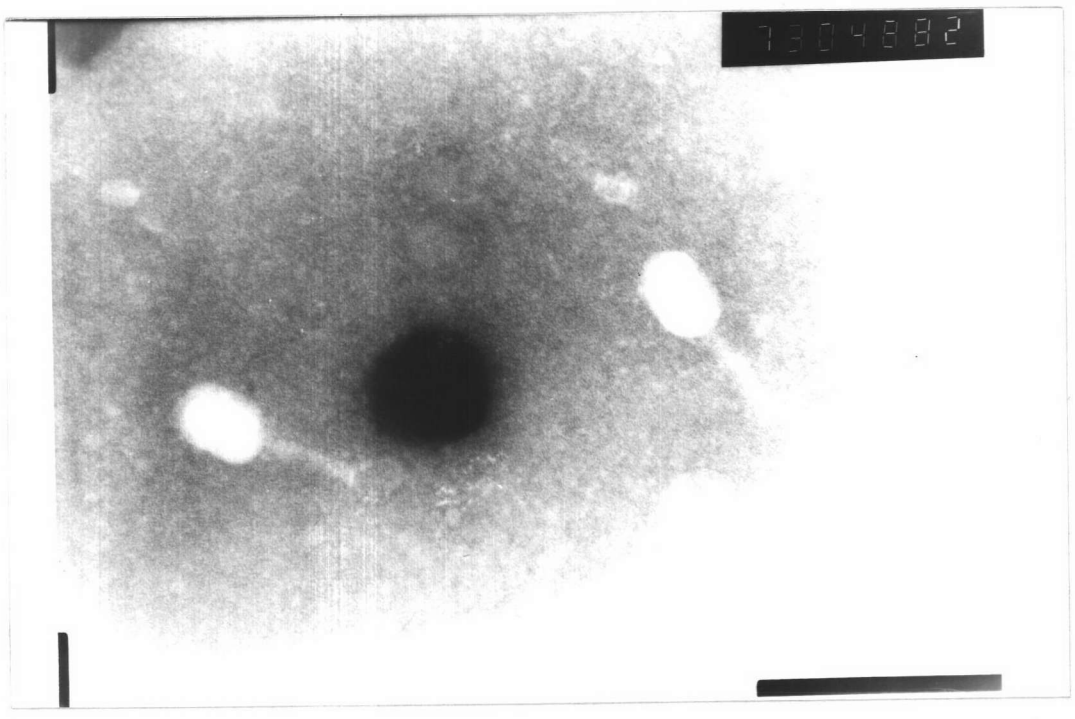
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิจารณ์

ลักษณะของโคลิฟาจที่ใช้ในการวิจัย

ลักษณะของโคลิฟาจที่ทำการเพาะขึ้นในห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้ในการวิจัย แสดงดังรูปที่ 4.1 จากรูปร่างลักษณะของโคลิฟาจที่ได้เป็นรูป Icosahedral ด้านไม่เท่า มีหาง และมีขนาดส่วนหัวประมาณ 55 x 88 นาโนเมตร ส่วนหาง 22 x 143 นาโนเมตร



รูปที่ 4.1 ลักษณะของโคลิฟาจที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 91,250 เท่า โดยวิธี Negative straining

ถ่ายที่ : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจที่เติมในน้ำประปา และความขุ่นที่มีอยู่ในน้ำประปา

1. <u>การกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน</u>

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน จะตรวจพบโคลิฟาจในน้ำกรอง มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 10 - 10^3 พีเอฟยู/มิลลิลิตร โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจแตกต่างกันตามอัตรากรอง แสดงดังรูปที่ 4.2 ซึ่งอัตรากรองที่ต่างกันให้ผลการกำจัดโคลิฟาจไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยอัตรากรองที่ใช้ยังอยู่ในช่วงที่ผู้ผลิตแนะนำให้ใช้ คือ ไม่เกิน 2.5 ลิตร/นาที

การตรวจพบโคลิฟาจในน้ำกรอง เมื่อใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน เนื่องจากโคลิฟาจสามารถผ่านช่องว่างของเมมเบรนได้ แต่ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจระหว่าง 4-6 ล็อก ก็ผ่านมาตรฐาน SWTR ซึ่งกำหนดให้ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ อย่างน้อย 4 ล็อก (Jacangelo et al., 1991)

สำหรับการกำจัดความขุ่นที่มีอยู่ในน้ำประปา จากตารางที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง ที่อัตรากรองต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าอัตรากรองที่เปลี่ยนไปให้ผลในการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกัน ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำกรองเท่ากับ 0.35 เอ็นทียู

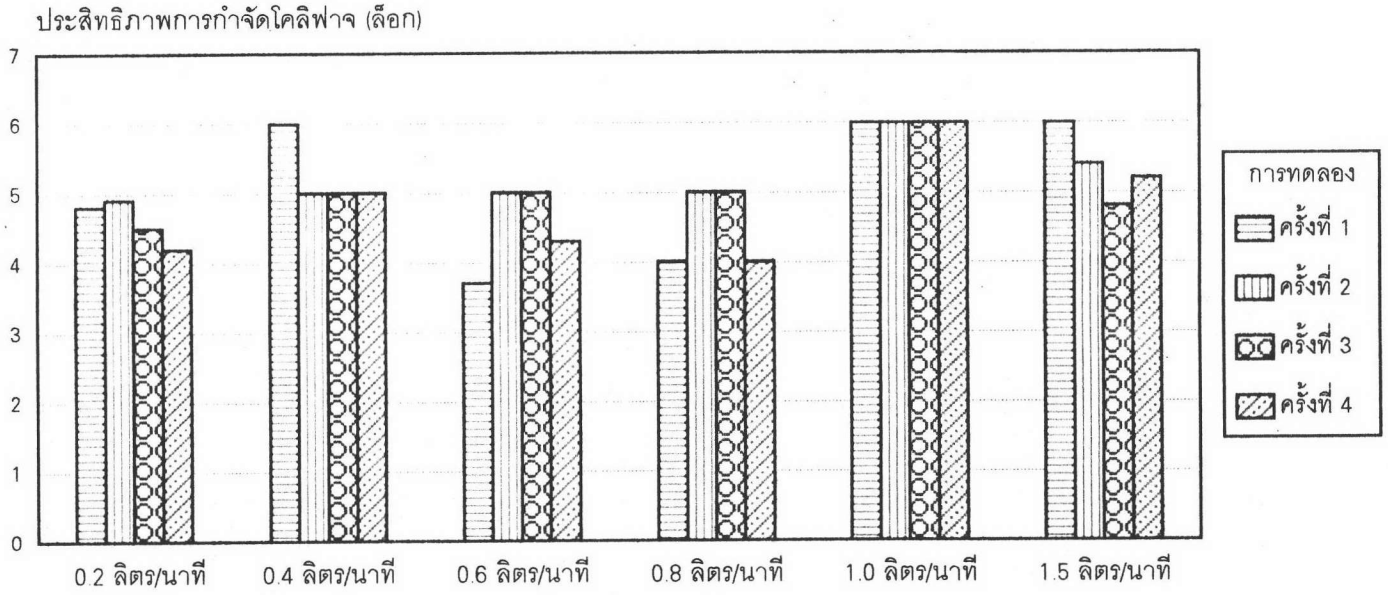
2. <u>การกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน</u>

จากตารางที่ 4.2 พบว่าการกรองตัวอย่างน้ำทีมีโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน จะตรวจไม่พบโคลิฟาจในน้ำกรอง ทุกอัตรากรอง ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ อยู่ระหว่าง ≥ 6 ล็อก ถึง ≥ 7.3 ล็อก เนื่องจากโคลิฟาจที่ใช้ในการทดลองมีขนาดส่วนหัว ประมาณ 55 x 88 นาโนเมตร (0.055 x 0.088 ไมครอน) ส่วนหาง 22 x 143 นาโนเมตร (0.022 x 0.143 ไมครอน) ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่า 0.03 ไมครอน จึงไม่สามารถทะลุผ่านช่องว่างของเมมเบรนขนาดเฉลี่ย 0.03 ไมครอนได้ การกรองที่เกิดขึ้นเป็นกลไกการติดค้างบนผิวเมมเบรน

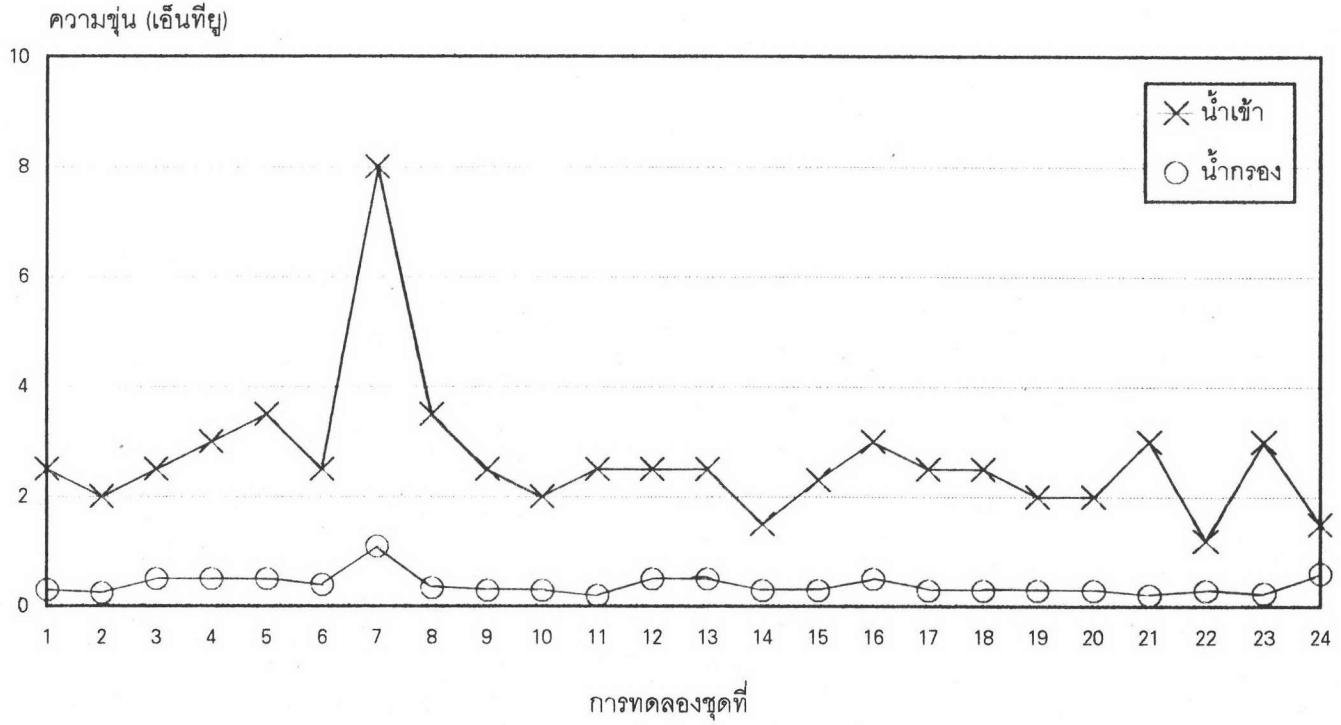
สำหรับการกำจัดความขุ่นที่มีอยู่ในน้ำประปา โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ให้ผลเช่นเดียวกับการกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำกรองเท่ากับ 0.31 เอ็นทียู

ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ และความขุ่นเฉลี่ยที่อัตรากรองต่างๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ

การทดลองชุดที่	อัตรากรอง (ลิตร/นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโคลิฟาจ (พีเอฟยู/มิลลิลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ (ล็อก)	ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู)	
		น้ำเข้า	น้ำกรอง		น้ำเข้า	น้ำกรอง
1	0.2	2.2×10^{7}	323	4.8	2.5	0.3
2		1.5×10^{7}	180	4.9	2.0	0.25
3		1.8×10^{7}	707	4.5	2.5	0.5
4		1.3×10^{7}	1060	4.2	3.0	0.5
5	0.4	1.4×10^{7}	25	6	3.5	0.5
6		1.0×10^{7}	132	5	2.5	0.4
7		7.8×10^{6}	58	5	8.0	1.1
8		1.3×10^{7}	145	5	3.5	0.35
9	0.6	2.6×10^{6}	427	3.7	2.5	0.3
10		1.2×10^{7}	227	5.0	2.0	0.3
11		1.6×10^{7}	230	5.0	2.5	0.2
12		4.2×10^{6}	57	4.3	2.5	0.5
13	0.8	2.6×10^{7}	4.2×10^{3}	4	2.5	0.5
14		7.8×10^{6}	40	5	1.5	0.3
15		1.8×10^{7}	517	5	2.3	0.3
16		4.0×10^{7}	2.5×10^{3}	4	3.0	0.5
17	1.0	1.8×10^{7}	12	6	2.5	0.3
18		1.8×10^{7}	12	6	2.5	0.3
19		1.3×10^{7}	15.5	6	2.0	0.3
20		1.3×10^{7}	16	6	2.0	0.3
21	1.5	2.3×10^{7}	27	6.0	3.0	0.22
22		1.3×10^{7}	57	5.4	1.2	0.3
23		1.1×10^{7}	170	4.8	3.0	0.25
24		1.6×10^{7}	117	5.2	1.5	0.6



