บทที่ 5

ผลการทดลอง วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

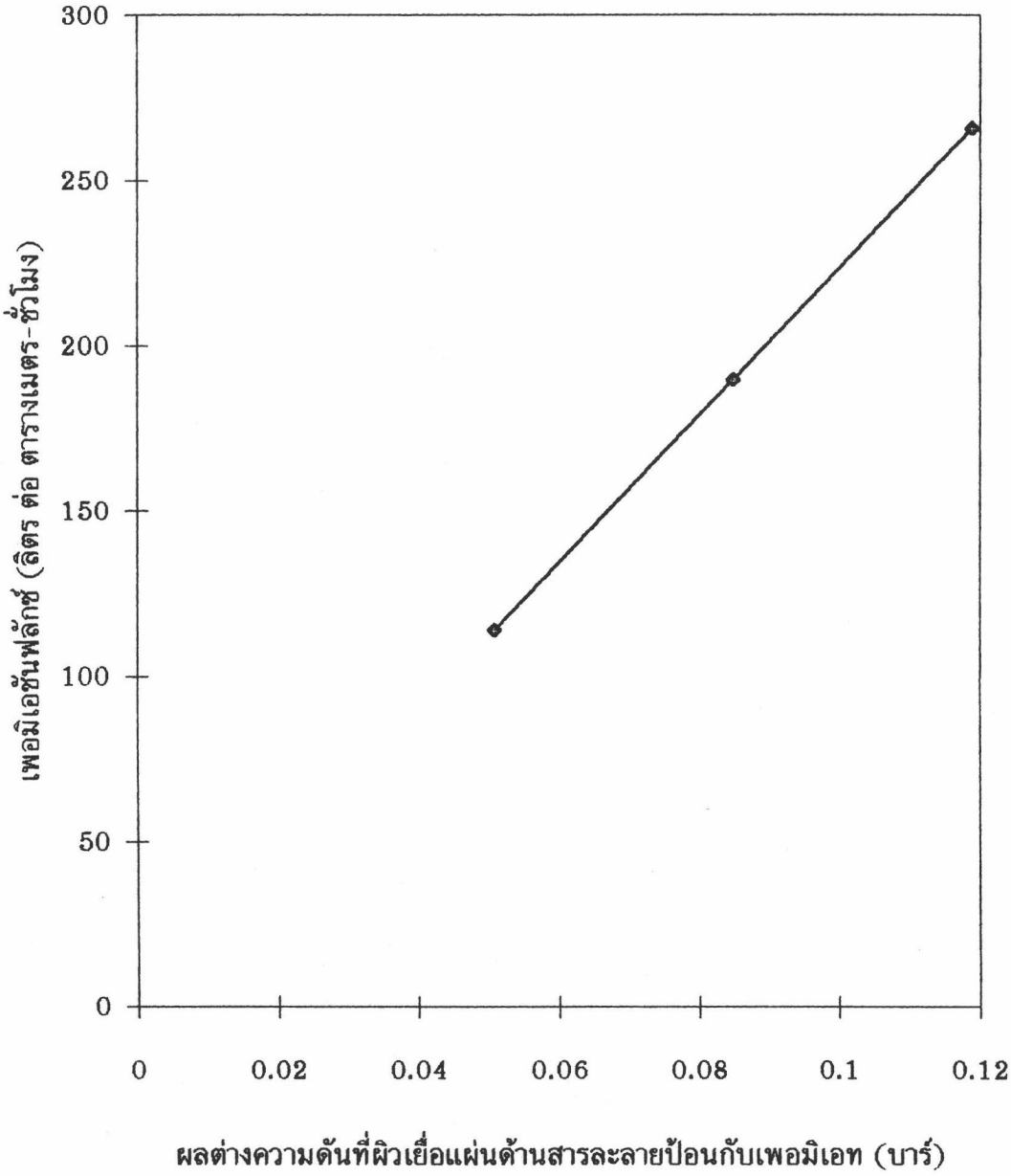
จากการศึกษากระบวนการแยก Clostridium acetobutylicum ATCC 824 โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในเครื่องกรองชนิดหมุนได้ และผลของตัวแปรที่มีต่อกระบวนการแยกสารด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ รายละเอียดของผลการทดลอง และวิจารณ์ผลมีดังนี้

5.1 การศึกษาผลของการกรองน้ำกำจัดแร่ธาตุ(demineral water)ที่มีต่อเยื่อแผ่น

การทำการศึกษาการกรองน้ำกำจัดแร่ธาตุด้วยเยื่อแผ่นเพื่อให้ทราบภาวะ และคุณสมบัติเยื่อแผ่นที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 12 ลิตรต่อชั่วโมง ความดันขาเข้า 0.068,0.102 และ 0.136 บาร์ ที่ความห่างของผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในเท่ากับ 2.65 มิลลิเมตร เก็บเพอมิเอชันฟลักซ์น้ำกำจัดแร่ธาตุทุก 2 นาที ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.1 พบว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำต่อเวลาจะมีค่าคงที่ เนื่องจากในน้ำกำจัดแร่ธาตุปราศจากอนุภาคปนอยู่ จึงไม่เกิดการอุดตันของเยื่อแผ่น ซึ่งผลการทดลองนี้จะใช้เป็นมาตราฐานในการทดสอบความสะอาดของผิวเยื่อแผ่นในการทดลองครั้งต่อ ๆไป โดยที่ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำก่อนการทดลองทุกครั้งจะต้องได้เท่ากับค่าเพอมิเอชันฟลักซ์มาตราฐาน จึงจะสามารถทำการทดลองการกรองต่อไปได้

จากค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำต่อเวลาที่ความดันต่าง ๆ จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง เนื่องจากเป็นการกรองสารละลายที่ไม่มีอนุภาคปนอยู่ ความต้านทานการกรองของ

เยื่อแผ่นเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นความต้านทานการกรองซึ่งแสดงในรูปของสมการฟลักซ์ในสมการที่ 3.1 จึงเป็นค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเท่านั้น เนื่องจากค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าคงที่ จึงทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำมีค่าคงที่ จากกราฟความชันของเส้นกราฟมีค่าเท่ากับ $1/\mu R_m$ เมื่อ R_m คือ ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น จากการคำนวณเยื่อแผ่นเซรามิกที่ใช้ในการทดลองมีค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเท่ากับ $1.86*10^{11}$ เมตร$^{-1}$ สามารถนำค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นนี้ไปใช้ในสมการที่ 3.1 เพื่อใช้ในการคำนวณค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ในการกรองน้ำหมักได้ต่อไป



รูปที่ 5.1 แสดงค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำกำจัดแร่ธาตุต่อความดัน

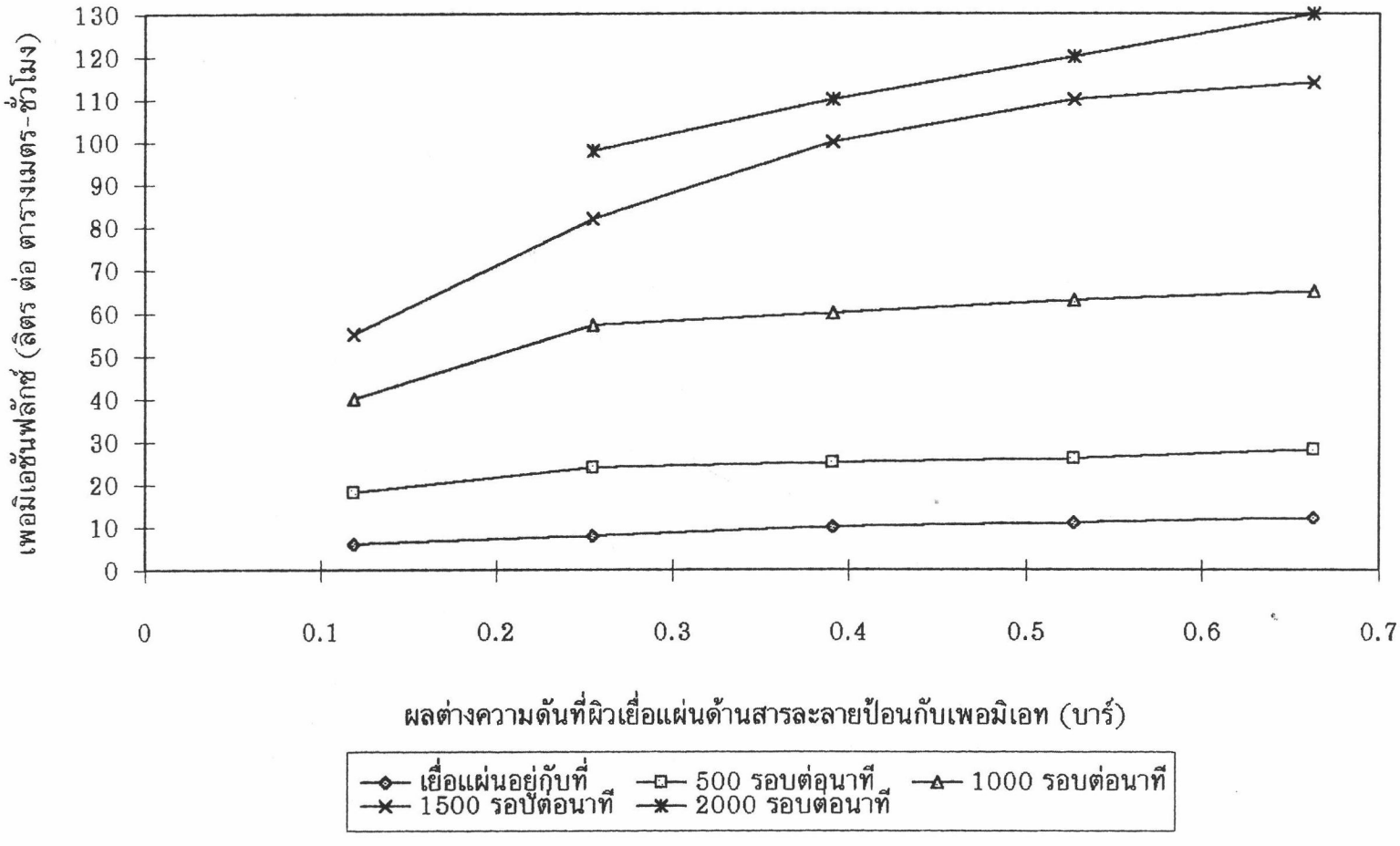
5.2 การศึกษาผลของความดันที่มีต่อการกรอง *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 ในน้ำหมัก โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในเครื่องกรองชนิดหมุนได้

การศึกษาผลของความดันที่มีต่อการกรองน้ำหมัก โดยทำการทดลองที่ความดันขาเข้า 0.136,0.272,0.408,0.544 และ 0.680 บาร์ อัตราการป้อนน้ำหมักเท่ากับ 12 ลิตรต่อชั่วโมง ความห่างของผนังเยื่อแผ่นกับท่อด้านในเท่ากับ 2.65 มิลลิเมตร ทำการวัดค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่เวลาต่างๆกัน พบว่าในช่วงแรกของการกรองค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะมีค่าสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้ จะถูกกักสะสมอยู่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาค ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นจะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

