บทที่ 4

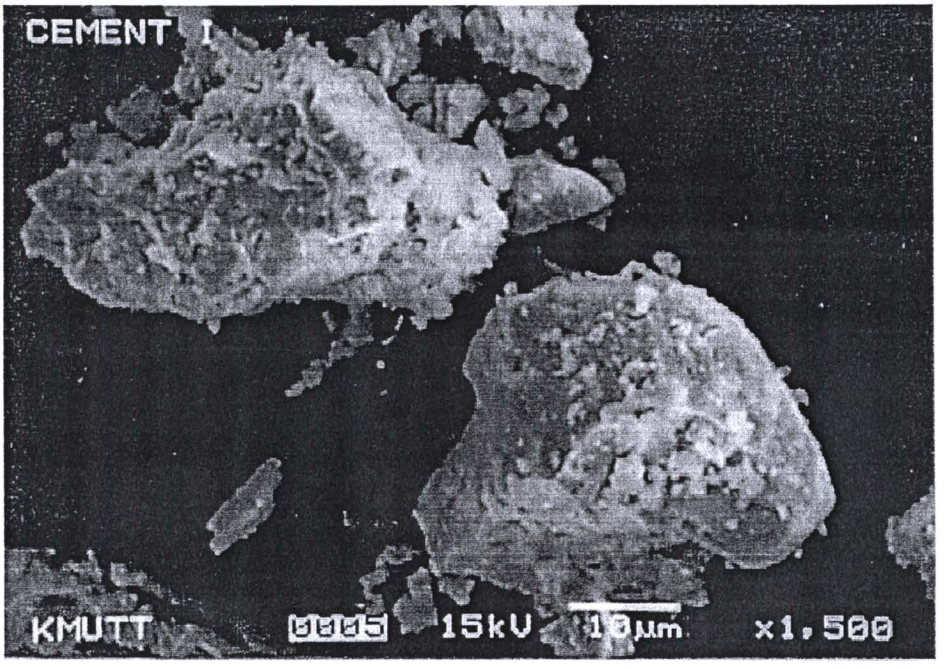
ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติวัสดุประสาน

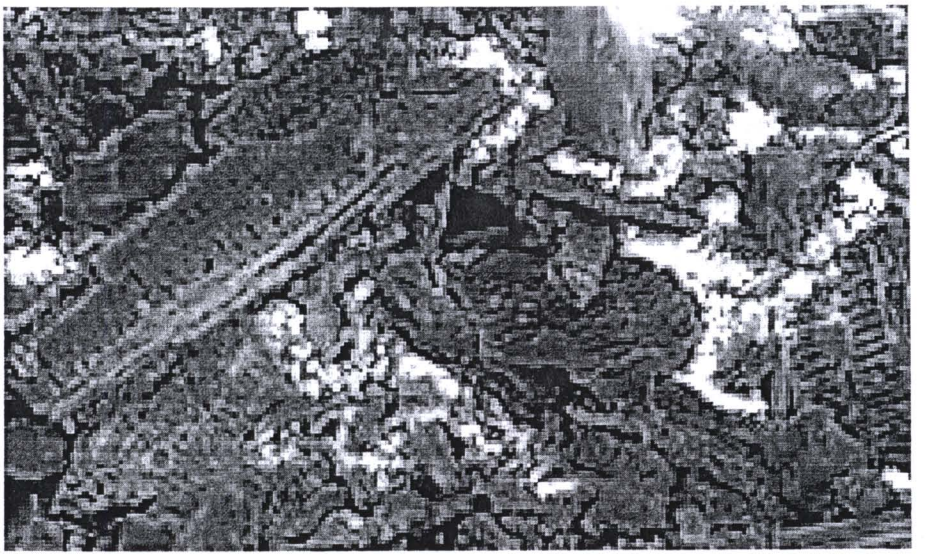
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.1.1.1 รูปร่าง

เมื่อพิจารณารูปร่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบเปลือกไม้จากภาพขยายกำลังสูงด้วยเครื่อง SEM ในกำลังขยายต่างๆกันตามความเหมาะสมของขนาดอนุภาค ตามรูปที่ 4.1 เห็นได้ชัดเจนว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างเป็นก้อน เหลี่ยมมุม และมีผิวที่ขรุขระไม่เรียบ ส่วนรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างเถ้าแกลบเปลือกไม้ รูปร่างของเถ้าแกลบเปลือกไม้มีอนุภาคที่เป็นแผ่นยาว ซึ่งอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบเปลือกไม้ จะช่วยให้คอนกรีตมีคุณสมบัติดีขึ้น เนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่มีมาก ส่งผลให้การยึดเกาะส่วนผสมต่างๆในคอนกรีตดีขึ้น และพัฒนากำลังอัดได้มากขึ้น



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.1.1.2 ความละเอียดและการกระจายตัวของอนุภาค

ความละเอียดของวัสดุมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการทำปฏิกิริยาโดยเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูง การพัฒนากำลังอัดในคอนกรีตจะเป็นไปอย่างช้าๆเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ 28 วันแรก แต่จะค่อยๆพัฒนากำลังอัดในระยะยาวจนถึง 3 ปีครึ่ง [จตุพล และคณะ, 2548] และทำให้ความพรุนต่ำ เพราะความละเอียดสูงก็หมายถึงมีพื้นที่ผิวมากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้เกิดสารแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และเนื่องจากความละเอียดไปอุดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 20 พื้นที่ผิวจำเพาะวิธีของเบลนเท่ากับ 3,250 ซม.^{2}/ก. และค่ากลางอนุภาคเท่ากับ 25 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ใช้ มีค่าน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 12.2 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.16 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 9,460 ซม.^{2}/ก. และมีค่าเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 10.04 ไมโครเมตร

