

■ ธนากร พิระพันธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์
พินิจ รัตนประมากุล	นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ
ก้องเกียรติ ภูวงศ์	นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ
พิชัย นิมิตยงสกุล	รองศาสตราจารย์ สำนักวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

การศึกษาการชำรุดของคอนกรีตที่ผิวทางวิ่งของสนามบินตากลิ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสาเหตุของรอยแตกเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-5 ซม. บนพื้นคอนกรีตผิวทางวิ่งสนามบินตากลิ รวมทั้งหาวิธีป้องกันและซ่อมรอยแตกดังกล่าว โดยเน้นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหินที่ใช้ในการก่อสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบหาปริมาณธาตุเหล็กในหิน รวมถึงใช้การตรวจสอบด้วยวิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อหาส่วนประกอบทางเคมีของหินที่สกัดได้จากรอยแตก และผงคอนกรีตบริเวณรอบๆ หินนั้น และได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบเพื่อคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมในการซ่อมพื้นผิวคอนกรีต ซึ่งผลการตรวจสอบทางเคมีพบว่า รอยแตกที่เกิดขึ้นเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ (FeS_2) ที่เป็นส่วนประกอบในหินบางส่วนที่ใช้ในงานก่อสร้างสนามบิน ซึ่งเมื่อแร่ดังกล่าวทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ความชื้นและซีเมนต์เพส จะได้ผลิตภัณฑ์ คือ ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) และจาโรไซต์ ($Fe_3(SO_4)_2(OH)_5 \cdot 2H_2O$) ที่ตรวจพบได้จากผล XRD ของคอนกรีตรอบๆ หินที่เกิดปัญหารอยแตก สำหรับการป้องกันสามารถทำได้โดย หลีกเลี่ยงการใช้หินที่มีแร่ไพไรต์ เป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ควรใช้หินที่มีปริมาณธาตุเหล็กไม่สูงเกินกว่าค่าเฉลี่ยทั่วไปที่มีในหินปูนเพื่องานก่อสร้างสำหรับวัสดุที่เหมาะสมในการซ่อมคือ อีพอกซีมอร์ตาร์

ABSTRACT

This study investigated the causes of 2-5 cm. cracks on the runway of Takli air base, and suggested the preventing measures and repairing method. The study emphasized on the investigation of chemical compositions of aggregate used for construction, especially the iron content. X-Ray Diffraction (XRD) analysis was used to determine the compositions of the deteriorated aggregate and the interface component. Based on the conventional

repairing method, the comparative study on repairing materials was carried out. Test results showed that the cracks were originated due to the oxidation of pyrite contained in the aggregates used for construction. Pyrite, detected by the XRD, reacted with oxygen, moisture, and cement paste around the aggregate resulting in the products of gypsum and jarosite which could also be detected by XRD technique of the interface component. The suggestion on the preventing measure was to avoid using aggregate containing pyrite and aggregate containing high amount of iron. For repairing material, the epoxy mortar was recommended.

คำหลัก : แร่ไพไรต์; ออกซิเดชัน; วัสดุผสมทราย; สนามบิน

1. บทนำ

ในประเทศไทย กองทัพอากาศมีสนามบินอยู่ด้วยกันทั้งสิ้นไม่น้อยกว่า 15 สนามบิน สนามบินตากลิ นับว่าเป็นสนามบินหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปฏิบัติการทางทหารในเขตภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย โดยส่วนใหญ่ทางวิ่งและทางขับของสนามบินมักจะก่อสร้างด้วยคอนกรีต ถ้าหากคอนกรีตที่ใช้เกิดมีปัญหาก็จะส่งผลกระทบต่อการใช้งานของสนามบิน

จากผลการสำรวจสภาพพื้นผิวทางวิ่งของสนามบินตากลิในปี พ.ศ. 2541 โดยกรมช่างโยธาทหารอากาศ พบว่าตลอดความยาวของทางวิ่ง มีรอยแตกเล็กๆ หรือมีการบวมตัวของคอนกรีตขนาดประมาณ 2-5 ซม. ซึ่งสาเหตุของการเกิดรอยแตกดังกล่าวยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด มีแต่เพียงข้อสันนิษฐานที่ได้จากการตรวจสอบทางเคมีในเบื้องต้น ซึ่งคาดว่า หินบริเวณที่เกิดรอยแตกเล็กๆ นี้มีธาตุเหล็กเจือปนอยู่ จึงทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศเกิด

สนิมขึ้นในหิน เป็นผลให้เกิดรอยแตกดังกล่าวขึ้น ผลของรอยแตกเล็กๆ ที่เกิดขึ้นจากการบวมตัวของคอนกรีตนี้ ทำให้เกิดเศษวัสดุเล็กๆ ที่สามารถส่งผลเสียหายต่อเครื่องยนต์ของเครื่องบิกันได้ และยังเกิดเป็นหลุมเล็กๆ ในบริเวณพื้นผิวทางวิ่ง อาจทำให้อายุการใช้งานของพื้นผิวทางวิ่งลดลงได้

2. ความสำคัญของงานวิจัย

จากปัญหาที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ถ้าหากไม่มีการตรวจสอบสาเหตุที่แน่ชัด เพื่อการป้องกันและแก้ไขต่อไป เหตุการณ์ดังกล่าวอาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่ออากาศยานและผู้บังคับอากาศยานที่ใช้สนามบินดังกล่าว อีกทั้งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้อีกในอนาคตสำหรับสนามบินแห่งอื่นๆ ของกองทัพอากาศหรือแม้กระทั่งสนามบินพาณิชย์แห่งอื่นๆ เช่นกัน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวินิจฉัยสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยแตกดังกล่าว เพื่อหาวิธีป้องกันการชำรุดที่เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันนี้ และเพื่อเสนอแนวทางแก้ไขการชำรุดที่เกิดขึ้นแล้วนี้ต่อไป

3. การทดลอง

3.1 การตรวจสอบขั้นพื้นฐาน

สิ่งที่ควรกระทำในเมืองต้น คือ การรวบรวมข้อมูลเดิมของการก่อสร้างสนามบินเพื่อตรวจสอบ ทำได้โดยการสอบถาม และรวบรวมข้อมูลการก่อสร้าง ตั้งแต่วัสดุที่ใช้ ขั้นตอน และวิธีการก่อสร้าง นอกจากนี้แล้วควรตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาใช้ในการตั้งข้อสมมติฐานต่อไป ทำได้โดยการตรวจสอบสภาพการเสียหายที่เกิดขึ้น และเก็บตัวอย่างจากสถานที่จริง

3.2 การตรวจสอบเพื่อหาสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น

3.2.1 การตั้งข้อสมมติฐาน

ในขั้นตอนนี้เป็นการตั้งข้อสมมติฐาน โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลเดิมของการก่อสร้าง และข้อมูลจากการตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสถานที่จริง

3.2.2 การตรวจสอบข้อสมมติฐาน

เป็นการพิสูจน์ข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งขึ้นเพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงที่ทำให้เกิดรอยแตกขึ้น โดยอาศัยวิธีการตรวจสอบตามมาตรฐาน

3.2.3 การแก้ไขข้อสมมติฐานและการตรวจสอบ

เป็นการปรับแก้ข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งขึ้น ในกรณีที่มีการตรวจสอบแล้วไม่เป็นไปตามข้อสมมติฐานหรือมีความไม่ชัดเจนเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องแก้ไขและตรวจสอบ เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริง

3.3 การเสนอแนะแนวทางการป้องกัน

เมื่อได้ข้อสรุปที่ชัดเจนถึงสาเหตุที่เกิดขึ้นแล้ว จะได้ทำการ

เสนอแนะวิธีป้องกันรอยแตกที่เกิดขึ้น เพื่อไม่ให้เกิดการชำรุดในลักษณะเดียวกันแบบนี้อีก

3.4 การเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหารอยแตกที่เกิดขึ้น

เมื่อทราบสาเหตุที่เกิดขึ้นและแนวทางการป้องกันแล้ว จะได้ทำการเสนอแนะแนวทางแก้ไขรอยแตกที่เกิดขึ้นในปัจจุบันต่อไป

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองสามารถแสดงได้โดยมีรายละเอียดตามขั้นตอนการทดลองที่ได้กล่าวไว้แล้ว ดังนี้