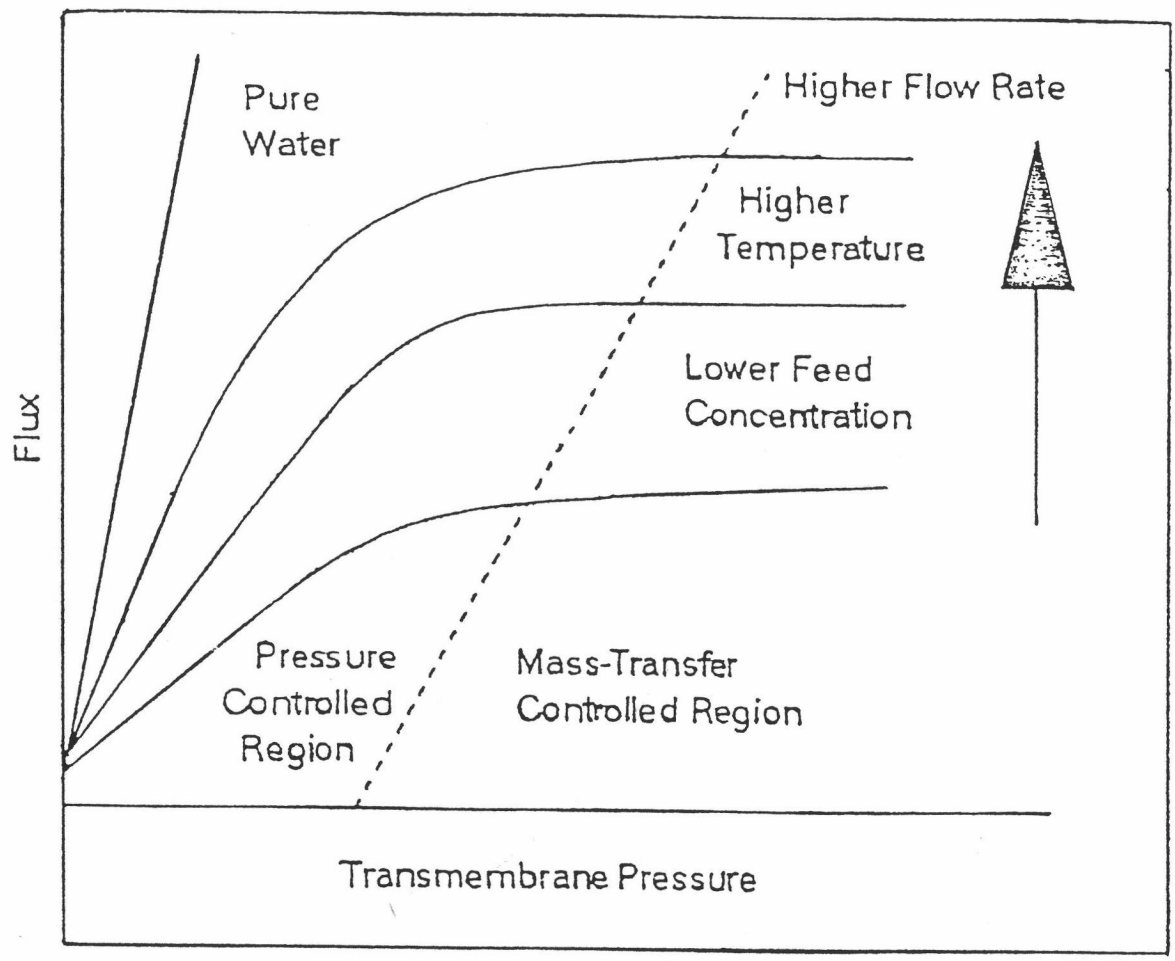
จากผลการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันกับค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 เมื่อทำการทดลองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ และเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นเป็น 500 ,1000 ,1500 และ 2000 รอบต่อนาที พบว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์เป็นสัดส่วนตรงกับความดัน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.1 เมื่อทำการทดลองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงแรก และจะเข้าสู่ภาวะคงตัวอย่างรวดเร็ว การเพิ่มความดันให้กับระบบสามารถเพิ่มค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ได้เพียงเล็กน้อย ค่าฟลักซ์จะเริ่มมีค่าคงที่เนื่องจากเกิดเจลโพลาไรเซชัน ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ช่วงที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดันได้ เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น (C_w) มีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลาย (C_g) ของสารนั้น ตัวถูกละลายจะมีลักษณะคล้ายเจลที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ชั้นเจลจะเกิดขึ้นคลุมผิวเยื่อแผ่นมีลักษณะคล้ายเยื่อแผ่นอีกแผ่นต่ออนุกรมอยู่กับเยื่อแผ่นเดิม แรงขับดันในการแพร่กลับของตัวถูกละลายเนื่องจากผลต่างของความเข้มข้นจะมีค่าคงที่ การเพิ่มความดันจึงไม่มีผลให้

อัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลายสู่ระบบสูงขึ้น แต่จะเป็นการเพิ่มอัตราการสะสมตัวถูกละลายในชั้นเจล ทำให้ชั้นเจลอัดตัวแน่นขึ้น ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากการเกิดเจลโพลาไรเซชันจะมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าคงที่ เรียกช่วงที่ค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดันว่า ช่วงการควบคุมโดยการถ่ายเทมวล อธิบายได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากเกิดการอุดตันของอนุภาคกับค่าความดัน สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 5.4

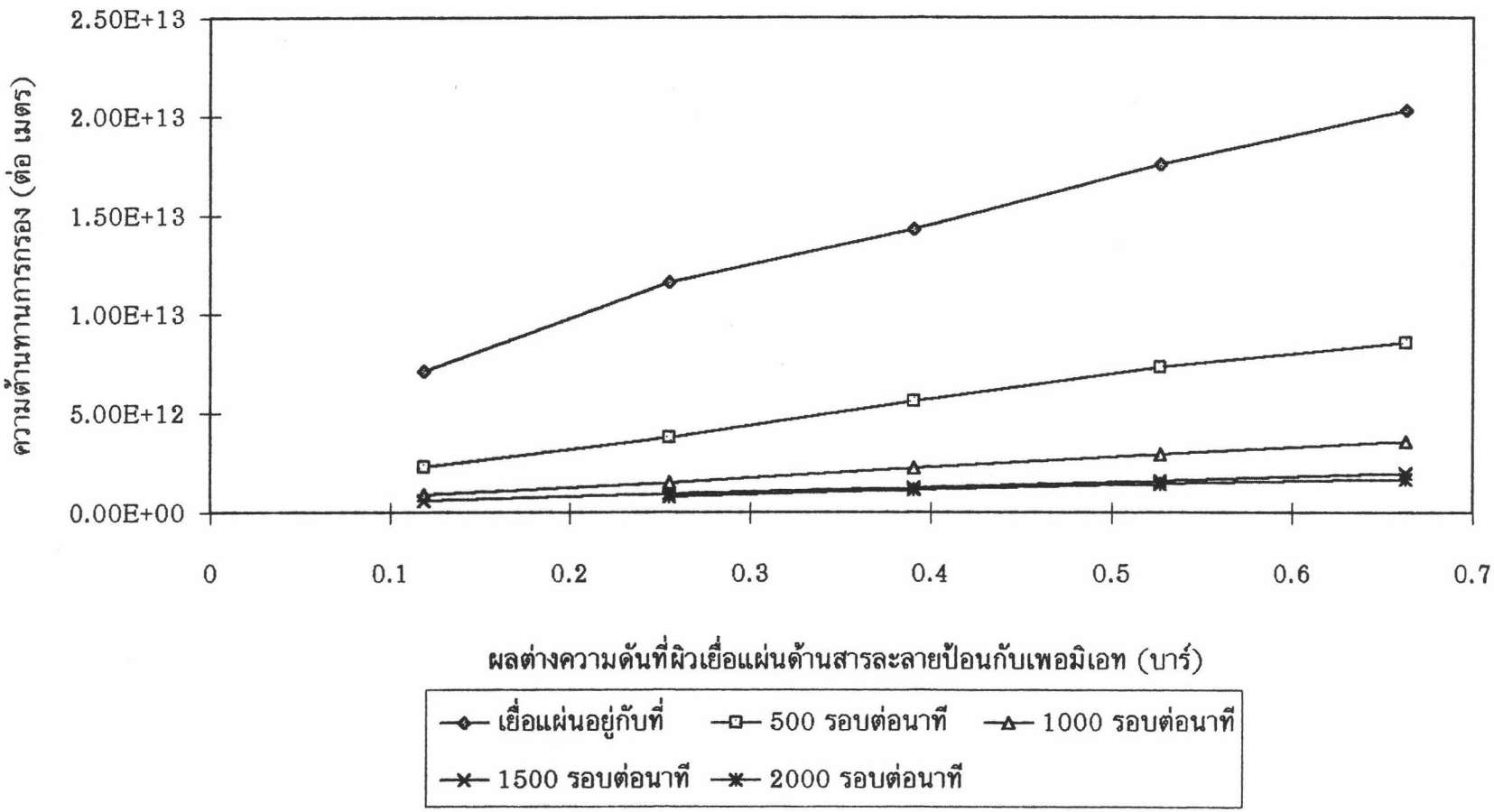
การเพิ่มค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนของเยื่อแผ่น การเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นสามารถลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันที่บริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นได้เป็นอย่างดี ทำให้ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าน้อยลง ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มความดันให้กับระบบ จึงทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าเมื่อเทียบกับการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพอมิเอชันฟลักซ์ กับ ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท ที่ความเข้มข้นเชลล์ในสายป้อน 6.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 5.8 แสดงช่วงค่าฟลักซ์ไม่ขึ้นกับความดัน (8)



รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของเยื่อแผ่น กับ ผลต่าง ความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท ที่ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน 6.5 กรัมต่อลิตร

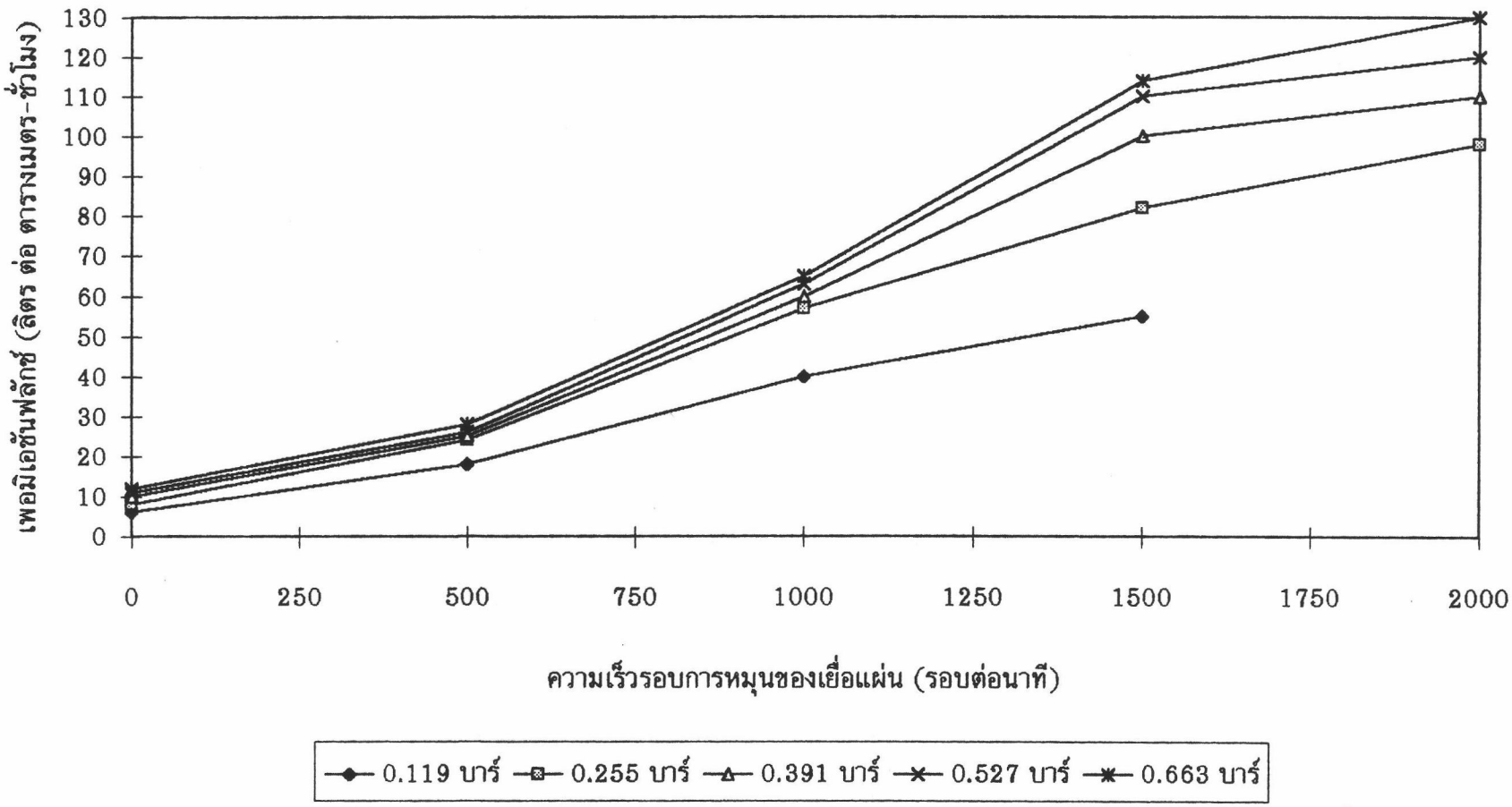
5.3 การศึกษาผลของความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นต่อการกรอง *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 ในน้ำหมัก โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในเครื่องกรองชนิดหมุนได้

จากการศึกษาผลของความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นต่อค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำหมัก โดยทำการทดลองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่และทำการเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 500 ,1000, 1500 และ2000 รอบต่อนาที ความดันขาเข้า 0.136,0.272,0.408,0.544 และ 0.680 บาร์ โดยใช้อัตราการป้อนของน้ำหมักเท่ากับ 12 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ กับค่าความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น ดังรูปที่ 5.5 พบว่าการเพิ่มค่าความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น จะทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่นทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลายที่เรียกว่า การหมุนวนของเทย์เลอร์ ทำให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวเยื่อแผ่น กวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณผิวเยื่อแผ่นให้หลุดออกกลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงสามารถควบคุมการสร้างเจลบนผิวเยื่อแผ่นได้เป็นอย่างดี ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้มีค่าสูง

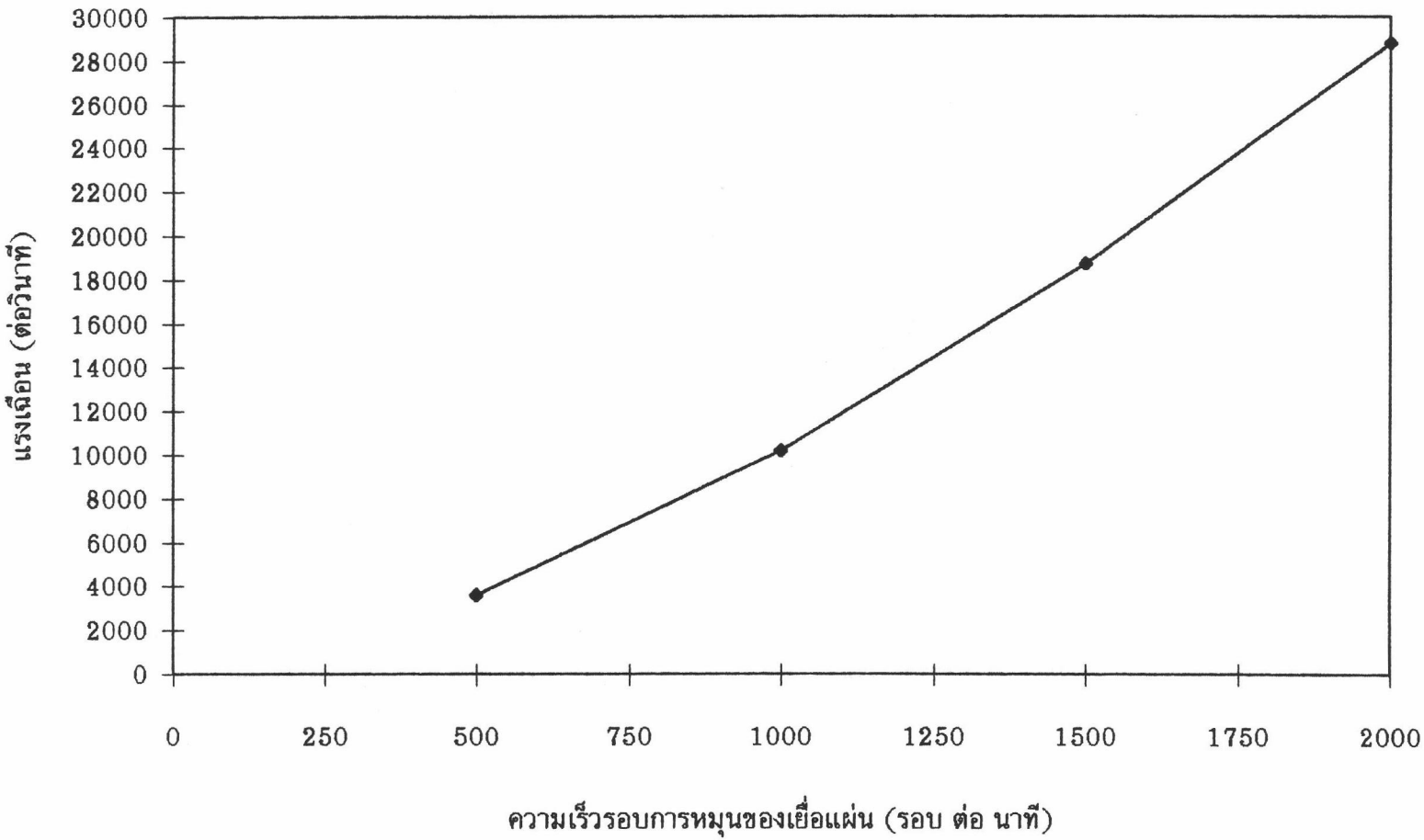
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น กับ แรงเฉือน (Shear)ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่น จะแสดงดังรูปที่ 5.6 พบว่าแรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวเยื่อแผ่นแปรตามความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.17 และจากแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถอธิบายการเพิ่มขึ้นของค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ได้ จากรูปที่5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ผิวเยื่อแผ่น กับ ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่น พบว่าการเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวเยื่อแผ่นจะทำให้ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าลดลง อธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น จะทำให้แรงเฉือนบริเวณผิวเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้น แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกวาดอนุภาคบริเวณผิวเยื่อแผ่นออก ทำให้ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นมีค่าลดลง ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น

การหมุนของเยื่อแผ่นทำให้เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นกับการหมุนวนของเทย์เลอร์ แสดงในรูปของค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (Taylor number) ดังแสดงในรูปที่ 5.8 พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นทำให้ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.13 ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถทำนายลักษณะการไหลของสารละลายในช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในได้ ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์กับค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ ในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าความชันของเส้นกราฟจะเริ่มชันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์สูงกว่า 800 เนื่องจากการไหลของสารละลายเริ่มเปลี่ยนจาก ช่วงเปลี่ยนแปลงการไหล (transition) เข้าสู่ช่วง การหมุนวนแบบปั่นป่วน (turbulent vortex) ซึ่งเป็นไปตามช่วงการเปลี่ยนแปลงการไหลที่ทำการทดลองโดย KATAOKA(21) ทำให้การถ่ายเทมวลของตัวทำละลายมีค่าสูงขึ้น ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จึงมีค่าสูงตามไปด้วย

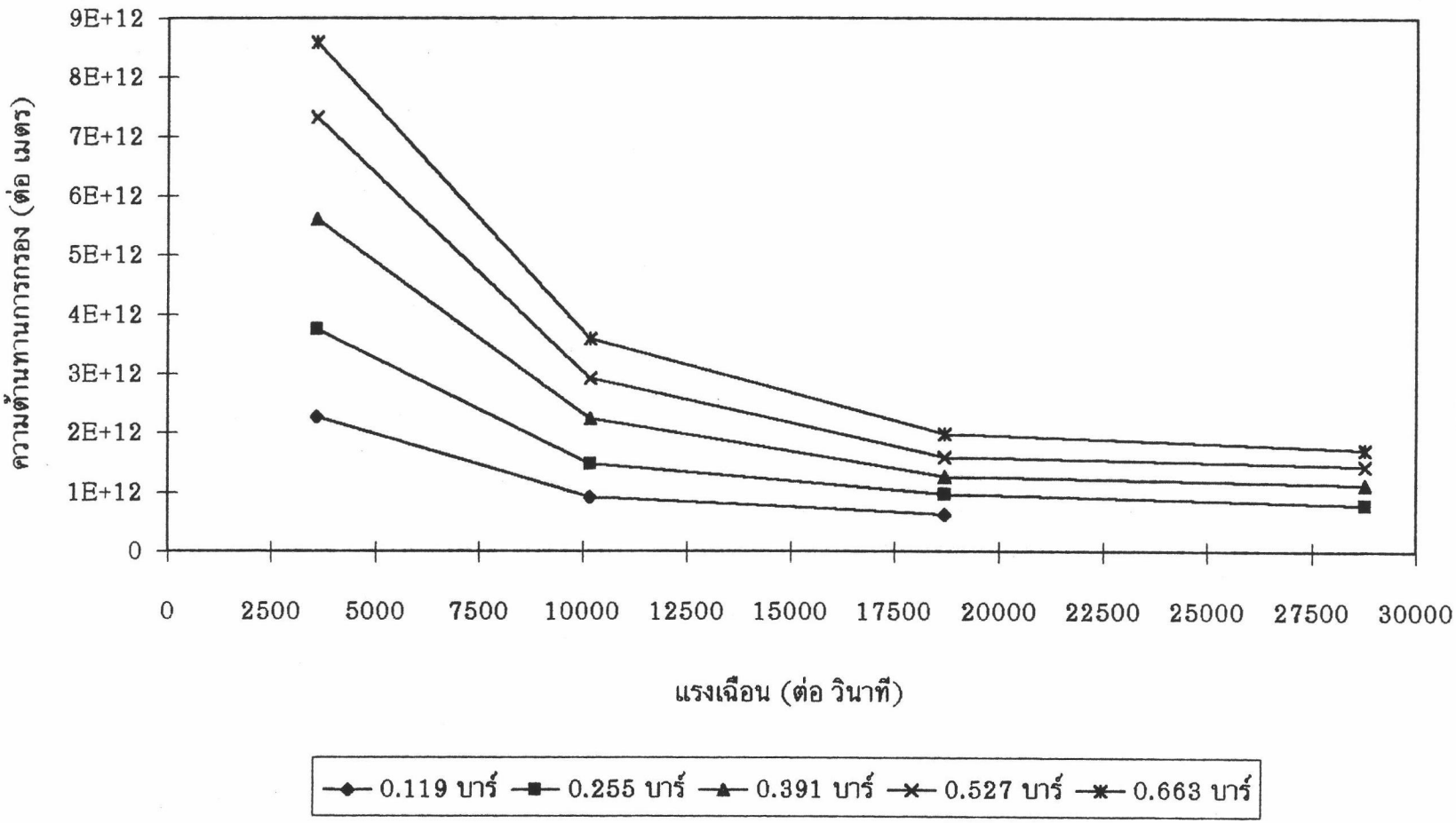
จากการทดลองสามารถเปรียบเทียบผลของความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นต่อการกรอง โดยการเปรียบเทียบค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ กับ การกรองขณะเยื่อแผ่นหมุนที่ 1500 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ทำการทดลองที่ความดันขาเข้า 0.136,0.272,0.408,0.544 และ 0.680 บาร์ จากกราฟจะเห็นได้ว่า การกรองขณะเยื่อแผ่นหมุนจะให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่สูงกว่าการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่มาก เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่นทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวเยื่อแผ่นช่วยลดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นได้ดี จากกราฟที่ภาวะคงที่จะเห็นว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองขณะเยื่อแผ่นหมุนที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที จะมีค่าสูงกว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ประมาณ 10 เท่า