4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบเปลือกไม้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาระบุว่า ความละเอียดของวัสดุมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก [วันชัย และคณะ, 2546] พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี MgO, SO_3, LOI, C_3A และ C_4AF อยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดของ ASTM C 150 ซึ่ง C_3A ช่วยในการยึดจับคลอไรด์ เมื่อพิจารณาผลรวมออกไซด์ของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ของเถ้าแกลบเปลือกไม้มีค่ารวมเท่ากับร้อยละ 90.66 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO_3 และค่า LOI เท่ากับร้อยละ 0.09 และ 5.71 ตามลำดับ ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASTM C 618 คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ และจัดให้อยู่ใน Class N ได้

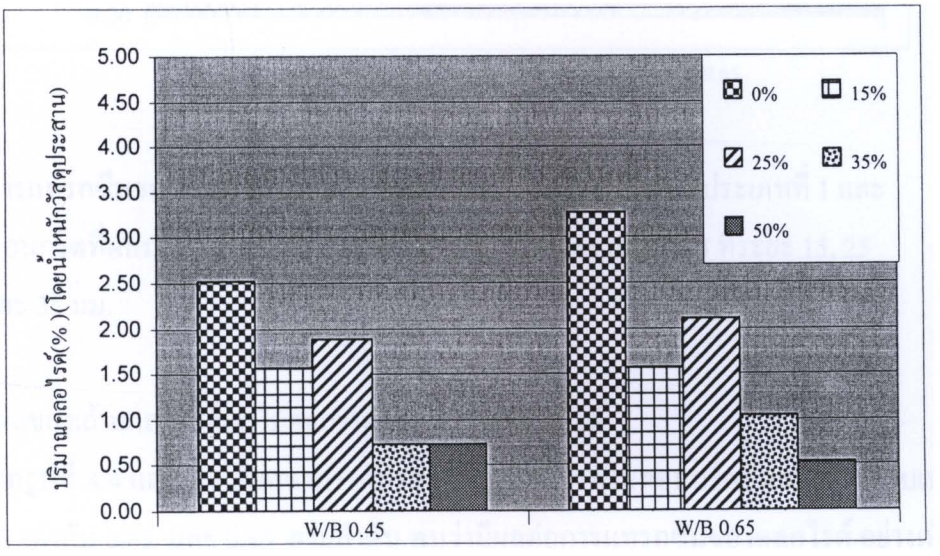
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี โดยน้ำหนัก (ร้อยละ)	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบ เปลือกไม้
Silicon Dioxide, SiO_2	20.80	87.0
Aluminum Oxide, Al_2O_3	5.50	1.08
Iron Oxide, Fe_2O_3	3.16	2.58
Calcium Oxide, CaO	64.97	1.25
Magnesium Oxide, MgO	1.06	-
Sodium Oxide, Na_2O	0.08	0.08
Potassium Oxide, K_2O	0.55	1.00
Sulfur Trioxide, SO_3	2.96	0.09
Loss On Ignition, LOI	2.89	5.71
Tricalcium Silicate,C_3S	56.50	-
Dicalcium Silicate,C_2S	17.01	-
Tricalcium Aluminate, C_3A	9.23	-
Tetracalcium Aluminoferrite,C_4AF	9.62	-

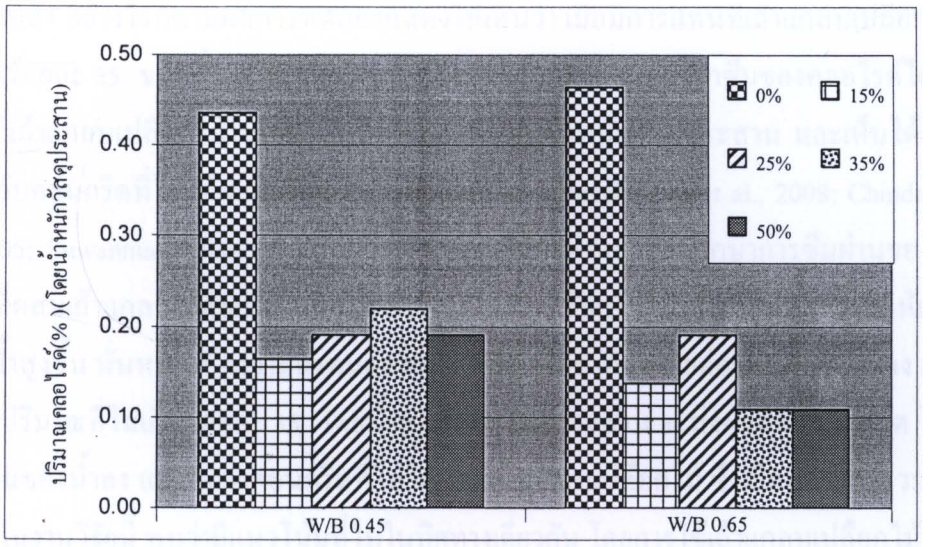
4.2 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