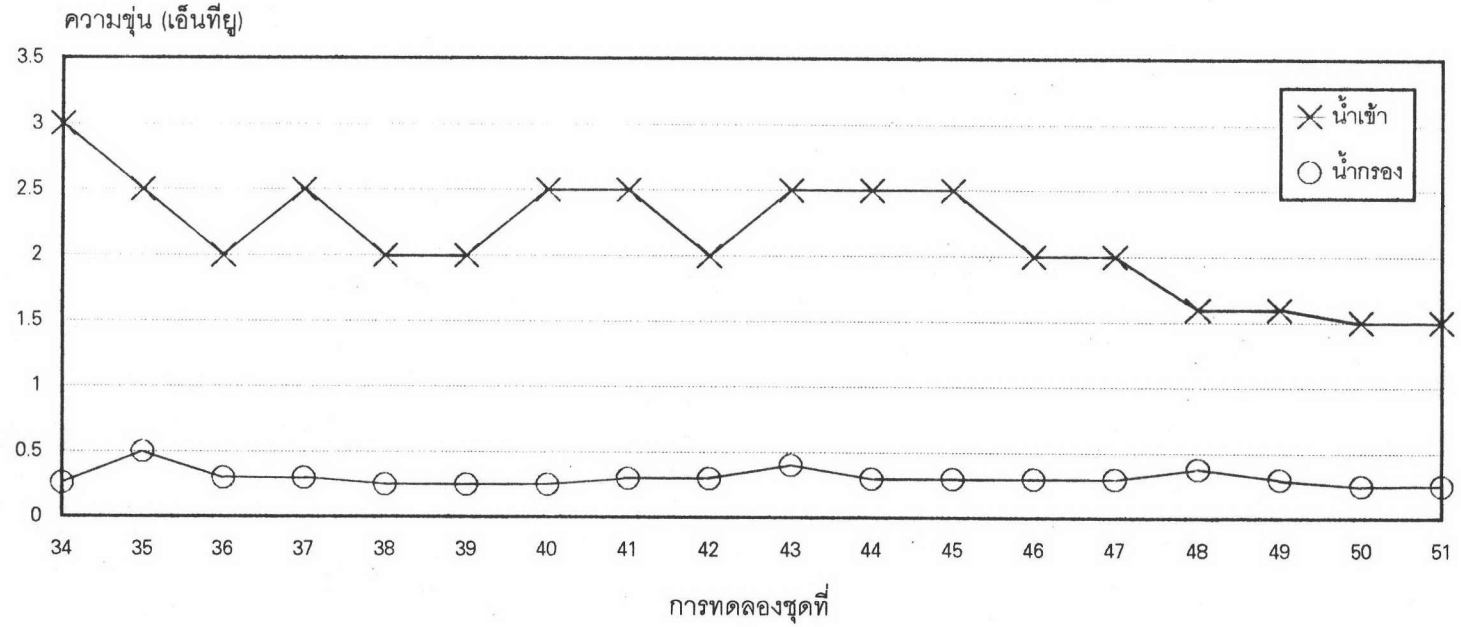
รูปที่ 4.2 **กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด** 0.1 **ไมครอน ที่อัตรากรองต่างๆ กัน (การทดลองชุดที่** 1 - 24)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ การทดลองชุดที่ 1-24

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ และความขุ่นเฉลี่ยที่อัตรากรองต่างๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ

การทดลองชุดที่	อัตรากรอง (ลิตร/นาที)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโคลิฟาจ (พีเอฟยู/มิลลิลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ (ล็อก)	ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู)	
		น้ำเข้า	น้ำกรอง		น้ำเข้า	น้ำกรอง
34	0.2	$3.0x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.5	3.0	0.26
35	0.4	$1.1x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7.0	2.5	0.5
36	0.6	$4.0x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.6	2.0	0.3
37		$2.2x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7.3	2.5	0.3
38		$1.5x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7.2	2.0	0.25
39		$1.5x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7.2	2.0	0.25
40	0.8	$8.0x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6	2.5	0.25
41		$1.0x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.5	0.3
42		$1.4x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.0	0.3
43		$1.1x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.5	0.4
44	1.0	$1.8x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.5	0.3
45		$1.8x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.5	0.3
46		$1.3x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.0	0.3
47		$1.3x10^7$	ตรวจไม่พบ	≥ 7	2.0	0.3
48	1.5	$8.2x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.9	1.6	0.38
49		$2.2x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.3	1.6	0.3
50		$7.5x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.9	1.5	0.25
51		$1.5x10^6$	ตรวจไม่พบ	≥ 6.2	1.5	0.25



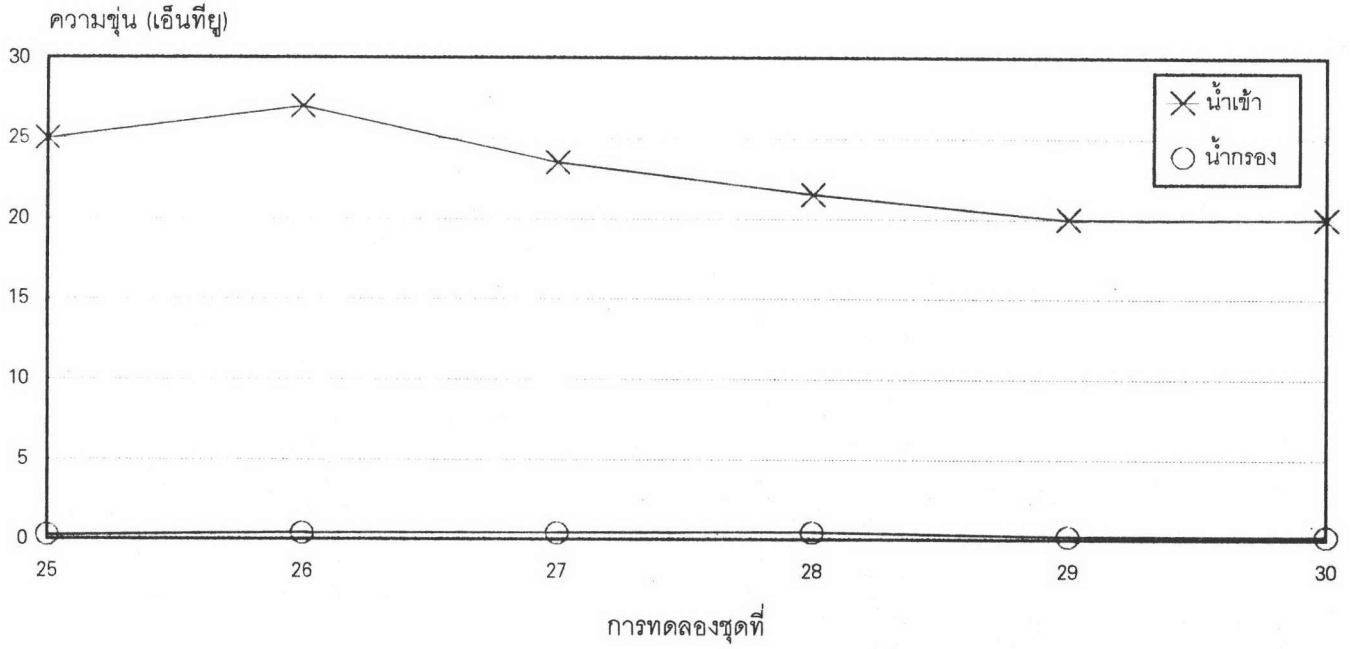
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ การทดลองชุดที่ 34-51

ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ที่เติมในน้ำประปา

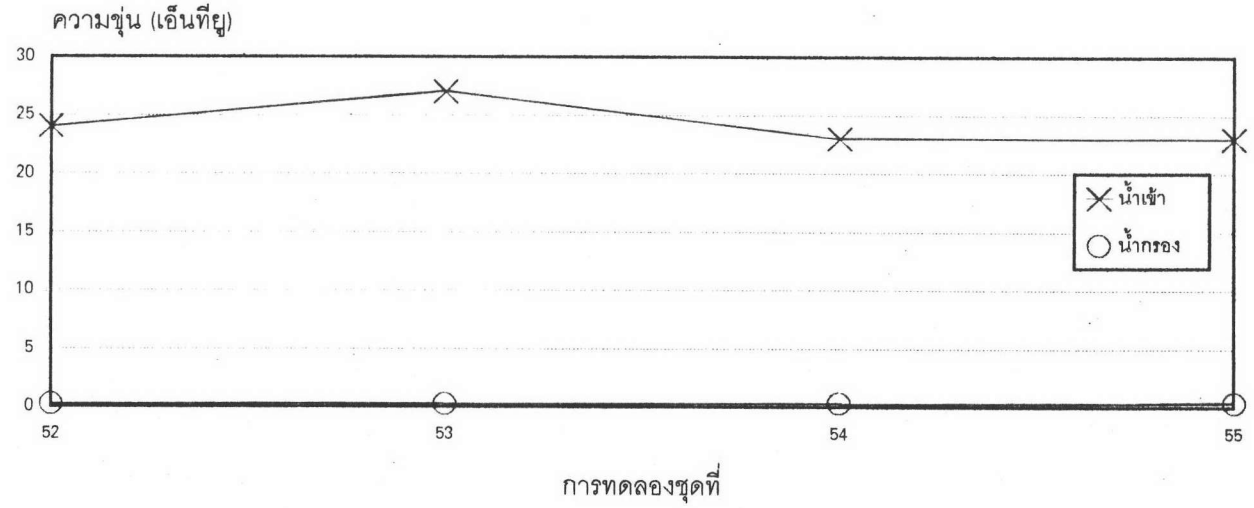
จากตารางที่ 4.3 ซึ่งเปรียบเทียบผลที่ได้จากการกรอง น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่างๆ กัน นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าการใช้เมมเบรนขนาดต่างกัน และการเปลี่ยนอัตรากรอง ให้ผลในการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกันโดยน้ำที่กรองด้วยเมมเบรนทั้งสองขนาดมีค่าความขุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 เอ็นทียู เนื่องจากความขุ่นมีขนาดเฉลี่ยใหญ่กว่าช่องว่างเฉลี่ยของเมมเบรนมาก จึงเกิดการกรองติดค้างบนผิวเมมเบรน

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการกรองน้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่างๆ กัน

ขนาดรูเมมเบรน (ไมครอน)	อัตรากรอง (ลิตร/นาที)	ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู)	
		น้ำเข้า	น้ำกรอง
0.1	0.2	25	0.3
	0.4	27	0.4
	0.6	23.5	0.4
	0.8	21.5	0.45
	1.0	20	0.2
	1.5	20.	0.2
0.03	0.6	24	0.24
	0.8	27	0.26
	1.0	23	0.3
	1.5	23	0.4



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู การทดลองชุดที่ 25-30



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความขุ่นของน้ำเข้า และน้ำกรอง โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู การทดลองชุดที่ 52-55

ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ที่เติมในน้ำประปา

การกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู จะทดลองกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน เท่านั้น เนื่องจาก ตรวจไม่พบโคลิฟาจในน้ำกรองที่ได้จากการใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน กรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ โดยไม่มีความขุ่นสังเคราะห์ การทดลองชุดนี้จึงทดลองกับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าการกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน จะตรวจพบโคลิฟาจในน้ำกรอง ช่วงเวลา 0 - 40 นาที หลังจากนั้นจะตรวจไม่พบจนสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากความขุ่นสังเคราะห์ที่เติมในตัวอย่างน้ำ จะเคลือบที่ผิวเมมเบรน ทำให้ขนาดช่องว่างเมมเบรนเปลี่ยนไป คือมีขนาดเล็กลง ซึ่งโคลิฟาจไม่สามารถทะลุผ่านได้ ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจจึงสูงขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 45 นาที คือ ตรวจไม่พบโคลิฟาจในน้ำกรอง

ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ในตัวอย่างน้ำชนิดนี้ พบว่าน้ำกรองมีความขุ่นเฉลี่ย 0.24 เอ็นทียู

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน อัตรากรอง 0.2 ลิตร/นาที กรองตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู

การทดลองชุดที่	เวลากรอง (นาที)	ความเข้มข้นของโคลิฟาจ (พีเอฟยู/มิลลิลิตร)		ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจ (ล็อก)	ความขุ่นเฉลี่ย (เอ็นทียู)	
		น้ำเข้า	น้ำกรอง		น้ำเข้า	น้ำกรอง
31	0	2.5×10^6			21	
	30		860	3.5		0.25
	40		180	42		0.25
	50		ตรวจไม่พบ	≥ 6.4		0.25
	60		ตรวจไม่พบ	≥ 6.4		0.2
32	0	3×10^6			20	
	30		910	3.6		0.2
	40		120	4.4		0.25
	45		ตรวจไม่พบ	≥ 6.5		0.3
	50		ตรวจไม่พบ	≥ 6.5		0.2
	60		ตรวจไม่พบ	≥ 6.5		0.25
33	0	2.2×10^6			25	
	30		720	3.4		0.3
	40		200	4.0		0.3
	45		ตรวจไม่พบ	≥ 6.3		0.2
	50		ตรวจไม่พบ	≥ 6.3		0.25
	60		ตรวจไม่พบ	≥ 6.3		0.25

