

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านเยื่อแผ่นยางธรรมชาติ ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาดหยดและการกระจายตัวของอนุภาคแขวนลอยในระบบของเหลวผสม และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ เช่น ขนาดรูพรุนและการกระจายตัวของรูพรุนบนแผ่นฟิล์ม อุณหภูมิ และความหนาแน่นฟิล์ม ที่มีอิทธิพลต่อการซึมผ่านได้ของน้ำผ่านฟิล์มยาง

4.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อขนาดหยดและการกระจายตัวของอนุภาค o-xylene ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

#### 4.1.1 ค่าแรงตึงระหว่างผิว

การทดลองนี้ใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นสารช่วยในการคงตัวของหยด o-xylene ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสม โดยหาค่าแรงตึงระหว่างผิวของ o-xylene กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ค่าการทดลองแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1 รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงระหว่างผิวกับความเข้มข้นของสารละลาย พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากแนวโน้มของกราฟได้ค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดไมเซลล์ (critical micelle concentration) ค่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารช่วยในการคงตัวของหยดเท่ากับ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

#### 4.1.2 อิทธิพลของค่าสัดส่วนเฟสของ o-xylene ต่อการกระจายขนาดหยด

ผลของการกระจายขนาดหยด o-xylene ที่สัดส่วนเฟส 0.1 0.2 0.3 และ 0.5 ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยความเร็วรอบใบกวนค่าต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ ข.1 ข.2 ข.3 ข.4 ภาคผนวก ข ตามลำดับ ซึ่งแสดงผลในรูปของความถี่หยดในช่วงเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ รูปที่ 4.2 4.3 4.4 4.5 และ 4.6 แสดงการกระจายขนาดหยด o-xylene ที่สัดส่วนเฟส 0.1 0.2 0.3 0.5 ตามลำดับ จากข้อมูลความถี่นำมาหาค่าขนาดหยดเฉลี่ย ( $D_{32}$ ) ได้โดยสมการ

$$D_{32} = \frac{\sum fn.d^3}{\sum fn.d^2} \quad (2.14)$$

ค่าขนาดหยดเฉลี่ยที่คำนวณได้จะมีค่าใกล้เคียงกับขนาดหยดในสารแขวนลอย เนื่องจากได้มาโดยการสุ่มตัวอย่างหยดอย่างน้อย 1000 หยด ค่าขนาดหยดเฉลี่ยที่ได้นี้แสดงถึงพื้นที่ระหว่างเฟสในสารแขวนลอย (interfacial area =  $6\phi/D_{32}$ )

ค่าขนาดหยดเฉลี่ยมีความสัมพันธ์กับภาวะในการกวนดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = \beta \cdot f(\phi) \frac{K}{(\theta C)^{0.4}} \left[ \frac{1}{Np} \right]^{0.4} \cdot We_I^{-0.6} \quad (2.45)$$

การหาสมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการทำนายขนาดหยด o-xylene ในสารแขวนลอย สามารถหาได้โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{32}$  กับ  $We_I$  ที่สัดส่วนเฟสต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 4.8 และ 4.9 จากนั้นนำค่าความชันที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับค่าสัดส่วนเฟส ดังรูปที่ 4.10 ได้สมการความสัมพันธ์ที่ใช้ในการหาค่า  $f(\phi)$  (correlation factor) ซึ่งคือ เทอม  $C_7(1+C_8)$  ในสมการต่อไปนี้

$$\frac{D_{32}}{D_i} = c_7(1 + c_8\phi)We_I^{-0.6} \quad (2.27)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ได้ค่าคงตัว  $c_7$  และ  $c_8$  ในสมการที่ 2.27 เท่ากับ 0.02 และ 0.8 ตามลำดับ ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ที่ได้ คือ

$$\frac{D_{32}}{D_i} = 0.02(1 + 0.89\phi)We_I^{-0.6} \quad (4.1)$$

หลังจากได้สมการความสัมพันธ์สำหรับทำนายขนาดหยด o-xylene ในสารแขวนลอย แสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้ในรูปที่ 4.11

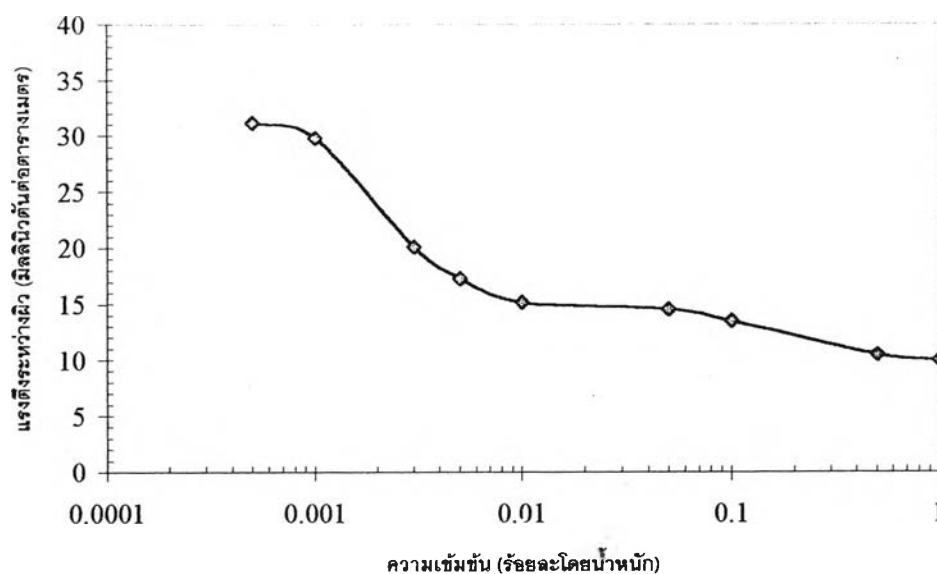
จากสมการ (2.45) ค่าของ  $\beta$  คำนวณได้จากความสัมพันธ์  $D_{32} = \beta d_{95}$  เป็นสัดส่วนของ  $d_{95}/D_{32}$  ค่า C เป็นค่าคงตัว

