

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาการบด

จากการศึกษาการบดหินปูนทั้งแบบแห้ง และเปียก ที่ความเร็วรอบต่างๆ และที่ %Ball Filling ต่างๆ ได้ผลดังนี้

##### 4.1.1 ผลการศึกษาการบดแห้ง

การศึกษาที่ออกแบบการทดลองที่ค่า %Ball Filling 40 ถึง 60% และค่าความเร็วรอบ (Speed) 40 และ 62 rpm ได้ผลดังนี้

##### 4.1.1.1 ผลการบดแห้งที่ค่าความเร็วรอบ 40 rpm ที่ %Ball Filling ต่างๆ

การบดแห้งสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงได้อย่างค่อนข้างจำกัด เพราะเมื่อบดนานประมาณ 30 ชั่วโมง ก็ไม่สามารถบดให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงไปอีก(ดูรูปที่ 4.1-4.3) ซึ่งน่าจะเป็นเนื่องจากเกิดการจับตัวกันของอนุภาคเล็กกลายเป็นอนุภาคกลุ่มใหญ่ในระหว่างการบด(Agglomeration) โดยที่อนุภาคมีขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้นจึงมีโอกาสดจับกันก่อนเป็นอนุภาคที่โตขึ้นอีกได้จากแรงกลจากการบด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.1 ว่าการบดนาน 50 ชั่วโมงได้อนุภาคที่หยาบกว่าการบด 30 ชั่วโมง

อนึ่งค่า %Ball filling ที่ดีที่สุดคือ 40

**ผลการบดแห้งที่ 40 %Ball Filling ที่ค่าความเร็วรอบ 40 และ 62 rpm**

โดยทั่วไปค่าความเร็วที่เหมาะสมต่อการบดจะอยู่ในช่วง 60-70%ของCritical Speed (Reed, 1995) และ Critical Speed สำหรับเครื่องจักรที่ใช้บดมีค่าประมาณ 111 rpm

แต่การศึกษานี้มีข้อจำกัดของเครื่องมือที่มีที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ โดยสามารถปรับได้เพียง 2 ค่าความเร็วรอบเท่านั้นคือ 40 และ 62 rpm หรือเทียบเท่า 36 และ 55%ของCritical Speed

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 จะเห็นว่า ความเร็วรอบสูงขึ้นสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดลดลงเร็วขึ้นทั้งนี้ น่าจะเนื่องจากได้รับพลังงานมากขึ้น ซึ่งทำให้มีแรง Chippingมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็จะทำให้เกิดการจับตัวกันของอนุภาค (Agglomeration) เร็วขึ้นด้วย

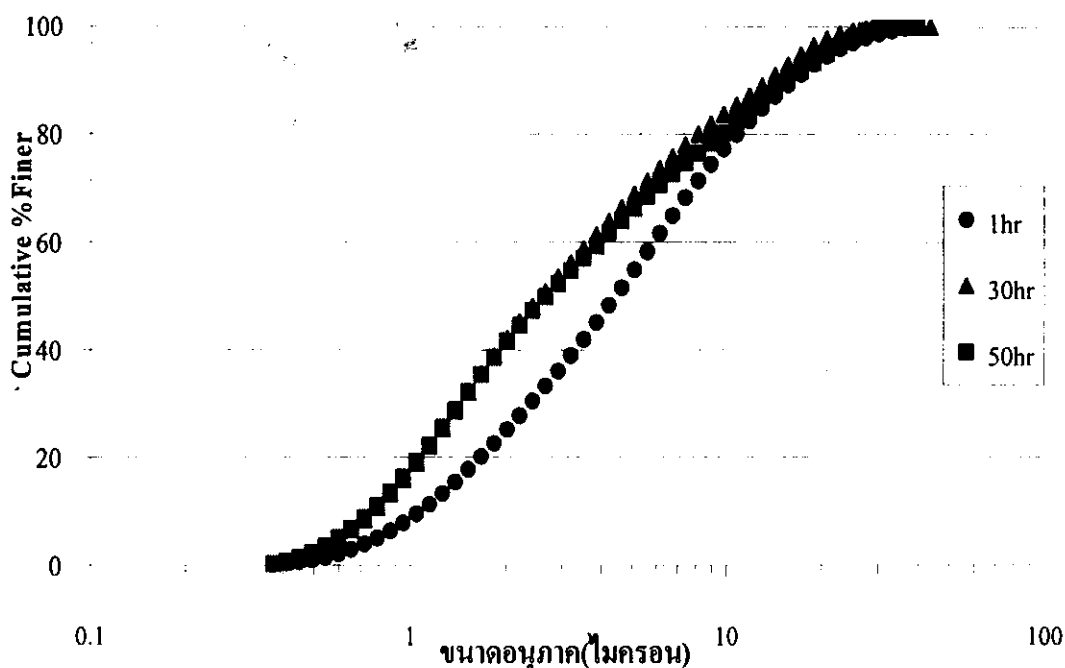
สำหรับการบดหินปูนเมื่อความเร็วในการบดเพิ่มมากขึ้น (มีค่าน้อยกว่า 60-70%Critical speed) จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบด

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบดแห้งที่รูปแบบการบดต่างๆ

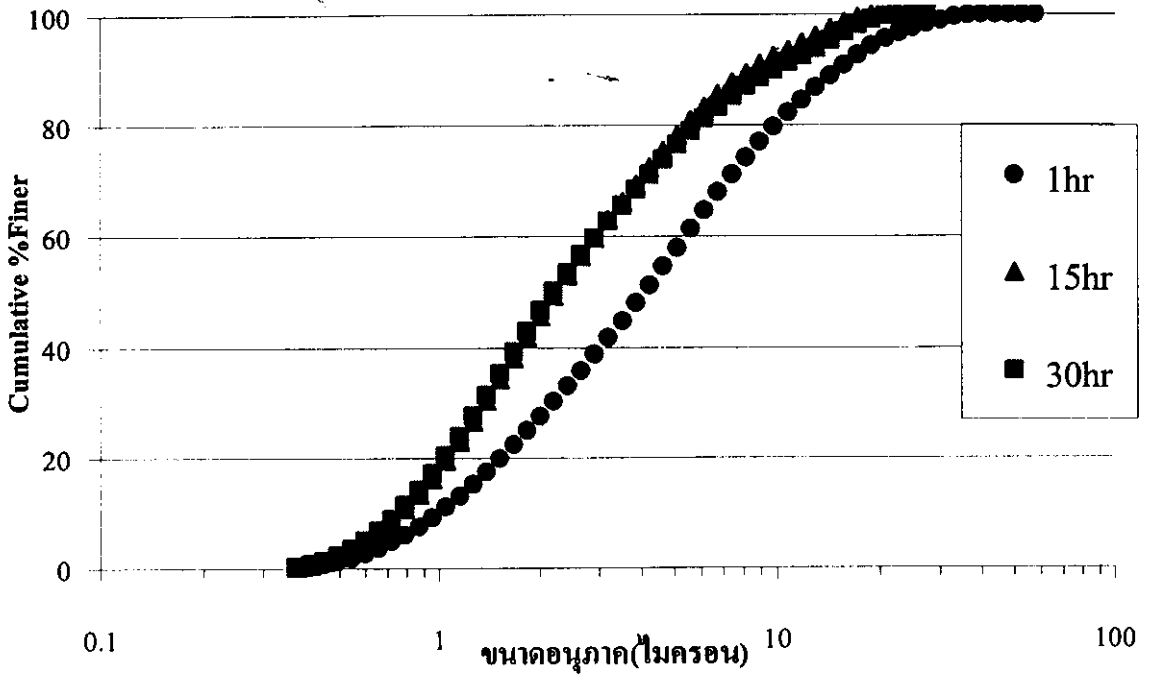
No.	Condition		Grinding 1 hr.		
	%Ball Filling	Speed (rpm)	%Passing		
			1 microns	3 microns	10 microns
1	40%Ball Filling	40	10	40	80
2	50%Ball Filling		11	40	80
3	60%Ball Filling		7	33	72
4	40%Ball Filling	62	20	48	84

จากการอ่านค่า %Passing (ตามตาราง 4.1) ที่ขนาด 1, 3 และ 10 ไมครอนจะเห็นว่า การบดที่ 40 rpm และ 40%Ball Filling จะได้ปริมาณที่ผ่านขนาดต่างๆมากกว่าการบดที่ 50 และ 60%Ball Filling ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อเพิ่มความเร็วรอบจาก 40 เป็น 62 rpm จะสามารถผลิตผงที่มีขนาดเล็กได้มากขึ้นด้วย

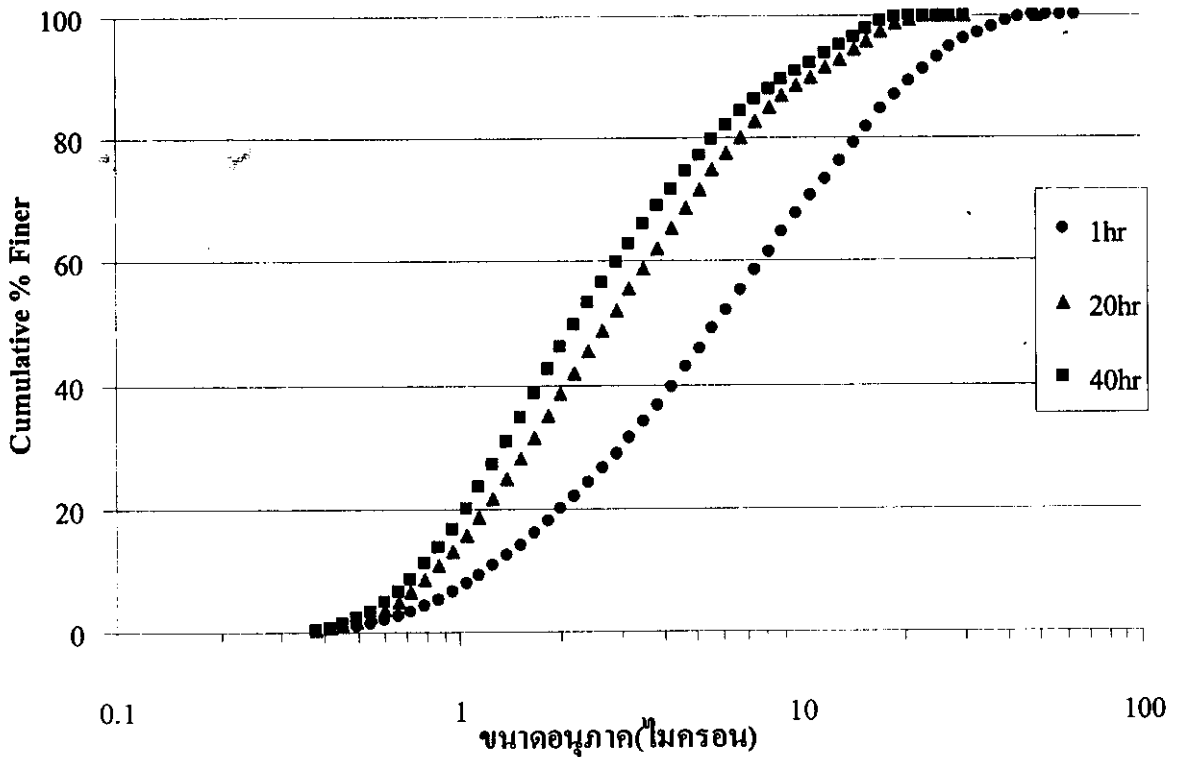
สำหรับการบดหินปูนแบบบดแห้งสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงได้อย่างจำกัด เพราะเมื่อบดนานประมาณ 30 ชั่วโมง ก็ไม่สามารถบดให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงไปอีกเนื่องจากเกิดการจับตัวกันของอนุภาคเล็กกลายเป็นอนุภาคกลุ่มใหญ่ (Agglomeration) จึงต้องปรับปรุงแนวการศึกษาเป็นการบดเปียกแทน



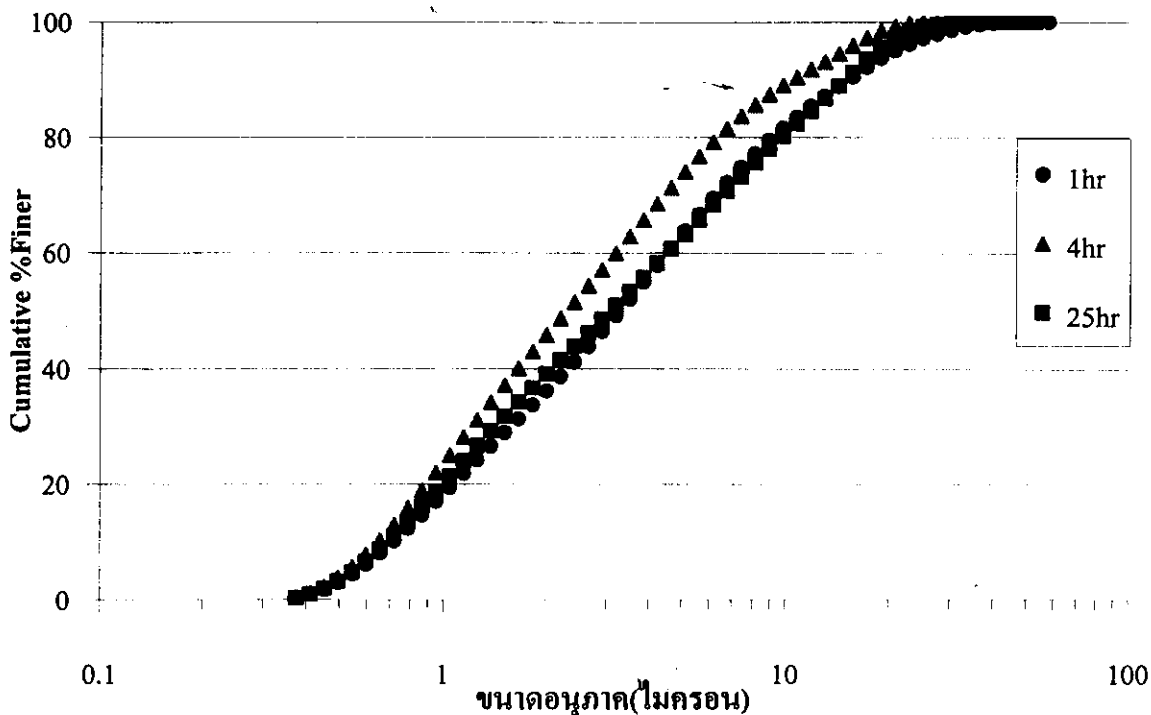
รูปที่ 4.1 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดแห้งที่ 40 %Ball Filling และความเร็วรอบ 40 rpm