4.2.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการซึมผ่านของคลอไรด์

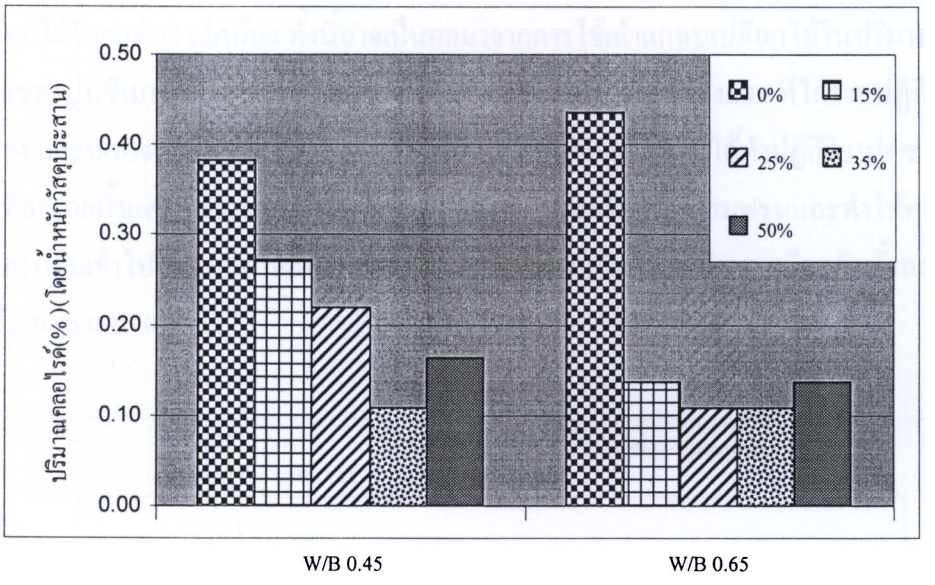
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 จะเห็นค่าปริมาณของคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ระยะความลึกต่างๆกันพบว่า อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ กล่าวคืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ได้มากกว่าอัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 ในระยะห่างจากผิวคอนกรีตที่เท่าๆกัน และแสดงแนวโน้มที่เหมือนกันที่ระดับความลึกอื่นๆดังแสดงในรูปที่ 4.3(ข.) และ 4.3(ค.) ที่แสดงผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 25 และ 35 มม. ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระดับความลึกจากผิวคอนกรีตมากขึ้นจะเห็นว่าผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าไปได้ยากขึ้น และสิ่งที่สังเกตได้ชัดอีกอย่างคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตธรรมดาที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้มากกว่าในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ โดยสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 เป็น 0.65 ในคอนกรีตธรรมดาจะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับความลึก 25 มม. เท่ากับ 0.44 และ 0.46 ตามลำดับในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 จะมีการแทรกซึมของคลอไรด์ที่ระดับเดียวกันเท่ากับ 0.22 และ 0.11 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในคอนกรีตธรรมดา คุณสมบัติด้านการซึมผ่านในคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังอัด และขึ้นกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็นหลัก ส่วนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ คุณสมบัติด้านการซึมผ่านจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาปอซโซลานด้วย



ก.ความลึก 15 มม.



ข. ความลึก 25 มม.



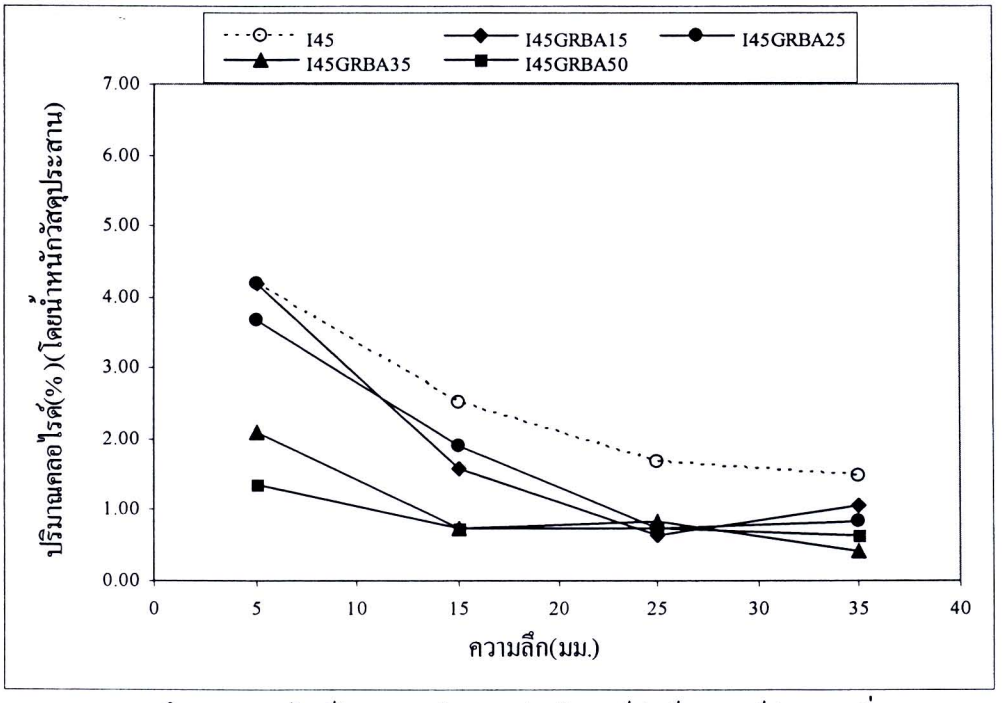
ค. ความลึก 35 มม.

รูปที่ 4.3 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ที่ระยะ 15, 25 และ 35 มม.

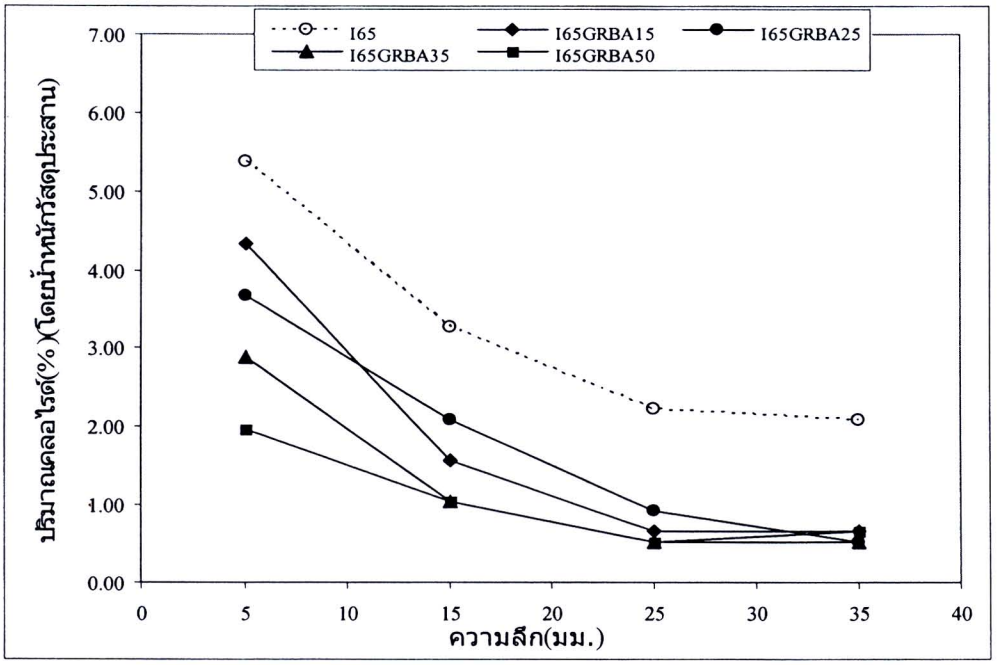
4.2.2 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 ที่แสดงการแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ตามลำดับ พบว่ามีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ อย่างเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะบริเวณผิวของคอนกรีต ทั้งในส่วนของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 และ 0.65 ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในส่วนผสมคอนกรีตมีผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์ลดลง โดยการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้การแทรกซึมของ

