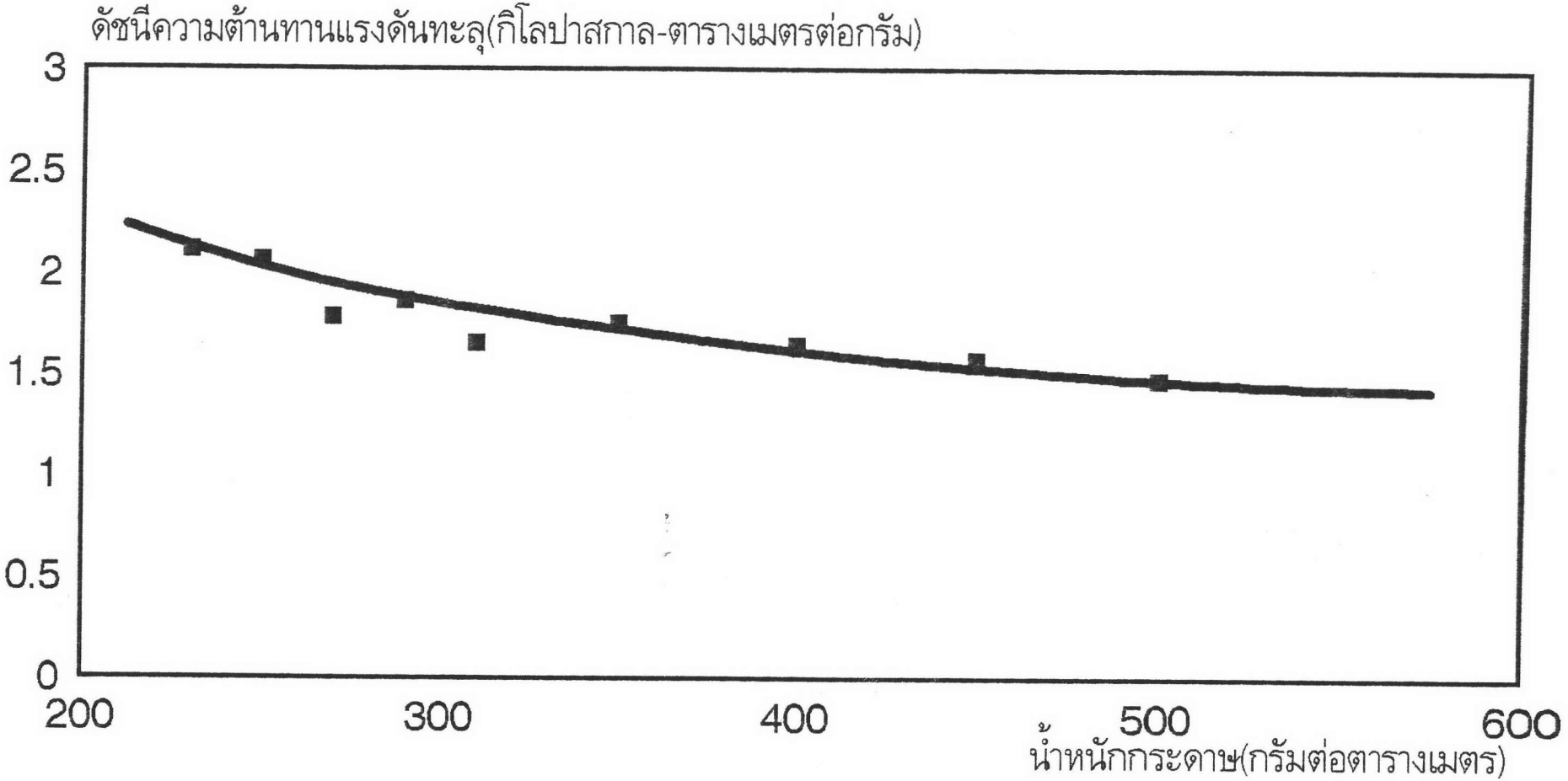
ความยืดตัวของกระดาษจะเป็นปฏิภาคผกผันกับความต้านทานแรงดึง ในทิศที่มีความต้านทานแรงดึงสูงจะมีความยืดตัวต่ำ และในทิศที่มีความต้านทานแรงดึงต่ำจะมีความยืดตัวสูง กระดาษกล่องและกระดาษทั่วไปที่ผลิตด้วยเครื่องจักรประเภทตะแกรงกลม มีความยืดตัวในแนวขวางเครื่องสูงกว่าในแนวขนานเครื่องมาก เนื่องจากเส้นใยส่วนใหญ่เรียงตัวในแนวขนานเครื่อง ทำให้เส้นใยในแนวขวางเครื่องมีจุดพันธะมากกว่าเส้นใยในแนวขนานเครื่อง การยืดตัวของกระดาษเกิดจากการยืดตัวของจุดพันธะและเส้นใย แต่การยืดตัวของพันธะสูงกว่าเส้นใย เมื่อดึงกระดาษในแนวขวางเครื่อง กระดาษจึงยืดตัวได้มากกว่า ดังแสดงในรูป 6.7

6. ความหนา

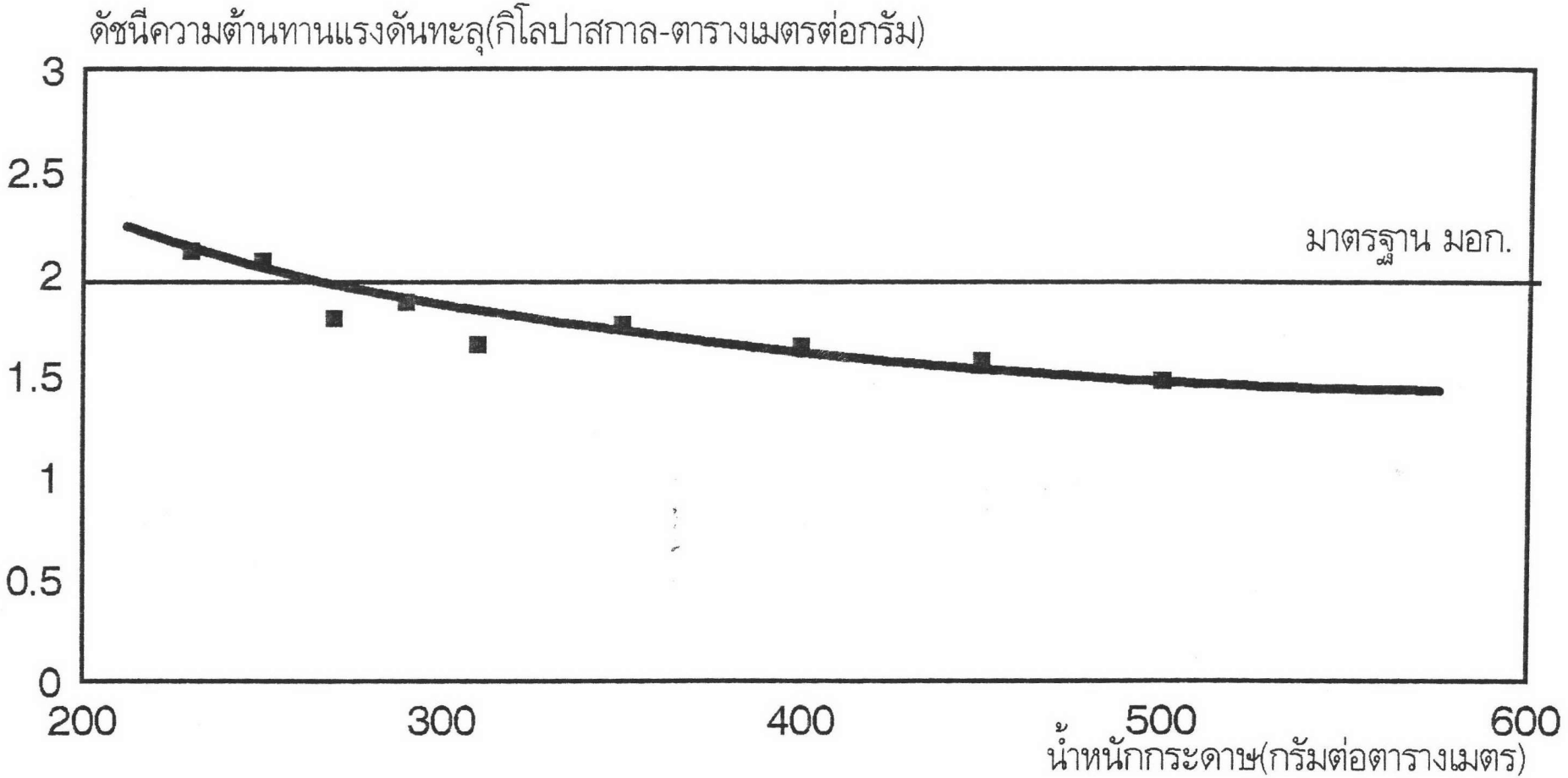
รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักกระดาษ ความหนาเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำหนักกระดาษเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มของความหนาไม่ได้เป็นปฏิภาคกับเส้นใย เส้นกราฟมีความชันลดลง ถ้าหารน้ำหนักกระดาษด้วยความหนาจะได้ความหนาแน่น รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและน้ำหนักกระดาษ ความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักกระดาษเพิ่มขึ้น สาเหตุทำนองเดียวกับความต้านทานแรงดันทะลุ เมื่อสัดส่วนของชั้นบนและชั้นล่างเปลี่ยนไป กระดาษชั้นล่างเป็นเศษกระดาษที่ประกอบด้วยเส้นใยคราฟท์ไม่ฟอกเป็นส่วนใหญ่ เศษกระดาษเหล่านี้ปกติมีความหนาแน่นน้อยกว่ากระดาษชั้นบนและเมื่อถูกบดให้มีค่ามีค่าฟรีเนสสูงในกระดาษที่มีน้ำหนักมากก็ยิ่งทำให้กระดาษมีความหนาแน่นลดลง



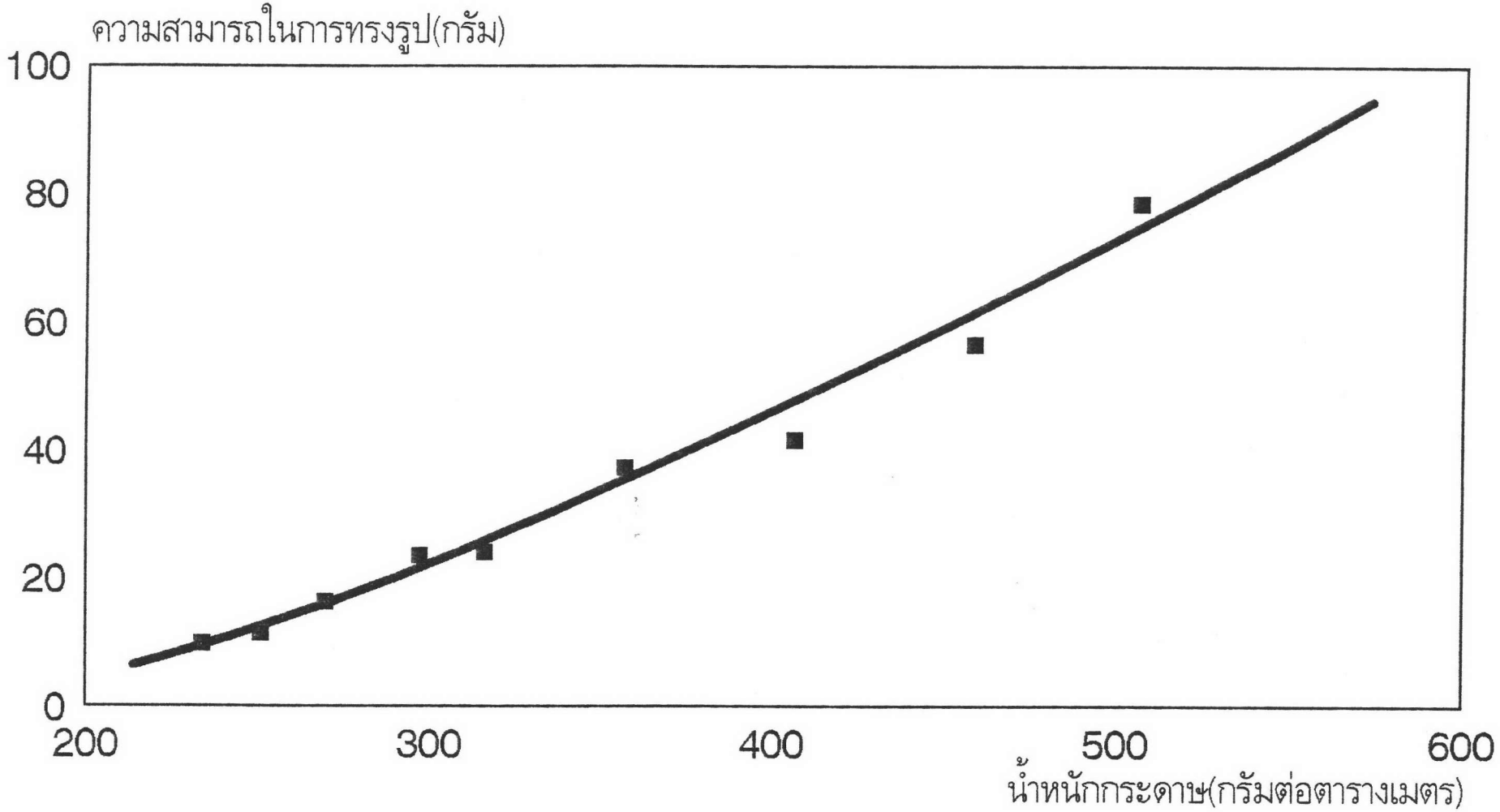
รูปที่ 6.1 : ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุและน้ำหนักกระดาษ เส้นกราฟมีความชันลดลงเมื่อน้ำหนักกระดาษเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีชั้นขาวในสัดส่วนที่ลดลง