รูปที่ 4.2 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดแห้งที่ 50 % ball filling และความเร็วรอบ 40 rpm



รูปที่ 4.3 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดแห้งที่ 60 % ball filling และความเร็วรอบ 40 rpm



รูปที่ 4.4 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดแห้งที่ 40 % ball filling และความเร็วรอบ 62 rpm

#### 4.1.2 ผลการศึกษาการบดเปียก

การศึกษการบดเปียกนั้นจะทำการทดลองที่ค่า %Solid ที่ 60 และ 65%Solid และใช้ชนิดของสารช่วยกระจายตัว 2 ชนิด คือ Sodium Silicate และ Stearic acid เพื่อลดการจับก้อนของอนุภาคที่ถูกลบให้เล็กลงไปได้แล้ว

จากการศึกษาพบว่า การบดเปียกสามารถทำให้ขนาดอนุภาคลดลงละเอียดกว่า 1 ไมครอนได้มากกว่าการบดแห้ง ซึ่งแสดงว่าการบดแบบเปียกมีประสิทธิภาพและการกระจายตัวดีกว่าการบดแบบแห้ง และมีช่วงการกระจายตัวที่ค่อนข้างแคบ (ดูรูปที่ 4.7 เทียบกับรูปที่ 4.1-4.4 ที่ผ่านมา)

##### 4.1.2.1 ผลการบดเปียกที่ 40%Ball Filling ความเร็ว 62 rpm ที่ค่า%Solid ต่างๆ

จากการศึกษา (ดูรูปที่ 4.7 และ 4.8) พบว่าที่ค่า%Solid สูงขึ้นจะได้ขนาดอนุภาคที่หยาบกว่าเมื่อบดที่ค่า %Solid ที่ต่ำกว่า โดยจากการสังเกตระหว่างการทดลอง การบดที่ %Solid สูงจะพบว่าเมื่อบดอนุภาคเล็กลงระดับหนึ่ง ความหนืดของผงหินปูนจะสูงขึ้น ซึ่งน่าจะเป็นเพราะน้ำแห้งไป โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงจะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ละมีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องหลีกเลี่ยงการบดที่%Solid สูงๆ

##### 4.1.2.2 ผลการบดเปียกที่ 40%Ball Filling ความเร็ว 62 rpm 60%Solid ที่อาศัยสารช่วยกระจายตัวต่างกัน

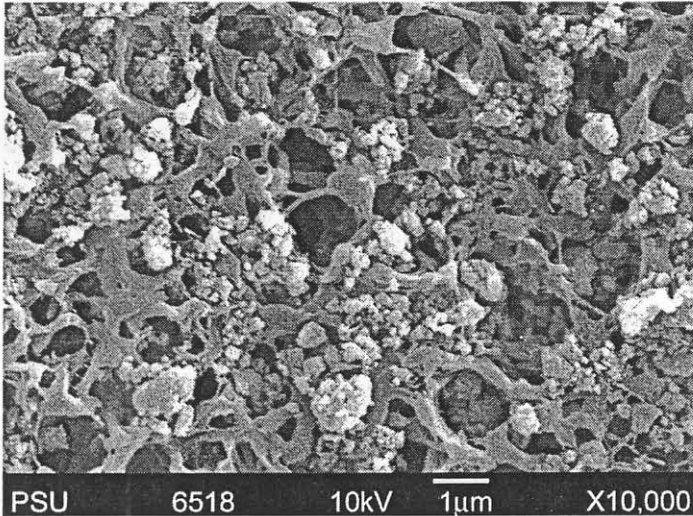
การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้ Sodium Silicate และ Stearic Acid เป็นสารช่วยกระจายตัว และจากผลการศึกษาค้นคว้าพบว่า สารช่วยกระจายทั้งสองไม่ได้เพิ่มความสามารถในการลดขนาดของอนุภาค แต่การใช้โซเดียมซิลิเกตทำให้ความสามารถในการลดขนาดเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเวลาแรกเท่านั้น (ดูตารางที่ 4.2) และเมื่อบดนานประมาณ 50 ชั่วโมงพบว่าค่า %Passing ค่อนข้างใกล้เคียงกับการบดแยกแบบธรรมดา (ดูรูปที่ 4.9 และ 4.10)

การอาศัยสารปรับสภาพผิวสามารถทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลงได้ดีขึ้น เฉพาะในช่วงแรกของการบดเท่านั้น แต่เมื่อบดนานขึ้นพบว่าไม่ช่วยให้ดีขึ้นจากการบดแบบไม่ใส่สารปรับสภาพผิว

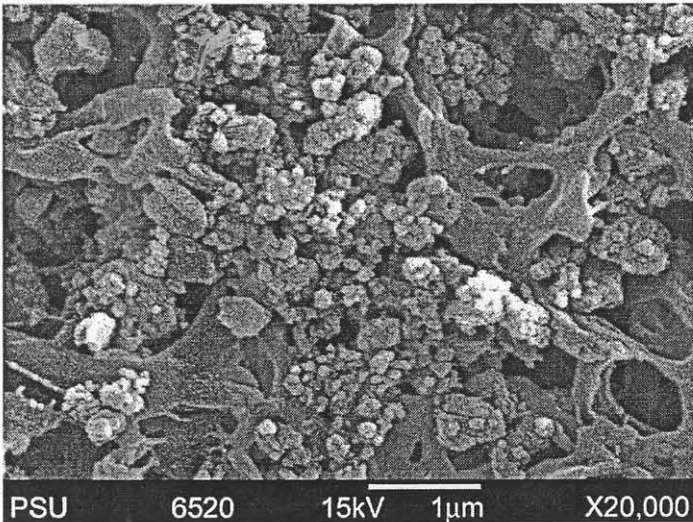
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบดแยกที่รูปแบบการบดต่างๆ

No.	Condition				Grinding 1 hr.		
	%Ball Filling	Speed (rpm)	%Solid	Dispersing Agent	%Passing		
					1 micron	3 micron	10 micron
1	40%Ball Filling	62	60%Solid	Non	20	56	92
2			65%Solid		14	50	90
3			60%Solid	Sodium Silicate	40	88	100
4				Stearic Acid	20	56	82

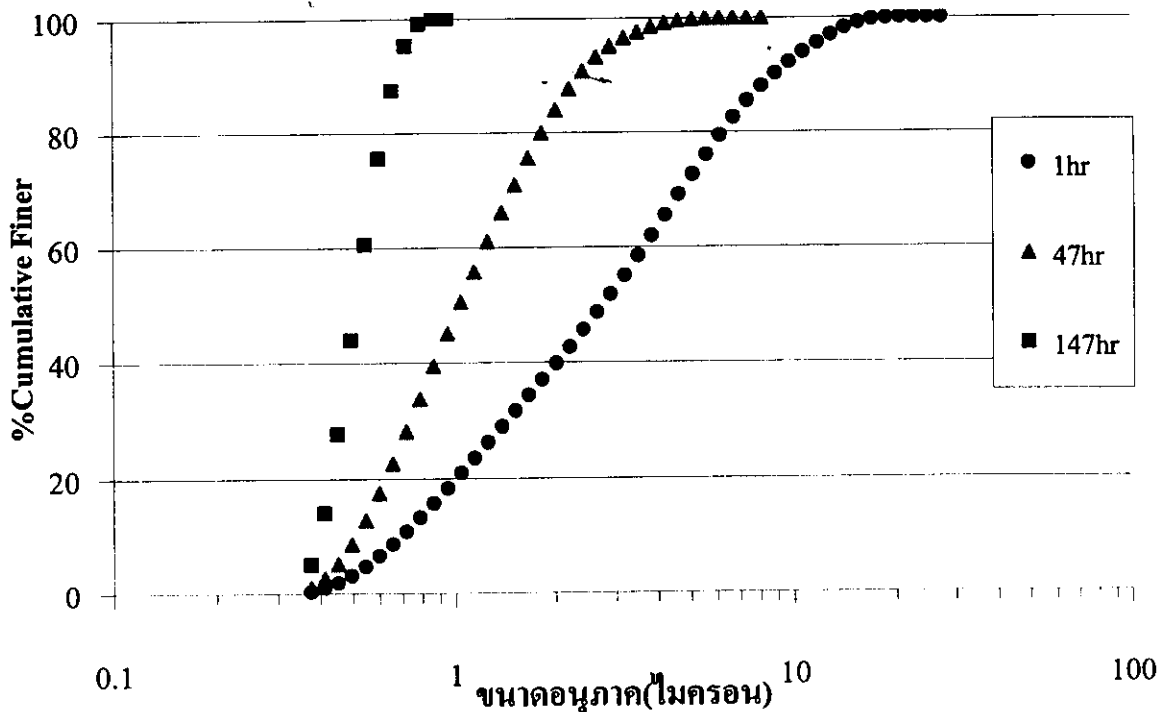
จากภาพถ่ายผงอนุภาคภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และมีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมี พลังงานบริเวณผิว (Surface Energy) สูง เมื่อแห้งอนุภาคก็จับรวมตัวเป็นกลุ่ม ส่วนที่มีรูปร่างคล้ายฟองน้ำ คือ แผ่นกรอง Micro Porous



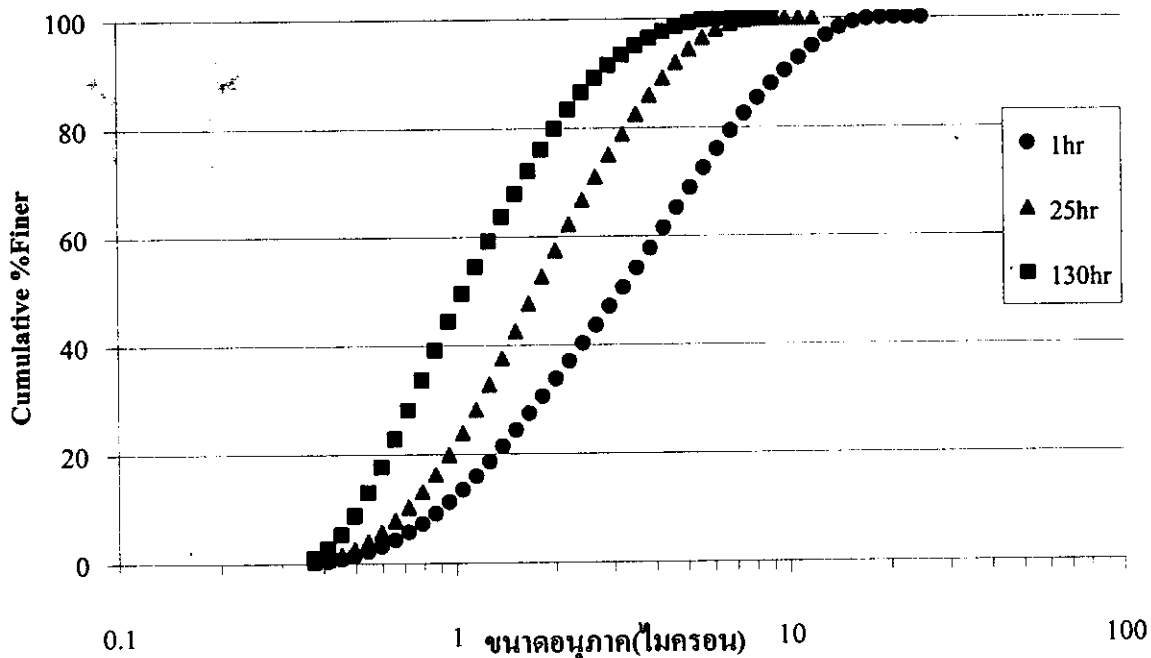
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของอนุภาคผงหินปูนชนิดที่ 147 ชั่วโมง ความเร็ว 62 rpm 60%solid (กำลังขยาย 10,000 เท่า) โดยกระจายอนุภาคบนแผ่นกรอง Micro Porous ที่มองเห็นเป็น โครงตาข่าย