$$C = \frac{4}{27} = 0.0472$$

และ เพาเวอร์นัมเบอร์ สำหรับถังติดแผ่นกั้น

$$N_p = 4.18$$

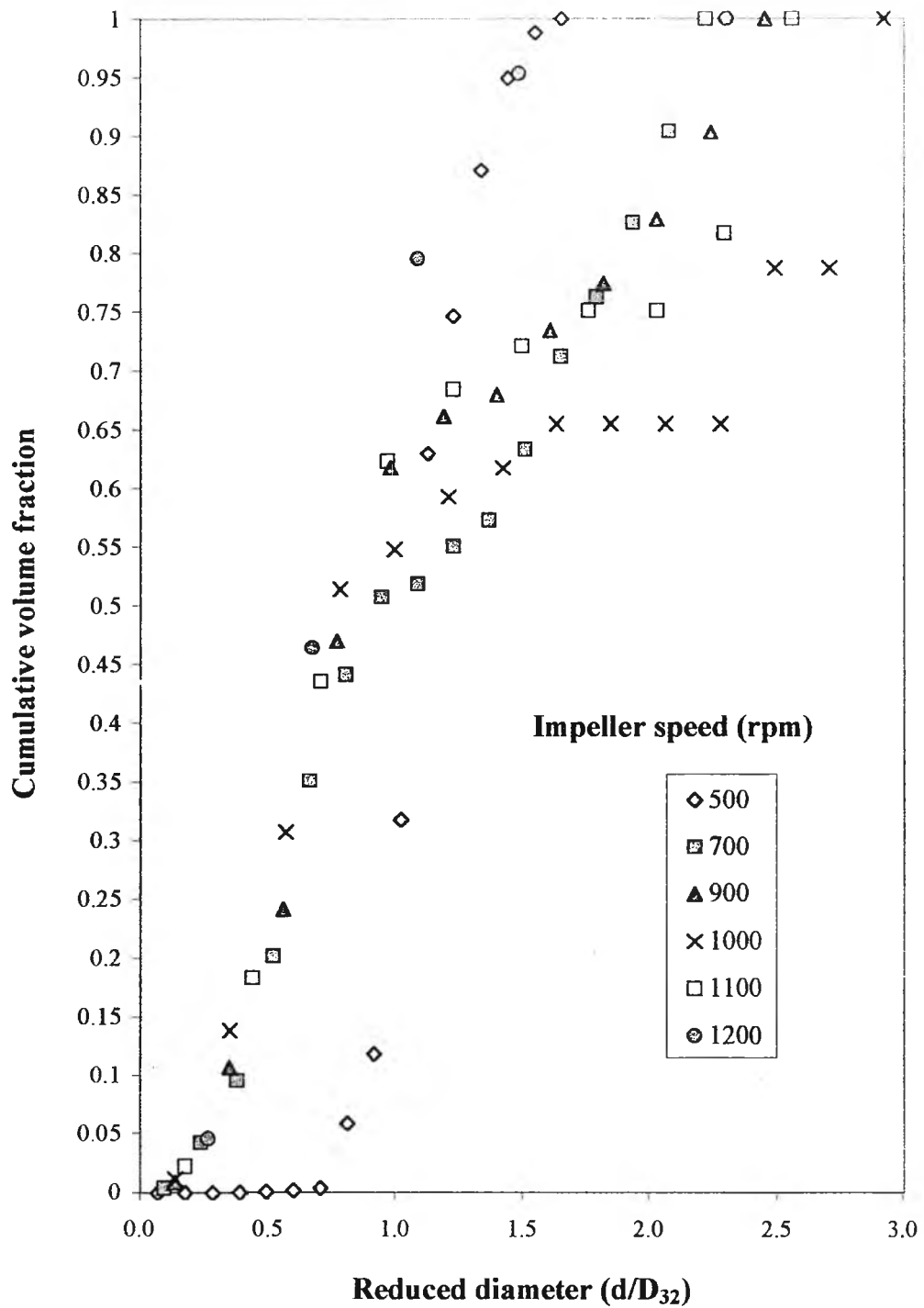
ค่าแฟกเตอร์ความรุนแรงของการปั่นป่วน ( $\theta$ ) สำหรับใบกวนแบบก้านสามารถประมาณได้ ค่าคงตัว K เท่ากับ 0.72 ได้มาจากผลการทดลองของ Clay<sup>(7)</sup> โดยใช้  $d_{95}/D_{32}$  แทน  $1/\beta$  ผลจากการทดลองได้ค่า  $\beta$  เท่ากับ 0.52 และค่า  $\theta$  เท่ากับ  $7.83 \times 10^3$  แสดงการคำนวณในภาคผนวก จ.



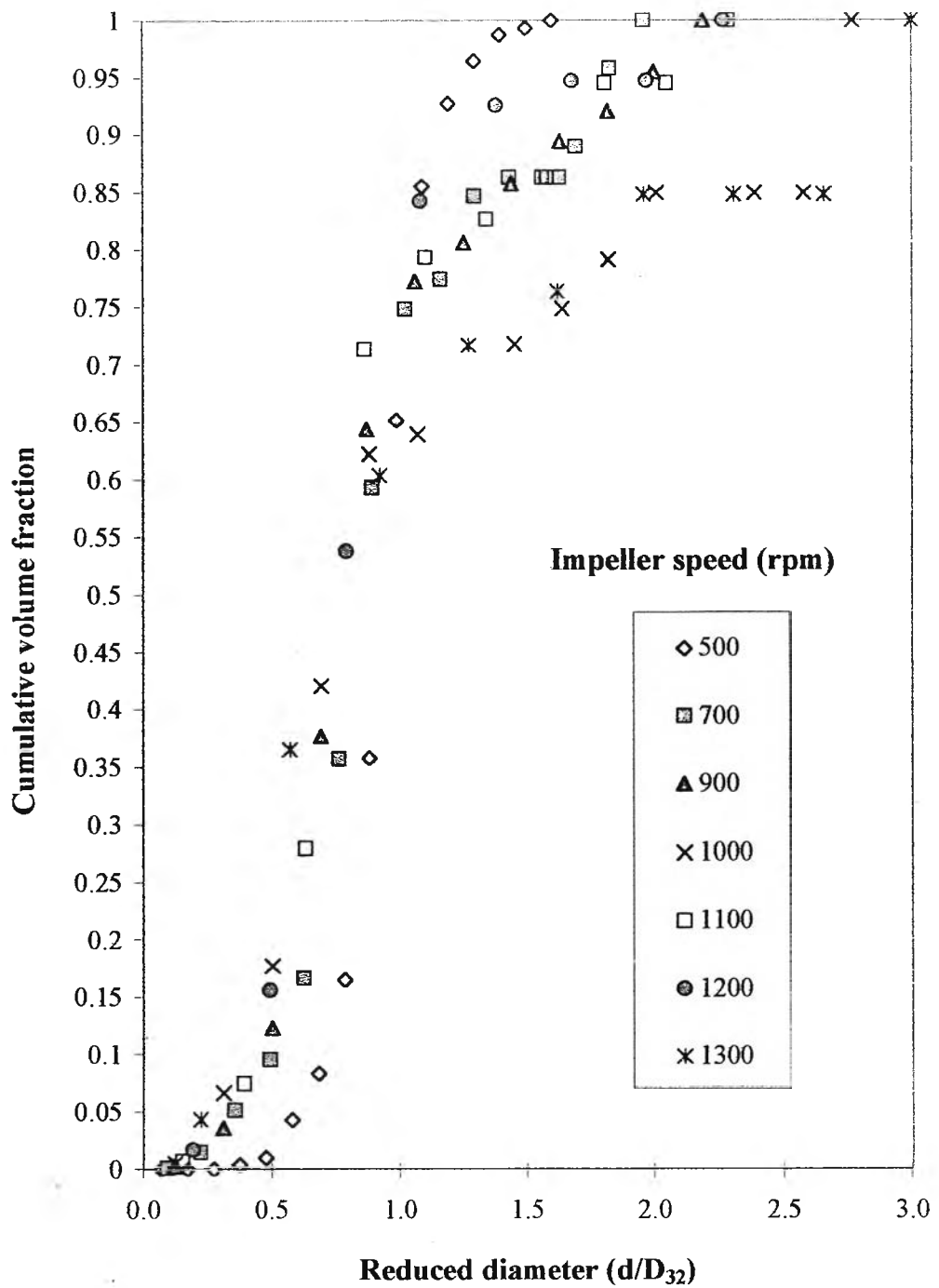
รูปที่ 4.1 ค่าแรงตึงระหว่างผิวของ o-xylene กับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.2 การกระจายตัวของรูพรุนที่เกิดจากหยด o-xylene ในฟิล์มยาง