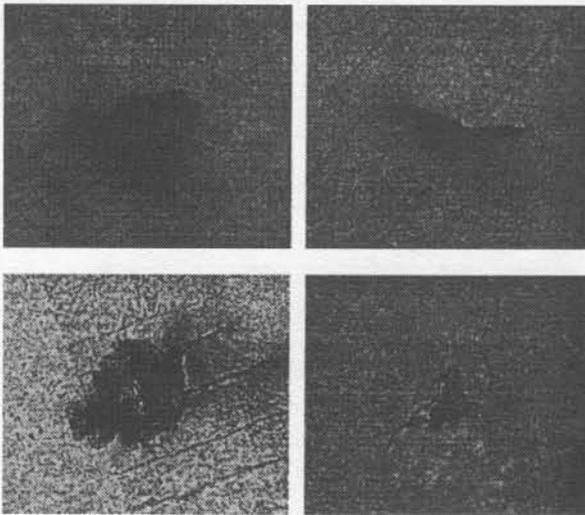
4.1 ผลการตรวจสอบขั้นพื้นฐาน

สนามบินนี้ถูกสร้างขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2506-2507 โดยกองทัพอากาศของประเทศสหรัฐอเมริกา ผิวทางเป็นคอนกรีตกว้าง 45 เมตร ยาว 3001.5 เมตร มีการทำ Overlay ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2518 ด้วยแอสฟัลติกคอนกรีต ทน 25 ซม. และมีการทำ Overlay ครั้งที่ 2 ในปี พ.ศ. 2538 ด้วยคอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงดันที่ 600 ปอนด์/ตร.นิ้ว (4.134 MPa) ทน 45 ซม. ปัญหาการแตกร้าวที่ผิวทางวิ่งเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2539 หรือประมาณ 1 ปี หลังจากที่มีการก่อสร้างครั้งสุดท้าย

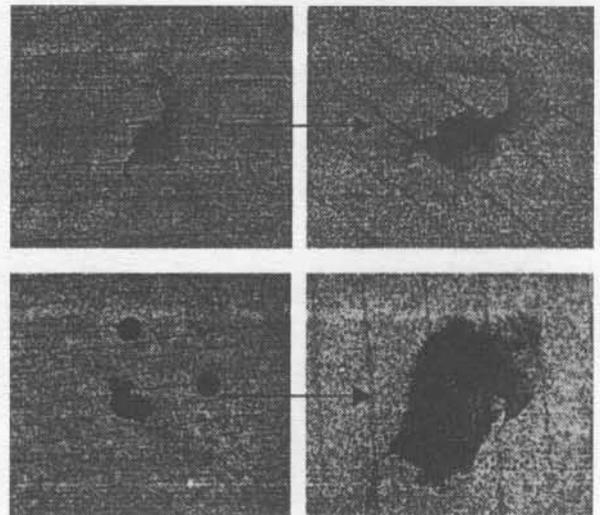
ผลการตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นพบว่า มีรอยแตกเล็กๆ หรือมีการบวมตัวของคอนกรีต ขนาด 2-5 ซม. ลึกจากผิวลงไปประมาณ 1-2 ซม. มีสิบริเวณรอยแตกคล้ายสิริสนิมบริเวณที่เกิดอยู่ในเนื้อหิน สีของเนื้อหินที่สังเกตได้มีสีเทาดำ แตกต่างจากสีของสีเทาจางๆ ของหินปูนทั่วไป บางจุดที่เกิดและมีความรุนแรงทำให้เกิดการหลุดล่อนของผิวคอนกรีต ขนาดของความเสียหายมีให้เห็นอยู่ชัดเจนทั่วไปบนผิวทางวิ่ง รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างความรุนแรงและสภาพพื้นผิวทางวิ่งที่มีรอยแตกดังกล่าว บางจุดได้มีการซ่อมในเบื้องต้นไปบ้างแล้ว

นอกจากนี้แล้วจากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 6 เดือน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงรุนแรงมากขึ้นที่อาจทำให้เกิดรอยแตกที่มากขึ้นจนนำไปสู่การหลุดล่อนของผิวคอนกรีตเป็นชิ้นเล็กๆ ได้ ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคอนกรีตลดลงได้ (ดูรูปที่ 2)

ผลการตรวจสอบสภาพความเสียหายในสถานที่จริงยังพบอีกว่าความเสียหายลักษณะเดียวกันนี้ เกิดขึ้นที่ในเนื้อหินของแอสฟัลติกคอนกรีตที่มีอยู่ทั้งบนไหล่ทางของทางวิ่งและทางขับ แต่ไม่เกิดการแตกร้าวในแอสฟัลติกคอนกรีต ให้เห็นเช่นในกับที่เกิดในปอร์ตแลนด์คอนกรีตเนื่องจากหินที่ใช้ในแอสฟัลติกคอนกรีตถูกเกาะยึดด้วยดีในแอสฟัลต์ที่มีความยืดหยุ่นดีกว่า จึงไม่เกิดการแตกร้าว รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแอสฟัลติกคอนกรีต



รูปที่ 1 สภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวทางรังสนามบินตาคลีย์



รูปที่ 2 สภาพความเสียหายมีความรุนแรงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 6 เดือน

4.2 ผลการตรวจสอบเพื่อหาสาเหตุของความเสียหายที่เกิดขึ้น

4.2.1 ผลการตั้งข้อสมมติฐาน

จากข้อมูลที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลเดิมของการก่อสร้างและข้อมูลจากการตรวจสอบสภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสถานที่จริง ทำให้สันนิษฐานได้ว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นมีผลมาจากหินที่ใช้ โดยหินบางส่วนอาจมีส่วนประกอบของเหล็กเจือปนอยู่ในหินปูนในปริมาณที่สูงเกินปกติ การที่มีธาตุเหล็กเจือปนสูง จึงทำให้หินดังกล่าว ถ้าอยู่ในชั้นบนสุด สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและอากาศเกิดเป็นสนิมขึ้น ทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น และส่งผลให้เกิดรอยแตกขึ้นในเวลาต่อมา เมื่อเวลาผ่านไปหินดังกล่าวสามารถเสื่อมสลายกลายเป็นผงและทำให้เกิดเป็นหลุมเล็กๆ ขึ้นได้

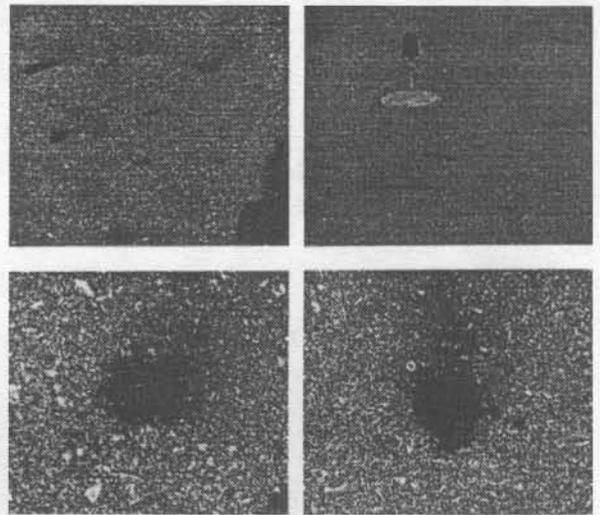
4.2.2 ผลการตรวจสอบข้อสมมติฐาน

ก่อนการตรวจสอบข้อสมมติฐาน ได้ทำการตรวจสอบหาข้อมูลของหินปูนที่ใช้ในประเทศไทยพบว่า ส่วนประกอบของแร่เหล็กที่อยู่ในรูปของ Fe_2O_3 ของหินปูนทั่วไปมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 3% ในขณะที่หินปูนที่ผลิตได้ที่สระบุรีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.06% ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลส่วนประกอบทางเคมีของหินปูน [1]

	CaO(%)	MgO(%)	Fe_2O_3 (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)
หินปูนทั่วไป	22-56	0-21	Max 3		
หินปูนที่ผลิตได้ที่สระบุรี	55	0.32	0.06	0.08	0.07

ในการตรวจสอบข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งขึ้นเบื้องต้นนี้ ได้



รูปที่ 3 สภาพของแอสฟัลติกคอนกรีตที่ไหลทางรังและทางขับ

ทำการส่งตัวอย่างหินจำนวน 30 ตัวอย่าง ไปวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่อยู่ในรูปของ Fe_2O_3 โดย 9 ตัวอย่างแรกเป็นหินจากแท่งเจาะที่ทำการเจาะจากสถานที่จริง ส่วนอีก 14 ตัวอย่างเป็นหินที่ได้จากแหล่งหินบริเวณรอบๆ พื้นที่ อ.ตาคลีย์ เช่น ที่ อ.ตาคฟ้า จ.นครสวรรค์ อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี และ อ.บ้านหมี่ จ.ลพบุรี และที่เหลืออีก 7 ตัวอย่างเป็นหินที่ได้จากกองหินภายในโรงเรียนนายเรืออากาศ การทดสอบกระทำโดยกรมทรัพยากรธรณี โดยใช้การละลายตัวอย่างด้วยกรด HNO_3 และ HF และใช้ Atomic Absorption Spectrometry ในการตรวจสอบหาปริมาณของ Fe_2O_3 ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณของ Fe_2O_3 ในหินที่ได้จากสนามบินตาคลีย์มีค่าปกติ