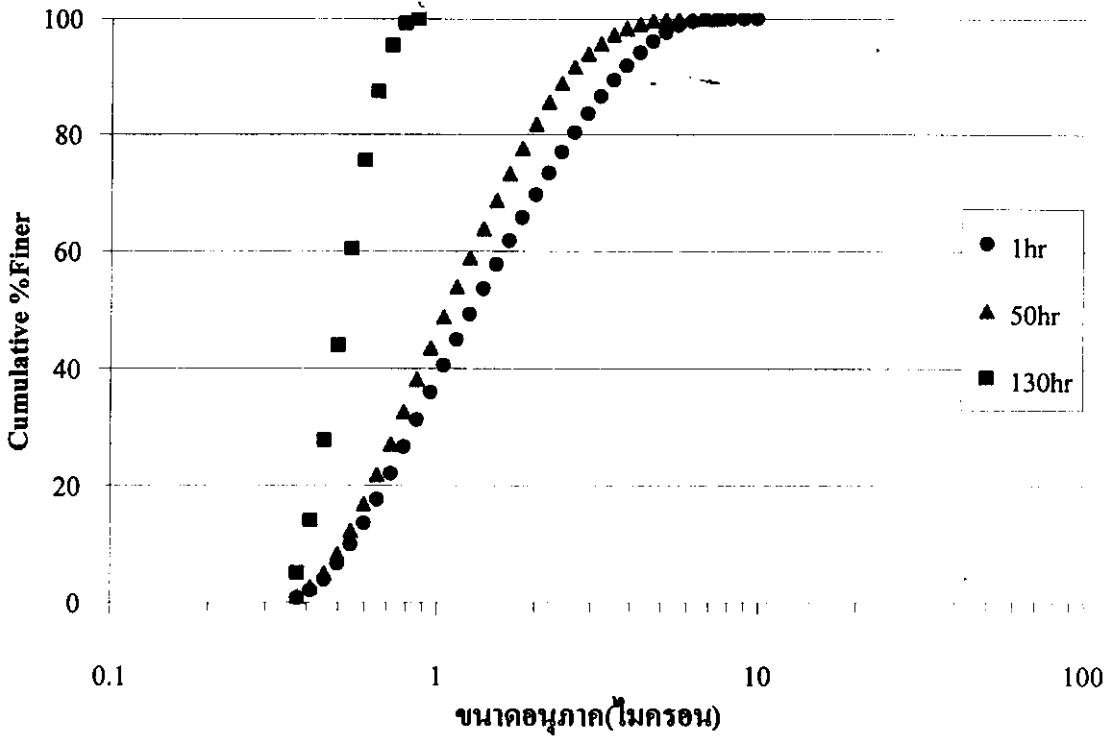
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของอนุภาคผงหินปูนชนิดที่ 147 ชั่วโมง ความเร็ว 62 rpm 60%solid (กำลังขยาย 20,000 เท่า) โดยกระจายอนุภาคบนแผ่นกรอง Micro Porous ที่มองเห็นเป็น โครงตาข่าย



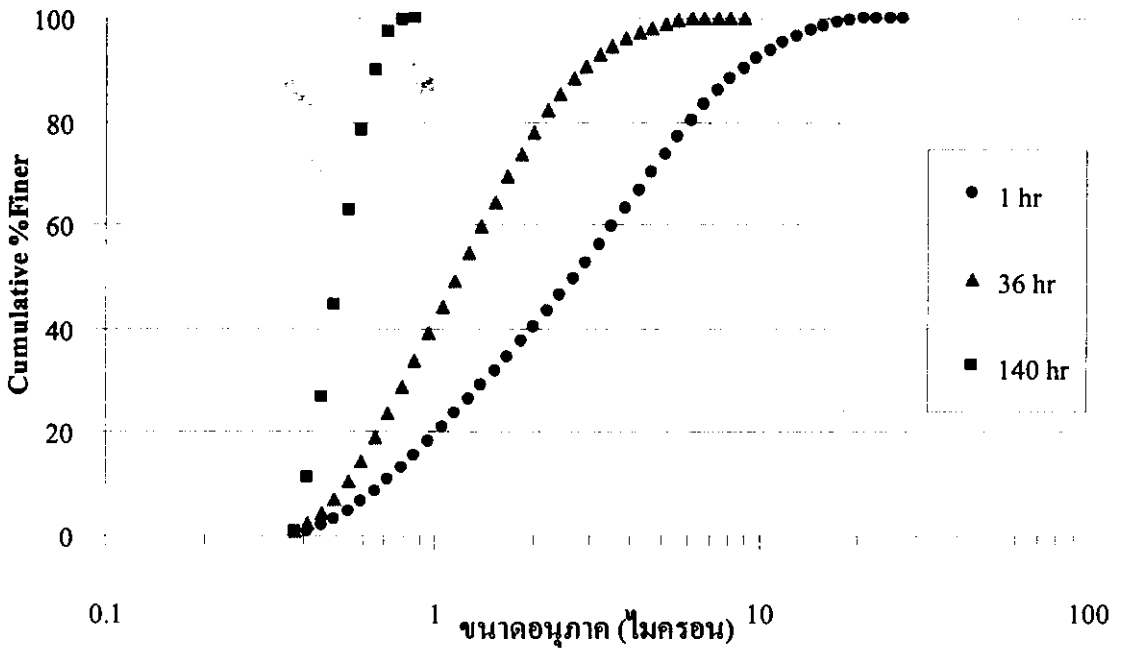
รูปที่ 4.7 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดเปียกที่ 40%Ball Filling  
ความเร็วรอบ 62 rpm และ 60 % Solid



รูปที่ 4.8 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดเปียกที่ 40%Ball Filling  
ความเร็วรอบ 62 rpm และ 65 % Solid



รูปที่ 4.9 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดเปียกที่40%Ball Filling ความเร็วรอบ 62 rpm 60 % Solid และใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารช่วยกระจายตัว



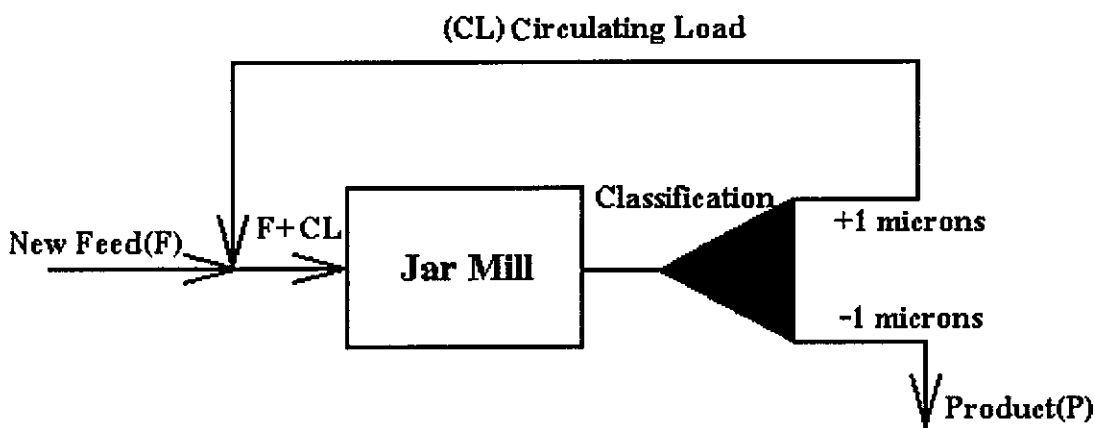
รูปที่ 4.10 การกระจายของอนุภาคที่ได้จากการบดเปียกที่40%Ball Filling ความเร็วรอบ 62 rpm 60 % Solid และใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว



#### 4.2 การศึกษาการบดแบบวงจรปิด(Close Circuit) กับการคัดขนาด

จากการบดเปียกแบบเปิด(Open Circuit) ที่ผ่านมาต้องใช้เวลาในการบดนานมากจึงจะได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนทั้งหมด เช่น ใช้เวลา 130-147 ชั่วโมง เป็นต้น ดังนั้นถ้าจะให้ใช้เวลาบดเร็วขึ้นจึงน่าจะบดแบบวงจรปิด (Close Circuit) โดยใช้เวลาบดน้อยลงแล้วนำผงหินปูนที่บดได้ไปคัดแยกเอาส่วนที่ละเอียดกว่า 1 ไมครอน ออกไปแล้วนำส่วนที่โตกว่า 1 ไมครอนย้อนกลับไปบดใหม่ดังในรูปที่

4.11



รูปที่ 4.11 แผนผังกระบวนการบดวงจรปิด

Classification	คือ การคัดแยกขนาดโดยวิธี Beaker Decantation
New Feed (F)	คือ การเติมผงหินปูนใหม่
Circulating Load (CL)	คือ ผงหินปูนที่มีขนาดโตกว่า 1 ไมครอน ต้องเข้าสู่กระบวนการบดอีกรอบ
Product (P)	คือ ผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน

อนึ่งเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดลองซึ่งใช้เครื่องบดจาร์มิล(Jar Mill) ไม่สามารถทำระบบวงจรปิดได้ นอกจากนี้ยังไม่มีอุปกรณ์สำหรับคัดขนาด ซึ่งจะต้องใช้ไฮโดรไซโคลขนาดพิเศษที่จะสามารถคัดแยกขนาดโดยคัดขนาดละเอียดถึง 1 ไมครอนได้ดังนั้นจึงต้องประยุกต์วิธีการทดลองโดยใช้การคัดขนาดโดยวิธี Beaker Decantation แทนซึ่งวิธีนี้เป็นการคัดแยกขนาดโดยอาศัยหลักการของการจมตัวของของแข็งในของไหลตามสมการ Stoke's Equation (ดูรายละเอียดของหลักการในภาคผนวก) ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในการบดแต่ละครั้งใช้เวลา 20 ชั่วโมงซึ่งใช้ข้อมูลการบดแบบเปิดที่ 20 ชั่วโมงดังตารางที่ 4.3

$$t = \frac{18H\eta}{a^2(\rho - \rho_0)g}$$

- แทนค่า  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคหินปูน  $2.62 (g/cm^3)$   
 $\rho_0$  คือ ความหนาแน่นของของน้ำ  $1.00 (g/cm^3)$   
 $a$  คือ ขนาดอนุภาค 1 ไมครอน  $= 0.0001 (cm)$   
 $\eta$  คือ ความหนืดของของเหลวที่เป็นตัวกลาง  $0.0098 \text{ Poise}$   
 $g$  คือ  $981 (cm/s^2)$   
 $t$  คือ เวลาการตกตะกอน หน่วยเป็น วินาที  
 $H$  คือ ค่าความสูงที่อนุภาคตกจมมา  $(cm)$

$$t = 1.2 \times 10^4 H$$

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่การบด 20 ชั่วโมง

No.	Condition				Grinding 20 hr.		
	%Ball Filling	Speed (rpm)	%Solid	Dispersing Agent	%Passing		
					1 micron	3 micron	10 micron
I	40	62	60	Non	37.5	85.87	100

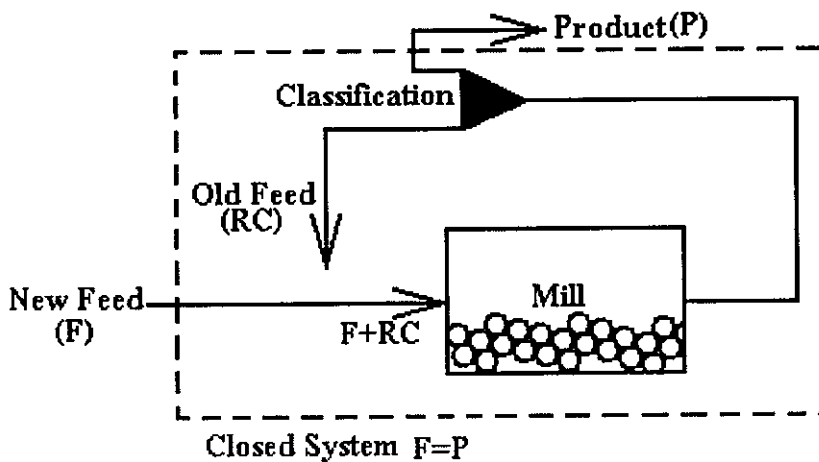
ในการทดลองบดแบบวงจรมีคั้นได้จากกระบวนการบดหินปูน 20 ชั่วโมง แล้วนำมาคัดส่วนที่ละเอียดกว่า 1 ไมครอน ออกแล้วนำส่วนที่หยาบกว่า 1 ไมครอนกลับไปบดต่อโดยเพิ่มหินปูนป้อนชุดใหม่ น้ำหนักเท่ากับส่วนที่ละเอียดกว่า 1 ไมครอนที่คัดแยกออกไปเพื่อให้ปริมาณหินในหม้อบดเท่าเดิม

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการคัดขนาดโดยวิธี Beaker Decantation

Stage	Grinding (Hrs.)	Condition				Result from Beaker Decantation (g)			
		%Ball Filling	Speed (rpm)	%Solid	Dispersing Agent	P	F	Loss	RC
	0	40	62	60	Non	0	385	0	0
1	20					35	70	35	315
2	40					48	83	35	302
3	60					54	87	33	298
4	80					58	86	28	299
5	100					60	92	32	293
6	120					60	93	33	292

การบดและการคัดขนาดจะดำเนินไปหลายครั้งจนกว่าเข้าสู่สภาวะคงที่(Steady State) ซึ่งตรวจสอบโดยเช็คสภาวะที่ปริมาณของผงหินปูนที่ขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอน มีค่าเท่ากับปริมาณหินปูนที่เติมเข้าไปใหม่ New Feed (F) ซึ่งจะเท่ากับกำลังการผลิตของระบบต่อเวลาการบด 20 ชั่วโมง ผลการบดคัดขนาดปรากฏในตารางที่ 4.4

ระหว่างการทดสอบจะมีผงบางส่วนที่หายไป(Loss) ซึ่งจะหายไประหว่างการนำผงออกจากหม้อบด และการติดภาชนะระหว่างการอบแห้ง การศึกษาในครั้งนี้จึงสังเกตค่า New Feed (F) และค่า Product (P) เมื่อค่าทั้งสองเริ่มคงที่ให้ถือว่า ระบบการบดจะเข้าสู่สภาวะที่คงที่ (Steady State)