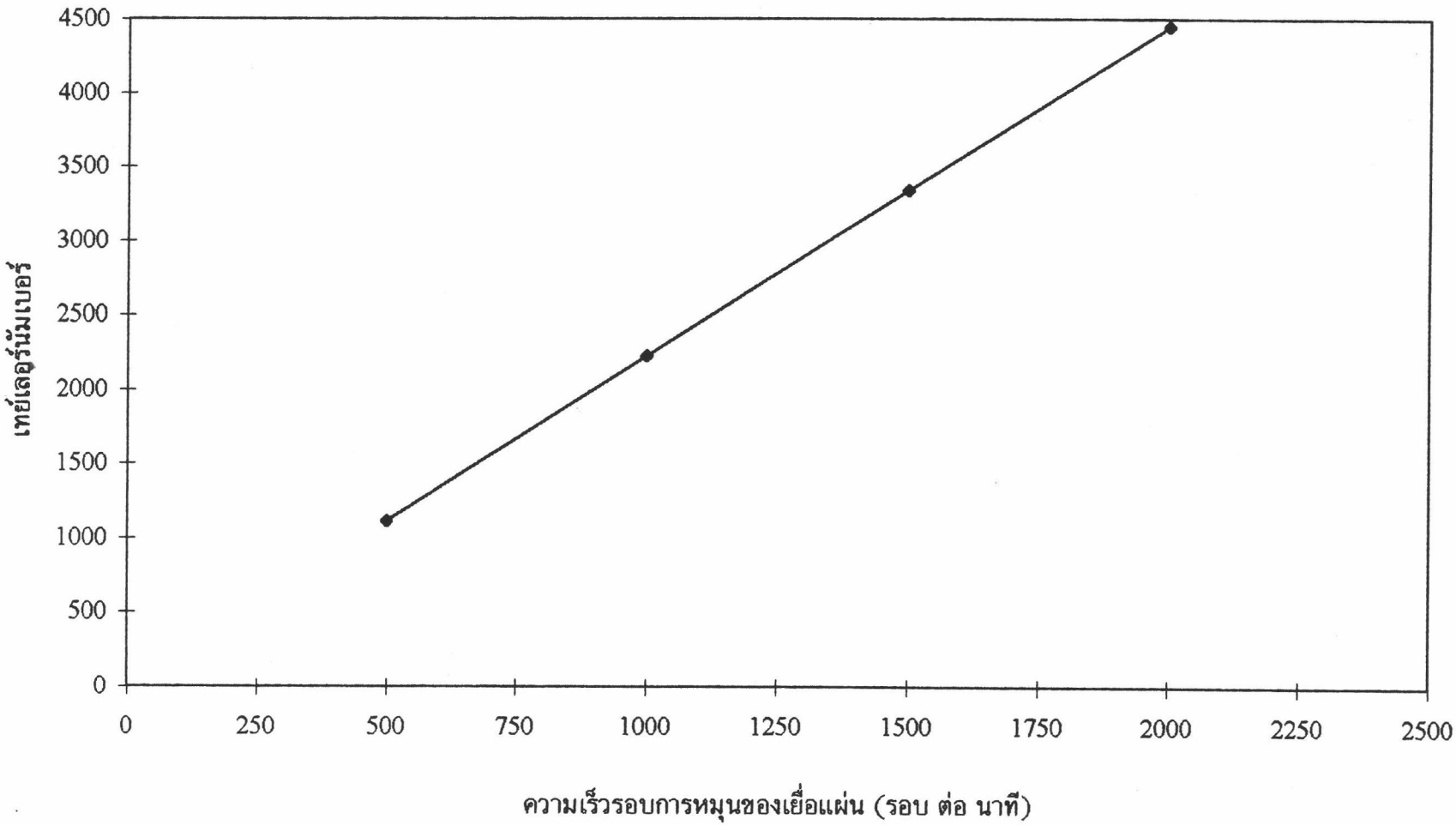
รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ กับ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น



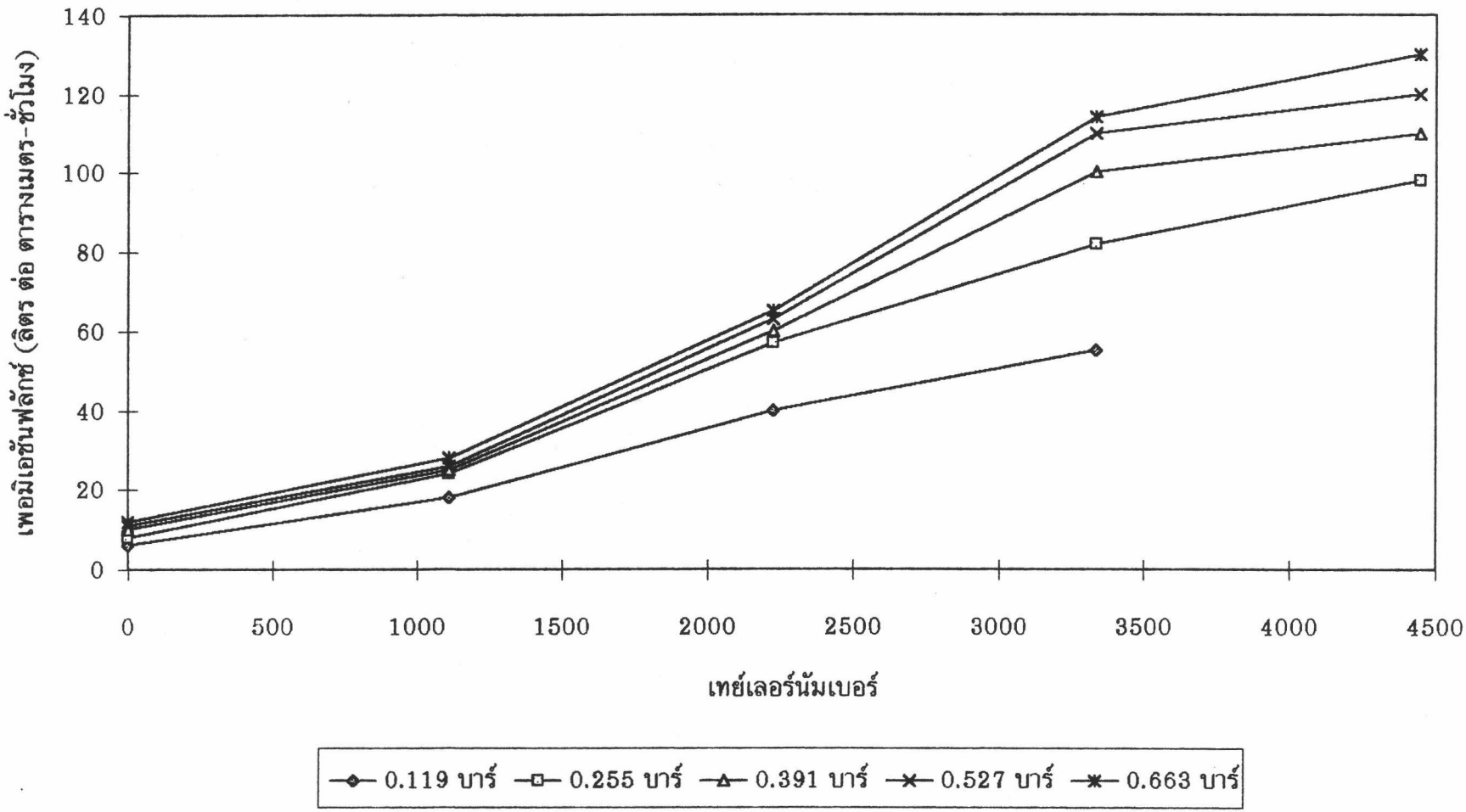
รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น กับ แรงเฉือน



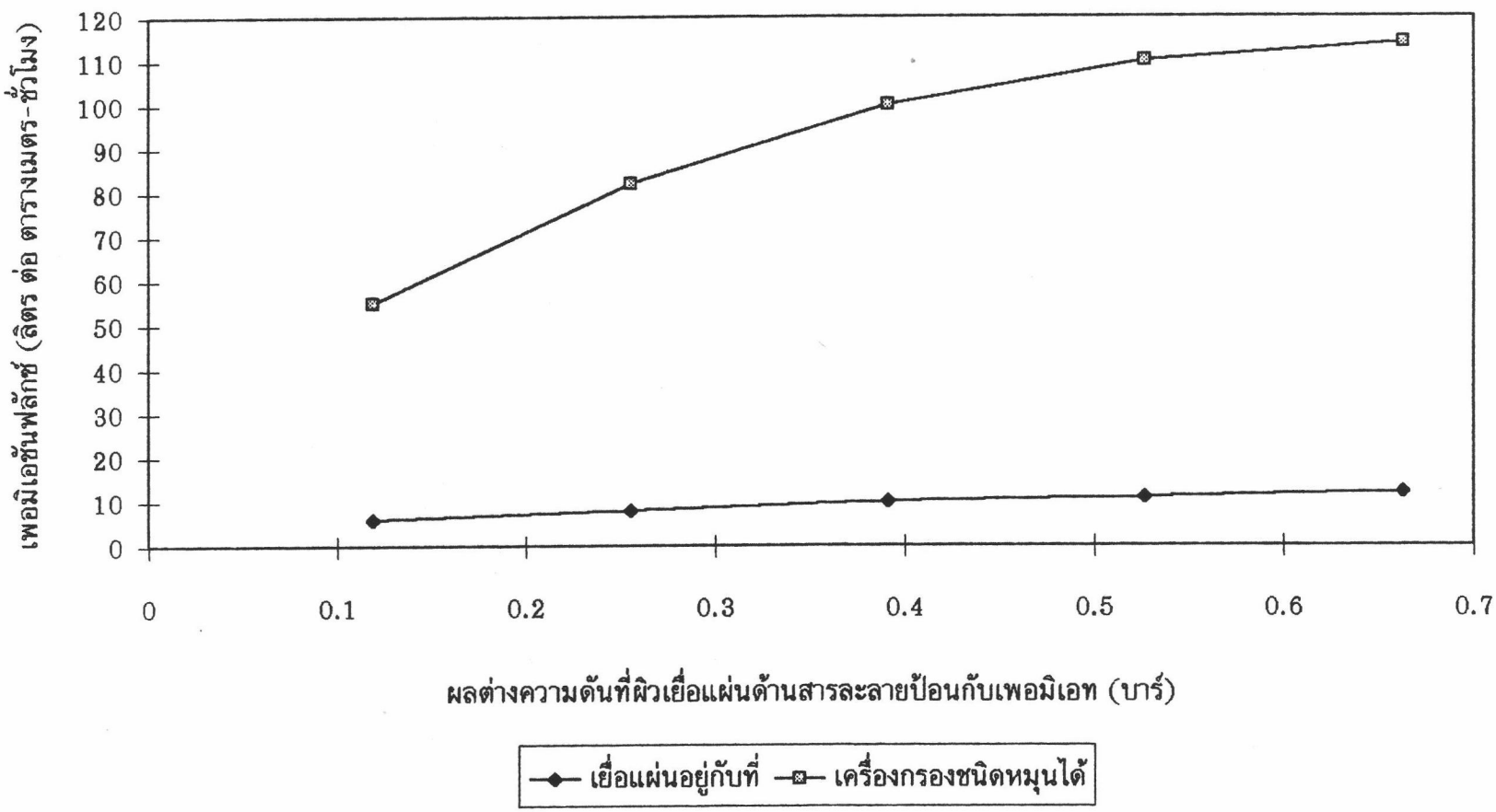
รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของเยื่อแผ่น กับ แรงเฉือนที่ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน 6.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ กับ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ กับ ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์

