

## การศึกษาวิธีการตรวจสอบมวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีต หลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains)

ภานุรังษิ ศิริวิธูธา

วิศวกรเขต ส่วนผลิต 2

กิจการคอนกรีตผสมเสร็จนครหลวง

**บทคัดย่อ:** จากการที่ลูกค้างานโครงการหลายราย ประสบปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ซึ่งมีผลกระทบต่อการใช้งานและความสวยงามของโครงสร้างเป็นอย่างมาก และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมผิวคอนกรีตในโครงสร้างค่อนข้างสูง เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นอีก และเป็นการสนองนโยบายบริษัท ในการผลิตคอนกรีตคุณภาพเพื่อความพึงพอใจของลูกค้า โครงการนี้จึงมุ่งศึกษาถึงวิธีการตรวจสอบมวลรวมหยาบที่เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายนั้น เพื่อกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบวัตถุดิบก่อนการผลิตคอนกรีตต่อไป

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าแร่ไพไรต์ (Ferrous Sulfide,  $FeS_2$ ) ที่เจือปนอยู่ในมวลรวมหยาบ เป็นปัจจัยสำคัญของปัญหาดังกล่าว โดยที่แร่ไพไรต์ในมวลรวมหยาบจะทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศที่ซึมผ่านผิวคอนกรีตเข้าไป เกิดเป็น Ferrous Sulfate ( $FeSO_4$ , มีลักษณะเป็นเจลสีน้ำตาลอมเขียว) และกรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) โดยกรดกำมะถันจะทำปฏิกิริยากับแร่แคลไซต์ ( $CaCO_3$ ) ในมวลรวมหยาบเกิดเป็นแร่ยิปซัม ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ทำให้มวลรวมหยาบเกิดการขยายตัวและดันตัวหลุดออกจากผิวคอนกรีต (Pop Out) และ Ferrous Sulfate ( $FeSO_4$ ) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็น Ferric Sulfate ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) มีลักษณะเป็นสนิมเหล็กสีน้ำตาล โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไปจนเสร็จสมบูรณ์ประมาณ 6 เดือน ถึง 2 ปี

สำหรับวิธีการตรวจสอบหาปริมาณแร่ไพไรต์ ( $FeS_2$ ) ในมวลรวมหยาบนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้ได้เลือกใช้วิธีของ Midgley ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากและประหยัด โดยการแช่มวลรวมหยาบลงใน Saturated Lime Water ถ้าปรากฏว่ามีเจลสีน้ำตาลอมเขียวเกาะอยู่บนมวลรวมหยาบหลังจากแช่ประมาณ 3-5 นาที และเปลี่ยนเป็นสนิมเหล็กสีน้ำตาลเมื่อนำขึ้นมาผึ่งอากาศประมาณ 30 นาที แสดงว่ามวลรวมหยาบนั้นมีแร่ไพไรต์เจือปนอยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อนได้ (Pop Out)

วิธีการศึกษา ทำโดยการตั้งสมมติฐานว่า Saturated Lime Water คือสารละลายเบส โดยเลือกใช้สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ), โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $Na(OH)$ ) และ Saturated Lime Water ตามวิธีที่กล่าวไว้ในเว็บไซต์ [Http://www.worldofconcrete.com](http://www.worldofconcrete.com) ทำการทดสอบเปรียบเทียบกัน ระหว่างมวลรวมหยาบจากต้นแหล่งที่เคยเกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) กับมวลรวมหยาบจากแหล่งอื่นที่ไม่เคยเกิดปัญหา ผลการทดสอบปรากฏว่ามวลรวมหยาบจากทั้งสองแหล่ง ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อสารละลายทั้ง 3 ชนิด ตามวิธีการของ Midgley แต่อย่างใด จึงยืนยันผลการทดสอบโดยทดสอบกับตัวอย่างจริงที่เคยเกิดปัญหา ซึ่งยังคงให้ผลเช่นเดิม จึงสรุปได้ว่าสารละลายที่ใช้ยังไม่ใช่ Saturated Lime Water ตามวิธีของ Midgley ที่ทำให้แร่ไพไรต์ในมวลรวมเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้การศึกษาหาข้อสรุปต่อไป