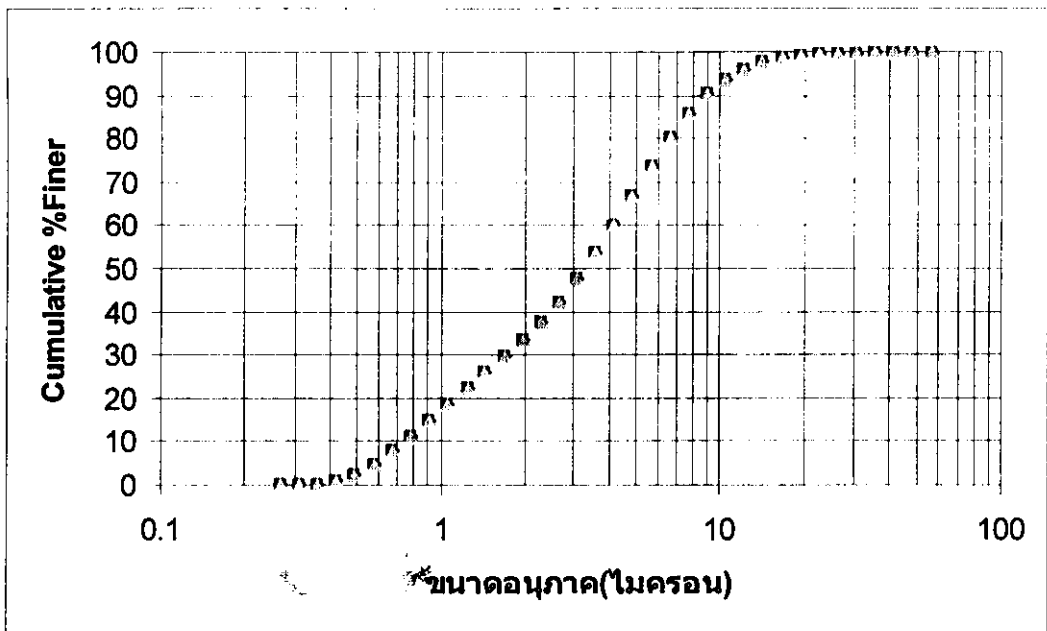


รูปที่ 4.12 แผนผังกระบวนการบดวงจรมอดที่ออกแบบสำหรับการศึกษา

#### 4.2.1 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบด

จากข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงหินปูนที่เวลาการบด 1 ชั่วโมง (ข้อมูลการวิเคราะห์โดยเครื่อง Mastersizers ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ตามรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า มีหินปูนขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอน 18.64 % และขนาดละเอียดกว่า 3 ไมครอน 47.60%

ดังนั้นการบดแร่ระบบวงจรถัดกับเครื่องคัดขนาดจึงสามารถออกแบบกระบวนการได้โดยการบด และคัดขนาดที่ให้มีการแยกขนาดตามที่ต้องการแล้วนำส่วนที่หยาบกลับไปบดใหม่



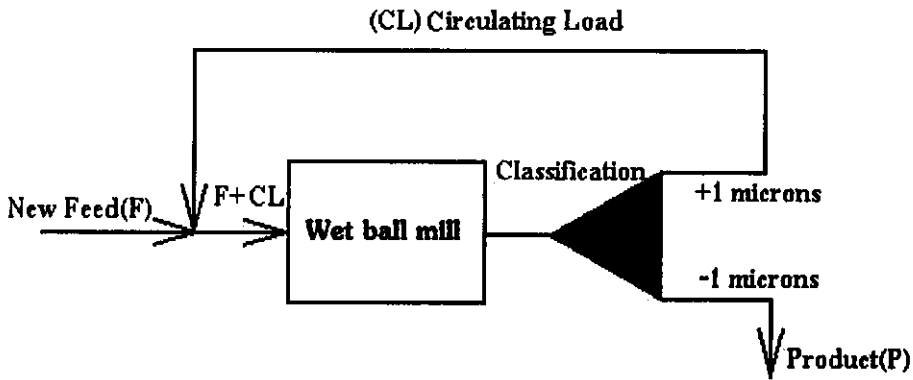
รูปที่ 4.13 ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงหินปูนที่เวลาการบด 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคที่การบด 1 ชั่วโมง

No.	Condition				Grinding 1 hr.		
	%Ball Filling	Speed (rpm)	%Solid	Dispersing Agent	%Passing		
					1 micron	3 micron	10 micron
1	40%Ball Filling	62	60	Non	18.64	47.60	93.55

โดยหากต้องการผลิตที่ขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอนก็ต้องแยกขนาดที่ 1 ไมครอนซึ่งจะได้ส่วนละเอียดเป็นผลิตภัณฑ์ 18.64 % ในขณะที่หากต้องการขนาดที่หยาบกว่า 3 ไมครอนก็จะมีส่วนละเอียดมากถึง 47.60% ซึ่งทำให้สัดส่วนที่ต้องกลับไป (CL) บดใหม่ลดลงไปมาก

เนื่องจากการนำส่วนที่ยังไม่ได้ขนาดนำกลับไปป้อนเครื่องบดใหม่(Circulating Load) ทำให้ต้องใช้เครื่องบดและเครื่องมือคัดแยกขนาดที่มีกำลังการผลิตสูงกว่าอัตราการผลิตของหินปูนละเอียดมาก ในการประเมินหาอัตราส่วนของขนาดเครื่องบด ค่ากำลังการผลิตของระบบได้โดยสมมติออกแบบระบบการบดเป็นระบบปิดและป้อนหินปูนด้วยอัตรา 100 ตันต่อชั่วโมง (ดูรูปที่ 4.14 ประกอบ)



รูปที่ 4.14 รูปแบบการคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการบด

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบดและคัดขนาดที่ขนาดอนุภาค -x ไมครอน

$$\left(\frac{US_x}{100}\right)(F + CL) = 100$$

$$F = 100$$

$US_x$  (Under Size X microns) = เปอร์เซ็นต์ของอนุภาคที่มีขนาดละเอียดกว่า x ไมครอน

สามารถคำนวณค่า CL ได้ มีค่าเท่ากับ

$$CL = \left[ 100 - \left( \frac{US_x \times F}{100} \right) \right] \times \frac{100}{US_x}$$

ให้  $MC = (F + CL)$

$MC$  = กำลังการผลิตของเครื่องบด (Mill Capacity) หน่วย tph

$MC:P$  = อัตราส่วนของขนาดเครื่องบด(MC) ต่อกำลังการผลิตของระบบ

สำหรับข้อมูลที่พอจะหาได้จากข้อมูลโรงงานอุตสาหกรรมมีดังนี้

1. การบดปูนขาวด้วยบอลมิลล์ของบริษัทปูนขาวและแร่ อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา มีดังนี้
 

อัตราการผลิต	4	เมตริกตัน/ชั่วโมง
ต้นทุนการบดและค้คขนาดแห้ง	200	บาท/เมตริกตัน
%Ball Filling	50	%
2. การผลิตหินปูนบดละเอียด(-100 เมช และ-325 เมช ) บดด้วยเครื่องบดเรย์มอนด์มิลล์ของบริษัทรุ่งยูซี อ.บ้านตาขาว จ.ตรัง ค่าใช้จ่ายในการบดและค่าวัตถุดิบ 500-600 บาท ค่าวัตถุดิบ 150-200 บาทในขณะที่ราคาหินปูนบดละเอียดที่ขายกัน ณ ที่เหมืองเท่ากับ 1,100 บาทต่อเมตริกตัน

การประเมินต้นทุนการบดแร่ของโครงการวิจัยนี้ จะอาศัยพื้นฐานจากข้อมูลข้างต้น โดยทำการประเมินดังนี้

- ก. ค่าเตรียมวัตถุดิบ และค่าวัตถุดิบใช้ตัวตัวเลข 750 บาท/เมตริกตัน
- ข. ตามข้อมูลการบดจากเครื่องบดบอลมิลล์นั้นค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่จะอยู่ที่ค่าพลังงานที่ใช้หมุนบอลมิลล์ดังนั้นจึงประเมินค่าใช้จ่ายการบดเพื่อผลิตหินปูนละเอียดกว่า 1 ไมครอนจากการเปรียบเทียบตัวเลขของ Retention Time ของหินในเครื่องบด ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าพลังงาน ค่าสึกหรอ ค่าแรงงาน และอื่นๆ โดยคำนวณเป็นขั้นตอนดังนี้

จากข้อมูลของการบดปูนขาวด้วยบอลมิลล์

ขนาดของบอลมิลล์	เส้นผ่าศูนย์กลาง	2.5	เมตร
	ยาว	7	เมตร

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของบอลมิลล์} &= 7 \times \pi \times \left(\frac{2.5}{2}\right)^2 \\ &= 36.36 \quad \text{ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

%Ball Filling                      50      %

ช่องว่างระหว่างบอลที่ให้หินปูนแทรกอยู่ 40 %

ค่า Bulk density ของหินปูนมีค่าเท่ากับ                      1.55      เมตริกตัน/ลูกบาศก์เมตร

ดังนั้นปริมาณผงหินปูนที่บอลมิลล์รับได้

$$\begin{aligned} &= 1.55 \times 0.50 \times 0.40 \times 7 \times \pi \times \left(\frac{2.5}{2}\right)^2 \\ &= 11 \quad \text{เมตริกตัน} \end{aligned}$$

อัตราป้อน                      4                      เมตริกตัน/ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{Retention Time} &= \frac{\text{Mass Retained}}{\text{Mass Flowrate}} \\ &= \frac{11}{4} \\ &= 2.75 \quad \text{ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่าย = 200 บาท/เมตริกตัน

จากการประเมินการบดวงจรปิดในหัวข้อการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบด กำหนดให้ค่าดังนี้

$$\text{Retention Time} = 1 \quad \text{ชั่วโมง}$$

$$\text{ดังนั้นเทียบค่าใช้จ่ายในการบด(บาท/เมตริกตัน)} = \frac{200 \times \text{Retention time} \times MC : P \text{ ratio}}{2.75}$$

เนื่องจากการบดและคัดขนาดนี้เป็นการบดแบบแห้งแต่ที่ออกแบบไว้ในโครงการเป็นการบดแบบเปียกในขณะที่คัดแยกนี้เป็นขนาดละเอียดกว่ามาก ดังนั้นค่าใช้จ่ายจริงจึงมีสัดส่วนที่สูงกว่าทั้งนี้ประมาณเป็นสัดส่วนมากกว่า 2 เท่า ผลการประเมินแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบดที่เงื่อนไขของขนาดอนุภาคต่างๆ (ป้อน 100 เมตริกตันต่อชั่วโมง)

ขนาดผลิตภัณฑ์ x <sub>1</sub> (microns)	US <sub>x</sub> (%)	CL เมตริกตัน	MC เมตริกตัน	MC:P ratio	ค่าใช้จ่ายในการบด บอลมิลล์ (บาท/เมตริกตัน)	รวมค่าวัตถุดิบ ค่าเตรียม และค่าบด (บาท/เมตริกตัน)
-1	18	455.56	555.56	5.56:1	808	1,558
-3	47	112.77	212.77	2.13:1	309	1,059
-10	93	7.53	107.53	1.08:1	156	906

ในกรณีของการบดแบบวงจรเปิด(Open Circuit) นั้นจะต้องใช้เวลาบดนานมากจึงจะได้ขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่า 1 ไมครอน ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

อนึ่งหากนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมจริงการบดแบบเปิดจะเป็นการทำงานการผลิตครั้งละหนึ่งครั้ง(Batch) โดยบรรจุวัตถุดิบลงไปแล้วบดไปตามเวลาที่กำหนดเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ

เมื่อจะพิจารณาค่าใช้จ่ายในการบดก็สามารถประเมินในลักษณะเดียวกันกับในกรณีของการบดแบบวงจรปิดได้ดังสมการข้างล่างโดยต้องใช้เวลาบดอย่างน้อย 147 ชั่วโมงซึ่งผลการประเมินแสดงในตารางที่ 4.7

$$\text{ค่าใช้จ่ายในการบด(บาท/เมตริกตัน)} = \frac{200 \times \text{Retention time} \times MC : P \text{ ratio}}{2.75}$$

$$\text{Retention Time} = 147 \quad \text{ชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าใช้จ่ายในการบด(บาท/เมตริกตัน)} &= \frac{200 \times 147}{2.75} \\ &= 10,690 \quad \text{บาท/เมตริกตัน} \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบดแบบเปิดที่เงื่อนไขของขนาดอนุภาคต่างๆ (ป้อน 100 เมตริกตันต่อชั่วโมง)

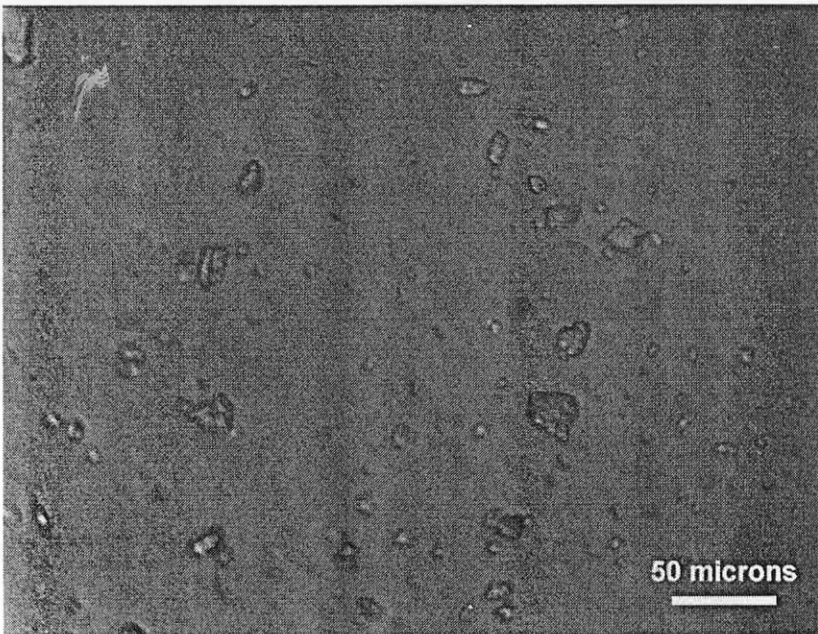
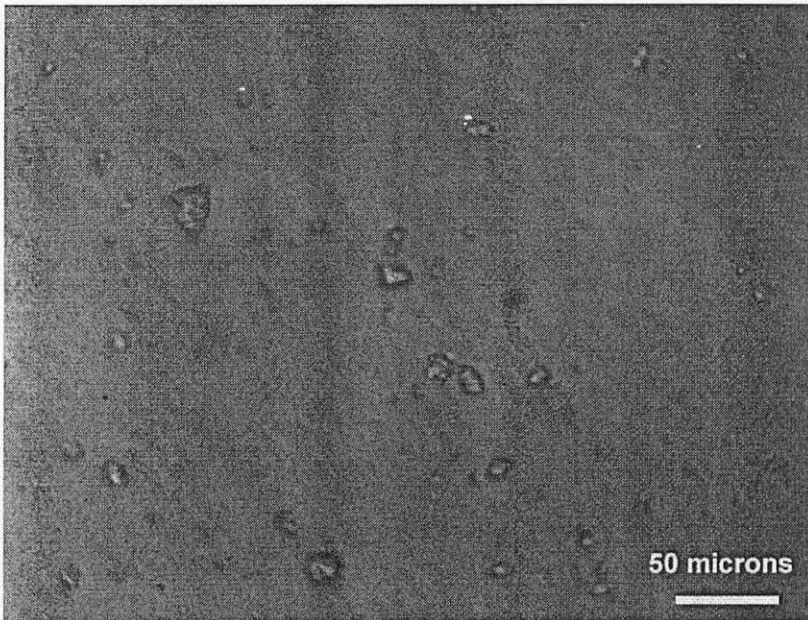
ขนาดผลิตภัณฑ์x,(microns)	เวลาที่ใช้บด (ชั่วโมง)	ค่าใช้จ่ายในการบด บอลมิลล์ (บาท/เมตริกตัน)	รวมค่าวัตถุดิบ ค่าเตรียม และค่าบด (บาท/เมตริกตัน)
100% ผ่าน 3 ไมครอน	147	10,690	11,440