คลอไรด์ลดลง อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 35 ของน้ำหนักวัสดุประสานมีแนวโน้มจะลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 15 ของน้ำหนักวัสดุประสาน และเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้เลย (Tangchirapat et al., 2008; Chindaprasirt et al., 2005; Suwanmaneechot et al., 2009) ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ พบว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณที่สูง จะทำให้การซึมผ่านของน้ำสูงขึ้น นั่นหมายถึงความคงทนต่อสารเคมีที่เข้าไปทำอันตรายต่อคอนกรีตน้อยลง แต่การแทนที่ในปริมาณที่ไม่เกินร้อยละ 35 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะส่งผลดีต่อคอนกรีต โดยลดการซึมผ่านของน้ำลง และดีกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ พบว่ามีแนวโน้มที่ไปในทิศทางเดียวกัน โดยการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ถึงร้อยละ 50 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ส่งผลให้การแทรกซึมของคลอไรด์มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 35 เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณสูงจะลดปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตลง และส่งผลให้ความแข็งแรง ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง และนอกจากนั้นปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ส่วนที่เกินและไม่ได้ทำปฏิกิริยาปอซโซลานก็สามารถที่ละลายน้ำและถูกชะออกมาได้ง่าย ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเกิดความพรุนและทำให้คลอไรด์สามารถแทรกซึมเข้าไปในคอนกรีตได้ง่ายขึ้น และผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งกลุ่มที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65



รูปที่ 4.4 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45



รูปที่ 4.5 การแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด

ความสัมพันธ์ระหว่างคลอไรด์อิสระกับคลอไรด์ทั้งหมด หาได้จากการนำค่าของปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด(ใช้กรดเป็นตัวทำละลาย)และปริมาณคลอไรด์อิสระ(ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย) จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยรูปที่ 4.6 และ 4.7 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณคลอไรด์อิสระและปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในกลุ่มคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ และในกลุ่มที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ตามลำดับ การวิเคราะห์เชิงถดถอยจากกราฟ จะได้สมการที่ใช้ในการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระในส่วนผสมต่างๆ ดังนี้

คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ได้ Free Cl^- = 0.9278Total Cl^--0.0496

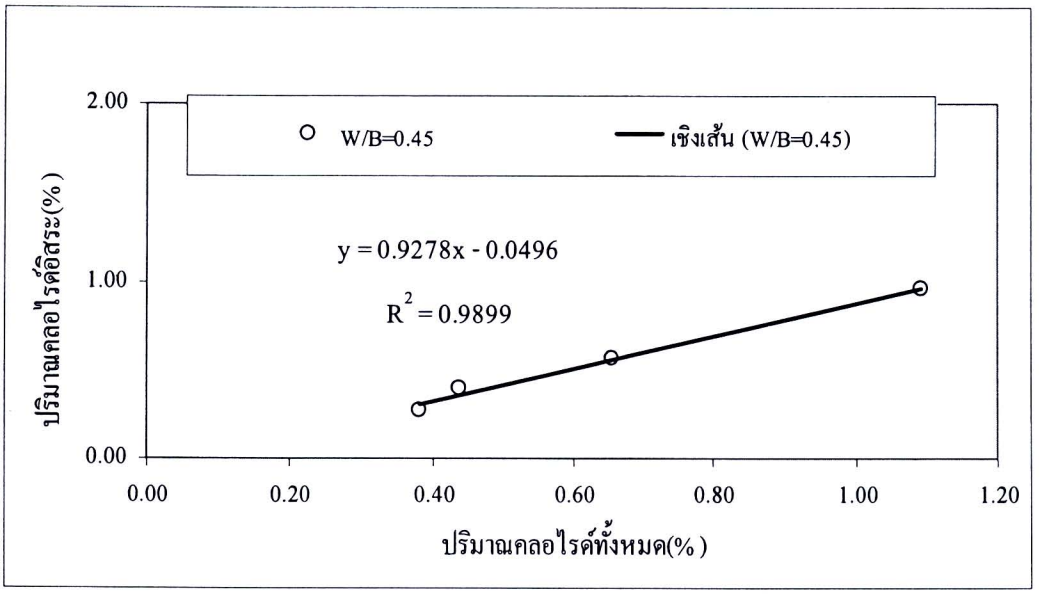
คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 ได้ Free Cl^- = 0.9671Total Cl^--0.0436

คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 ได้ Free Cl^- = 0.9263Total Cl^--0.0747

