

### วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบ

เนื่องจากการทดสอบโดยวิธีประยุกต์นั้นเป็นวิธีใหม่ ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดสอบนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาวิธีทดสอบที่ได้รับการยอมรับมาก่อนและสามารถตอบโจทย์ที่ต้องการทราบเกี่ยวกับคุณลักษณะต่างๆ โพรงคอนกรีตได้ เช่น การกระจายขนาดของโพรงคอนกรีต ขนาดโพรงคอนกรีต และปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม เป็นต้น ด้วยดังกล่าววิธีเอ็มไอพีซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการนิยมนั้นจึงเป็นวิธีที่นำมาใช้ทดสอบเพื่ออ้างอิง และเปรียบเทียบผลการทดสอบควบคู่ไปด้วยวิธีประยุกต์ นอกจากวิธีเอ็มไอพีแล้วยังมีผลการทดสอบด้วยวิธีอื่นๆ ประกอบอีกด้วยอันได้แก่ มาตรฐาน ASTM C1202 และกำลังอัดคอนกรีต ตามลำดับ

#### 4.1 การวิเคราะห์หาค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตภายในเนื้อคอนกรีต

จากการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีพบว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม ได้แก่ D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ตามลำดับ พบว่าจะได้ ค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของปริมาตรของปรอทที่ถูกอัดเข้าสู่ก้อนตัวอย่างตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดสอบ (Total Intruded Volume) ต่อ ปริมาตรของก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ (Sample Bulk Volume) ซึ่งสามารถแสดงเป็นร้อยละได้ ดังรูปที่ 4.1 และยังสามารถนำมาจำแนกต่อไปได้เป็นโพรงคอนกรีตประเภทต่างๆ กันตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งเรียงจากขนาดใหญ่ไปหาเล็กตามลำดับดังต่อไปนี้ คือค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตขนาดใหญ่หรือโพรงอากาศ (Air Void or Entrapped Air) ซึ่งหมายถึง โพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 10 ไมครอนขึ้นไป โพรงแคพิลลารี (Capillary Pore) ซึ่งหมายถึงโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 10 ไมครอน และสุดท้ายคือโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเล็กที่สุดหรือโพรงเจล (Gel Pore) ซึ่งหมายถึงโพรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.01 ไมครอนลงไปแต่เนื่องจากข้อจำกัดในการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีพบว่าในเรื่องของความดันปรอทที่ใช้อัดคอนกรีตนั้นค่าความดันที่ใช้ต้องมีค่าไม่เกิน 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้วโดยประมาณ ทำให้โพรงเจลที่เล็กที่สุดที่สามารถวัดได้นั้นได้มีขนาดประมาณ 0.007 ไมครอนเท่านั้น ดังนั้น โพรงเจลที่ได้จากการวัดด้วยวิธีเอ็มไอพีในที่นี้จึงหมายถึงโพรงที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.007 ไมครอนถึง 0.01 ไมครอน โดยหลักการในการคำนวณหาค่าปริมาตรโพรงชนิดต่างๆ นั้นจะสามารถพิจารณาจากค่าปริมาตรของปรอทส่วนที่ถูกอัดเข้าสู่โพรงด้วยความดันที่ใช้อัดปรอทที่มีค่าต่างๆ กัน ความ

ตันที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จะถูกใช้ในการแปลความหมายขนาดของโพรงคอนกรีตซึ่งจะมีขนาดเล็กลง ๆ ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ คือ ในช่วงเริ่มต้นความตันที่ใช้จะมีค่าเริ่มต้นที่ศูนย์ถึงประมาณ 1.5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ขนาดของโพรงคอนกรีตที่วัดได้ในช่วงนี้จึงหมายถึงโพรงคอนกรีตที่เป็นโพรงอากาศซึ่งมีขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาดประมาณ 140 ถึง 160 ไมครอน จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความตันจนถึงค่าประมาณ 20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าค่าความตันนี้จะสามารถตรวจพบโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมครอนได้ และหลังจากเพิ่มความตันต่อไปจนถึงค่าประมาณ 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะสามารถตรวจพบโพรงคอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.01 ไมครอนได้ ด้วยเหตุนี้เองการทราบปริมาตรของปอร์ตสแควนที่ถูกแทนที่เข้าสู่โพรงคอนกรีตด้วยความตันในช่วงนี้ คือตั้งแต่ 20 ถึง 21,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จึงสามารถทำนายค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตประเภทแคพพิลลารี ที่มีขนาด 10 ไมครอนถึง 0.01 ไมครอนได้ และเมื่อเพิ่มความตันต่อไปอีกจะพบว่าโพรงคอนกรีตที่ตรวจได้จึงเป็นโพรงเจลซึ่งต้องใช้ความตันปอร์ตมากกว่า 21,000 ถึง 30,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งค่าขนาดของโพรงเจลที่ได้เหล่านี้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ไมครอน แต่ไม่เล็กไปกว่า 0.007 ไมครอน ด้วยเหตุนี้การทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีจึงยังคงไม่สามารถตรวจวัดโพรงเจลบางส่วนได้ อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีนั้นพบว่าปริมาตรของโพรงเจลในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมครอน นั้นมีปริมาณน้อยมากและอีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติการซึมผ่านของคอนกรีตได้มากเท่ากับโพรงชนิดแคพพิลลารี ดังนั้นจึงไม่นำโพรงเจลในส่วนที่มีขนาดเล็กกว่า 0.007 ไมครอนมาประกอบการพิจารณาได้ ผลการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพีกับทั้ง 9 สัดส่วนผสมพบว่าจะได้ค่าปริมาตรของโพรงอากาศ โพรงแคพพิลลารี โพรงเจล และโพรงคอนกรีตรวม ตามลำดับ ดัง-แสดงในตารางที่ 4.1

หากนำผลของปริมาณโพรงคอนกรีตที่ได้ในแต่ละประเภทต่าง ๆ มาเปรียบเทียบลงบนกราฟเดียวกันจะได้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าปริมาตรของโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity) ด้วยวิธีเอ็มไอพีนั้น ทำให้สามารถแบ่งแยกได้ 2 ส่วนด้วยกัน ดังนี้คือ

ส่วนแรกได้แก่ ส่วนของปริมาตรโพรงที่ไม่มีความสัมพันธ์เทียบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตแต่อย่างใด ซึ่งได้แก่ ฟองอากาศหรือโพรงอากาศ (Air Void) โดยหากพิจารณาปริมาตรโพรงอากาศที่วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าสัดส่วนอยู่ระหว่างร้อยละ 0.14 ถึง 1.66 ของโพรงคอนกรีตรวม และจากรูปที่ 4.2 พบว่าโพรงอากาศนั้นไม่มีรูปแบบที่สามารถอธิบายได้แต่อย่างใด ส่วนสาเหตุที่นั่นน่าจะเกิดจากปัจจัยต่างๆระหว่างการทดสอบ เช่น การหล่อตัวอย่างและการเคาะแบบหล่อแห่งคอนกรีตที่ไม่สม่ำเสมอ เป็นต้น

ในขณะที่ส่วนที่สอง ได้แก่ ส่วนของปริมาตรโพรงคอนกรีตที่มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนผสมคอนกรีตซึ่ง ได้แก่ โพรงแคพพิลลารี และโพรงเจล เนื่องจากหากพิจารณาจากตารางที่ 4.2

และ รูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำจะมีปริมาณโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ต่ำกว่าสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า ตัวอย่างเช่น หากพิจารณาสัดส่วนที่มีชนิดของวัสดุประสานที่เหมือนกัน คือ ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) อันได้แก่ สัดส่วนผสม D.7 D.18 และ D.29 แต่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกันได้แก่ 0.4 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ พบว่าจะได้ปริมาณโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ได้จะเรียงจากน้อยไปหามากดังนี้ คือ สัดส่วนผสม D.7 D.18 และ D.29 ตามลำดับ หรือถ้าหากพิจารณากรณีนี้ ตัวอย่างคอนกรีตที่ทดสอบมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากัน แต่พบว่าชนิดของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่าง เช่น สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันคือ 0.5 แต่มีวัสดุประสานที่แตกต่างกัน คือ สัดส่วนผสม D.15 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าแกลบร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) สัดส่วนผสม D.18 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) และ สัดส่วนผสม D.22 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 (65% OPC+10%RHA+25%FA) ตามลำดับ พบว่าปริมาณโพรงแคพพิลลารีและโพรงเจลที่ได้จะเรียงจากน้อยไปหามากดังนี้ คือ สัดส่วนผสม D.22 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 มีปริมาตรน้อยที่สุด รองลงมาได้แก่ สัดส่วนผสม D.18 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 และสุดท้ายคือ สัดส่วนผสม D.15 ซึ่งมีการใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าแกลบร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) ซึ่งมีปริมาณโพรงมากที่สุด

นอกจากนี้ในตารางที่ 4.2 ยังพบว่าในที่นี้แยกเป็นโพรงคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นประเภทโพรงแคพพิลลารีโดยคิดเป็นร้อยละ 78.67 ถึง 93.31 ของปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม โดยโพรงเจลและโพรงอากาศมีปริมาตรเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังพบว่าโพรงเจลจะมีปริมาตรคิดเป็นเพียงร้อยละ 5.52 ถึง 9.70 ของปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม หรือ ร้อยละ 5.91 ถึง 10.90 ของโพรงประเภทแคพพิลลารีซึ่งจากรูปที่ 4.2 พบว่า ความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรงของโพรงเจลและโพรงแคพพิลลารีมีคุณลักษณะและแนวโน้มที่เหมือนกัน

เนื่องจากโพรงแคพพิลลารีนั้นส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติการซึมผ่านได้ (Permeability) และมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อความทนทาน (Durability) อีกทั้งยังเป็นโพรงที่มีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับโพรงชนิดอื่นๆ จากการทดสอบโดยเอ็มไอทีพบว่าสามารถวิเคราะห์หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีกับปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมได้ ดังสมการ (4.1) และพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

$$P = 1.1048P' + 0.0047 \quad (4.1)$$

โดยที่	$P'$	หมายถึง ปริมาตรโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)
	$P$	หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) มีค่า 0.9821 ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้สามารถนำไปใช้ประมาณค่าปริมาณโพรงแคพพิลลารีจากโพรงคอนกรีตรวมได้

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบเอ็มไอพีกับวิธีตามมาตรฐาน ASTM C1202 พบว่า ได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กล่าวคือ ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมมีความสัมพันธ์แปรตามกันและพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อเทียบกับกับค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังสมการ (4.2)

$$Q = 13752.6P - 631.8 \quad (4.2)$$

โดยที่	$Q$	หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)
	$P$	หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) มีค่า 0.90 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นที่น่าพอใจและสามารถนำไปใช้ทำนายค่า ประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 หรือ ค่า ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพีก็ได้ หากทราบค่าใดค่าหนึ่งที่ให้มาก่อน

ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะค่าของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเทียบกับค่าของประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 พบว่าจะได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 กล่าวคือ ปริมาตรโพรงแคพพิลลารี มีความสัมพันธ์แปรตามกันและพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นกัน เมื่อเทียบกับกับค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังสมการ (4.3)

$$Q = 15219P' - 570.64 \quad (4.3)$$

โดยที่	$Q$	หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)
	$P'$	หมายถึง ปริมาตรโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น(The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) มีค่า 0.88 ถึงแม้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้นของสมการที่ (4.3) นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าเดียวกันที่ได้จากสมการที่ (4.2) แต่เนื่องจากสมการ (4.3) นี้ ได้มาจากผลของปริมาตรของโพรงแคพพิลลารีซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตโดยตรงมากกว่าผลของปริมาตรโพรงรวม เนื่องจากโพรงแคพพิลลารีเป็นโพรงที่มีปริมาณมากที่สุดในเนื้อคอนกรีต ด้วยเหตุนี้สมการที่(4.3) จึงน่าจะเป็นสมการที่ให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่าสมการ (4.2)

ในการเปรียบเทียบผลการทดสอบเอมไอพีกับการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ อายุ 91 วัน นั้น พบว่าได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับทฤษฎี คือ คอนกรีตที่มีปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม (Total Porosity or Pore Volume) สูง พบว่าค่ากำลังอัดจะมีค่าต่ำ ดังสมการ (4.4)

$$fc' = -233.91 \ln(P) + 18.135 \quad (4.4)$$

โดยที่  $fc'$  หมายถึง ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 91 วัน (กก.ต่อ ตร.ซม.)  
 $P$  หมายถึง ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอมไอพี (ร้อยละ)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) มีค่า 0.8387

ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาผลของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ อายุ 91 วันนั้น พบว่าเนื่องจากสมการ (4.1) พบว่าปริมาตรโพรงแคพพิลลารีมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับปริมาตรโพรงรวม ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความสัมพันธ์ของปริมาตรโพรงแคพพิลลารีเปรียบเทียบกับ การทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 91 วัน จึงควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับสมการ (4.4)

#### 4.2 การวิเคราะห์ขนาดโพรงคอนกรีต

หากพิจารณาผลของขนาดของโพรงคอนกรีต (Pore Size) จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโค้งสะสมของการกระจายขนาดโพรงคอนกรีต (Cumulative Pore Size Distribution) เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากการทดสอบด้วยวิธีเอมไอพี ดังแสดงผลการทดสอบในภาคผนวก ข รูปที่ ข.19-ข.27 พบว่า ขนาดของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสมจะมีค่าขนาด

ของโพรงคอนกรีตที่แตกต่างกัน โดยค่าขนาดของโพรงคอนกรีตที่ได้โดยวิธีเอ็มไอพีนั้นมักหมายถึงค่าที่ได้จากการหาค่ากลางแบบฐานนิยม (Mode) ซึ่งหมายถึงขนาดโพรงคอนกรีตที่มีจำนวนหรือมีความถี่ของขนาดโพรงในช่วงนั้นมากที่สุด แต่นอกจากวิธีฐานนิยมนี้ยังพบว่ายังสามารถคำนวณหาขนาดโพรงคอนกรีตได้จากค่ากลางแบบอื่นๆอีก เช่น ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Mean) และค่าเฉลี่ยมัธยฐาน (Median) ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 4.4 โดยพบว่าขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณด้วยค่ากลางทั้ง 3 วิธีนี้ให้ค่าที่แตกต่างกันไป ดังนี้คือ ค่าฐานนิยมให้มีความถี่ของขนาดโพรงที่โตที่สุด รองลงมาคือมัธยฐาน และค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิต มีขนาดโพรงที่เล็กที่สุด

อย่างไรก็ดีในตารางที่ 4.4 พบว่าค่าของขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมดไม่ว่าจะคำนวณขนาดด้วยวิธีใดก็ตาม แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดโพรงคอนกรีตที่ได้จากวิธีเอ็มไอพีของสัดส่วนผสมทั้ง 9 สัดส่วนผสม พบว่าไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันแต่อย่างใด ในกรณีนี้จึงพอจะสรุปได้ว่าชนิดของวัสดุประสานที่ใช้และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนั้นจะมีอิทธิพลต่อปริมาณโพรงคอนกรีตโดยตรงมากกว่าที่จะส่งผลที่ชัดเจนต่อขนาดโพรงคอนกรีต

ในการเปรียบเทียบขนาดของโพรงคอนกรีตระหว่างสัดส่วนผสมนั้นนอกจากจะต้องทราบขนาดของโพรงคอนกรีตแล้วนั้นยังไม่เพียงพอ ควรจะต้องทราบด้วยว่าขนาดโพรงนั้นได้มาจากการคำนวณด้วยค่ากลางวิธีใด จึงจะสามารถใช้ในการเปรียบเทียบกันได้

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีประยุกต์

เนื่องจากในการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์นั้นมีข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะต้องรอกวนกว่าก้อนตัวอย่างจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการคัดเลือกสัดส่วนผสมคอนกรีตที่เหมาะสม นั่นคือมีค่าความต้านทานการซึมผ่านคลอไรด์ตามมาตรฐาน ASTM C1202 ต่ำ คือไม่เกินประมาณ 2,000 คูลอมป์ และนอกจากนี้ยังต้องมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีความหลากหลายต่าง ๆ กัน คือ 0.4 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ และมีชนิดของวัสดุประสานที่มีหลายรูปแบบต่าง ๆ กัน ได้แก่ สัดส่วนผสมใช้ซีเมนต์ร้อยละ 85 และเถ้าแกลบร้อยละ 15 (85% OPC+15%RHA) สัดส่วนผสมซึ่งใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 และเถ้าลอยร้อยละ 35 (65% OPC+35%RHA) และสุดท้ายคือสัดส่วนผสม ซึ่งใช้ซีเมนต์ร้อยละ 65 เถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าลอยร้อยละ 25 (65% OPC+10%RHA+25%FA) ตามลำดับ ซึ่งหลังจากการได้ผลทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202 แล้วพบว่ามีส่วนผสมที่เข้าเกณฑ์อยู่ 9 สัดส่วนผสม