### 4.3 การวิเคราะห์ขนาดโดยเทคนิค Image Analysis

การวิเคราะห์ขนาดโดยอาศัยเทคนิค Image Analysis ซึ่งจะทำให้การถ่ายภาพที่กำลังขยายต่างๆแล้วนำมาวิเคราะห์ขนาดโดยการนับจำนวนที่ขนาดอนุภาคต่างๆกัน

จากการศึกษาพบว่าวิธีการวิเคราะห์ขนาดโดยวิธีนี้มีข้อจำกัดเมื่อขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนเนื่องจาก Resolution ของกล้องถ่ายภาพมีค่าจำกัด

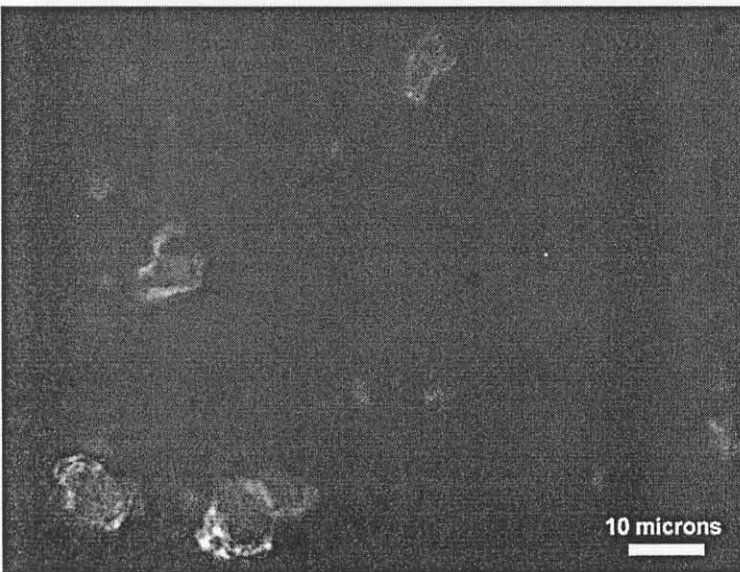


รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า

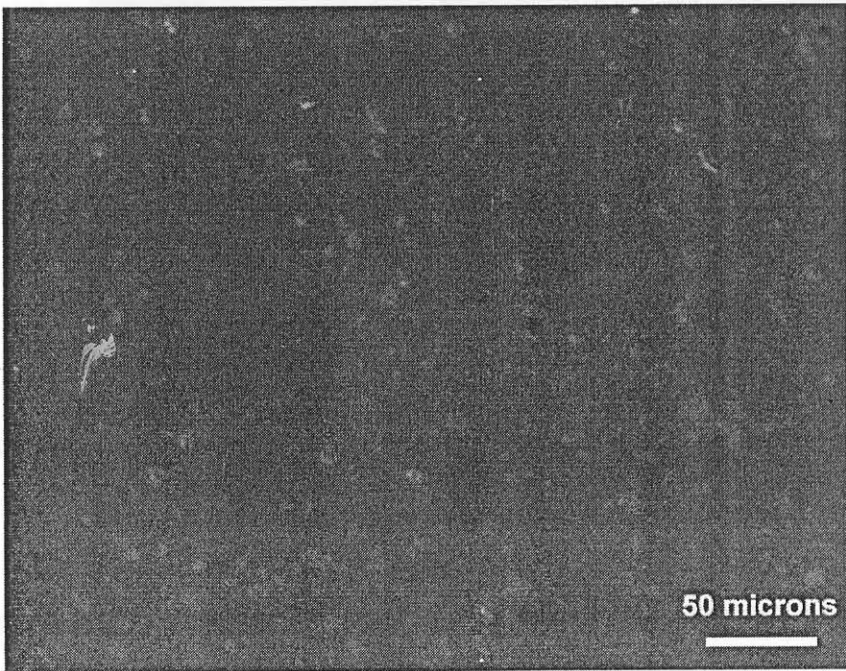
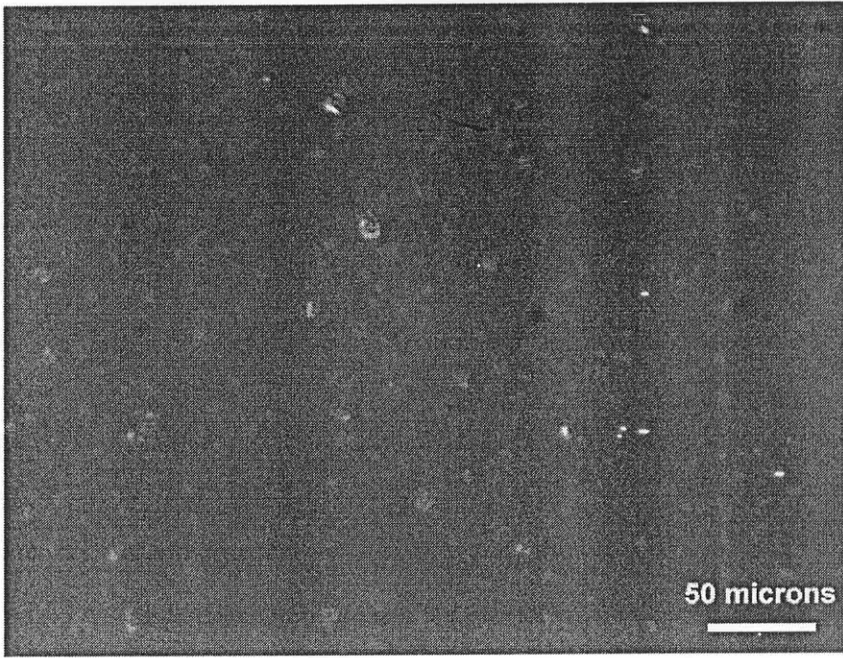
จากภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าอนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 5- 15 ไมครอน มีรูปร่างไม่แน่นอน (Irregular) ดังรูปที่ 4.15

เมื่อทำการถ่ายภาพที่กำลังขยายมากขึ้น(800 เท่า) ดังรูปที่ 4.16 จะทำให้สามารถมองเห็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก และพบว่าอนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 3-8 ไมครอน

เมื่อทำการบดนานขึ้นแล้วนำอนุภาคที่ได้มาถ่ายภาพพบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลงและมีการกระจายตัวแคบลง ดังแสดงในภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 147 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 พบว่าที่กำลังขยาย 200 เท่า อนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 5- 10 ไมครอน และที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าอนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 1-3 ไมครอน อีกทั้งมีรูปร่างค่อนข้างกลม

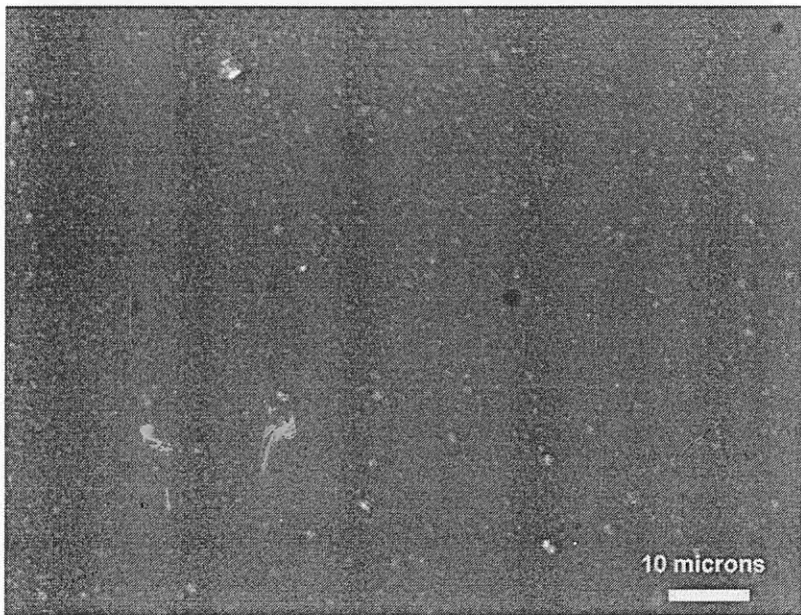
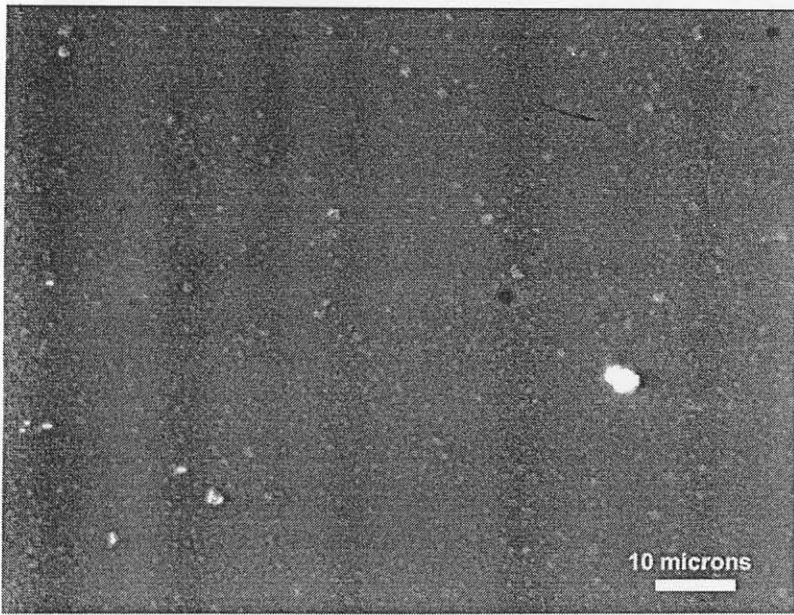


รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 1 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 800 เท่า



รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 147 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 200 เท่า





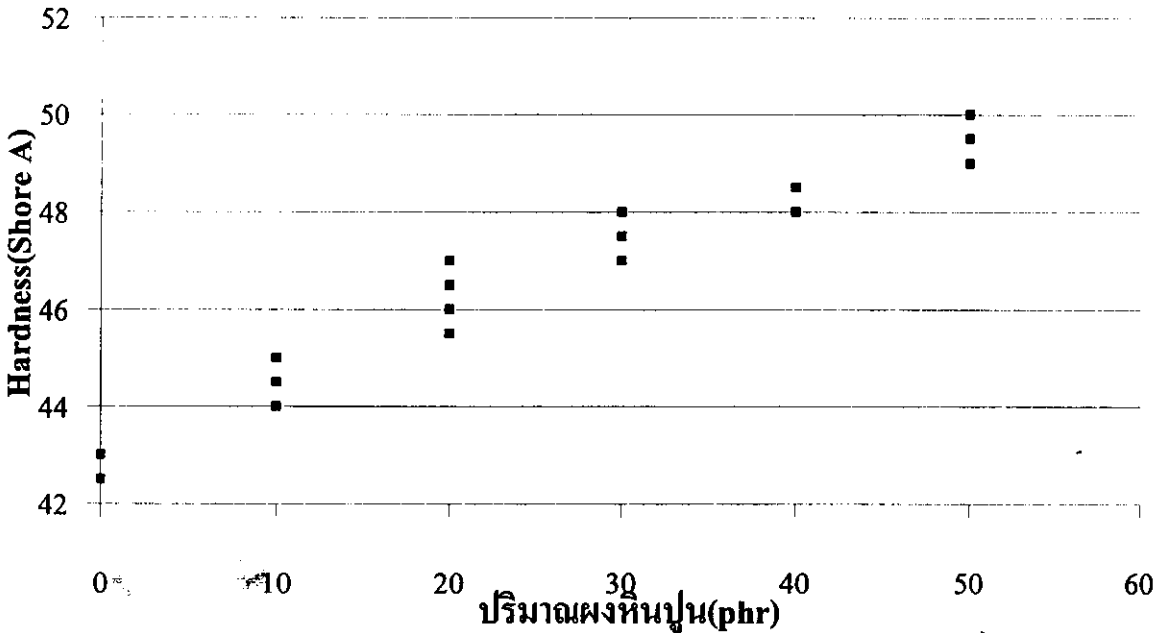
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายอนุภาคหินปูนใช้เวลาบด 147 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 800 เท่า

