

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 ความถ่วงจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะของสารซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบทางเคมี ซึ่ง Aylward and Findlay (อ้างถึงโดยปริญาและอินทชัย 2528) รายงานว่าออกไซด์ของธาตุมีความหนาแน่นสูง ได้แก่ ออกไซด์ของซิลิเนียม อลูมิเนียม แมกนีเซียม และเหล็ก ส่วนออกไซด์ที่มีความหนาแน่นต่ำ ได้แก่ ออกไซด์ของซิลิกอน ซัลเฟอร์ โซเดียม และโพแทสเซียม ปูนซีเมนต์ มีออกไซด์ของ ซิลิเนียม ซิลิกอน และอลูมิเนียม เป็นสารประกอบหลัก ดังนั้นจึงมีความถ่วงจำเพาะสูง ส่วนซีเมนต์อลอยมีสารประกอบหลักของ ซิลิกอน ซัลเฟอร์ โซเดียมและโพแทสเซียม ดังนั้นจึงมีความถ่วงจำเพาะต่ำ ปูนซีเมนต์ มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 (ชุมพล 2528) ส่วนความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์อลอยจากการทดสอบได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.95 (ชุมพล 2528) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ความถ่วงจำเพาะของยางแอสฟัลท์ซีเมนต์ ทดสอบตาม Specific Gravity of Asphalt Cement by Pycnometer Method พบว่ามีค่าเท่ากับ 1.01923 ซึ่งค่าที่ได้ อยู่ในช่วงความถ่วงจำเพาะยางทั่ว ๆ ไป คือมีค่าอยู่ระหว่าง 1.00-1.10

ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ปราศจากการเคลือบผิว ด้วยสารซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 2.7115 ค่าความถ่วงจำเพาะทั้งหมดดังกล่าวมาแล้ว จะใช้ในการคำนวณหาความอุดมสมบูรณ์ของยางแอสฟัลท์ของมวลรวม ค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวม และเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์ สำหรับการทดสอบมาร์แชลล์

4.1.2 ค่าเพนเนเทรชัน

ค่าเพนเนเทรชันของยางแอสฟัลท์โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5-73 Standard Test Method For Penetration of Bituminous Material สามารถวัดระยะเป็น มิลลิเมตรซึ่งใช้มาตรฐานสามารถหลวงในแนวตั้งจมลงในยางแอสฟัลท์ โดยกำหนดน้ำหนักเข็ม ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ หากการทดสอบจำนวน 4 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยเพนเนเทรชัน 87.5 ซึ่งอยู่ในช่วง 80-100 ตามมาตรฐานกำหนด

4.2 คุณสมบัติของมวลรวมหยาบและละเอียดที่ถูกละเลียงด้วยสารซีเมนต์

4.2.1 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและละเอียดที่ถูกละเลียงด้วยสารซีเมนต์

ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบ และละเอียดที่ถูกละเลียงด้วยสารซีเมนต์ผสมซีเมนต์ 100:0, 80:20, 60:40 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ทุกค่าของความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและละเอียดที่ถูกละเลียงด้วยสารซีเมนต์ทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและละเอียดที่ปราศจากการละเลียง คือมีค่าต่ำกว่า 2.7115 ทั้งนี้เพราะปูนซีเมนต์จะทาปฏิกิริยากับน้ำเกิดเปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมที่ถูกละเลียงได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 100:0 ที่การบ่ม 1, 3, 7, 28 วัน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมหยาบเท่ากับ 1.27, 1.06, 0.58, 0.48 และมวลรวมละเอียดเท่ากับ 1.68, 1.45, 0.96, 0.75 ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะที่การบ่ม 1 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์ยังไม่สมบูรณ์คงเหลือปริมาณน้ำผสมอยู่ในมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดอยู่มาก จึงมีปริมาณความชื้นสูงสุดเป็นค่าเฉลี่ยเฉลี่ยเกิดไฮเดรต และค่าเฉลี่ยมวลโมลไฮเดรต สารประกอบที่ได้มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวม (Neville, 1981) ซึ่งเป็นผลให้มวลรวมหยาบและละเอียดที่ถูกละเลียงมีความถ่วงจำเพาะลดลง

ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 100:0 บ่มที่ 3 วันพบว่า การละเลียงที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 ให้ความถ่วงจำเพาะมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดสูงกว่าการละเลียงที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ทั้งนี้เนื่องจากจากการที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ ปริมาณน้ำไม่เพียงพอการทาปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์ 100:0 จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะรวมสูงกว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง การทาปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์มากกว่าทำให้ความถ่วงจำเพาะรวมลดลง (สมพร, 2532) คือ 2.6976 ลดต่ำลงเป็น 2.6673

4.2.2 ปริมาณน้ำที่ถูกละเลียงของมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยสารซีเมนต์

สารซีเมนต์จะทาปฏิกิริยากับน้ำและจะเคลือบอยู่ที่ผิวของมวลรวม โดยปริมาณน้ำที่เหลือจากการทาปฏิกิริยา สามารถหาค่าได้จากเปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมที่ถูกละเลียงด้วยสารซีเมนต์

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณน้ำที่เหลือจากการทาปฏิกิริยา} &= \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมที่ถูกละเลียง} \\ &= \frac{(\text{น.น.มวลรวม} - \text{น.น.มวลรวมอบแห้ง})}{\text{น.น.มวลรวมอบแห้ง}} \times 100 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์เกรด 40

วัสดุ	ปูนซีเมนต์*	ซีเมนต์เกรด	ยางแอสฟัลท์	มวลรวม
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.95	1.01923	2.7115

หมายเหตุ *ทดสอบโดย บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและละเอียดที่เปลี่ยนแปลงเมื่อถูกเคลือบ

ซีเมนต์ : ซีเมนต์เกรด	ที่การบ่ม (วัน)	น้ำ/สารซีเมนต์	ถ.พ. ของ มวลรวมหยาบ	ถ.พ. ของ มวลรวมละเอียด	ถ.พ. รวม
—	—	—	2.7975	2.650	2.7115
100:0 100:0	3	0.3 0.4	2.7905 2.7850	2.6313 2.5845	2.6976 2.6673
100:0 80:20 60:40	1	0.3	2.7915 2.7935 2.7330	2.6093 2.5834 2.6020	2.685 2.670 2.673
100:0 80:20 60:40	3	0.3	2.7905 2.7720 2.7810	2.6313 2.6408 2.6350	2.6976 2.6957 2.6959
100:0 80:20 60:40	7	0.3	2.7900 2.7710 2.7825	2.5806 2.6348 2.6270	2.6673 2.6917 2.6919
100:0 80:20 60:40	28	0.3	2.7960 2.7960 2.7960	2.5814 2.6068 2.5681	2.6695 2.6850 2.6620

คือ 1.27 และ 1.68 % แต่เมื่อการบ่มสูงขึ้นเป็น 3, 7, 28 วัน การเกิดปฏิกิริยามากขึ้นจึงเหลือปริมาณน้ำในส่วนผสมของมวลรวมหยาบและละเอียดลดลง ในทางตรงกันที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์แกลบ 80:20, 60:40 ปริมาณน้ำที่ยังคงเหลืออยู่จะลดลง เมื่อเวลาการบ่มนานขึ้น

จากการพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมหยาบและละเอียด ที่การบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน จะพบว่า ปริมาณความชื้นของมวลรวมหยาบจะมีค่าน้อยกว่ามวลรวมละเอียด สาเหตุเนื่องจากมวลรวมละเอียดมีขนาดเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวมากกว่าและต้องการน้ำเพื่อมาเคลือบผิวสูงกว่า ทำให้เหลือน้ำสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยกว่า ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงเป็นผลให้ปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้นของมวลรวมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซีเมนต์แกลบเพิ่มมากขึ้นที่การบ่ม 1 วัน เมื่ออัตราส่วนปูนซีเมนต์:ซีเมนต์แกลบเท่ากับ 100:0 เปอร์เซ็นต์ ความชื้นของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดมีค่าเท่ากับ 1.27 และ 1.68 เมื่อซีเมนต์แกลบเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์:ปูนซีเมนต์เป็น 80:20 และ 60:40 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของมวลรวมหยาบและละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 1.31, 1.86 และ 0.35, 2.35 ตามลำดับ ที่การบ่ม 3, 7 และ 28 วัน ก็ให้ผลเช่นเดียวกันทั้งนี้เพราะปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็วกว่าซีเมนต์แกลบ (ปริญญ, 2528 และ Neville, 1981) จึงเหลือปริมาณน้ำในส่วนผสมน้อยกว่าและปริมาณน้ำที่เหลือจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณซีเมนต์แกลบสูงขึ้น

4.3 การหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบผิว

4.3.1 ปริมาณน้ำที่พอเหมาะสำหรับการเคลือบ

ให้ทำการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยสารซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, 0.4 ที่อายุการบ่ม 3 วัน สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นการเคลือบผิวมวลรวมหยาบ (น้ำหนักที่ค้ำตะแกรง 3/4" - เบอร์ 4) และมวลรวมละเอียด (ค้ำตะแกรงเบอร์ 8 - ถาดรองเป็นวัสดุอัดแทรก) พิจารณาการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยสารซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 ที่อายุการบ่ม 3 วัน โดยการสัมผัสด้วยมือและมองด้วยสายตา พบว่าผิวของมวลรวมหยาบมีความหยาบและขรุขระเพิ่มขึ้น ส่วนมวลรวมละเอียดมีความหยาบมากขึ้นและยังมีสารซีเมนต์ที่เหลือจากการอัดเกาะมวลรวมทำหน้าที่เป็นวัสดุอัดแทรกเพียงพอ ซึ่งทำให้สีของมวลรวมบางส่วนเปลี่ยนไปเป็นสีของซีเมนต์ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการทดสอบหาสัดส่วนขนาดคละ พบว่า การเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวล

รวมละเอียดมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับมวลรวมที่ปราศจากการเคลือบ ทั้งนี้ก็เพราะที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 มีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการดูดซึมของมวลรวมและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ จึงทำให้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารซีเมนต์มีความพอดี และมีมวลรวมที่มีส่วนละเอียดยังคงเหลืออยู่ ดังนั้นการเคลือบผิวมวลรวมจึงมีความเหมาะสมที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.3

แต่เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จากการสัมผัสด้วยมือใน ผิวของมวลรวมหยาบมีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น มีปริมาณการเคลือบผิวเพิ่มสูงขึ้นส่วนมวลรวมละเอียดจะเกิดการเกาะตัวของมวลรวมที่มีส่วนละเอียดมาก เกาะบนผิวของมวลรวมที่มีขนาดโตกว่า ทำให้ขาดแคลนมวลรวมหยาบขนาดเล็กกว่า (ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 4) และมวลรวมละเอียด(ส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 50 - ส่วนที่เป็นวัสดุอัดแทรก) ทั้งนี้ก็เพราะที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.4 นั้น มีปริมาณน้ำมาก ทำให้ส่วนที่มีขนาดเล็กและส่วนละเอียด ในขณะเปียกขึ้นเกาะบนผิวที่มีขนาดโต และจับกันเป็นก้อนที่มีขนาดโตขึ้น โดยแรงยึดเกาะที่เกิดจากความชื้น และปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลให้มวลรวมที่มีส่วนละเอียดและวัสดุอัดแทรกขาดหายไป

4.3.2 สัดส่วนขนาดผละของมวลรวมที่ถูกเคลือบผิวที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 และ 0.4

สัดส่วนขนาดผละของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ถูกเคลือบผิวด้วยสารซีเมนต์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ที่การบ่มคงที่ 3 วัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

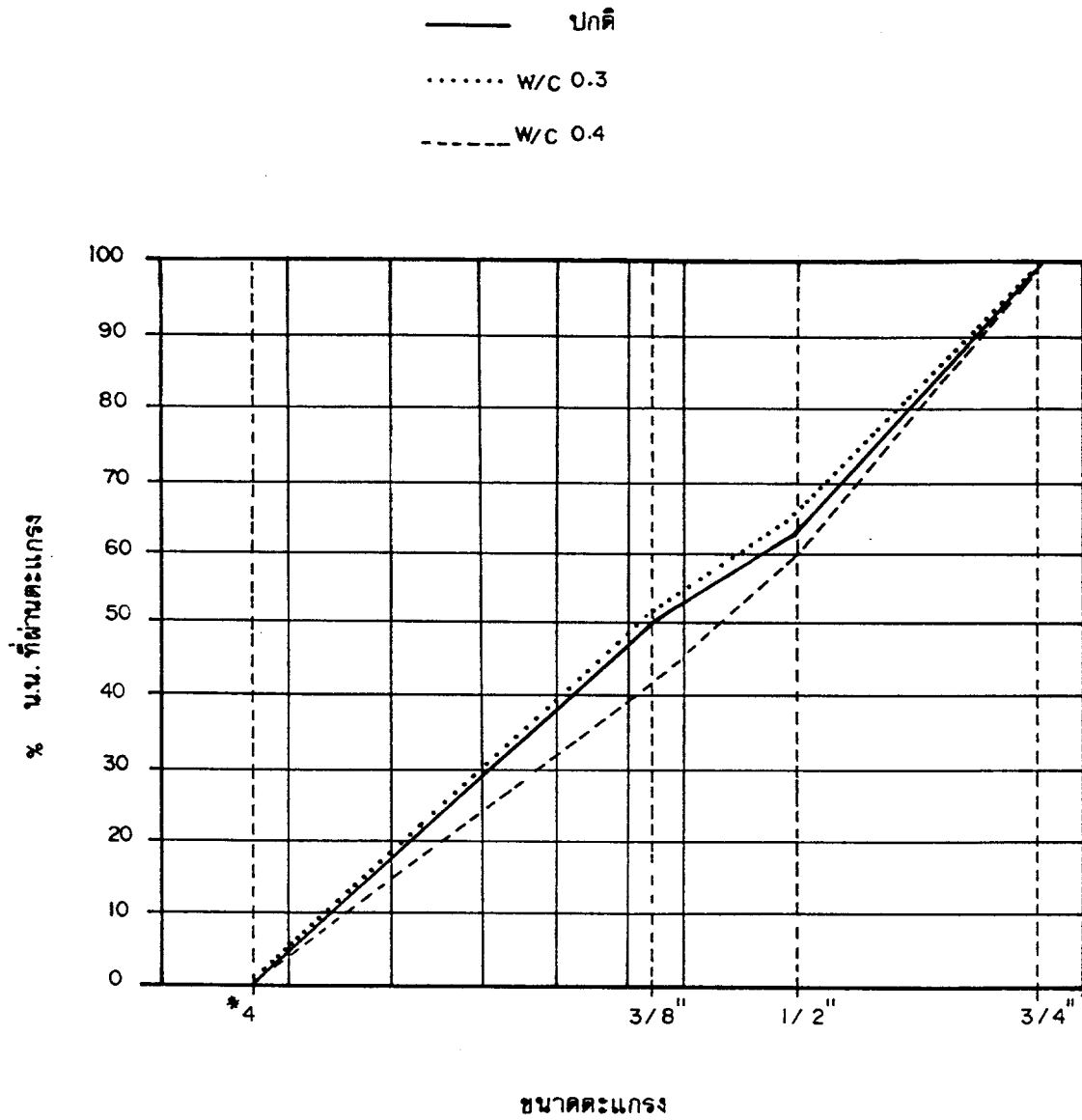
จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าเส้นแสดงสัดส่วนขนาดผละของมวลรวมหยาบ ที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.3 จะอยู่เหนือเส้นสัดส่วนขนาดผละของมวลรวมหยาบที่ปราศจากการเคลือบผิวเล็กน้อยและที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.4 เส้นแสดงสัดส่วนขนาดผละจะอยู่ใต้เส้นสัดส่วนขนาดผละที่ปราศจากการเคลือบผิว ทั้งนี้เพราะ ที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.3 จะทำให้ปริมาณน้ำพอดีที่ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเป็นผลให้มวลรวมหยาบที่ถูกเคลือบผิวได้สม่ำเสมอ ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ 0.4 ซึ่งปริมาณน้ำมีมากเกินไปความต้องการในการทำปฏิกิริยา จะทำให้มวลรวมที่มีขนาดเล็กไปยึดเกาะบนผิวมวลรวมที่มีขนาดโตกว่า ทำให้ขาดแคลนส่วนเป็นขนาดเล็กในมวลรวมเป็นผลให้เส้นกราฟแสดงสัดส่วนขนาดผละต่ำลง ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.3.1