ด้วยกัน ได้แก่ สัดส่วนผสม D.4 D.7 D.11 D.15 D.18 D.22 D.26 D.29 และ D.33 ซึ่ง สัดส่วนผสมเหล่านี้จะถูกนำไปได้นำมาทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอที่เช่นกัน

โดยส่วนผลการทดสอบวิธีประยุกต์นั้นได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ส่วนขั้นตอนการวิเคราะห์นั้น สามารถดำเนินการได้จากสมมติฐานของงานวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.7 ถึง 4.15 โดยในการวิเคราะห์แต่ละครั้งนั้นพบว่าค่าความเข้มข้นที่ได้ทั้งทางด้านซัฟแอนไนด์และ แคโทดนั้นจะถูกนำมาพิตเพื่อให้ได้สมการเส้นโค้งพหุนามกำลังสามโดยใช้หลักการของวิธี Least Square หลังจากวิเคราะห์วิธีประยุกต์แล้วจะได้ผลการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

4.3.1 สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำ มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าเนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทดสอบ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts) จะใช้เวลายาวนานกว่า สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานสูง ดังแสดงด้วยแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.16

4.3.2 สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 (D.7 D.18 และ D.29) มีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีกว่าสัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้า- แกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26) ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทดสอบ จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่(Ts) ยาวนานกว่า แต่พบว่าสัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สัดส่วนที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกับเถ้าแกลบร้อยละ 10 (D.11 D.22 และ D.33) จะมีค่าระยะเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบจนเข้าสู่ สภาวะคงที่ (Ts) ที่ยาวนานที่สุด ดังแสดงด้วยแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.17

4.3.3 จากสมมติฐานเบื้องต้นในการศึกษา ปริมาตรของโพรงภายในเนื้อคอนกรีต แปร- ผันโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl]<sup>-</sup>)<sub>in</sub> ที่เกิดขึ้น ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะ คงที่ (Ts) ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดสอบสอดคล้องกับสมมติฐานเนื่องจากคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำ ต่อวัสดุประสานต่ำจะมี ปริมาตรโพรงภายในเนื้อคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานสูง ดังแสดงในแผนภูมิแท่งในรูปที่ 4.18 ซึ่งจากรูปเดียวกันนี้ หากพิจารณาในกรณีที่มี สัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันพบว่า สัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน มากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ เถ้าลอยร้อยละ 25 เถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกัน (D.11 D.22 และ D.33) มีแนวโน้มที่จะมีปริมาตรโพรงภายในเนื้อคอนกรีตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ([Cl]<sup>-</sup>)<sub>in</sub> ที่ได้จากการทดสอบต่ำที่สุด รองลงมา คือ สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 35 (D.7 D.18 และ D.29) และที่มีปริมาตรโพรง ภายในเนื้อคอนกรีตที่สูงที่สุด คือ สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26)

4.3.4 จากสมมติฐานค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตภายในเนื้อคอนกรีต แปรผันโดยตรงกับ อัตราส่วนของค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลออก ( $[Cl^-]_{out}$ ) ต่อความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ( $[Cl^-]_{in}$ ) ดังนั้นค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในรูปที่ 4.19 พบว่าในสัดส่วนผสมที่มีชนิดของวัสดุประสานเหมือนกัน จะพบว่าค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตจะแปรผันตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าในรูปเดียวกันนี้ หากพิจารณาในกรณีที่มีสัดส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่เท่ากันนั้นพบว่า สัดส่วนผสมที่มีการใช้วัสดุปอซโซลานมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันในการแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ เถ้าลอยร้อยละ 25 และเถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมกัน (D.11 D.22 และ D.33) มีแนวโน้มที่จะมีค่าความต่อเนื่องที่สูงที่สุดแทนที่จะมีค่าความต่อเนื่องต่ำที่สุด ในขณะที่สัดส่วนผสมซึ่งถูกแทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 15 (D.4 D.15 และ D.26) กลับมีค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตต่ำที่สุดแทนที่จะมีค่าความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตสูงที่สุด ทั้งนี้อาจจะเนื่องด้วยค่าความต่อเนื่องตามสมมติฐานนั้นเป็นค่าที่ได้จากการสัมพันธ์กับปริมาณโพรงรวม ซึ่งหากจะพิจารณาปริมาณโพรงรวมจากค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า จากรูปที่ 4.18 พบว่าค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าในแต่ละสัดส่วนนั้นมีความแตกต่างกันมาก ในขณะที่ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลออกในแต่ละสัดส่วนนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมากและความคลาดเคลื่อนจากการวัดค่าความเข้มข้นที่ไหลออกเพียงเล็กน้อยอาจจะจะมีผลกระทบอย่างยิ่งต่อการคำนวณค่าร้อยละของความต่อเนื่องตามสมมติฐาน ซึ่งในประเด็นนี้เอง อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลื่อนขึ้นได้โดยง่ายสำหรับการคำนวณหาค่าร้อยละของความต่อเนื่อง

4.3.5 สัดส่วนผสมที่มีค่าดัชนีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ของคลอไรด์สูง หมายถึง คอนกรีตที่ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้สำหรับงานคอนกรีตในสภาวะแวดล้อมคลอไรด์ เนื่องจากจะมีคลอไรด์ที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านก่อนทดสอบได้เป็นปริมาณมาก ซึ่งทราบได้จากค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลออก ( $[Cl^-]_{out}$ ) ภายในระยะเวลาการทดสอบที่ไม่ยาวนานนัก ซึ่งทราบได้จากค่าระยะเวลา ( $T_s$ ) จากการทดสอบ ค่าดัชนีความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ ของสัดส่วนผสมทั้งหมดสามารถ แสดงได้ดังรูปที่ 4.20

#### 4.4 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบวิธีประยุกต์กับวิธีอื่นๆ

##### 4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิธีประยุกต์ กับการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1202

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบโดยวิธีประยุกต์ร่วมกับ ASTM C1202 พบว่าสามารถพิจารณาได้หลายกรณีด้วยกัน ดังต่อไปนี้



4.4.1.1 ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ ค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ( $Q_s$ ) ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ(4.5)

$$Q = 0.3479Q_s - 59.208 \quad (4.5)$$

โดยที่  $Q$  หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)  
 $Q_s$  หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ( $Q_s$ ) (คูลอมบ์)

ซึ่งพบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) เป็น 0.90 ซึ่งมีความสอดคล้องกันเป็นที่น่าพอใจ

4.4.1.2 สำหรับสัดส่วนผสมที่มีวัสดุประสานชนิดเดียวกันพบว่า ค่าความต่อเนื่องแปรผันตาม ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 4.22

4.4.1.3 ค่าดัชนีความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์ จะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ดังแสดงในรูปที่ 4.23 โดยพบว่า หากพิจารณาค่าดัชนีความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์แยกตามชนิดของวัสดุประสานจะสามารถจำแนกดัชนีค่าความสามารถการซึมผ่านของคลอไรด์ ได้ออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ K1 K2 และ K3 ตามสมการ (4.6) (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$K1 = 0.0319Q - 20.525 \quad (4.6)$$

$$K2 = 0.0111Q - 7.522 \quad (4.7)$$

$$K3 = 0.0111Q - 10.861 \quad (4.8)$$

โดย K1 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า แกลบร้อยละ 10 และเถ้าลอย ร้อยละ 25 ได้แก่ D.11 D.22 และ D.33 (พีพีเอ็ม ต่อ ซม.)  
 K2 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า-ลอย ร้อยละ 35 ได้แก่ D.7 D.18 และ D.29 (พีพีเอ็ม ต่อ ซม.)  
 K3 หมายถึง ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ที่มีสัดส่วนผสมที่มีการแทนที่เถ้า-

แถบ ร้อยละ 15 ได้แก่ D.4 D.15 และ D.26 (พีพีเอ็ม ต่อ ชม.)

Q หมายถึง ค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (คูลอมบ์)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) ของทั้งสามสมการมีค่าเป็น 0.9897 1.000 และ 0.9953 สำหรับสมการที่ (4.6) (4.7) และ (4.8) ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้สมการเหล่านี้จึงน่าที่จะนำไปใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 กับค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ ได้เป็นอย่างดี

หากพิจารณารูปที่ 4.23 จะพบว่าผลของชนิดของวัสดุประสานที่ใช้ทั้งสามชนิดนั้นมีความแตกต่างกันโดยวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าแถบร้อยละ 10 และเถ้าลอยร้อยละ 25 ร่วมกันสมการ (4.6) มีค่าความชันมากที่สุด หมายถึง การเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยของประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ที่ทดสอบได้นั้นจะส่งผลทำให้ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์โดยวิธีประยุกต์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างมาก ในขณะที่ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ของวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าลอย ร้อยละ 35 หรือสมการ(4.7) และวัสดุประสานที่มีการแทนที่เถ้าแถบร้อยละ 15 หรือสมการ(4.8) จะมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเนื่องจากความชันที่น้อยกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความชันของสมการ (4.7) กับ สมการ (4.8) นั้นมีค่าเท่ากันคือ 0.0111 แต่พบว่าสมการ (4.7) จะมีระยะตัดแกนตั้ง (Y-intercept) ที่มากกว่าสมการ (4.8) ซึ่งถ้าหากกำหนดให้ค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ คือ K2 และ K3 ของทั้งสมการ(4.7) และสมการ (4.8) มีค่าเป็นศูนย์ หรือสมมติว่าคอนกรีตที่ใช้มีคุณสมบัติดีเยี่ยมสามารถต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ร้อยเปอร์เซ็นต์ จะคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 ได้เท่ากับ 678 และ 978 คูลอมบ์ ตามลำดับ ซึ่งจากความค่าประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันเหล่านี้จะเป็นผลอันเนื่องมาจากสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity) ที่แตกต่างกันของวัสดุประสานที่ต่างชนิดกัน

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบวิธีประยุกต์ กับการทดสอบวิธีเอ็มไอพี

ตามสมมติฐานของการศึกษาในบทที่ 2 จะได้ว่า ค่าปริมาณโพรงคอนกรีตรวมนั้น แปรผันตาม ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ( $[Cl^-]_{in}$ ) ซึ่งหลังจากได้ทำการทดสอบด้วยวิธีเอ็มไอพี พบว่าจะได้ปริมาณโพรงคอนกรีตรวมที่แท้จริง ซึ่งหากนำค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณจุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ( $[Cl^-]_{in}$ ) ที่ได้จากการทดสอบประยุกต์มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี พบว่าค่าที่ได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.24 จากรูปจะได้รับความสัมพันธ์ดังสมการ (4.9)

$$P = (5 \times 10^{-5}) ([CI] \text{ in}) + 0.0399 \quad (4.9)$$

โดย	P	หมายถึง	ปริมาตรโพรงคอนกรีตรวม (ร้อยละ)
	[CI] in	หมายถึง	ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ([CI] in) (พีพีเอ็ม)

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ที่ได้จากความถดถอยเชิงเส้น (The Correlation Coefficient of Linear Regression;  $R^2$ ) ของสมการมีค่าเป็น 0.9139 ซึ่งถือว่าความสัมพันธ์ที่ได้ี้มีความสอดคล้องกัน และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรโพรงคอนกรีตรวมกับค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.1 ค่าปริมาณและสัดส่วนที่คิดเป็นร้อยละของโพรงคอนกรีตประเภทต่างๆที่ตรวจวัดได้  
จากการวัดปริมาณโพรงคอนกรีตด้วยวิธีเอ็มไอพี

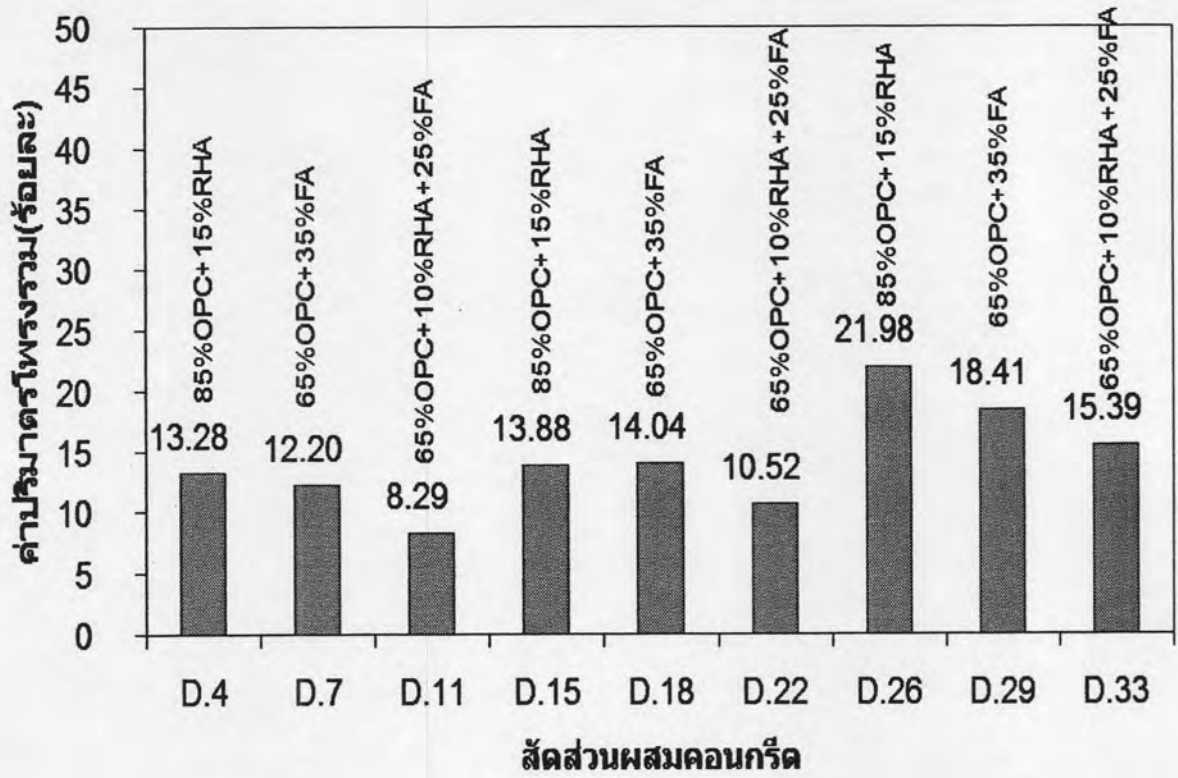
สัดส่วนผสมคอนกรีต	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุ ประสาน (W/B)	ปริมาณโพรง แคพพิลลารี (0.01-10 ไมครอน)(%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาณโพรง เจล (0.007- 0.01 ไมครอน) (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาณโพรง อากาศ( 10- 150 ไมครอน) (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)	ปริมาณโพรง คอนกรีตรวม (%) /(คิดเป็น สัดส่วนร้อยละ)
D.4 (85%OPC+15%RHA)	0.4	12.39% (93.31%)	0.73% (5.52%)	0.16% (1.17%)	13.28% (100.00%)
D.7 (65%OPC+35%FA)	0.4	9.60% (78.67%)	0.94% (7.70%)	1.66% (13.62%)	12.20% (100.00%)
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.4	7.22% (87.10%)	0.53% (6.45%)	0.53% (6.45%)	8.29% 100.00%
D.15 (85%OPC+15%RHA)	0.5	11.90% (85.76%)	1.27% (9.15%)	0.71% (5.09%)	13.88% (100.00%)
D.18 (65%OPC+35%FA)	0.5	12.42% (88.42%)	1.10% (7.82%)	0.53% (3.76%)	14.04% (100.00%)
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.5	9.36% (89.01%)	1.02% (9.70%)	0.14% (1.29%)	10.52% (100.00%)
D.26 (85%OPC+15%RHA)	0.6	19.18% (87.24%)	1.55% (7.03%)	1.26% (5.74%)	21.98% (100.00%)
D.29 (65%OPC+35%FA)	0.6	16.35% (88.80%)	1.45% (7.88%)	0.61% (3.33%)	18.41% (100.00%)
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA)	0.6	13.63% (88.55%)	1.07% (6.96%)	0.69% (4.49%)	15.39% (100%)