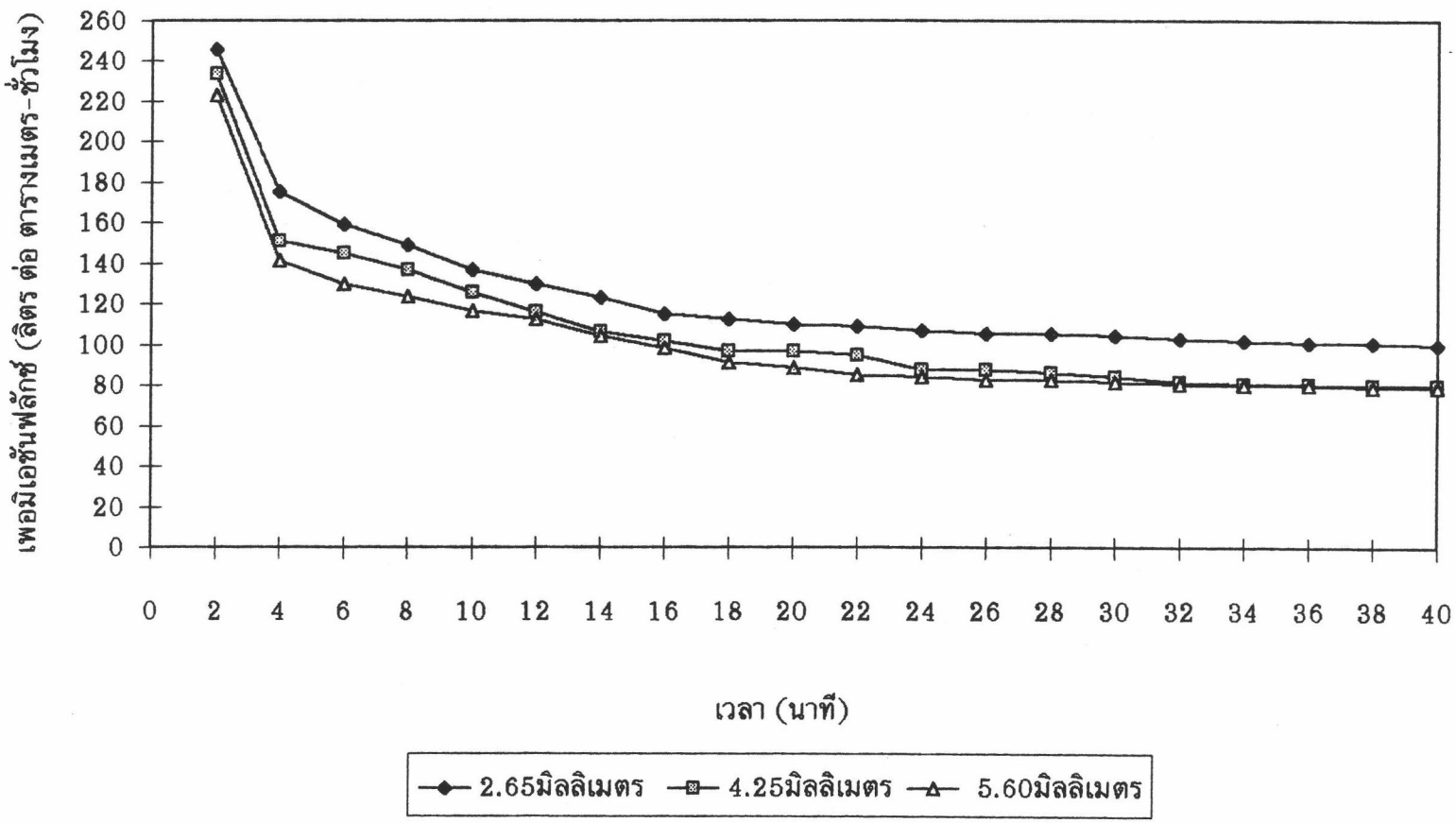


รูปที่ 5.10 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ที่ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 1500 รอบต่อนาที กับ การ กรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ ที่ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน 6.5 กรัมต่อลิตร

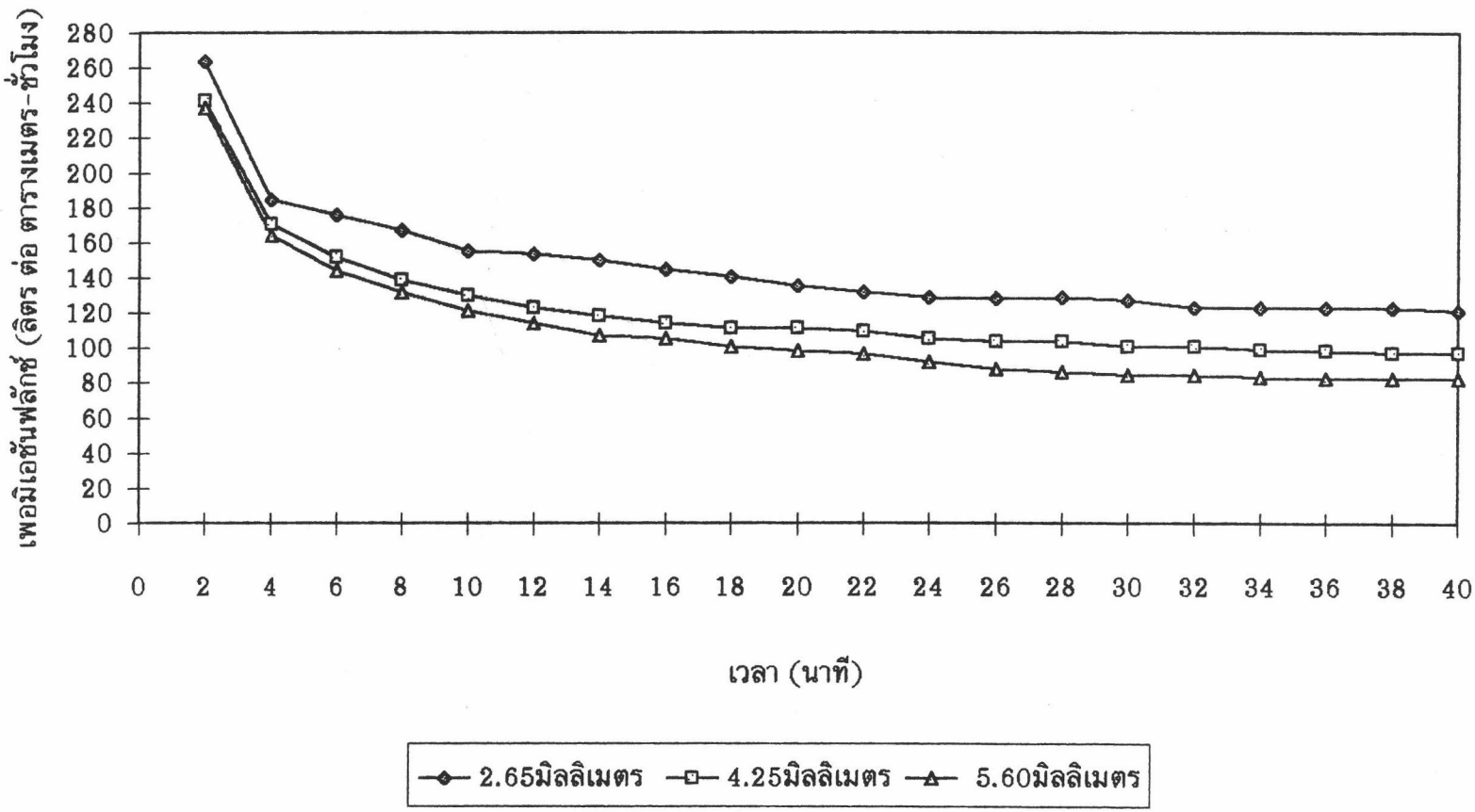
5.4 การศึกษาผลของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ต่อการกรอง *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 ในน้ำหมัก โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในเครื่องกรองชนิดหมุนได้

การศึกษาผลของช่องว่างระหว่างเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ต่อค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำหมัก กระทำโดยการเปลี่ยนแปลงความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่น กับผนังท่อด้านใน 3 ค่า คือ 2.65 , 4.25 และ 5.6 มิลลิเมตร ทำการทดลองที่ความดันขาเข้า 0.680 บาร์ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นเท่ากับ 1500 และ 2000 รอบต่อนาที อัตราการป้อนน้ำหมักเท่ากับ 12 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.12 และ5.13 พบว่าการเพิ่มความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน จะมีผลทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ลดลงและจากรูปที่ 5.14 เมื่อทำการทดลองเปลี่ยนความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น โดยที่ความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในคงที่ พบว่าที่ความเร็วรอบของเยื่อแผ่นต่ำ มีผลทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ต่ำลงเช่นกัน

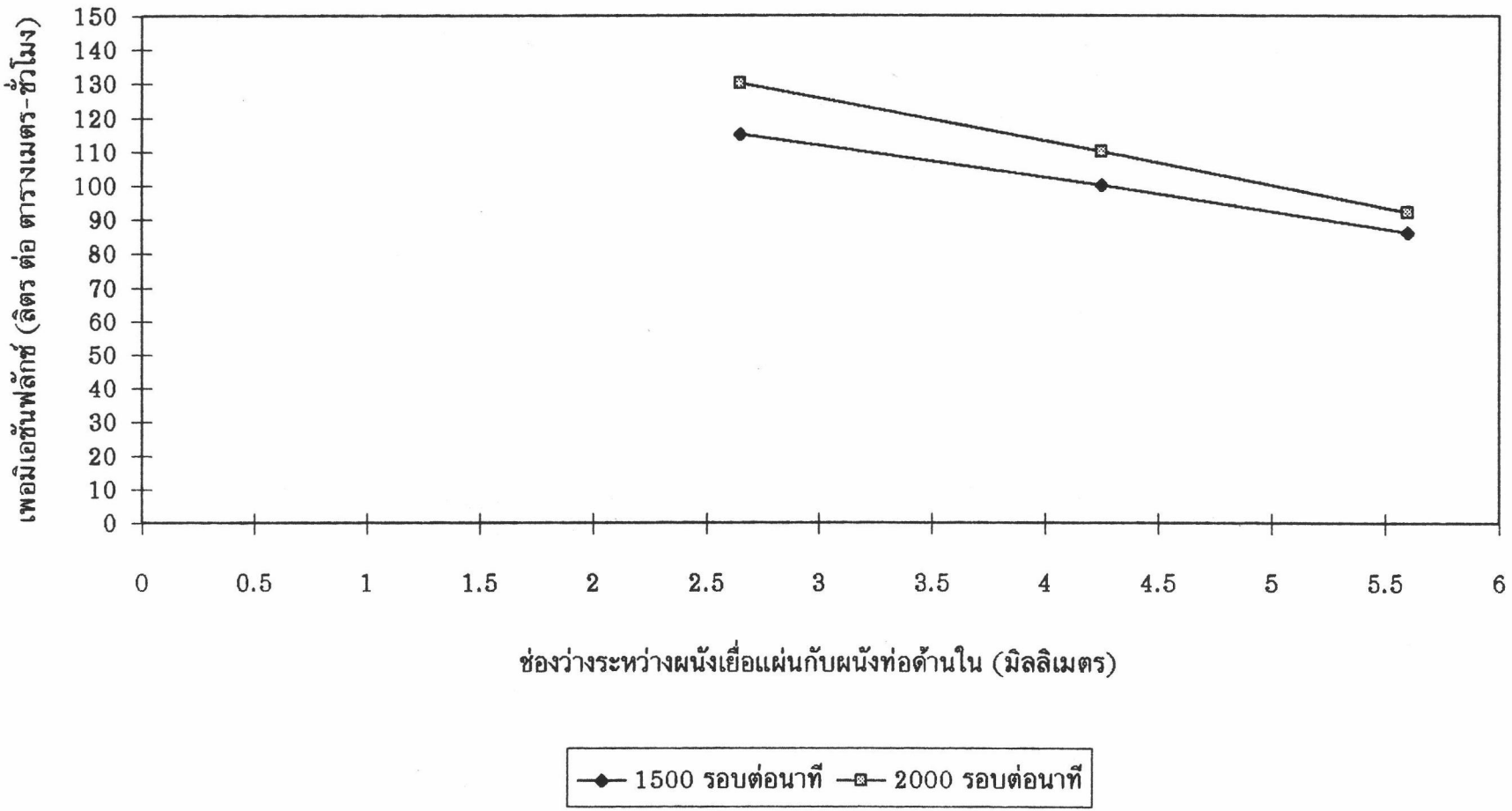
ความสัมพันธ์ผกผันระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน สามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน กับ แรงเฉือนที่เกิดบริเวณผิวเยื่อแผ่น ตามสมการที่ 3.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความห่างของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในลดลง จะมีผลทำให้แรงเฉือนบริเวณผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.15 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกวาดอนุภาคที่อุดตันบริเวณผิวเยื่อแผ่นให้กลับเข้าไปในสารละลาย ทำให้ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นมีค่าน้อยลง ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ได้จึงมีค่าสูงขึ้น