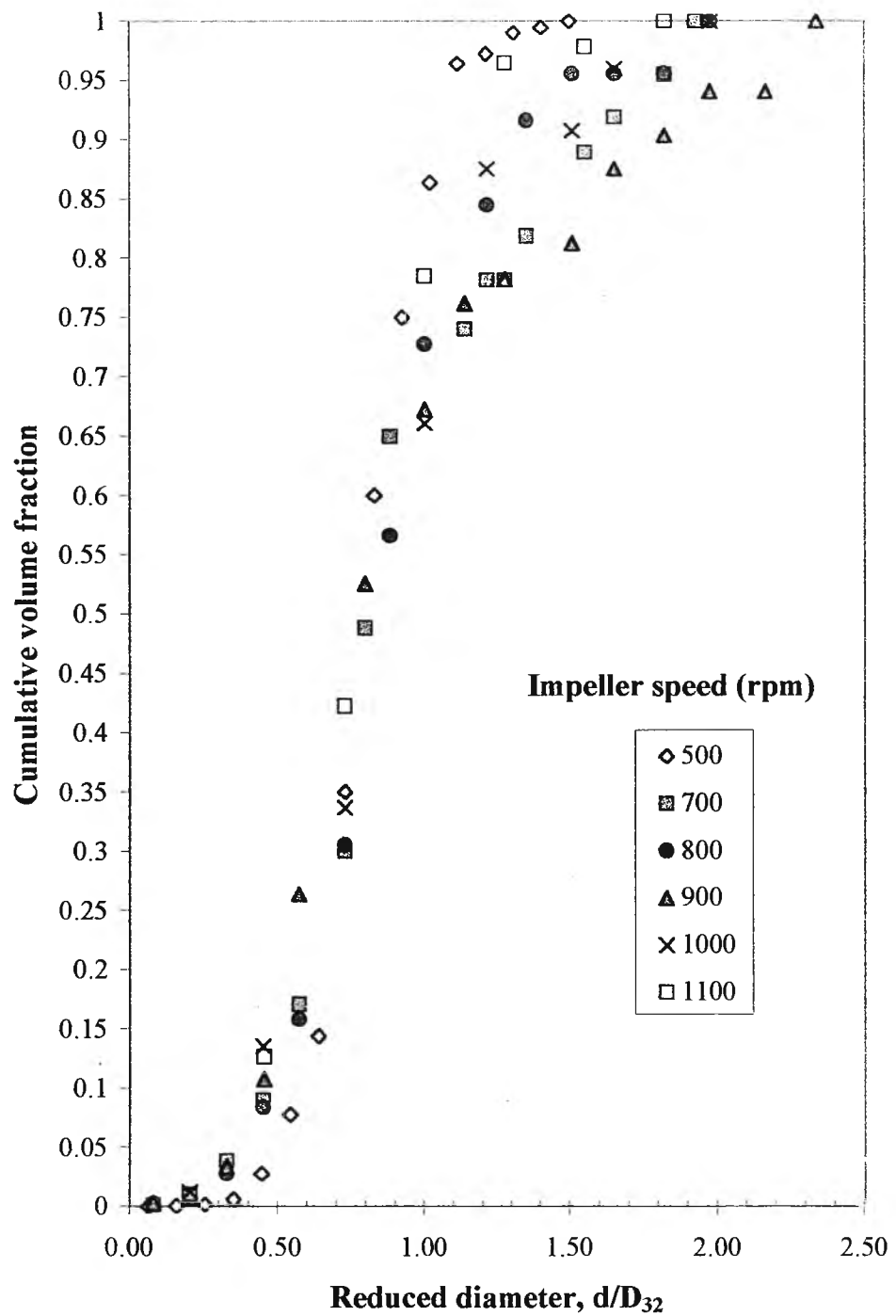
หลังจากผสมสารแขวนลอย o-xylene ในน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ ในอัตราส่วน 10 : 1 โดยปริมาตร ของผสมจะถูกกวนให้มีการกระจายอย่างทั่วถึงตลอดเวลา จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยวิธีการจุ่มและวัลคาไนซ์ด้วยการอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หยด o-xylene ระบายออกไปในกระบวนการอบคงเหลือไว้แต่ที่รูพรุน เมื่อนำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อดูการกระจายขนาดรูพรุนต่อพื้นที่บนแผ่นฟิล์มยาง ดังรูปที่ 4.12 พบว่า การกระจายตัวของรูพรุนค่อนข้างสม่ำเสมอและขนาดของรูพรุนที่เกิดบนแผ่นฟิล์มใกล้เคียงกับขนาดหยดเฉลี่ยของ o-xylene ในสารแขวนลอย รูปที่ 4.13 แสดงภาพตัดขวางเนื้อฟิล์มยาง พบว่าเนื้อยางมีลักษณะเป็นรูพรุนที่เกิดจากการพา o-xylene โดยไอน้ำในระหว่างกระบวนการ วัลคาไนซ์ รูพรุนที่เชื่อมต่อกันนี้เป็นช่องทางสำหรับการแพร่ของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เกิดบนแผ่นฟิล์มกับขนาดหยดเฉลี่ยในสารแขวนลอย แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.14



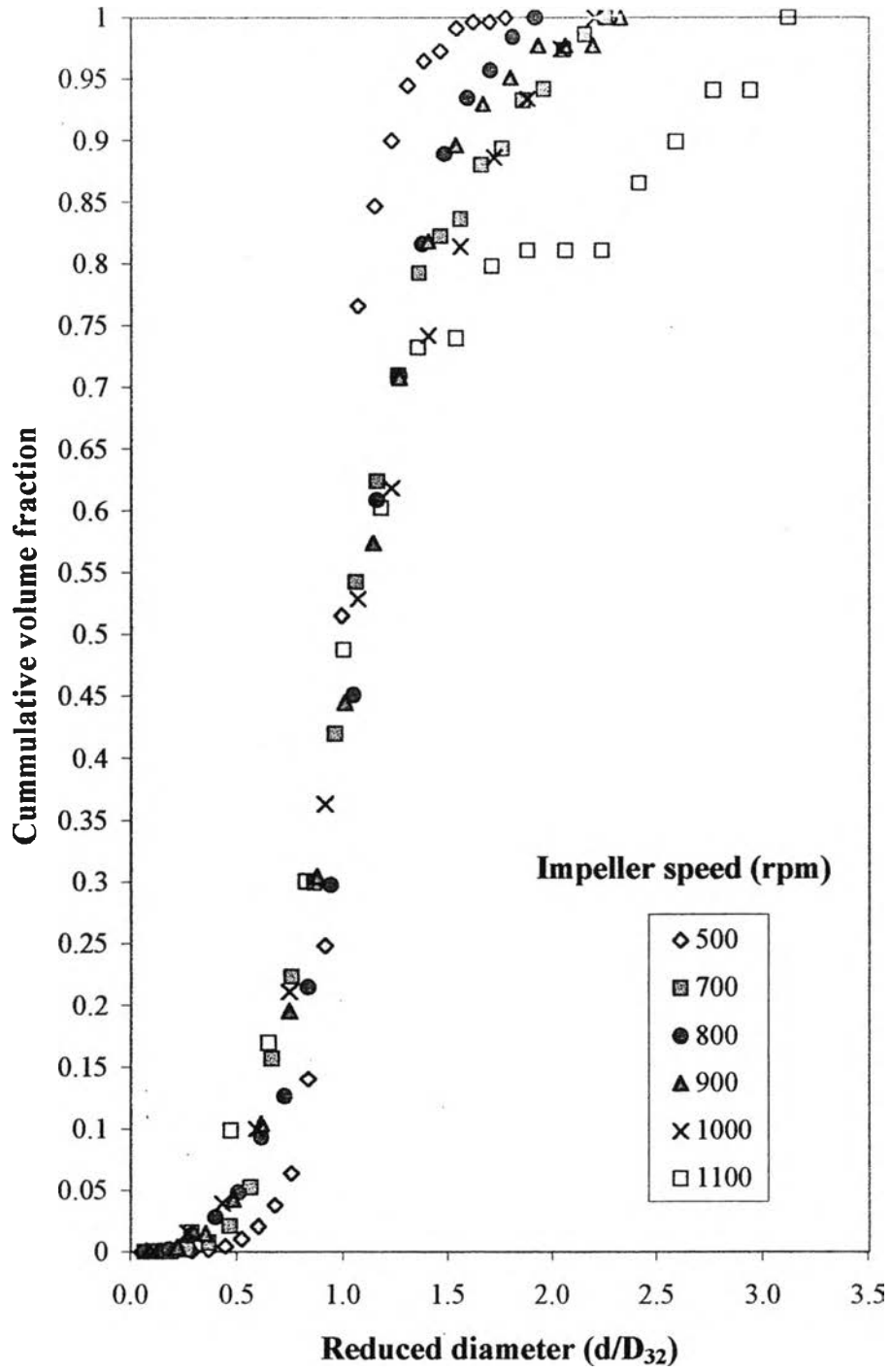
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรสะสมกับ reduced diameter ที่  $\phi = 0.1$