## 1. เข้าใจนโยบายผู้บริหาร

**1.1 การเลือกเรื่อง** เพื่อเป็นการสนองนโยบายบริษัท ในด้านการผลิตคอนกรีตคุณภาพเพื่อความพึงพอใจของลูกค้า

**1.2 ปัญหา** ปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ก่อให้เกิดโพรงเล็กๆ ที่ผิวคอนกรีต มีขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว ลึกประมาณ 1 นิ้ว กระจายอยู่ทั่วตลอดทั้งโครงสร้าง และบางโพรงอาจมีคราบสนิมสีน้ำตาลไหลออกมา ส่งผลต่อความสวยงามของโครงสร้างคอนกรีตเป็นอย่างมาก และยังสามารถส่งผลกระทบต่อความคงทนของโครงสร้างซึ่งจำเป็นต้องทำการเฝ้าตรวจติดตามต่อไปในอนาคต ปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อนนี้จัดเป็นปัญหาใหม่ที่เพิ่งเกิดขึ้นในประเทศไทย และยังจัดเป็นปัญหาใหม่สำหรับวงการคอนกรีตทั่วโลกอีกด้วย เนื่องจากยังไม่มีหน่วยงานใดๆ ออกมามาตรฐานรองรับการป้องกัน และแก้ไขปัญหาอย่างชัดเจน ตัวอย่างโครงการที่เคยเกิดปัญหานี้ในประเทศไทยได้แก่ ผิวคอนกรีต Runway สนามบินตาศลีย์ จ. นครสวรรค์, ผิวคอนกรีตโครงสร้างผนังราวสะพาน (Parapet) โครงการทางด่วนชั้นที่สอง ส่วน D และผิวคอนกรีตโครงสร้าง Subway Cut&Cover Sheet Pile Section สถานีพระราม 9 โครงการ MRTA ซึ่งทั้งสามโครงการข้างต้นใช้คอนกรีตของบริษัทฯ ทั้งหมด จึงส่งผลเสียต่อภาพลักษณ์บริษัทฯ ในด้านคุณภาพคอนกรีตอย่างมาก รวมถึงภาระที่บริษัทฯ ต้องรับผิดชอบค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมผิวคอนกรีตให้กับลูกค้าที่ค่อนข้างสูง เพราะบริเวณที่ผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) มีการกระจายทั่วตลอดทั้งโครงสร้าง



รูปที่ 1 การแตกตัวของคอนกรีตผนังสะพาน



รูปที่ 2 ลักษณะการตันตัวของมวลรวม



รูปที่ 3 หินสีดำที่ปรากฏในทุกโพรง

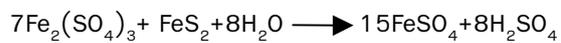
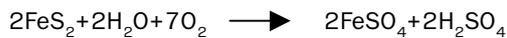


รูปที่ 4 คราบสนิมสีน้ำตาลรอบหินสีดำ

**1.3 การสังเกตปัญหา** จากการเข้าไปสังเกตด้วยตาพบการหลุดร่อนแตกตัวของคอนกรีตพร้อมกับมีคราบเปื้อนสีน้ำตาลไหลออกจากคอนกรีตบริเวณที่เป็นโพรง เมื่อทำการตรวจสอบโดยการสกัดคอนกรีตพบว่า ทุกๆ โพรงที่คอนกรีตหลุดร่อน จะพบหินสีดำเข้มลักษณะเป็นชิ้นๆ มีคราบสีน้ำตาลรอบๆ หิน ไม่พบเหล็กเสริมรอบๆ บริเวณหิน เมื่อนำหินมาบดจะละเอียดเหมือนผงถ่าน สามารถขูดหินออกได้ด้วยเล็บมือ ลักษณะทางกายภาพจากการส่งตัวอย่างทดสอบที่กรมทรัพยากรธรณีพบว่าตัวอย่างเป็นหินปูนกรวดเหลี่ยม (Limestone Breccia) เกิดบริเวณที่มีแนวรอยเลื่อน (Fault) ตัดผ่านหินปูน ทำให้เกิดการแตกเป็นชิ้นๆ มีแร่แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) มาเชื่อมประสานเข้าด้วยกัน