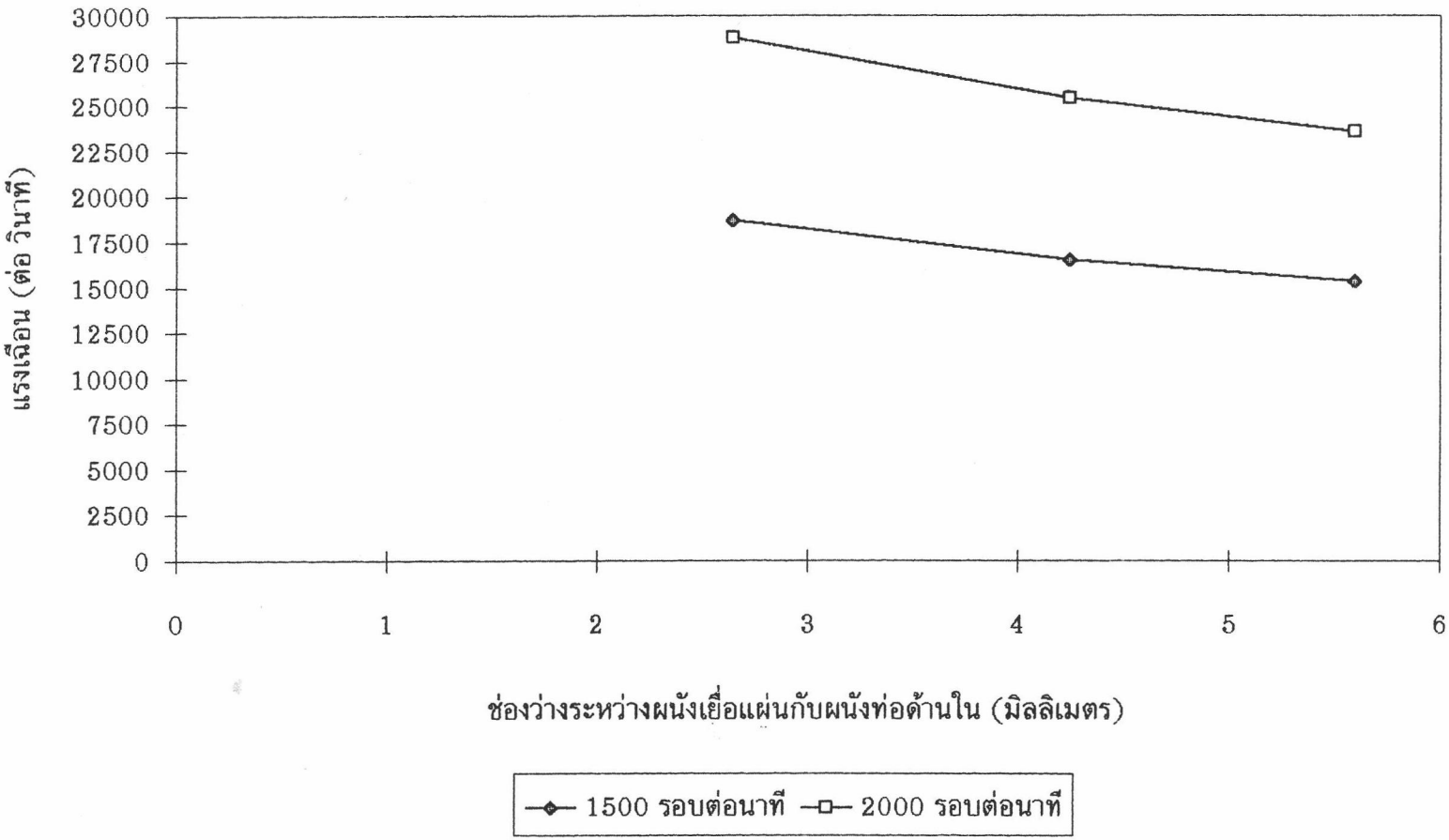
รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 1500 รอบต่อนาที ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท 0.663 บาร์



รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับเวลา เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบต่อนาที ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท 0.663 บาร์



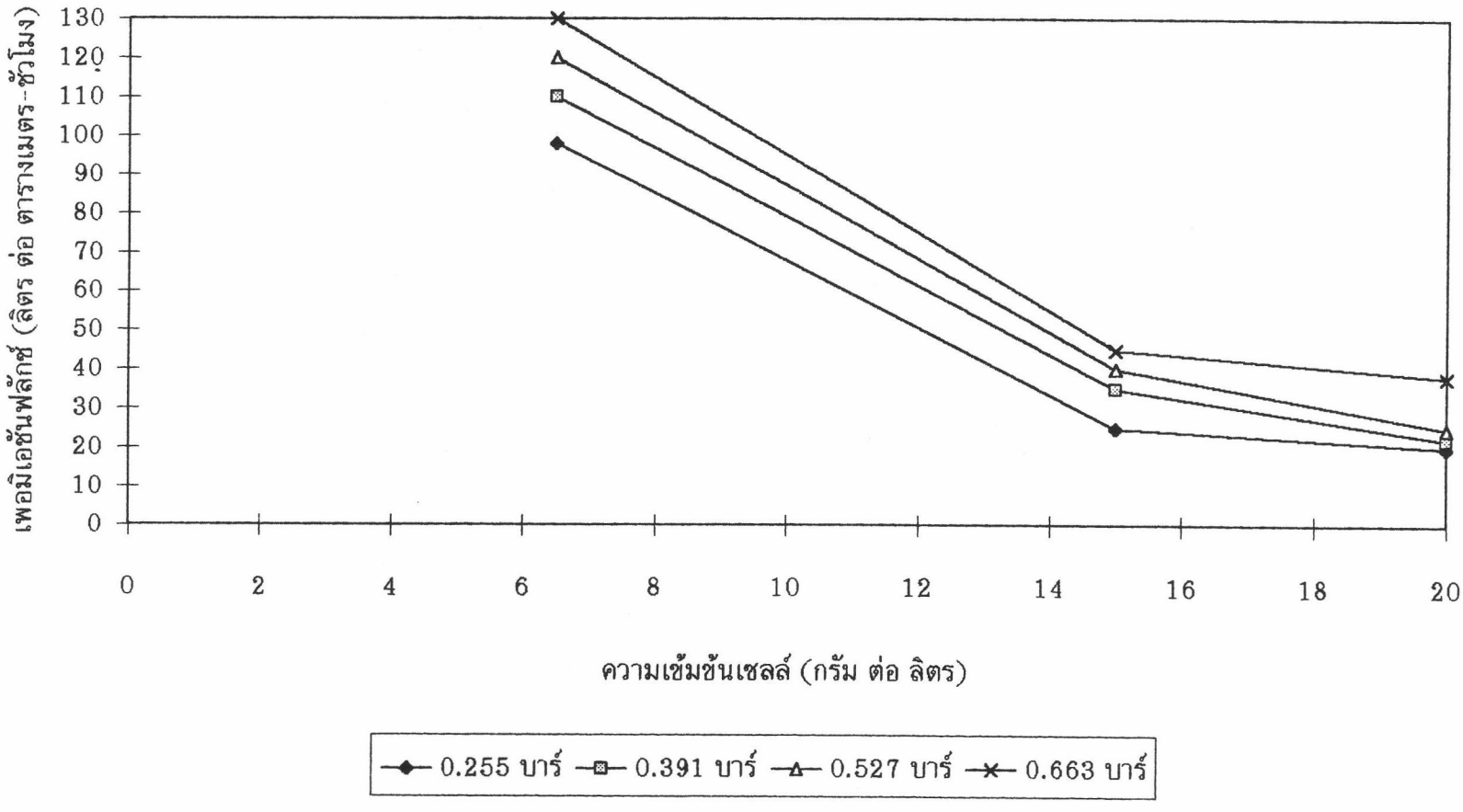
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์กับช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ที่ความดัน 0.663 บาร์