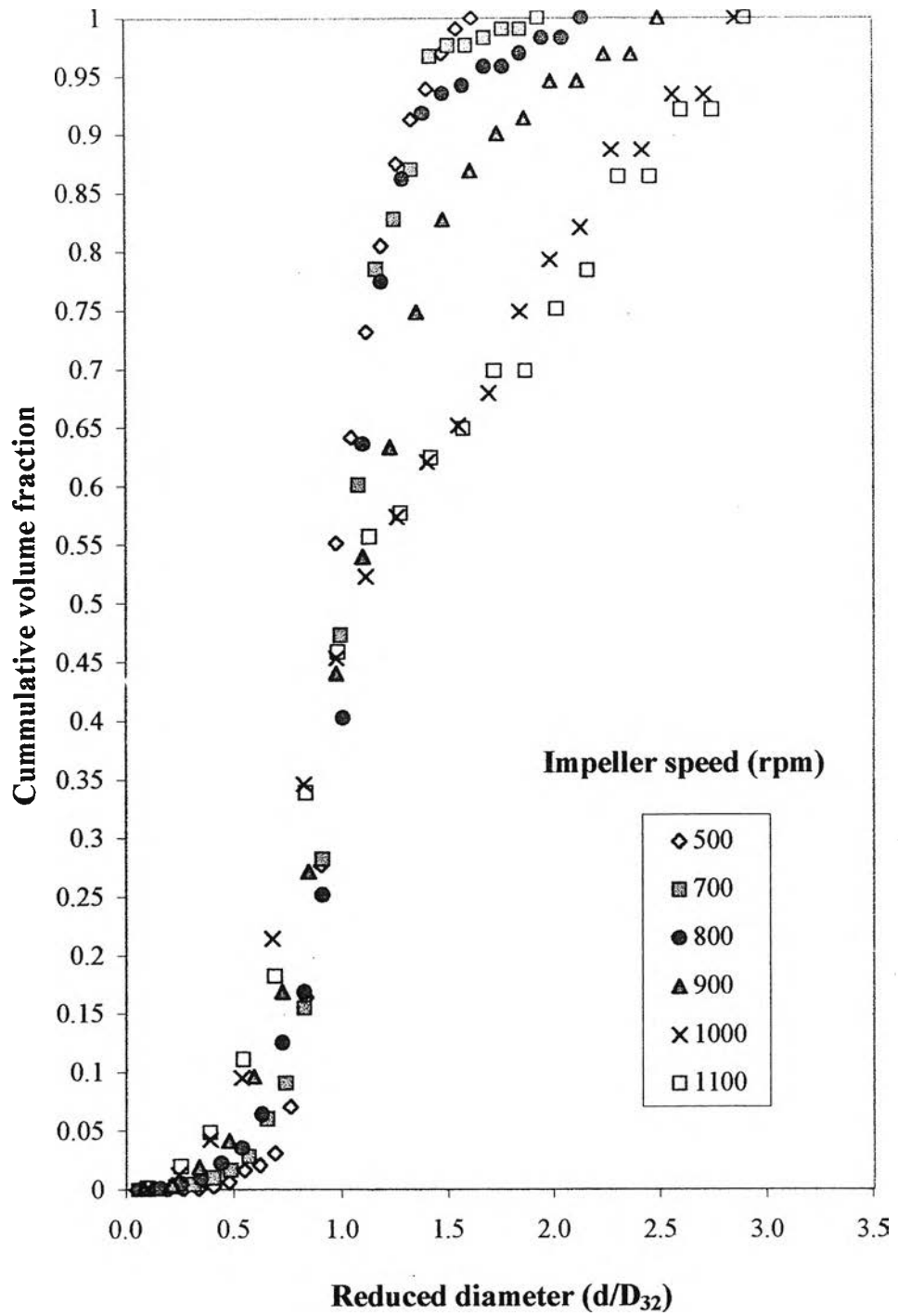
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรสะสมกับ reduced diameter ที่  $\phi = 0.15$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรสะสมกับ reduced diameter ที่  $\phi = 0.2$

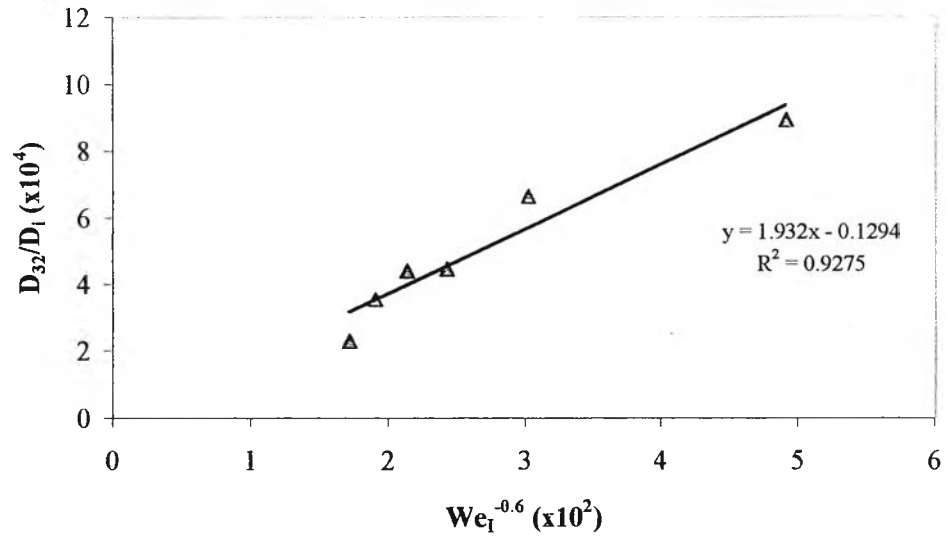


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรสะสมกับ reduced diameter ที่  $\phi = 0.3$

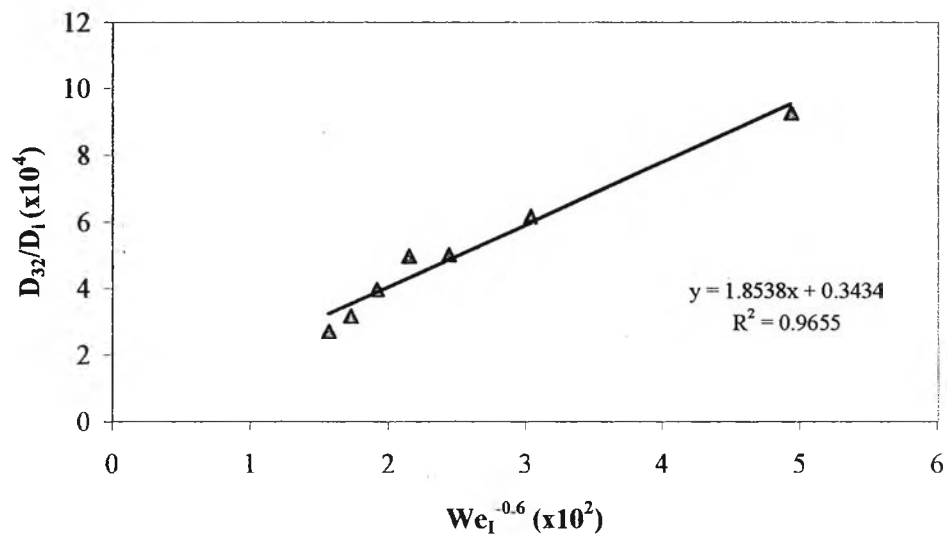


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรสะสมกับ reduced diameter ที่  $\phi = 0.5$