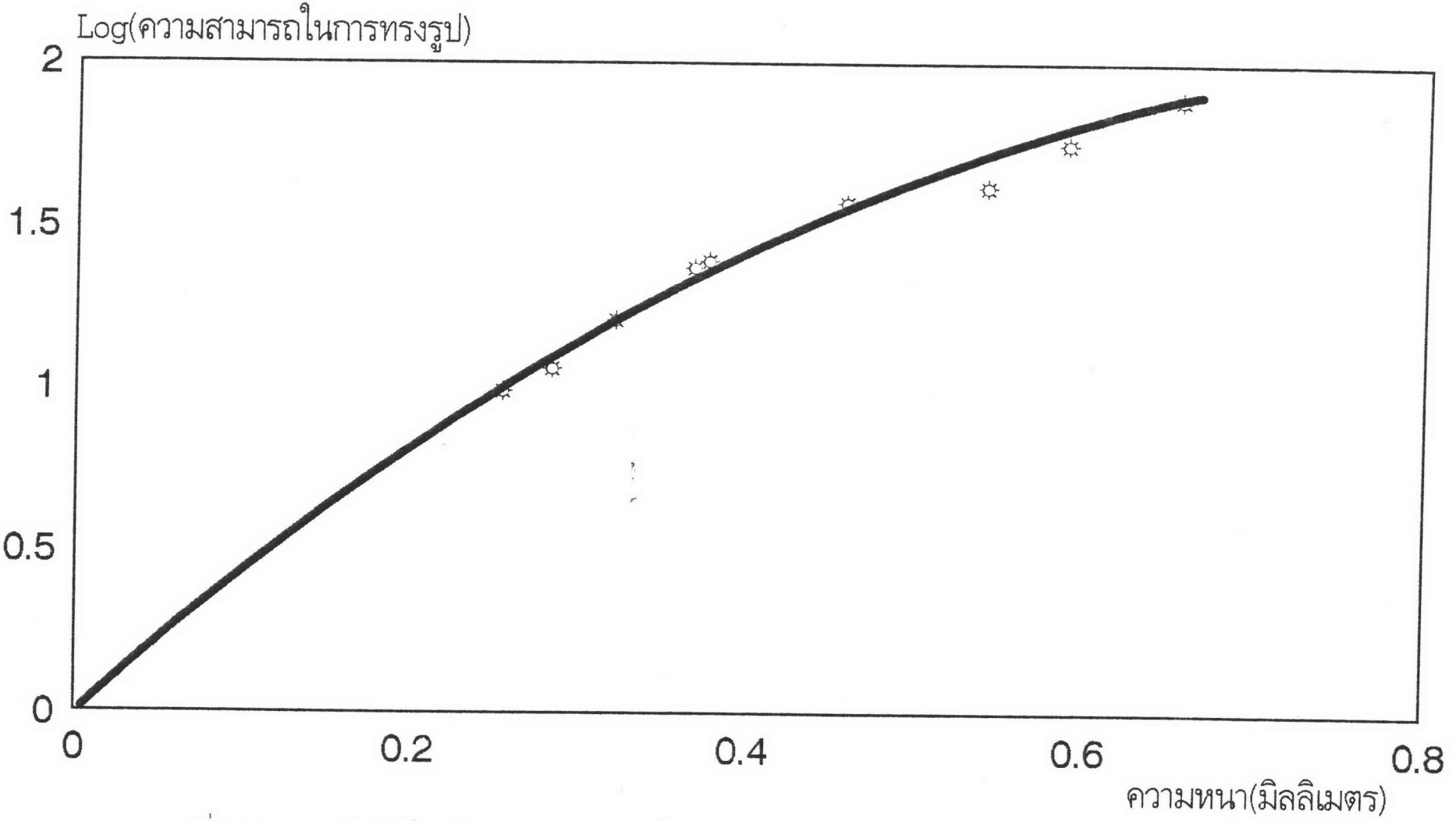
รูปที่ 6.2 : แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและน้ำหนักกระดาษ
ดัชนีความต้านทารแรงดันทะลุมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักกระดาษเพิ่มขึ้น



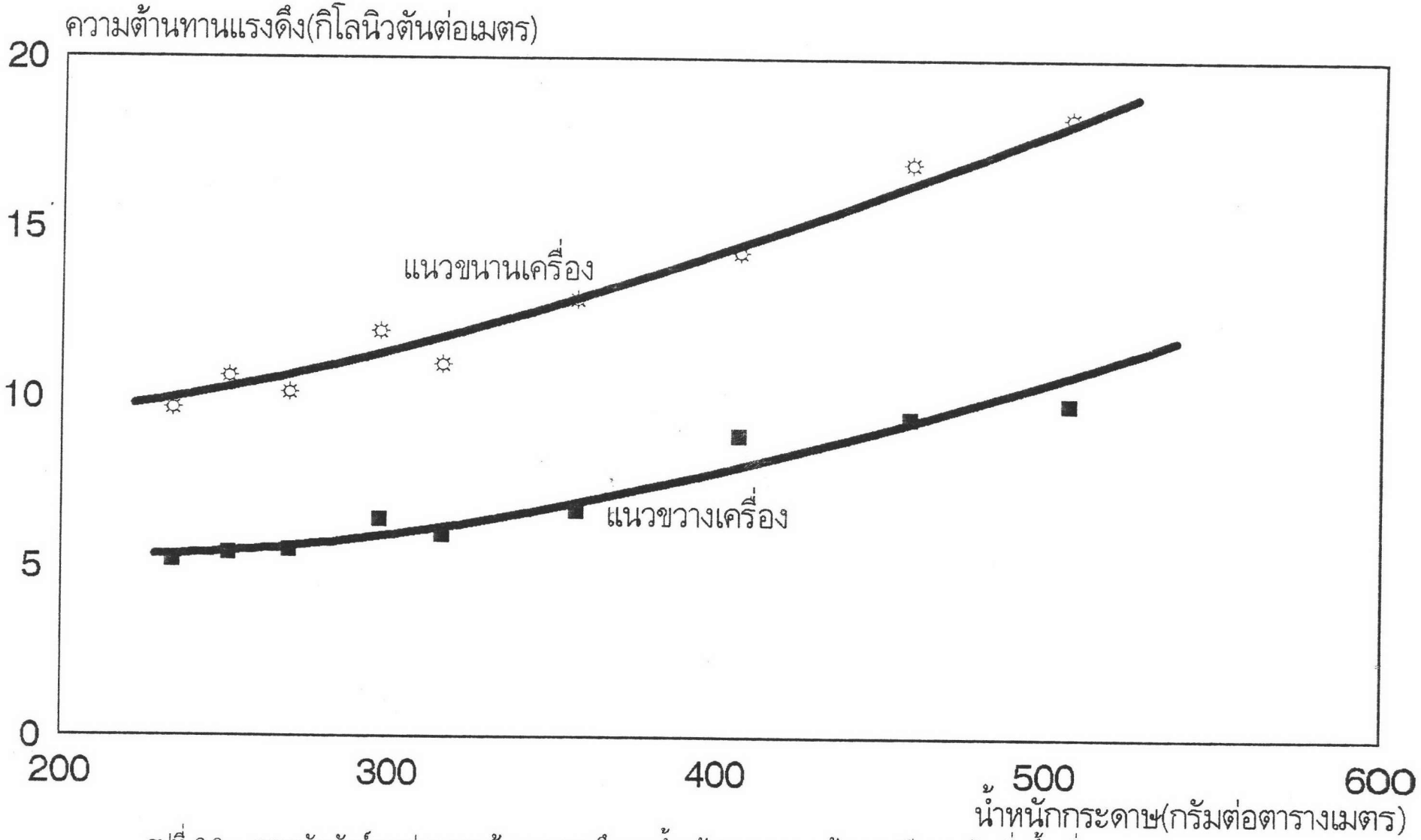
รูปที่ 6.3 : กราฟเปรียบเทียบระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุที่วัดได้ และมาตรฐาน มอก.
ซึ่งมีเฉพาะกระดาษ 230 และ 250 กรัมต่อตารางเมตรเท่านั้นที่เป็นไปตามมาตรฐาน



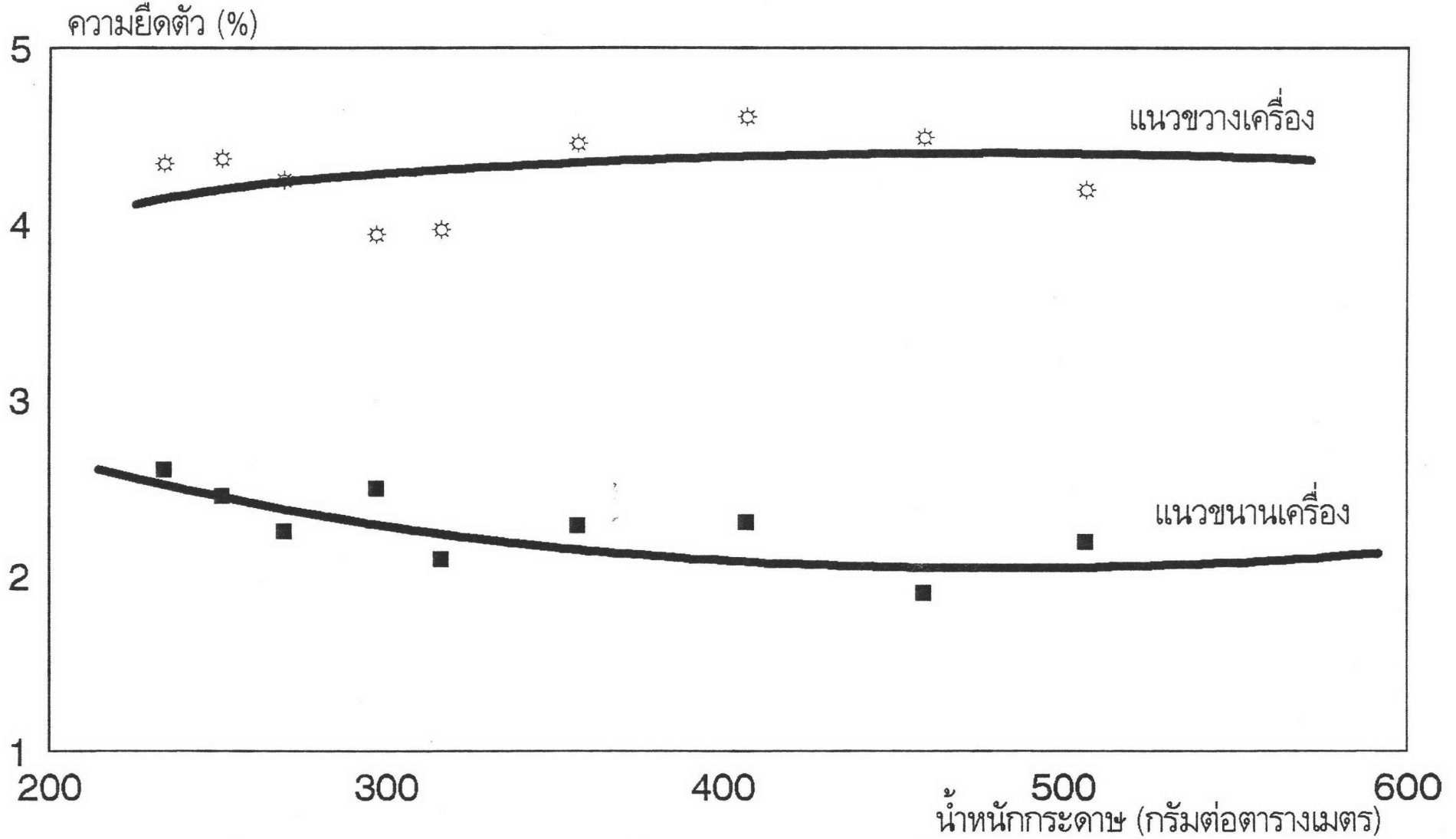
รูปที่ 6.4 : ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการทรงรูปและน้ำหนักกระดาษ ความสามารถในการทรงรูป ไม่ได้แปรตามน้ำหนักกระดาษโดยตรง แต่แปรตามความหนายกกำลังสามและค่า Young's modulus