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่เพิ่มขึ้นหลังการเคลือบด้วย 44
 สารซีเมนต์ที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3
 และ 0.4 ที่อายุการบ่ม 3 วัน

อัตราส่วนน้ำ/ ปูนซีเมนต์ ขนาดตะแกรง	มวลรวมหยาบ		มวลรวมละเอียด	
	0.3	0.4	0.3	0.4
3/4"	-	-	-	-
1/2"	5.3	29.5	-	-
3/8"	10.4	37.9	-	-
เบอร์ 4	27.3	-23.1	-	-
ผาดรอง	3.0	2.1	-	-
รวมน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น	46.0	46.4	-	-
เบอร์ 8	-	-	9.2	12.9
16	-	-	13.2	15.8
30	-	-	5.6	9.9
50	-	-	6.1	11.8
100	-	-	8.5	7.7
200	-	-	4.0	2.9
ผาดรอง	-	-	12.5	-1.7
รวมน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น	-	-	59.1	59.8

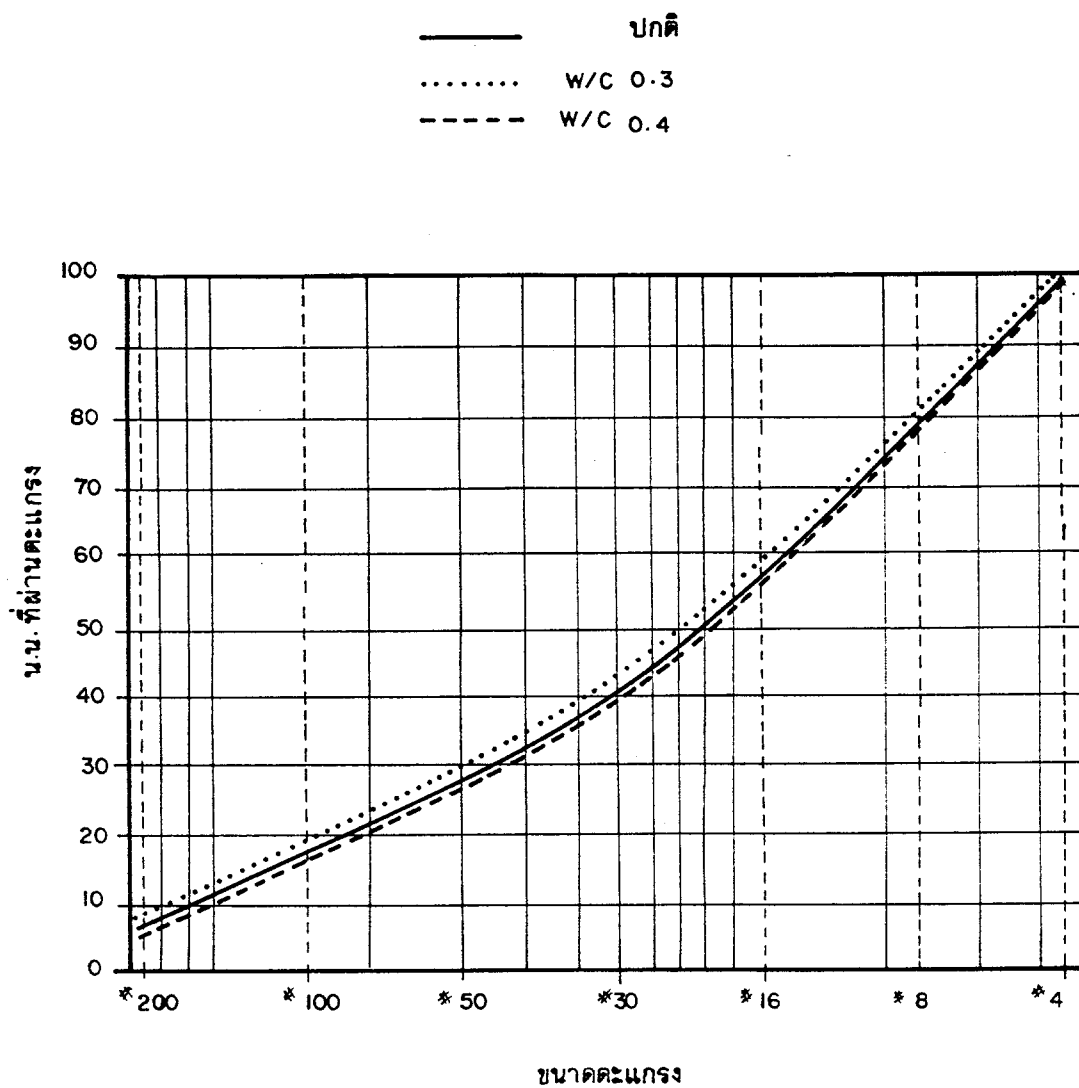
- หมายเหตุ 1) ปริมาณมวลรวมหยาบ 475 กรัม ซีเมนต์ 41.28 กรัม น้ำ (W/C 0.3,0.4) เท่ากับ 12.38 และ 16.51 กรัม
- 2) มวลรวมละเอียด 629 กรัม ซีเมนต์ 54.72 กรัม และน้ำ (W/C 0.3,0.4) เท่ากับ 16.42 และ 21.89 กรัม
- 3) หน่วยน้ำหนักมีหน่วยเป็นกรัม
- 4) เครื่องหมายลบ แสดงถึง น้ำหนักที่ลดลง

เส้นแสดงสัดส่วนขนาดกะมะวลรวมหยาบ



รูปที่ 4.1 รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดกะมะวลรวมหยาบที่ปราศจากการ
 เคลือบและสัดส่วนขนาดกะมะวลรวมหยาบ ซึ่งถูกเคลือบผิว
 ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, 0.4 อายุการบ่ม 3 วัน

เส้นแสดงสัดส่วนขนาดกะมวรวมละเอียด



รูปที่ 4.2 รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดกะของมวลรวมละเอียดที่ปราศจากการ
 เคลือบและสัดส่วนขนาดกะของมวลรวมหยาบ ซึ่งถูกเคลือบผิวที่
 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, 0.4 อายุการบ่ม 3 วัน

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าเส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียด ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 จะอยู่เหนือเส้นสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่ปราศจากการเคลือบผิว และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 อยู่ใต้เส้นสัดส่วนขนาดคละปราศจากการเคลือบผิว ซึ่งทั้งนี้เพราะการเคลือบผิวมวลรวมละเอียดด้วยสารซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 การบ่มคงที่ 3 วัน เป็นอัตราส่วนที่พอดีกับการดูดซึมของมวลรวมละเอียดและปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้เส้นกราฟแสดงสัดส่วนขนาดคละอยู่เหนือเส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละที่ปราศจากการเคลือบอย่างสม่ำเสมอ ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 เส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละมวลรวมจะอยู่ใต้เส้นสัดส่วนขนาดคละที่ปราศจากการเคลือบผิว เมื่อพิจารณาจากส่วนที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 30 - เบอร์ 4 เส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละจะอยู่ใกล้ขีดเส้นสัดส่วนขนาดคละที่ปราศจากการเคลือบ สาเหตุมาจากปริมาณน้ำมีมากเกินไปเกินความต้องการในการทำปฏิกิริยา ทำให้มวลรวมละเอียดที่มีขนาดเล็กไปยึดเกาะบนผิวมวลรวมที่มีขนาดใหญ่กว่า คือ ตั้งแต่เบอร์ 30 - เบอร์ 200 เส้นกราฟต่ำลงมาก ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3.1

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบเส้นสัดส่วนขนาดคละที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 และ 0.4 จะพบว่า การเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยสารซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.3 จะทำให้สัดส่วนขนาดคละที่ได้มีความเหมาะสมในการเคลือบ

4.3.3 คุณสมบัติของคอนกรีตแอสฟัลท์ที่ทำจากมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ถูกเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลการทดสอบมาร์แชลล์ประกอบด้วย ค่าเสถียรภาพ ค่าการยุบตัว ค่าโพรงอากาศ ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม ค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์ ได้ทำการทดสอบคอนกรีตแอสฟัลท์ที่ทำจากมวลรวมเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ล้วน ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 และ 0.4 และบ่มที่อายุ 3 วัน เพื่อเลือกหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เหมาะสม ผลการทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.3 ก.-ง

รูปที่ 4.3 ก. แสดงค่าเสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลท์ จะเห็นได้ว่า ในช่วงแรกเมื่อเพิ่มปริมาณปริมาณยางแอสฟัลท์ ค่าเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด แล้วค่าเสถียรภาพจะค่อย ๆ ลดลงในช่วงแรกส่วนผสมปริมาณยางแอสฟัลท์น้อย ทำให้ไม่พอเพียงต่อการยึดเกาะของมวลรวม แต่เมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มขึ้นจนพอดีกับการเคลือบผิวมวลรวม ยึดเกาะและประสานมวลรวมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ค่าเสถียรภาพของแอสฟัลท์คอนกรีตสูงสุด และ

เมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มขึ้นมากเกินไปทำให้การขัดกันระหว่างมวลรวมลดลง และค่าเสถียรภาพจะลดลงด้วย

ค่าเสถียรภาพสูงสุดที่ปราศจากการเคลือบผิวด้วยสารซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 3180 ปอนด์ และเพิ่มขึ้นเป็น 3450 ปอนด์ เมื่อเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 ทั้งนี้เนื่องจากการที่ส่วนผสมคอนกรีตแอสฟัลท์ใช้มวลรวมที่มีขนาดละเอียดแน่นและการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดทำให้ผิวของมวลรวมหยาบมีเหลี่ยมมุมมากขึ้นเกิดการขัดกันของมวลรวมมากขึ้นและส่วนผสมมีความแน่นขึ้นเป็นผลให้ต้องใช้ยางแอสฟัลท์สูงขึ้นเป็นประมาณ 5.5 - 6.0 เปอร์เซ็นต์ในส่วนผสม เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์เป็น 0.4, ค่าเสถียรภาพสูงสุดลดลงเป็น 2820 ปอนด์ ซึ่งเกิดจากส่วนที่เป็นเม็ดเล็กของมวลรวมหยาบและส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดของมวลรวมละเอียด รวมทั้งส่วนที่เป็นวัสดุยึดแทรกเกิดการยึดเกาะบนผิวมวลรวมที่มีขนาดโตกว่า เป็นผลให้ขาดแคลนส่วนที่เป็นเม็ดเล็กและเม็ดละเอียดในสัดส่วนขนาดละเอียด ดังที่กล่าวมาแล้วทำให้ค่าเสถียรภาพลดลง และจากการที่มวลรวมขนาดเล็กไปยึดเกาะบนผิวมวลรวมที่โตกว่า ทำให้พื้นที่ผิวลดลงปริมาณยางที่ใช้เคลือบผิวลดลงเป็นเพียงประมาณ 5.0 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

รูปที่ 4.3 ข. แสดงค่าการยุบตัวของคอนกรีตแอสฟัลท์ จะเห็นได้ว่าค่าการยุบตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์เป็นการลดการขัดกันระหว่างอนุภาคของมวลรวม ทำให้การเคลื่อนตัวของมวลรวมง่ายมากขึ้น เป็นผลให้การยุบตัวมีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณยางแอสฟัลท์

การเคลือบผิวมวลรวมทำให้ค่าการยุบตัวลดลง เนื่องจากผิวของมวลรวมหยาบ และผิวของมวลรวมละเอียดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4-ค้ำตะแกรงเบอร์ 30 จะมีความหยาบและเพิ่มเหลี่ยมมุมมากขึ้นทำให้เกิดการขัดกันของมวลรวมและเลื่อนตัวผ่านกันของมวลรวมยากมากขึ้น ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 มวลรวมมีส่วนที่เป็นเม็ดละเอียดที่หนาที่ เป็นวัสดุยึดแทรกและหล่อลื่นทำให้ค่าการยุบตัวสูงกว่า (ชัชชาญ, 2530) ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดได้สมบูรณ์กว่าผิวของมวลรวมมีความหยาบ และขรุขระมากขึ้นนอกจากนี้ ส่วนละเอียดของมวลรวมที่เหลือเป็นวัสดุยึดแทรกลดลงซึ่งทำให้ค่าการยุบตัวลดลง

จากรูปที่ 4.3 ค. ค่าโพรงอากาศจะลดลง เมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้บดอัดง่ายขึ้น และยางแอสฟัลท์ที่เพิ่มจะทำให้ปริมาณโพรงอากาศลดลง ทั้งนี้การเคลือบผิวมวลรวมทำให้ค่าโพรงอากาศเพิ่มขึ้นเนื่องจากการ

เคลื่อนผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยปูนซีเมนต์นั้นเป็นเพิ่มความหยาบและเหลี่ยมมุมของมวลรวม ทำให้เกิดปริมาณโพรงอากาศสูงเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4. จะให้ค่าโพรงอากาศสูงกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3 ทั้งนี้จากการที่อัตราส่วน 0.3 จะมีปริมาณน้ำพอเพียงแก่การเคลื่อนผิวมวลรวมละเอียดปิดเกาะบนผิวมวลรวมหยาบไม่สมบูรณ์ทำให้โพรงอากาศเพิ่มขึ้นไม่มาก ซึ่งจะลดโพรงอากาศลงแต่เมื่อมีปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นเป็น 0.4 การเคลื่อนผิวสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้ปริมาณโพรงอากาศเพิ่มสูงขึ้นอีก