ในส่วนของแร่ประกอบทางเคมีที่เป็นสาเหตุทำให้ผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) คือแร่ไพไรต์ (Ferrous Sulfide,  $\text{FeS}_2$ ) จากการส่งตัวอย่างทดสอบด้วยวิธี X-ray diffraction Analysis (XRD Analysis) ที่ประเทศเยอรมัน พบว่าตัวอย่างที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) มีแร่ไพไรต์เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 3-5%

กลไกที่ทำให้ผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) เริ่มต้นจากการที่แร่ไพไรต์ในมวลรวมหยาบทำปฏิกิริยากับน้ำและออกซิเจนในอากาศที่ซึมผ่านผิวคอนกรีตเข้าไป เกิดเป็น Ferrous Sulfate ( $\text{FeSO}_4$ , มีลักษณะเป็นเจลสีน้ำเงินอมเขียว) และกรดกำมะถัน ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) โดยกรดกำมะถันจะทำปฏิกิริยากับแร่แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) ในมวลรวมหยาบเกิดเป็นแร่ยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ทำให้มวลรวมหยาบเกิดการขยายตัวและดันตัวหลุดออกจากผิวคอนกรีต (Pop Out) และ Ferrous Sulfate ( $\text{FeSO}_4$ ) จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็น Ferric Sulfate ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) มีลักษณะเป็นสนิมเหล็กสีน้ำตาลดั่งสมการ



โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดอย่างค่อยเป็นค่อยไป จนเริ่มแสดงอาการประมาณ 6 เดือน ถึง 2 ปี

## 2. กำหนดงานที่จะทำ

**2.1 พิจารณาทางเลือก** จากปัญหาดังกล่าว ได้พิจารณาคัดเลือกแนวทางป้องกันปัญหาไว้ 3 แนวทาง ดังนี้

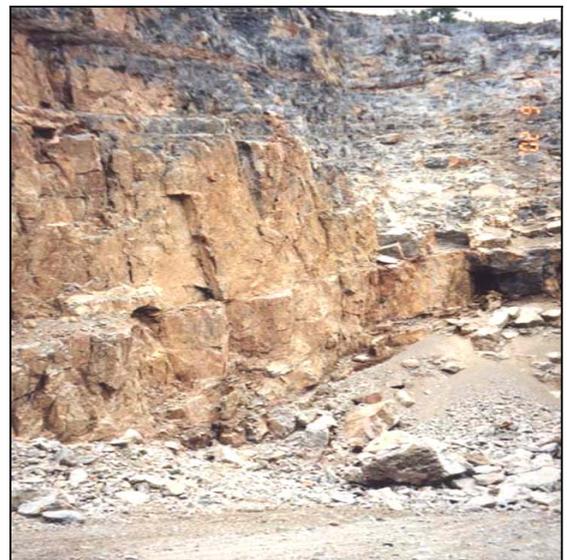
1). ระวังการใช้เหมืองหินที่มีสภาพแวดล้อมคล้ายกับเหมืองหินที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าว

2). พัฒนาวิธีการทดสอบมวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้มวลรวมดังกล่าวในการผลิตคอนกรีต

3). ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตใหม่ สำหรับมวลรวมหยาบที่น้ำจะก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out)