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยวิธีประยุกต์

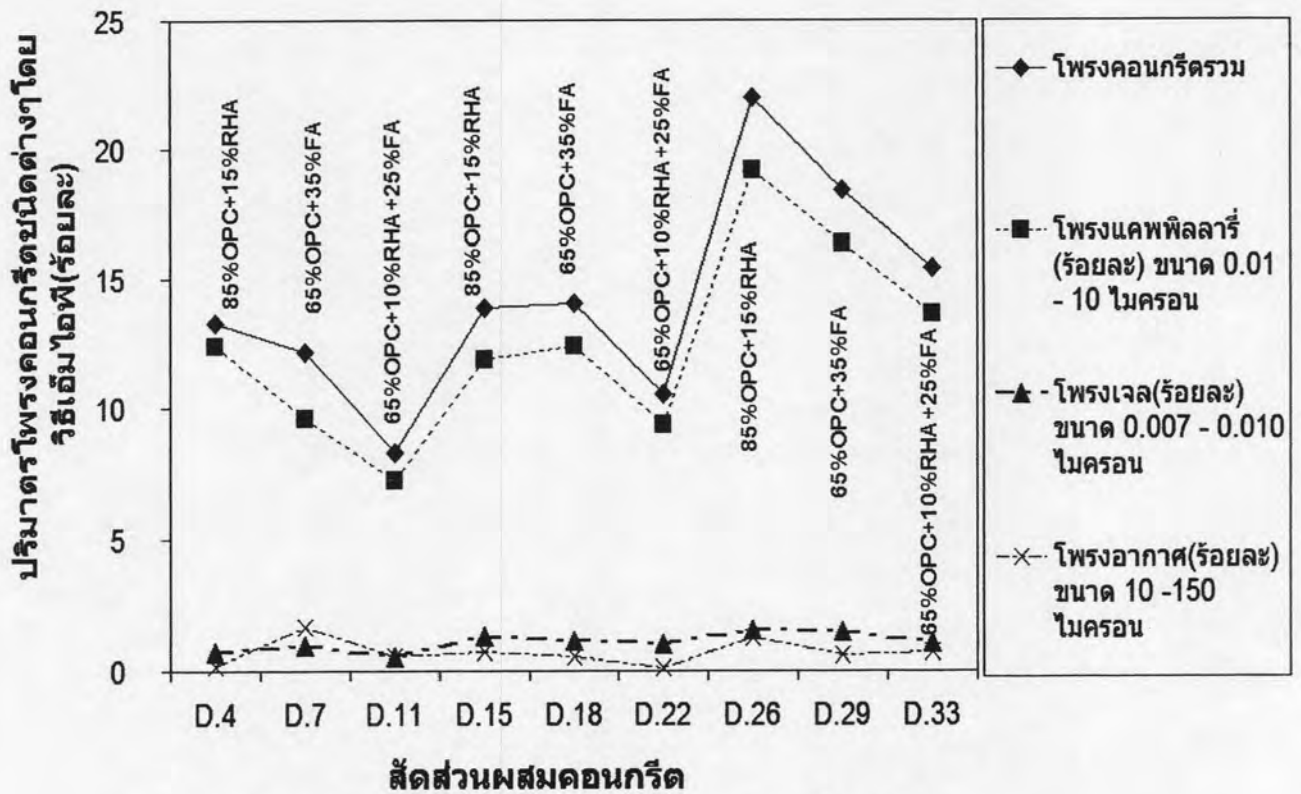
สัดส่วนผสมคอนกรีต	ระยะเวลา (Ts) (ชั่วโมง)	ค่าประจุ ไฟฟ้าณ สภาวะคงที่ (Qs) (คูลอมบ์)	[Cl] <sup>-</sup> in (พีพีเอ็ม)	[Cl] <sup>-</sup> out (พีพีเอ็ม)	ความ ต่อเนื่อง (ร้อยละ)	ค่าดัชนีการ ซึมผ่านได้ ของคลอไรด์ (พีพีเอ็ม/ซม.)
D.4 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.4)	37.2	3,915	1961	87	4.44%	2.34
D.7 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.4)	43.0	2,815	1426	125	8.77%	2.91
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.4)	49.6	2,114	834	120	14.39%	2.42
D.15 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.5)	29.7	4,213	2156	167	7.75%	5.62
D.18 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.5)	36.5	3,509	1652	190	11.50%	5.21
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.5)	40.5	2,678	1317	239	18.15%	5.90
D.26 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.6)	22.0	7,612	3088	386	12.50%	17.55
D.29 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.6)	29.5	5,635	2913	425	14.59%	14.41
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.6)	31.0	3,287	1890	426	22.54%	13.74

ตารางที่ 4.3 ค่าขนาดโพรงคอนกรีตชนิดต่างๆ ของลัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 ลัดส่วนผสม

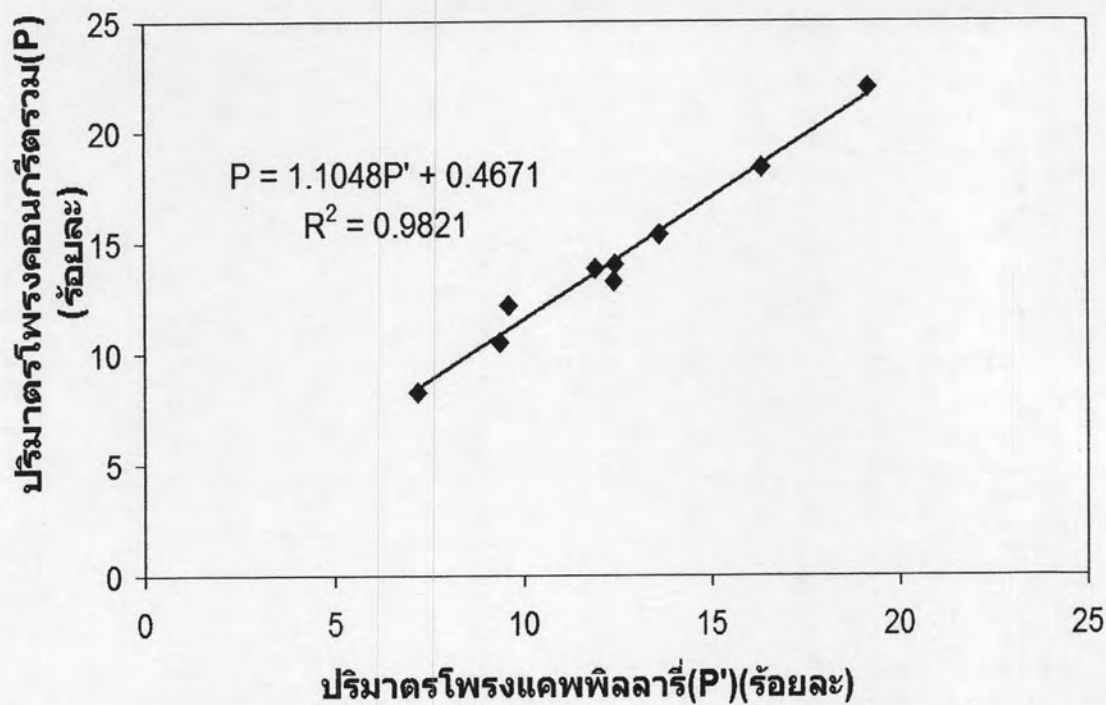
ลัดส่วนผสมคอนกรีต	ขนาดโพรงคอนกรีต(ไมครอน)		
	ค่าเฉลี่ยแบบฐานนิยม (Pore Size) (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยแบบเลขคณิต (Pore Size) (ไมครอน)	ค่าเฉลี่ยแบบมัธยฐาน (Pore Size) (ไมครอน)
D.4 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.4)	0.06537	0.0313	0.05221
D.7 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.4)	0.06455	0.03422	0.0686
D.11 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.4)	0.06301	0.03086	0.0534
D.15 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.5)	0.05632	0.02871	0.05079
D.18 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.5)	0.05596	0.02857	0.04832
D.22 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.5)	0.03973	0.02372	0.03423
D.26 (85%OPC+15%RHA ,W/B=0.6)	0.05624	0.02936	0.04879
D.29 (65%OPC+35%FA ,W/B=0.6)	0.05920	0.02988	0.05321
D.33 (65%OPC+10%RHA+25%FA ,W/B=0.6)	0.06648	0.03371	0.06648



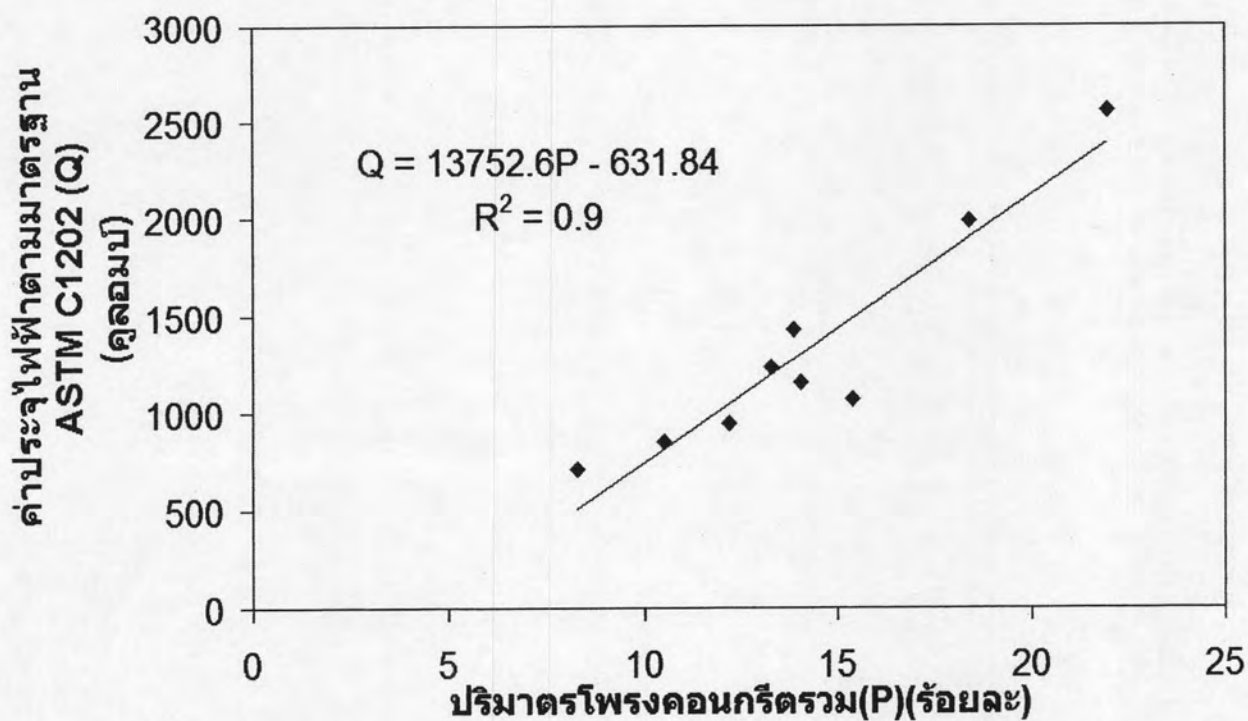
รูปที่ 4.1 ปริมาณโครงคอนกรีตรวมเทียบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



รูปที่ 4.2 ปริมาณโครงคอนกรีตชนิดต่างๆ เทียบกับคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม

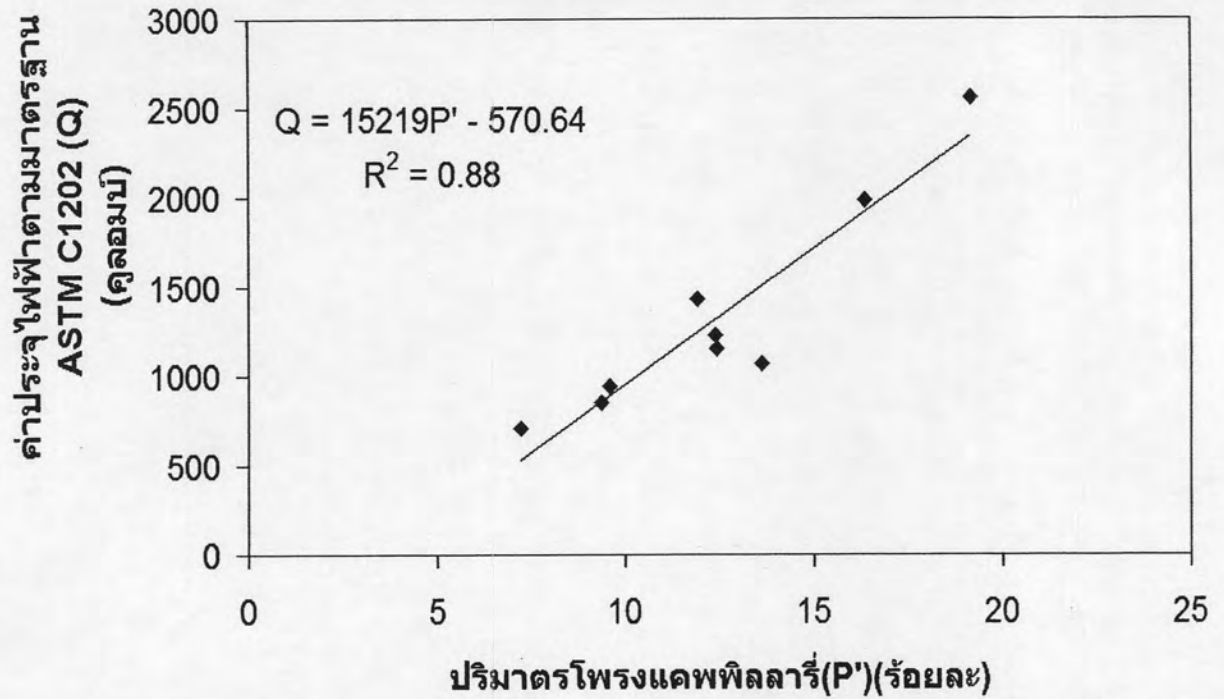


รูปที่ 4.3 ปริมาณของโพรงคอนกรีตรวมเทียบกับปริมาณของโพรงแคทพิลลารี โดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม

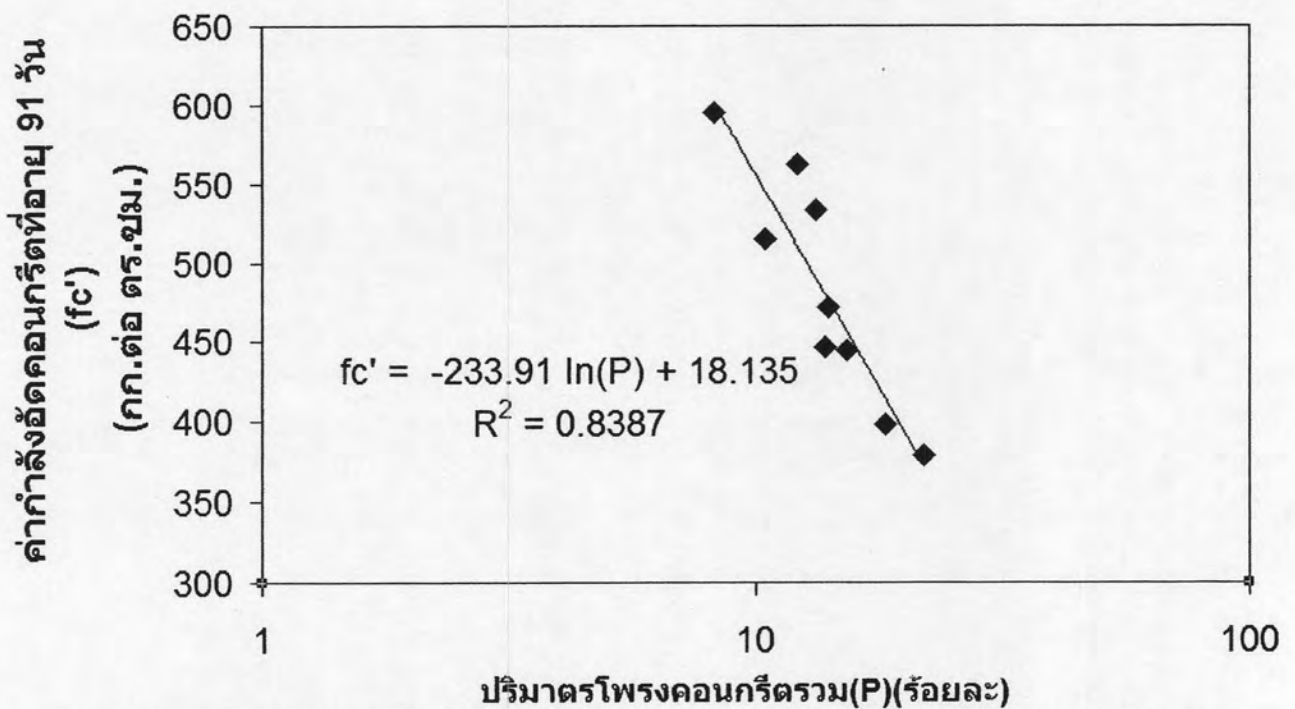


รูปที่ 4.4 ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาณของโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม

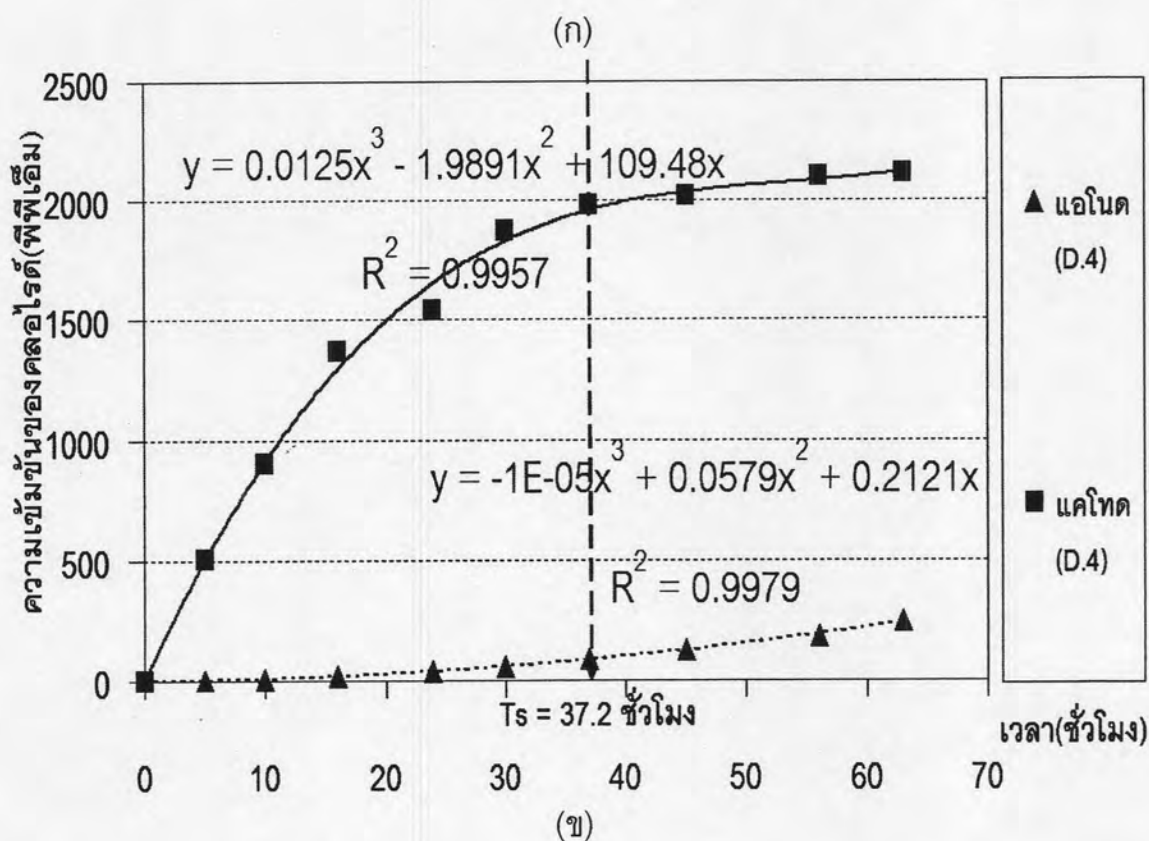
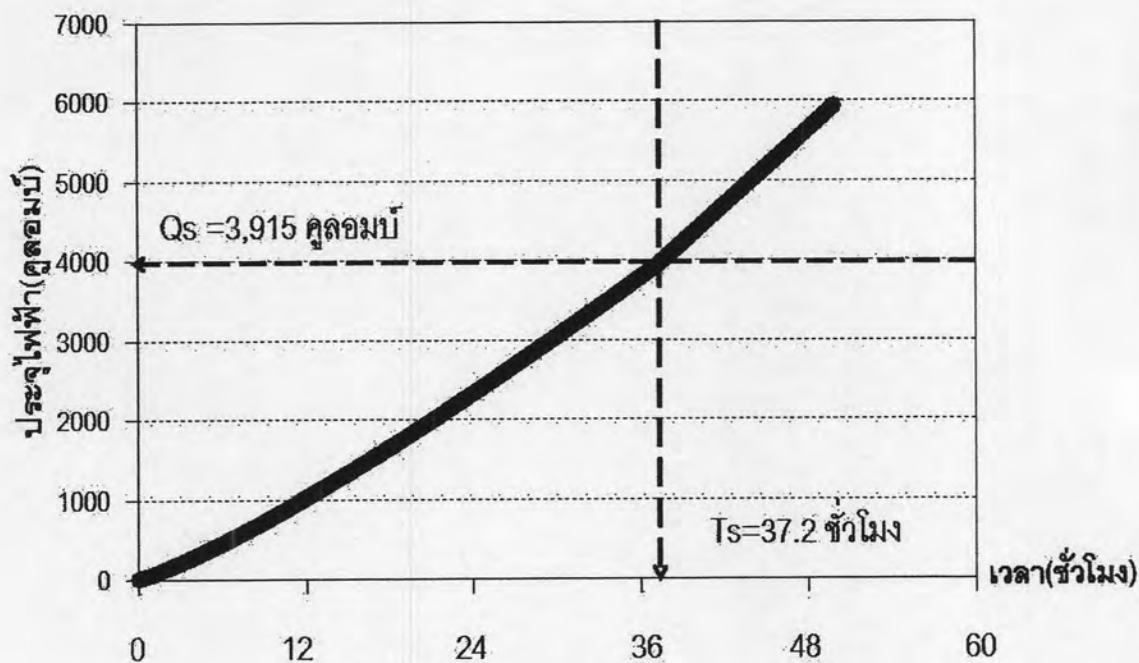




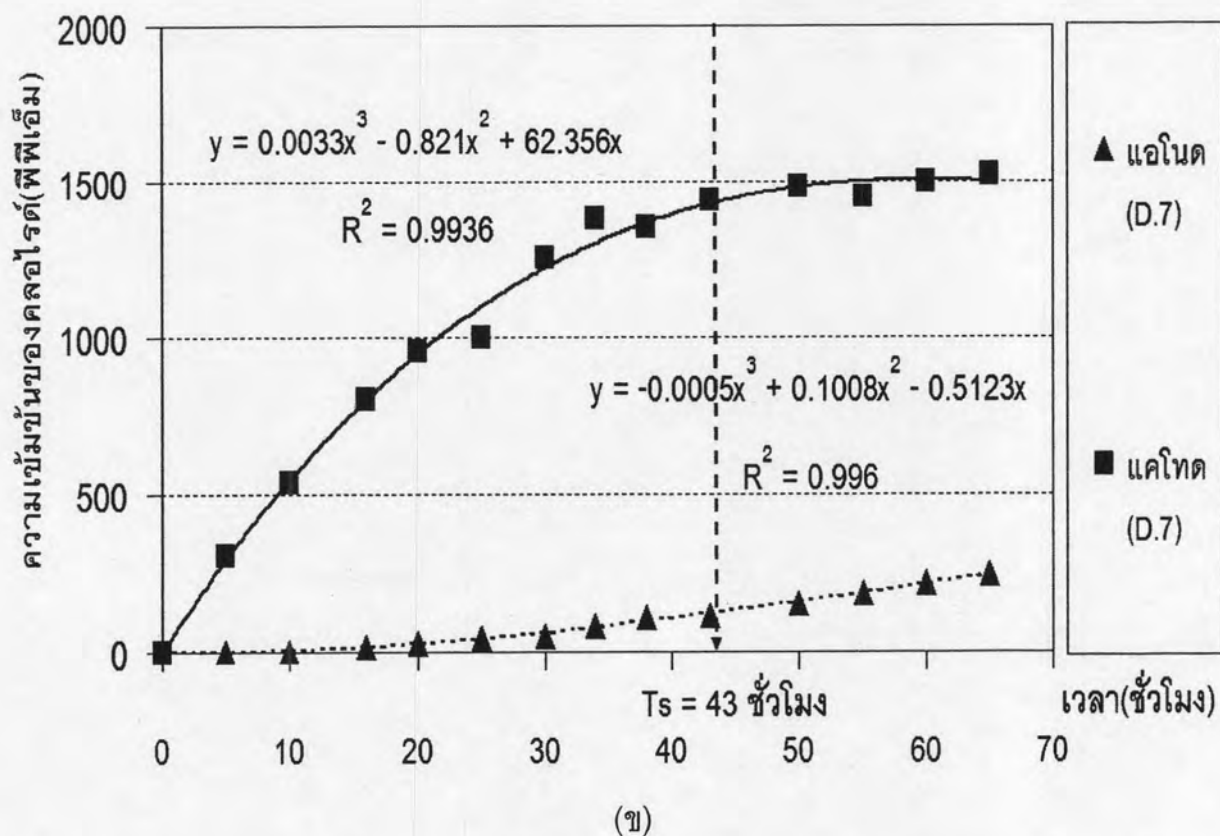
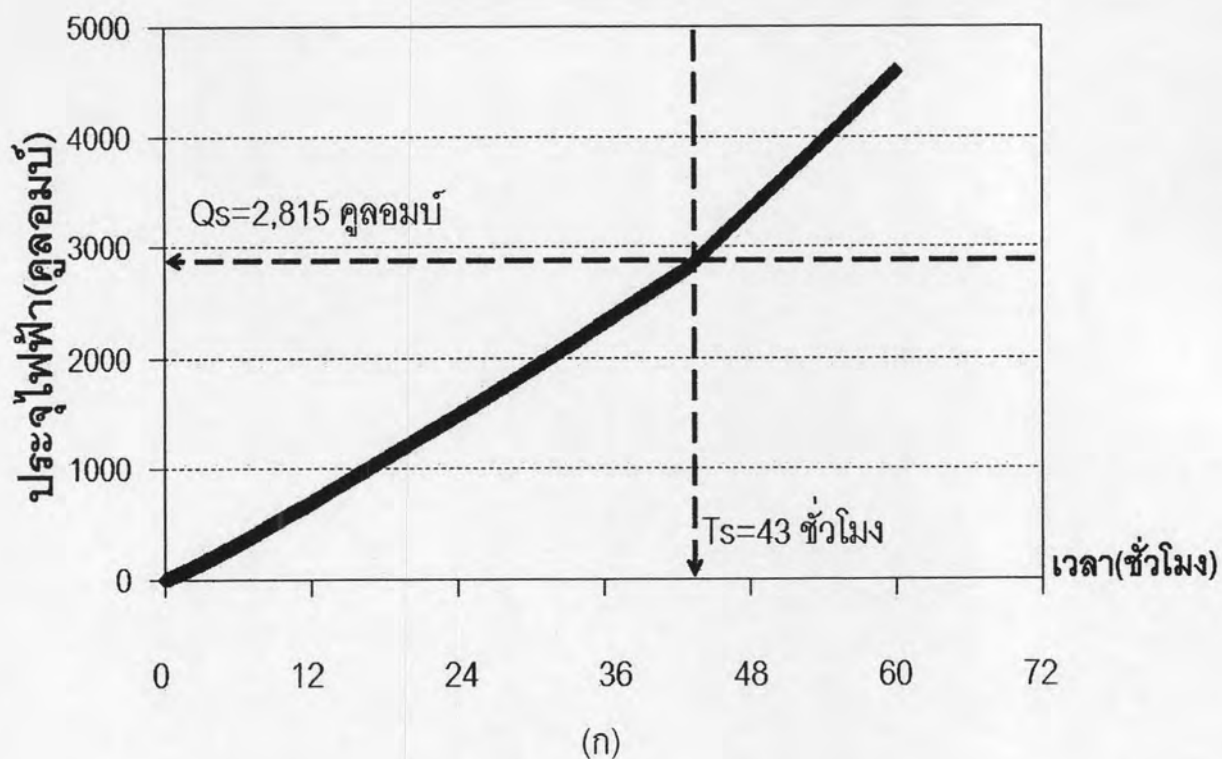
รูปที่ 4.5 ค่าประจุไฟฟ้าตามมาตรฐาน ASTM C1202 เทียบกับปริมาณของโพรงแคพพิลลารีโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



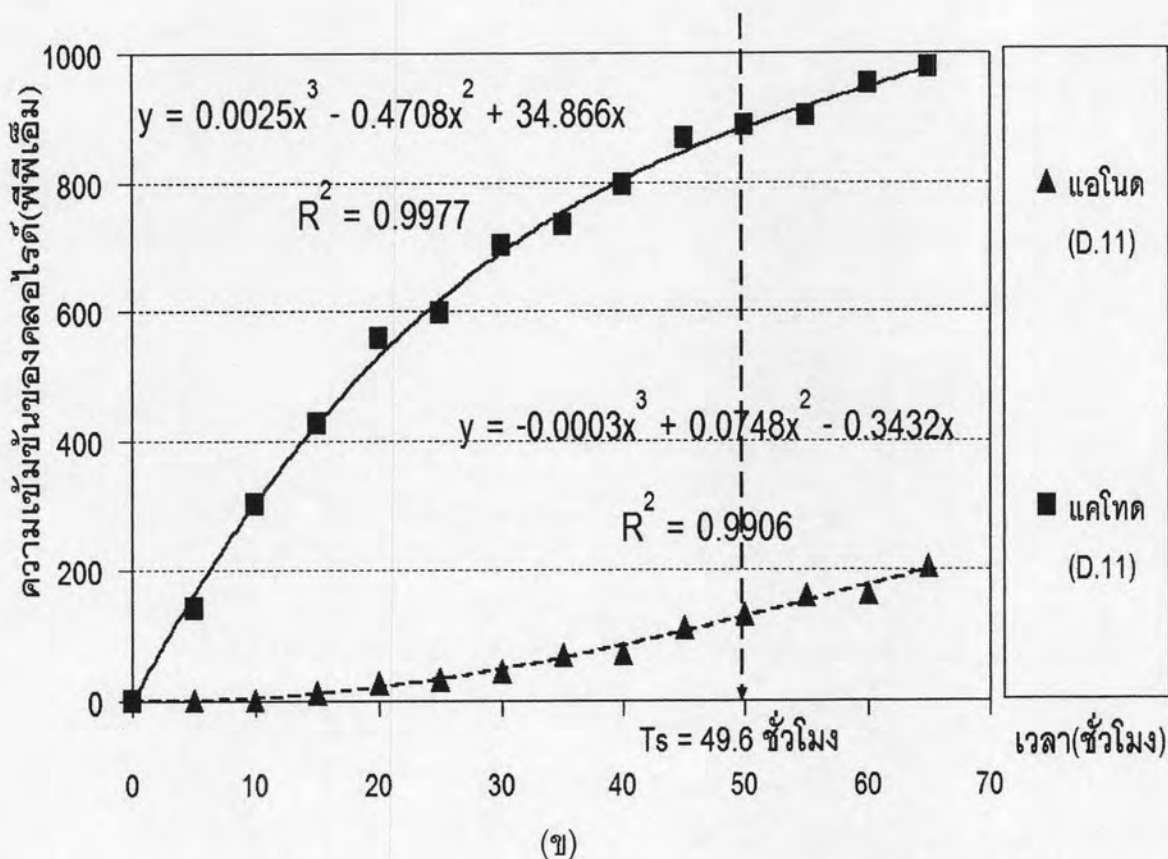
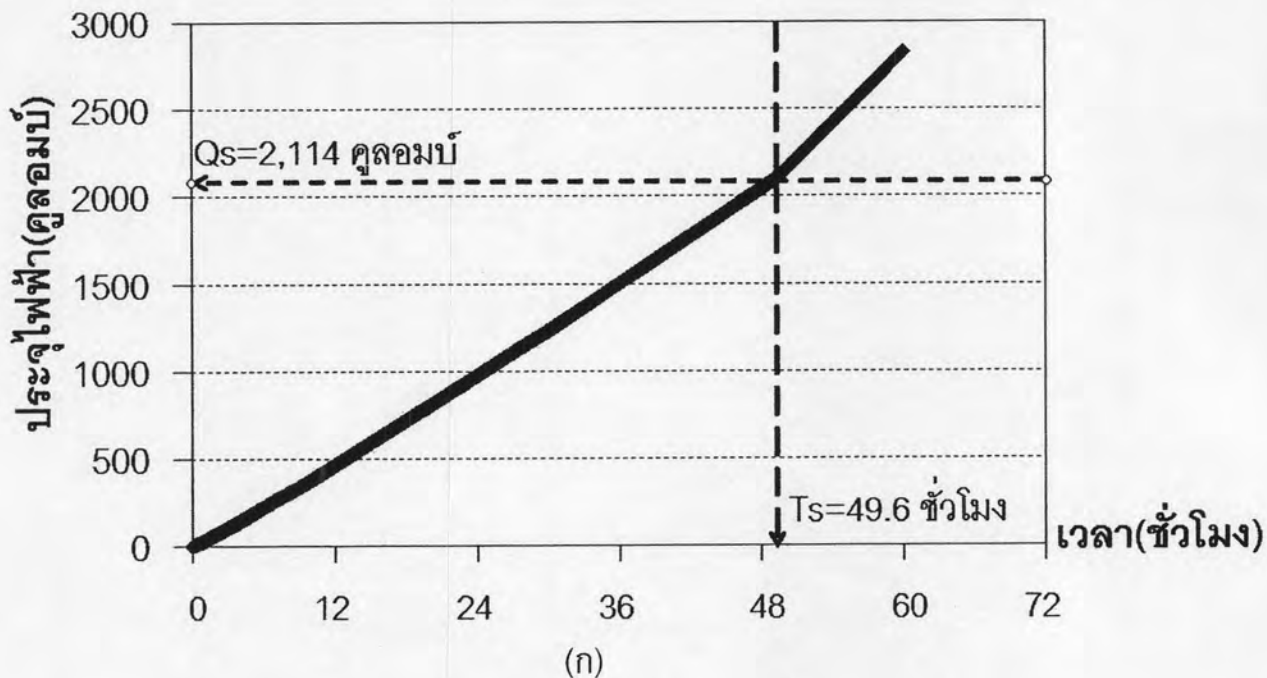
รูปที่ 4.6 ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 91 วันเทียบกับปริมาณของโพรงคอนกรีตรวมโดยวิธีเอ็มไอพี ของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 9 สัดส่วนผสม