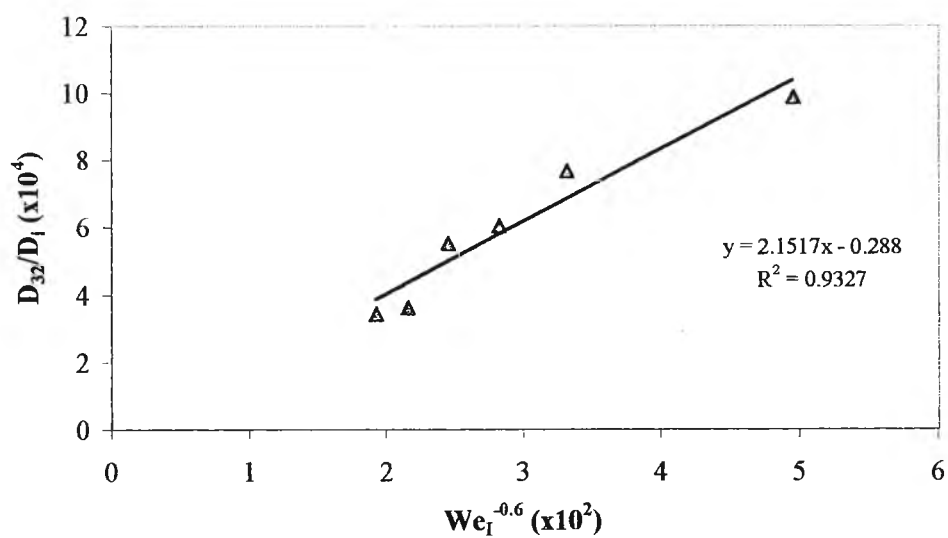




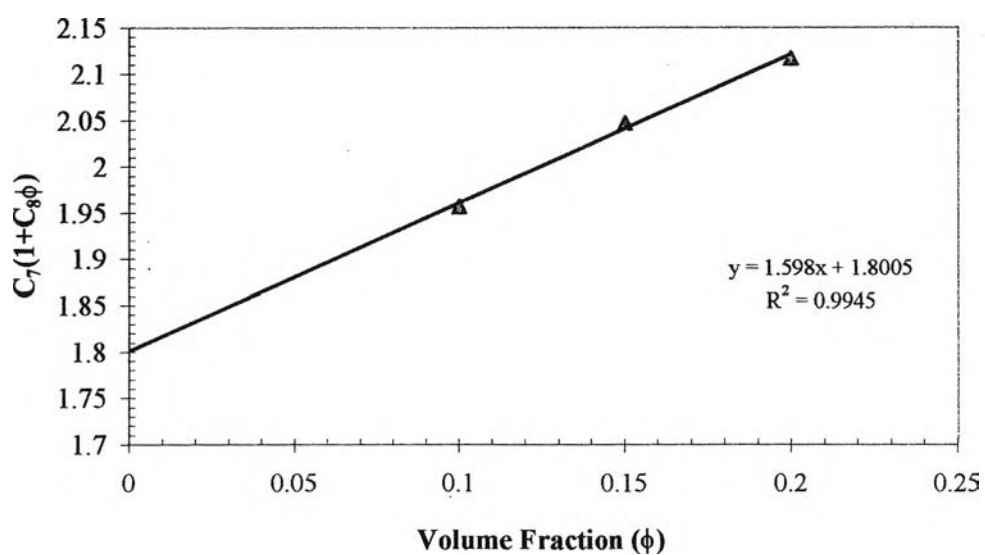
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{32}$  กับ  $We_1^{-0.6}$  ที่  $\phi=0.1$



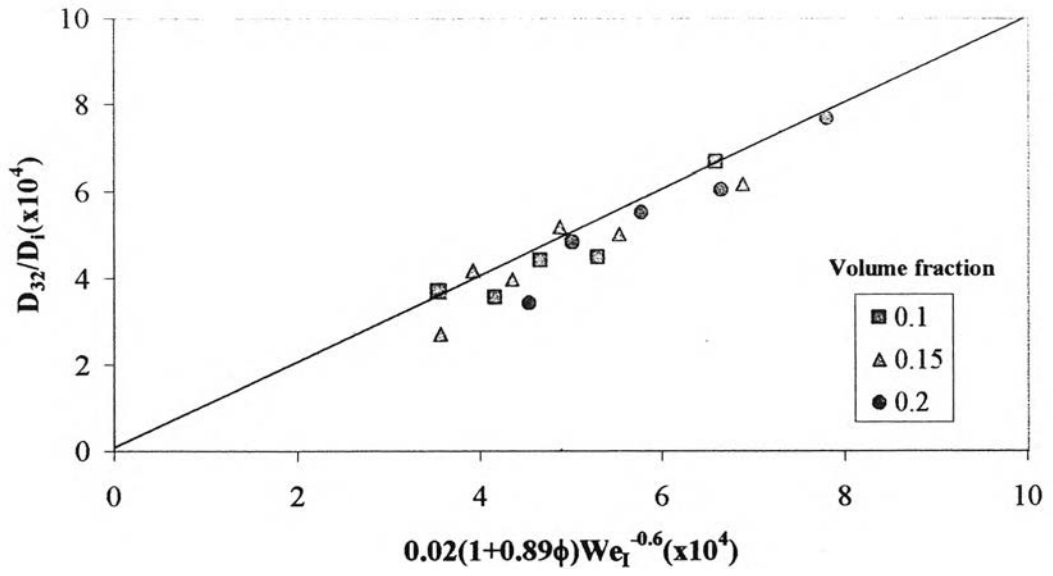
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{32}$  กับ  $We_1^{-0.6}$  ที่  $\phi=0.15$



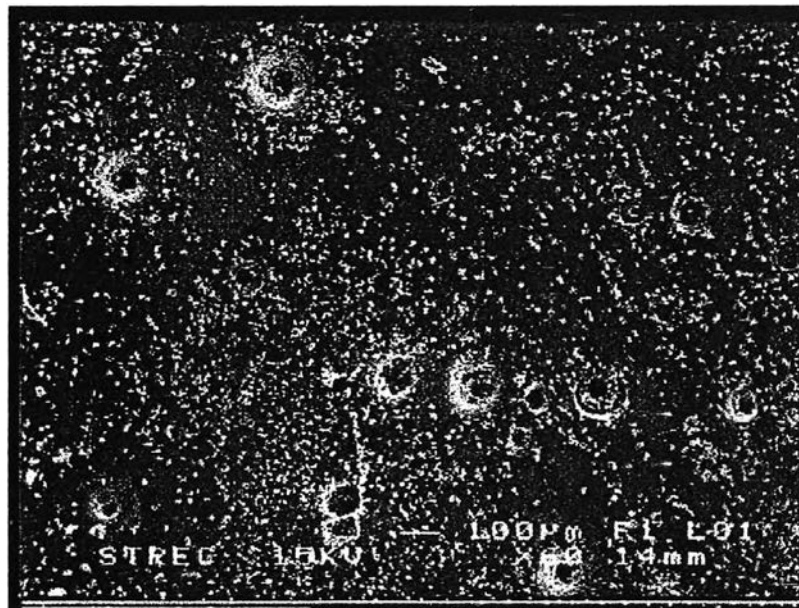
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $D_{32}$  กับ  $We_1^{-0.6}$  ที่  $\phi=0.2$