เวลาที่ใช้ในการกรอง

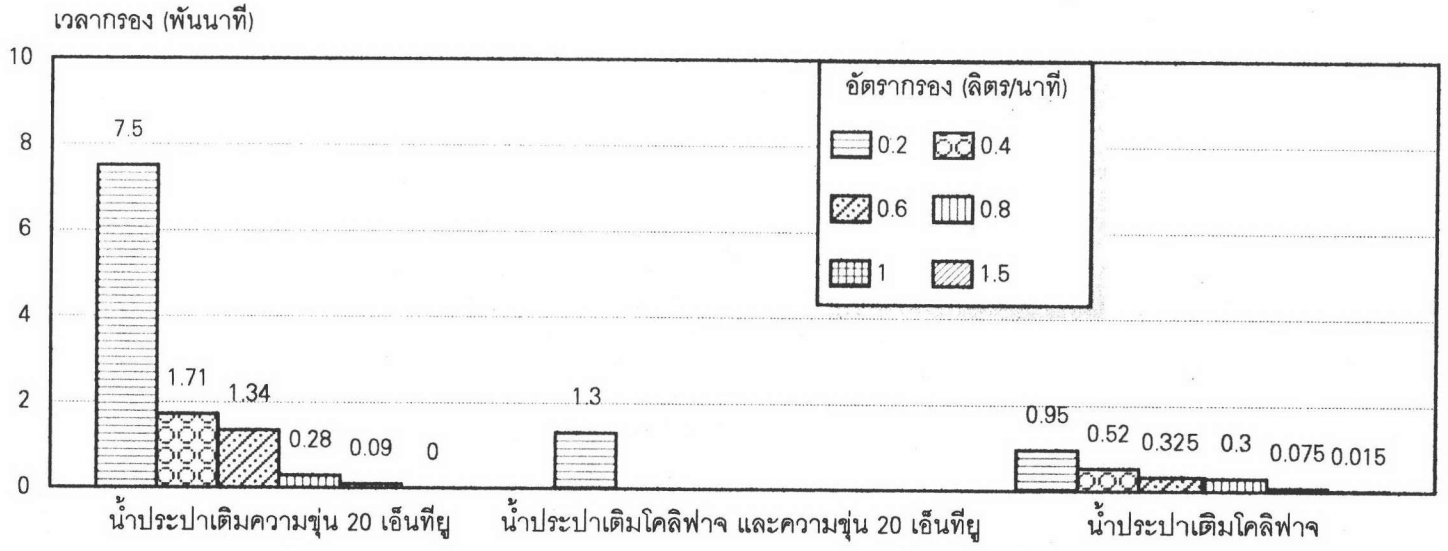
จากกราฟรูปที่ 4.7 และ 4.8 เวลาที่ใช้ในการกรองจนกระทั่งเมมเบรนอุดตัน คือกำหนดให้เมื่อความดันขึ้นถึง 1 บาร์ หรือ 2 บาร์ โดยขนาดช่องว่าง และอัตรากรองคงที่ พบว่า ตัวอย่างน้ำต่างชนิดกันใช้เวลากรอง(อายุกรอง) เรียงตามลำดับ จากมากไปน้อยดังนี้ คือ 1. น้ำประปาเติมความขุ่น 20 เอ็นทียู 2. น้ำประปาเติมโคลิฟาจ และความขุ่น 20 เอ็นทียู 3. น้ำประปาเติมโคลิฟาจ

เนื่องจากขนาดอนุภาคความขุ่นเฉลี่ยมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างเฉลี่ยของเมมเบรนทั้งสองขนาด จึงไม่สามารถเข้าไปติดค้างภายในรูของเมมเบรน (internal clogging) แต่จับอยู่บนผิวเมมเบรน เกิดการกรองติดค้างบนผิวเมมเบรน และช่องว่างระหว่างอนุภาคของความขุ่นก็มีมาก ทำให้อายุการกรองยาวนานที่สุด สำหรับอัตรากรองที่สูงขึ้นจะมีอายุการกรองสั้นกว่าการใช้อัตราการกรองต่ำ เนื่องจากการใช้อัตรากรองสูง ต้องเพิ่มความดันสูงขึ้น อนุภาคความขุ่นที่เคลือบอยู่บนผิวเมมเบรนถูกอัดตัวแน่นขึ้น ความต้านทานของเมมเบรนจึงสูงขึ้น อายุกรองจึงสั้นลง

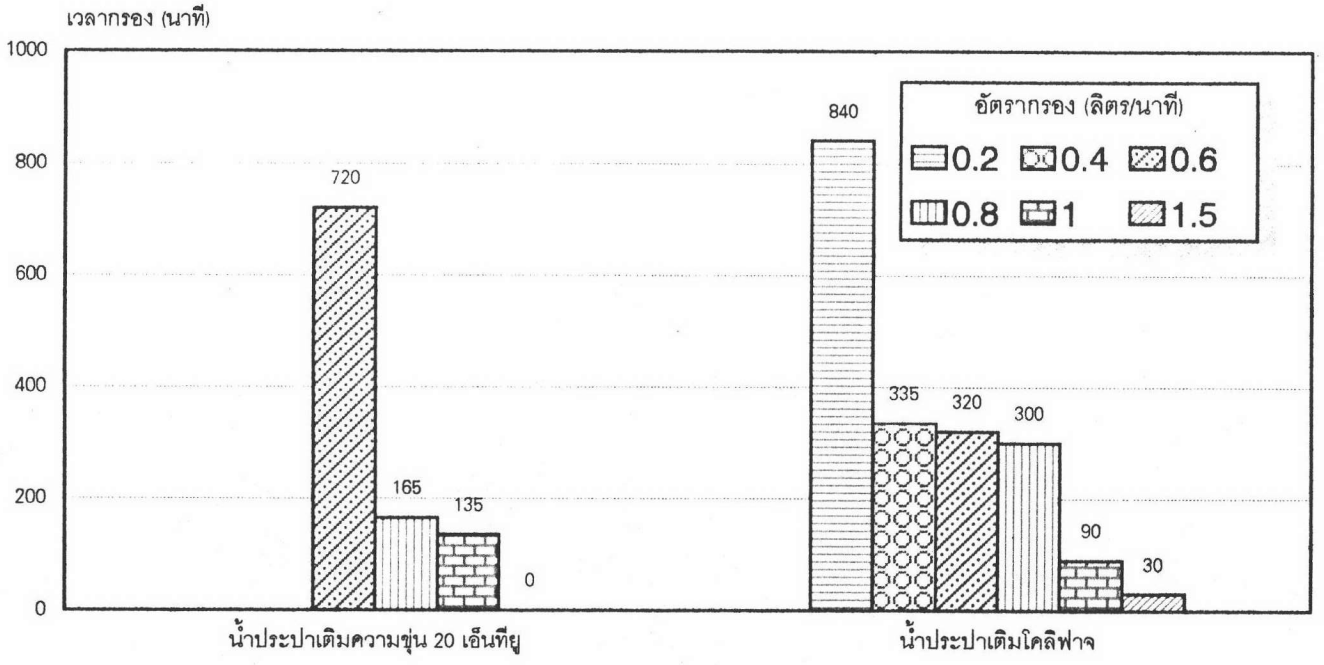
สำหรับการกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน อนุภาคโคลิฟาจจะมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างเฉลี่ยของเมมเบรน จึงกรองติดค้างบนผิวเมมเบรนเช่นกัน และอัตรากรองที่สูงขึ้นก็ให้ผลเช่นเดียวกับการกรองอนุภาคความขุ่น

การกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอนนั้น อนุภาคโคลิฟาจสามารถทะลุผ่านเข้าไปในช่องว่างของเมมเบรนได้ ความต้านทานที่เกิดในระบบจึงเกิดจากการอุดตันภายในรูเมมเบรนด้วย ทำให้อายุการกรองสั้นกว่าการกรองตัวอย่างน้ำที่มีความขุ่นเพียงอย่างเดียว หรือการกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ ซึ่งอนุภาคความขุ่นจะเคลือบบนผิวเมมเบรน ทำให้โคลิฟาจทะลุผ่านเมมเบรนได้น้อยลง ดังนั้นการกรองโดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน นอกจากเกิดการติดค้างบนผิวเมมเบรน เช่นเดียวกับ เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอนแล้ว ยังเกิดการอุดตันภายในช่องว่างของเมมเบรนด้วย

การกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ จะมีอายุการกรอง 1300 นาที ซึ่งยาวนานกว่า การกรองตัวอย่างน้ำที่มีโคลิฟาจ (885 นาที) นอกจากอายุการกรองที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจในตัวอย่างน้ำที่มีความขุ่นสังเคราะห์ก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความขุ่นสังเคราะห์มีผลทำให้อายุการกรอง และประสิทธิภาพการกำจัดโคลิฟาจเพิ่มขึ้น เนื่องจากความขุ่นสังเคราะห์ทำหน้าที่คล้าย prefilter ที่เคลือบบนผิวเมมเบรน จึงเกิดการกรองหยาบขึ้นชั้นหนึ่งก่อนถึงชั้นเมมเบรน



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกรองตัวอย่างน้ำจนเมมเบรนอุดตันที่ความดัน 1 บาร์ ที่อัตรากรองต่างๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกรองตัวอย่างน้ำจนเมมเบรนอุดตันที่ความดัน 1 บาร์ ที่อัตรากรองต่างๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน

ความต้านทานเชิงชลศาสตร์ของเมมเบรน (Hydraulic resistance of the membrane)

จากกราฟรูปที่ 4.9 - 4.22 พบว่า เมื่อเวลากรองเพิ่มขึ้น ความดันที่ใช้ในการกรองจะเพิ่มตามไปด้วย เพื่อรักษาอัตรากรอง (อัตราการผลิตน้ำ) ให้คงที่ การเพิ่มความดันก็เพื่อลดความต้านทานเชิงชลศาสตร์ ที่เกิดขึ้นของเมมเบรน จากสมการที่ 4.1 (Vigneswaren, Ben Aim, 1991)

$$J = \Delta P/\mu R \qquad (4.1)$$

โดยที่ J = อัตรากรองต่อพื้นที่เมมเบรน (ลิตร/นาที ตารางเมตร)

ΔP = ผลต่างความดันระหว่างทางน้ำเข้า และน้ำออก (บาร์)

μ = ความหนืดของน้ำ = 0.001 นิวตัน วินาที/ตารางเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

R = ความต้านทานเชิงชลศาสตร์ซึ่งประกอบด้วย

R_a = ความต้านทานจริงของเมมเบรน ตามทฤษฎี

R_c = ความต้านทานที่เกิดจากการให้ความดันกับระบบ

R_f = ความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันบนผิวเมมเบรน (fouling)

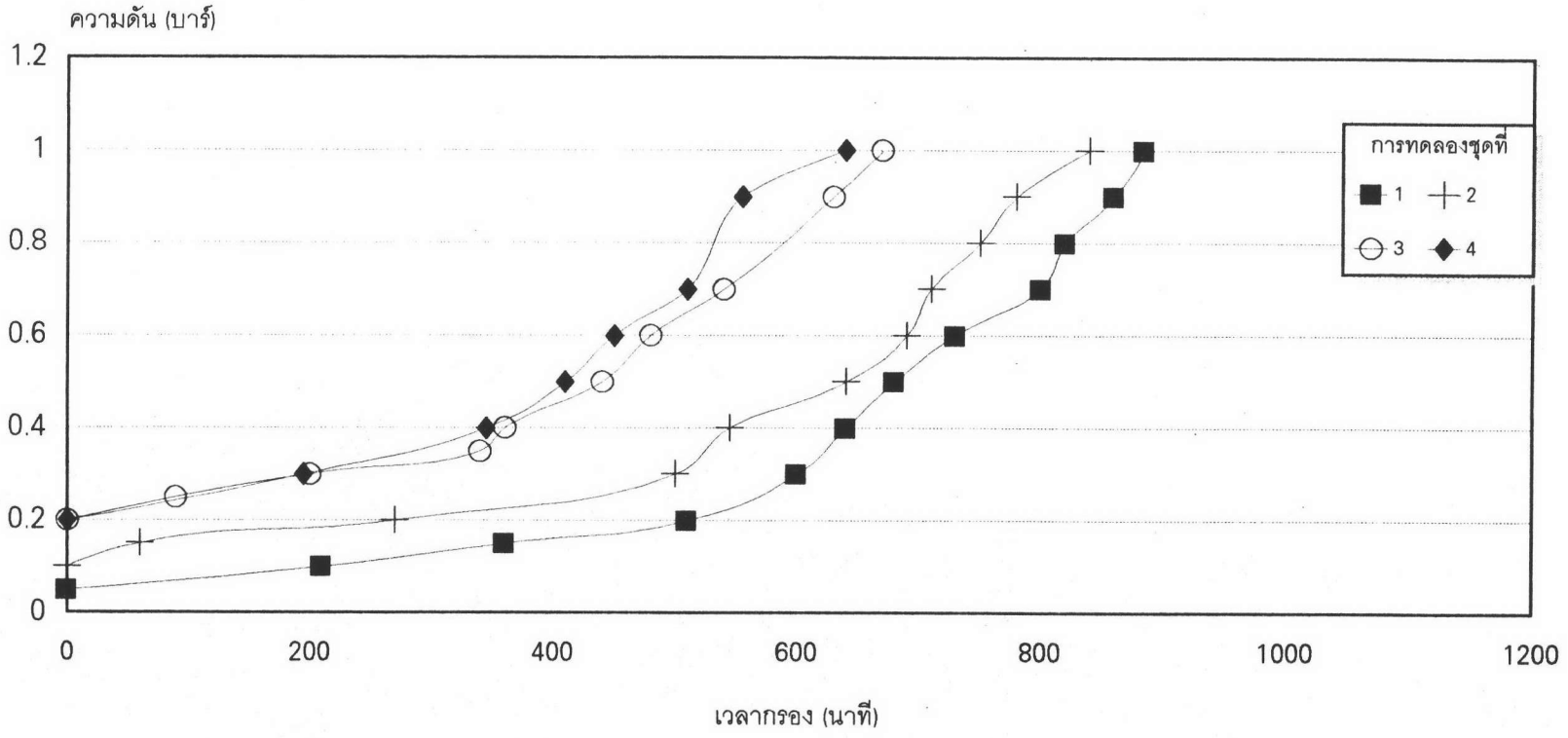
R_p = ความต้านทานที่เกิดจากปรากฏการณ์ Concentration Polarization

R_g = ความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล (gel layer)