รูปที่ 4.3 ง. แสดงค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกการเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์ทำให้เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์อีก ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวมจะเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงแรกการเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์นั้นทำให้การบดอัดง่ายขึ้น เนื่องจากยางแอสฟัลท์ทำหน้าที่หล่อลื่นช่องว่างระหว่างมวลรวมจึงลดลง แต่ในช่วงหลังเมื่อเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์มากขึ้นปริมาณยางจะมีมากเกินไปและเข้าไปเพิ่มช่องว่างระหว่างมวลรวม

ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวมของมวลรวมของคอนกรีตแอสฟัลท์ที่ทำจากมวลรวมเคลื่อนที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.3, และ 0.4 จะมีค่าสูงกว่ามวลรวมที่ปราศจากการเคลื่อนผิว โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.4 ให้ค่าสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 ซึ่งผลที่ได้ก็สอดคล้องกับผลของค่าโพรงอากาศ

รูปที่ 4.3 จ. แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์ จะเห็นได้ว่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์สูงขึ้นเมื่อปริมาณยางแอสฟัลท์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากปริมาณยางแอสฟัลท์มากขึ้นและค่าที่ได้รับคำนวณมาจากค่าโพรงอากาศ (รูปที่ 4.3 ค.) และค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม (รูป 4.3 ง.) รูปที่ 4.3 ฉ. แสดงค่าหน่วยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกเมื่อเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์มากขึ้น จะทำให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุด และเพิ่มปริมาณยางแอสฟัลท์ขึ้นอีก จะทำให้หน่วยน้ำหนักเริ่มลดลง ทั้งนี้ก็เพราะการเพิ่มปริมาณยางในช่วงแรกเป็นการลดโพรงอากาศทำให้หน่วยน้ำหนักสูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณยางในช่วงหลังทำให้ปริมาณยางมากเกินไป เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักลดลง เนื่องจากยางแอสฟัลท์มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 จะพบว่าจาก เส้นกราฟเมื่อเพิ่มปริมาณยางมากขึ้น จะทำให้หน่วยน้ำหนักเพิ่มตามด้วย ค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุด อยู่ที่ปริมาณยางแอสฟัลท์เกิน 7 % ซึ่งสูงกว่าค่าที่ทำการทดสอบ

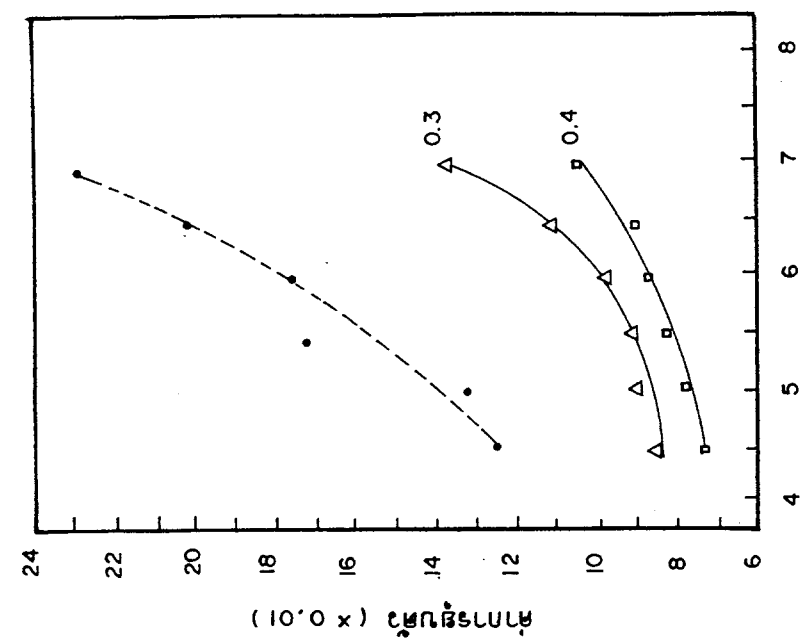
ค่าหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่ปราศจากการเคลือบผิว มีค่าสูงสุด 154.5 ปอนด์/ฟุต³ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสูงสุดของมวลรวมที่ถูกเคลือบผิวที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ตามลำดับ 0.3 และ 0.4 ซึ่งมีค่าประมาณเท่ากับ 150 ปอนด์/ฟุต³ และ 145 ปอนด์/ฟุต³ ค่าความถ่วงจำเพาะของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่ถูกเคลือบลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าหน่วยน้ำหนักสูงสุดของคอนกรีตแอสฟัลท์ที่เคลือบที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.4 จึงมีค่าต่ำสุด

การทดสอบมาร์แชลล์ ในส่วนนี้เป็นการเลือกหาอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ที่เหมาะสมจากอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.3 และ 0.4 โดยเปรียบเทียบกับมวลรวมที่ปราศจากการเคลือบผิวพบว่า ค่าอัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.3 ให้ค่าเสถียรภาพสูงสุด คือ 3450 ปอนด์ โดยเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดเคลือบผิวด้วยสารซีเมนต์ 8 % โดยน้ำหนักส่วนผสม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์กับข้อกำหนดพบว่า การเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยสารซีเมนต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.3 และ 0.4 ทำให้ค่าเสถียรภาพมีค่าสูงสุดสูงกว่าข้อกำหนดของการออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ และที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.3 ค่าการยุบตัวและค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม ได้ตรงตามข้อกำหนด และค่าโพรงอากาศและค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์มีค่ากว้างกว่าข้อกำหนด ส่วนที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.4 ค่าการยุบตัวสูงกว่าข้อกำหนดเล็กน้อย ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวมตรงตามข้อกำหนด ค่าโพรงอากาศสูงกว่าข้อกำหนด และค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่ต่ำกว่าข้อกำหนด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบมาร์แชลล์ในการเคลือบมวลรวมหยาบและละเอียดโดยใช้ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 100:0 แสดงว่าที่การบ่มคงที่ 3 วัน และที่อัตราส่วนน้ำต่อน้ำซีเมนต์ 0.3 เหมาะสมกว่า

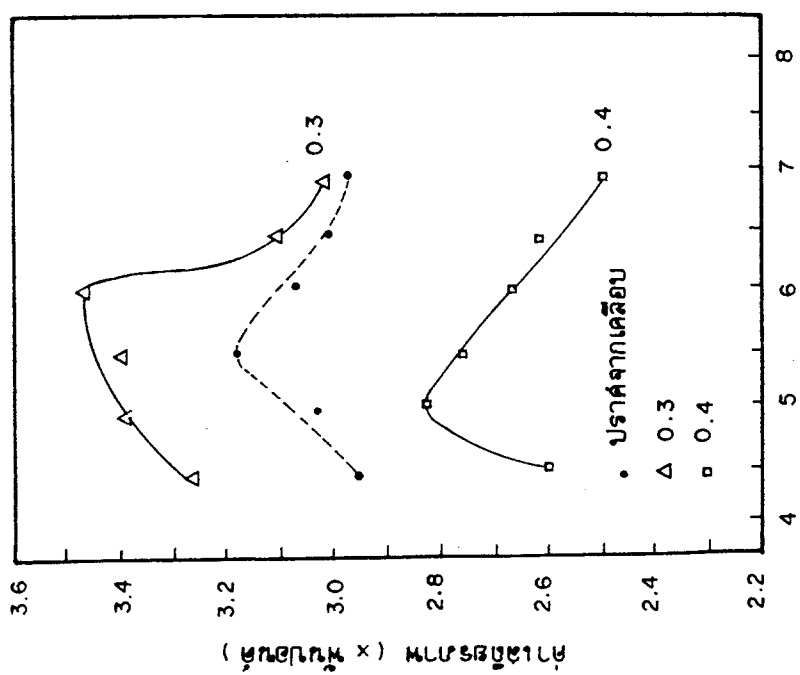
ตารางที่ 4.5 สรุปผลการทดสอบมาร์แชลล์ในการเคลือบมวลรวมหยาบและละเอียดโดยใช้ปูนซีเมนต์
 ต่อซีเมนต์ลอย 100:0 ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 และที่การบ่มคงที่ 3 วัน
 และปราศจากการเคลือบ

คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์		
		0.3	0.4	ไม่เคลือบ
ค่าเสถียรภาพสูงสุด (ปอนด์)	> 750	3450	2820	3150
ค่าการยุบตัว (x0.01 นิ้ว)	8-16	8.5-13.5	7.3-10.3	12.0-22.8
% โพรงอากาศ	3-5	1.4-8.0	4.6-9.5	0.2-3.6
% ช่องว่างระหว่างมวลรวมต่ำสุด	> 14	17.5-17.8	19.1-20.0	14.0-16.6
% ช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์	75-85	56-92	50-77	74-99



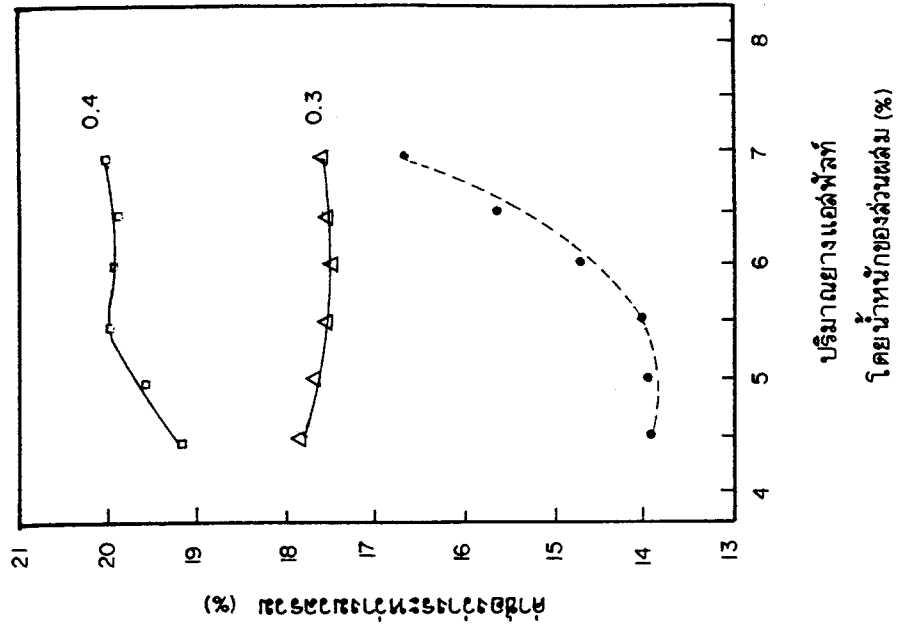
ปริมาณน้ำของส่วนผสม (%)
โดยน้ำหนักของส่วนผสม (%)

รูปที่ 4.3 ข. ค่าการยุบตัว

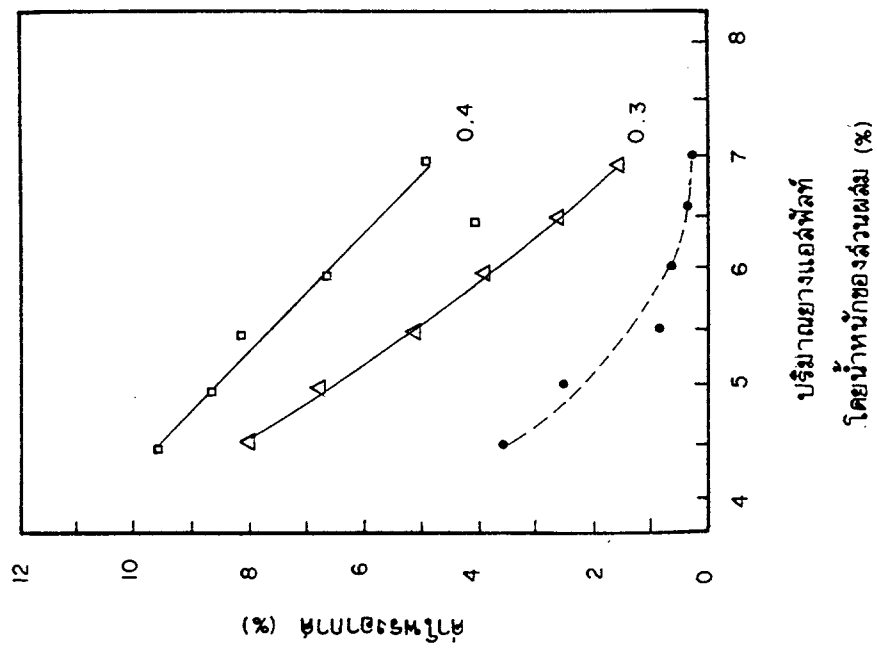


ปริมาณน้ำของส่วนผสม (%)
โดยน้ำหนักของส่วนผสม (%)