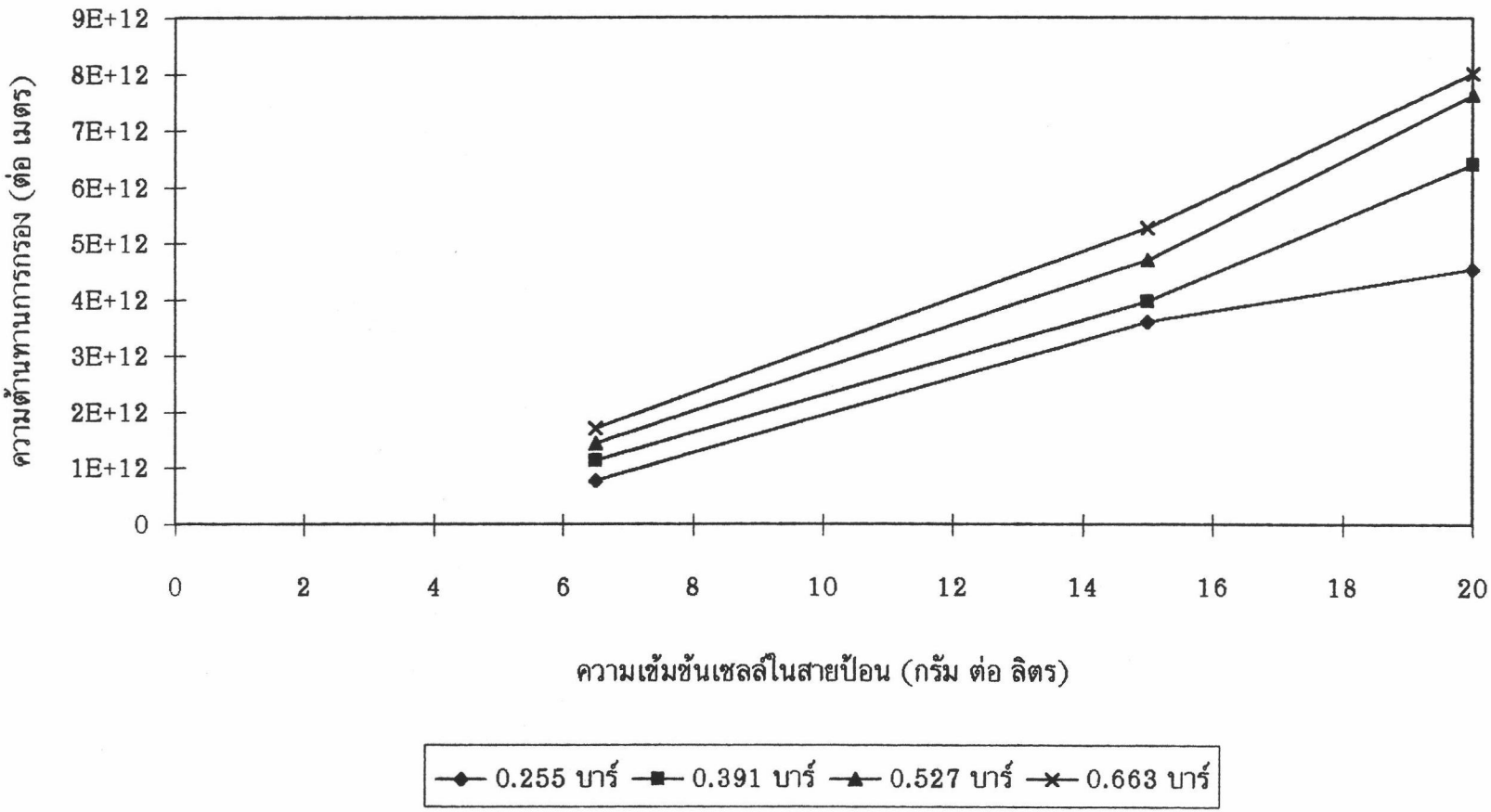
รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน ที่ความดัน 0.633 บาร์

5.5 การศึกษาผลของความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อนต่อการกรอง*Clostridium acetobutylum* ATCC 824 ในน้ำหมัก โดยใช้เยื่อแผ่นเซรามิกในเครื่องกรองชนิดหมุนได้

การศึกษาผลของความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน ต่อค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของน้ำหมัก ทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นของเซลล์เริ่มต้น 3 ค่า คือ 6.5 , 15 และ 20 กรัมต่อลิตร ทดลองที่ความดันขาเข้า 0.272,0.408,0.544 และ 0.680 บาร์ อัตราการป้อนน้ำหมักเท่ากับ 12 ลิตรต่อชั่วโมง แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 5.15 พบว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะแปรผกผันกับค่าความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน เมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นของเซลล์สูงจะทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3.12 เนื่องจากความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อนมีผลต่อการถ่ายเทมวล , การเกิดโพลาไรเซชัน และการอุดตันของเยื่อแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.16 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นกับความเข้มข้นของเซลล์ในสายป้อนที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อนจะทำให้ค่าความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าลดลง



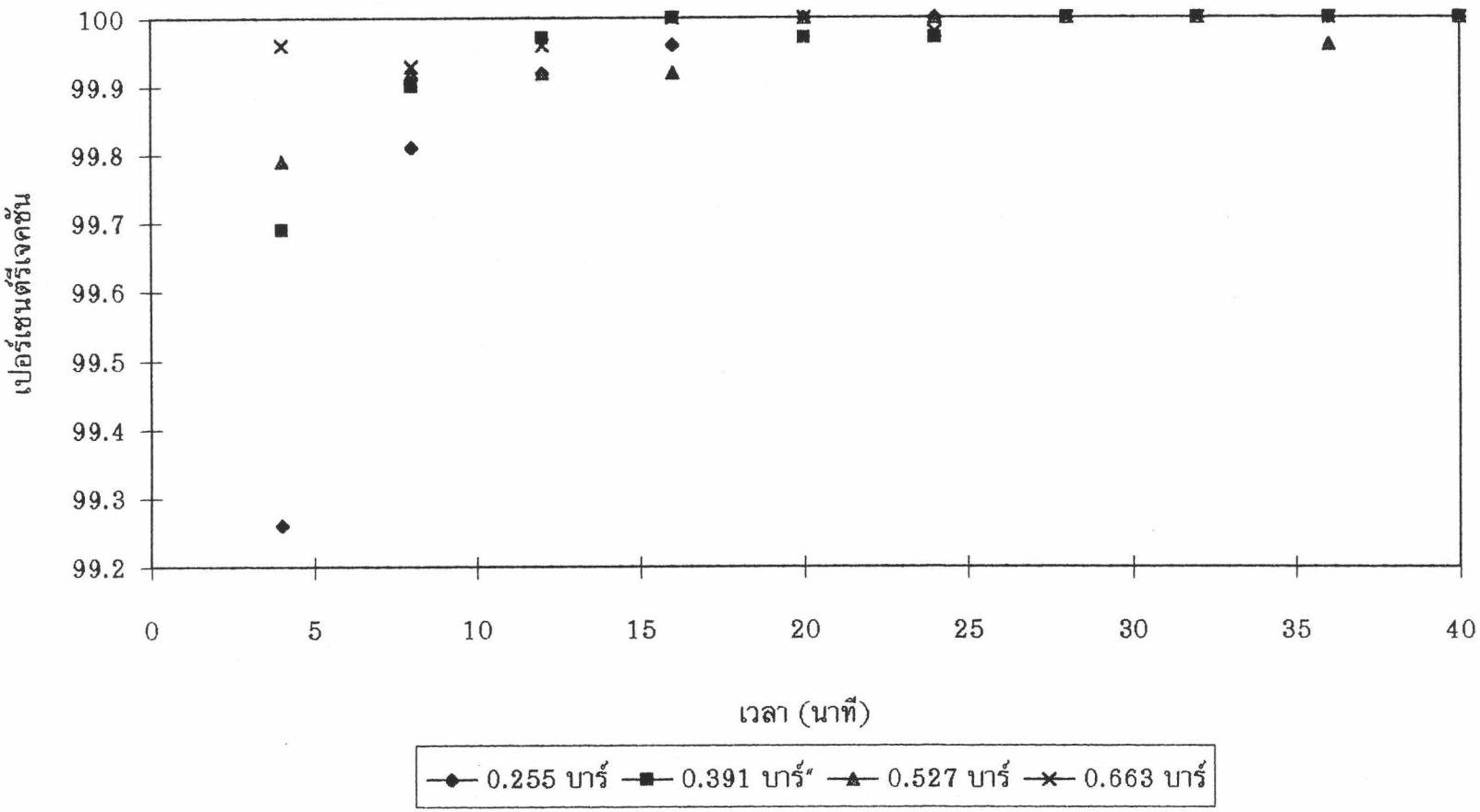
รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ กับ ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน ที่ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบต่อนาที



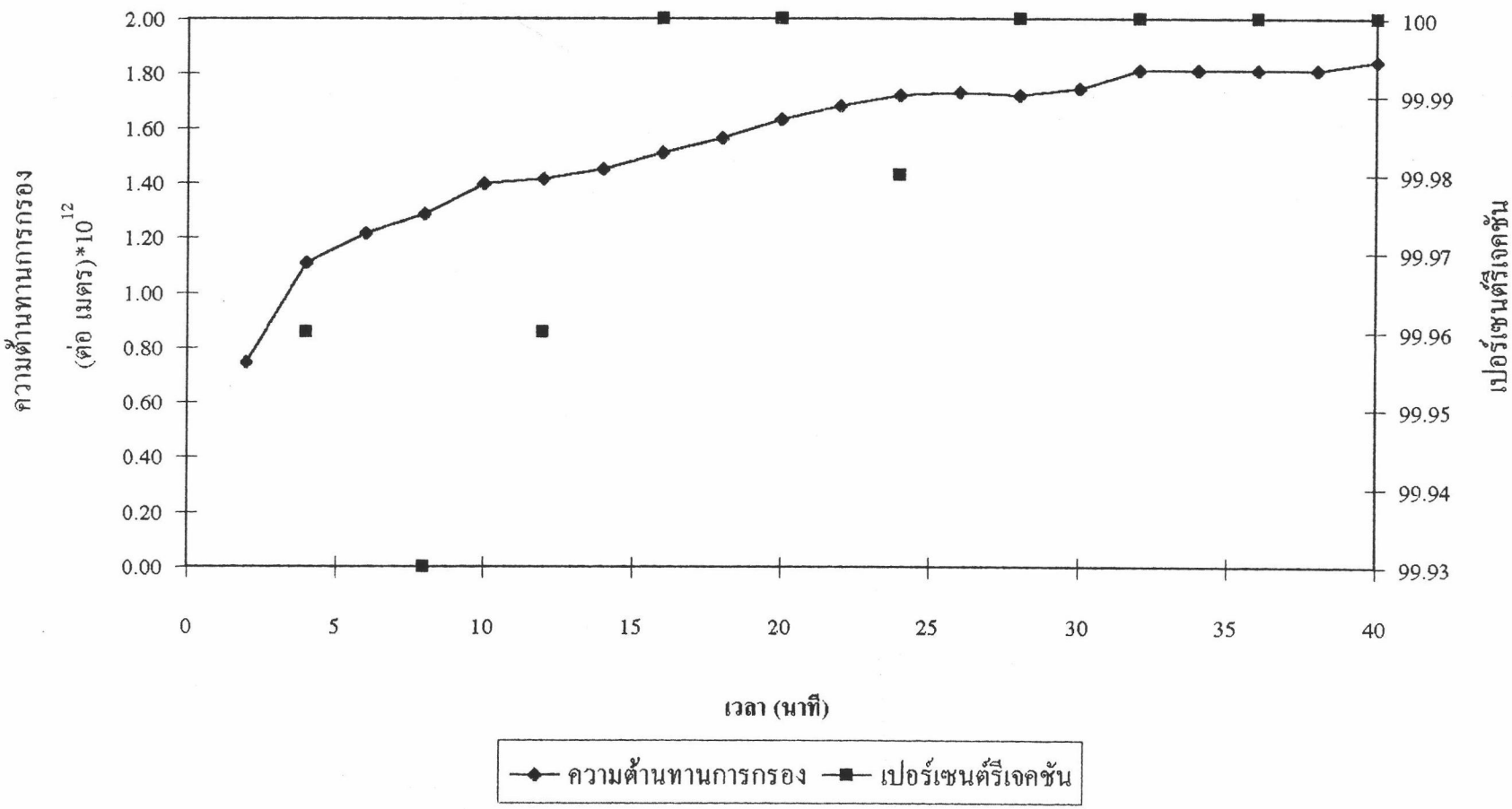
รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของเยื่อแผ่นกับความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน ความเร็วรอบการหมุน 2000 รอบต่อนาที

5.6 การศึกษาเปอร์เซ็นต์การเก็บกักของการกรอง *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824 ด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้