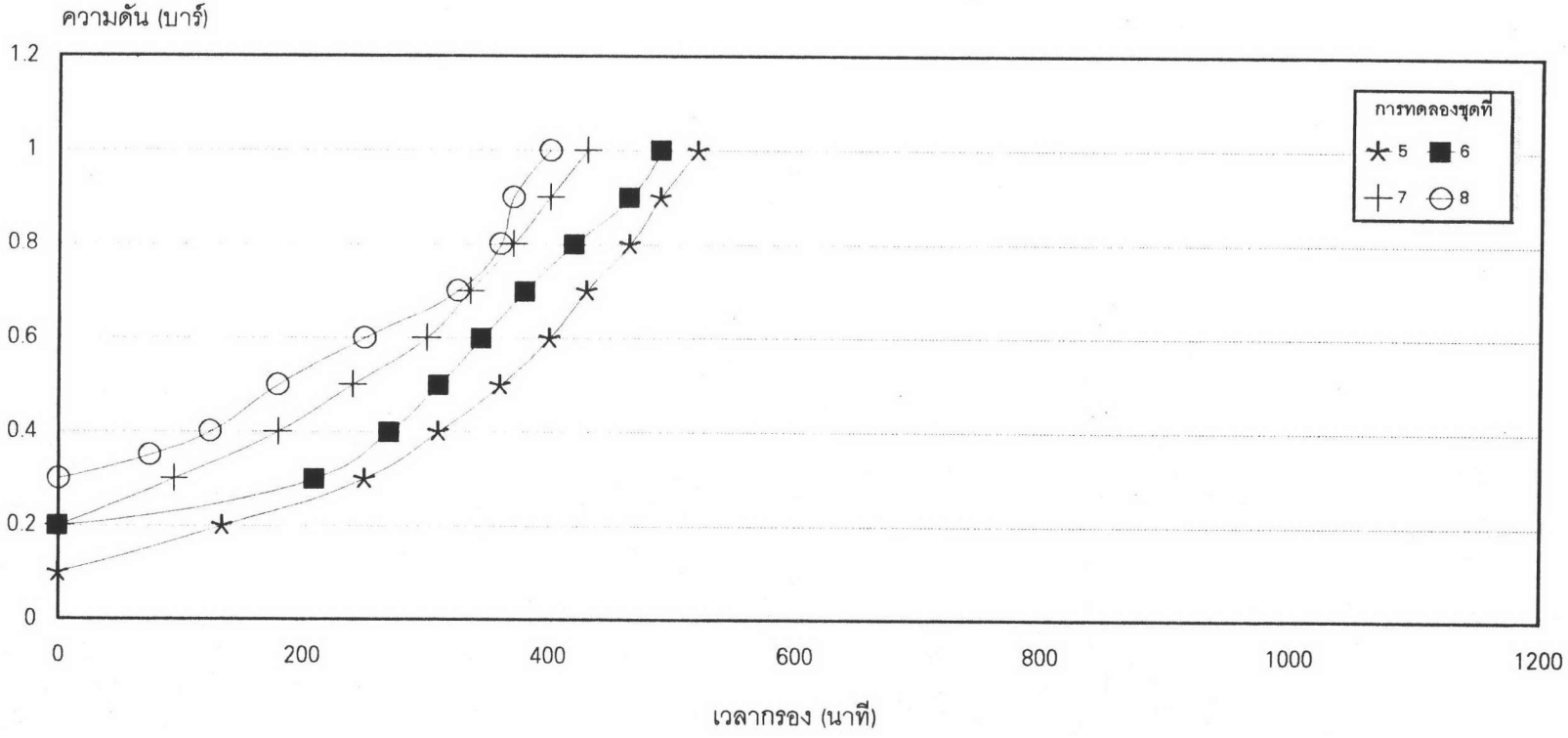
R_d = ความต้านทานที่เกิดจากการสะสมตะกอน (deposit)

R_i = ความต้านทานที่เกิดจากการอุดตันภายในช่องว่างของเมมเบรน (internal clogging)

ค่า R_a เป็นความต้านทานจริงของเมมเบรน แต่ค่า R_a จะเปลี่ยนไประหว่างการกรอง ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการกรอง เช่นการเพิ่มความดันแก่ระบบ เมมเบรนจะถูกอัดตัวเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างของเมมเบรนเปลี่ยนไป ในทางปฏิบัติจึงรวมค่าความต้านทานจากการอัดตัว R_c กับ R_a เป็นค่าความต้านทานของเมมเบรน (R_m) ซึ่งมีค่าคงที่เมื่อทำการกรองน้ำสะอาด สำหรับการกรองน้ำที่มีอนุภาคปนอยู่ จะทำให้อัตรากรองลดลงเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป ดังรูปที่ 4.23 เนื่องจากการอุดตันจากสาเหตุต่างๆ ทำให้ความต้านทานของระบบเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24

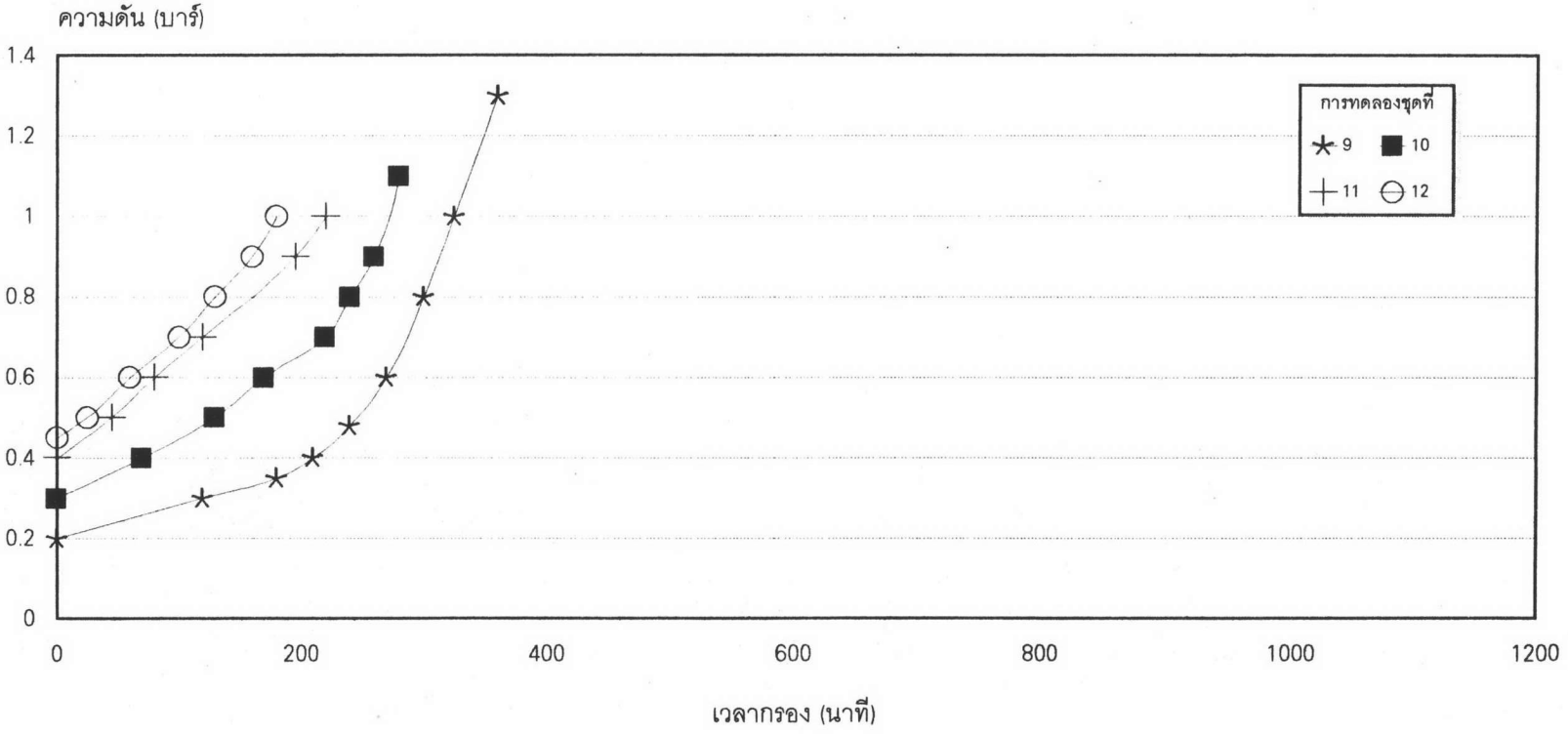


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.2 ลิตร/นาที

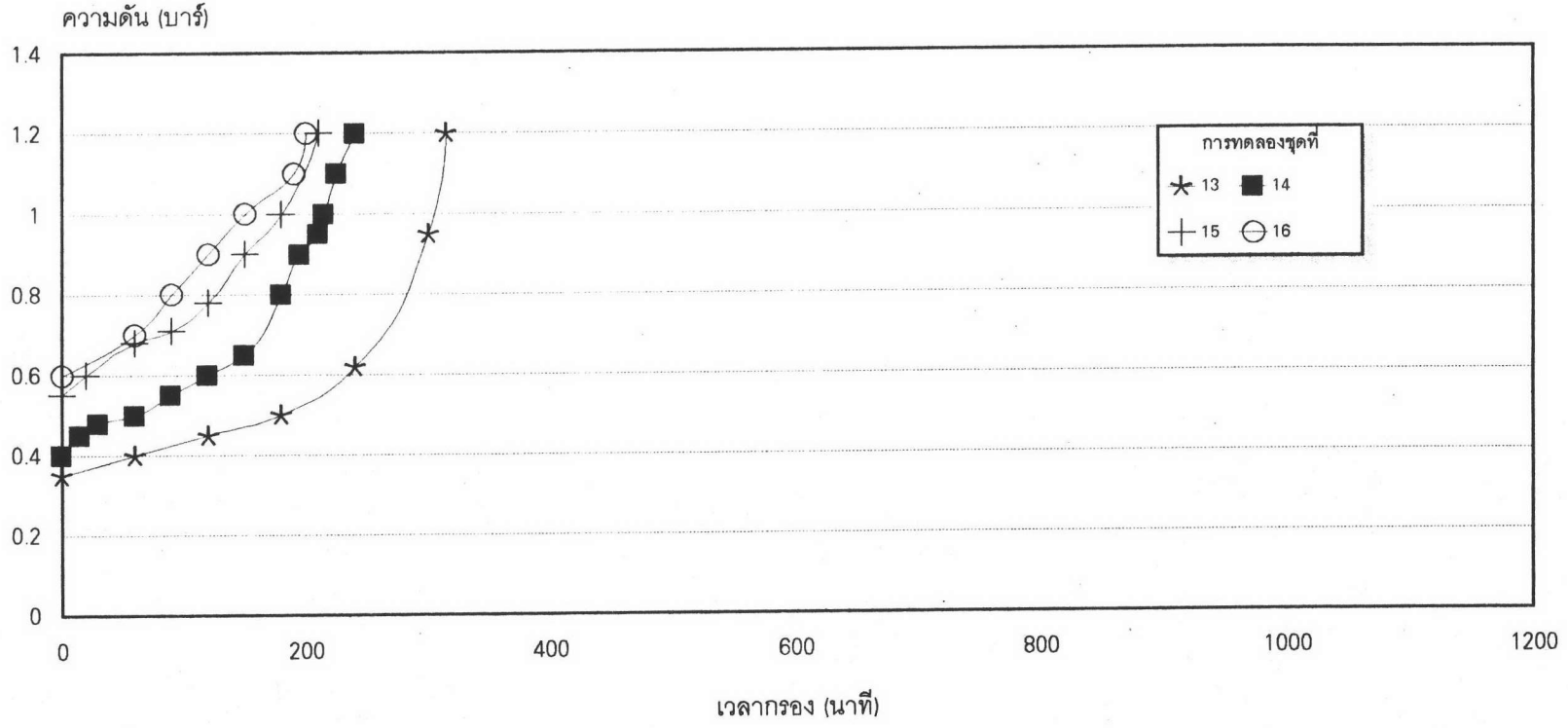


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.4 ลิตร/นาที

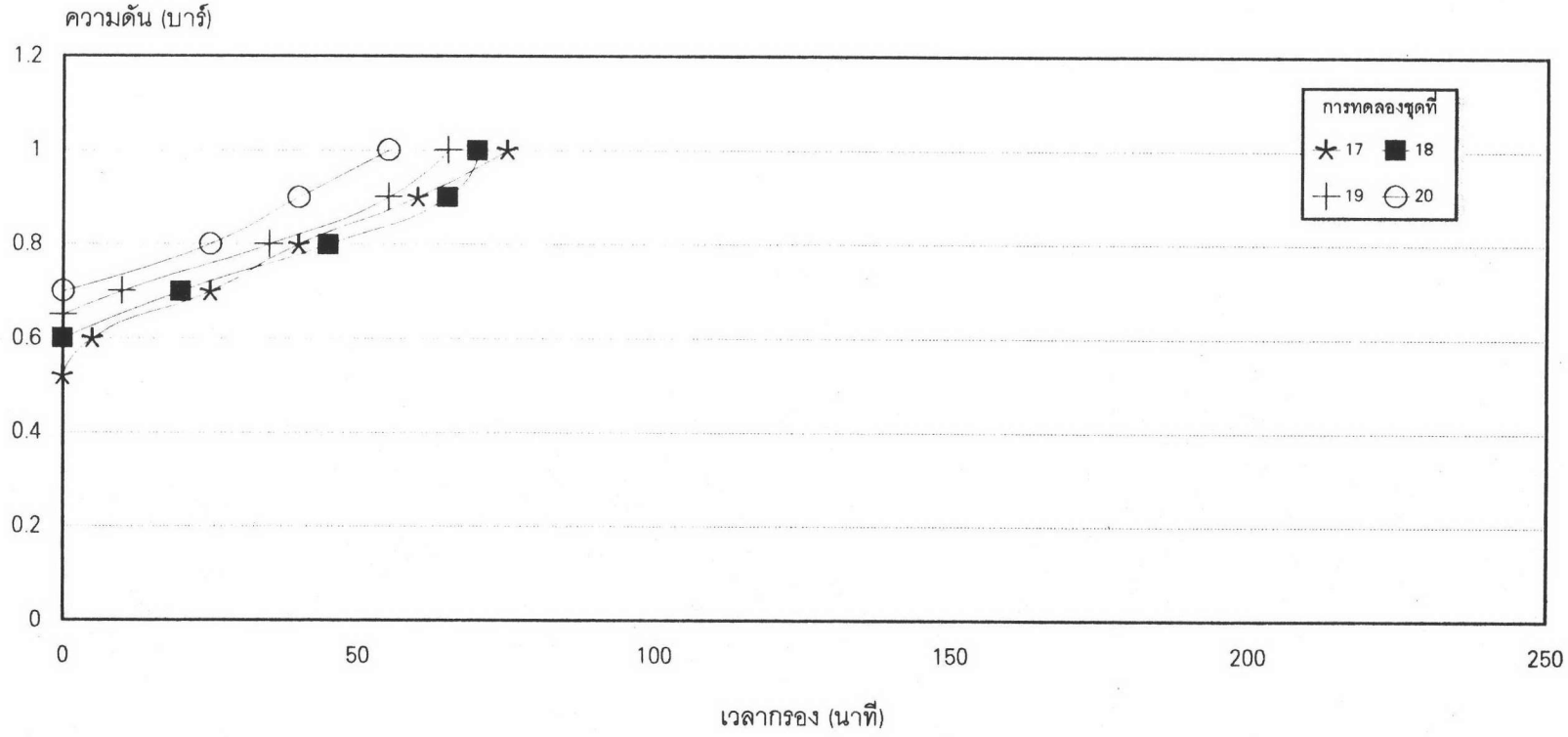
ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