รูปที่ 4.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสัดส่วนเฟส



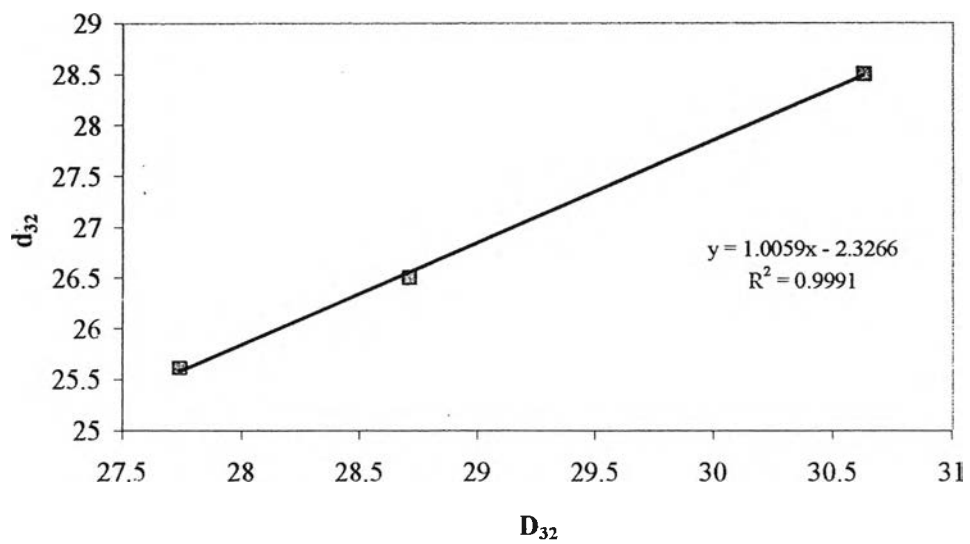
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของขนาดหยดกับค่าสัดส่วนเฟสและ weber number



รูปที่ 4.12 รูปทรงที่เกิดบนผิวแผ่นฟิล์มผสม o-xylene ความเร็วรอบใบกวน 500 รอบต่อนาที  $\phi=0.2$



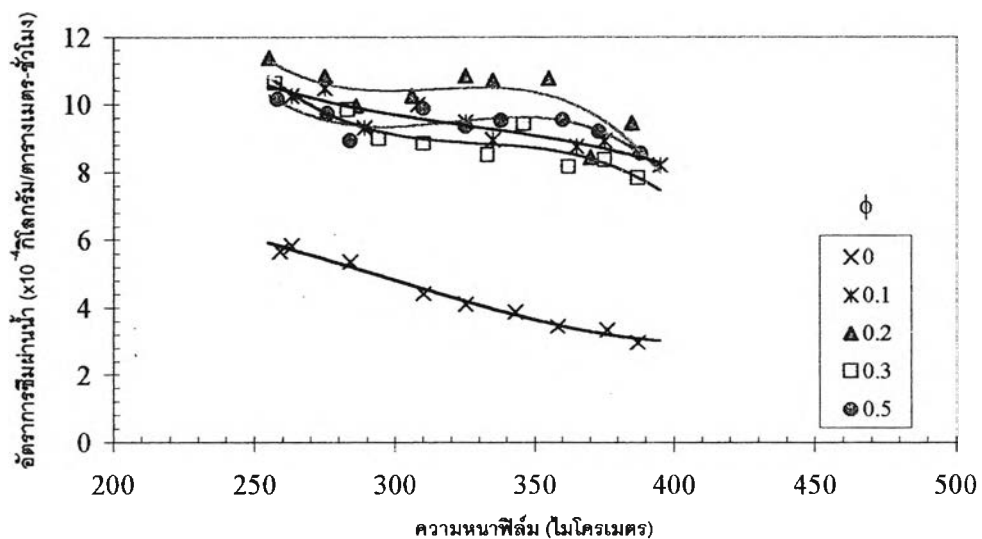
รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางผ่านฟิล์มยาง (กำลังขยาย 4000 เท่า)



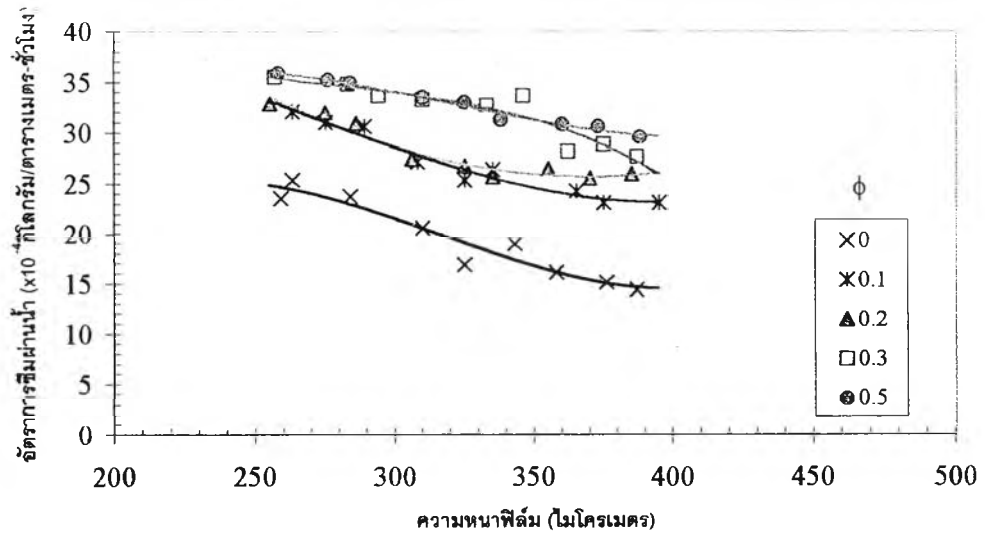
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนเฉลี่ยบนผิวฟิล์มกับ  $D_{32}$

#### 4.3 อิทธิพลของค่าสัดส่วนเฟส o-xylene ต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

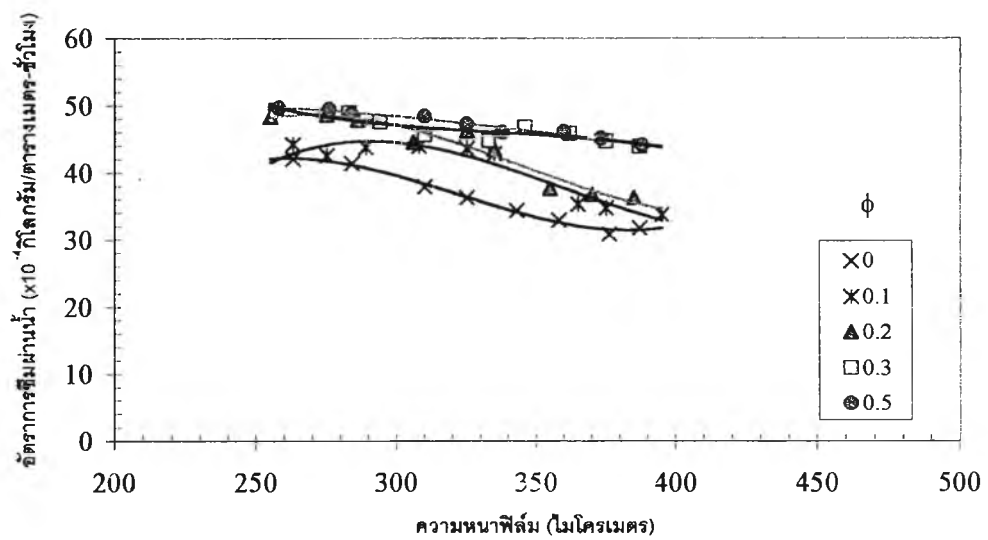
อัตราการซึมผ่านของน้ำที่สัดส่วนเฟสต่าง ๆ ความเร็วรอบใบกวนคงที่ 500 รอบต่อนาที แสดงไว้ใน รูปที่ 4.15 4.16 4.17 และ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำกับความหนาที่ค่าสัดส่วนเฟสต่าง ๆ ในภาวะอุณหภูมิคงที่ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากกราฟพบว่าอัตราการซึมผ่านของน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนเฟสสูงขึ้น แต่ผลที่ได้ไม่ชัดเจน การเพิ่มสัดส่วนเฟสเป็นการเพิ่มขนาดและจำนวนหยด o-xylene ในเนื้อยาง ในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส หยดของ o-xylene จะถูกไอน้ำในยางพาออกไป เกิดเป็นแผ่นฟิล์มยางที่มีลักษณะเป็นท่อขนาดเล็กคอดเคี้ยวต่อเนื่องกัน ขนาดและจำนวนท่อเพิ่มตามสัดส่วนเฟสที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราการซึมผ่านของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์มเห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่ไม่ผสม o-xylene กับแผ่นฟิล์มผสม o-xylene ในสัดส่วนเฟสต่าง ๆ