## 2.2 ประเมินผลสำหรับแต่ละทางเลือก

**1). ระวังการใช้เหมืองหินจากแหล่งที่มีสภาพแวดล้อมคล้ายกับเหมืองหินที่ก่อให้เกิดปัญหา:** ลักษณะเหมืองหินที่ก่อให้เกิดปัญหาดังกล่าวพบว่า มีชั้นหินสีน้ำตาลแทรกอยู่ตลอดเหมืองหินสันนิษฐานว่าชั้นหินดังกล่าวได้ทำปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อมแล้วเกิดเป็นสนิมเหล็ก ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำหินดังกล่าวมาใช้ในการผลิตคอนกรีต เพราะมีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) แต่จากการสำรวจเหมืองหินที่มีสภาพแวดล้อมคล้ายกัน กลับพบว่าหินจากแหล่งดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) แต่อย่างไรก็ดี ดังนั้นการจำแนกเหมืองหินที่ก่อให้เกิดปัญหาจึงไม่สามารถทำได้โดยการตรวจสอบสภาพทั่วไป แต่จำเป็นต้องอาศัยเครื่องมือตรวจสอบพิเศษและความชำนาญของผู้ตรวจสอบ



รูปที่ 5 แสดงเหมืองหินต้นแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains)



รูปที่ 6 แสดงเหมืองหินใกล้เคียง ซึ่งมีลักษณะคล้ายเหมืองหินต้นแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains)

2). พัฒนาการทดสอบมวลรวมหยาบ ที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน เป็นการป้องกันปัญหาที่ต้นเหตุ สามารถทดสอบหินที่สงสัยว่าจะก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) ได้ทันที และไม่นำหินดังกล่าวไปใช้ผลิตคอนกรีตในกรณีทดสอบไม่ผ่าน แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมในเชิงธุรกิจ

3). ออกแบบส่วนผสมคอนกรีตใหม่สำหรับมวลรวมหยาบที่นำจะก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน โดยการออกแบบให้คอนกรีตมีความทับน้ำสูง และเสนอข้อแนะนำของระยะหุ้มเหล็กเสริม (Covering) ในการออกแบบโครงสร้างกับผู้ออกแบบเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำและออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับแร่ไพไรต์ในมวลรวมหยาบได้ในกรณีจำเป็นต้องใช้มวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) แต่วิธีการนี้เป็นการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุ และสิ้นเปลืองเกินความจำเป็นในกรณีที่มวลรวมหยาบนั้นไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out)

2.3 คัดเลือกภารกิจที่ส่งผล จากการประเมินผลทั้ง 3 ทางเลือก พบว่า ทางเลือกที่ 2). มีความเป็นไปได้ในเชิงธุรกิจมากที่สุด และตอบสนองนโยบายการผลิตคอนกรีตคุณภาพเพื่อสร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าได้เป็นอย่างดี

### 3. พัฒนาการเพื่อปฏิบัติงาน

สาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) คือแร่ไพไรต์ (Pyrite,  $FeS_2$ ) ซึ่งโดยส่วนใหญ่แร่ชนิดนี้จะพบอยู่ในชั้นของถ่านหิน (Coal) หรือหินดินดาน (Shale) มากกว่า อาจเป็นไปได้ว่าเหมืองหินต้นแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหาในคอนกรีตดังกล่าว มีชั้นถ่านหิน (Coal) หรือชั้นหินดินดาน (Shale) ตัดผ่าน และได้มีการนำหินบริเวณนั้นซึ่งมีแร่ไพไรต์เจือปนอยู่มาทำการผลิตคอนกรีต จึงเกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ตามสาเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องพัฒนารูปแบบทดสอบหาแร่ไพไรต์ที่เจือปนอยู่ในมวลรวมหยาบ เพื่อป้องกันปัญหาที่ก่อให้เกิดผิวกอนกรีตเกิดการหลุดร่อน (Pop Out) ต่อไป โดยมีแนวทางเลือก 2 ทางดังนี้