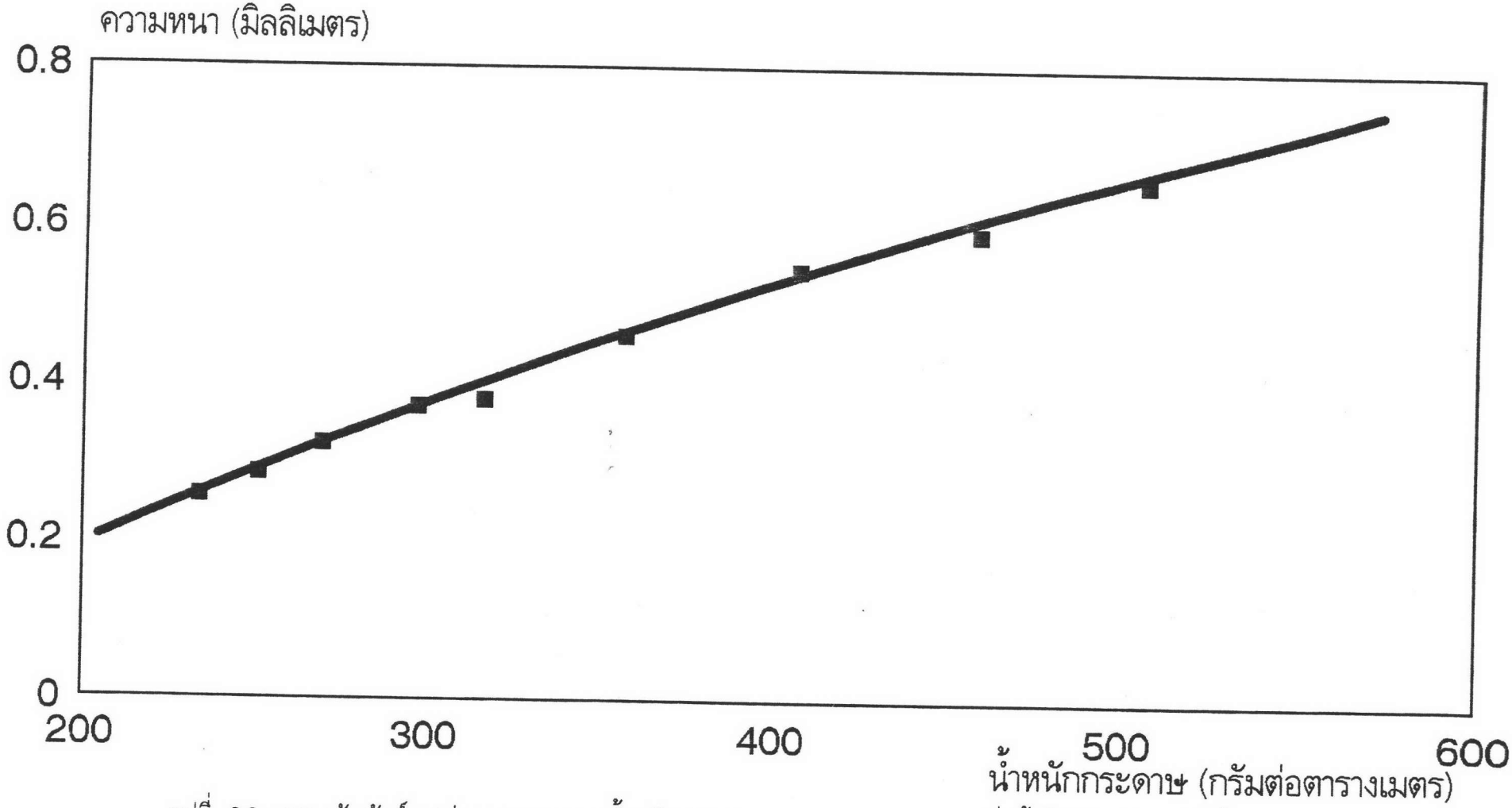
รูปที่ 6.5 : ความสัมพันธ์ระหว่าง Log(ความสามารถในการทรงรูป)และความหนา ความชันของกราฟมีค่าประมาณ 3ถึง 4



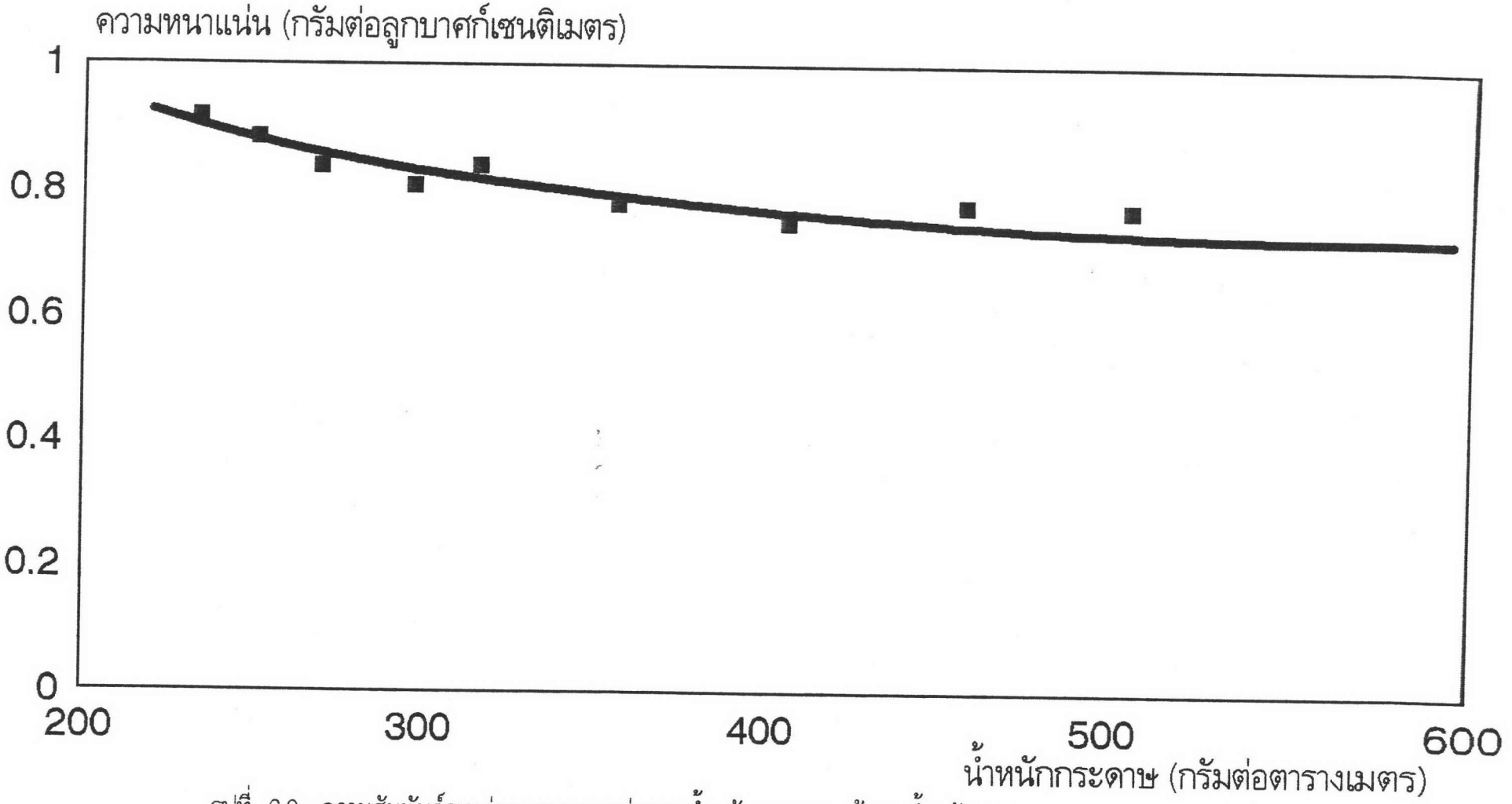
รูปที่ 6.6 : ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงดึงและน้ำหนักกระดาษ เส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาของกระดาษ



รูปที่ 6.7 : ความสัมพันธ์ระหว่างความยืดตัวและน้ำหนักกระดาษ ด้านขนานเครื่องมีความยืดตัวน้อยกว่าด้านขวางเครื่อง



รูปที่ 6.8 : ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและน้ำหนักกระดาษ ความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้นไม่เป็นปฏิภาคกับน้ำหนักกระดาษ



รูปที่ 6.9 ; ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและน้ำหนักกระดาษ ถ้าหารน้ำหนักกระดาษ
ด้วยความหนาจะได้ความหนาแน่น ความหนาแน่นลดลงเมื่อกระดาษมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรในระบบเว็ท-เอนด์

1. ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรในระบบเว็ท-เอนด์ที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้แป้งโดยตรง

ผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปรในระบบเว็ท-เอนด์ที่เกี่ยวข้องโดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 5.2 สรุปได้ดังนี้

ก. ความเป็นกรดด่าง มีค่าเฉลี่ย 6.6 มีความเป็นกรดเล็กน้อย เหมาะที่จะใช้แป้งประจุบวก

ข. ความนำไฟฟ้าจำเพาะ มีค่าเฉลี่ย 1245 ไมโครซีเมนต์ต่อเซ็นติเมตร ซึ่งนับว่าค่อนข้างต่ำ แป้งประจุบวกที่เหมาะสมที่จะใช้คือแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.018

ค. ศักย์ซีต้า มีค่าเฉลี่ยเป็นลบเล็กน้อย มีความเหมาะสมที่จะใช้แป้งประจุบวกเพราะมีที่ว่างพอที่จะให้แป้งประจุบวกตกค้างลงบนเส้นใย

ง. ความต้องการประจุบวกมีค่าเฉลี่ย 10 ไมโครอีควิวาเลนต์ต่อกิโลกรัมไม่จำเป็นต้องเติมสารจับประจุลบ

สรุปว่าสามารถใช้แป้งประจุบวกได้โดยไม่ต้องปรับระบบ แป้งประจุบวกที่เหมาะสมคือแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 (แป้งประจุบวก Amylofax T-1100)

2. ผลการวิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆ

ในการผลิตตามปกติ วัตถุดิบชั้นบนจะประกอบด้วยเยื่อ 35% และเศษกระดาษ 65% ตามตัวอย่างที่ 1 ถึง 10 ในตารางที่ 5.2 ส่วนตัวอย่างที่ 11 ถึง 13 วัตถุดิบเป็นเศษกระดาษ 100% จากการที่วัตถุดิบต่างกันทำให้ตัวอย่างทั้ง 2 ชุด มีสมบัติบางประการที่น่าสนใจ แม้ว่าโดยสรุปแล้วจะสามารถใช้แป้งประจุบวกชนิดเดียวกันก็ตาม ตารางที่ 6.3 เปรียบค่าตัวแปรในระบบเว็ท-เอนด์เมื่อใช้วัตถุดิบเป็นเศษกระดาษ 65% และ 100%

ก. ปริมาณของแข็งที่กรองได้ เมื่อวัตถุดิบเป็นเศษกระดาษล้วนๆ มีของแข็งที่กรองได้สูงกว่าเมื่อใช้เศษกระดาษ 65% เนื่องจากในเศษกระดาษมีฟิลเลอร์ซึ่งเป็นดินขาวหรือแคลเซียมคาร์บอร์เนตอยู่มาก เมื่อใช้เศษกระดาษเป็นวัตถุดิบมากขึ้น ปริมาณของแข็งที่กรองได้จึงมากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในตาราง 6.3 เมื่อใช้เศษกระดาษ 65% ปริมาณของแข็งที่กรองได้เท่ากับ 77% ในขณะที่ ใช้เศษกระดาษ 100% ปริมาณของแข็งที่กรองได้เท่ากับ 82.67%