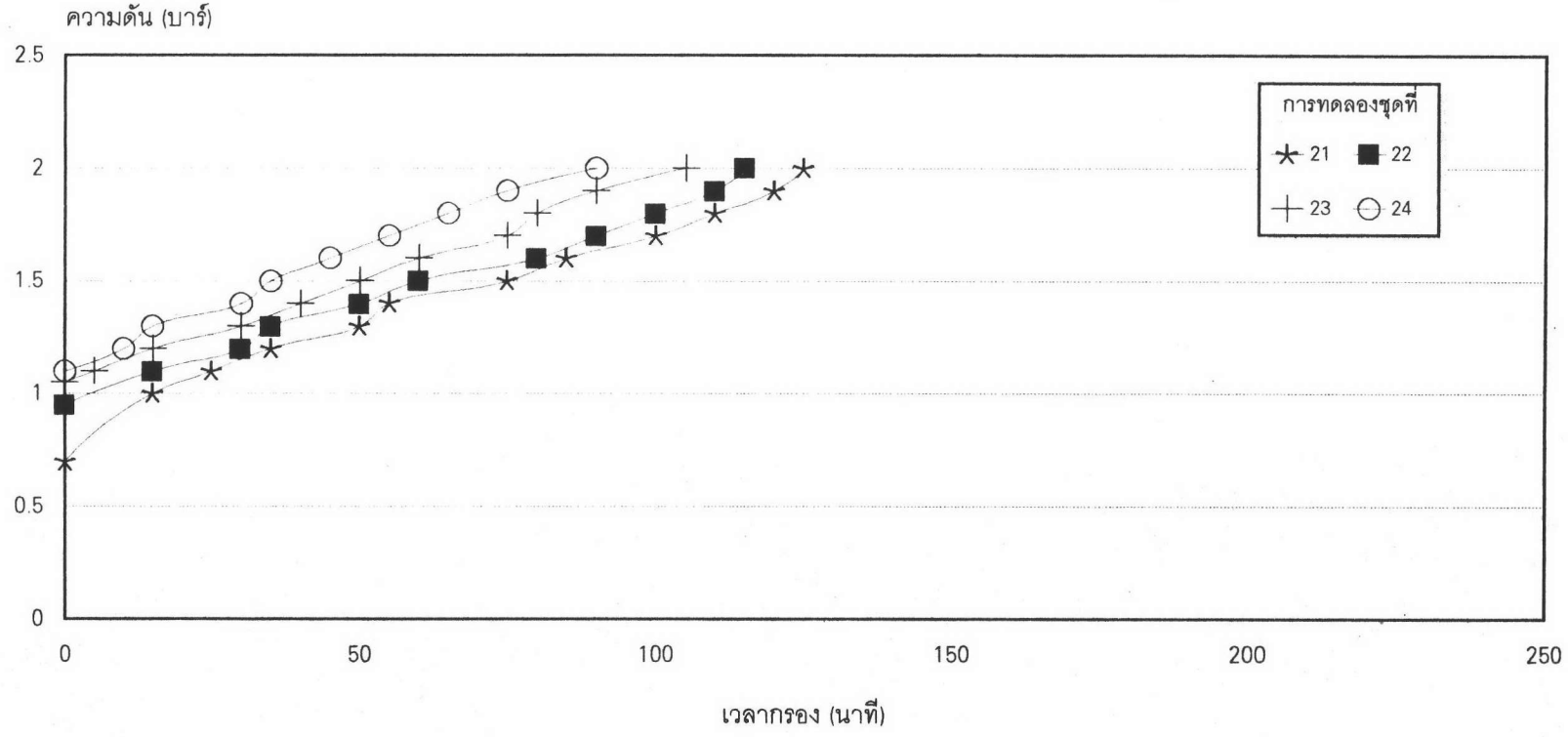
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.6 ลิตร/นาที



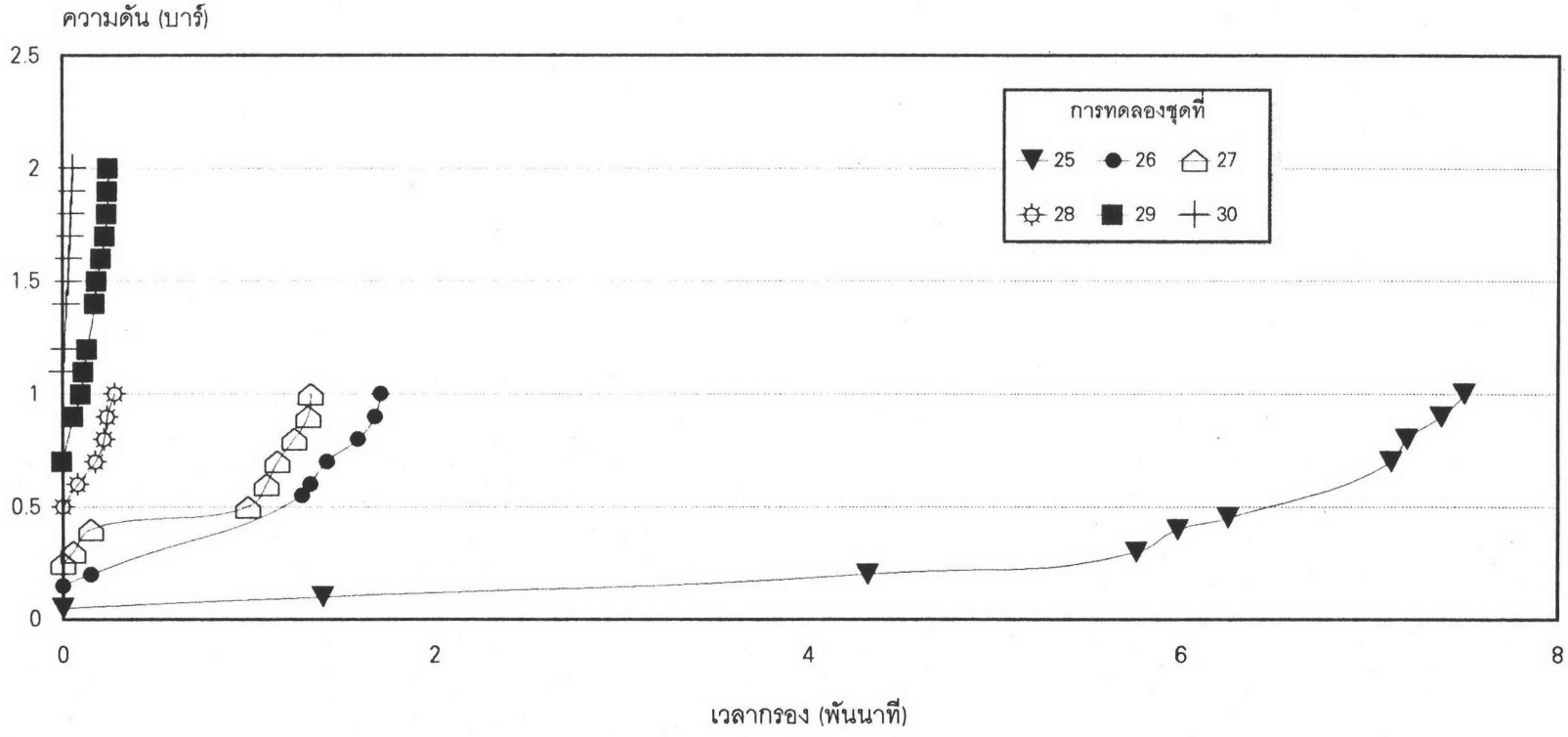
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.8 ลิตร/นาที



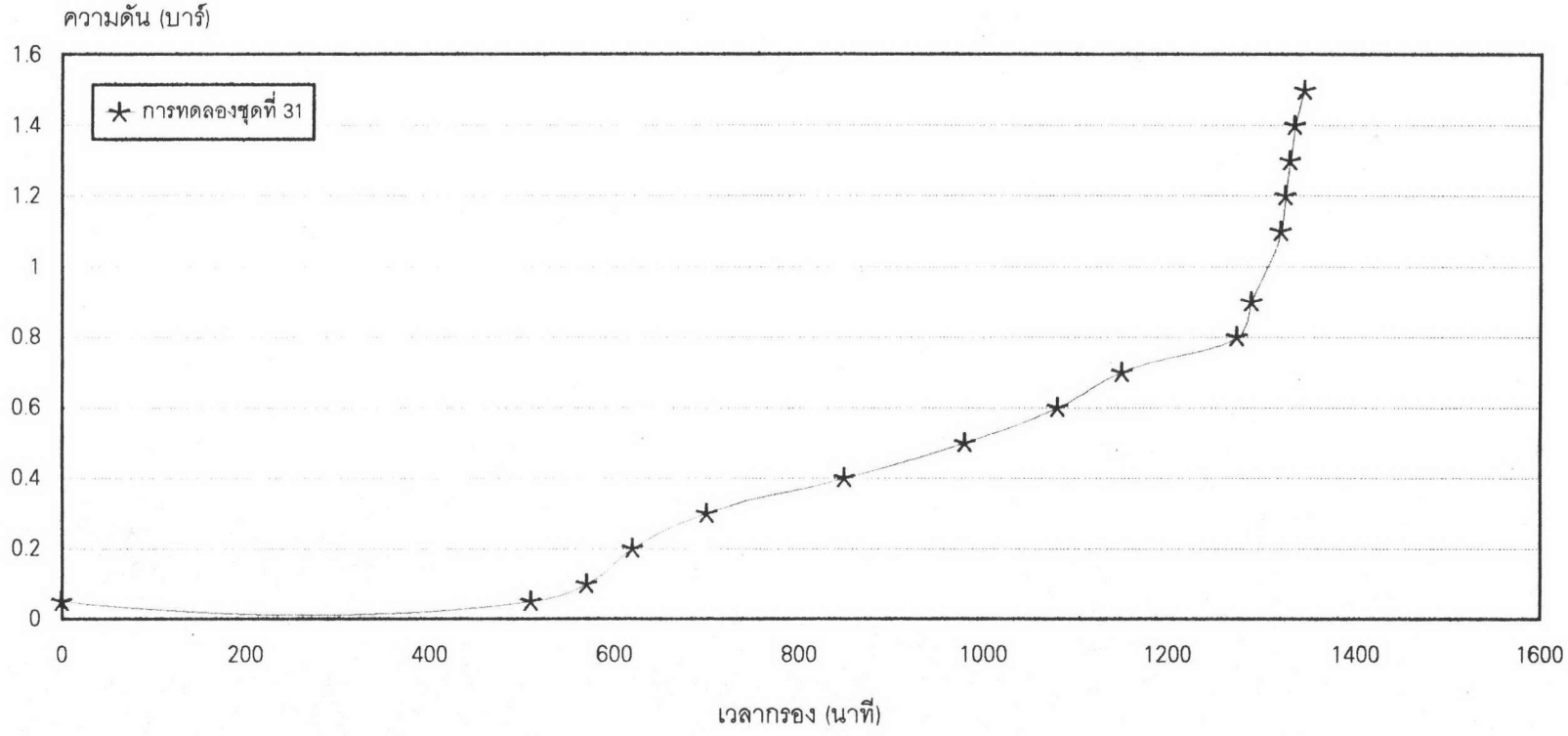
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที



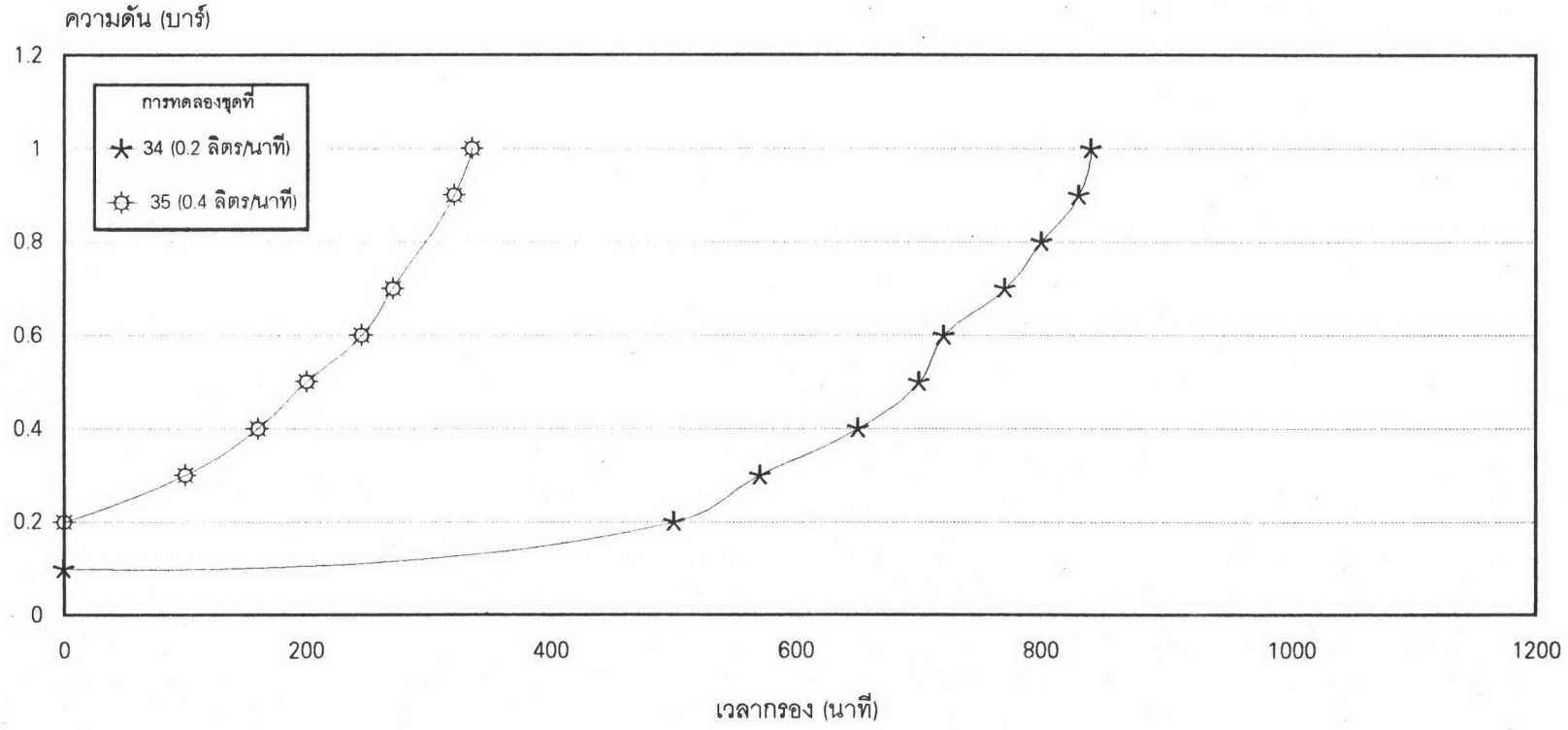
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที



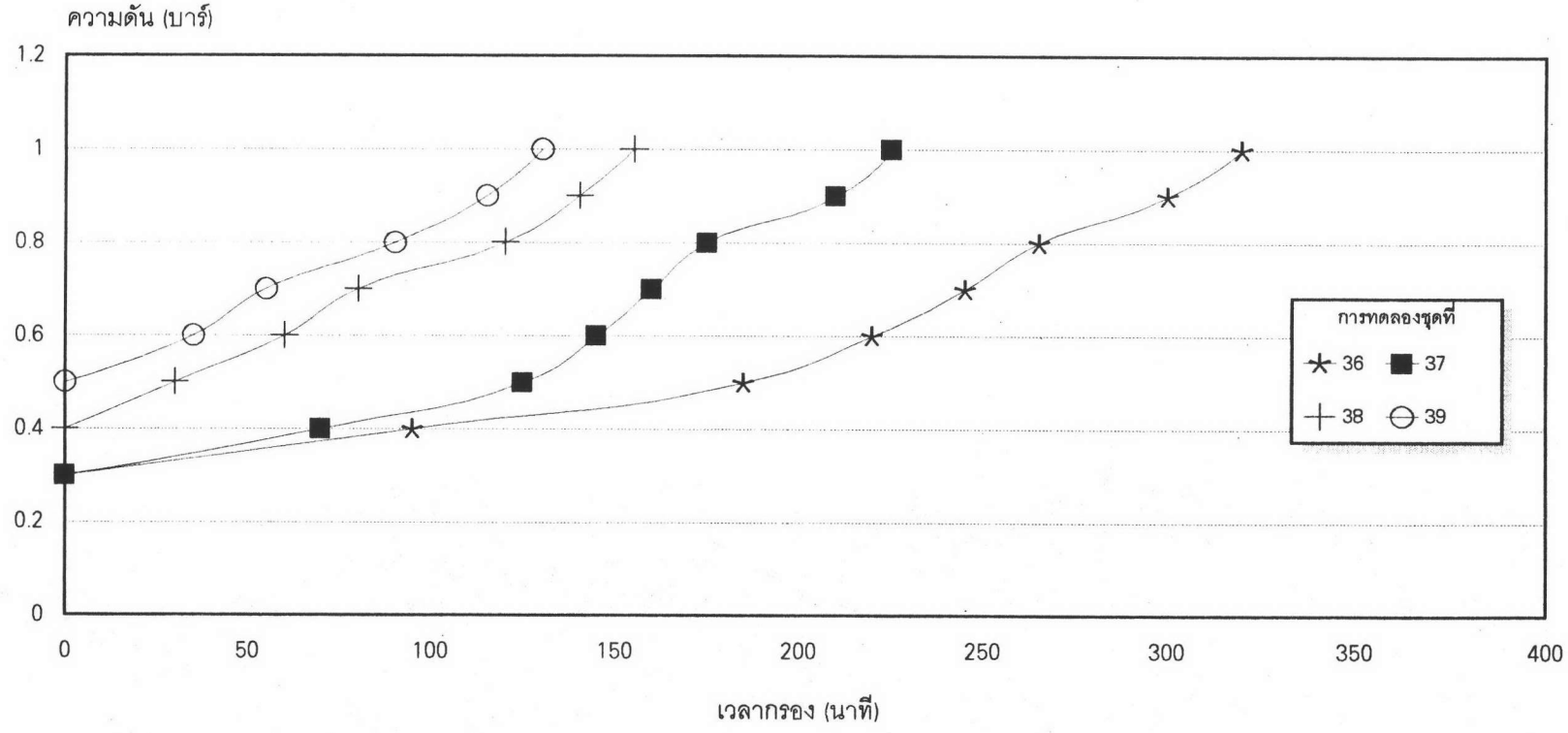
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู



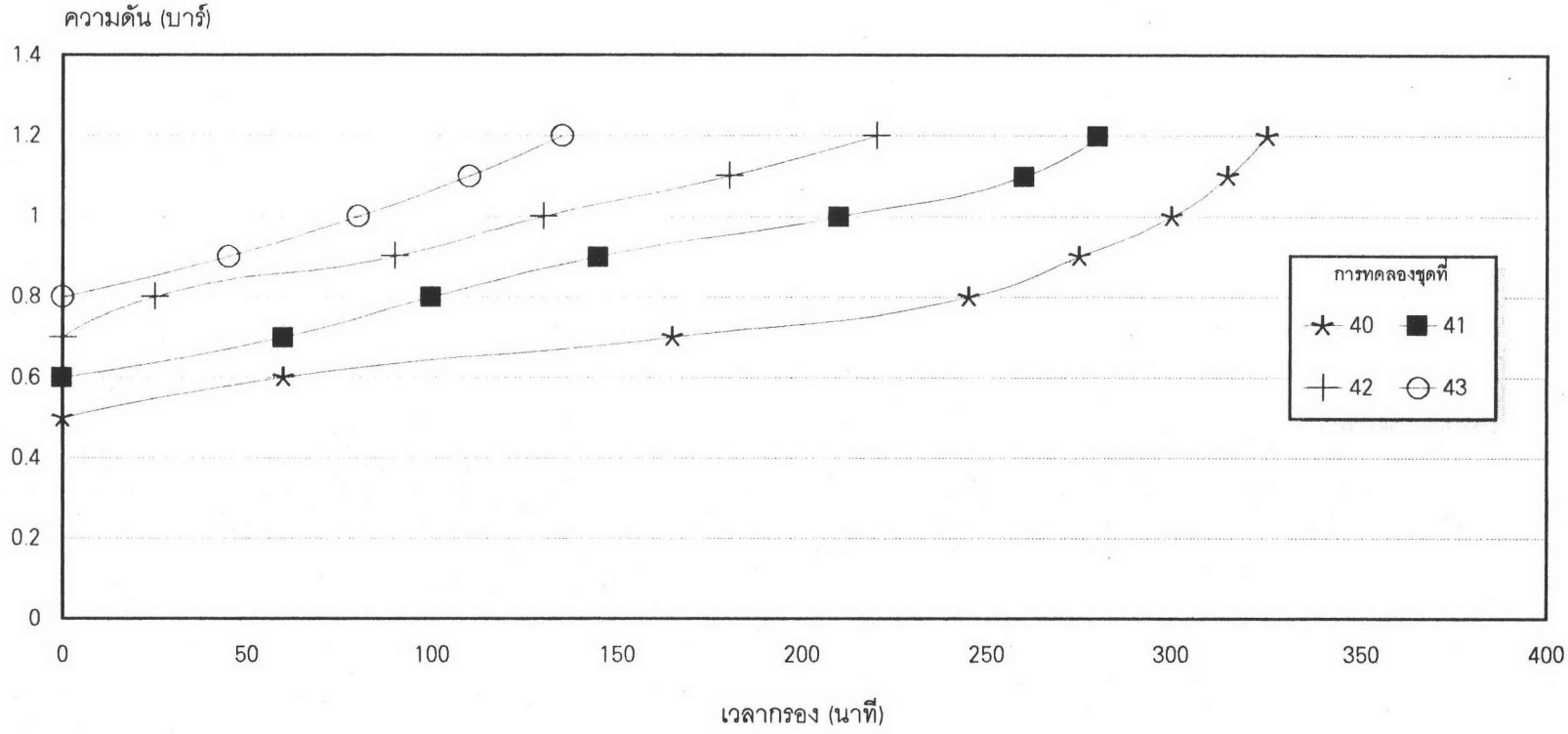
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ และความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู ที่อัตรากรอง 0.2 ลิตร/นาที



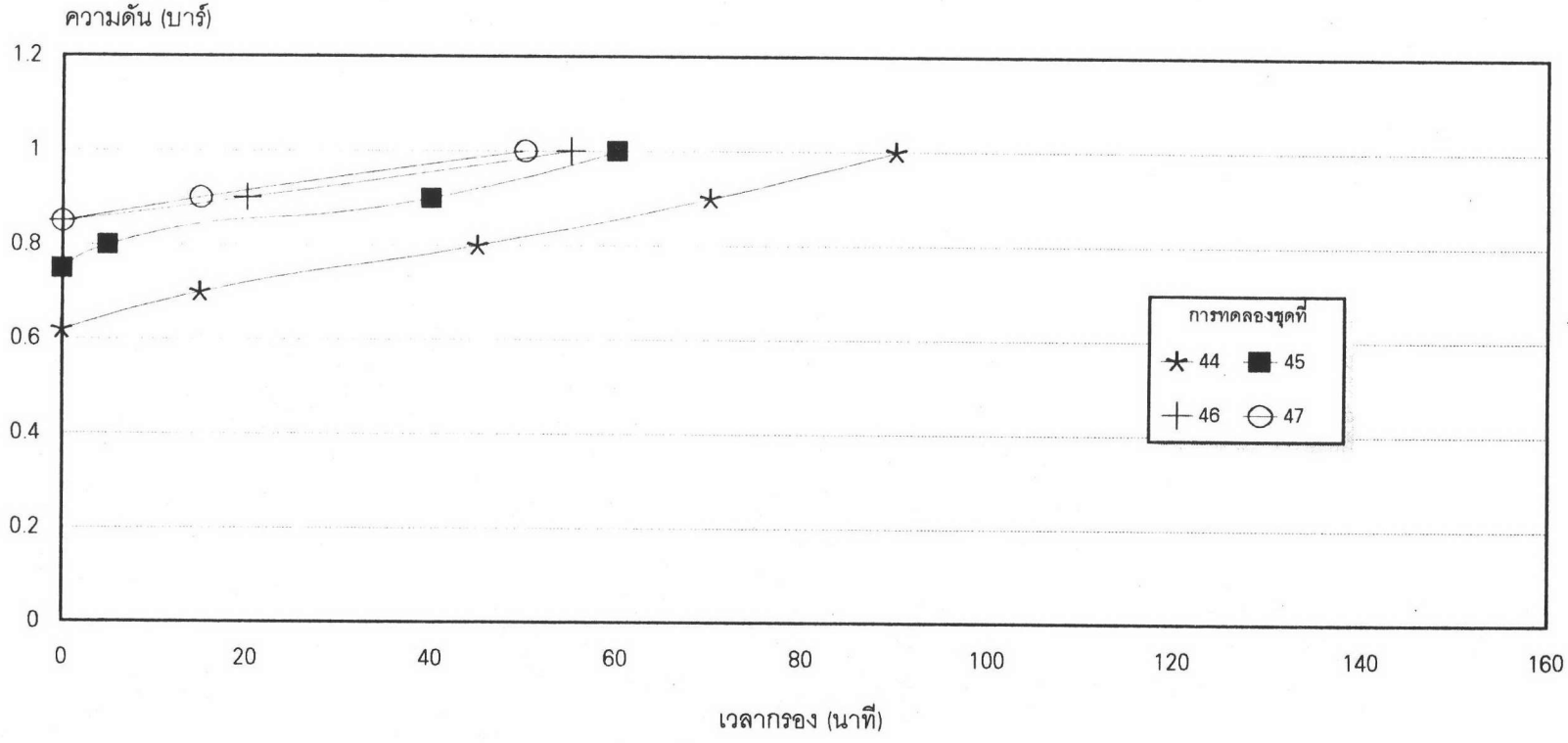
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ อัตรากรอง 0.2 และ 0.4 ลิตร/นาที