1). ทดสอบตัวอย่างหินที่สงสัยว่าจะก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) โดยใช้วิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD Analysis) เพื่อหาปริมาณแร่ประกอบ (Form of Chemical Compound) ในมวลรวมหยาบนั้น ซึ่งสามารถตรวจสอบหาปริมาณแร่ไพไรต์ที่เจือปนในมวลรวมหยาบได้ค่อนข้างแม่นยำ แต่มีข้อเสียคือต้องส่งตัวอย่างทดสอบที่ต่างประเทศเนื่องจากเครื่องมือ XRD ในประเทศไทยยังไม่สามารถคำนวณหาปริมาณแร่ประกอบในมวลรวมหยาบที่แม่นยำได้ และค่าใช้จ่ายสำหรับการทดสอบต่อครั้งค่อนข้างสูง และยังใช้เวลาในการทดสอบค่อนข้างนาน จึงเหมาะสำหรับทำการวิจัยมากกว่าที่จะตั้งเป็นมาตรฐานสำหรับทดสอบในบริษัทฯ แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้จัดว่าเป็นวิธีที่ป้องกันการเกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ได้ดีที่สุด ณ ขณะนี้

2). ทำการทดลองหาสารที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างแร่ไพไรต์ ( $FeS_2$ ) กับน้ำ ( $H_2O$ ) และออกซิเจน ( $O_2$ ) ให้เกิดเร็วขึ้น ในที่นี้ได้เลือกทฤษฎีของ Midgley มาทำการทดลอง โดยการแช่มวลรวมหยาบที่สงสัยว่าจะก่อให้เกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ลงใน Saturated Lime Water ถ้าปรากฏว่ามีเจลสีน้ำเงินอมเขียวเกาะอยู่บนมวลรวมหยาบหลังจาก

แช่ประมาณ 3-5 นาที และเปลี่ยนเป็นสนิมเหล็กสีน้ำตาลเมื่อนำขึ้นมาผึ่งอากาศประมาณ 30 นาที แสดงว่ามวลรวมหยาบนั้นมีแร่ไฟโรท์เจือปนอยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อนได้ (Pop Out) ซึ่งวิธีการนี้สามารถทดสอบได้รวดเร็วและประหยัด แต่ยังไม่ทราบแน่ชัดว่า Saturated Lime Water คืออะไร และมีปัจจัยในการทดลองอย่างไรบ้าง เนื่องจากทฤษฎีนี้ไม่ได้กล่าวถึงโดยละเอียด จึงต้องทำการทดลองสุ่ม (Trial and Error) เพื่อให้ได้ Saturated Lime Water ที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในประเทศไทย สำหรับใช้ทดสอบมวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) ต่อไป

เมื่อประเมินทั้ง 2 ทางเลือกแล้วพบว่า ทางเลือกที่ 2) เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถทดสอบได้ง่าย รวดเร็วและประหยัด

#### 4. วิธีการเพื่อให้งานสำเร็จ

ทำการตั้งสมมติฐานว่า Saturated Lime Water คือ สารละลายเบส จึงได้ทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na(OH)) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่า pH 12-14 นอกจากนี้ยังได้ทดลองเตรียมสารละลาย Saturated Lime Water ตามวิธีที่กล่าวไว้ในเว็บไซต์ <http://www.worldofconcrete.com> ทำโดยการละลายปูนขาว (Lime, CaO) ปริมาณที่มากพอในน้ำสะอาด คนให้ทั่ว จากนั้นร่อนจนกระทั่งปูนขาวที่ไม่ละลายน้ำตกตะกอนลงหมดเหลือแต่น้ำใส มีค่า pH ประมาณ 12.6 ซึ่งเป็นสารละลาย Saturated Lime Water สำหรับใช้ทดสอบมวลรวมหยาบที่คาดว่าจะก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) ต่อไป โดยการทดลองนั้นจะทำการแช่มวลรวมหยาบลงในสารละลายที่เตรียมไว้ดังกล่าวที่เวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 นาที จากนั้นนำตัวอย่างขึ้นมาผึ่งอากาศประมาณ 30 นาที ตามลำดับ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับกันระหว่างมวลรวมหยาบจากแหล่งปกติที่ไม่เคยเกิดปัญหากับมวลรวมหยาบจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา และบันทึกผลลงในตารางดังแสดง