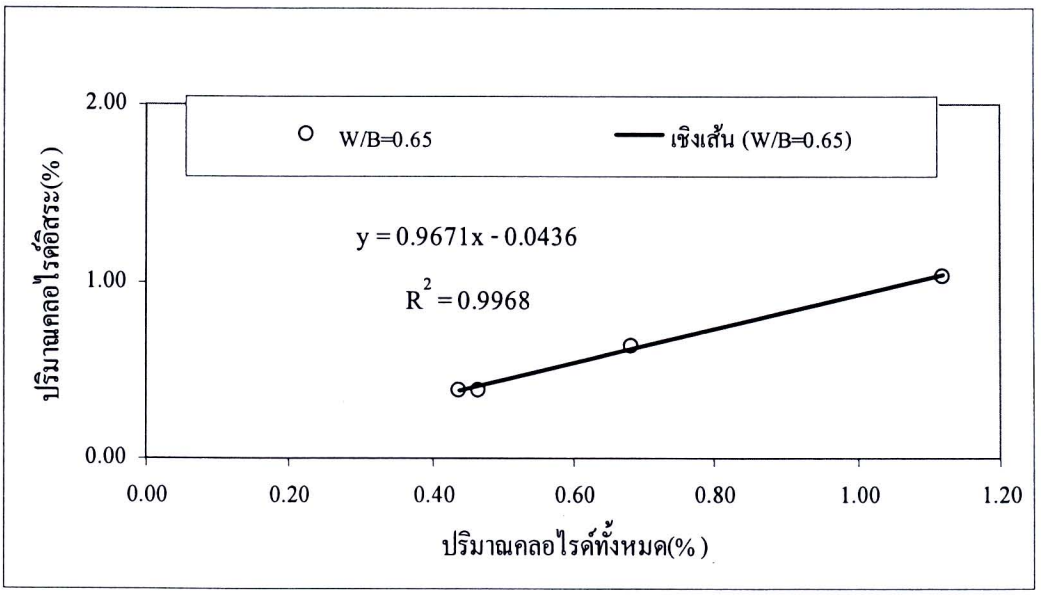
คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65 ได้ Free Cl^- = 0.9551Total Cl^--0.0292

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่าปริมาณคลอไรด์อิสระแปรผันตรงกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด และจะสังเกตเห็นว่าความชันของเส้นตรงที่ได้จากการวิเคราะห์ของทั้ง 4 กลุ่ม มีความใกล้เคียงกัน ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดมีประโยชน์ในการทำนายปริมาณคลอไรด์อิสระซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์ที่ทำให้เกิดสนิมและกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ในทางปฏิบัติ และการหาปริมาณคลอไรด์อิสระจากการทดลองมีความ

ซับซ้อน และใช้เวลานานมากกว่าการหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ที่สามารถทำได้สะดวก และเวลาไม่นาน แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต้องได้จากฐานข้อมูลที่มีจำนวนมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ อาจมีจำนวนฐานข้อมูลที่ยังไม่เพียงพอที่จะให้ความสัมพันธ์ที่มีความชัดเจนและถูกต้อง แต่สามารถที่จะใช้เป็นฐานข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาในเรื่องนี้ต่อไป



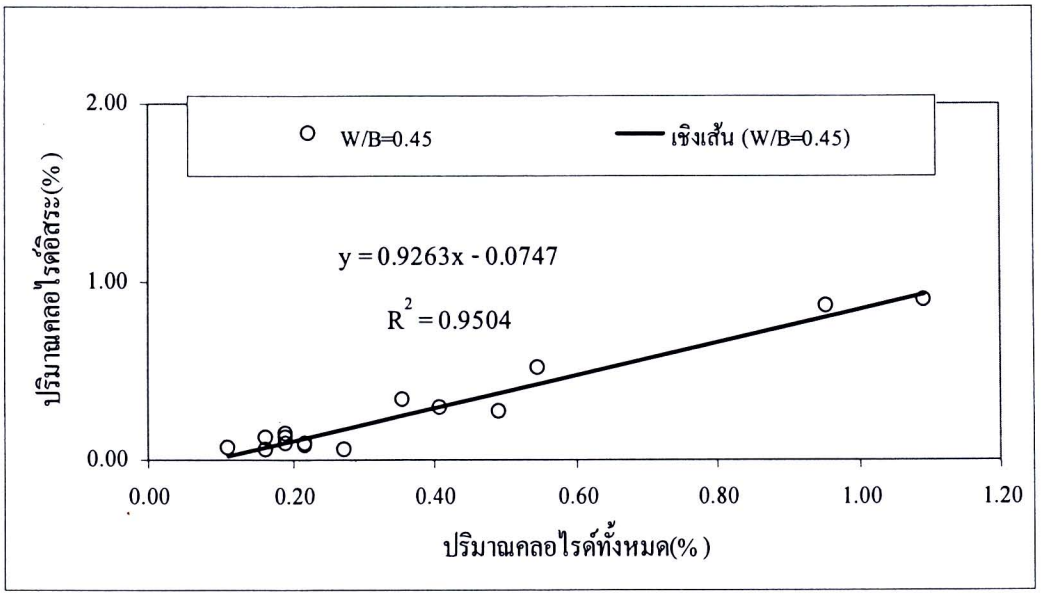
ก. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่มี W/B เท่ากับ 0.45



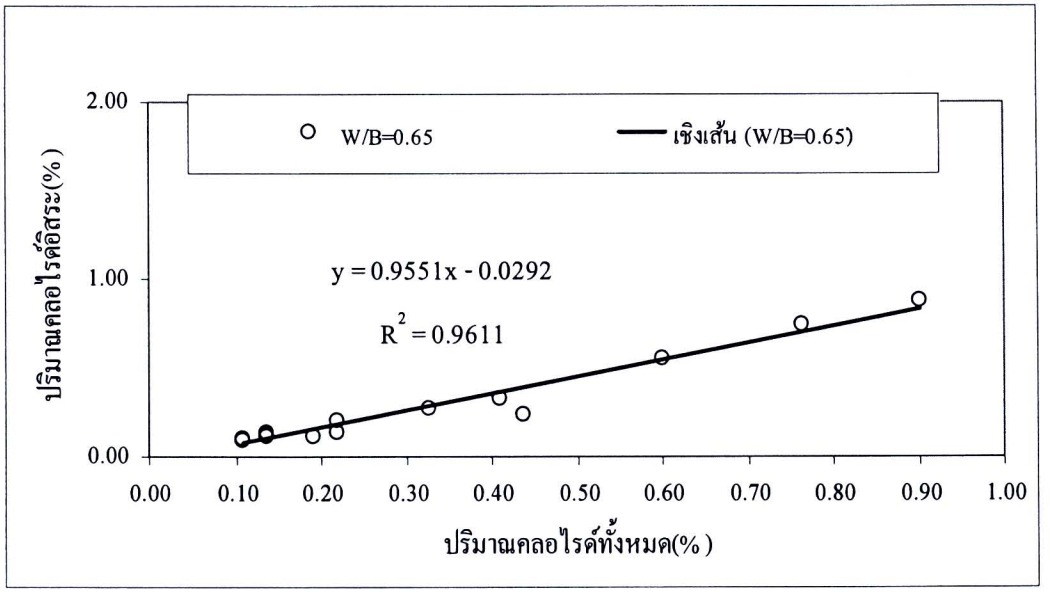
ข. คอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