#### 4.4 ผลการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับช่วงปริมาณผงหินปูนที่เหมาะสม

##### 4.4.1 ผลการทดสอบหาค่าความแข็ง

เมื่อเติมผงหินปูน(ขนาด  $d_{50}=0.5$  ไมครอน)เข้าไปผสมในยางธรรมชาติ STR 5L ทำให้ความแข็งของยางเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนเพิ่มขึ้น ความแข็งของยางก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยที่ปริมาณผงหินปูน 50 phr ยางจะมีความแข็งมากที่สุด ซึ่งความแข็งของยางผสมที่ไม่ได้เติมผงหินปูนมีความแข็งเฉลี่ยประมาณ 42 Shore A จากรูปที่ 4.19 และที่ 50 phr ยางผสมมีความแข็งประมาณ 49.6 Shore A ซึ่งมีความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจากยางที่ไม่ได้เติมผงหินปูน 15.88 %

ทั้งนี้ น่าจะอธิบายตาม Ismail (1998) ว่าเป็นเพราะ สมบัติ Plasticity ของ Rubber chain ถดลงมีผลทำให้ยางที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น

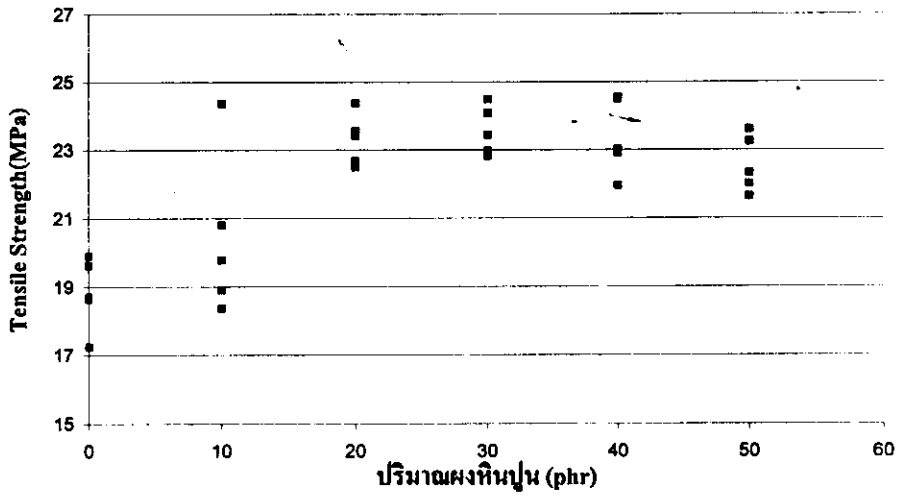


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของยางคงรูปกับปริมาณผงหินปูน(ขนาด  $d_{50}=0.5$  ไมครอน)

##### 4.4.2 ผลการทดสอบหาค่าความทนทานต่อแรงดึง

จากการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมพบว่า ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมที่ไม่ได้เติมผงหินปูน(ขนาด  $d_{50}=0.5$  ไมครอน)มีความทนทานต่อแรงดึงเฉลี่ยประมาณ 19 MPa จากรูปที่ 4.20 เมื่อผสมผงหินปูนเพิ่มขึ้นค่าความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกส่วนผสม และส่วนผสมที่ 30 phr ยางผสมจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจากยางที่ไม่ได้เติมผงหินปูนอยู่ประมาณ 23.53 % ซึ่งส่วนผสมที่ 30, 40 และ 50 phr ค่าความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ 22-24 MPa

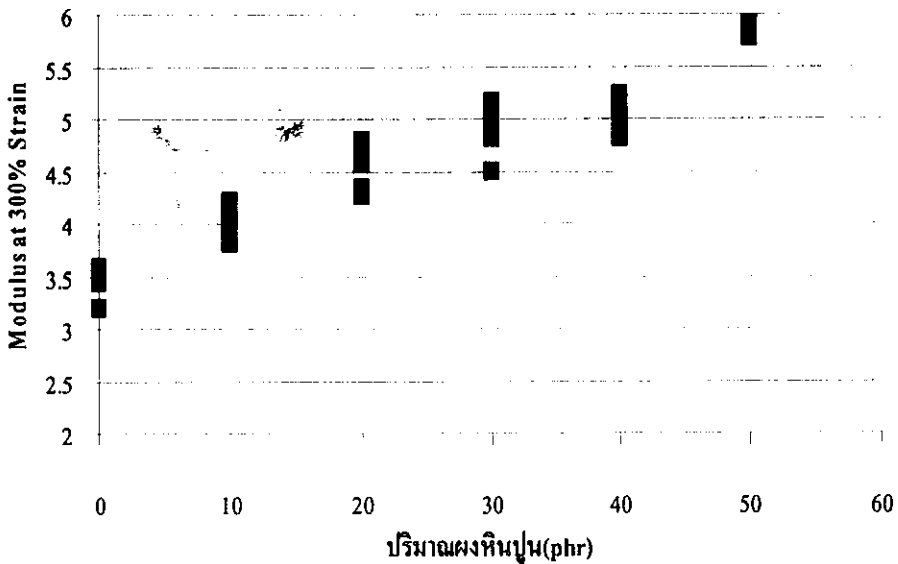
ซึ่งสามารถอธิบายตาม Ismail (1997) ถ้าสารตัวเติมมีขนาดเล็กส่งผลทำให้ค่า Tensile Strength, Tensile Modulus และ Tear Strength ของยางผสมจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปกับที่ปริมาณผงหินปูน (ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)

#### 4.4.3 ผลการทดสอบหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ 300%การยืด

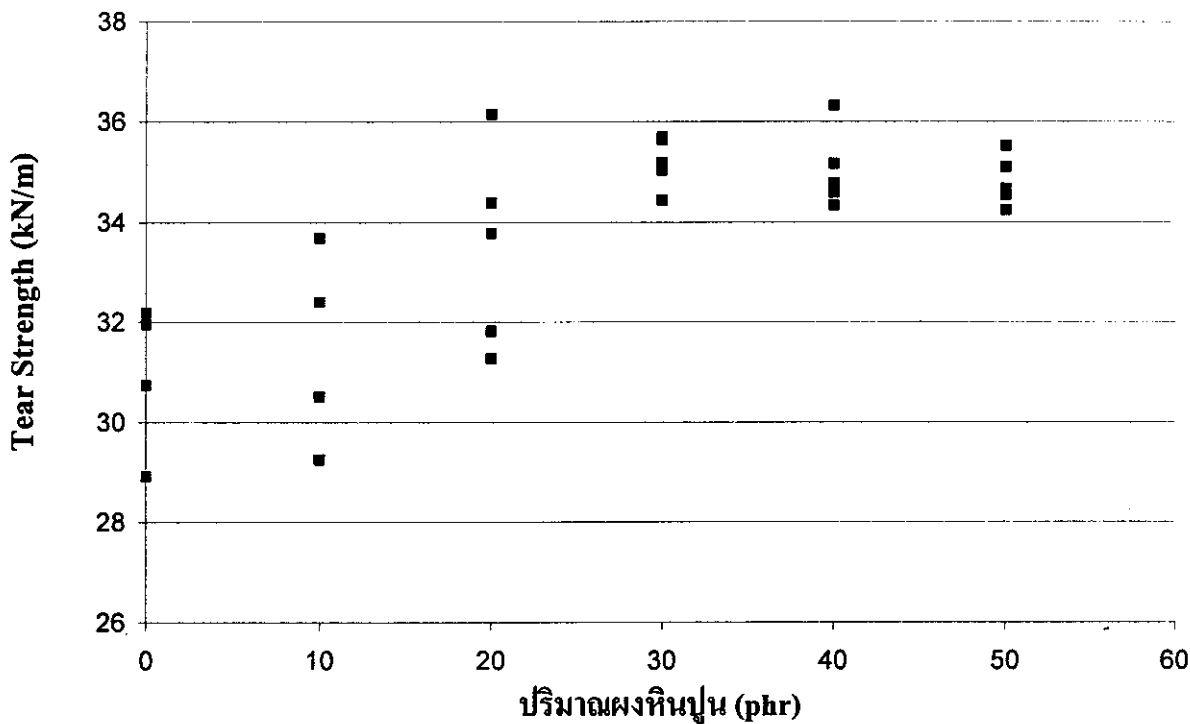
จากการทดสอบค่ามอดูลัสของยางที่ 300% การยืด พบว่าค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณผงหินปูน(ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 10, 20, 30, 40 จนถึง 50 phr ซึ่งค่ามอดูลัสของยางที่ 300% การยืด ส่วนผสมที่ไม่เติมผงหินปูนมีค่าประมาณ 3.4 MPa ส่วนยางผสมที่มีการเติมผงหินปูนมีค่ามอดูลัสที่ 300% การยืดมีค่าประมาณ 5.8 MPa (รูปที่ 4.21) ซึ่งมีค่าสูงกว่ายางผสมที่ไม่ได้เติมผงหินปูน 66.80%



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ความเครียด 300% การยืด กับปริมาณผงหินปูน (ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)

4.4.4 ผลการทดสอบหาค่าความต้านทานการฉีกขาด

จากการทดสอบความต้านทานการฉีกขาดของชิ้นงานยางผสมที่ไม่ได้เติมผงหินปูนมีค่าประมาณ 30 kN/m เมื่อผสมผงหินปูน(ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และส่วนผสมที่ 30 phr ค่าความต้านทานการฉีกขาดมีค่าประมาณ 35 kN/m ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากยางผสม ที่ไม่ได้เติมผงหินปูนอยู่ประมาณ 15.25 % (รูปที่ 4.22)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางคงรูปกับปริมาณผงหินปูน (ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)

## 4.5 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางผสม

### 4.5.1 ผลการศึกษาด้านสมบัติความแข็งของยางผสม (Hardness)

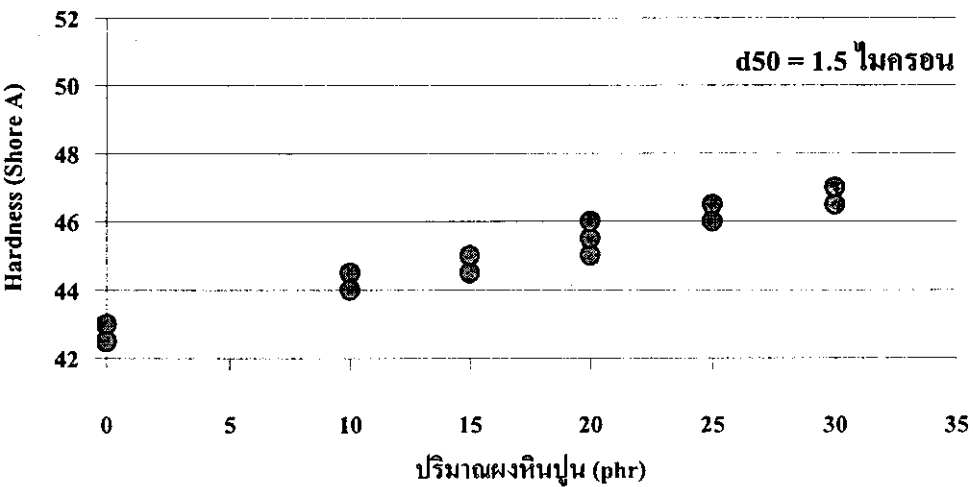
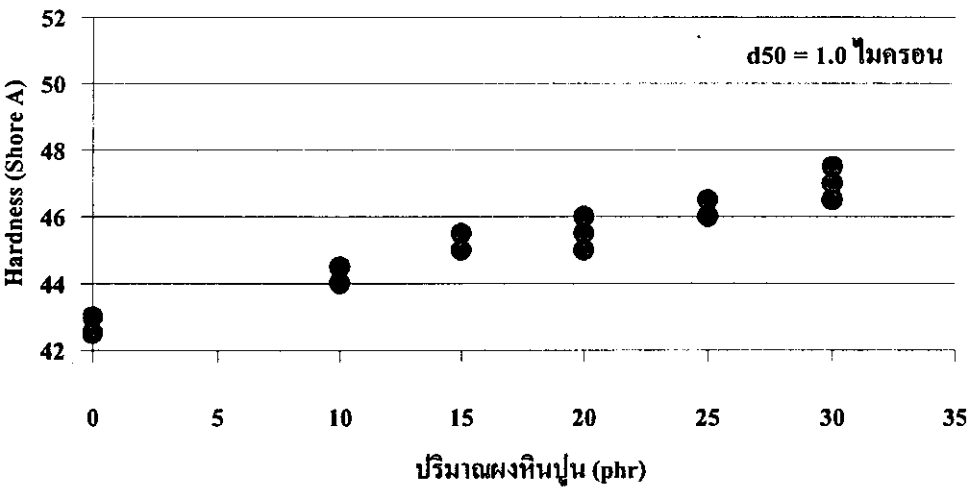
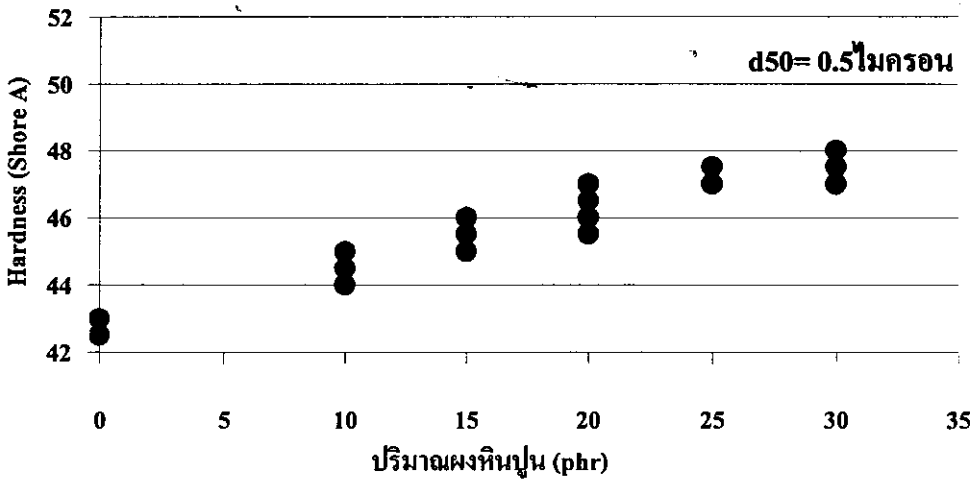
#### 4.5.1.1 ความแข็งของยางที่เติมอนุภาคต่างขนาดกัน