ปริมาณของแข็งที่กรองได้แบ่งเป็น 3 ส่วนคือเส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอน เศษเส้นใยขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนและฟิลเลอร์ขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน โดยปกติแล้ว ถ้าบดเยื่อและเศษกระดาษด้วยเวลาเท่าๆ กันหรือใช้พลังงานในการบดเท่าๆ กัน เยื่อจะมีฟรีเนสสูงกว่าและมีเส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอนมากกว่าเศษกระดาษ ดังนั้น ถ้าเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบที่เป็นเศษกระดาษล้วนๆ และวัตถุดิบที่มีเยื่อเป็นส่วนผสม วัตถุดิบที่มีเยื่อเป็นส่วนผสมควรมีเส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอนมาก และเกิดเศษเยื่อน้อย เพราะเส้นใยจากเศษกระดาษจะเปราะมีความแข็งแรงต่ำและมีขนาดสั้นกว่าเส้นใยจากเยื่อ แต่ข้อมูลในตาราง 6.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เศษกระดาษ 65% มีเส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอน 52.32% ในขณะที่ใช้เศษกระดาษ 100% มีเส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอน 57.08% และในขณะเดียวกัน วัตถุดิบที่มีเยื่อเป็นส่วนผสมกลับมีเศษเส้นใยมากกว่า ซึ่งตรงข้ามกับหลักทั่วไป สาเหตุน่าจะเกิดจากขั้นตอนการเตรียมเยื่อของบริษัทฯ ซึ่งนำเยื่อและเศษกระดาษผสมกันก่อนแล้วจึงบด เยื่อซึ่งมีเส้นใยแข็งกระด้าง มีฟรีเนสก่อนบดประมาณ 650-700 ซีเอสเอฟ ในขณะที่เศษกระดาษมีเส้นใยสั้นและมีเศษเยื่อมากมีฟรีเนสประมาณ 300-350 ซีเอสเอฟ ถ้าผสมเยื่อและเศษกระดาษด้วยอัตราส่วน 65 : 35 จะได้ฟรีเนสรวมประมาณ 420-460 ซีเอสเอฟ ใช้เวลาบดประมาณ 2.5 ชั่วโมง จึงได้ฟรีเนสตามต้องการคือ 280-340 ซีเอสเอฟ แต่สำหรับเศษกระดาษล้วนๆ ใช้เวลาในการบดเพียง 0.5 ชั่วโมงหรือน้อยกว่าก็ได้ฟรีเนสตามต้องการ การที่ผสมเยื่อและเศษกระดาษเข้าด้วยกันก่อนแล้วจึงบด ทำให้เส้นใยจากเศษกระดาษซึ่งอ่อนแออยู่แล้ว ถูกบดเป็นเวลานานจนเกิดเศษเยื่อขนาดเล็กจำนวนมาก เมื่อกรองน้ำเยื่อด้วยตะแกรงขนาด 75 ไมครอน เยื่อจะตกค้างบนตะแกรงน้อย ในขณะที่การบดเศษกระดาษล้วนๆ ใช้ เวลาน้อยกว่า เกิดเศษเยื่อน้อยกว่า จึงมีเส้นใยตกค้างบนตะแกรงมากกว่า

ข. ความเป็นกรดด่างของวัตถุดิบที่เป็นเศษกระดาษ 100% มีค่า 7.2 มากกว่าเมื่อใช้เศษกระดาษ 65% เนื่องจากในปัจจุบัน การผลิตกระดาษพิมพ์เขียนส่วนใหญ่ใช้ระบบด่าง ความเป็นกรดด่างในกระบวนการผลิตมีค่าสูง ทำให้กระดาษที่ผลิตได้มีความเป็นกรดด่างสูงตามไปด้วย ดังนั้น เศษกระดาษที่ใช้ในการผลิตกระดาษชั้นบนของกระดาษกล่องไม่เคลือบจึงมีความเป็นกรดด่างสูง ทำให้ความเป็นกรดด่างในระบบสูงตามไปด้วย

ค. ศักย์ซีต้าของวัตถุดิบที่เป็นเศษกระดาษ 100% สูงขึ้นเนื่องจากความเป็นกรดด่างสูงขึ้น

ค่าอื่นๆ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก และสามารถใช้แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ได้ในวัตถุดิบทั้ง 2 อย่าง

ตารางที่ 6.3 : เปรียบเทียบค่าตัวแปรในระบบเว็ท-เอนด์เมื่อใช้วัตถุดิบเป็นเศษกระดาษ 65% และ 100%

ค่าที่วัด		เศษกระดาษ 65%			เศษกระดาษ 100%		
		ปริมาณ	%	%ตกค้างรอบแรก	ปริมาณ	%	%ตกค้างรอบแรก
ปริมาณของแข็งทั้งหมด(อบที่ 130องศาเซลเซียส	มก/กก	4643	100.00	64.27	6191	100.00	76.43
ปริมาณของแข็งที่กรองได้	มก/กก	3575	77.00	85.62	5118	82.67	91.60
ปริมาณของแข็งละลาย	มก/กก	1068	23.00		1073	17.33	
ความเป็นกรดด่าง		6.5			7.2		
ความนำไฟฟ้าจำเพาะ	ไมโครซีเมนต์/ซม	1223			1319		
ศักย์ซีต้า	มิลลิโวลต์	-8.4			-14.8		
ความต้องการประจุบวก	ไมโครอีควิวาเลนต์/กก	10			12		
ความต้องการประจุลบ	ไมโครอีควิวาเลนต์/กก						
เส้นใยขนาดใหญ่กว่า 75 ไมครอน	มก/กก	2429	52.32	94.72	3534	57.08	98.03
เศษเส้นใยขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน	มก/กก	896	19.30	68.20	1091	17.63	78.23
ฟิลเลอร์ขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอน	มก/กก	250	5.38	61.64	493	7.97	73.93
เกลือ	มก/กก	898	19.34		851	13.75	
คอลลอยด์	มก/กก	124	2.66		181	2.92	
ประจุอลูมิเนียม	มก/กก	86	1.85	37.06	148	2.39	41.97
ประจุอลูมิเนียมเชิงซ้อน	มก/กก	82	1.77	37.64	142	2.29	43.20
แป้ง	มก/กก	161	3.46		116	1.88	
แป้งเชิงซ้อน	มก/กก	117	2.51		77	1.25	
กลูโคสอิสระ	มก/กก	7	0.14		2	0.03	

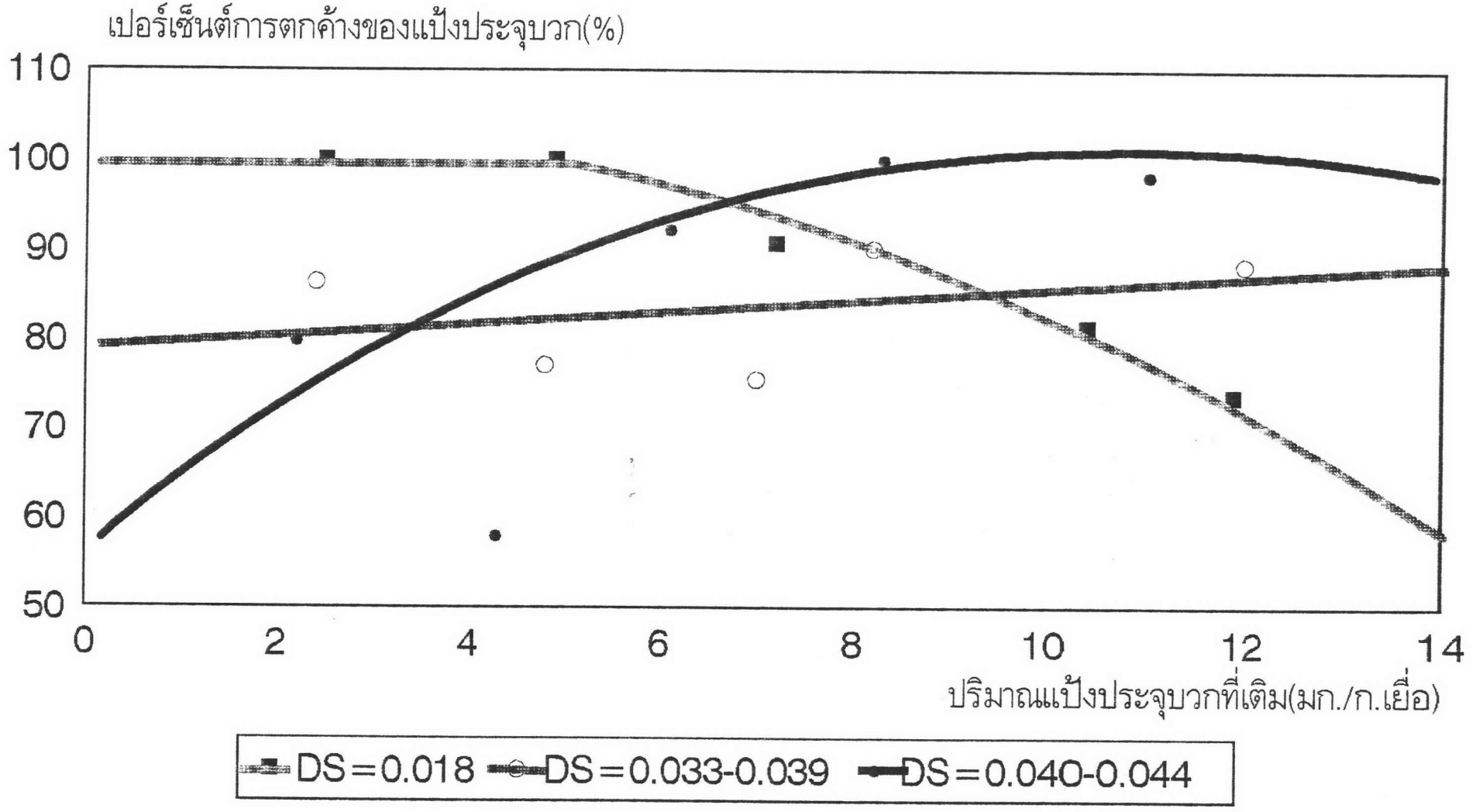
การตกค้างของแป้งประจุบวกและสมบัติของแผ่นทดสอบ

1. การตกค้างของแป้งประจุบวก

แป้งประจุบวกตกค้างบนเยื่อมากขึ้นเมื่อเติมแป้งประจุบวกในปริมาณสูงขึ้น ในตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อทดลองเติมแป้งประจุบวกที่ระดับการแทนที่ประจุต่างๆ ในช่วง 0-12 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ พบว่ามีแป้งตกค้างบนเส้นใยมากที่สุดที่ 21.22 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ในจำนวนนี้เป็นแป้งที่มีอยู่เดิมซึ่งมาจากเศษกระดาษ 10.45 มิลลิกรัม และแป้งประจุบวก 10.97 มิลลิกรัม ในการเติมแป้งที่เว็ท-เอนด์ แป้งจะตกค้างบนเส้นใยไม่เกิน 30 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ (อร่าม อุดล, 2537) ไม่ว่าจะเติมแป้งลงไปเท่าใดก็ตาม ถ้าต้องการให้แป้งตกค้างบนกระดาษมากขึ้น ต้องเปลี่ยนวิธีการเติมแป้ง เช่น การเติมแป้งออกซิไดซ์หรือแป้งดิบที่ Size press แป้งจะฉาบอยู่บนผิวกระดาษ เติมแป้งดิบที่ไม่ต้มในขั้นตอนการเตรียมเยื่อ หรือเติมระหว่างชั้นของกระดาษ มีรายงานว่าบางโรงงานสามารถเติมแป้งได้ถึง 8% ทำให้ความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นกว่า 2 เท่า(อร่าม อุดล, 2537)

ในด้านเปอร์เซนต์การตกค้างของแป้งประจุบวก แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.018 จะตกค้าง 100% เมื่อเติมในปริมาณไม่เกิน 4.91 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ และการตกค้างจะลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 เปอร์เซนต์การตกค้างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น ส่วนแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 มีการตกค้างต่ำในช่วงแรกแล้วพิ่มขึ้นเป็น 100% เมื่อเติมแป้งประจุบวก 8.33 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อแล้วจึงลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.10

มีการศึกษาว่า ที่ค่าความนำไฟฟ้าต่ำๆ แป้งประจุบวกทุกชนิดจะมีการตกค้างรอบแรกเท่ากัน และเมื่อค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น แป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุสูงจะตกค้างได้มากกว่าแป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุต่ำ (Avebe, 1991) แต่ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ 4.3 ดังแสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 6.10 ไม่เป็นไปตามนั้น น่าจะมีการศึกษาเพิ่มเติม