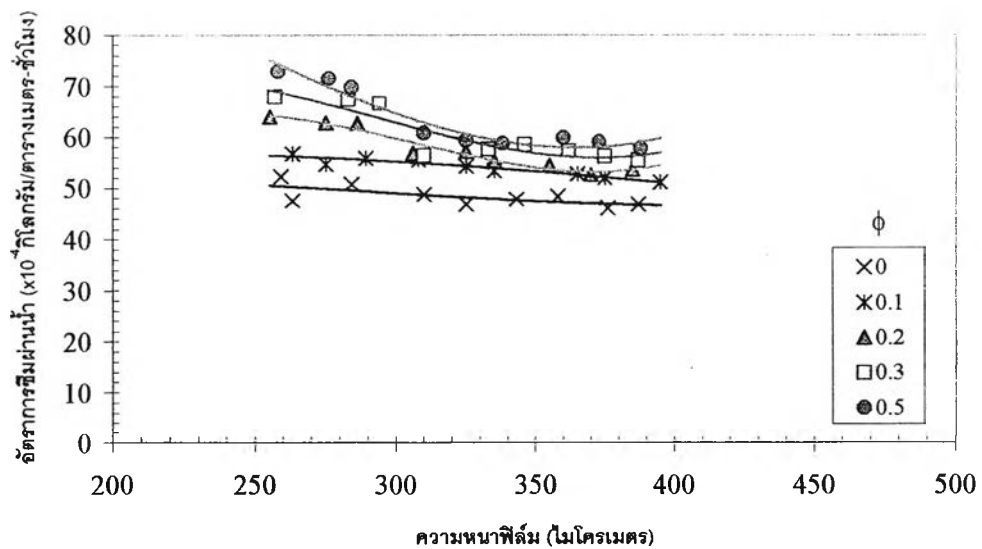
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของไอน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส สัดส่วนเฟส 0 0.1 0.2 0.3 และ 0.5



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สัดส่วนเฟส 0 0.1 0.2 0.3 และ 0.5



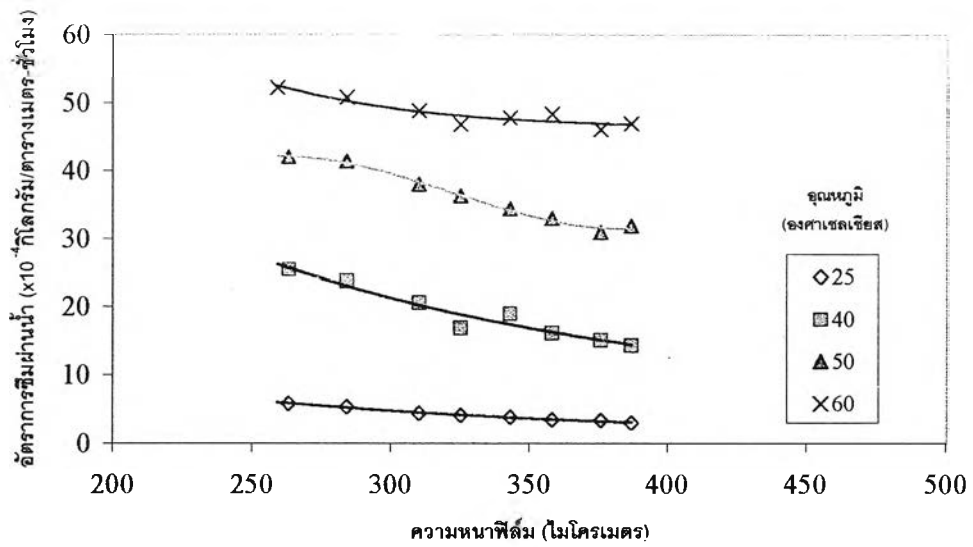
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สัดส่วนเฟส 0 0.1 0.2 0.3 และ 0.5



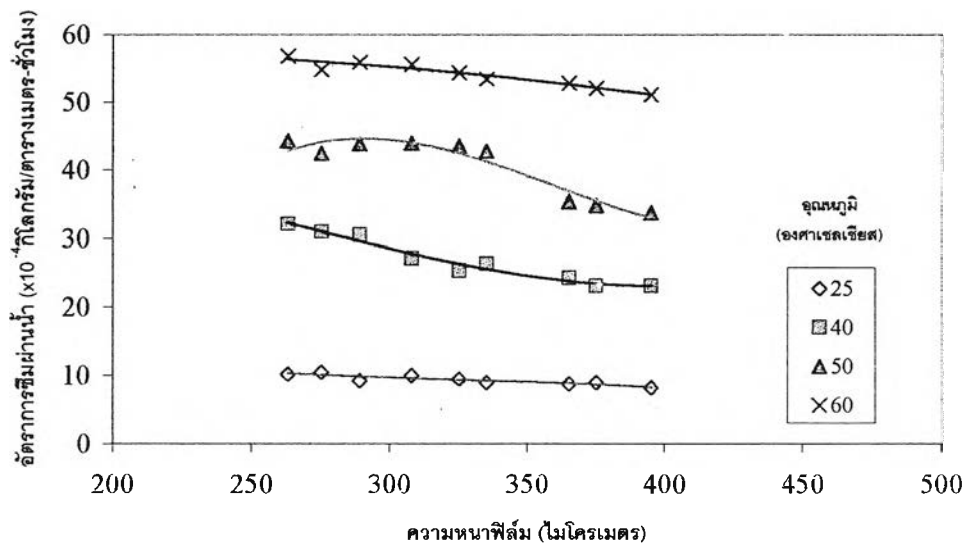
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส สัดส่วนเฟส 0 0.1 0.2 0.3 และ 0.5

#### 4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่ทำการศึกษา แผ่นฟิล์มยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วนำไปทดสอบหาอัตราการซึมผ่านของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ รูปที่ 4.19 4.20 4.21 4.22 และ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในภาวะสัดส่วนเฟสคงที่ 0.1 0.15 0.2 0.3 และ 0.5 ตามลำดับ ความเร็วรอบใบกวน 500 รอบต่ออนาที พบว่าอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำ ทำให้ค่าความแตกต่างของความเข้มข้นไอน้ำที่ผิวทั้งสองด้านของฟิล์มสูงขึ้น

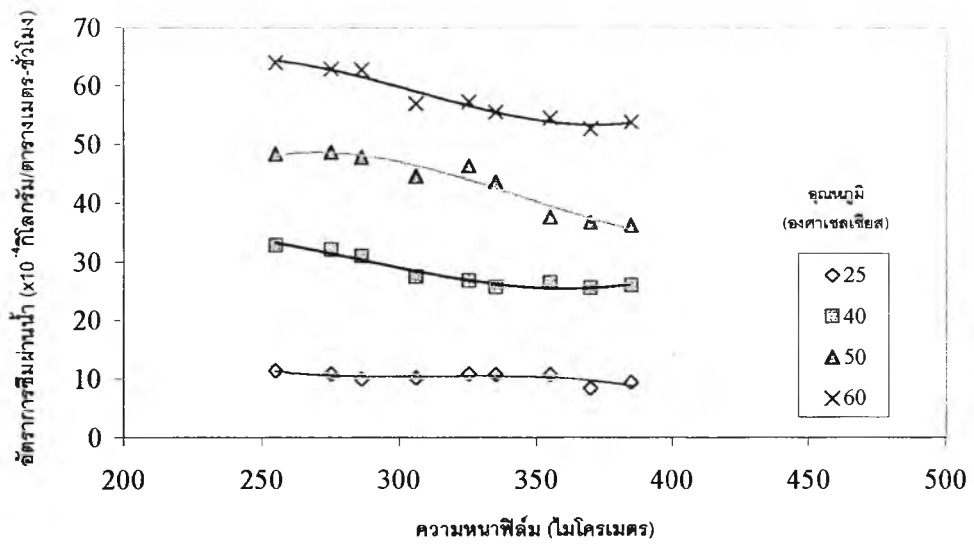


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่  $\phi=0$   
 อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