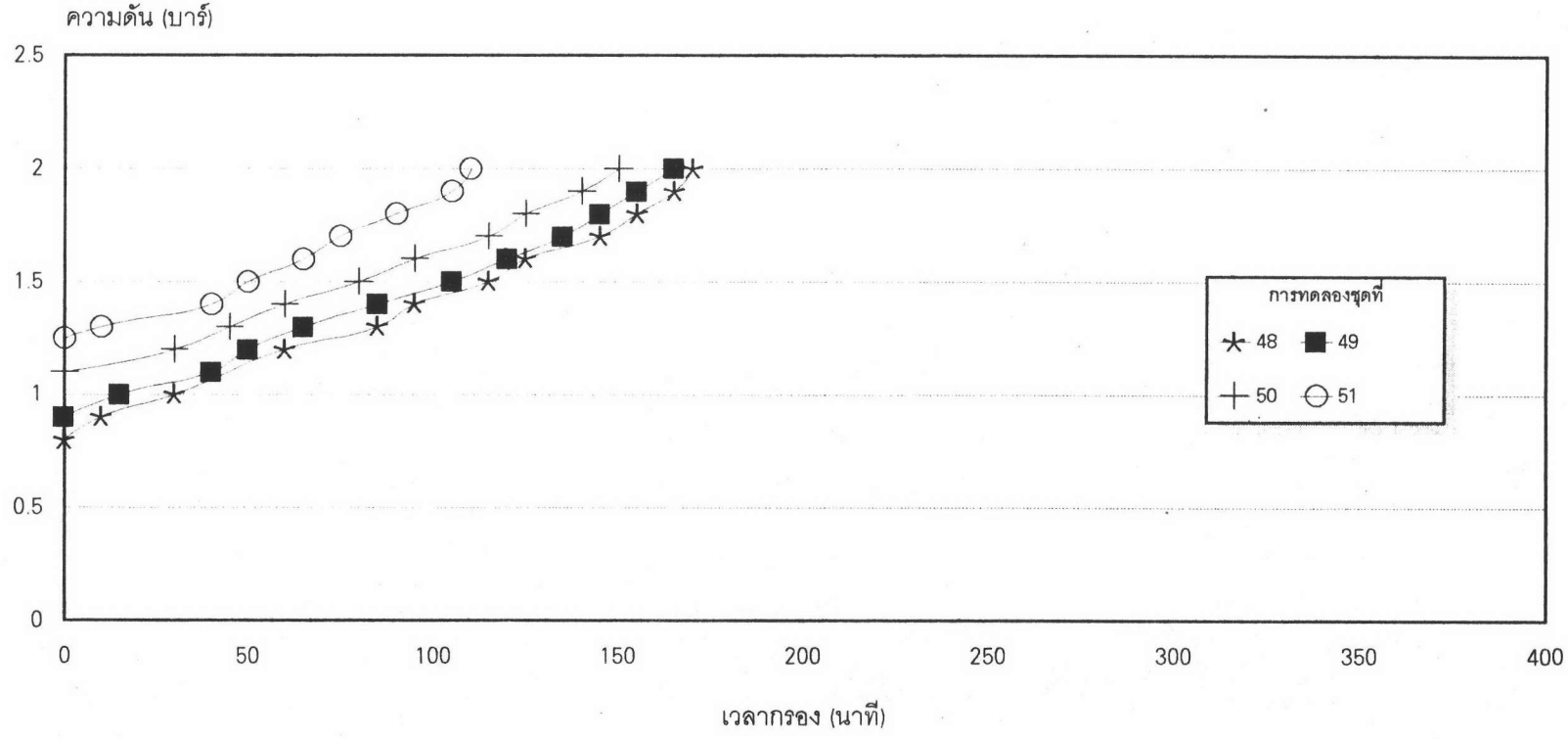
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.6 ลิตร/นาที



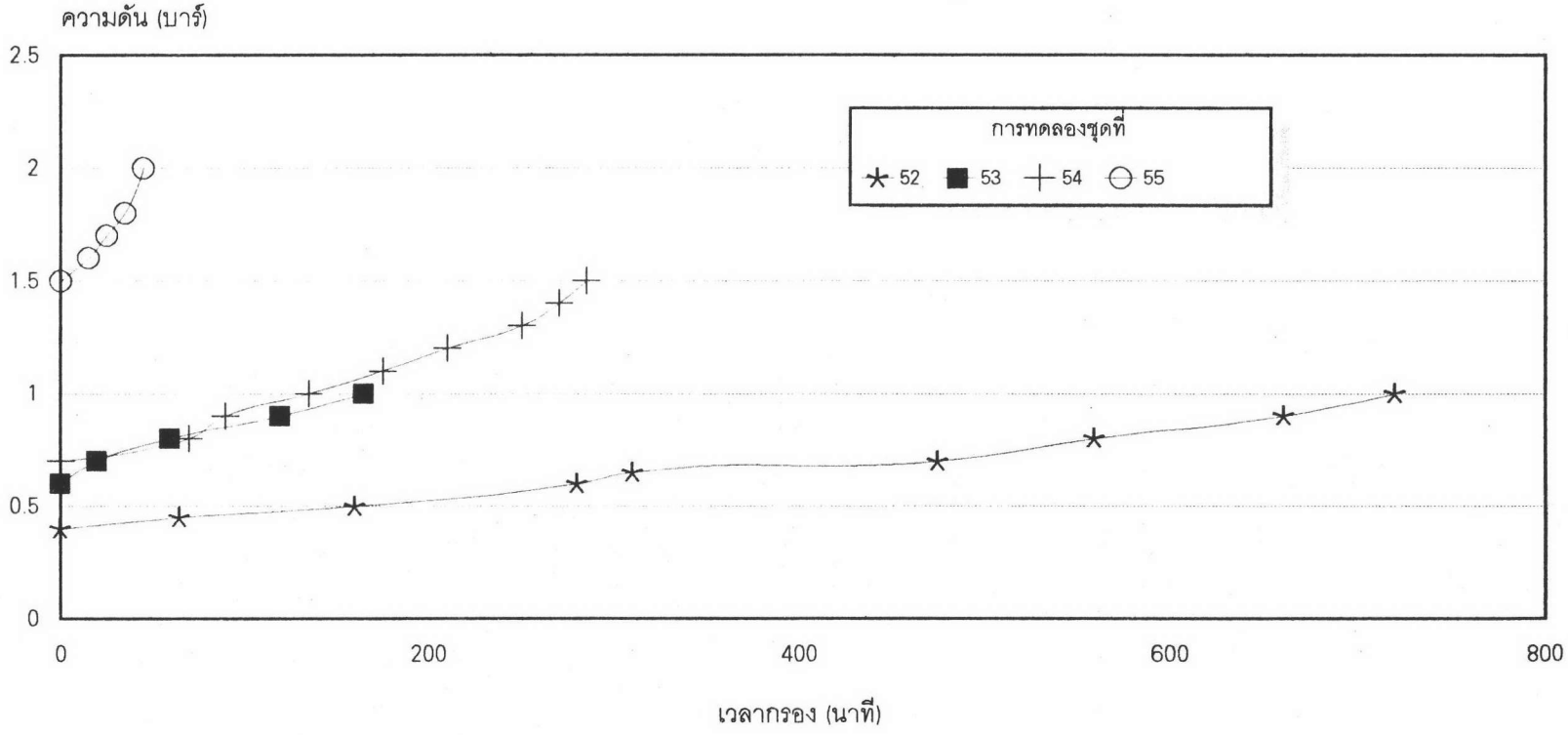
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 0.8 ลิตร/นาที



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.0 ลิตร/นาที

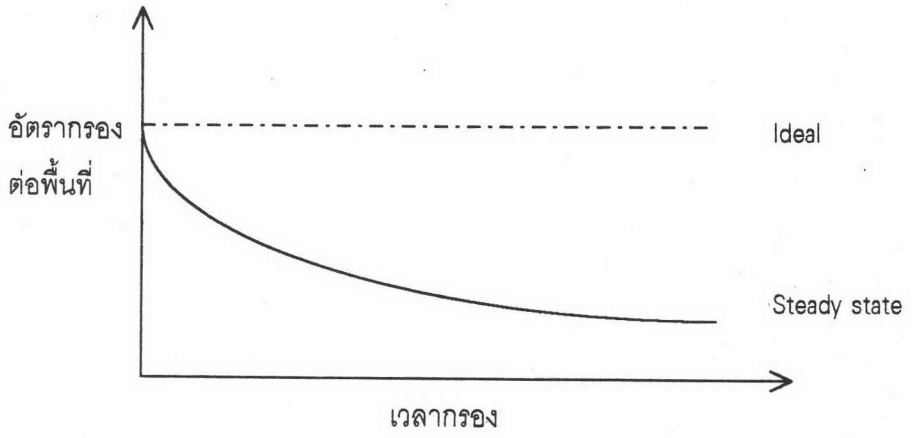


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ ที่อัตรากรอง 1.5 ลิตร/นาที

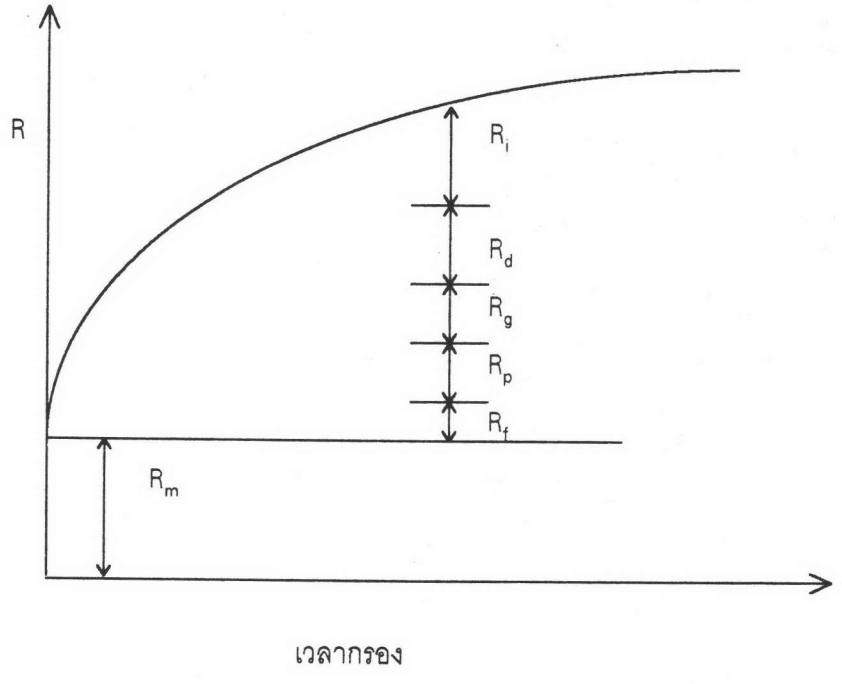


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากรอง และความดัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมความขุ่นสังเคราะห์ 20 เอ็นทียู

ทอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรองต่อพื้นที่ และเวลากรอง



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทาน, R และเวลากรอง

Hoogland และคณะ (1986) ได้กำหนดให้ ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างการกรองเป็นค่า R_{op} ดังสมการที่ 4.2

$$R_{op} = R_f + R_p + R_g + R_d + R_i = M\alpha \qquad (4.2)$$

โดยที่ M = น้ำหนักของตะกอนบนผิวเมมเบรน (cake loading)

α = ความต้านทานเฉพาะ (specific resistance)

ค่า $M\alpha$ เรียกว่า ความต้านทานของตะกอน (cake resistance)

ความต้านทานของเมมเบรน (membrane resistance, R_m)

เมื่อทำการกรองน้ำประปาผ่านเมมเบรนที่ความดันต่างๆ กัน แล้วบันทึกค่าอัตรากรองที่ได้นำมาเขียนกราฟระหว่าง ความดันต่อความหนืดของน้ำ และอัตรากรองต่อพื้นที่ ดังรูปที่ 4.25 ความชันที่ได้จากกราฟ คือค่า R_m จากสมการที่ 4.1 ค่า R ในการกรองน้ำประปา คือ ค่า R_m

$$J_w = \Delta P / \mu R_m \qquad (4.3)$$

โดยที่ J_w = อัตรากรองน้ำประปาต่อพื้นที่เมมเบรน (ลิตร/นาที ตารางเมตร)

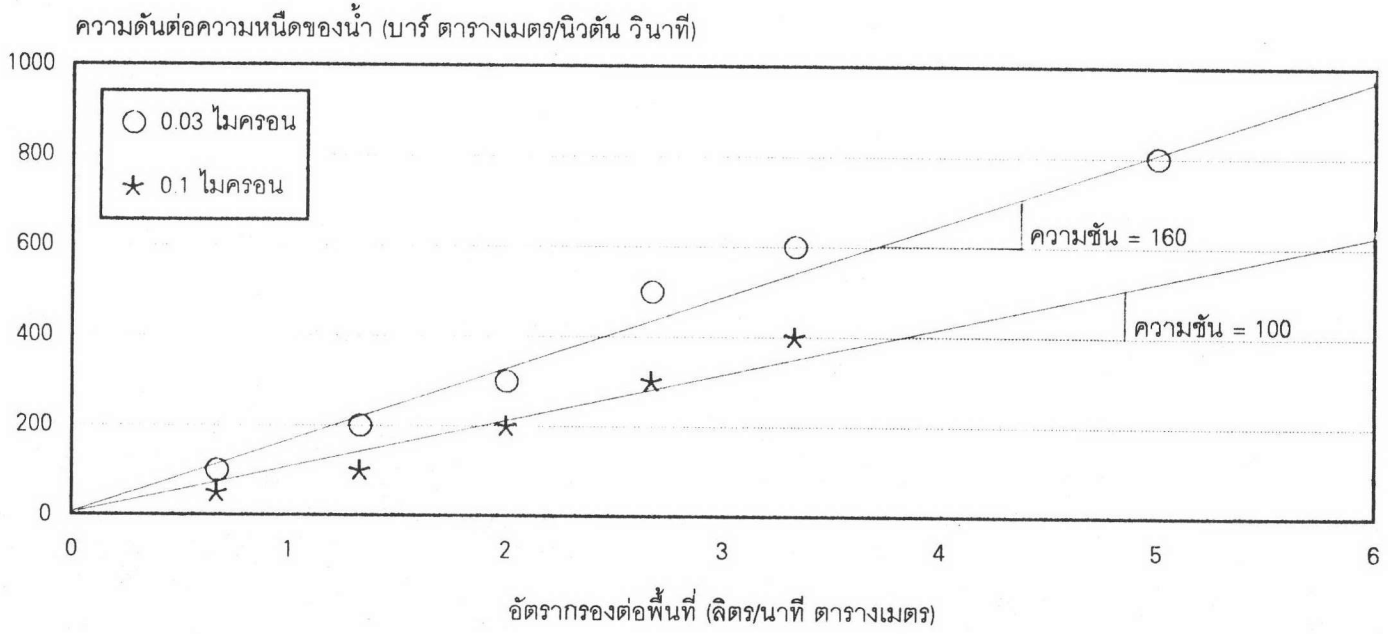
ΔP = ผลต่างความดันระหว่างทางน้ำเข้า และน้ำออก (บาร์)

μ = ความหนืดของน้ำ = 0.001 นิวตัน วินาที/ตารางเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส

R_m = ความต้านทานของเมมเบรน (เมตร$^{-1}$)