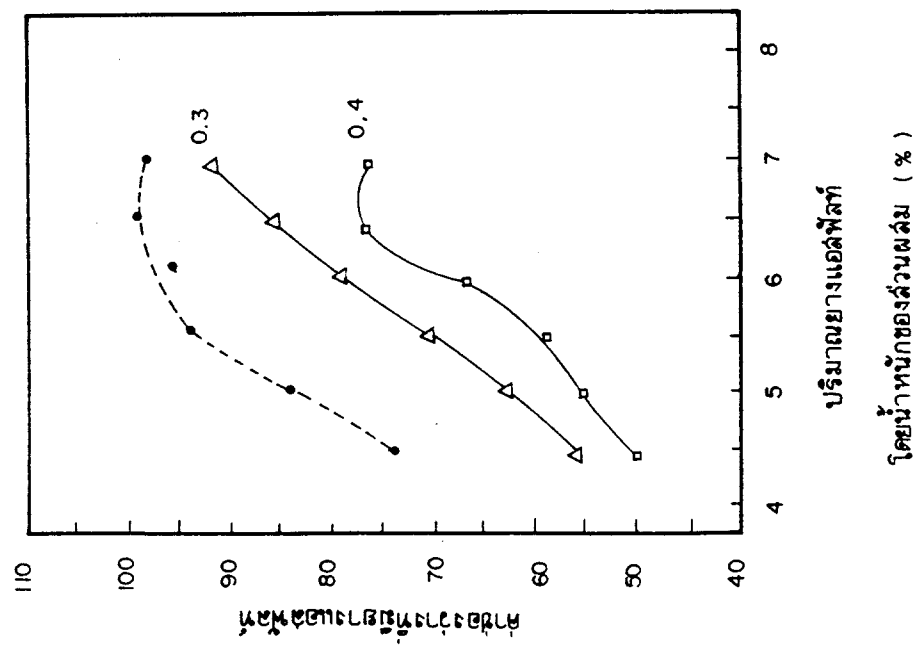
รูปที่ 4.3 ก. ค่าเสถียรภาพ



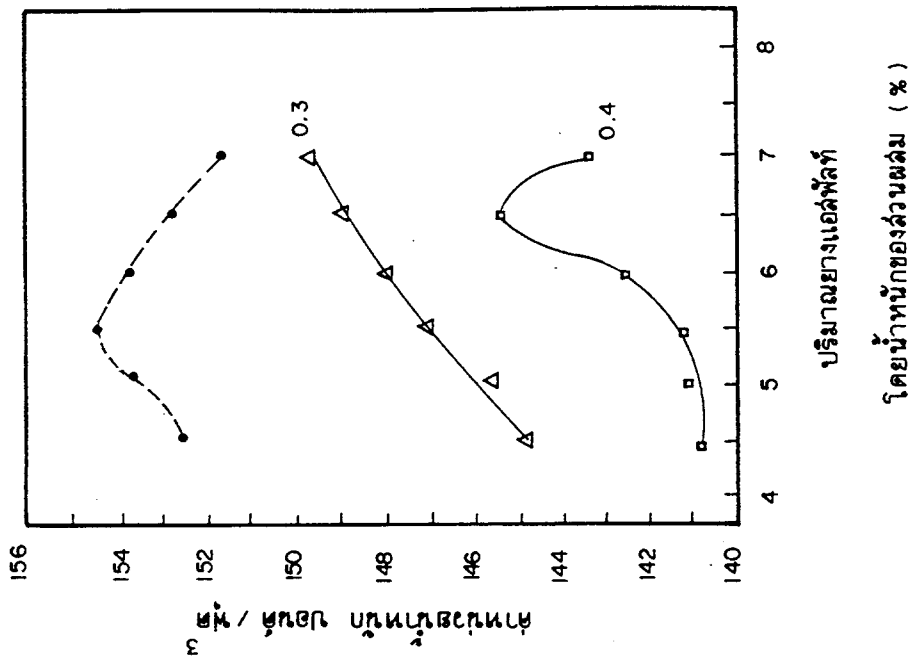
รูปที่ 4.3 จ. ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม



รูปที่ 4.3 ค. ค่าโพรงอากาศ



รูปที่ 4.3 จ. ค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์



รูปที่ 4.3 จ. ค่าหน่วยน้ำหนัก

4.4 การเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์เถ้าลอยสำหรับคอนกรีตแอสฟัลท์

ได้ทำการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์เถ้าลอยที่อัตราส่วน 100:0, 80:20 และ 60:40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ 0.3 โดยใช้การบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน

4.4.1 สัดส่วนขนาดผลของมวลรวมที่เปลี่ยนไป

สัดส่วนขนาดผลของมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์เถ้าลอยที่เปลี่ยนไป ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ผสมซีเมนต์เถ้าลอย 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ 4.7 และรูปที่ 4.4 ก.ข.ค. และ 4.5 ก.ข.ค.

ตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงน้ำหนักของมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่เปลี่ยนไปหลังการเคลือบผิวที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ ที่อายุการบ่มต่ำ (1 วัน) การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์และเคลือบผิวมวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดที่มีขนาดโตไม่แข็งแรงเกิดการหลุดลอกไปค้างบนตะแกรงที่มีขนาดเล็กลง ทำให้มีปริมาณมวลรวมละเอียดและวัสดุยึดแทรกเพิ่มขึ้น แต่เมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น (3 และ 7 วัน) การทำปฏิกิริยาของสารซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น การยึดเกาะของสารซีเมนต์บนผิวที่มีขนาดโตแข็งแรงยิ่งขึ้นการหลุดลอกเกิดขึ้นได้ยากขึ้น ทำให้ส่วนที่เป็นวัสดุยึดแทรกลดลง และลดลงมากที่สุดเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้นเป็น 28 วัน ทำให้มวลรวมละเอียดลดลง

เมื่อพิจารณาเส้นแสดงสัดส่วนขนาดผล ดังแสดงไว้ในรูปกราฟที่ 4.4 ก.ข.ค. รูปกราฟ แสดงสัดส่วนขนาดผลของมวลรวมหยาบซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เถ้าลอย 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนผสม เส้นแสดงสัดส่วนขนาดผลที่ถูกเคลือบใกล้เคียงกัน และอยู่เหนือเส้นแสดงสัดส่วนของมวลรวมที่ปราศจากการเคลือบผิว และเส้นกราฟจะลดลงเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะการเคลือบผิวทำให้ผิวมวลรวมหยาบมีความขรุขระและหยาบขึ้นที่อายุการบ่มต่ำคือ 1 วัน การหลุดลอกมากที่สุด ทำให้ค่าสัดส่วนขนาดผลละเอียดขึ้น และกราฟสูงขึ้น และเมื่ออายุการบ่มเพิ่มสูงขึ้นเป็น 3, 7 และ 28 วัน การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์มากขึ้นทำให้การเคลือบผิวมวลรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น และปริมาณวัสดุยึดแทรกลดลงเป็นผลให้สัดส่วนขนาดผลหยาบขึ้น และเส้นกราฟลดลงตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่เปลี่ยนไปหลังการเคลือบผิวที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ

	น้ำหนักของมวลรวมหยาบที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ											
ปูนซีเมนต์: ซีเมนต์ลอย	100:0				80:20				60:40			
น้ำ/ปูนซีเมนต์	0.3				0.3				0.3			
ขนาด ตะแกรง	ที่อายุการบ่ม (วัน)											
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
3/4"	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1/2"	4.5	5.3	7.3	8.0	3.7	6.0	8.1	10.5	2.8	5.4	7.5	4.5
3/8"	8.9	10.4	11.2	13.1	8.4	9.9	10.8	17.5	8.0	13.2	15.0	19.0
เบอร์ 4	29.8	27.3	24.7	22.0	29.2	24.2	22.5	15.6	28.6	25.7	23.2	21.0
ผาดรอง	3.4	3.0	3.0	2.0	4.2	3.5	3.1	1.5	5.0	4.3	3.6	2.9
น.น. ที่เพิ่มขึ้น	46.6	46.0	46.0	46.0	45.5	44.6	43.5	45.1	44.4	44.6	45.3	43.4

หมายเหตุ 1) ปริมาณมวลรวมหยาบ 475 กรัม และน้ำ 12.38 กรัม

2) อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์

100:0 , ปูนซีเมนต์ 41.28 กรัม

80:20 , ปูนซีเมนต์ 33.02 กรัม ซีเมนต์ 8.26 กรัม

60:40 , ปูนซีเมนต์ 24.77 กรัม ซีเมนต์ 16.51 กรัม

3) น้ำหนักมีหน่วยเป็น กรัม

ตารางที่ 4.7 น้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่เปลี่ยนไปหลังการเคลือบผิวที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ

	น้ำหนักของมวลรวมละเอียดที่ขนาดตะแกรงต่าง ๆ											
ปูนซีเมนต์: ซีเมนต์ลอย	100:0				80:20				60:40			
น้ำ/ปูนซีเมนต์	0.3				0.3				0.3			
ขนาดตะแกรง	ที่อายุการบ่ม (วัน)											
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
เบอร์ 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	8.1	9.2	10.6	13.5	8.0	9.1	10.9	21.4	6.9	8.8	9.7	16.2
16	9.0	13.2	13.9	14.0	8.8	12.9	13.7	14.2	5.6	10.3	13.3	12.0
30	3.0	5.6	7.0	14.6	2.9	4.4	7.4	10.1	2.7	4.1	6.8	11.8
50	7.6	6.1	5.7	4.8	6.5	5.1	4.8	-2.0	7.3	6.7	4.9	-0.70
100	8.8	8.5	7.8	5.7	9.3	8.7	6.9	2.0	8.9	8.1	6.7	2.5
200	6.7	4.0	2.5	-0.6	7.5	6.3	4.3	3.9	8.0	6.7	4.3	3.4
ถาดรอง	13.7	12.5	10.8	9.2	15.0	12.6	10.8	9.5	18.3	14.4	12.0	11.8
น.น. รวม	56.9	59.1	58.3	61.2	58.0	59.1	58.8	59.1	57.7	59.1	57.7	57.0

หมายเหตุ 1) ปริมาณมวลรวมละเอียด 629 กรัม และน้ำ 16.42 กรัม

100:0 ปูนซีเมนต์ 54.72 กรัม

80:20 ปูนซีเมนต์ 43.78 กรัม ซีเมนต์ลอย 10.94 กรัม

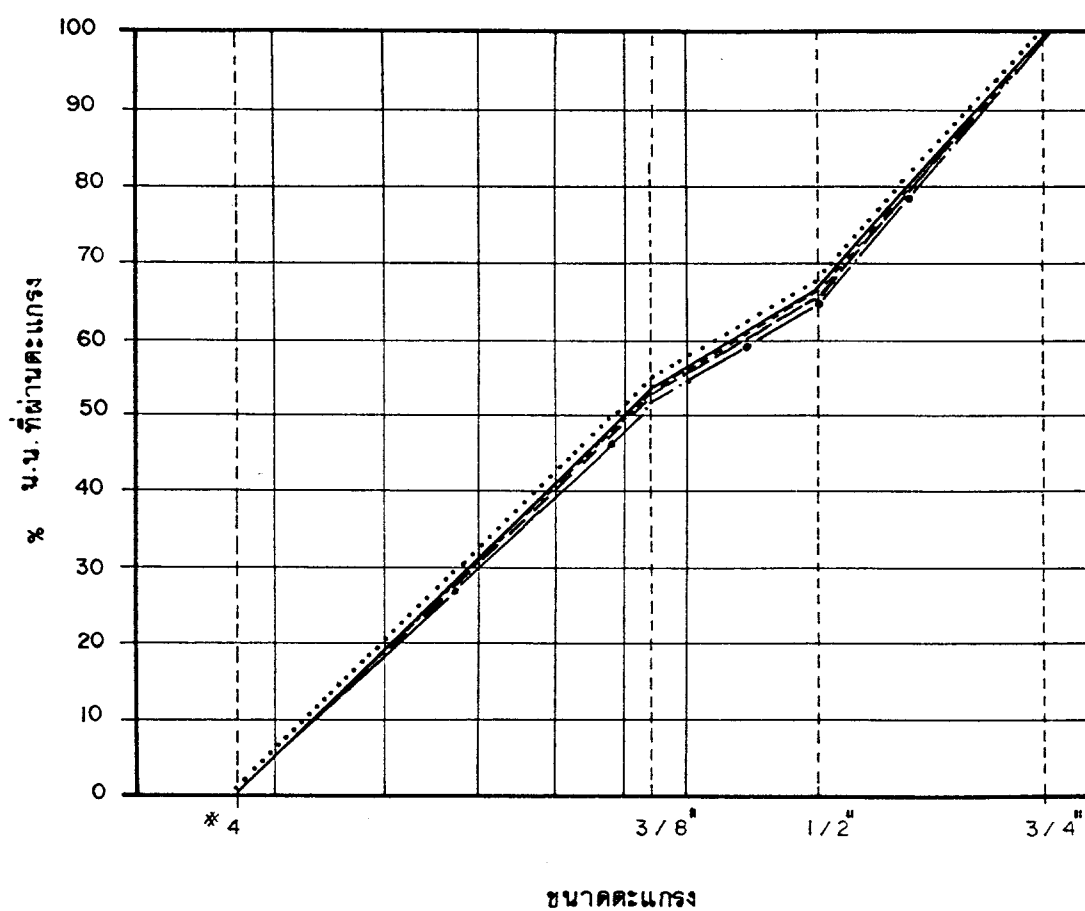
60:40 ปูนซีเมนต์ 32.83 กรัม ซีเมนต์ลอย 21.89

3) น้ำหนักมีหน่วยเป็นกรัม

4) เครื่องหมายลบ แสดงถึงน้ำหนักที่ลดลง

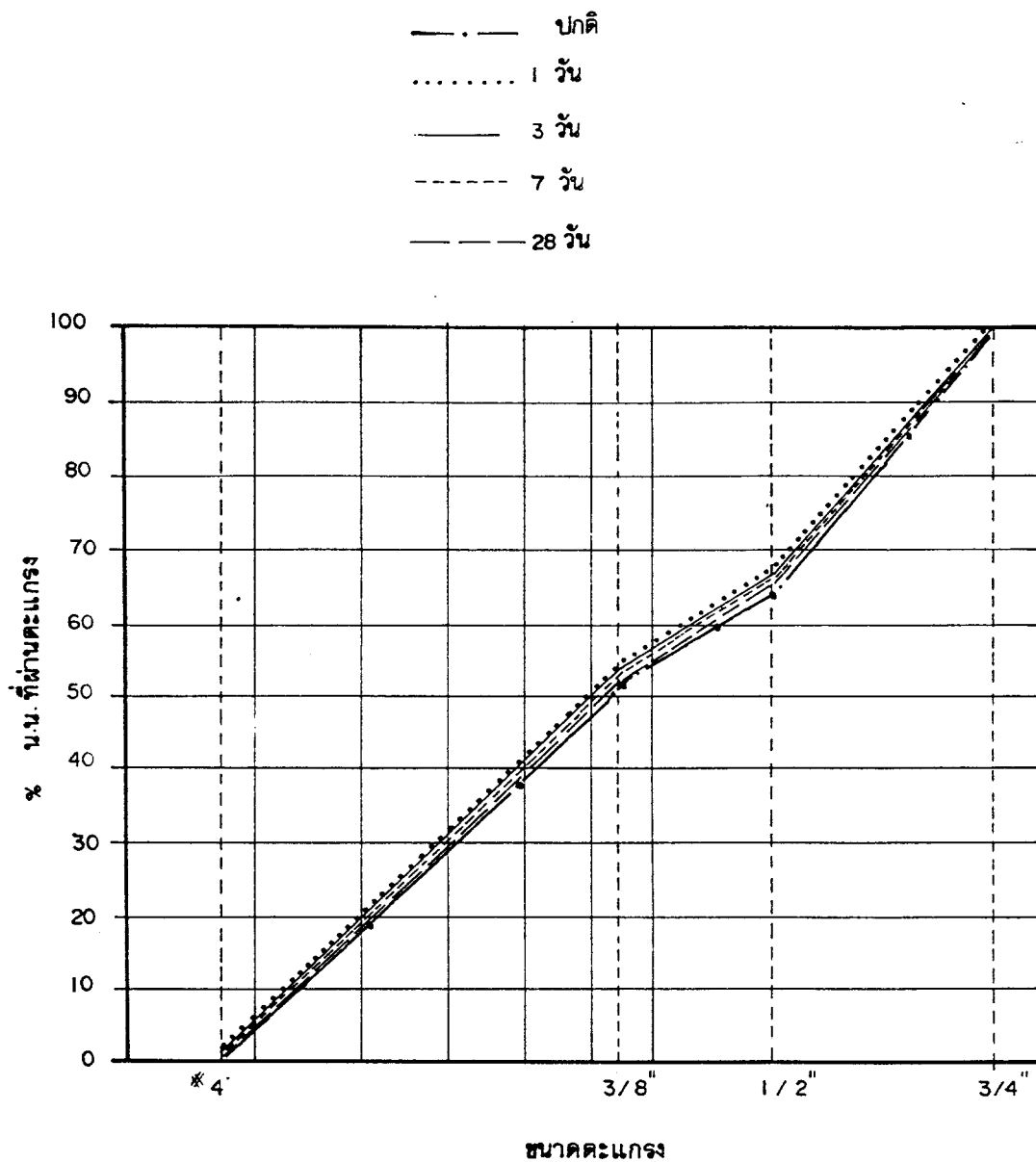
เส้นแสดงสัดส่วนขนาดกะมวลรวมหยาบ

— · —	ปกติ
.....	1 วัน
————	3 วัน
-----	7 วัน
— — — —	28 วัน



รูปที่ 4.4.ก รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดกะมวลรวมหยาบ ซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
ปูนซีเมนต์ค่อขี้เถ้าลอยเท่ากับ 100:0 ที่การบ่ม 1,3,7,28 วัน