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน						
	เวลา (นาที)	แช่ใน Ca(OH) <sub>2</sub>			ผึ่งอากาศ 30 นาที		
		pH			PH		
	12	13	14	12	13	14	
หินจากแหล่งปกติ	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน						
	เวลา (นาที)	แช่ใน Na(OH)			ผึ่งอากาศ 30 นาที		
		pH			PH		
	12	13	14	12	13	14	
หินจากแหล่งปกติ	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1						
	2						
	3						
	4						
	5						

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน		
	เวลา (นาที)	แช่ใน Saturated Lime Water	ผึ่งอากาศ 30 นาที
		pH	pH
	12.6	12.6	
หินจากแหล่งปกติ	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1		
	2		
	3		
	4		
	5		

ตารางที่ 1 แสดงตารางสำหรับบันทึกผลการทดสอบตามวิธีของ Midgley ทำการทดสอบโดยใช้สารละลาย Ca(OH)<sub>2</sub>, Na(OH) ที่ pH 12-14 และ Saturated Lime Water

## 5. การปฏิบัติตามแผนงาน

ดำเนินการทดสอบตามแผน ได้ผลดังนี้

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน						
	แช่ใน $\text{Ca(OH)}_2$			ผึ่งอากาศ 30 นาที			
	เวลา (นาที)	pH			pH		
หินจากแหล่งปกติ	1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน						
	แช่ใน $\text{Na(OH)}$			ผึ่งอากาศ 30 นาที			
	เวลา (นาที)	pH			pH		
หินจากแหล่งปกติ	1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

ตัวอย่างหิน	สีของตัวอย่างหิน		
	แช่ใน Saturated Lime Water	ผึ่งอากาศ 30 นาที	
	เวลา (นาที)	pH	pH
หินจากแหล่งปกติ	1	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ
หินจากแหล่งที่ก่อให้เกิดปัญหา	1	ปกติ	ปกติ
	2	ปกติ	ปกติ
	3	ปกติ	ปกติ
	4	ปกติ	ปกติ
	5	ปกติ	ปกติ

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบตามวิธีของ Midgley โดยใช้สารละลาย  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{Na(OH)}$  ที่ pH 12-14 และ Saturated Lime Water

## 6. การตรวจสอบผล

### 6.1 การตรวจสอบด้วยวิธีที่เสนอโดย

จากผลการทดสอบพบว่าตัวอย่างหินจากทั้ง 2 แหล่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามทฤษฎีของ Midgley แต่อย่างใด ซึ่งอาจสรุปได้ 2 ประเด็นคือ

1). สารละลายที่ใช้ทดสอบครั้งนี้ยังไม่ใช่ Saturated Lime Water ตามทฤษฎีของ Midgley

2). ตัวอย่างหินที่ใช้ทดสอบ ไม่มีแร่ไพไรต์เจือปนอยู่ในปริมาณที่มากพอในการทำปฏิกิริยา

จึงเปลี่ยนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบใหม่ โดยใช้ตัวอย่างหินจริงที่เคยเกิดปัญหาผิวกอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) และตัวอย่างหินที่มีแร่ไพไรต์เจือปนอย่างชัดเจน มาทำการทดสอบใหม่ โดยยังคงทดสอบตามวิธีเดิม ผลการทดสอบปรากฏว่าตัวอย่างจากทั้ง 2 แหล่งยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามทฤษฎีของ Midgley แต่อย่างใด