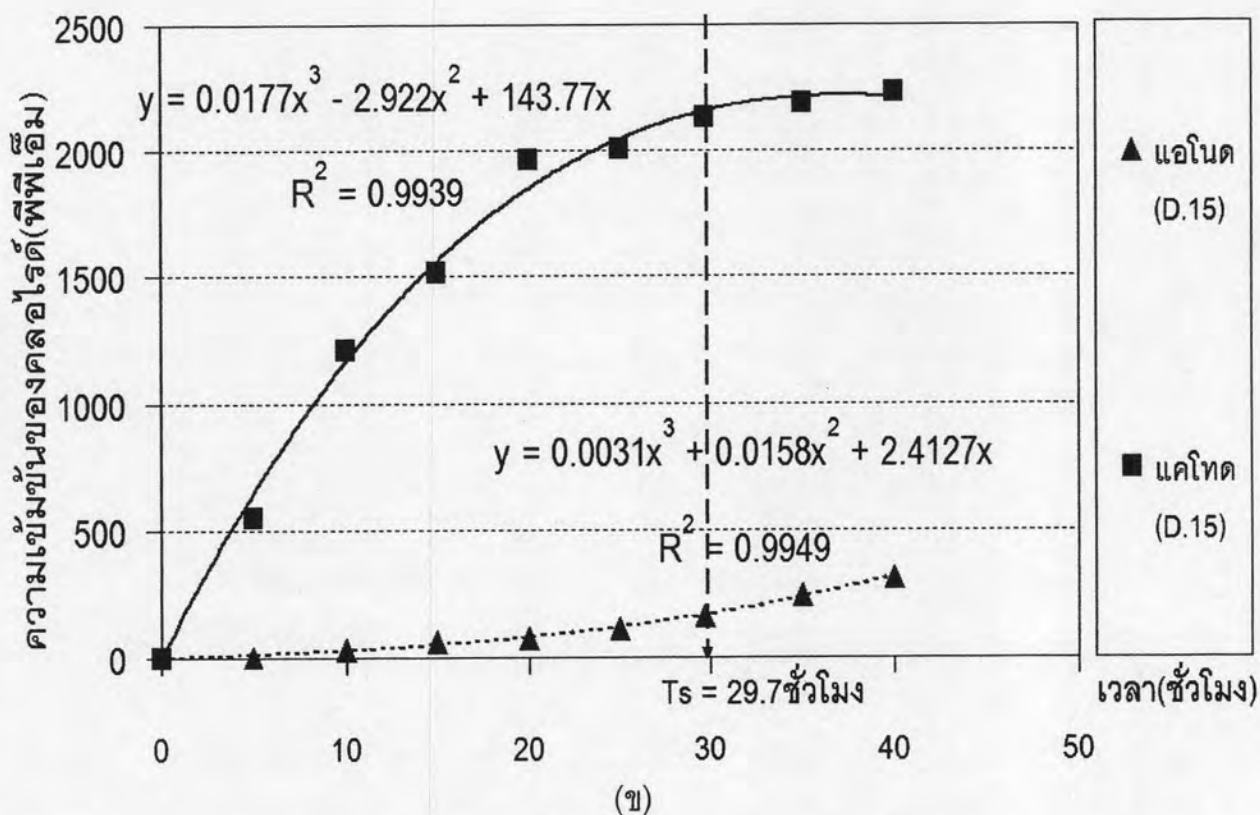
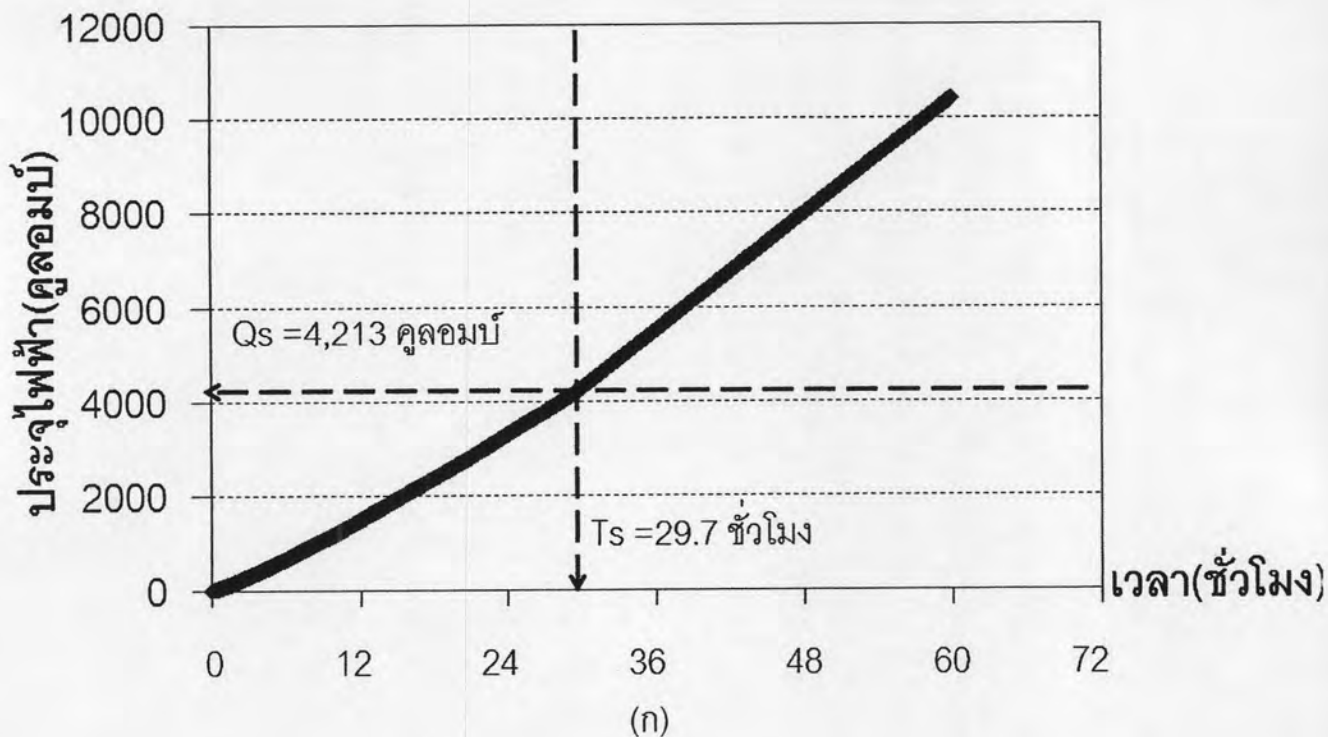
รูปที่ 4.7(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.4 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.4 และรูปที่ 4.7 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.4



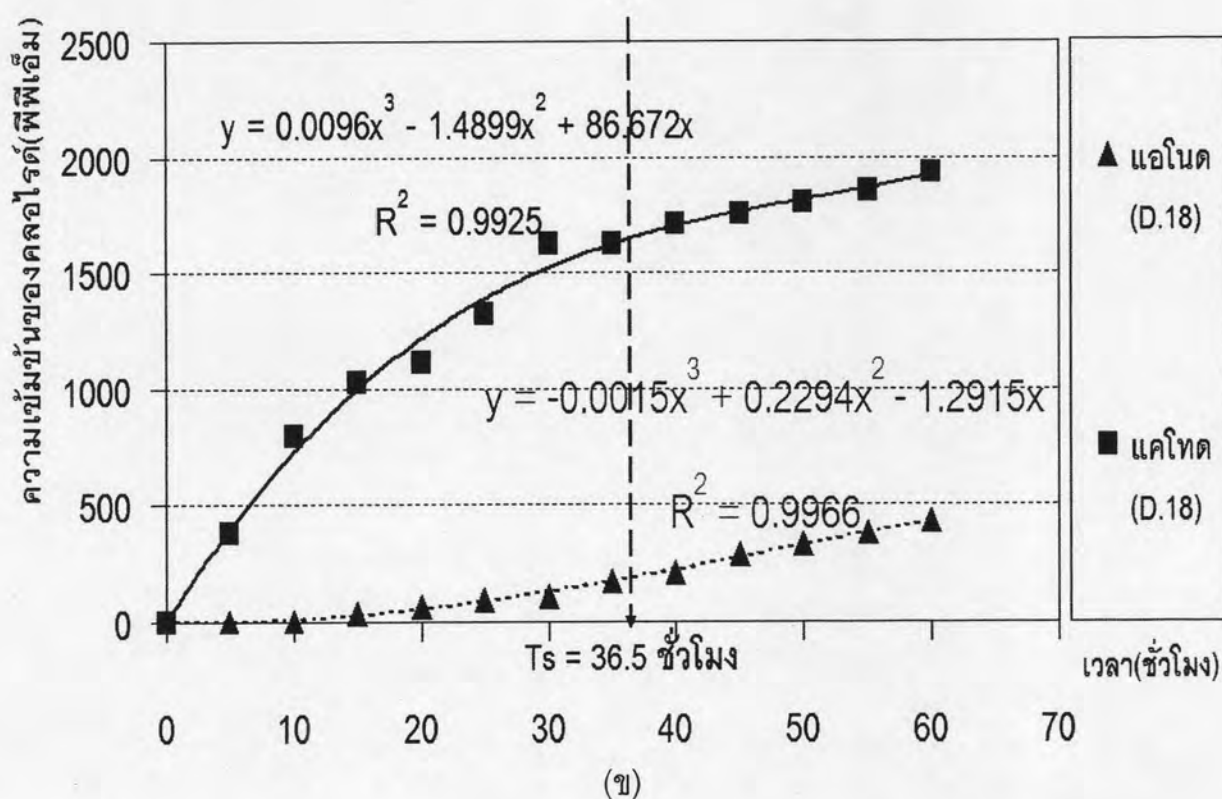
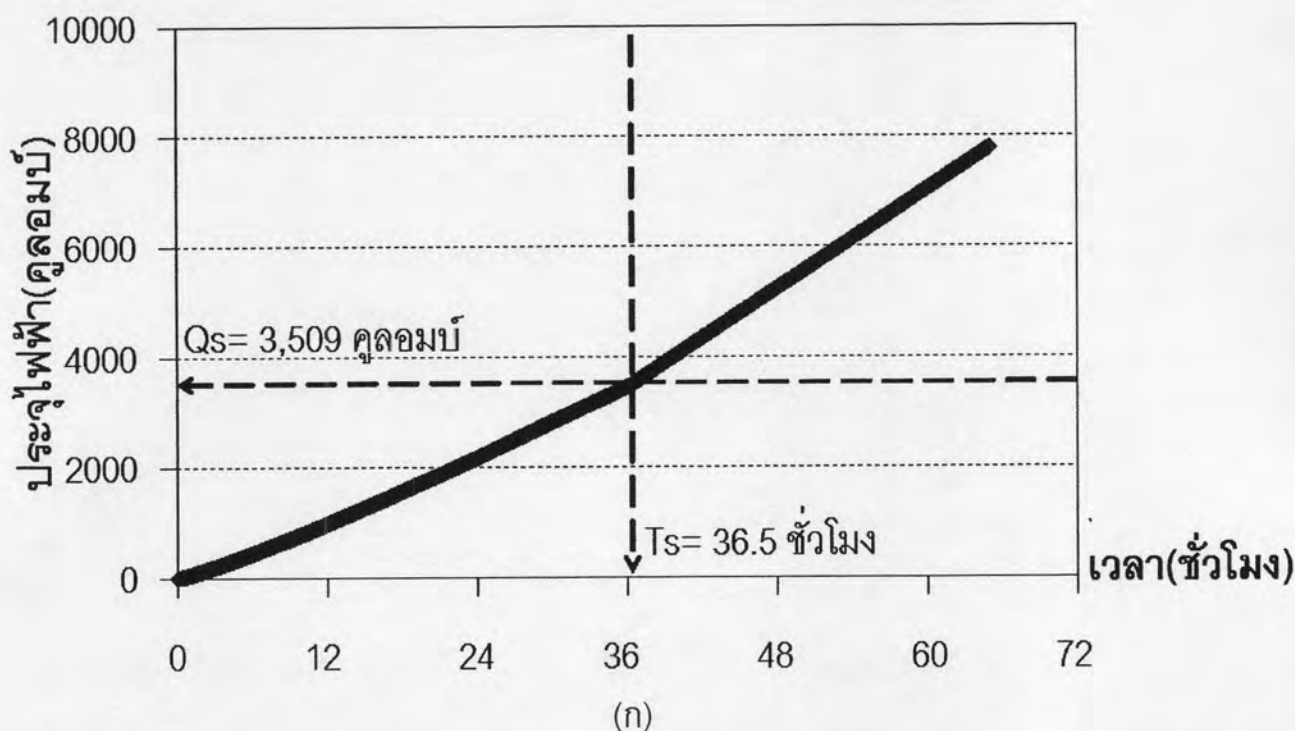
รูปที่ 4.8(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.7 (OPC65%+ FA35%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และรูปที่ 4.8 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ซั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.7