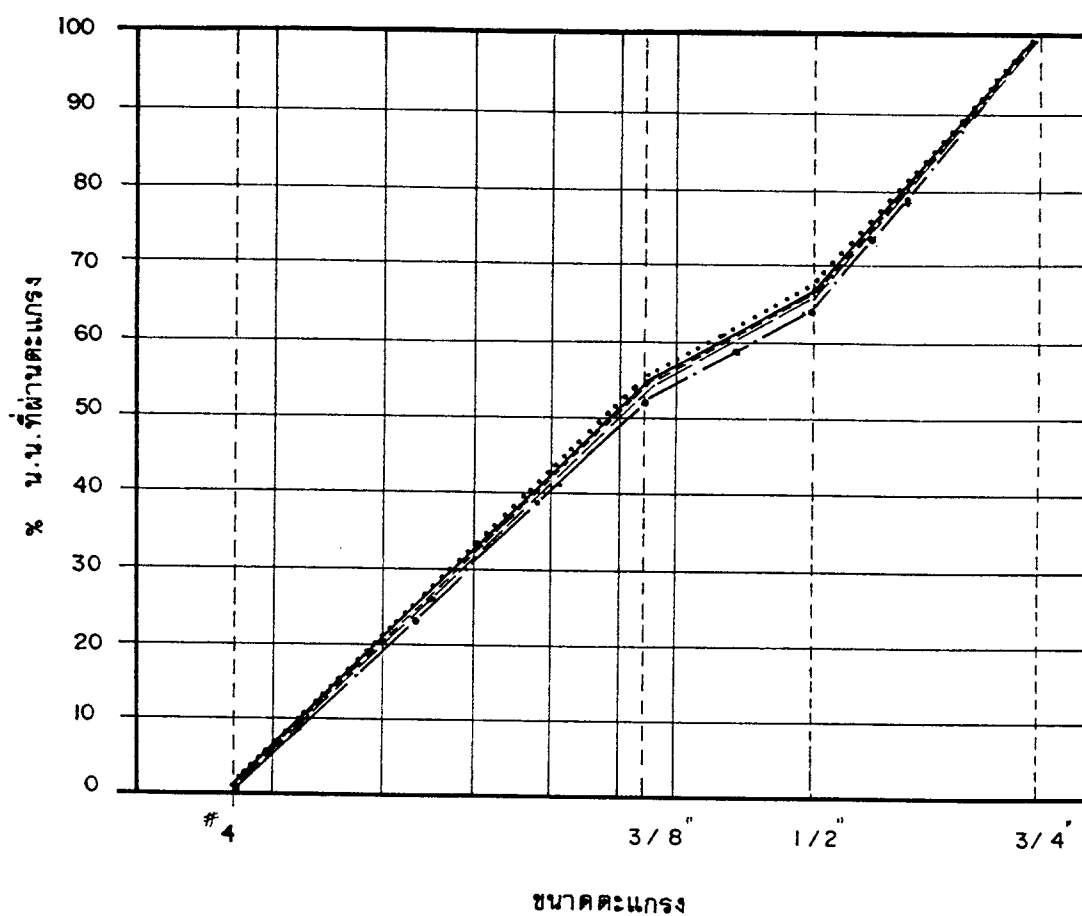
เส้นโค้งวัดสัดส่วนขนาดผลรวมรวมหยาบ



รูปที่ 4.4. ข รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดผลรวมรวมหยาบซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
 ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์เท่ากับ 80:20 ที่การบ่ม 1,3,7,28 วัน

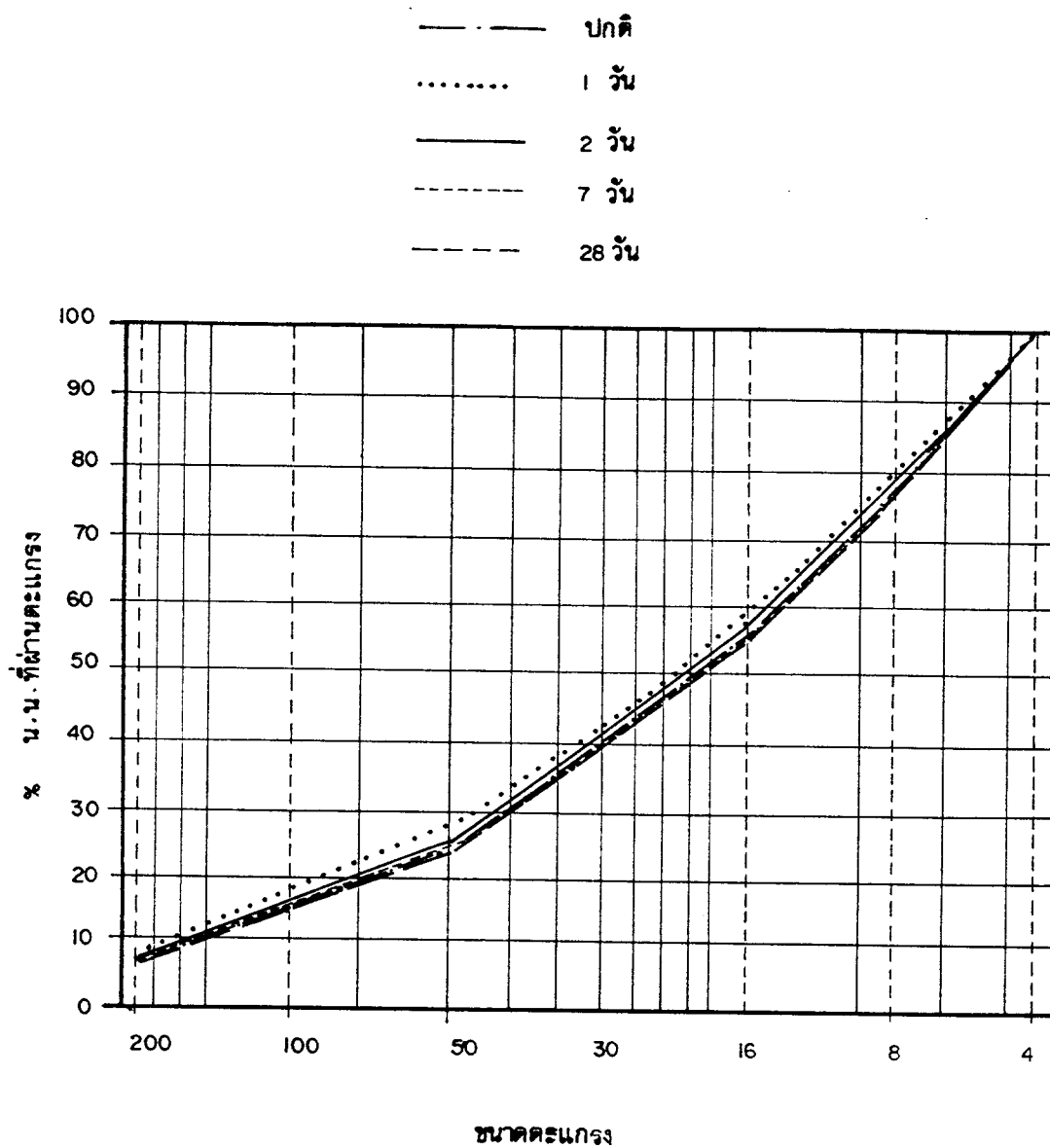
เส้นแสดงสัดส่วนขนาดของมวลรวมหยาบ

— . —	ปกติ
.....	1 วัน
————	3 วัน
-----	7 วัน
— — — —	28 วัน



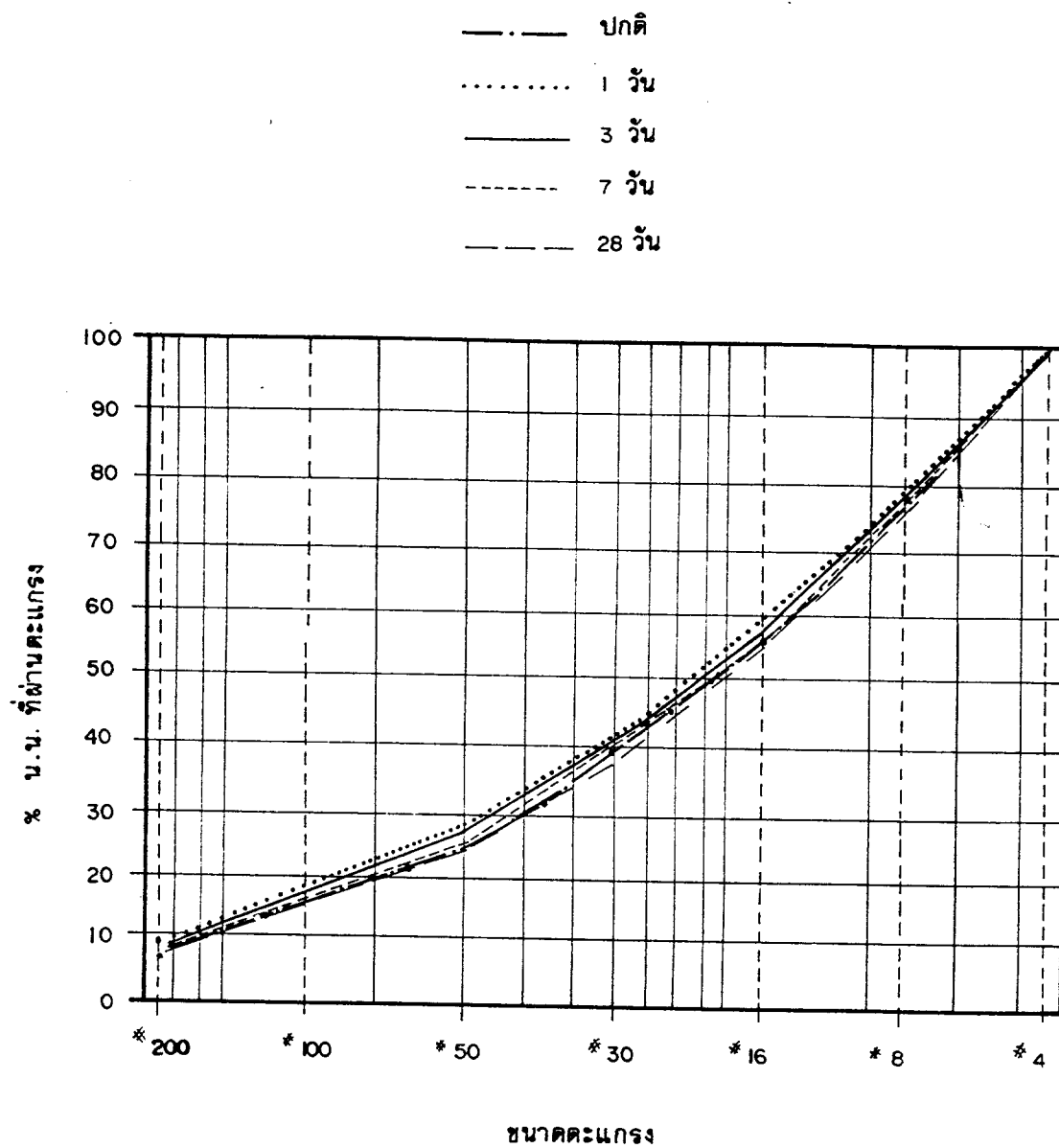
รูปที่ 4.4.ค รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดของมวลรวมหยาบซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ร้อยละ 60:40 ที่การบ่ม 1,3,7,28 วัน