ก. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45



ข. คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.65

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์อิสระกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้

4.2.4 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการดักจับคลอไรด์(Chloride binding capacity)

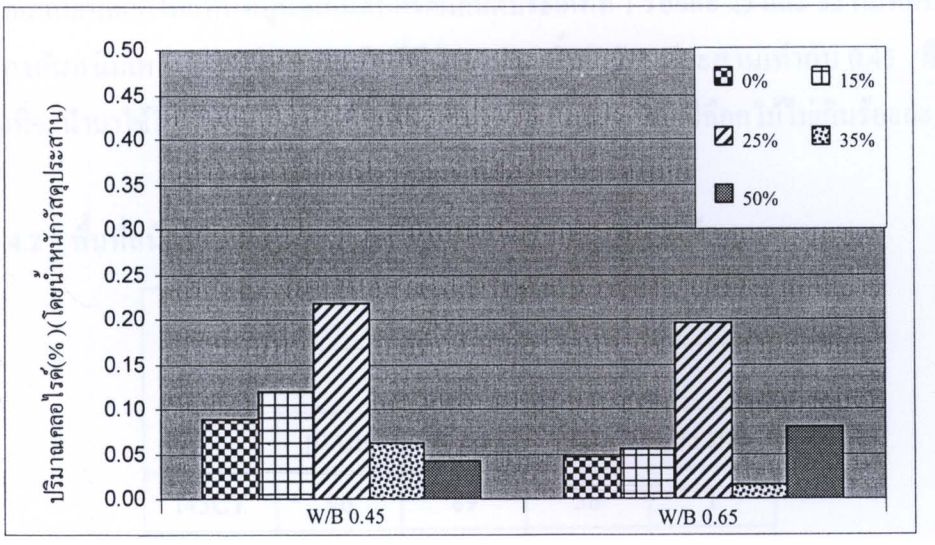
คลอไรด์ที่ถูกดักจับคือคลอไรด์ที่ถูกเนื้อของคอนกรีตดักจับทั้งที่ผิวหน้าและภายใน การหาปริมาณของคลอไรด์ที่ถูกดักจับ สามารถทำได้โดย ใช้ค่าปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ลบด้วยค่าปริมาณคลอไรด์อิสระ จะได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดักจับ คลอไรด์ที่ดักจับนี้จะส่งผลให้คลอไรด์อิสระที่จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมและกัดกร่อนเหล็กเสริมในคอนกรีตเสริมเหล็กลดน้อยลง

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์ที่ถูกดักจับกับอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้มากขึ้นถึงร้อยละ 25 จะทำให้การดักจับคลอไรด์ได้ผลดีขึ้นเมื่อเทียบกับคอนกรีตธรรมดา โดยที่อัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้เท่ากับร้อยละ 25 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การดักจับคลอไรด์ได้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มคอนกรีต และเป็นแนวโน้มเดียวกันทั้งกลุ่มที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 และ 0.65 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้มากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคลอไรด์ลดลงแต่จะใกล้เคียงกับกลุ่มที่ไม่ได้ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้วัสดุปอซโซลานในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้านการต้านทานคลอไรด์ จะมีผลต่อการลดปริมาณคลอไรด์อิสระ นั่นหมายถึงที่อัตราการแทนที่วัสดุปอซโซลานที่มากขึ้น การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีตน่าจะดีขึ้น ทั้งนี้มีงานวิจัยที่แสดงผลของการดักจับคลอไรด์ในซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50 กลับทำให้การดักจับคลอไรด์มีค่าลดลง [สมนึก ตั้งเติมสิริกุล, 1999] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้

โดยทั่วไปแล้ว วัสดุประสานที่มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ที่ดี ทำให้ปริมาณคลอไรด์อิสระที่อยู่ในโพรงของคอนกรีตมีค่าลดลงและการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์ก็จะต่ำลงด้วย การดักจับคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในรูปปฏิกิริยาเคมีกับ C3A และก่อให้เกิดแคลเซียมคลอโรอลูมิเนต (3CaO.Al2O3.CaCl2.10H2O) บางครั้งเรียกว่า เกลือของฟรีเดล (Friedel's salt) [คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543] การศึกษาครั้งนี้พบว่า เถ้าแกลบเปลือกไม้ที่ผสมในคอนกรีตมีปริมาณของสารประกอบประเภทอลูมินัมต่ำมาก (ร้อยละ 1.08) ซึ่งมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบเปลือกไม้ในวัสดุประสานจึงไม่น่าจะส่งผลต่อการดักจับคลอไรด์ไอออนที่เกิดจากกลไกทางเคมีได้ อย่างไรก็ตามการดักจับคลอไรด์อิออนอีกส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการดักจับทางกายภาพ โดยคลอไรด์ไอออนสามารถที่จะถูกดักจับที่ผิวของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เจลที่เป็นของแข็ง เช่น แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต หรือ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต เป็นต้น [Cheewaket. et al., 2010] ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว นั่นหมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีมากและ

การดักจับคลอไรด์ไอออนทางกายภาพที่ผิวของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจึงมีแนวโน้มมากขึ้นด้วย จึงส่งผลให้ร้อยละของปริมาณคลอไรด์ที่กักเก็บเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตไม่เกินร้อยละ 25 และและมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ปริมาณที่สูงมากกว่าร้อยละ 25

การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีต เป็นเพียงองค์ประกอบอย่างหนึ่งที่พิจารณาว่าวัสดุประสารชนิดใดสามารถเพิ่มการดักจับคลอไรด์ได้ดีและลดปริมาณคลอไรด์อิสระที่จะเข้าไปทำอันตรายกับเหล็กเสริมและใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตที่ป้องกันคลอไรด์ แต่ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ได้แก่ ความทึบน้ำของคอนกรีตก็จะส่งผลทำให้การแรกซึมของคลอไรด์ทั้งหมดเข้าไปได้ยากขึ้น ดังนั้นแนวทางในการป้องกันการทำลายเนื่องจากคลอไรด์ต่อเหล็กเสริมคือการเลือกใช้วัสดุประสานที่มีผลต่อการดักจับคลอไรด์ที่มากขึ้นและส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการซึมผ่านน้อยลง กล่าวคือคอนกรีตมีความหนาแน่นขึ้น ทึบน้ำมากขึ้นนั่นเองแต่ครั้งนี้ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับกำลังอัดของคอนกรีตด้วย ซึ่งแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน



รูปที่ 4.8 การดักจับคลอไรด์ในคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มี W/B เท่ากับ 0.45 และ 0.65 ที่ระยะ 15 มม.

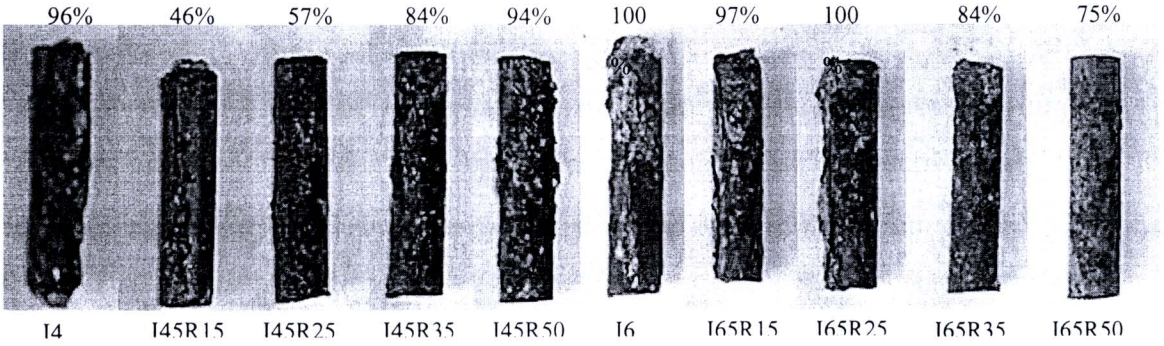
4.3 การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตภายหลังเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 30 เดือน

4.3.1 ผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อสนิมเหล็ก

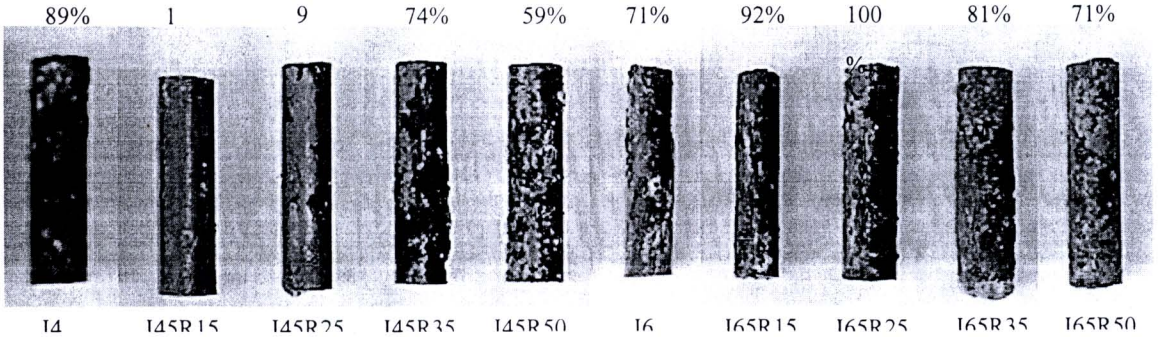
จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าร้อยละการเกิดสนิมที่ระยะ 10 มม. มีร้อยละการเกิดสนิมมากกว่าร้อยละ 50 เกือบทุกส่วนผสมตัวอย่างทั้งในส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 และ 0.65 แต่เมื่อความลึกเข้าไปที่ระยะ 20 มม. อัตราส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 จะมีร้อยละการเกิดสนิมที่น้อยกว่า ซึ่งจากรูปภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า ร้อยละการเกิดสนิมของเหล็กเสริมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลง โดยแสดงผลสอดคล้องทุกๆระยะความลึกของคอนกรีตหุ้มเหล็ก ซึ่งจุดนี้เองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่น้อยมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการซึมน้ำได้น้อยลง จึงส่งผลให้คลอไรด์เข้าไปทำลายเหล็กเสริมได้ยากขึ้น และลักษณะการเกิดสนิมมีทิศทางที่สอดคล้องกับปริมาณแทรกซึมของคลอไรด์ในคอนกรีตดังที่กล่าวไปแล้ว และเมื่อพิจารณาที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 50 มม. ซึ่งเป็นระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กที่ใช้งานจริง ในสภาพแวดล้อมทะเลพบว่าในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.65 ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล ทั้งนี้เนื่องจากมีการเกิดสนิมเหล็กคอนข้างชัดเจนแต่การใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 25 และ 35 ก็มีทิศทางที่ดีในการป้องกันสนิมเหล็กส่วน ในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.45 มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมทะเลเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ไม่เกินร้อยละ 35

ตารางที่ 4.2 พื้นที่สนิมในเหล็กเสริมในคอนกรีตที่แช่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเล

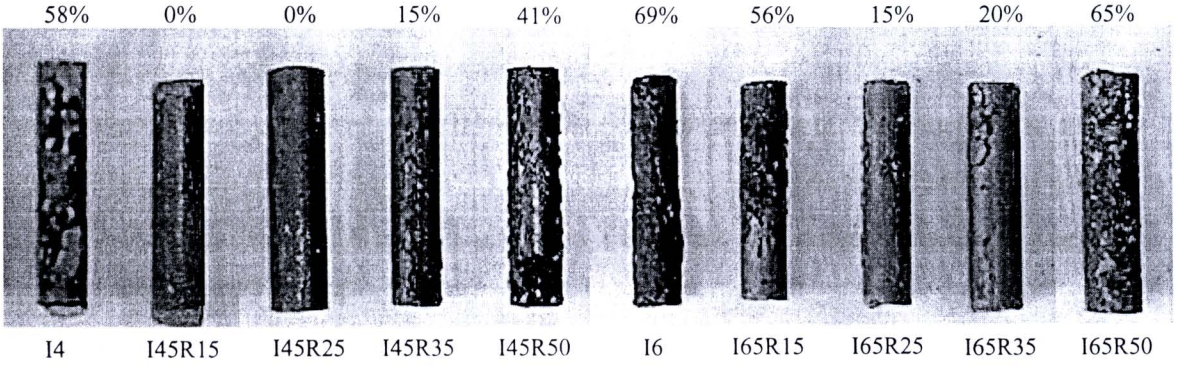
ส่วนผสม	พื้นที่สนิม (ร้อยละ)			
	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก			
	10 มม.	20 มม.	50 มม.	75 มม.
I45CT	96	89	58	1
I45R15	46	1	0	-
I45R25	57	9	0	0
I45R35	84	74	15	0
I45R50	94	59	41	33
I65CT	100	71	69	64
I65R15	97	92	56	1
I65R25	100	100	15	1
I65R35	84	81	20	1
I65R50	75	71	65	64



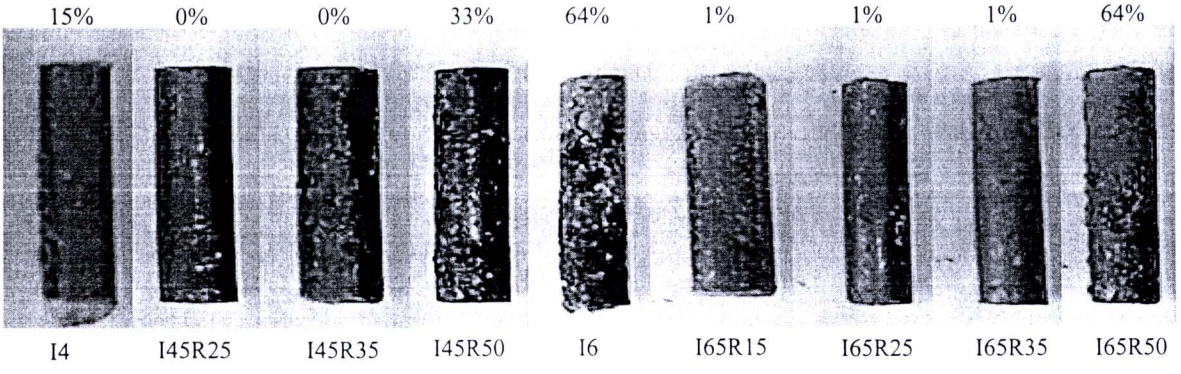
ก. ระยะหุ้มคอนกรีต 10 มม.



ข. ระยะหุ้มคอนกรีต 20 มม.



ค. ระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม.



ง. ระยะหุ้มคอนกรีต 75 มม.

รูปที่ 4.9 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้บดละเอียดหลังแช่น้ำทะเล 30 เดือน

4.3.2 ผลของเถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อสนิมเหล็ก

จากตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละของพื้นที่การเกิดสนิมเหล็กที่ฝังในคอนกรีตทุกส่วนผสมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กต่างๆ โดยภาพรวมแล้ว การแทนที่เถ้าแกลบเปลือกไม้ในคอนกรีตในปริมาณที่มากขึ้น จะสามารถต้านทานการเกิดสนิมเหล็กได้ดีขึ้น และจะเห็นได้ว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 10 มม. เกือบทุกส่วนผสมมีพื้นที่สนิมมากกว่าร้อยละ 50 ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ถึงความแตกต่างของการเกิดสนิมระหว่างส่วนผสมต่างๆได้ ที่ระดับความลึกของการฝังเหล็กที่มากขึ้นจะสามารถวิเคราะห์ถึงผลของการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ต่อการเกิดสนิมเหล็กได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการใช้เถ้าแกลบเปลือกไม้ในปริมาณไม่เกินร้อยละ 35 จะส่งผลดีต่อการต้านทางการเกิดสนิมแต่ถ้าแทนที่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 50 กลับให้ผลในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้การเกิดสนิมเหล็กสูงมากขึ้น

โดยเหล็กเสริมถูกทำลายเข้าไปถึงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก 75 มม. ซึ่งจะเห็นได้จากรูปของเหล็กเสริมที่ 4.8 ของตัวอย่าง I45 R50 นั่นแสดงให้เห็นว่าการใช้คอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ที่มากถึงร้อยละ 50 การทำลายเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นไปอย่างรวดเร็วมาก ถึงแม้จะใช้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กที่ 75 มม. ก็ตาม เหล็กเสริมก็จะถูกทำลายได้ภายในระยะเวลา 30 เดือน เท่านั้น แต่สำหรับคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 การเกิดสนิมเหล็กจะเข้าไปถึงระดับความลึกที่ 50 มม. เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะที่ส่วนผสม I45R25 ในการออกแบบคอนกรีตที่ใช้ในสภาวะแวดล้อมทะเลต้องให้ความสำคัญทั้งส่วนผสมของเถ้าแกลบเปลือกไม้ และอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานด้วย โดยคำนึงถึงระยะหุ้มคอนกรีตควบคู่กันไป แต่ในความเป็นจริงเมื่อมีการลดปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานลงอาจส่งผลต่อความสามารถในการเทได้ของคอนกรีต ทำให้การทำงานยากขึ้น ดังนั้น จึงจำเป็นจะต้องปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต ให้สามารถเทเข้าแบบได้ง่ายและต้านการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดีด้วย เพื่อที่จะลดการเกิดสนิมในเหล็กเสริม