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างหินที่มีแร่ไพไรต์เจือปนอย่างชัดเจน ก่อนและหลังการทดสอบ

ดังนั้นประเด็นข้อ 1) น่าจะเป็นไปได้มากที่สุด ทั้งนี้ Saturated Lime Water ตามทฤษฎีของ Midgley อาจจะขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ ที่ยังไม่ได้ควบคุม เช่นความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ อุณหภูมิของสารละลายและอากาศขณะทำการทดสอบ รวมไปถึงประเภทของสารละลาย ซึ่งจะทำการศึกษาต่อไป

## 6.2 การยืนยันผลการทดสอบจากตัวอย่างคอนกรีตที่เคยเกิดปัญหา :

ด้วยความร่วมมือจาก นต. ดร. ธนากร พิระพันธุ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ ซึ่งเป็นผู้ที่กำลังทำวิจัยเกี่ยวกับปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ที่เกิดขึ้นบน Runway สนามบินตาศลีย์ จ. นครสวรรค์ เช่นกัน จึงได้นำตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะแก่น (Coring) มาทดสอบเพื่อกำหนดและหาคุณสมบัติของหินในเชิงแร่วิทยาโดยวิธี X-Ray Diffraction Analysis (XRD Analysis) โดยแบ่งส่วนคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนเนื้อหินที่เกิดปัญหา และซีเมนต์เพสต์รอบๆ หินที่เกิดปัญหาซึ่งเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาแร่ไฟไรท์ ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าตัวอย่างเนื้อหินที่มีปัญหานั้นมีส่วนประกอบของแรยิปซัม (Gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) และแร่ไฟไรท์ (Pyrite,  $\text{FeS}_2$ ) ในส่วนของตัวอย่างที่เป็นผลผลิตของปฏิกิริยาแร่ไฟไรท์ดังกล่าวนี้ มีส่วนประกอบของแรยิปซัม (Gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) เพียงอย่างเดียวซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 8 แสดงรูปตัวอย่างคอนกรีตที่มีปัญหาก่อนนำไปทดสอบ

## 7. การจัดสู่การทำงานปกติ

ในระหว่างที่ยังไม่สามารถหาวิธีการทดสอบมวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stains) ได้ วิธีการป้องกันการนำมวลรวมหยาบดังกล่าวมาใช้งานในเบื้องต้น ทำได้โดยการหลีกเลี่ยงมวลรวมหยาบจากต้นแหล่งดังกล่าว หรือมวลรวมหยาบที่มีฝุ่นแดงเจือปนอยู่

## 8. แผนงานในอนาคต

ร่วมมือกับสถาบันทดสอบภายนอก เช่น SRD หรือมหาวิทยาลัย เพื่อร่วมทำการทดสอบหาสารละลายที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบมวลรวมหยาบที่ก่อให้เกิดปัญหาผิวคอนกรีตหลุดร่อน (Pop Out) จากการเป็นสนิมในมวลรวม (Rust Stain) ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

- NOEL P. Mailvaganam, "Repair and Protection of Concrete Structures", CRC Press, Inc., AM Neville, "Properties of Concrete", Fourth and Final Edition, 140-141.
- ACI 302.1R, "Concrete Floor and Slab Construction", 2001, 57-58.
- [Http://www.worldofconcrete.com](http://www.worldofconcrete.com), "Rust in exposed aggregate", "Ferrous Sulfides in Aggregate Cause Rust Stains", "How to make saturated limewater".
- รายงานผลการทดสอบตัวอย่างหินเลขที่ 1062/2545, กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี
- รายงานผลการทดสอบ XRD เลขที่ วฟ. 271/45
- Technical Report letter Ft/al/0730/99, Technical University of Darmstadt, Germany.
- เอกสารประกอบหลักสูตรการฝึกอบรมคอนกรีตเทคโนโลยีแบบบูรณาการ สำหรับวิศวกร เรื่อง "วัสดุผสมคอนกรีต".