รูปที่ 6.10 : ความสัมพันธ์ระหว่างการตกค้างและปริมาณแป้งประจุบวกที่เติม

2. สมบัติของแผ่นทดสอบ

เมื่อเติมแป้งประจุบวกลงในเยื่อ สมบัติของแผ่นทดสอบจะเปลี่ยนไป สมบัติที่วัดเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรง จากตารางที่ 5.4 พบว่า ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและดัชนีความต้านทานแรงดึงมีความสัมพันธ์กัน ถ้าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูง ดัชนีความต้านทานแรงดึงจะสูงตามไปด้วย โดยเฉพาะในแผ่นทดสอบ ซึ่งไม่มีอิทธิพลของความหนาเข้ามาเกี่ยวข้อง ความแตกต่างของการทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุและความต้านทานแรงดึงก็คือ ในการทดสอบความต้านทานแรงดึง แรงที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบจะกระทำทีละแนว เช่น แนวขนานเครื่องและแนวขวางเครื่อง(ในกรณีที่เป็นตัวอย่างจากกระบวนการผลิตจริง) ชิ้นงานทดสอบจะยืดตัวได้อย่างอิสระจนกระทั่งขาด ในขณะที่การทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ ชิ้นงานทดสอบจะถูกจับด้วยตัวจับรูปวงแหวน และถูกดันด้วยแผ่นไดอะแฟรมยางจนกระทั่งขาด นั่นคือชิ้นงานทดสอบถูกแรงกระทำในทุกทิศทางพร้อมกัน ชิ้นงานทดสอบจะเริ่มขาดในแนวที่มีความยืดตัวน้อย ซึ่งก็คือแนวขนานเครื่องในกระดาษทั่วไป(รอยขาดจะอยู่ในแนวขวางเครื่อง) แล้วค่อยขาดในทิศทางตรงข้าม ดังนั้นการพิจารณาความแข็งแรงของชิ้นงานทดสอบ สามารถเลือกพิจารณาสมบัติเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งก็เพียงพอ ในกรณีกระดาษกล่องไม่เคลือบ ควรพิจารณาความต้านทานแรงดันทะลุเป็นหลัก เพื่อให้สอดคล้องกับการกำหนดของสำนักงานมาตรฐานสินค้าอุตสาหกรรม

ก. ความต้านทานแรงดันทะลุ

1) แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 เพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุได้ดีที่สุด รองลงมาคือแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 และ 0.018 ตามลำดับ กราฟทั้ง 3 เส้นในรูปที่ 6.11 มีความชันลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น

2) ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นสูงสุด เมื่อเติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุต่างๆ ในช่วง 2- 1.2 มิลลิกรัม/กรัมเยื่อดังนี้

ระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นสูงสุด 7.4 %

ระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นสูงสุด 4.2 %

ระดับการแทนที่ประจุ 0.018 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นสูงสุด 3.7%

3) ตัวอย่างที่ 6, 10 และ 16 ในตารางที่ 5.4 มีดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูงผิดปกติ เทียบกับตัวอย่างใกล้เคียงเนื่องจากความหนาแน่นของแผ่นทดสอบสูงผิดปกติ น่าสังเกตุว่าตัวอย่างที่มีความหนาแน่นผิดปกติเป็นตัวอย่างที่เติมแป้งประจุบวกในปริมาณสูง และมีแนวโน้มว่าความหนาแน่นของแผ่นทดสอบลดลงเมื่อการเติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุสูงขึ้น

ข. ความต้านทานแรงดึง จากตารางที่ 5.4 เห็นได้ว่าการเติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุต่างๆ ให้ผลในการเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงได้ใกล้เคียงกัน แป้งประจุบวกทั้ง 3 ชนิดสามารถเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงได้ประมาณ 5.5 - 7.5% ซึ่งเป็นค่าใกล้เคียงกับการเพิ่มของดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ

ค. ความยืดตัว ความยืดตัวของแผ่นทดสอบมีค่าไม่ต่างกัน เมื่อมีการแปรปริมาณแป้งประจุบวก ดังแสดงในตาราง 5.4 แต่พบว่าเมื่อแป้งมีระดับการแทนที่ประจุสูงขึ้น ความยืดตัวจะลดลงเล็กน้อยดังนี้

ระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ความยืดตัวเฉลี่ย 3.66%
ระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 ความยืดตัวเฉลี่ย 3.52%
ระดับการแทนที่ประจุ 0.018 ความยืดตัวเฉลี่ย 3.46%

ง. ความสามารถในการทรงรูป ความสามารถในการทรงรูปดังแสดงในตารางที่ 5.4 มีการเปลี่ยนแปลงบ้าง แต่ไม่สามารถระบุได้ว่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร เนื่องจากความสามารถในการทรงรูปขึ้นอยู่กับตัวแปรทางกายภาพหลายประการ คือ ความหนาแน่น ความหนา และน้ำหนักของแผ่นทดสอบ การควบคุมตัวแปรเหล่านี้ในการทำแผ่นทดสอบเป็นไปได้ยาก จากสมการที่ 6.1 เห็นได้ว่า ความสามารถในการทรงรูปแปรตามความหนายกกำลังสาม นั่นคือความสามารถในการทรงรูปจะเปลี่ยนแปลงอย่างมาก แม้ว่าความหนาเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย และในการทำแผ่นทดสอบ ไม่สามารถควบคุมความหนาได้ ทำให้ความสามารถในการทรงรูปเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ไม่สามารถหาความเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการทรงรูปเนื่องจากแป้งประจุบวกได้ ถ้าหาค่าความสามารถในการทรงรูปด้วย(ความหนา)^3 จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 6.4 เห็นได้ว่าตัวอย่างที่เติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.018 และ 0.040-0.044 มีค่าความต้านทานการทรงรูป /(ความหนา)^3 ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 มีแนว

โน้มว่าค่าความสามารถในการทรงรูป/(ความหนา)^3 เพิ่มขึ้นเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 น่าจะสามารถเพิ่มความสามารถในการทรงรูปได้

3. การทดลองแป้งประจุบวกในกระดาษอื่นๆ

มีการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ โดยการเติมแป้งประจุบวกในวัตถุดิบชนิดอื่นหลายการทดลอง เช่น

ก. การทดลองโดยใช้เศษกระดาษกล่องลูกฟูกเก่าและเยื่อคราฟท์ไม่ฟอก ผสมกันในอัตราส่วน 50:50 บดที่ 6,000 รอบด้วยเครื่อง PFI-mill เติมสารส้ม 3% และซันสน 0.25% เติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ปริมาณ 0-2.5% พบว่าสามารถเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงจาก 62.3 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัมเป็น 71.1 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัมหรือเพิ่มขึ้น 14.4% และเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุจาก 4.4 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม เป็น 5.2 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 18.2% และเปอร์เซนต์การตกค้างของแป้งประจุบวกลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, ก.ย. 30)

ข. การทดลองโดยใช้เยื่อคราฟท์ไม่ฟอก 100% บดที่ 6,000 รอบด้วยเครื่อง PFI-mill เติมสารส้ม 2.5% และซันสน 1% เติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ปริมาณ 0-4% พบว่าสามารถเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงจาก 73.5 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัม เป็น 85.5 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัมหรือเพิ่มขึ้น 22% และเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุจาก 5.85 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัมเป็น 7.5 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 22% (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, มิ.ย. 30)

ค. การทดลองโดยใช้เศษกระดาษเก่าในประเทศ 100% เติมสารส้ม 2.5% และซันสน 1% เติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ปริมาณ 0-4% พบว่าสามารถเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงจาก 17.5 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัมเป็น 26.5 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 51% และเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุจาก 0.4 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัมเป็น 1.22 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 205% (กรมวิทยาศาสตร์บริการ,มิ.ย. 30)

ง. การทดลองโดยใช้เศษกระดาษกล่องลูกฟูกเก่า 100% เติมสารส้ม 3% และซันสน 2.5% เติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ปริมาณ 0-2.5% พบว่าสามารถ

เพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดึงจาก 19.2 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัม เป็น 27.6 กิโลนิวตัน-เมตร/กิโลกรัมหรือเพิ่มขึ้น 43.4% และเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุจาก 0.9 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม เป็น 1.51 เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 67.8% และการตกค้างของแป้งอยู่ในช่วง 99.1-99.9% (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, มี.ค. 31)

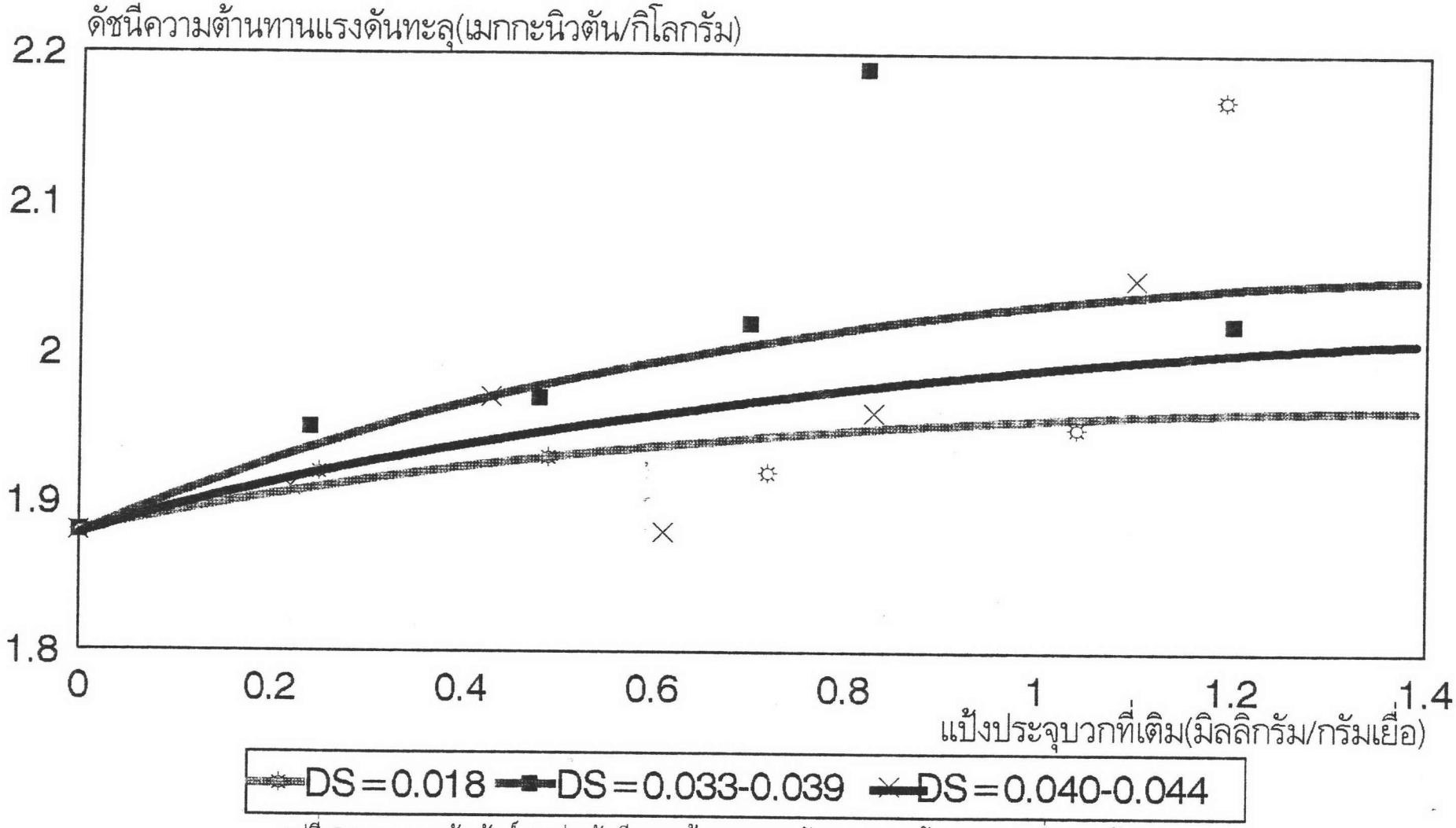
จ. ทดลองวัดการตกค้างของแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.016 ในเศษกระดาษและเยื่อซัลเฟตฟอกขาว พบว่าการตกค้างของแป้งประจุบวกในเยื่อซัลเฟตฟอกขาวสูงกว่าการตกค้างในเศษกระดาษ 13-22% (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, ต.ค. 28)

การทดลองในข้อ ก. ถึง จ. ใช้วัตถุดิบจากการผลิตกระดาษเหนียว(Kraft paper) การเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นทดสอบ ทั้งในแง่ของดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและดัชนีความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงมาก เช่น ข้อ ค. ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้น 205% ไม่มีการทดลองใดที่เพิ่มความแข็งแรงน้อยกว่า 14% และความแข็งแรงของเศษกระดาษเพิ่มขึ้นมากกว่าความแข็งแรงของเยื่อ แต่จากการทดลองที่ 4.3 ดังแสดงผลในตารางที่ 5.4 พบว่าความแข็งแรงของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้นน้อยมาก น่าจะมีปัจจัยบางอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ชนิดวัตถุดิบ ลำดับการเติมสารเคมี ระดับการบดเยื่อ เป็นต้น

พิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความแข็งแรงของกระดาษโดยตรง ซึ่งมีอยู่ 2 ประการ คือ ความแข็งแรงของเส้นใยและความแข็งแรงของพันธะ การเติมแป้งประจุบวกหรือสารเพิ่มความแข็งแรงเมื่อแห้งอื่นๆ จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของพันธะ แต่ไม่ได้เพิ่มความแข็งแรงของเส้นใย ถ้าความแข็งแรงของพันธะและความแข็งแรงของเส้นใยต่างกันมาก เมื่อกระดาษถูกแรงกระทำ กระดาษจะขาดตรงจุดที่มีความแข็งแรงต่ำกว่า การเติมแป้งประจุบวกในเว็ท-เอนด์จะไม่เพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษเลย ถ้าความแข็งแรงของเส้นใยและความแข็งแรงของพันธะมีค่าใกล้เคียงกัน (อร่าม อุดล, 2537) เพราะเมื่อความแข็งแรงของพันธะสูงขึ้น ถ้ากระดาษถูกแรงกระทำ กระดาษจะขาดที่เส้นใย

เยื่อโดยปกติจะมีความแข็งแรงของพันธะสูงมาก และมีความแข็งแรงของพันธะต่ำมากเช่นกัน การบดเยื่อทำให้ความแข็งแรงของพันธะสูงขึ้น แต่เมื่อบดเยื่อมากขึ้น แม้ว่าความแข็งแรงของพันธะจะสูงขึ้น แต่ความแข็งแรงของเส้นใยก็ลดลงด้วย ตัวอย่างเยื่อที่ใช้ในการทดลองได้ผ่าน

การบดมาแล้ว อาจเป็นไปได้ที่ตัวอย่างเยื่อซึ่งมีค่าฟรีเนส 339 ซีเอสเอฟ มีความแข็งแรงสูงสุดอยู่แล้ว การเติมแป้งประจุบวกจึงไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของแผ่นทดสอบ จึงควรมีการทดลองเติมแป้งประจุบวกในตัวอย่างที่มีค่าฟรีเนสต่างๆ กันเพื่อหาระดับการเติมแป้งและการบดเยื่อที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 6.11 : ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและแป้งประจุบวกที่เติม แป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.033-0.039 เพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุได้มากที่สุด

ตารางที่ 6.4 : แสดงค่าความสามารถในการทรงรูป/ความหนายกกำลัง 3

ตัวอย่างที่	แป้งประจุบวกที่เติม มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ	ความหนา มิลลิเมตร	ความสามารถในการทรงรูป* มิลลินิวตัน	ความสามารถในการทรงรูป/(ความหนา)3 มิลลินิวตัน/(มิลลิเมตร)3
1	-	0.134	116	48211
2	2.51	0.137	117	45501
3	4.91	0.130	109	49613
4	7.23	0.129	104	48447
5	10.36	0.126	92	45991
6	11.94	0.126	98	48991
7	2.41	0.134	101	41977
8	4.79	0.124	85	44581
9	7.01	0.133	102	43356
10	8.22	0.121	102	57576
11	12.00	0.123	101	54276
12	2.22	0.132	97	42174
13	4.30	0.127	104	50772
14	6.08	0.129	104	48447
15	8.33	0.132	107	46522
16	10.97	0.138	122	46422

หมายเหตุ * ความยาวตัวอย่างทดสอบ = 10 มิลลิเมตร

การตกค้างของแป้งประจุบวกและสมบัติของแผ่นทดสอบที่ค่าฟรีเนสต่างๆ

ในการทดลอง ได้ทดลองเติมแป้งประจุบวกในเยื่อที่ยังไม่บด(ฟรีเนส 420 ซีเอสเอฟ) ระหว่างบด(ฟรีเนส 400 ซีเอฟเอส) และหลังบด(ฟรีเนส 304 ซีเอฟเอส)วัดการตกค้างของแป้งประจุบวก ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.5 และวัดสมบัติของแผ่นทดสอบ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 5.6

1. การตกค้างของแป้งประจุบวกที่ค่าฟรีเนสต่างๆ

การทดลองเปลี่ยนค่าฟรีเนส มีตัวแปร 3 ตัวที่พิจารณา คือ ฟรีเนส ระดับการแทนที่ประจุของแป้งประจุบวกและปริมาณแป้งประจุบวกที่เติม รูปที่ 6.12 เป็นกราฟแท่งแสดงการตกค้างของตัวอย่างแผ่นทดสอบต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

ก. เมื่อค่าฟรีเนสและปริมาณแป้งประจุบวกที่เติมคงที่ เปอร์เซนต์การตกค้างของแป้งสูงขึ้นเมื่อแป้งประจุบวกมีระดับการแทนที่ประจุสูงขึ้น น่าจะเนื่องจากความแรงของประจุที่มากขึ้น ทำให้แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุสูงมีเปอร์เซ็นต์การตกค้างสูงตามไปด้วย ข้อสรุปนี้จะแย้งกับรูปที่ 6.10 เมื่อเติมแป้งประจุบวกน้อยๆ เช่น เมื่อเติมแป้งประจุบวก 2 มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ การตกค้างของแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 มีการตกค้างน้อยที่สุด น่าจะเป็นไปได้ว่าที่การเติมแป้งน้อยๆ ความเข้มข้นของแป้งในระบบจะต่ำ ศักย์ซีต้าของระบบจะเปลี่ยนจากลบเป็นกลางหรือบวกทันทีที่เติมแป้งประจุบวก ทำให้การตกค้างของแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุสูงมีการตกค้างต่ำเพราะระบบจะเป็นบวกมากกว่า เมื่อเติมแป้งมากขึ้น ความเข้มข้นของแป้งประจุบวกในระบบสูงขึ้น ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของแป้งประจุบวกบนเส้นใยและของเหลวที่อยู่รอบมีค่ามาก แป้งประจุบวกส่วนหนึ่งถ่ายเทเข้าไปในรูของเส้นใยของเยื่อใยยาว การถ่ายเทนี้เกิดขึ้นได้เร็วในแป้งที่มีระดับการแทนที่ประจุสูง เพราะเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแป้งประจุบวกและประจุลบของเซลลูโลสได้ดีกว่า ทำให้แป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุสูงตกค้างได้ดีกว่าแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ประจุต่ำเมื่อเติมแป้งมากขึ้น ในรูปที่ 6.12 การตกค้างของแป้งประจุบวกที่ระดับการเติมประจุต่างกันจะต่างกันมากขึ้นเมื่อเติมแป้งในปริมาณที่มากขึ้น

ข. เมื่อปริมาณแป้งประจุบวกที่เติมและระดับการแทนที่ประจุบวกคงที่ เปอร์เซนต์การตกค้างของแป้งประจุบวกสูงสุดที่ฟรีเนส 400 ซีเอสเอฟและต่ำสุดที่ฟรีเนส 420 ซีเอสเอฟ เห็นได้ว่าการบดเยื่อมีอิทธิพลต่อการตกค้างของแป้งมาก การบดมากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะทำให้แป้งประจุบวกตกค้างได้ไม่ดี สาเหตุน่าจะเนื่องจากเศษเยื่อและพื้นที่ผิวของเส้นใย ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อ

บดเยื่อมากขึ้น เยื่อที่ไม่บดจะมีเศษเยื่อน้อยและพื้นที่ผิวของเส้นใยต่ำ ทำให้การตกค้างของแป้งประจุบวกน้อย เมื่อบดเยื่อเพิ่มขึ้น เกิดเศษเยื่อและพื้นที่ผิวของเส้นใยเพิ่มขึ้น แป้งประจุบวกก็ตกค้างมากขึ้น แต่ถ้าบดเยื่อมากเกินไป จะเกิดเศษเยื่อจำนวนมาก เศษเยื่อเหล่านี้สามารถลอดรูตะแกรงได้ ทำให้แป้งประจุบวกตกค้างบนแผ่นทดสอบต่ำลง

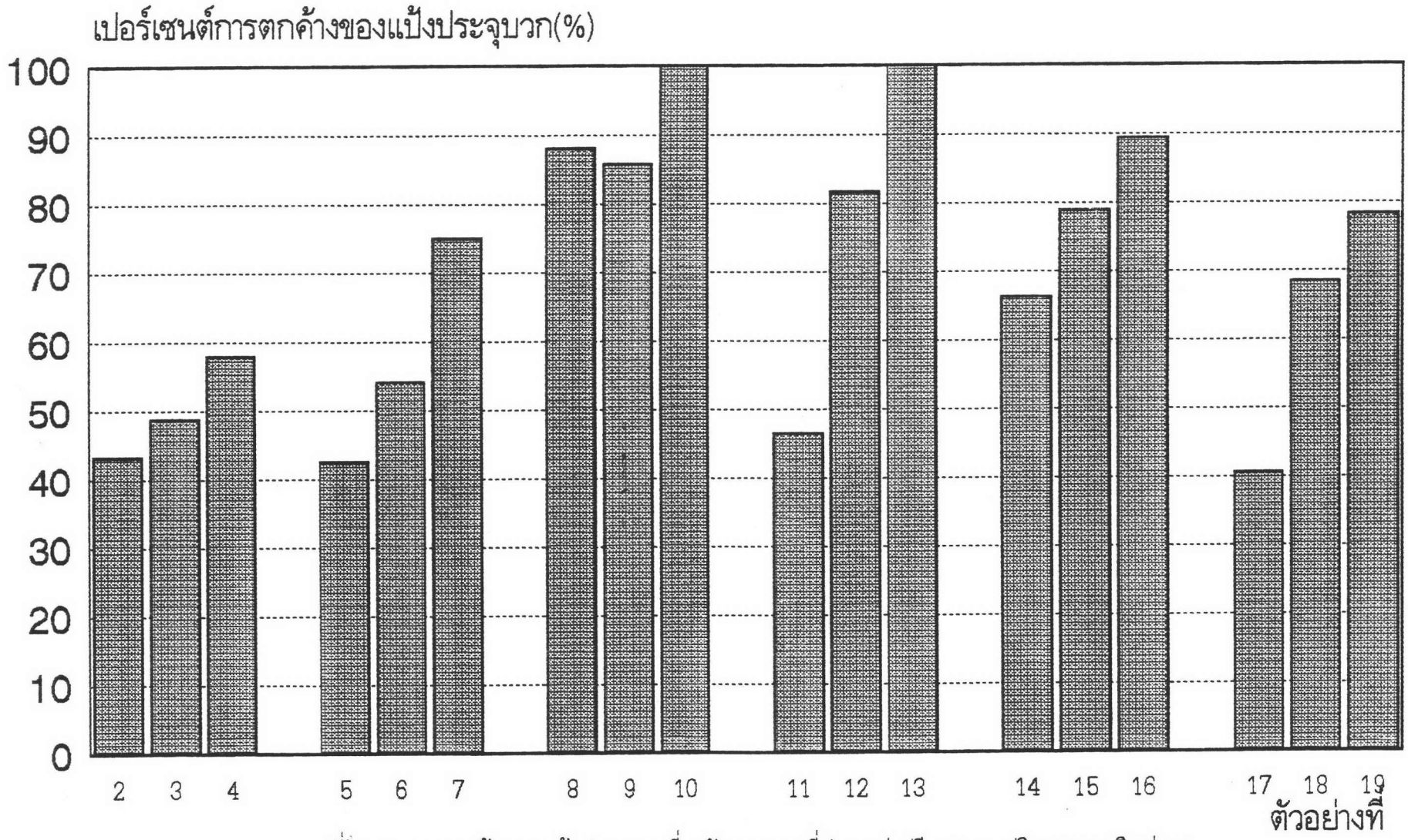
ค. เมื่อระดับการแทนที่ประจุบวกและฟรีเนสคงที่

1) เมื่อฟรีเนส 420 ซีเอสเอฟ เปอร์เซนต์การตกค้างเพิ่มขึ้นเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น

2) เมื่อฟรีเนส 400 ซีเอสเอฟ เปอร์เซ็นต์การตกค้างลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น

3) เมื่อฟรีเนส 304 ซีเอสเอฟ เปอร์เซ็นต์การตกค้างลดลงเมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น

แป้งประจุบวกตกค้างบนเศษเยื่อได้ดีกว่าบนเส้นใยเนื่องจากพื้นที่ผิวมากกว่า ในเยื่อที่มีฟรีเนสสูง แป้งจะตกค้างบนเส้นใยเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเยื่อมีฟรีเนสลดลงจะมีเศษเยื่อมากขึ้น เมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น แป้งประจุบวกจะตกค้างบนเศษเยื่อมากขึ้น และเศษเยื่อจะลอดตะแกรงไปมากด้วย ทำให้เมื่อเติมแป้งประจุบวกมากขึ้น การตกค้างจึงลดลง



รูปที่ 6.12 : การตกค้างของแป้งประจุบวกที่ระดับการแทนที่ประจุ ค่าฟรีเนส และปริมาณการเติมต่างๆ