จากการทดลองทำการเก็บสารตัวอย่างด้านเพอมิเอททุก 4 นาที นำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตัวถูกละลายในเพอมิเอท สามารถหาเปอร์เซ็นต์การเก็บกักได้จากสมการที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บกักต่อเวลา ทำการทดลองที่ความเข้มข้นเซลล์ 6.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบต่อนาที จากรูปที่ 5.17 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บกักเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทดลอง ค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บกักในช่วงแรกจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อเวลาผ่านไปเปอร์เซ็นต์การเก็บกักจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเกือบคงที่ สามารถอธิบายได้ว่าในช่วงแรกเยื่อแผ่นยังไม่เกิดการอุดตัน อนุภาคขนาดเล็กสามารถผ่านเยื่อแผ่นได้บางส่วน เมื่อเวลาผ่านไปความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดโพลาไรเซชันบนผิวเยื่อแผ่นทำให้ปริมาตรของรูพรุนเล็กลง อนุภาคจึงถูกเก็บกักได้มากขึ้น เป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การเก็บกักเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการทดลองเป็นเวลานานความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคจะเข้าสู่ภาวะคงที่ ทำให้ปริมาตรของรูพรุนไม่เปลี่ยนแปลง เปอร์เซ็นต์การเก็บกักจึงมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคกับเปอร์เซ็นต์การเก็บกัก ทดลองที่ความเข้มข้นเซลล์ 6.5 กรัมต่อลิตร ความดันขาเข้า 0.68 บาร์ ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นเท่ากับ 2000 รอบต่อนาที แสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์รีเจคชัน กับเวลา ที่ความเข้มข้นเซลล์เท่ากับ 6.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการกรองและเปอร์เซนต์รีเจคชัน กับเวลา ที่ความเร็วรอบการหมุน 2000 รอบต่อนาที ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท 0.663 บาร์

5.7 เปรียบเทียบผลทดลองการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้กับการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่

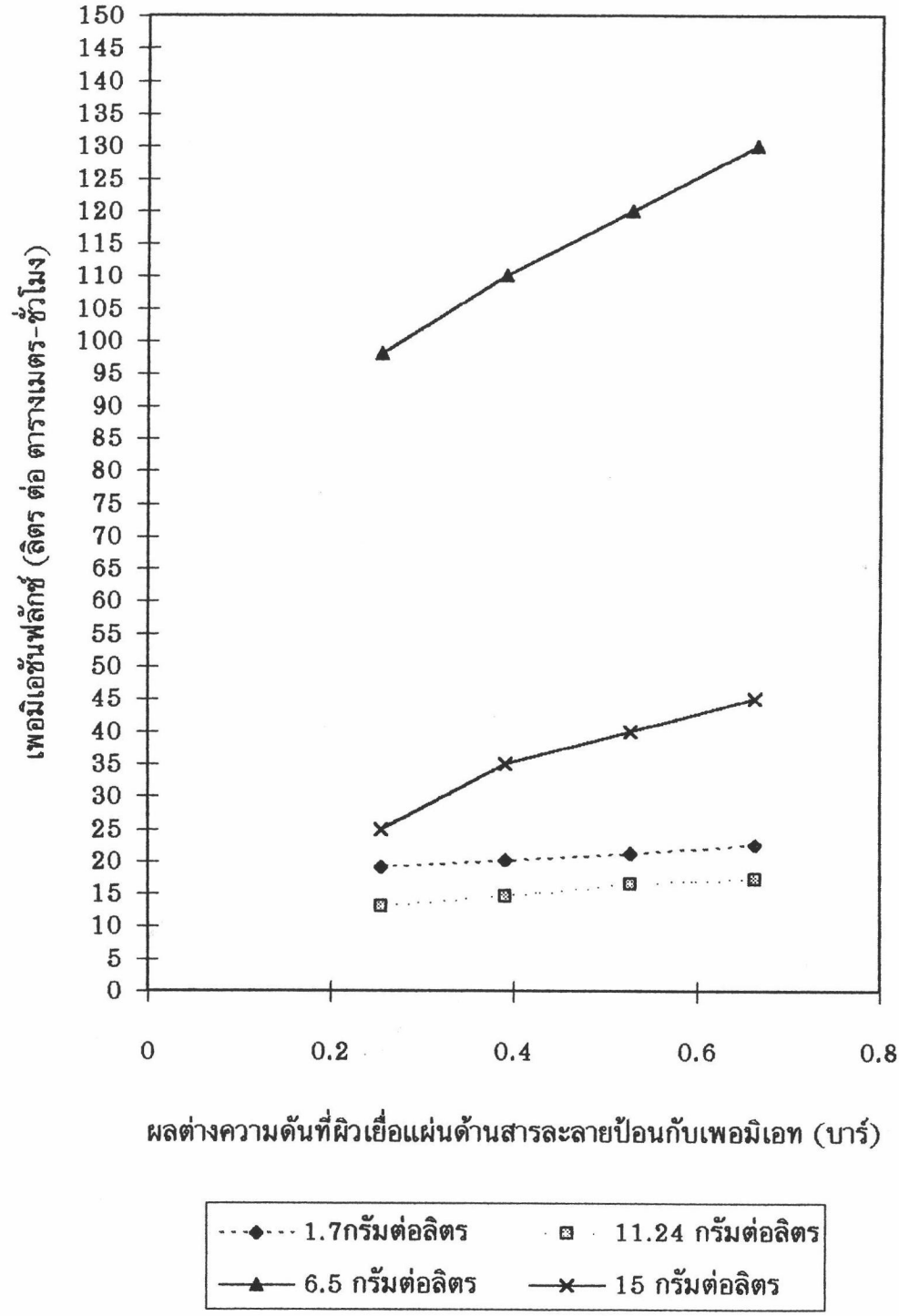
จากผลการทดลองการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้นำไปเปรียบเทียบกับผลทดลองการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นทั่วไป ซึ่งทำการทดลองโดยเหมือนเดือน พิศาลพงศ์ (25) ในงานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้อุลตราฟิลเตรชันเพื่อเพิ่มผลผลิตในกระบวนการหมักอะซิโตน-บิวทานอล แบบต่อเนื่อง โดยใช้จุลินทรีย์ Clostridium acetobutylicum ATCC 824 ภาวะการกรองโดยใช้เครื่องกรองทั้ง 2 ชนิดแสดงในตารางที่5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงภาวะการกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ กับ การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น

ภาวะการกรอง	การกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น	การกรองแบบไหลขนานโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้
ชนิดของเยื่อแผ่น และ โมดูล	เซรามิกแบบท่อหลายท่อ	เซรามิกแบบท่อเดี่ยว
ขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น	0.2 ไมโครเมตร	0.2 ไมโครเมตร
พื้นที่การกรอง	2030 ตารางเซนติเมตร	341.72 ตารางเซนติเมตร
อัตราการป้อนสาร	400 ลิตร ต่อ ชั่วโมง	12 ลิตร ต่อ ชั่วโมง
ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น	เยื่อแผ่นอยู่กับที่	ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบ ต่อ นาที
ความดันขาเข้า	0.408,0.544และ0.680 บาร์	0.408,0.544และ0.680 บาร์
ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน	1.7 และ 11.24 กรัม ต่อ ลิตร	6.5 และ 15 กรัม ต่อ ลิตร

ผลทดลองเปรียบเทียบการกรองโดยใช้เครื่องกรองทั้ง 2 ชนิดแสดงในรูปที่ 5.19 พบว่า การกรองเซลล์ความเข้มข้น 6.5 กรัมต่อลิตรด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ จะมีค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าการกรองเซลล์ความเข้มข้น 1.7 กรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นประมาณ 5 เท่า และการกรองเซลล์ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้จะมีค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าการกรองเซลล์ความเข้มข้น 11.24 กรัมต่อลิตร ด้วยเครื่องกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่ ประมาณ 2.4 เท่า

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้มีค่าสูงกว่าการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่มาก ถึงแม้ว่าจะทำการกรองที่ความเข้มข้นของเซลล์สูงกว่า จากกราฟจะเห็นว่าการเพิ่มความดันให้กับระบบการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่ ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากเยื่อแผ่นเกิดการอุดตันของอนุภาคอย่างรวดเร็ว ขณะที่การกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ การหมุนของเยื่อแผ่นจะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวเยื่อแผ่น ทำให้สามารถป้องกันการอุดตันของเยื่อแผ่นได้ดี ความต้านทานการกรองของเยื่อแผ่นจะมีค่าต่ำ การเพิ่มความดันให้กับระบบ จึงทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 5.19 แสดงผลการเปรียบเทียบการกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้กับการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่นชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่

สรุปผลการทดลอง

1. จากการทดลองการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อแผ่นเซรามิกชนิดหมุนได้ พบภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงสุดเท่ากับ 130 ลิตร ต่อ ตารางเมตร-ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อนเท่ากับ 6.5 กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นเท่ากับ 2000 รอบต่อนาที ความดันขาเข้า 0.680 บาร์ ช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อเท่ากับ 2.65 มิลลิเมตร ที่อัตราการป้อนน้ำหมัก 12 ลิตรต่อชั่วโมง

2. ความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อนมีผลต่อค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรอง ความเข้มข้นของสารป้อนสูงจะทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ต่ำ จากการทดลองพบว่าที่ค่าความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน 6.5 กรัมต่อลิตร จะให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงกว่าความเข้มข้นเซลล์ในสายป้อน 20 กรัมต่อลิตร ที่ความดันขาเข้า 0.272-0.680 บาร์ ประมาณ 3-5 เท่า

3. การเพิ่มความดันในการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ จะทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การเข้าสู่ภาวะคงที่จะใช้เวลานานขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความดันให้กับการกรองชนิดเยื่อแผ่นอยู่กับที่มีผลต่อค่าเพอมิเอชันฟลักซ์น้อยมาก ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น จากการทดลองที่ความเข้มข้นสารป้อน 6.5กรัมต่อลิตร ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่น 2000 รอบต่อนาที ที่ความดันขาเข้า 0.680 บาร์ ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองด้วยเครื่องกรองชนิดหมุนได้ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 130 ลิตรต่อตารางเมตร-ชั่วโมง ซึ่งมีค่าสูงกว่าเพอมิเอชันฟลักซ์ของการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ ประมาณ 10 เท่า

4. ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการกรองขณะเยื่อแผ่นอยู่กับที่ จากการทดลองพบว่าความเร็วรอบการหมุนสูงสุดที่ทำให้เพอมิเอชันฟลักซ์มีค่าสูงสุด คือ 2,000 รอบต่อนาที เนื่องจากที่ความเร็วรอบของเยื่อ

แผ่นสูงกว่านี้ ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์จะเริ่มลดลง การเพิ่มค่าเพอมิเซ้นฟลักซ์จะทำได้โดยการเพิ่มความดันให้กับระบบ

5. การลดขนาดของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านใน จะมีผลทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์สูงขึ้น เนื่องจากการลดขนาดของช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในจะทำให้แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น ทำให้ความต้านทานการกรองเนื่องจากการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นมีค่าลดลง จากการทดลองพบว่าช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในเท่ากับ 2.65 มิลิเมตร จะให้ค่าเพอมิเอชันสูงสุด โดยที่ช่องว่างระหว่างผนังเยื่อแผ่นกับผนังท่อด้านในเท่ากับ 4.25 และ 5.6 มิลลิเมตร จะให้ค่าเพอมิเอชันฟลักซ์ที่ต่ำกว่าและมีปริมาตรใกล้เคียงกัน

6. เวลาทำการกรองที่นานขึ้น จะทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบริเวณผิวเยื่อแผ่นปริมาตรของรูพรุนจะเล็กลง ทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การเก็บกักสูงขึ้น

<u>ข้อเสนอแนะ</u>

1. การเพิ่มเพอมิเอชันฟลักซ์อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดพื้นที่การกรองของเยื่อแผ่นที่ใช้

2. ทำการทดลองเปรียบเทียบกับการกรองโดยใช้เครื่องกรองชนิดหมุนได้ในแนวนอน

3. ทดลองนำเครื่องกรองชนิดหมุนได้ต่อเข้ากับถังหมัก เพื่อทำการกรองอย่างต่อเนื่องแทนการกรองแบบไหลขนานกับเยื่อแผ่น