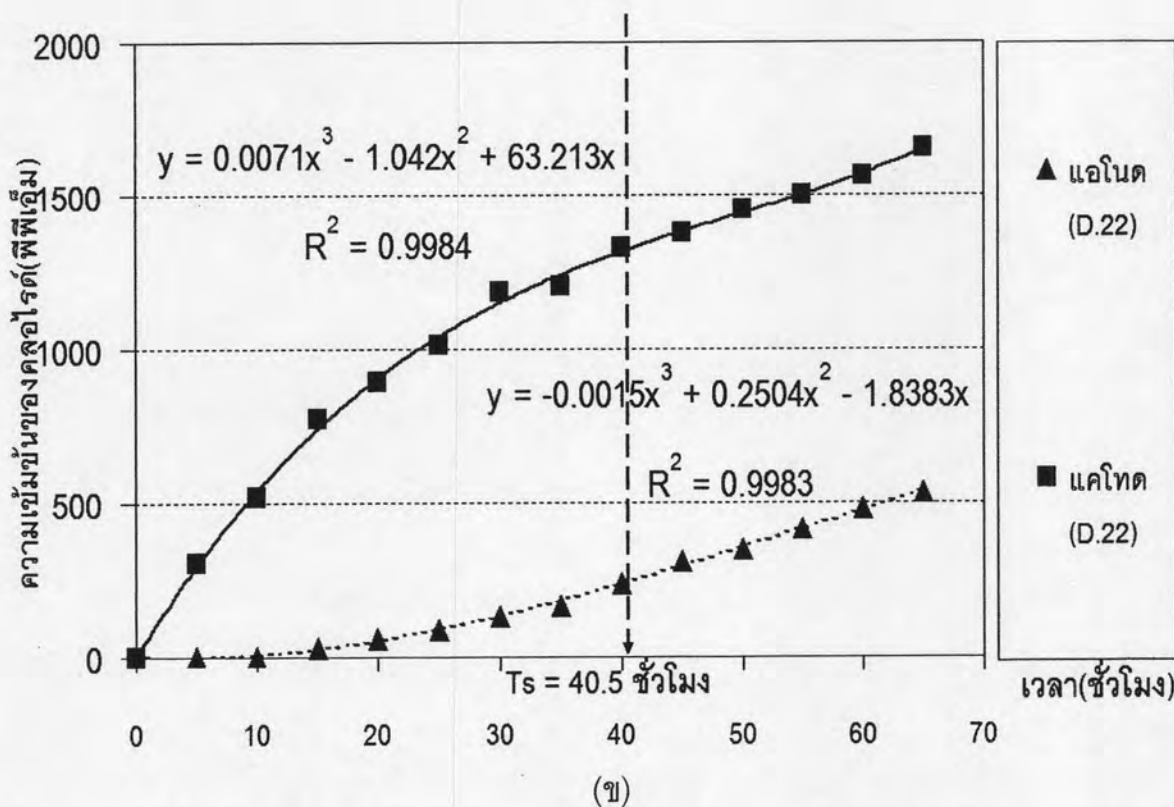
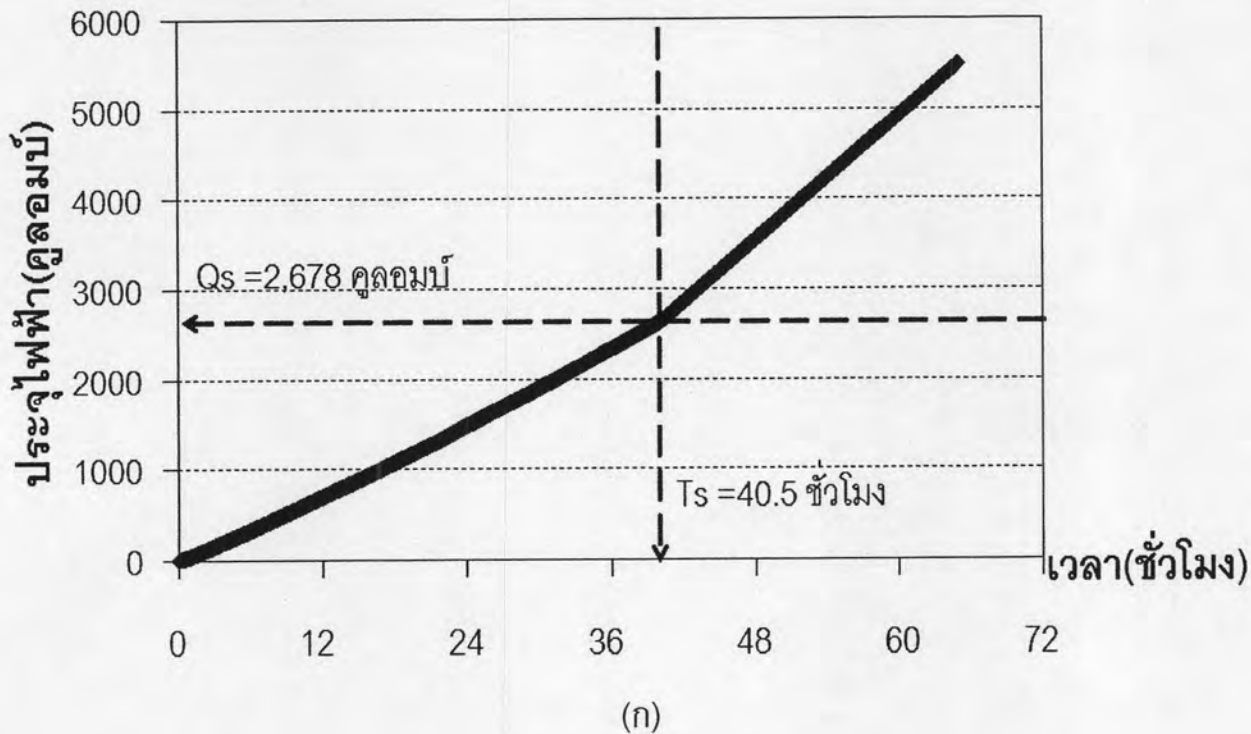
รูปที่ 4.9(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.11 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และรูปที่ 4.9(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.11



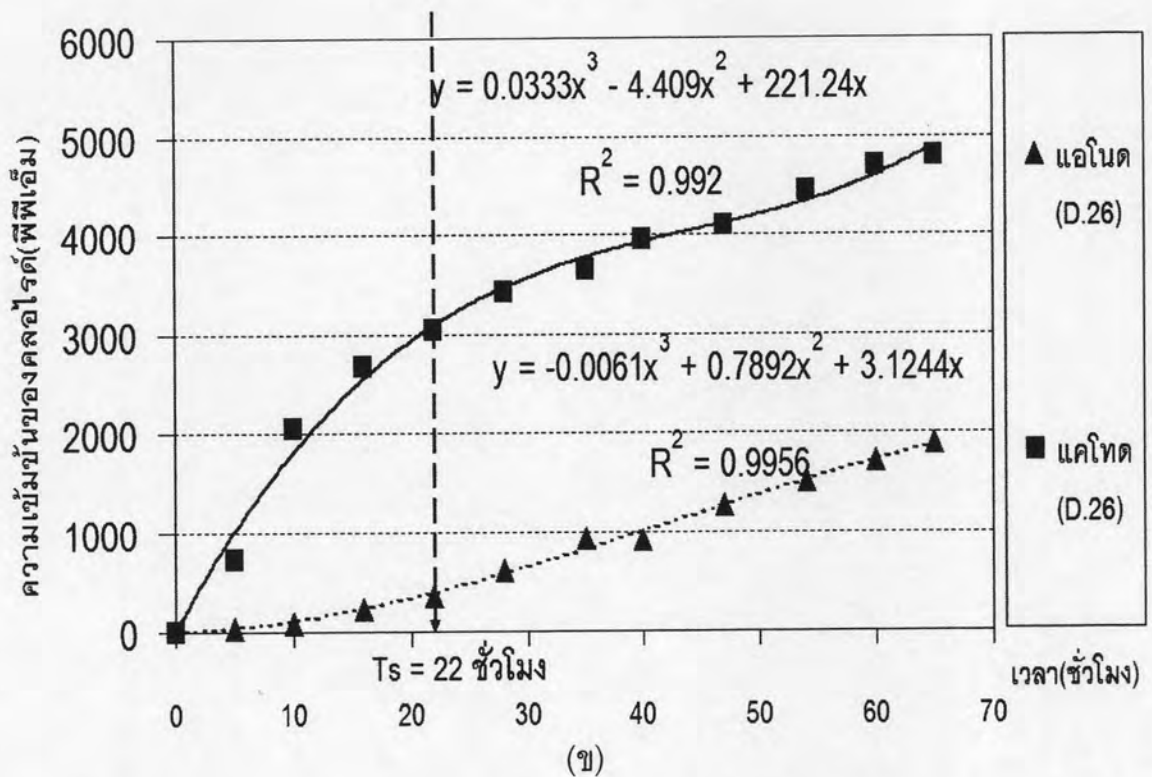
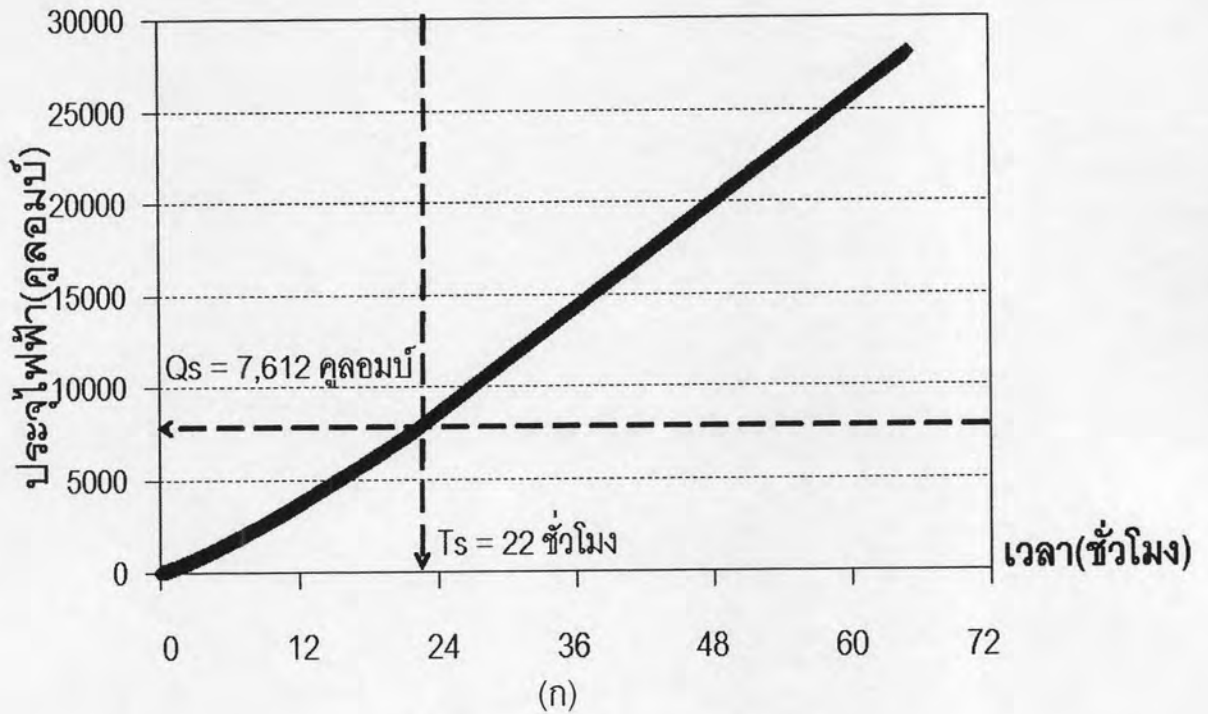
รูปที่ 4.10(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.15 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และ รูปที่ 4.10(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนโตนและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.15



รูปที่ 4.11(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.18 (OPC85%+ FA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และรูปที่ 4.11 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ชั่วแอนโตนและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.18

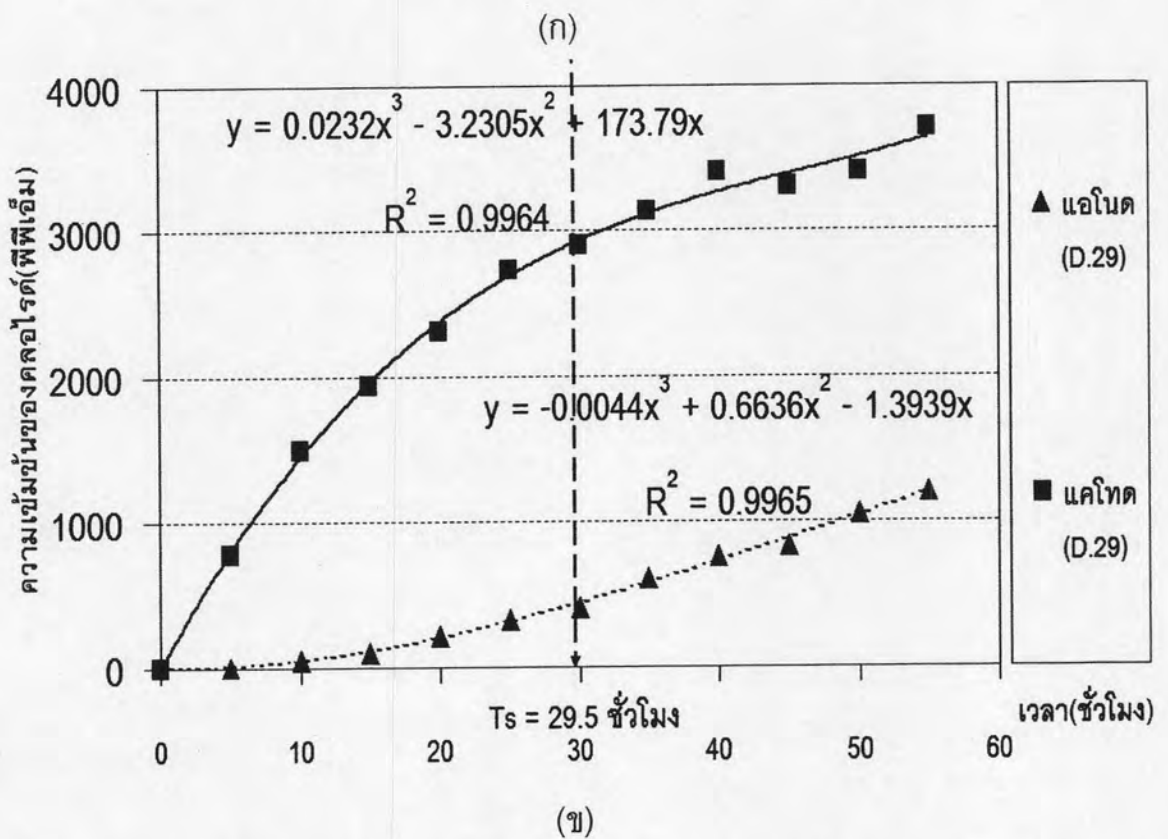
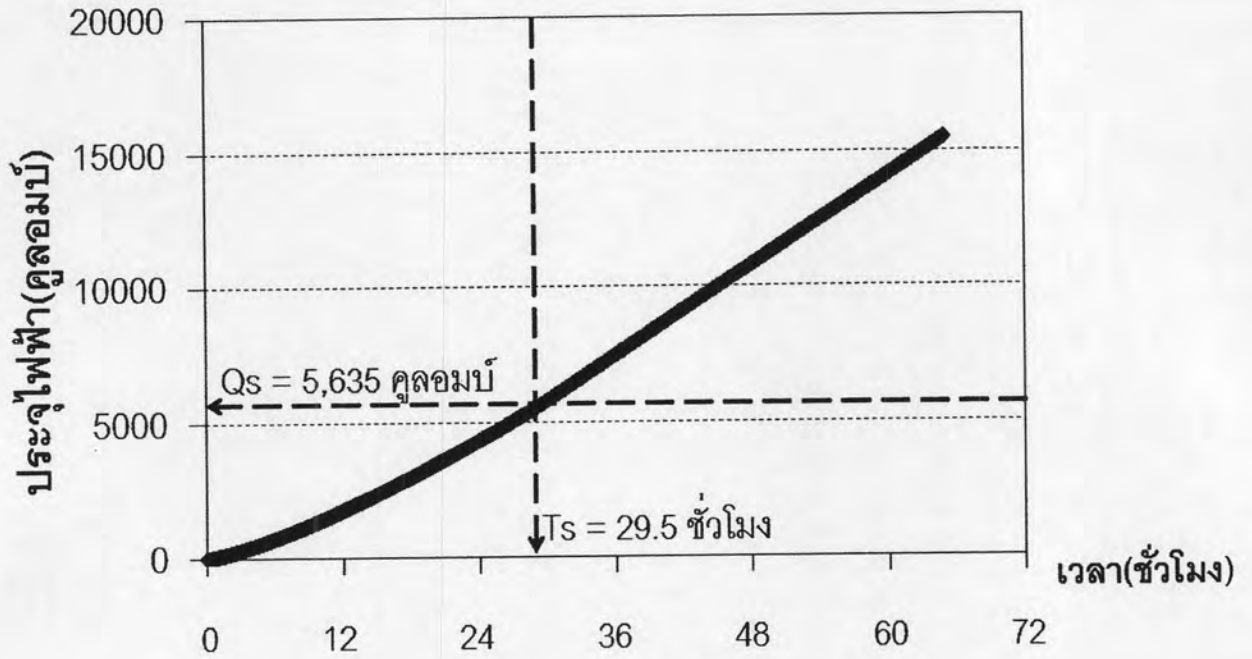