2. สมบัติของแผ่นทดสอบเมื่อเติมแป้งประจุบวกที่ระดับการบดเยื่อต่างๆ

ในการทดลองที่ 4.3 ทดลองโดยใช้น้ำเยื่อที่มีฟรีเนส 339 ซีเอสเอฟ เติมแป้ง 0-12 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของแผ่นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.4 และจากการวิเคราะห์ในข้อ 6.3.3 สรุปว่าควรทดลองเพิ่มโดยใช้ตัวอย่างน้ำเยื่อที่มีการบดในระดับต่างๆ กัน เพื่อศึกษาผลเนื่องจากการบดเยื่อ จึงทำการทดลองที่ 4.4 โดยใช้น้ำเยื่อที่มีฟรีเนส 420, 400, และ 304 ซีเอสเอฟ ทดลองเติมแป้งที่ 0-14 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ผลการทดสอบสมบัติของแผ่นทดสอบแสดงในตารางที่ 5.6 พบว่าที่การบดเยื่อน้อยๆ การเติมแป้งสามารถปรับปรุงความแข็งแรงของแผ่นทดสอบได้ โดยเฉพาะตัวอย่างที่ 13 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุมีค่า 2.38 เมกกะนิวตันต่อกิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 57.6% เมื่อบดเยื่อเพิ่มขึ้นจนมีฟรีเนส 304 ซีเอสเอฟ การเติมแป้งประจุบวกจะทำให้ความแข็งแรงลดลง ทั้งดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและความต้านทานแรงดึง

ก. ความต้านทานแรงดันทะลุ จากข้อมูลในตารางที่ 5.6 ปริมาณแป้งประจุบวกที่เติมมี 2 ช่วงคือ ประมาณ 8-9 มิลลิกรัม ต่อกรัมเยื่อและ 13-14 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ คำนวณค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุที่ปริมาณแป้งประจุบวก 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ด้วยวิธี Interpolation และจากรูปที่ 6.12 สามารถหาดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุที่ปริมาณแป้งประจุบวก ที่ 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อได้ ข้อมูลทั้งหมดแสดงในตารางที่ 6.5 จากข้อมูลในตารางที่ 6.5 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและฟรีเนส ที่ปริมาณแป้งประจุบวก 10 และ 15 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ของแป้งที่มีระดับการเติมประจุ 0.018 0.033-0.039 และ 0.040-0.044 ในรูปที่ 6.13 6.14 และ 6.15 ตามลำดับ และสามารถหาค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูงสุดเมื่อเติมแป้งประจุบวกแต่ละชนิดได้ดังแสดงในตารางที่ 6.6 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

ตารางที่ 6.5 : ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบที่ระดับการบดเยื่อต่างๆ

ฟรีเนส (ซีเอสเอฟ)	ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ (เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม)						
		ระดับการเติมประจุ 0.018		ระดับการเติมประจุ 0.033-0.039		ระดับการเติมประจุ 0.040-0.044	
	0	10	15	10	15	10	15
420	1.26	1.49	1.49	1.39	1.38	1.2	1.37
400	1.51	1.73	1.93	1.94	2.46	1.19	1.68
339	1.88	1.95	1.96	1.99	2.01	2.03	2.05
304	1.77	1.94	1.63	1.64	1.66	1.6	1.61

ตารางที่ 6.6 : ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูงสุดเมื่อเติมแป้งประจุบวก

ระดับการแทนที่ประจุ	ปริมาณแป้งประจุบวก มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ	ฟรีเนส ซีเอสเอฟ	ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุสูงสุด เมกกะนิวตัน/กิโลกรัม	%การเพิ่ม
-	0	340	1.88	0
0.018.	10	340	1.95	3.7
0.018.	15	370	2.1	11.7
0.033-0.039	10	370	2.12	12.8
0.033-0.039	15	405	2.45	30.3
0.040-0.044	10	360	2.08	10.6
0.040-0.044	15	360	2.1	11.7

1) แป้งประจุบวกแต่ละชนิด สามารถเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุได้ไม่เท่ากัน แป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.033-0.039 เพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุได้มากที่สุด โดยเฉพาะเมื่อเติมในปริมาณ 15 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นถึง 30.3% ดังตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.15 สำหรับแป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.040-0.044การเพิ่มปริมาณแป้งประจุบวกมีผลต่อการเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุน้อยมาก

2) การบดเยื่อมีอิทธิพลต่อการเพิ่มของดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ เยื่อที่ยังไม่บดมีฟรีเนส 420 ซีเอสเอฟมีค่าดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ 1.26 เมกกะนิวตันต่อกิโลกรัม เมื่อบดเยื่อจนได้ ฟรีเนส 339 ซีเอสเอฟ ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นเป็น 1.88 เมกกะ-นิวตันต่อกิโลกรัม หรือเพิ่มขึ้น 49.2% และถ้าบดเยื่อต่อไปจนฟรีเนสเท่ากับ 304 ซีเอสเอฟ ดัชนี-ความต้านทานแรงดันทะลุจะลดลงเหลือ 1.77 เมกกะนิวตันต่อกิโลกรัม

3) ผลการทดลองที่ได้ยืนยันว่า การบดเยื่อมีอิทธิพลต่อการเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเมื่อเติมแป้งประจุบวก ในเยื่อที่ไม่บดแม้ว่าจะเติมแป้งประจุบวกในปริมาณมาก แต่เนื่องจากเยื่อมีพื้นที่ผิวในการเกิดพันธะต่ำ ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุจะเพิ่มเพียงเล็กน้อย เมื่อบดเยื่อมากขึ้น แป้งประจุบวกจะเพิ่มดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุได้มากขึ้นเพราะเมื่อบดเยื่อมากขึ้น เยื่อจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นและเกิดเศษเยื่อมากขึ้นด้วย ทำให้พื้นที่ในการเกิดพันธะมากขึ้น แต่ถ้าบดเยื่อมากเกินไป ความแข็งแรงของเส้นใยจะถูกทำลายมากและเกิดเศษเยื่อขึ้นมาก การเติมแป้งประจุบวกจะทำให้ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุลดลง

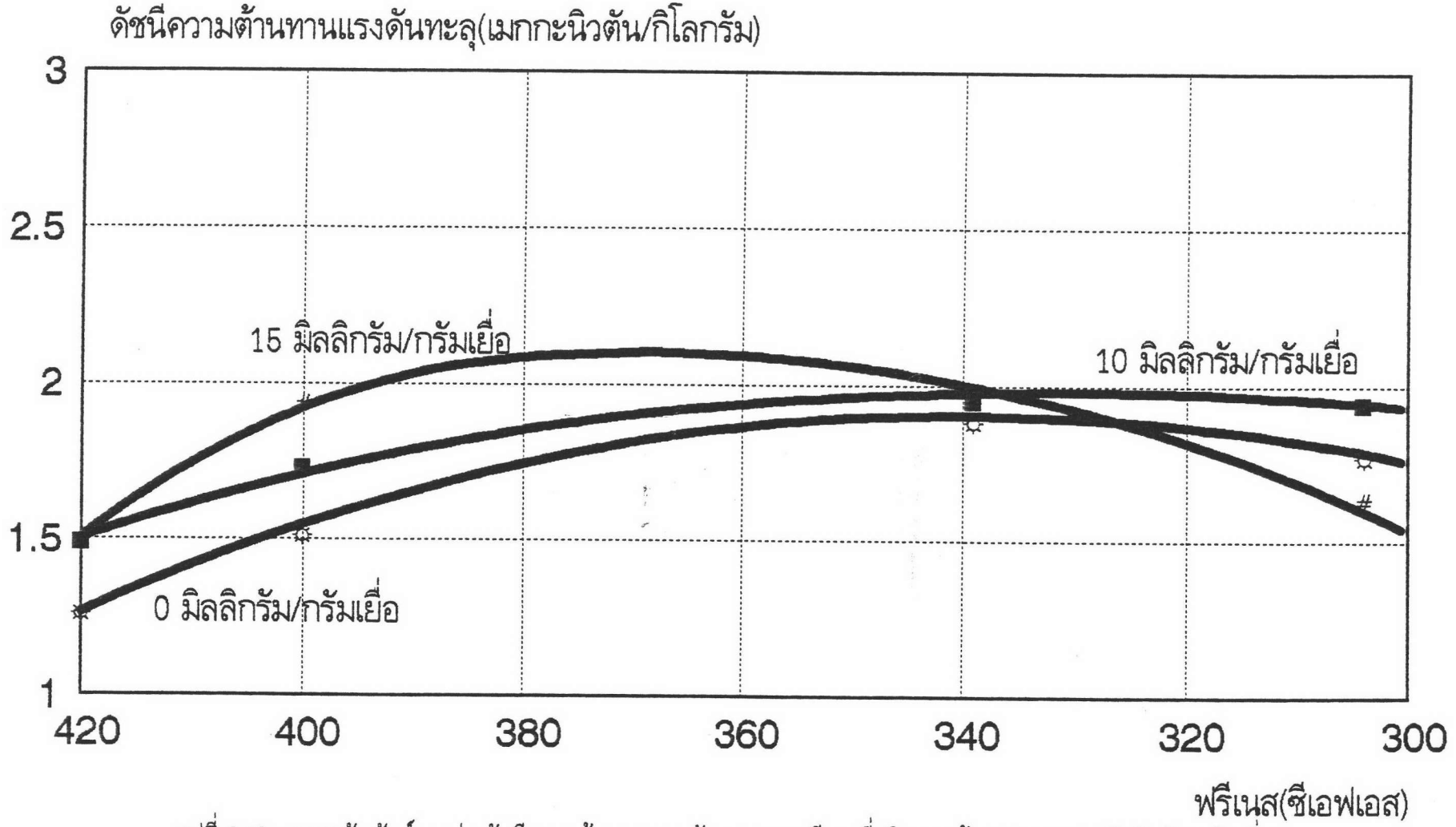
4) ที่ฟรีเนสประมาณ 325 ซีเอสเอฟ การเติมแป้งประจุบวกหรือไม่เติม ไม่มีผลต่อดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ

5) ที่ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเท่ากัน การเติมแป้งประจุบวกมากขึ้นสามารถลดการบดเยื่อลง

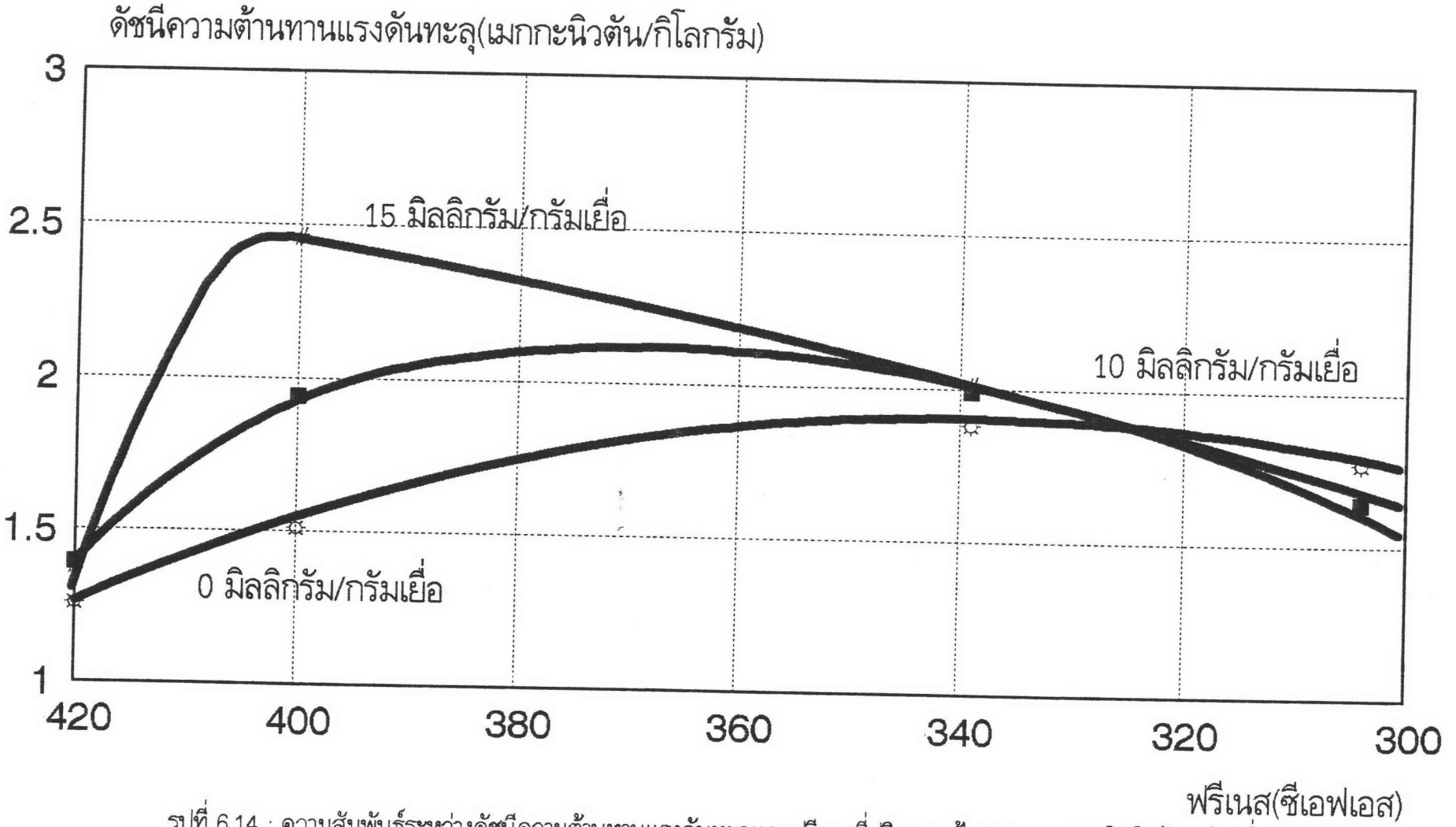
ข. ความต้านทานแรงดึง ดัชนีความต้านทานแรงดึงของแผ่นทดสอบ ที่ได้จากการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.6 มีการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุ คือ เมื่อไม่เติมแป้งประจุบวก ดัชนีความต้านทานแรงดึงมีค่าสูงสุดที่ฟรีเนส 339 ซีเอสเอฟ เมื่อเติมแป้งประจุบวก ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นเมื่อฟรีเนสสูงกว่า 320-330 ซีเอสเอฟ และมีค่าลดลงเมื่อฟรีเนสมีค่าต่ำกว่า 320-330 ซีเอสเอฟ