เมื่อใช้ผงหินปูนที่มีขนาดต่างกันคือ  $d_{50} = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ไมครอน เข้าไปผสมในยางธรรมชาติ STR 5L พบว่า ทั้ง 3 ขนาด มีผลทำให้ความแข็งของยางเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าเมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน 30 phr ได้สูงถึง 47-48 Shore A ดังรูปที่ 4.23

โดยเมื่อใช้อนุภาคที่มี  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน ที่ 30 phr ยางผสมมีความแข็งประมาณ 47.5 Shore A ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจากยางที่ไม่ได้เติมผงหินปูน 11.0% โดยมากกว่าการใช้อนุภาคที่มี  $d_{50} = 1.0$  ไมครอน ซึ่งมีความแข็งประมาณ 47 Shore A ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจากยางที่ไม่ได้เติมผงหินปูน 9.8% ส่วนการใช้อนุภาคที่มี  $d_{50} = 1.5$  ไมครอน ซึ่งมีขนาดใหญ่ที่สุด มีความแข็งประมาณ 46.9 Shore A ความแข็งเพิ่มสูงขึ้นจากยางที่ไม่ได้เติมผงหินปูน 9.6% ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

นั่นแสดงว่า การใช้อนุภาคที่มีขนาดละเอียดกว่า จะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูน ค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้จะอธิบายได้ว่า เมื่อเติมอนุภาคที่มีขนาดละเอียดลงไปในช่วง จะทำให้ยางมีความแข็ง (Rigid) มากขึ้น และมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่ออนุภาคหินปูนในช่วงยิ่งมาก ก็จะทำให้เพิ่มความแข็ง (Rigid) ให้กับยาง เมื่อเติมอนุภาคมากที่สุด คือ 30 phr ความแข็งของยางจึงมีค่าสูงที่สุดเช่นกัน





รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของยางคงรูปกับปริมาณของผงหินปูน

#### 4.5.1.2 ความแข็งของยางผสมที่เติมผงหินปูนชนิดเคลือบผิว

เมื่อใช้ผงหินปูนที่มีการเคลือบผิวต่างกัน โดยเคลือบด้วยสาร PAA, PMAA และมีวิธีการเคลือบผิว 2 วิธี คือ การบดผสม, การกวนผสม เข้าไปผสมในยางธรรมชาติ STR 5L พบว่าการเคลือบผิวทั้ง 4 แบบ มีผลทำให้ความแข็งของยางเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าความแข็ง เมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน 30 phr ได้สูงถึง 50-51 Shore A ดังรูปที่ 4.24

เมื่อพิจารณาการเคลือบทั้ง 4 แบบ กับแบบไม่เคลือบผิว การใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิว ตั้งแต่ 10-30 phr ยางผสมจะมีความแข็ง มากกว่าการใช้อุณหภูมิที่ไม่มีการเคลือบผิว

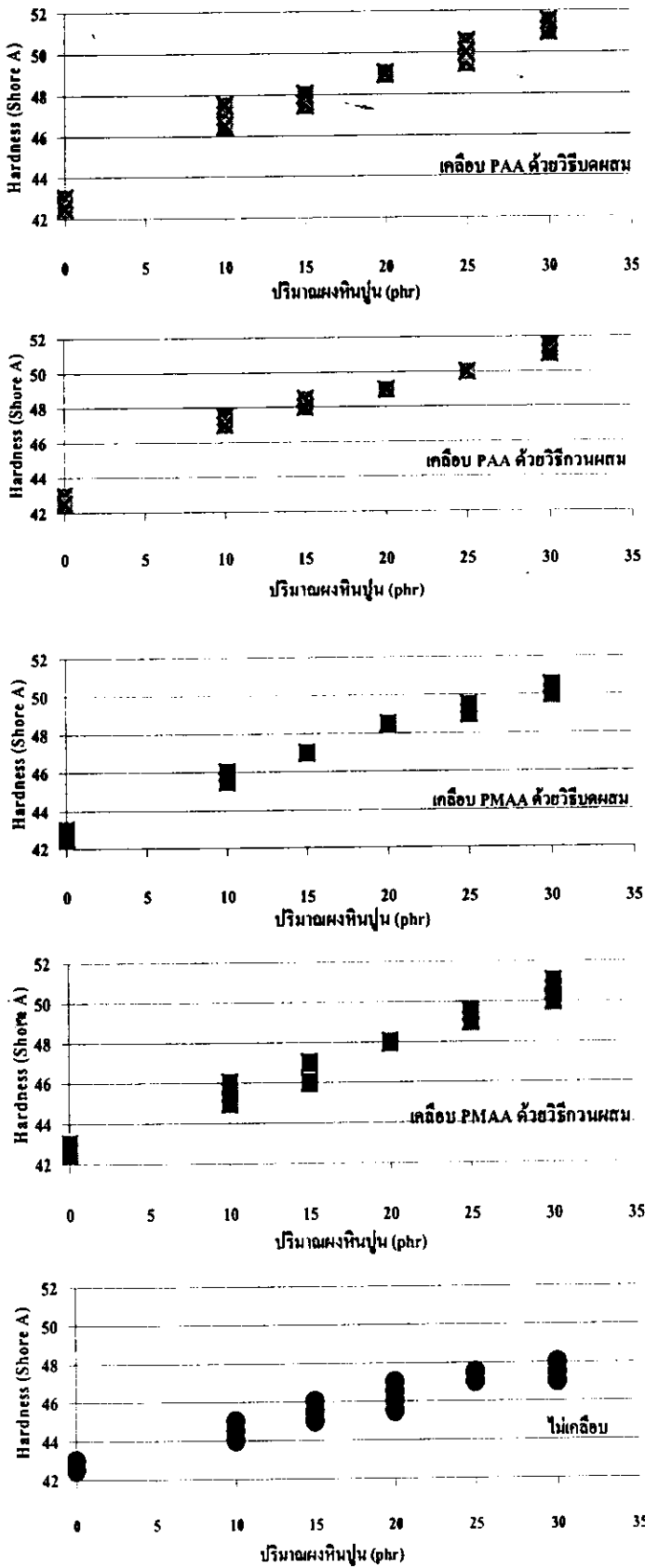
เมื่อพิจารณาวิธีการเคลือบผิวทั้ง การบดผสม และการกวนผสม การใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิวด้วย PAA ตั้งแต่ 10-30 phr ยางผสมจะมีความแข็ง มากกว่าการใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิวด้วย PMAA

เมื่อพิจารณาสารที่ใช้เคลือบผิวทั้ง PAA และ PMAA การใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิวโดยการบดผสม ตั้งแต่ 10-30 phr ยางผสมจะมีความแข็ง ค่อนข้างใกล้เคียงกับ การใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิวโดยการกวนผสม

นั่นแสดงว่า การใช้อุณหภูมิที่มีการเคลือบผิว จะส่งผลต่อความแข็ง มากกว่าการใช้อุณหภูมิที่ไม่มีการเคลือบผิว และการเคลือบผิวด้วย PAA จะส่งผลต่อความแข็ง มากกว่าการเคลือบผิวด้วย PMAA โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูน ค่าความแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่กรรมวิธีในการเคลือบผิว ไม่มีผลต่อความแข็งแต่อย่างใด

ทั้งนี้ น่าจะอธิบายได้ว่า PAA เป็นสารที่มีขี้วมมากกว่า PMAA จึงอาจทำให้เมื่อเคลือบผิวแล้ว มีผลต่อค่าความแข็งของยางผสม คือทำให้มีค่าความแข็งมากขึ้น

การเสริมแรงยางธรรมชาติด้วยผงอนุภาคหินปูนขนาดละเอียดกว่า 1 ไมครอน

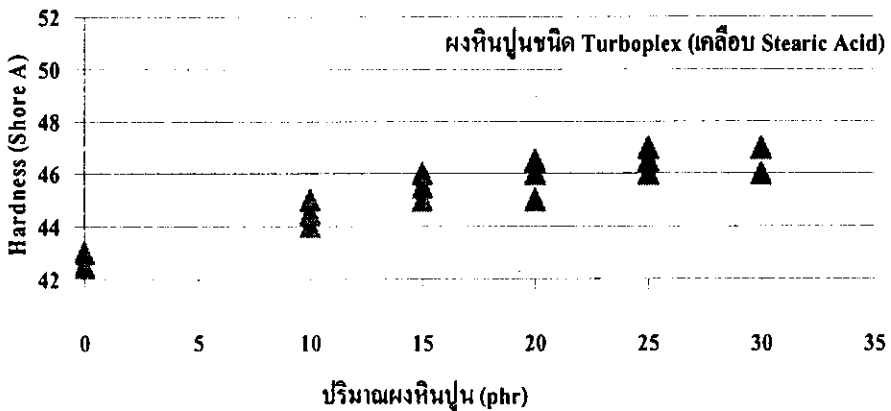
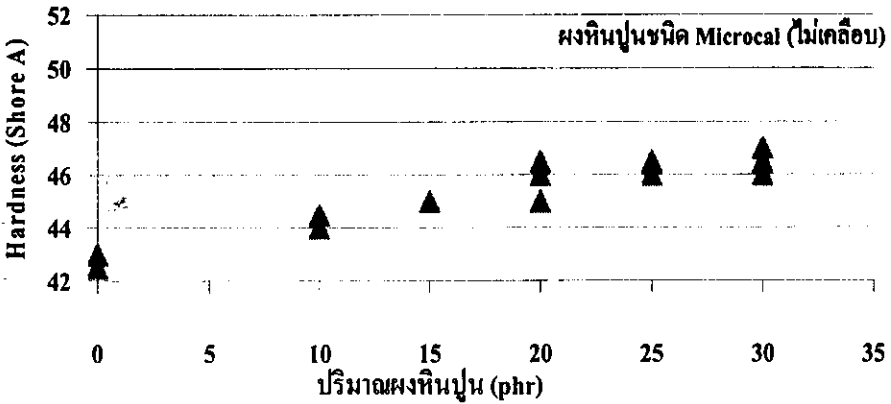
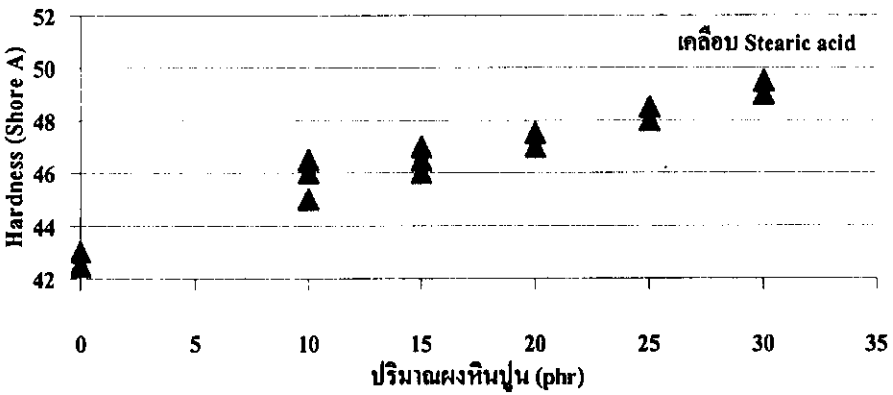
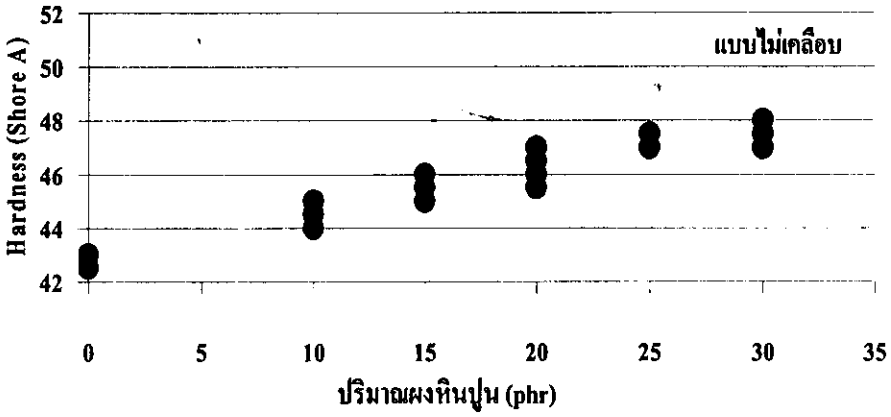


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของยางคงรูปกับปริมาณของผงหินปูน

#### 4.5.1.3 การศึกษาเปรียบเทียบกับหินปูนตามท้องตลาด

เมื่อใช้ผงหินปูนที่ไม่มีการเคลือบผิว ( $d_{50} = 0.5$  ไมครอน) และเคลือบผิวด้วย Stearic Acid มาเปรียบเทียบกับผงหินปูนจากบริษัทปูนคุณภาพจำกัด แบบที่ไม่มีการเคลือบผิว (Microcal) ( $d_{50} = 3.2$  ไมครอน) และเคลือบผิวด้วย Stearic Acid (Turboplex) ( $d_{50} = 3.0$  ไมครอน) เข้าไปผสมในยางธรรมชาติ STR 5L พบว่าผงหินปูนทั้ง 4 ชนิด มีผลทำให้ความแข็งของยางเพิ่มมากขึ้น และความแข็ง เมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน 30 phr ขึ้นไป สูงถึง 50-51 Shore A ดังรูปที่ 4.25