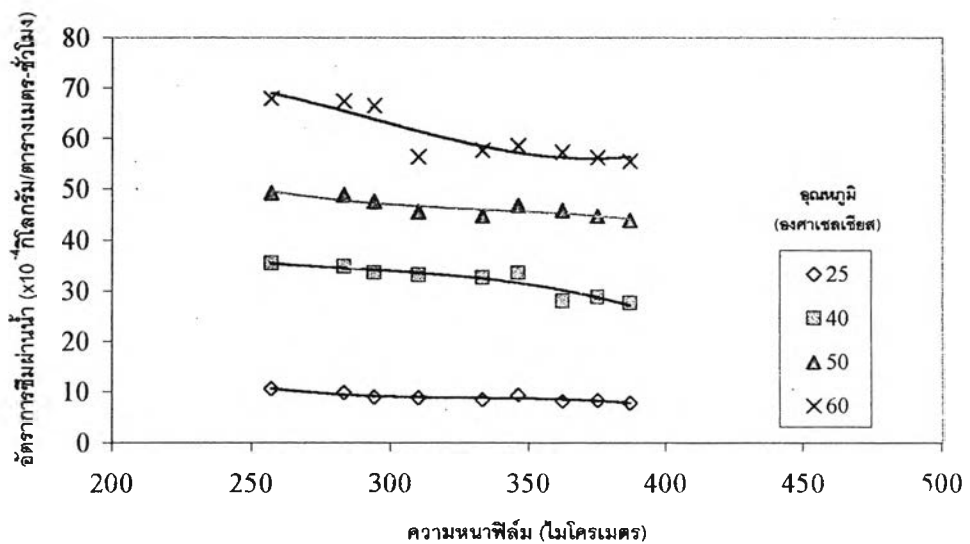


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่  $\phi=0.1$   
 อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

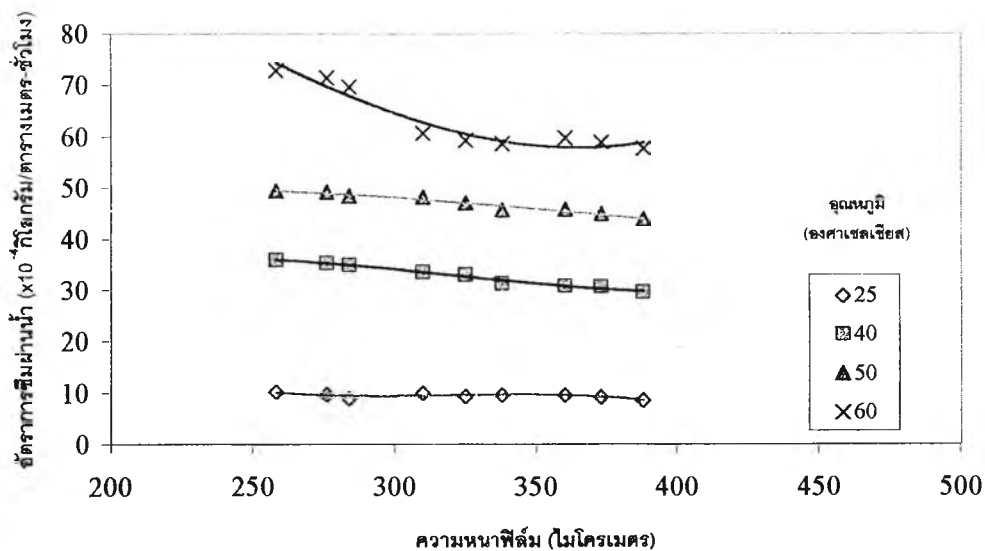




รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่  $\phi=0.2$  อนุภาค 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

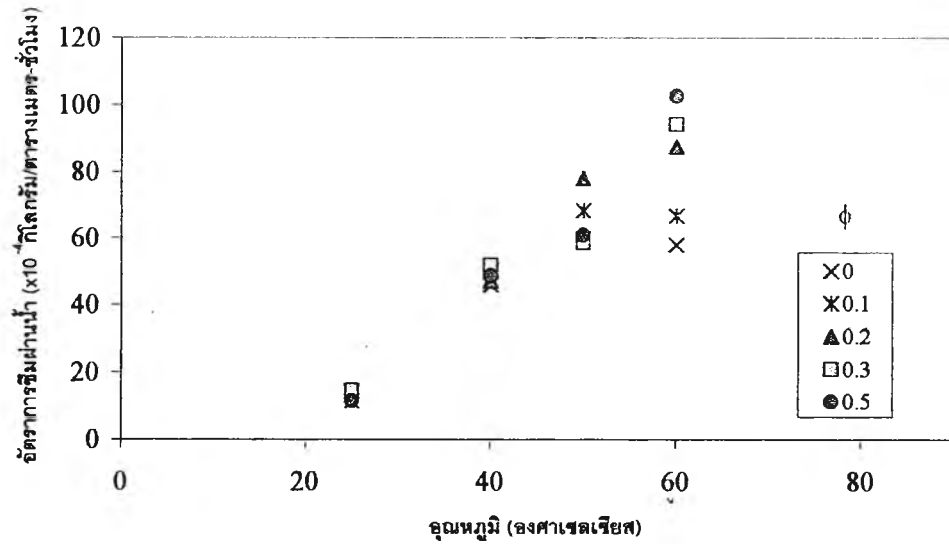


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่  $\phi=0.3$  อนุภาค 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม ที่  $\phi=0.5$  อุณหภูมิ 25 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส

จากการนำค่าจุดตัดแกน y ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำกับความหนาแผ่นฟิล์ม แสดงตัวอย่างในภาคผนวก ง.รูปที่ ง.1 ง.2 ง.3 ง.4 และ ง.5 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.24 ค่าจุดตัดแกน y คือ อัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผิวของฟิล์มยาง แนวโน้มของกราฟอภิปรายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส อัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่ผิวฟิล์มยางเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็นศูนย์ เนื่องจากยังมีโครงสร้างเป็นไอโซพรีนเมื่อนำยางไปไว้ในภาวะอุณหภูมิสูง โครงสร้างไอโซพรีนจะหดตัวทำให้ขนาดท่อรูในยางขยายกว้างขึ้น แต่ที่ภาวะอุณหภูมิต่ำยางจะเกิดการขยายตัวทำให้ขนาดท่อรูแคบลงจนโมเลกุลของน้ำไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ เกิดภาวะสมดุลของความเข้มข้นไอน้ำที่ผิวฟิล์มตลอดเวลา นอกจากนี้ที่ภาวะอุณหภูมิต่ำความเข้มข้นของไอน้ำต่ำด้วย ไอน้ำจึงไม่สามารถแพร่ผ่านฟิล์มยางที่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียสได้



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการซึมผ่านได้ของไอน้ำที่ผิวฟิล์มกับอุณหภูมิจากฟิล์ม ที่สัดส่วนเฟส 0 0.1 0.2 0.3 และ 0.5

#### 4.5 อิทธิพลของความหนาฟิล์มต่ออัตราการซึมผ่านของน้ำ

ความหนาของแผ่นฟิล์มเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่ง จากผลการทดลองพบว่าอัตราการซึมผ่านได้ของน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อแผ่นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความหนาเป็นการเพิ่มระยะทางในการแพร่ของไอน้ำผ่านแผ่นฟิล์ม