รูปที่ 4.12(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.22 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 และรูปที่ 4.12 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนิโตและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.22

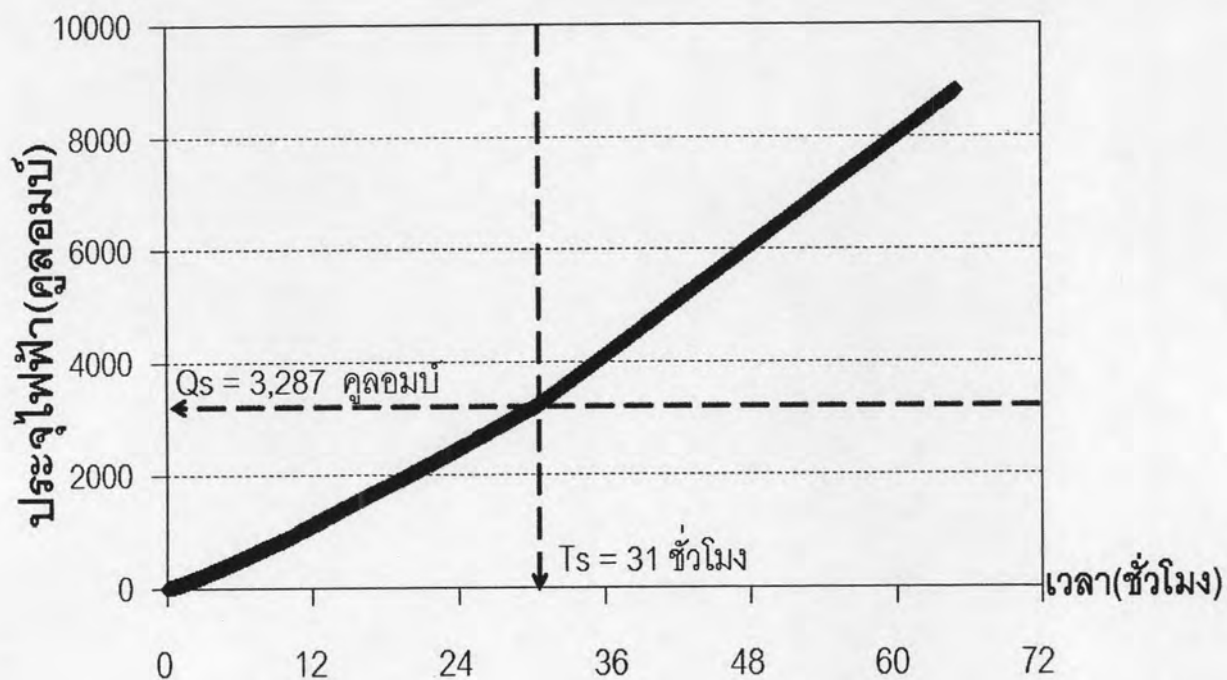


รูปที่ 4.13(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.26 (OPC85%+ RHA15%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.13 (ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนอนและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.26

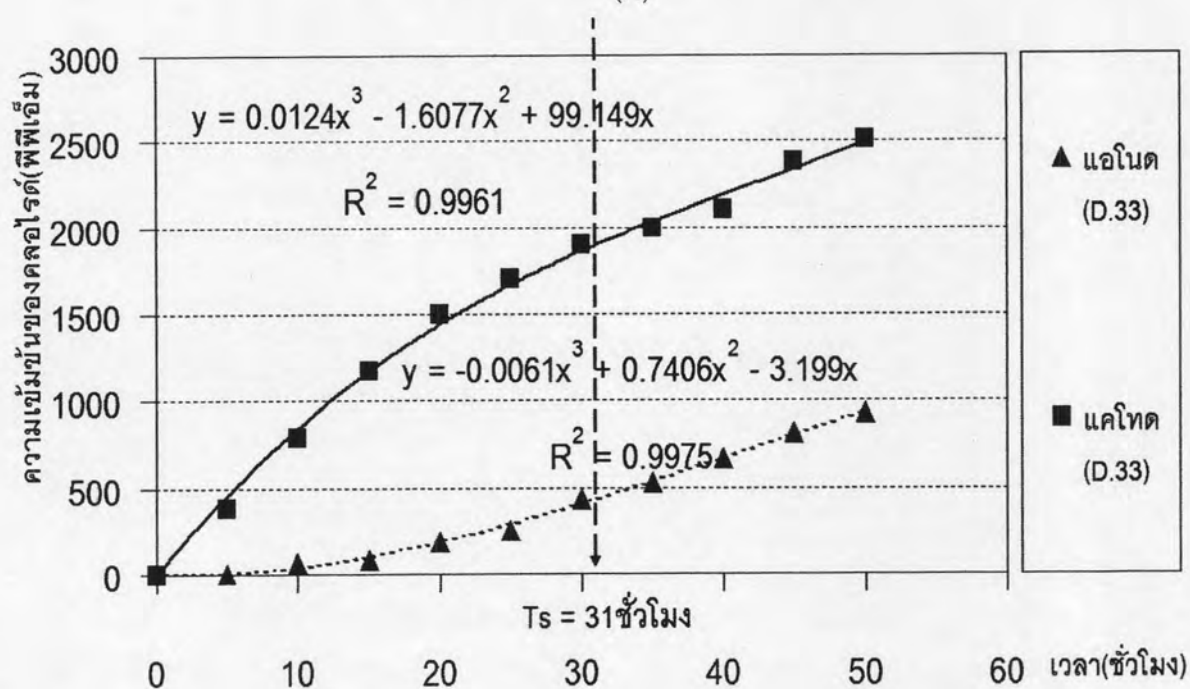




รูปที่ 4.14(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.29 (OPC65%+FA35%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.14(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอโนดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.29

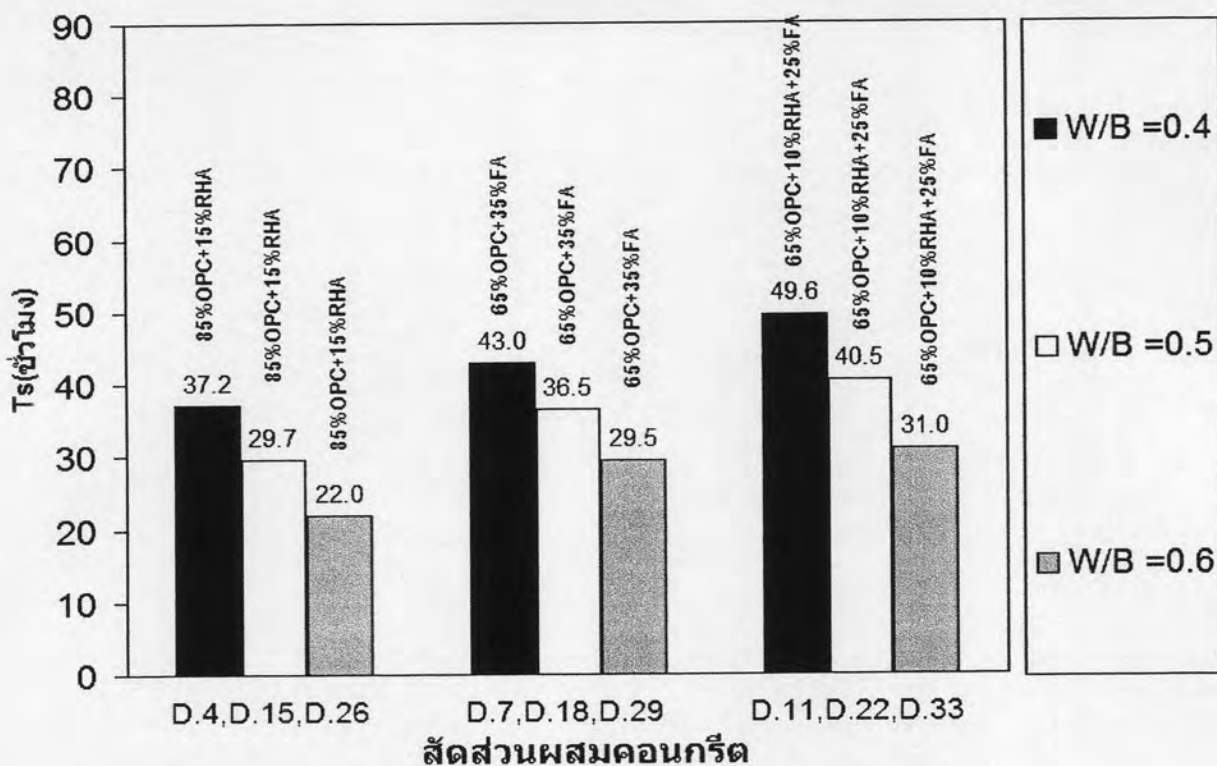


(ก)

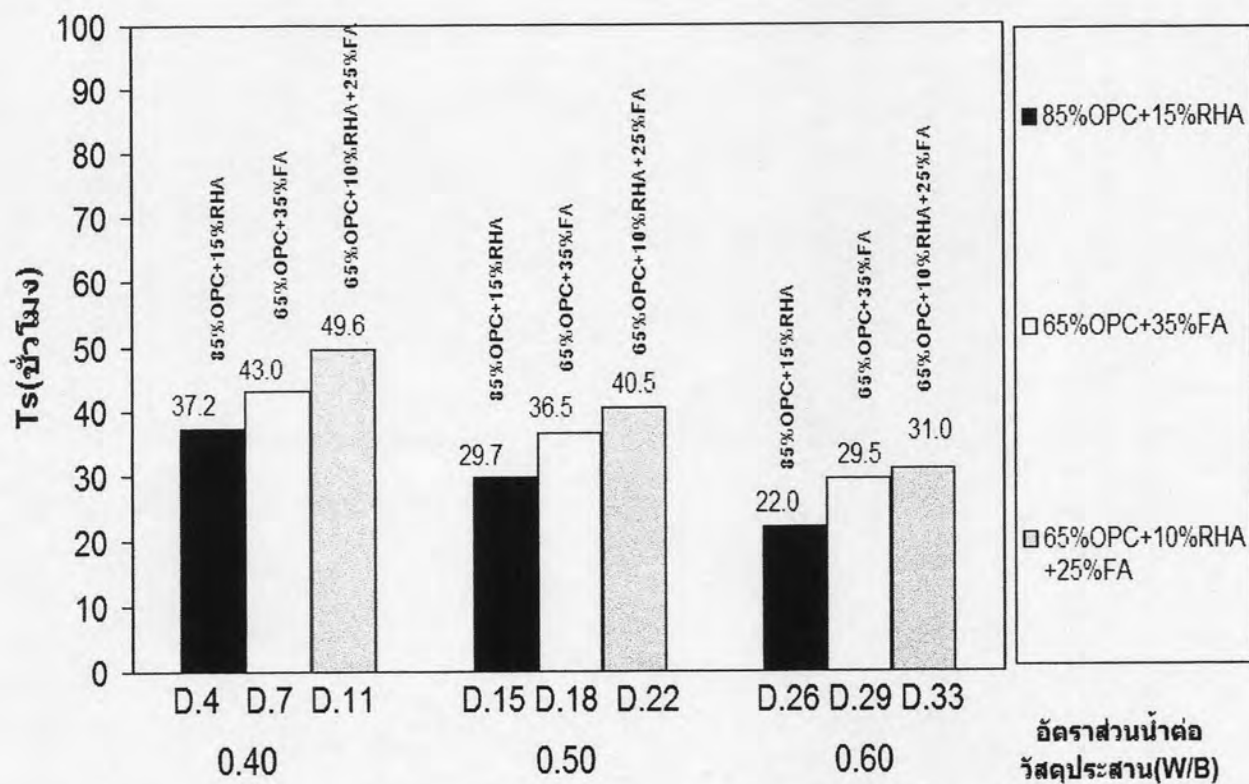


(ข)

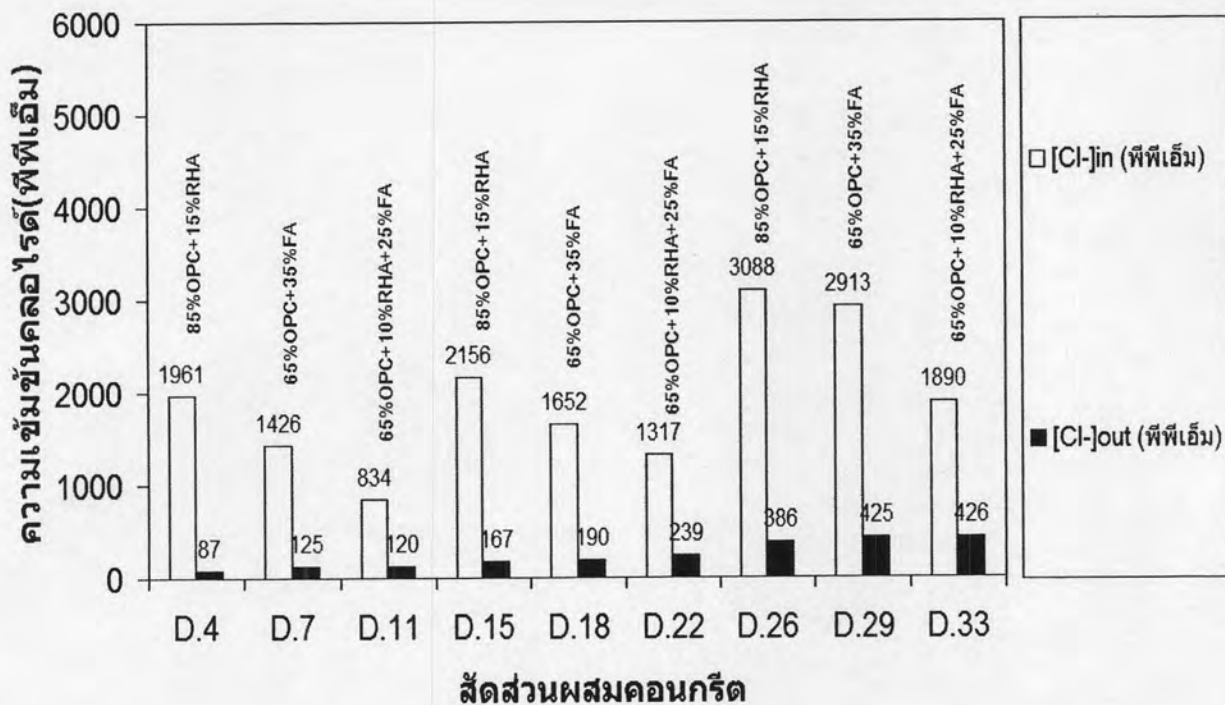
รูปที่ 4.15(ก) ปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผ่านตัวอย่างตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ ( $T_s$ ) ของก้อนตัวอย่างสัดส่วนผสม D.33 (OPC65%+ RHA10%+FA25%) อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.60 และรูปที่ 4.15(ข) ความเข้มข้นที่มีเปลี่ยนแปลงของคลอไรด์ที่ขั้วแอนอดและแคโทดเทียบกับเวลาของสัดส่วนผสม D.33