เส้นแสดงสัดส่วนขนาดผลรวมมะเอียด



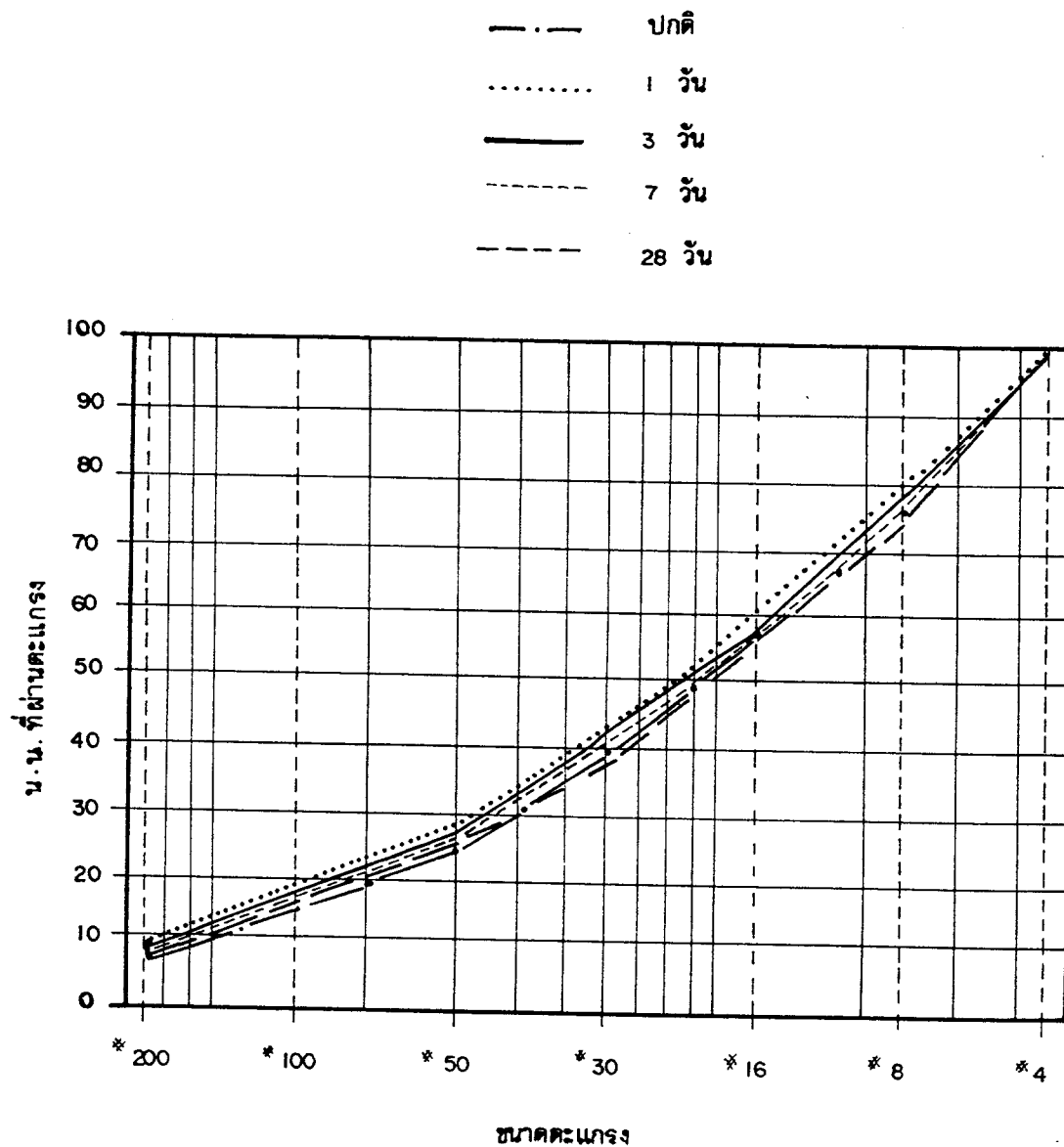
รูปที่ 4.5.ก รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดผลรวมมะเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
ปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ล้วนเท่ากับ 100:0 ที่การบ่ม 1,3,7,28 วัน

เส้นโค้งลัดคำนวณขนาดผลรวมละเอียด



รูปที่ 4.5.ข รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดผลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
 บุนนิเมนต์คอปเปอร์ที่ละลายเท่ากับ 80:20 ที่การบ่ม 1, 3, 7, 28 วัน

เส้นแสดงสัดส่วนขนาดกะมวลรวมละเอียด



รูปที่ 4.5.ค รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดกะมวลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวด้วย
 ปูนซีเมนต์คอกซ์ที่ละลายเท่ากับ 60:40 ที่การบ่ม 1,3,7,28 วัน

ในตนเองเดียวกัน รูปกราฟที่ 4.5 ก.ข.ค. รูปกราฟแสดงสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวด้วยปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่อายุการบ่ม 1,3,7 และ 28 วัน พบว่าทุกอัตราส่วนผสมเส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละมวลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบผิวที่อายุ 3 และ 7 วัน อยู่เหนือเส้นแสดงสัดส่วนขนาดคละของมวลรวมที่ปราศจากการเคลือบผิว ทั้งนี้ก็เพราะการเคลือบผิวมวลรวมละเอียด ทำให้มวลรวมละเอียดมีความหยาบขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้นการเคลือบผิวมวลรวมละเอียดมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้สารซีเมนต์ไปยึดเกาะบนมวลรวมละเอียดที่มีขนาดโตกว่าทำให้ขาดแคลนมวลรวมละเอียดและวัสดุอุดแทรกในบางส่วน จึงทำให้สัดส่วนขนาดคละหยาบขึ้น และเส้นสัดส่วนขนาดคละที่อายุการบ่ม 28 วัน ต่ำกว่าเส้นกราฟสัดส่วนขนาดคละที่ปราศจากการเคลือบผิว

การเคลือบผิวมวลรวมหยาบ และมวลรวมละเอียดด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ 100:0, 80:20 และ 60:40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.3 และที่อายุการบ่ม 1,3,7 และ 28 วัน ซึ่งใช้สัดส่วนขนาดคละที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่ามวลรวมหยาบซึ่งถูกเคลือบผิวมีการเคลือบผิวสม่ำเสมอและผิวหยาบเพิ่มขึ้น ส่วนมวลรวมละเอียดซึ่งถูกเคลือบที่อายุการบ่ม 1,3 และ 7 วัน ทำให้มวลรวมละเอียดมีความหยาบขึ้นและเพิ่มปริมาณส่วนละเอียดที่ตกน้ำที่เป็นวัสดุอุดแทรกมากขึ้น แต่เมื่ออายุการบ่มสูงขึ้นเป็น 28 วัน การยึดเกาะของสารซีเมนต์บนผิวมวลรวมละเอียดที่มีขนาดโตขึ้น มีผลให้มวลรวมละเอียดบางส่วนขาดหายไปบางส่วนในมวลรวมละเอียด แต่สัดส่วนขนาดคละที่ได้ยังคงใกล้เคียงตามข้อกำหนดเดิม

4.4.2 คุณสมบัติของคอนกรีตแอสฟัลท์โดยวิธิมาร์แชลล์

ผลการทดสอบมาร์แชลล์กับคอนกรีตแอสฟัลท์ที่ทำจากมวลรวมหยาบและละเอียดเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ 100:0, 80:20, 60:40 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ตลอดการทดสอบ และใช้ระยะเวลาการบ่ม 1,3,7 และ 28 วัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ก.ข.ค. และรูปที่ 4.6 - 4.11

รูปที่ 4.6 ก.ข.ค. แสดงค่าเสถียรภาพที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ 100:0, 80:20 และ 60:40 จะเห็นได้ว่าค่าเสถียรภาพมีค่าสูงเพิ่มขึ้นเมื่ออายุ 1,3 และ 7 วัน ทั้งนี้เนื่องจากที่อายุต่ำเช่นที่ 1 วัน การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ยังไม่ดีพอ ทำให้ความสามารถในการเชื่อมประสานของซีเมนต์เพสต์บนผิวมวลรวมไม่แข็งแรง เกิดการหลุดลอกกลายเป็นวัสดุอุดแทรก เป็นผลให้ความหยาบและเหลี่ยมมุมของมวลรวมเพิ่มขึ้นไม่มากการขัดกัน

ของมวลรวมจึงเพิ่มขึ้นไม่มาก ทำให้ค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 3200, 3450 และ 3440 ตามลำดับ เมื่อการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 3 และ 7 วันการทาปฏิกิริยามีมากขึ้น การเชื่อมประสานของซีเมนต์เฟสมีความแข็งแรง การเคลือบผิวสม่ำเสมอขึ้นการหลุดลอกมีน้อยลง เป็นผลให้มวลรวมมีความหยาบและเหลี่ยมมุมมากขึ้น การซัดกันของมวลรวมก็เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 3450, 3600, 3520 และ 3700, 3590, 3270 ปอนด์ ตามลำดับ และเมื่ออายุการบ่ม 28 วัน จากการไฮเดรชันมีความสมบูรณ์ทำให้ส่วนละเอียดของมวลรวมบางส่วนจับที่ผิวของมวลรวมและจับกันเองเป็นก้อนโตขึ้น ทำให้ส่วนผสมบางส่วนละเอียดไปมากทำให้ค่าเสถียรภาพสูงสุดลดลงเป็น 2380, 3340 และ 3050 ปอนด์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาค่าการยุบตัว ดังแสดงในรูป 4.7 ก.ข.ค. พบว่า การเคลือบผิวมวลรวมทำให้ค่าการยุบตัวลดลง และค่าการยุบตัวจะลดลงมากขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะการเคลือบผิวมวลรวมจะทำให้ผิวมีความหยาบและเหลี่ยมมุมมากขึ้น ทำให้การซัดกันระหว่างอนุภาคมวลรวมมากขึ้นการเคลือบผิวจะสมบูรณ์ขึ้นเมื่ออายุการบ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ที่อายุการบ่มต่ำจะเกิดการหลุดลอกได้ง่ายและอนุภาคเล็ก ๆ ที่หลุดลอกจะทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดแทรกทำให้เกิดการเลื่อนตัวได้ง่าย มีผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าต่ำ

รูปที่ 4.8 ก.ข.ค. แสดงค่าโพรงอากาศ จะพบว่าการเคลือบผิวมวลรวมทำให้ค่าโพรงอากาศเพิ่มขึ้น และค่าโพรงอากาศจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม ทั้งนี้ก็เพราะการมีเหลี่ยมมุมมากขึ้น ทำให้โพรงอากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (Griffith, 1958) โดยที่อายุการบ่ม 1 วัน จะเกิดการหลุดลอกของสารซีเมนต์ และทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดแทรกเป็นผลให้ช่องว่างระหว่างโพรงอากาศเพิ่มขึ้นไม่มาก และเมื่ออายุ 28 วัน การเคลือบผิวมวลรวมดีขึ้น ทำให้การหลุดลอกลดลงมีผลให้ขนาดแผลมวลรวมที่มีขนาดเล็กและวัสดุอุดแทรก จึงทำให้ค่าโพรงอากาศสูงขึ้น ส่วนค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม ดังแสดงไว้ในรูป 4.9 ก.ข.ค. ก็สามารถอธิบายได้ในทางตรงกันข้ามกับค่าโพรงอากาศ

เมื่อพิจารณาค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่ ดังแสดงไว้ในรูป 4.10 ก.ข.ค. พบว่าการเคลือบผิวมวลรวมจะทำให้ค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่ลดลง และจะลดลงตามอายุการบ่ม ทั้งนี้ก็เพราะจากความสัมพันธ์ของค่าช่องว่างระหว่างมวลรวมเป็นมวลรวมของค่าโพรงอากาศและค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่สูงที่สุด

รูปที่ 4.11 ก.ข.ค. แสดงหน่วยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอย 100:0, 80:20 และ 60:40 พบว่าการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักลดลง โดยที่การลดลงมีมากขึ้น เมื่ออายุการบ่มเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต มีค่าความถ่วงจำเพาะรวมต่ำ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่อายุการบ่ม 1 วัน ค่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตปริมาณน้อย มีมวลรวมละเอียดและวัสดุอัดแทรกมาก ทำให้มีความหนาแน่นมาก เป็นผลให้หน่วยน้ำหนักมีค่าสูงสุด 145 และ 149 ปอนด์/ฟุต³ และเมื่ออายุการบ่มสูงขึ้นเป็น 3, 7 และ 28 วัน ค่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มสูงขึ้น ทำให้มวลรวมละเอียดและวัสดุอัดแทรกลดลง จึงทำให้หน่วยน้ำหนักมีค่าต่ำลง

ผลการทดสอบมาร์แชลล์ ในการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอย 100:0, 80:20 และ 60:40 ที่การบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามข้อกำหนดแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ก.ข.และ ค. ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ

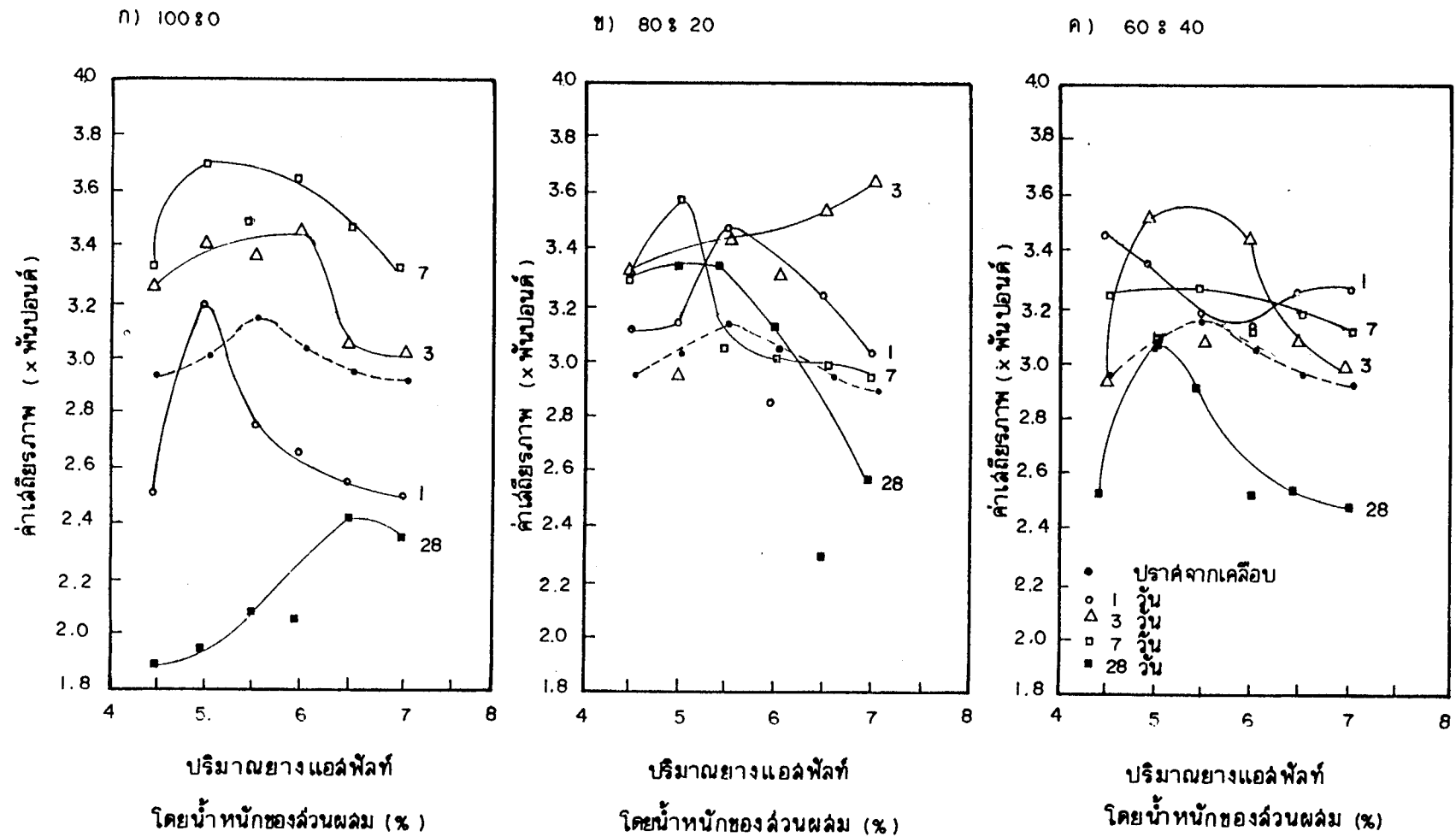
ค่าเสถียรภาพสูงสุดทุกอัตราส่วนมีค่าสูงสุ่มมากกว่าข้อกำหนดของการทดสอบ โดยวิธีมาร์แชลล์ คือมากกว่า 750 ปอนด์ และเมื่อนำค่าเสถียรภาพสูงสุดมาพล็อตลงในกราฟดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.12 รูปกราฟแสดง ค่าเสถียรภาพสูงสุด ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอย 100:0, 80:20, 60:40 ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7, 28 วัน จะเห็นได้ว่า ที่อายุการบ่ม 1, 3, 7 และ 28 วัน มีค่าเสถียรภาพสูงที่สุดที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอย 80:20, 80:20, 100:0 และ 80:20 คือ 3450, 3600, 3700 และ 3340 ปอนด์ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุ่มมากกว่ามวลรวมที่ไม่เคลือบผิว คือ มากกว่า 3150 ปอนด์ แสดงว่า มวลรวมหยาบและละเอียดเคลือบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้สัดส่วนขนาดละเอียดที่แน่น ที่อายุการบ่ม 7 วัน และที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อซีเมนต์ลอย 80:20 ที่อายุการบ่ม 3 วัน เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้ค่าเสถียรภาพสูงสุด และจากตารางที่ 4.8 ก.ข.ค. จะพบว่าทุกอัตราส่วนผสม ค่าการยุบตัว และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวมต่ำสุดตรงตามข้อกำหนด ส่วนค่าโพรงอากาศ และค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่ มีค่าต่ำกว่าข้อกำหนด แต่ยังมีค่าที่ต้องการอยู่ในช่องตามข้อกำหนด สามารถนำไปออกแบบส่วนผสมคอนกรีตแอสฟัลท์ได้

การเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดด้วยสารซีเมนต์ ทำให้ผิวของมวลรวมหยาบและละเอียดมีเหลี่ยมมุมเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ผิวหน้าของถนนแบบคอนกรีตแอสฟัลท์หยาบ ความต้านทานต่อการลื่นไถลได้ดี ซึ่งการเลือกใช้ค่าปริมาณโพรงอากาศที่เหมาะสมตามข้อกำหนด จะช่วยป้องกันการแตกร้าว (Bleeding) ในขณะที่อากาศร้อนโดยมีช่องว่างให้ยางแอสฟัลท์ขยายตัวได้พอดี เมื่อมีน้ำฝนหรือน้ำจืดมากระแทกจากใช้ค่าปริมาณโพรงอากาศตามข้อกำหนด จะทำให้ส่วนผสม

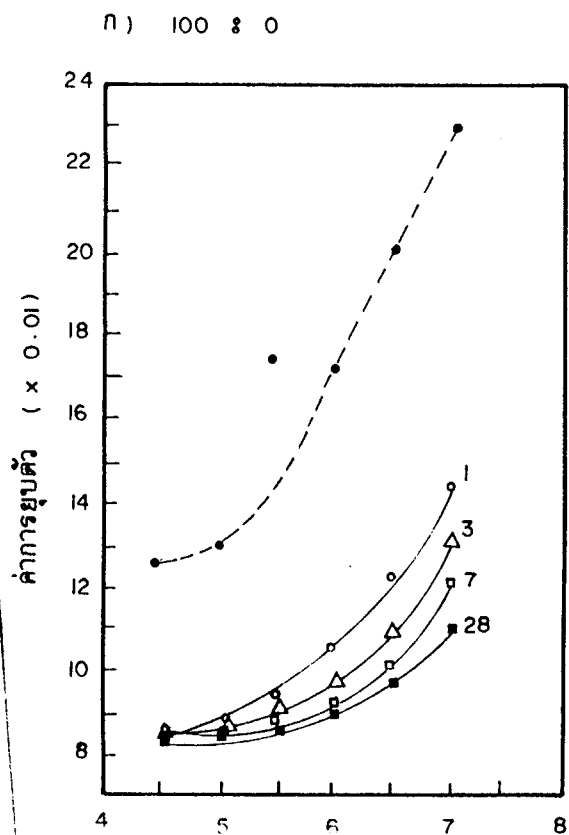
คอนกรีตแอสฟัลท์มีความหนาแน่นขึ้น และมีความทึบน้ำ (Impermeability) สูงและการเลือกใช้ค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่ตามข้อกำหนดจะทำให้ยางแอสฟัลท์มีการยึดเกาะกับมวลรวมได้ดี ทำให้ความคงทน (Durability) ความยืดหยุ่น (Flexibility) และความต้านทานจากการล้า (Fatigue) มีค่าสูงขึ้น ดังนั้น มวลรวมหยาบและละเอียดเคลือบด้วยสารซีเมนต์นำไปทำเป็นคอนกรีตแอสฟัลท์จะเหมาะสม และเกิดประโยชน์อย่างมากต่อการก่อสร้างผิวจราจรสำหรับประเทศที่มีภูมิอากาศร้อน

ตารางที่ 4.8 ค. ผลการทดสอบมาร์แชลล์ในการเคลือบผิวมวลรวมหยาบและละเอียดโดยใช้ปูนซีเมนต์
 ต่อซีเมนต์ 60:40

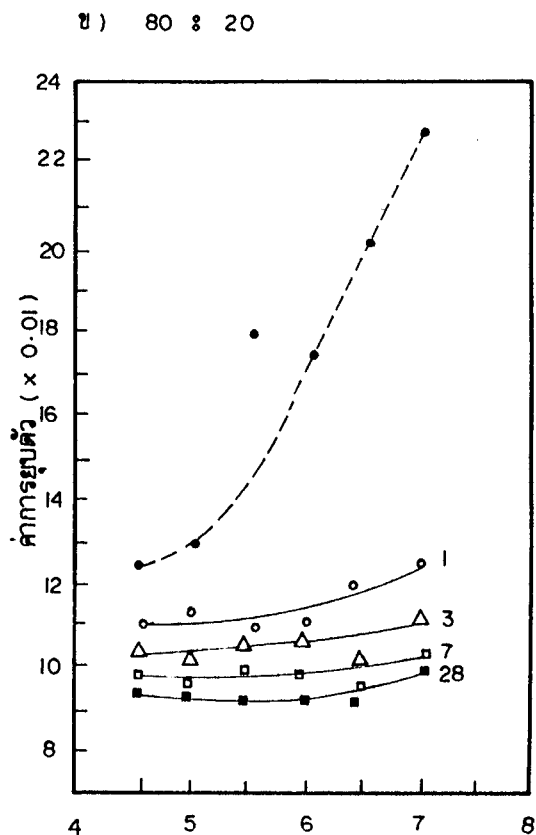
คุณสมบัติ	ข้อกำหนด	ที่การบ่ม (วัน)			
		1	3	7	28
ค่าเสถียรภาพสูงสุด (ปอนด์)	> 750	3440	3520	3270	3050
ค่าการยุบตัว ($\times 0.01$ นิ้ว)	8-16	9.4-14.0	9.3-12.5	9.0-11.4	9.-9.5
% ไพรออากาศ	3-5	0.7-7.0	1.4-7.2	1.58-7.5	1.84-8.6
% ช่องว่างระหว่างมวลรวมตัวสุด	>14	16.9	17.2	17.6	18.3
% ช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์	75-85	58-96	58-92	57-91	53-89



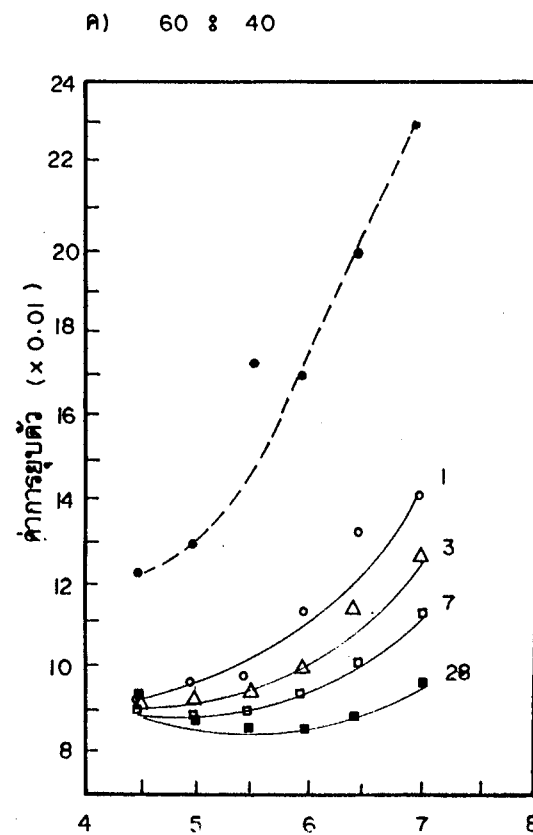
รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยคุณภาพ



ปริมาณยางแอลฟิลท์
โดยน้ำหนักของส่วนผสม (%)



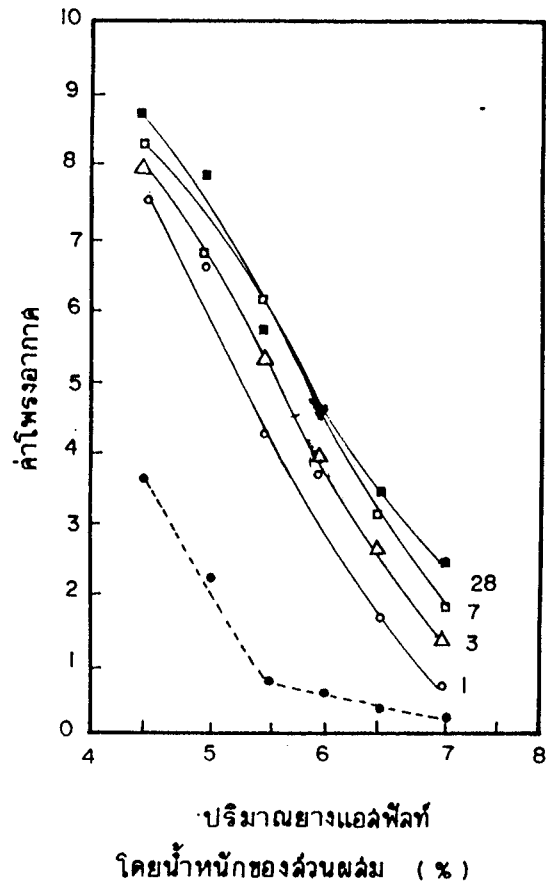
ปริมาณยางแอลฟิลท์
โดยน้ำหนักของส่วนผสม (%)



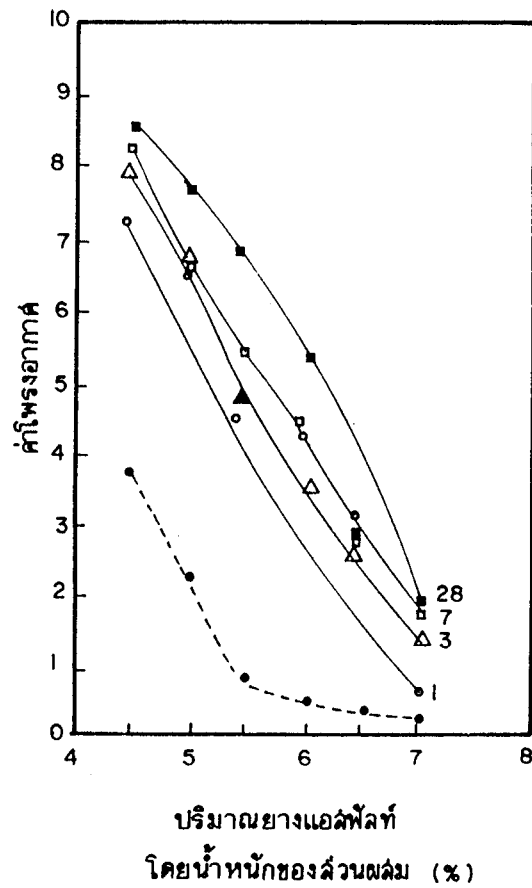
ปริมาณยางแอลฟิลท์
โดยน้ำหนักของส่วนผสม (%)