เมื่อพิจารณาทั้งที่ไม่มีการเคลือบผิว และเคลือบผิวด้วย Stearic Acid พบว่าเมื่อใช้ตั้งแต่ 10-30 phr ยางผสมจะมีความแข็ง มากกว่าการใช้อนุภาคหินปูนของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ทั้งนี้ ผงหินปูนที่เตรียมขึ้นมา และของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ที่มีการเคลือบผิวด้วย Stearic Acid จะทำให้ยางผสมมีความแข็ง มากกว่าการใช้อนุภาคที่ไม่มีการเคลือบผิว โดยที่ ผงหินปูนที่เตรียมขึ้นมา จะส่งผลต่อความแข็ง มากกว่าการใช้ Microcal และ Turboplex ของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ซึ่งน่าจะเป็นเพราะ ผงหินปูนที่เตรียมขึ้นมา มีขนาดละเอียดกว่า ของบริษัทปูนคุณภาพจำกัด ซึ่งมีขนาดประมาณ 10 ไมครอน ซึ่งได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อทางด้านบน ส่วนการเคลือบด้วย Stearic Acid ก็ส่งผลให้อนุภาคมีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน (Homogeneous) มากขึ้น เป็นผลให้ค่าความแข็งดีขึ้นไปตามลำดับ



รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งของยางคงรูปกับปริมาณของผงหินปูน

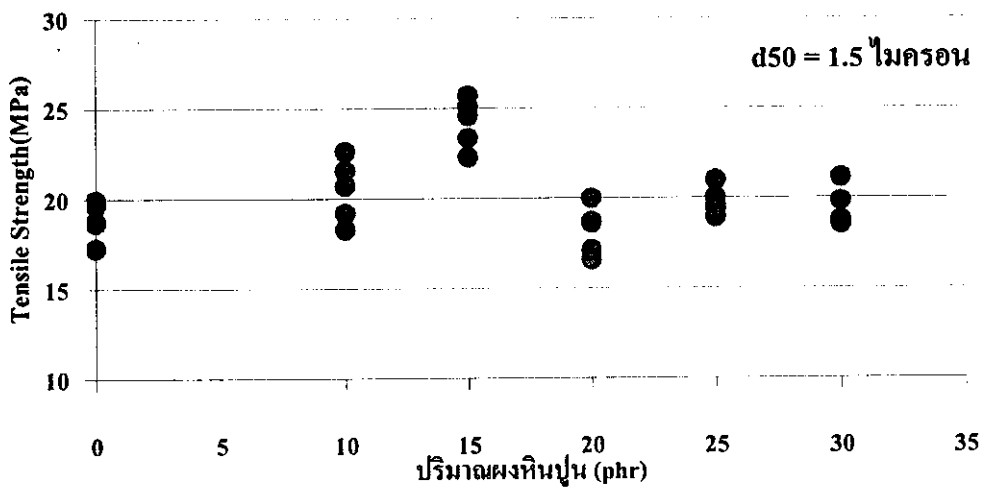
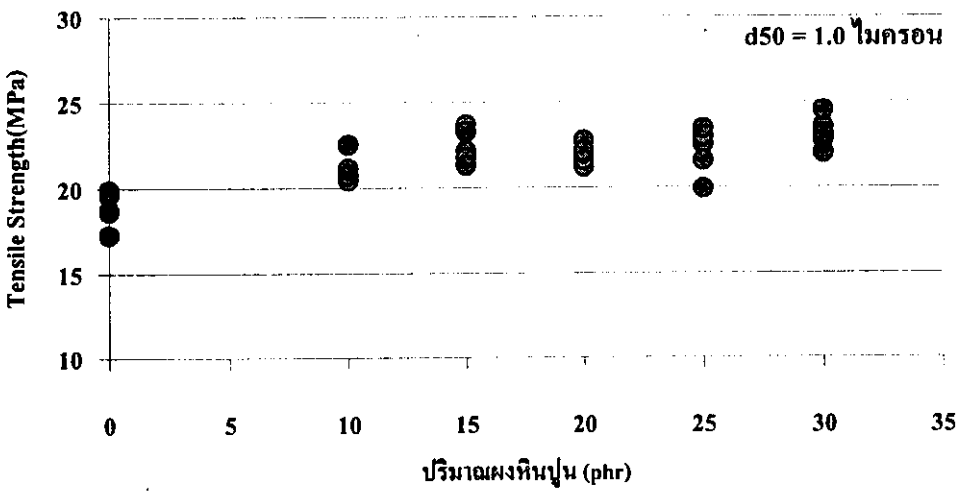
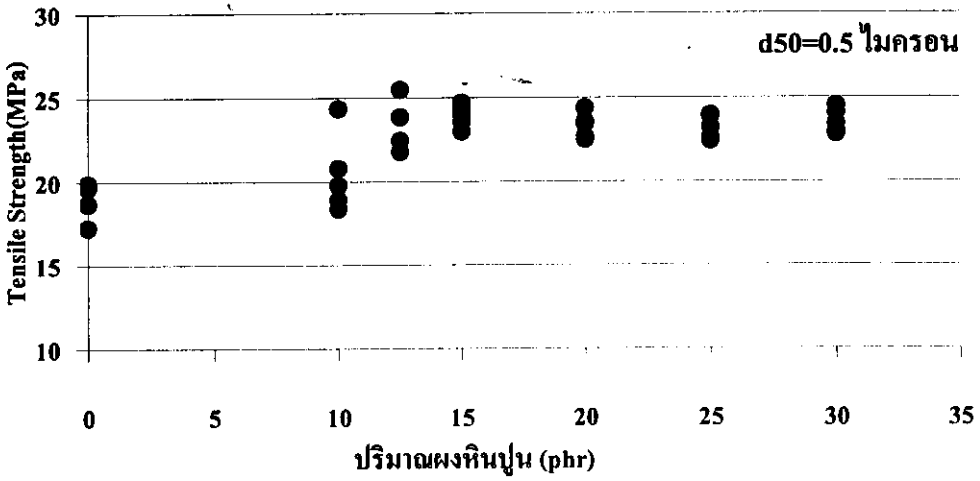
## 4.5.2 ผลการศึกษาด้านความทนทานต่อแรงดึงของยางผสม (Tensile Strength)

### 4.5.2.1 ค่าความทนทานต่อแรงดึง ของยางผสมผงหินปูนขนาดต่างๆกัน

เมื่อใช้ผงหินปูนที่มีขนาดต่างกันคือ  $d_{50} = 0.5, 1.0$  และ  $1.5$  ไมครอน ผสมในยางธรรมชาติ STR 5L พบว่าผงหินปูนที่มี  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน มีผลทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มจาก  $18.8 \text{ MPa}$  ขึ้นไปเป็นประมาณ  $23.9 \text{ MPa}$  แต่เมื่อเติมผงหินปูนมากไปอีกไม่ได้ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลง ส่วนผงหินปูนที่มี  $d_{50} = 1.0$  ไมครอน มีผลทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน และความทนทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงอย่างต่อเนื่อง เมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน  $30 \text{ phr}$  และสุดท้าย ผงหินปูนที่มี  $d_{50} = 1.5$  ไมครอน มีผลทำให้ความทนทานต่อแรงดึงของยางเพิ่มมากขึ้น จนถึงระดับหนึ่งแล้วลดลง โดยความทนทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณผงหินปูน  $15 \text{ phr}$  ดังรูปที่ 4.26

นั่นแสดงว่า การใช้ออนุภาคที่มีขนาดละเอียด จะส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อผงหินปูนมีขนาดละเอียดกว่าหรือเท่ากับ  $1$  ไมครอน ขนาดจะไม่ค่อยมีผลต่อความทนทานต่อแรงดึง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนมากไปอีก ไม่ได้ทำให้ความทนทานต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลง แต่จะลดลง หากผงหินปูนมีขนาดใหญ่กว่า  $1$  ไมครอน

ทั้งนี้น่าจะอธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคที่เดิมมีขนาดใหญ่ บริเวณรอบๆอนุภาคนั้น อาจเกิด Stress Concentration ขึ้น และส่งผลให้ชิ้นงานเกิดความวิบัติได้ง่าย กว่าการใช้อนุภาคขนาดละเอียด



รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูปกับปริมาณผงหินปูน

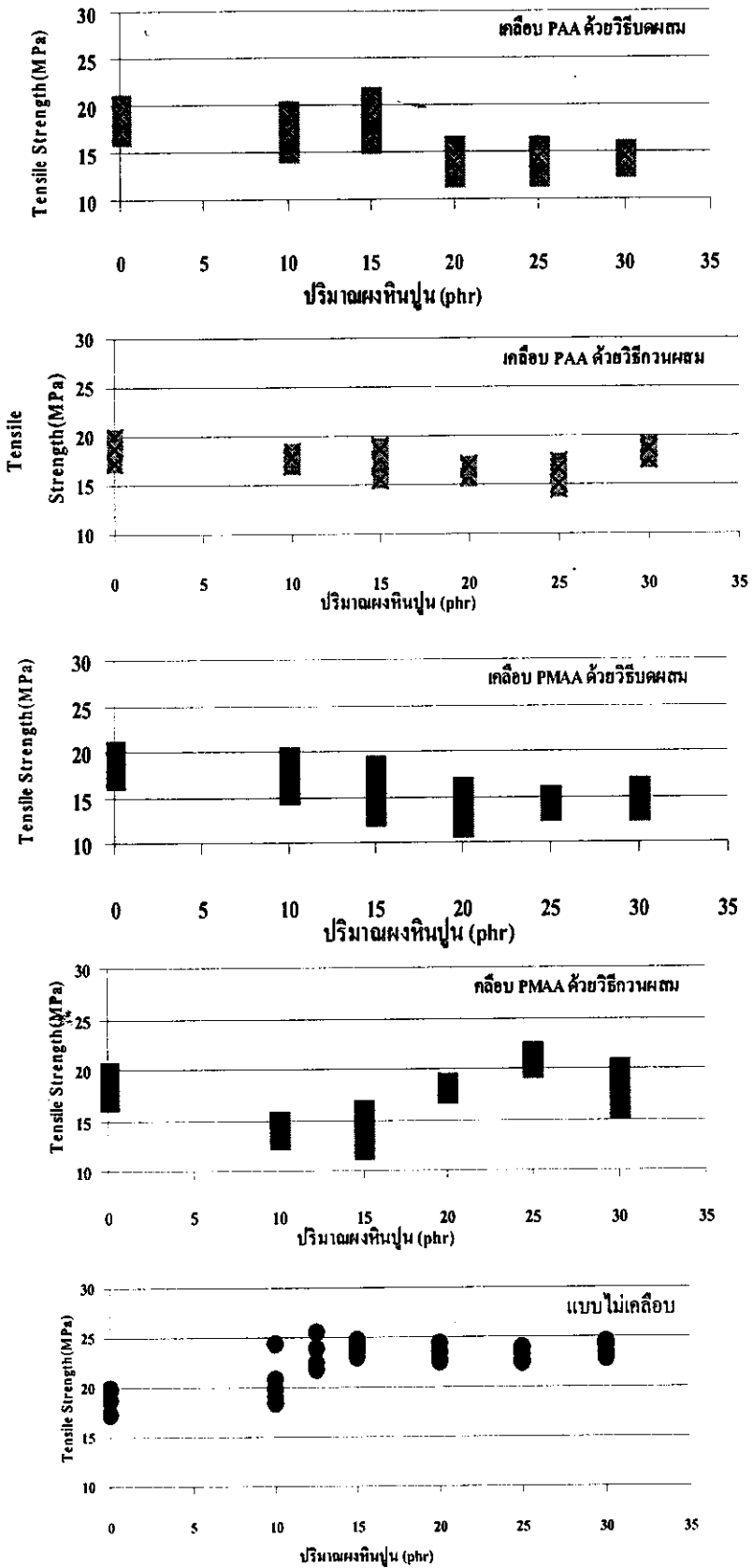
#### 4.5.2.2 ความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมที่เติมผงหินปูนชนิดเคลือบผิว

เมื่อใช้ผงหินปูน(ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน) ที่มีการเคลือบผิวต่างกันคือ เคลือบด้วย PAA, PMAA และมีวิธีการเคลือบผิว 2 วิธี คือ การบดผสม การกวนผสม เข้าไปผสมในยางธรรมชาติ STR 5L พบว่าผงหินปูนทั้ง 4 แบบ เกิดการ Agglomerate หรือ เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งส่งผลให้การทดสอบค่อนข้างคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง และไม่น่าเชื่อถือ โดยเฉพาะเมื่อปริมาณผงหินปูนสูงขึ้น จากรูปที่ 4.27

เมื่อพิจารณาการเคลือบทั้ง 4 แบบ กับแบบไม่เคลือบผิว การใช้อนุภาคที่มีการเคลือบผิวยางผสมจะมีความทนทานต่อแรงดึงน้อยกว่าการใช้อนุภาคที่ไม่มีการเคลือบผิว โดยอาจเกิดจากการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคหินปูนที่ผ่านการเคลือบผิวแล้วทำให้กลายเป็นจุดบกพร่องบนชิ้นงาน

โดยสาเหตุอาจเป็นเพราะ ขณะทำการผสมยางด้วยเครื่อง Two-roll mill ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของยาง ส่งผลให้สารที่ใช้เคลือบผิวอนุภาคเกิดปฏิกิริยาซึ่งอาจทำให้อนุภาคเกาะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ และเป็นผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงมีค่าลดลง





รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางรูปกับปริมาณผงทินปุ่น (ขนาด  $d_{50} = 0.5$  ไมครอน)