ค. ความยืดตัว เมื่อบดเยื่อมากขึ้น การยืดตัวจะเพิ่มขึ้นแล้วลดลง เมื่อเติมแป้งประจุบวก ความยืดตัวมีค่าใกล้เคียงกับเมื่อไม่เติมแป้ง ยกเว้นเยื่อที่ไม่บดจะมีความยืดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเติมแป้งประจุบวก

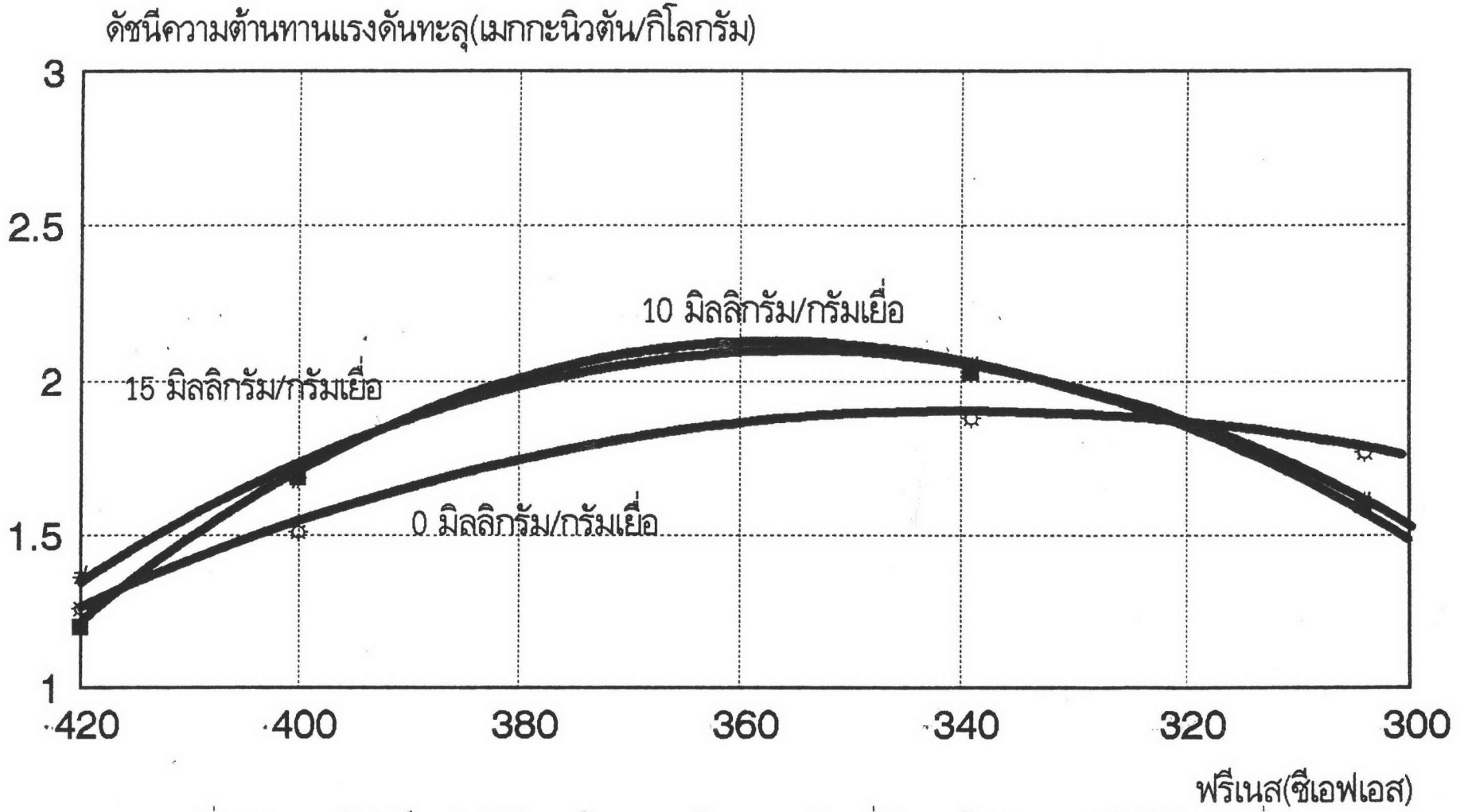
ง. ความสามารถในการทรงรูป ไม่พบว่าแป้งประจุบวกที่เติม ทำให้ความสามารถในการทรงรูปเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.13 : ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและฟรีเนสที่ปริมาณแป้ง 10 และ 15 มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ ของแป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.018



รูปที่ 6.14 : ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและฟรีเนสที่ปริมาณแป้ง 10 และ 15 มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ ของแป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.033-0.039



รูปที่ 6.15 : ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุและฟรีเนสที่ปริมาณแป้ง 10 และ 15 มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ ของแป้งประจุบวกที่มีระดับการเติมประจุ 0.040-0.044

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการเติมแป้งประจุบวก

ในการเติมแป้งประจุบวกในกระบวนการผลิต ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นก็คือค่าแป้งประจุบวก ค่าใช้จ่ายในการเตียมน้ำแป้ง ค่าไฟฟ้า ค่าปั๊ม ค่าถังใส่น้ำแป้ง ฯลฯ อาจรวมถึงภาระของระบบบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มขึ้นด้วย ในกรณีที่การตกค้างของแป้งประจุบวกต่ำ ค่าใช้จ่ายที่ลดลงก็คือค่าไฟฟ้าในการเดินเครื่องบดเยื่อเนื่องจากสามารถลดเวลาในการบดเยื่อลงได้และค่าซ่อมบำรุงเครื่องบดเยื่อ การตัดสินใจว่าควรใช้แป้งหรือไม่ จะพิจารณาภาระด้านค่าใช้จ่ายเป็นหลัก แต่ในบางครั้ง แม้ค่าใช้-จ่ายจะสูงขึ้นก็ต้องทำ เพื่อแลกกับความพอใจของลูกค้า ซึ่งอาจจะหมายถึงยอดขายที่เพิ่มขึ้นในอนาคตด้วย การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในหัวข้อนี้ จะพิจารณาเฉพาะราคาแป้งประจุบวกและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องบดเยื่อเท่านั้น เพราะเป็นค่าใช้จ่ายแปรผันที่มีมูลค่าสูงที่สุด

1. ค่าไฟฟ้าเนื่องจากการบดเยื่อ

การบดเยื่อของบริษัทฯ เป็นการบดเยื่อแบบแบทช์ ใช้โหลดในการบดคงที่ควบคุมค่าฟรีเนสด้วยการแปรเวลาในการบด ถ้าต้องการฟรีเนสต่ำก็บดเยื่อนานขึ้น เมื่อได้ฟรีเนสตามต้องการก็ถ่ายเยื่อออกจากถังเวียนเยื่อ จากการเก็บตัวอย่างเยื่อมาทดลองในข้อ 4.4 ได้จับเวลาบดเยื่อเทียบกับค่าฟรีเนส ได้ผลดังนี้

เวลาบดเยื่อ 1 ชั่วโมง ฟรีเนส 400 ซีเอสเอฟ

เวลาบดเยื่อ 2 ชั่วโมง ฟรีเนส 304 ซีเอสเอฟ

สามารถคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 : ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบดเยื่อ

ฟรีเนส(ซีเอสเอฟ)	420	410	400	390	380	370	360	350	340	330	320	310	304
เวลา(ชั่วโมง)	0	0.7	1	1.13	1.25	1.37	1.49	1.6	1.7	1.8	1.89	1.96	2
ค่าไฟฟ้า(บาท)	0	54	78	88	97	107	116	124	132	140	147	153	156

หมายเหตุ 1 อัตราค่าไฟฟ้า = 1.50 บาท/กว.-ชม.(รวมค่า Demand charge)

2 ค่าไฟฟ้า = 140.25 บาท/ชม.

3 1 แบทช์ = 1.8 ตัน

2. ค่าใช้จ่ายแป้งประจุบวก

ราคาแป้งประจุบวกที่ระดับการแทนที่ประจุต่างๆ มีดังนี้

ระดับการแทนที่ประจุ 0.018 ราคา 14 บาทต่อกิโลกรัม

ระดับการแทนที่ประจุ 0.033-0.039 ราคา 17 บาทต่อกิโลกรัม

ระดับการแทนที่ประจุ 0.040-0.044 ราคา 19 บาทต่อกิโลกรัม

3. ค่าใช้จ่ายเมื่อต้องการความต้านทานแรงดันทะลุเท่าเดิม

ตารางที่ 6.8 แสดงค่าใช้จ่ายที่ความต้านทานแรงดันทะลุเท่าเดิม

ตารางที่ 6.8 : ค่าใช้จ่ายที่ความต้านทานแรงดันทะลุเท่าเดิม

ระดับการแทนที่ประจุ	ปริมาณแป้งประจุบวก มิลลิกรัม/กรัมเยื่อ	ฟรีเนส ซีเอสเอฟ	ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุที่ต้องการ เมกกะนิวตันต่อกิโลกรัม	ค่าแป้ง บาท/ตันกระดาษ	ค่าไฟฟ้า บาท/ตันกระดาษ	รวมค่าใช้จ่าย บาท/ตันกระดาษ
-	0	340	1.88	0	156	156
0.018.	10	370	1.88	140	107	247
0.018.	15	405	1.88	210	66	276
0.033-0.039	10	405	1.88	170	66	236
0.033-0.039	15	415	1.88	255	27	282
0.040-0.044	10	390	1.88	190	88	278
0.040-0.044	15	390	1.88	285	88	373

ถ้าต้องการดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุเท่าเดิม เท่ากับแรงดันทะลุสูงสุดที่การบดเยื่อทำได้ การบดเยื่อล้วนๆ มีค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด คือ 156 บาทต่อตันกระดาษ การเติมแป้งประจุบวกเพื่อลดการบดเยื่อให้ผลไม่คุ้มค่า เพราะค่าใช้จ่ายจะสูงกว่าเมื่อบดเยื่อเพียงอย่างเดียว

4. ค่าใช้จ่ายเมื่อต้องการความต้านทานแรงดันทะลุสูงสุด

จากตารางที่ 6.6 และรูปที่ 6.14 ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุมีค่าสูงสุด เมื่อเติมแป้งประจุบวกที่มีระดับการแทนที่ 0.033-0.039 ปริมาณ 15 มิลลิกรัมต่อกรัมเยื่อ หรือกิโลกรัมต่อตันเยื่อ ดัชนีความต้านทานแรงดันทะลุของแผ่นทดสอบเพิ่มขึ้น 30.3% ที่ฟรีเนส 405 ซีเอสเอฟ คำนวณค่าใช้จ่ายได้ดังนี้

ค่าไฟฟ้า	66	บาทต่อตันกระดาษ
ค่าแป้งประจุบวก	255	บาทต่อตันกระดาษ
ค่าใช้จ่ายรวม	321	บาทต่อตันกระดาษ

ค่าใช้จ่ายที่คำนวณได้นั้น เป็นค่าใช้จ่ายต่อตันกระดาษชั้นขาว ในกระดาษกล่องไม่เคลือบที่ผลิตโดยบริษัทฯ มีเปอร์เซนต์ชั้นขาวเฉลี่ยประมาณ 23.2% ดังนั้น คิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อตันกระดาษจริงจะเท่ากับ (321)(.232) = 74.5 บาทต่อตันกระดาษกล่องไม่เคลือบ