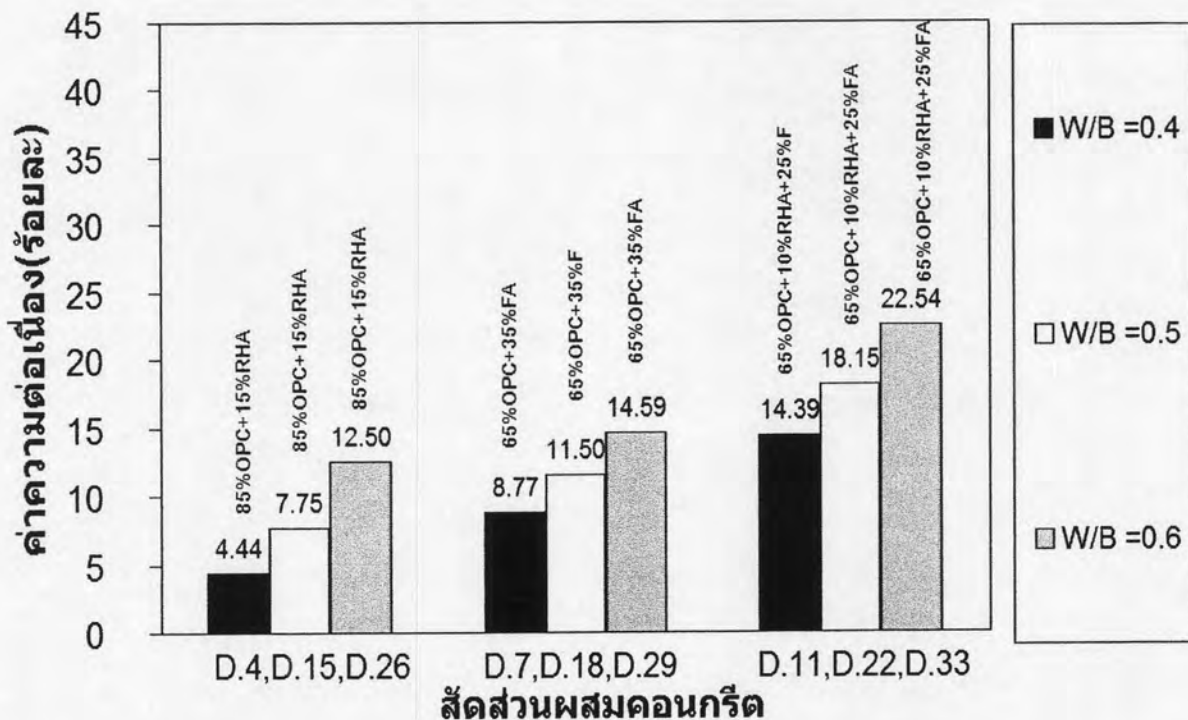
รูปที่ 4.16 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



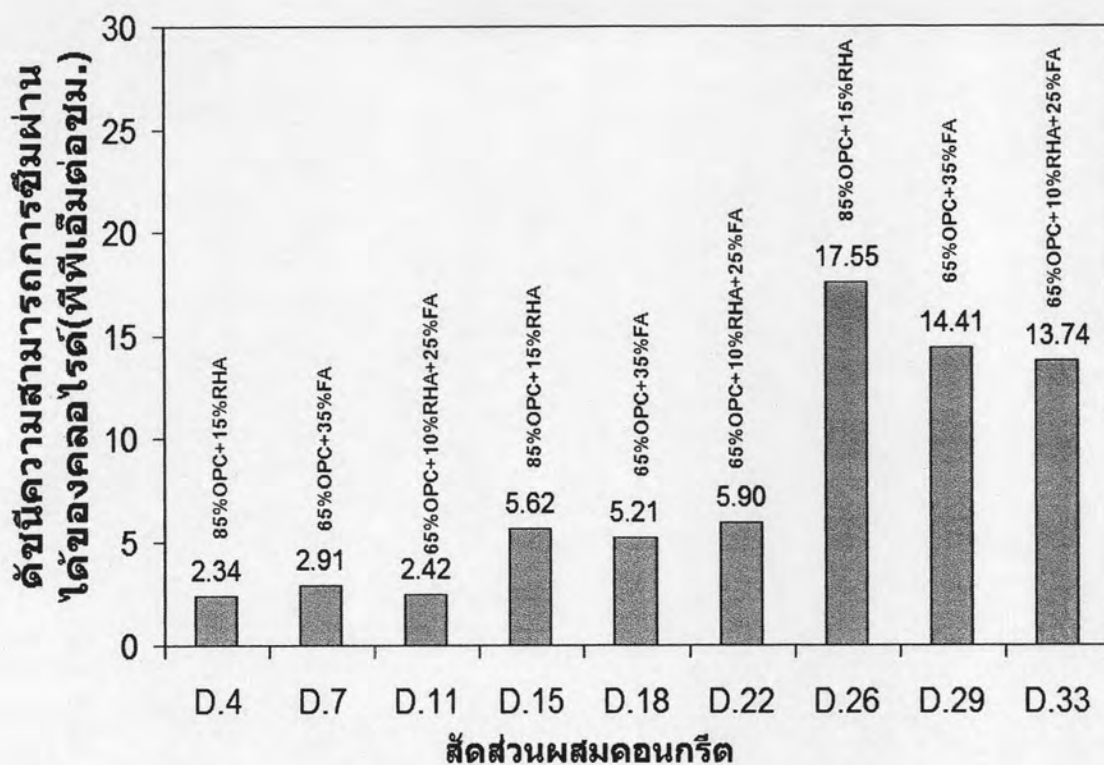
รูปที่ 4.17 ระยะเวลา (Ts) ที่ใช้ตามวิธีประยุกต์โดยแยกตามชนิดของวัสดุประสานที่ใช้



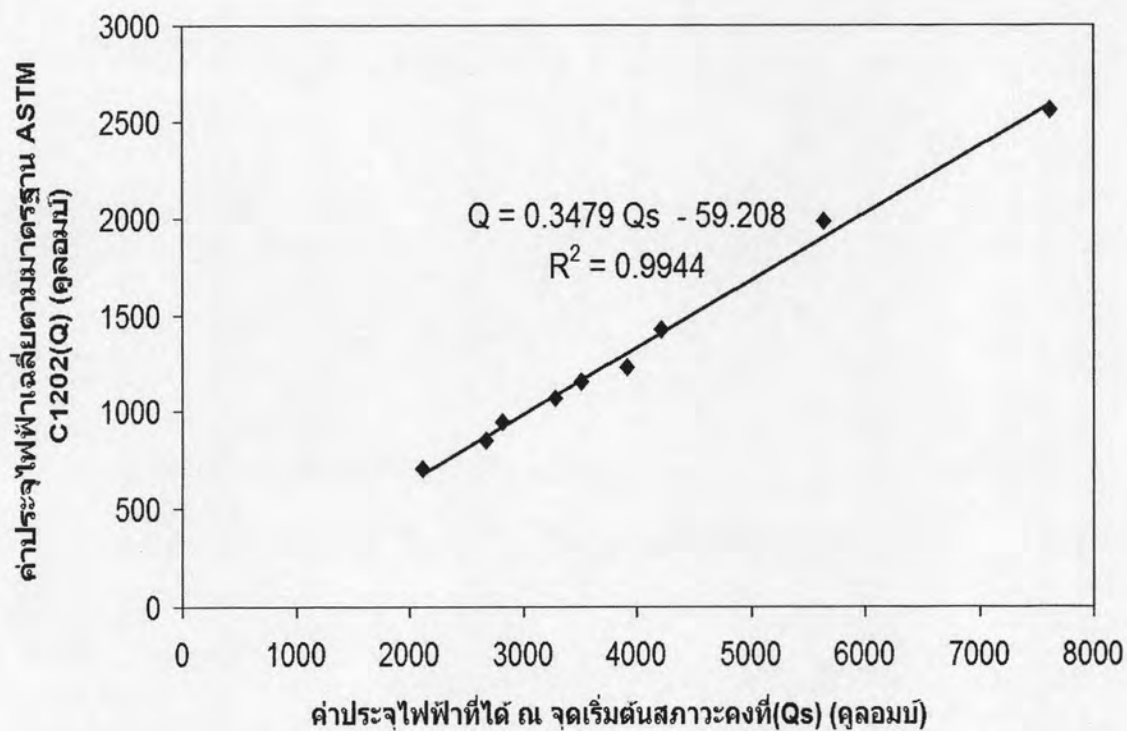
รูปที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้าและออกที่ได้ ณ จุดเริ่มต้นสภาวะคงที่ในแต่ละสัดส่วนผสม



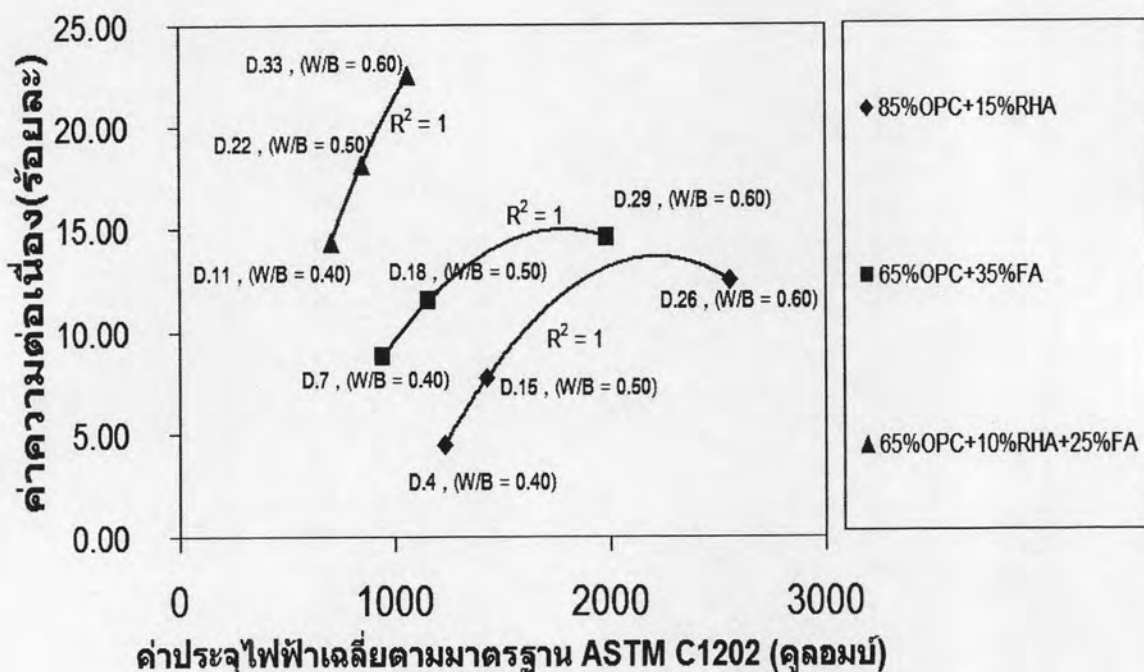
รูปที่ 4.19 ค่าร้อยละของความต่อเนื่องของโพรงคอนกรีตในแต่ละสัดส่วนผสม



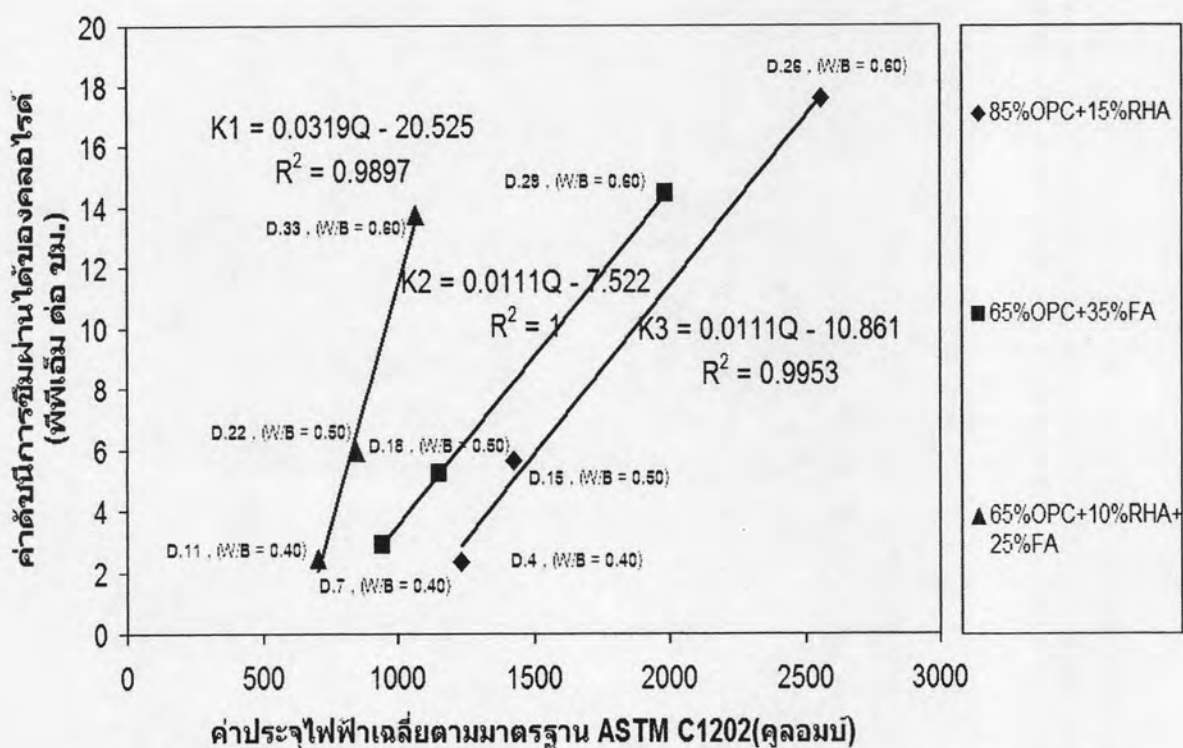
รูปที่ 4.20 ค่าดัชนีความสามารถในการซึมผ่านได้ของคลอไรด์ในแต่ละสัดส่วนผสม



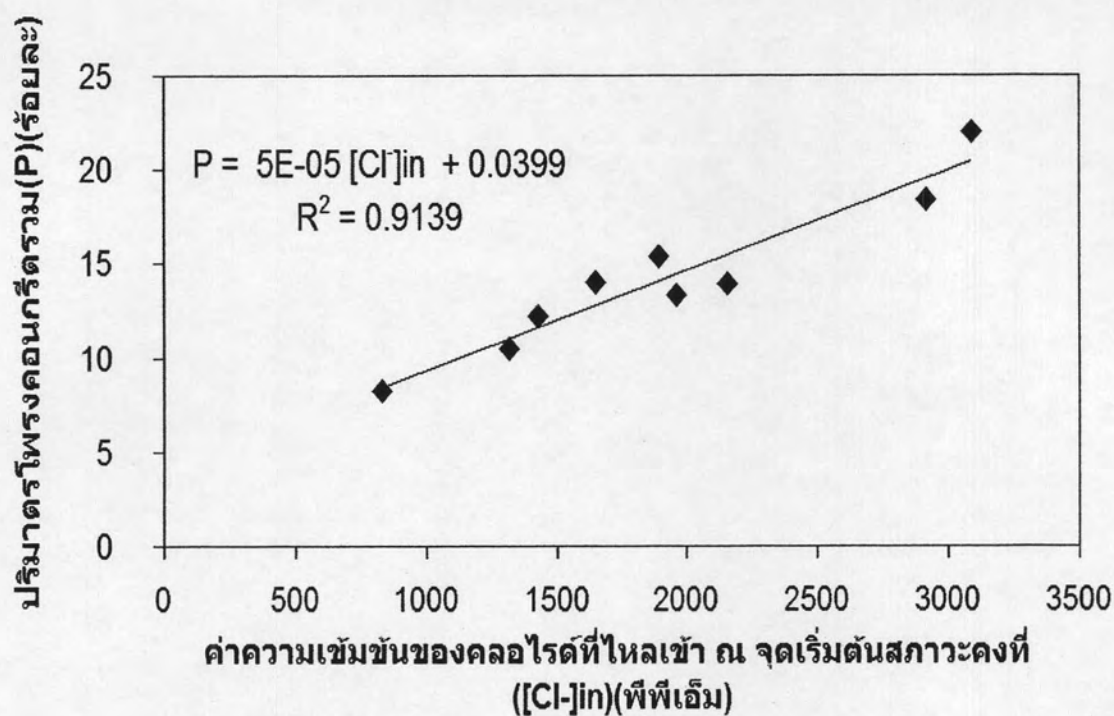
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประจุไฟฟ้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ (Qs) เทียบกับ ประจุไฟฟ้าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASTM C1202 (Q)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่อน้องเทียบกับประจุไฟฟ้า ASTM C1202



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการซึมผ่านได้ของคลอไรด์เทียบกับค่าประจุไฟฟ้า เฉลี่ย ตามมาตรฐาน ASTM C1202



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นคลอไรด์ที่ไหลเข้า ณ จุดเริ่มต้นของสภาวะคงที่ ([Cl<sup>-</sup>]<sub>in</sub>) เมื่อเทียบกับ ปริมาณโพรงคอนกรีตรวมที่ได้จากวิธีเอ็มไอพี