พื้นที่เมมเบรน = 0.3 ตารางเมตร

ค่า R_m ที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตรากรองต่อพื้นที่ และความดันต่อความหนืดของน้ำ ในการกรองน้ำประปา เพื่อหาค่าความต้านทานของเมมเบรน (membrane resistance, Rm)

ตารางที่ 4.5 ผลของการกรองน้ำประปา เพื่อหาค่า R_m

ขนาดรูเมมเบรน (ไมครอน)	ความดัน (บาร์)	P/μ	อัตรากรอง (ลิตร/นาที)	อัตรากรองต่อพื้นที่ (ลิตร/นาที ตารางเมตร)	ความต้านทานเมมเบรน (R_m, m^{-1})
0.1	0.05	50	0.2	0.67	1.0×10^{10}
	0.1	100	0.4	1.33	
	0.2	200	0.6	2.00	
	0.3	300	0.8	2.67	
	0.4	400	1.0	3.33	
0.03	0.1	100	0.2	0.67	1.6×10^{10}
	0.2	200	0.4	1.33	
	0.3	300	0.6	2.00	
	0.5	500	0.8	2.67	
	0.6	600	1.0	3.33	
	0.8	800	1.5	5.00	

ความต้านทานของตะกอน (cake resistance, Mα)

ในการวิจัยครั้งนี้ทำการทดลองโดยรักษาอัตรากรอง ให้คงที่ ดังนั้นค่าความต้านทานของตะกอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงไม่ได้คำนวณไว้ในผลการทดลอง แต่เปลี่ยนกราฟรูปที่ 4.9 - 4.22 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และเวลากรอง ให้อยู่ในรูปสมการถดถอยเชิงเส้น แสดงในภาคผนวก ฉ

ค่าดัชนีความต้านทาน (Resistance Index, RI)

RI คือ ค่าที่ใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการล้างย้อน แสดงดังสมการที่ 4.4

$$RI = \frac{R_2 - R_m}{R_1 - R_m} \qquad (4.4)$$

โดยที่ R_1 = ความต้านทานก่อนการล้างย้อนเมมเบรน

R_2 = ความต้านทานหลังการล้างย้อนเมมเบรน

R_m = ความต้านทานของเมมเบรน

ค่า R_1 และ R_2 คำนวณจากสมการที่ 4.1

เมื่อค่า RI เข้าใกล้ 1 การล้างย้อนจะไม่มีประสิทธิภาพ ค่า RI น้อยลง ประสิทธิภาพการล้างย้อนจะมากขึ้น และประสิทธิภาพการล้างย้อนจะดีมาก ถ้าค่าที่ได้เข้าใกล้ศูนย์

ตัวอย่างการหาค่า RI สำหรับการทดลองชุดที่ 1 โดยค่า R_m สำหรับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน เท่ากับ 1.0×10^{10} m^{-1} (จากตารางที่ 4.5) ค่า R_1 และ R_2 คำนวณจากสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$R_1 = \Delta P / \mu J$$

$$= (1.0 \text{ bar})/(0.001 \text{ N.S/m}^2 \times 0.67 \text{ L/min m}^2)$$

$$= 1492 \text{ bar min m}^4 / \text{N.S.L}$$

$$= 9 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$$

$$R_2 = (0.1 \text{ bar})/(0.001 \text{ N.S/m}^2 \times 0.67 \text{ L/min m}^2)$$

$$= 9 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

(1 bar min m^4 / N.S.L = 6×10^9 m^{-1})

จากข้อมูลในการทดลองชุดที่ 1-24 และ 36-51 ซึ่งศึกษาผลของการล้างย้อน นำมาหาค่า RI แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ตารางเปรียบเทียบค่า RI โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ที่อัตรากรองต่างๆ กัน

อัตรากรอง (ลิตร/นาที)	เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน				เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน			
	R_1 (m^{-1})	R_m(m^{-1})	R_2(m^{-1})	RI	R_1 (m^{-1})	R_m(m^{-1})	R_2(m^{-1})	RI
0.2	9.0×10^{12}	1.0×10^{10}	9.0×10^{11}	0.1	-	-	-	-
			1.8×10^{12}	0.2				
			1.8×10^{12}	0.2				
0.4	4.5×10^{12}	1.0×10^{10}	9.0×10^{11}	0.2	-	-	-	-
			9.0×10^{11}	0.2				
			1.4×10^{12}	0.3				
0.6	3.0×10^{12}	1.0×10^{10}	9.0×10^{11}	0.3	3.0×10^{12}	1.6×10^{10}	1.0×10^{12}	0.3
			1.2×10^{12}	0.4			1.2×10^{12}	0.4
			1.3×10^{12}	0.4			1.5×10^{12}	0.5
0.8	2.3×10^{12}	1.0×10^{10}	9.0×10^{11}	0.4	2.3×10^{12}	1.6×10^{10}	1.3×10^{12}	0.6
			1.2×10^{12}	0.5			1.6×10^{12}	0.7
			1.3×10^{12}	0.5			1.8×10^{12}	0.8
1.0	1.8×10^{12}	1.0×10^{10}	1.1×10^{12}	0.6	1.8×10^{12}	1.6×10^{10}	1.4×10^{12}	0.8
			1.1×10^{12}	0.6			1.5×10^{12}	0.8
			1.3×10^{12}	0.7			1.5×10^{12}	0.8
1.5	2.4×10^{12}	1.0×10^{10}	1.1×10^{12}	0.5	2.4×10^{12}	1.6×10^{10}	1.1×10^{12}	0.4
			1.3×10^{12}	0.5			1.3×10^{12}	0.5
			1.3×10^{12}	0.5			1.5×10^{12}	0.6

การล้างย้อน

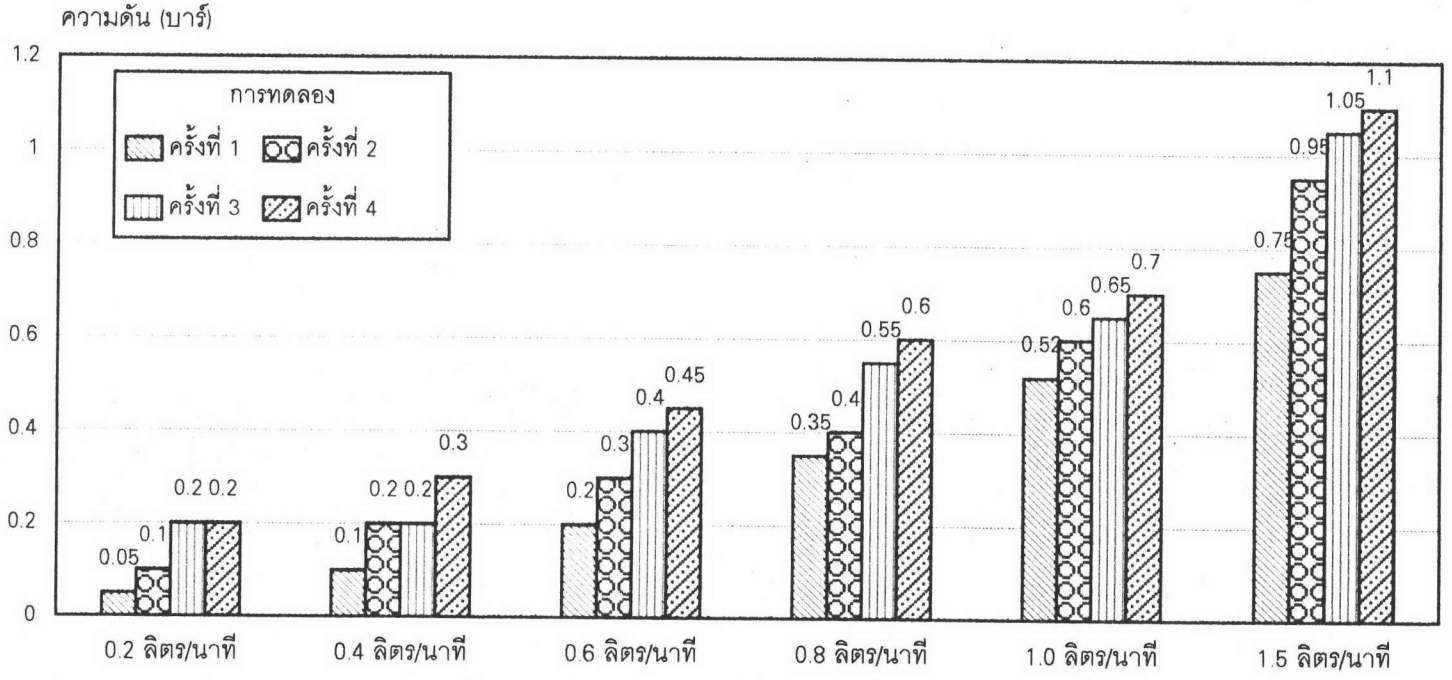
จากรูปที่ 4.26 และ 4.27 ความดันที่เพิ่มขึ้นในแต่ละชุดการทดลองหลังจากทำการล้างย้อน เกิดจากความต้านทานภายในเมมเบรน โดยที่การล้างย้อนไม่สามารถทำให้เมมเบรนคืนสภาพดีเหมือนเดิมได้ เนื่องจากการอุดตันแบบ irreversible fouling

สาเหตุของการเกิดการอุดตันแบบ irreversible fouling อาจเนื่องมาจาก

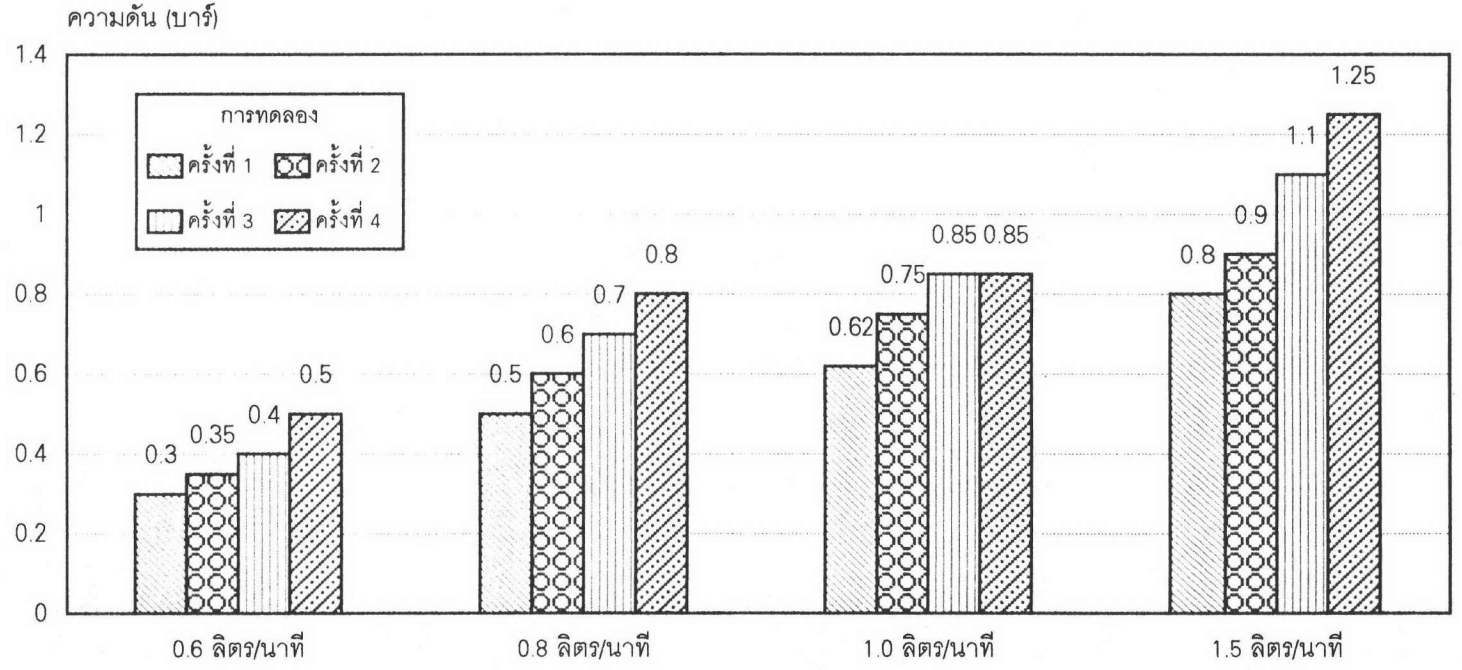
1. วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) จึงดูดซับสารอินทรีย์ และโคลิฟาจ ได้ดี
2. การอุดตันภายในรูเมมเบรนของโคลิฟาจ ซึ่งองค์ประกอบของโคลิฟาจจะคล้ายโปรตีน และโมเลกุลของโปรตีนมีคุณสมบัติที่จะดูดซับบนผิวเมมเบรนได้ดี

จากตารางที่ 4.6 ค่า RI ที่ได้แสดงว่า การล้างย้อนที่ใช้ในการทดลอง มีประสิทธิภาพดี ถึงแม้จะไม่สามารถ ทำให้เมมเบรนคืนสภาพดีเหมือนเดิมได้ จากเหตุผลข้างต้น แต่สามารถลดความต้านทานที่เกิดขึ้นบนผิวเมมเบรนได้ค่าหนึ่ง

สำหรับทุกอัตรากรอง เมื่อทำการล้างย้อนครั้งต่อไป ค่า RI จะเพิ่มขึ้น แสดงว่า ประสิทธิภาพการล้างย้อนลดลง เนื่องจากที่อัตรากรองสูงขึ้น จะเกิดการอัดตัวของโคลิฟาจ และอนุภาคความขุ่น บนผิวเมมเบรนมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการล้างย้อนลดลง



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบความดันที่เพิ่มขึ้นหลังจากการล้างย้อน แต่ละครั้ง ที่อัตรากรองต่างๆ กัน โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบความดันที่เพิ่มขึ้นหลังจากการล้างย้อน แต่ละครั้ง ที่อัตรากรองต่างๆ กัน
โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน ตัวอย่างน้ำ คือ น้ำประปาเติมโคลิฟาจ