รูปที่ 4.7 ค่าการยุบตัว

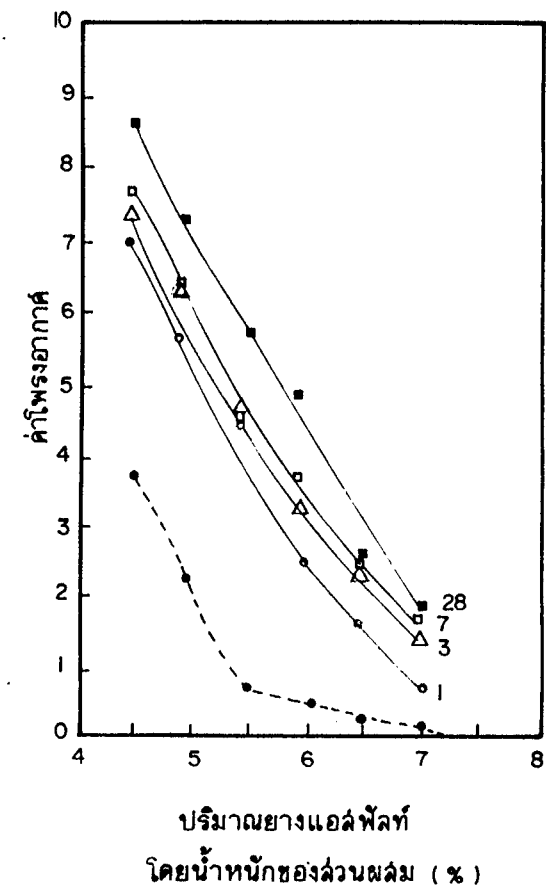
ก) 100 : 0



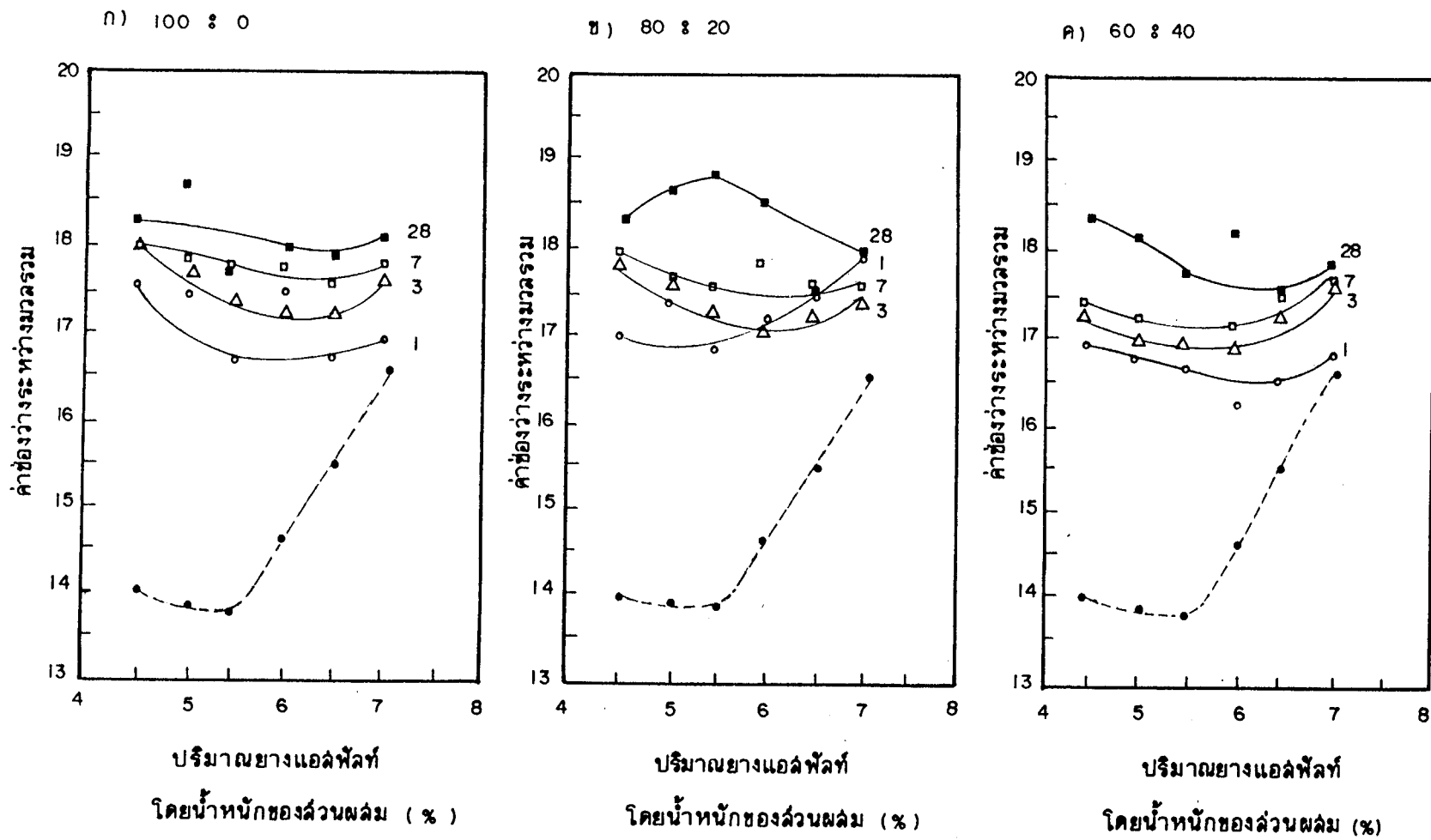
ข) 80 : 20



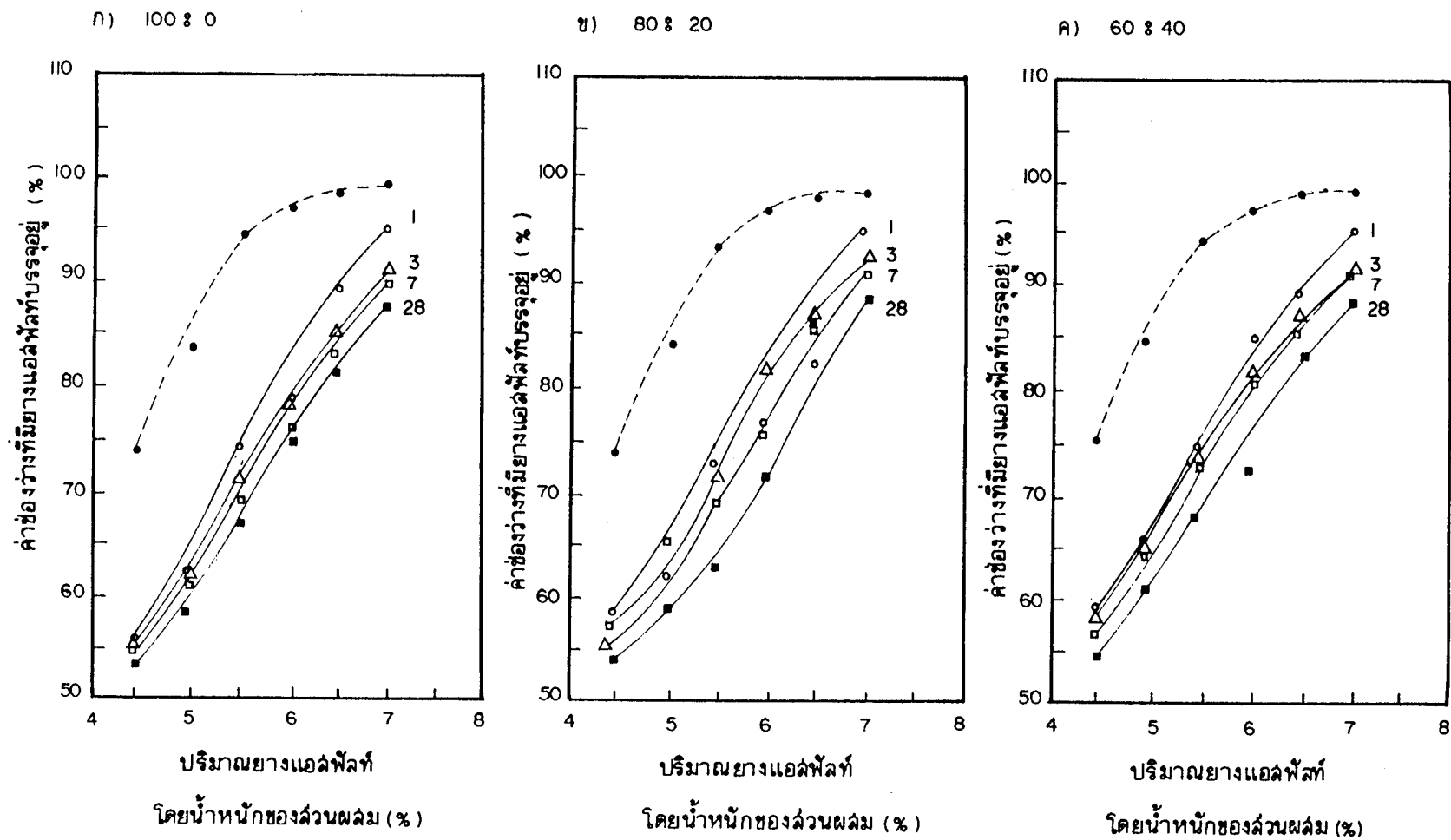
ค) 60 : 40



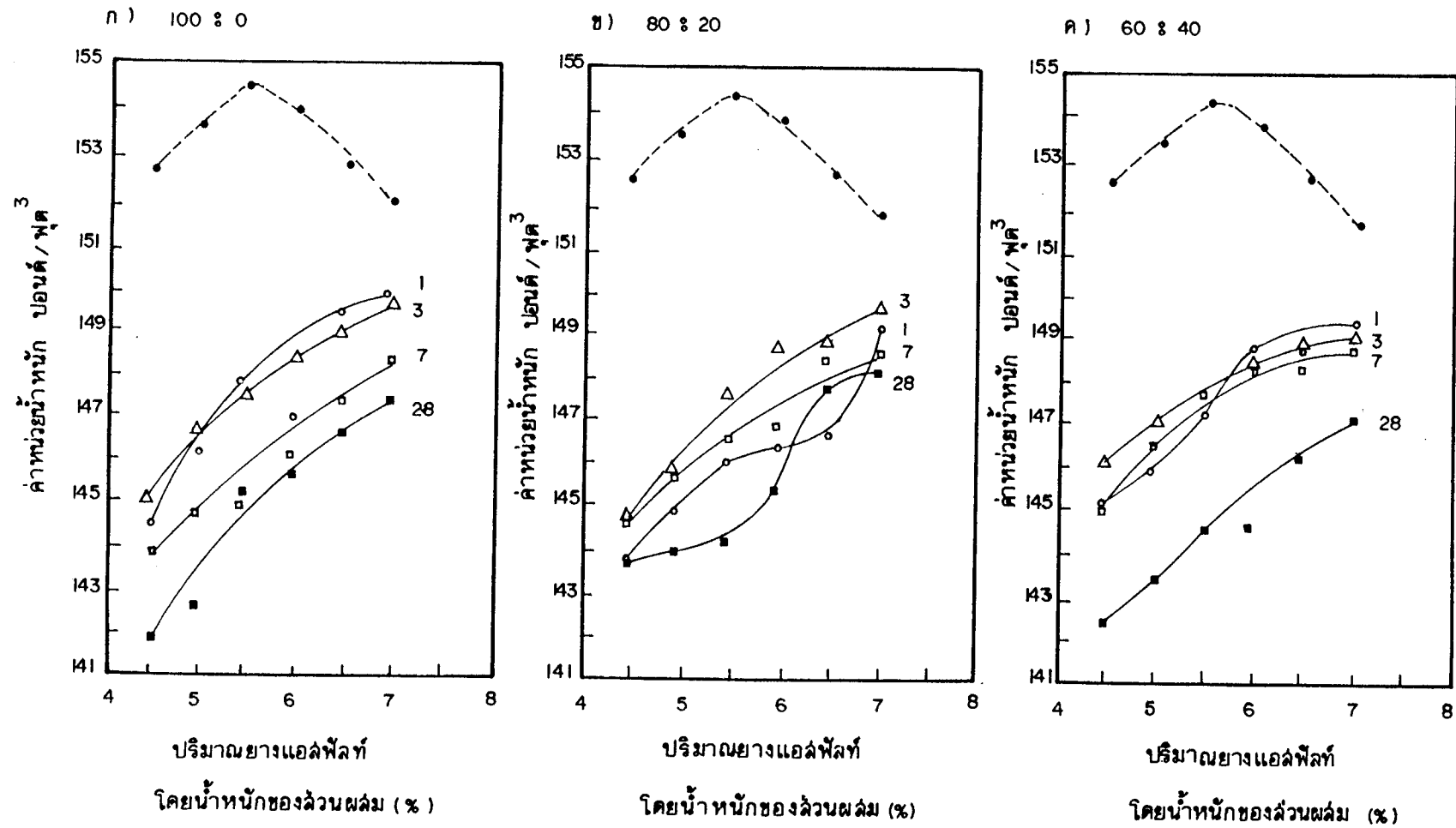
รูปที่ 4.8 ค่าโพรงอากาศ



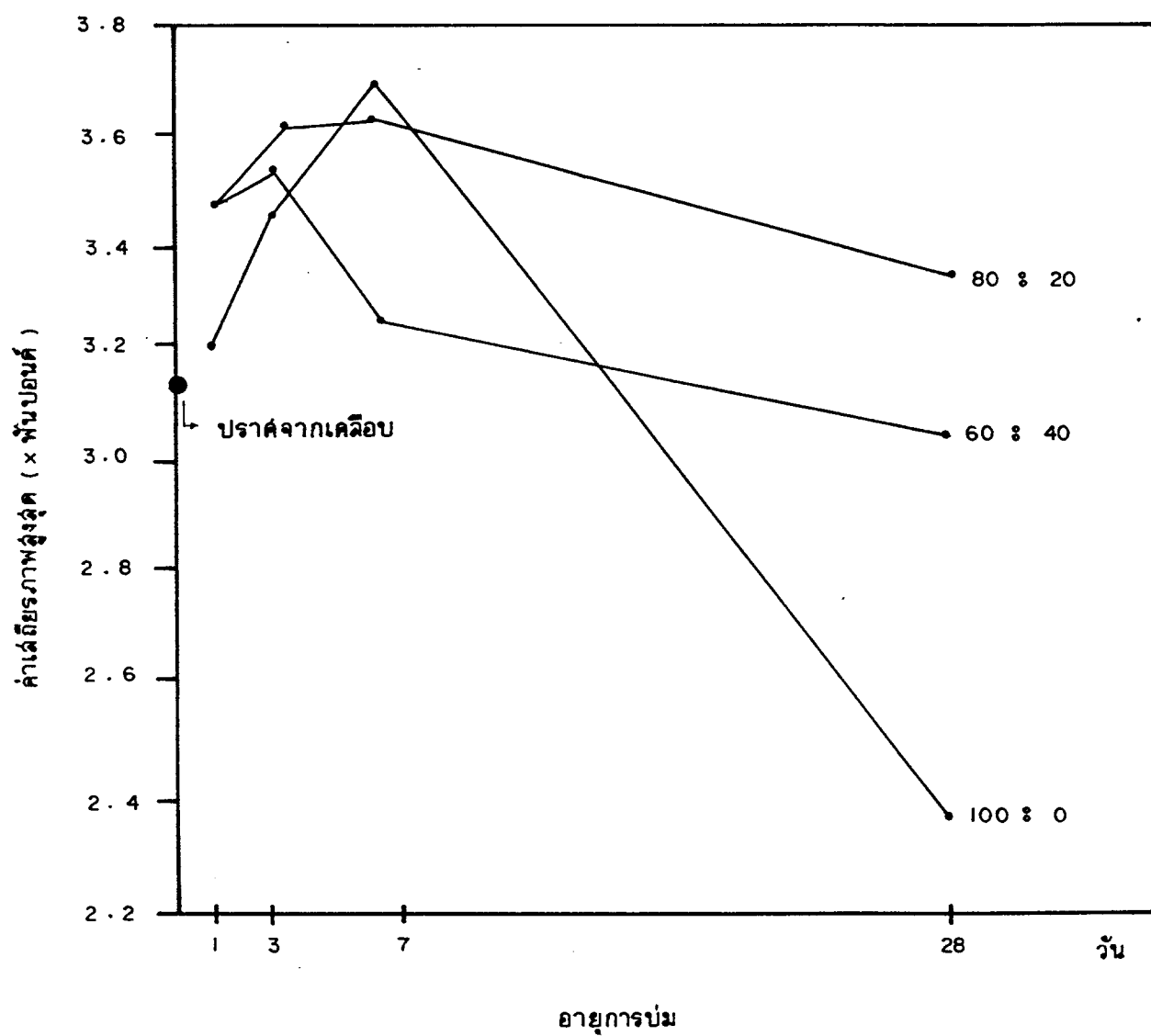
รูปที่ 4.9 ค่าช่องว่างระหว่างมวลรวม



รูปที่ 4.10 ค่าช่องว่างที่มียางแอสฟัลท์บรรจุอยู่



รูปที่ 4.11 ค่าหน่วยน้ำหนัก



รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยสภาพสูงสุด ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อพีแฉ่ล่อย 100:0, 80:20, 60:40 ที่อายุการปลูก 1,3,7,28 วัน