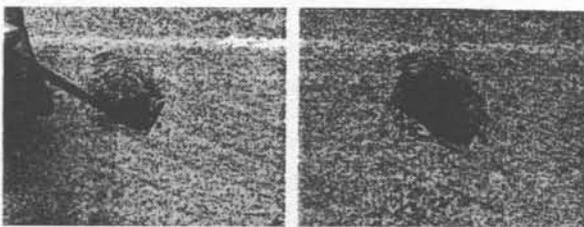
ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe_2O_3

รายละเอียดของแหล่งหินที่ทดสอบ	ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe_2O_3 (%)
หินที่ได้จากแท่งเจาะที่ทำการเจาะจากสถานที่จริง	0.07, 0.35, 0.17, 0.16, 0.15, 0.25, 0.28, 0.16, และ 0.30
หินที่ได้จากแหล่งหินบริเวณรอบๆพื้นที่ อ.ตากดี	1.59, 2.02, 1.34, 0.08, 0.07, 0.11, 5.42, 3.04, 0.55, 0.41, 0.41, 0.40, 0.81, และ 1.25
หินที่ได้จากกองหินภายในโรงเรือนนาฬิกาอากาศ	0.18, 0.18, 0.23, 0.19, 2.60, 0.13, และ 0.16

ในขณะที่ปริมาณของ Fe_2O_3 ในหินที่ได้จาก อ.ตากฟ้า จำนวนหนึ่งมีค่าเท่ากับ 5.42 และ 3.04% ซึ่งสูงกว่าค่ามากที่สุดที่ 3% ที่ตรวจพบในหินปูนทั่วไป ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบของทั้ง 30 ตัวอย่างนี้

ผลที่ได้ดังกล่าวนำไปสู่การพิจารณาถึงขั้นตอนการเลือกตัวอย่างหินเพื่อส่งไปทดสอบ ซึ่งอาจให้ผลที่แตกต่างกันในกรณีตัวอย่างหินที่ส่งไปวิเคราะห์ไม่เป็นตัวอย่างที่เป็นตัวแทนของหินทั้งหมดจริง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่อยู่ในรูปของ Fe_2O_3 อาจจะไม่สามารถช่วยตรวจสอบสมมติฐานได้ จึงควรพิจารณาวิธีการวิเคราะห์อื่นที่ให้ผลที่น่าเชื่อถือมากกว่า

จากผลดังกล่าวข้างต้น จึงนำไปสู่การใช้วิธีการพิจารณาเก็บตัวอย่างจากหินที่เกิดปัญหาจริง และใช้วิธีการตรวจสอบแบบ X-Ray Powder Diffraction (XRD) ในการตรวจสอบหาสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างหินจริง เพื่อนำไปสู่การหาสาเหตุที่แท้จริง รูปที่ 4 แสดงการเก็บตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดำในเนื้อหิน



รูปที่ 4 การเก็บตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงฝุ่นสีดำที่มีอยู่ในเนื้อหิน

ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD สำหรับผงตัวอย่าง 2 ชุดพบว่าแร่ไฟไรต์ หรือ FeS_2 เป็นส่วนประกอบทั้งสองตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 3 หมายความว่า ปริมาณเหล็กที่มีอยู่มากเกินไปน่าจะอยู่ในรูปของแร่ไฟไรต์

4.2.3 ผลการแก้ไขข้อสมมติฐานและการตรวจสอบ

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผงฝุ่นหินด้วย XRD

ตัวอย่างที่	สารประกอบ
1	kaolinite, gypsum, paragonite, jarosite, muscovite, quartz, และ pyrite
2	gypsum, muscovite, kaolinite, calcite, quartz, และ pyrite

จากผล XRD ที่ได้ทำให้ต้องมีการปรับข้อสมมติฐานที่ได้ตั้งขึ้นใหม่ ซึ่งคาดว่าสาเหตุของสนิมและรอยแตกที่เกิดขึ้นน่าจะเกิดมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฟไรต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่เกี่ยวข้อง ดังนี้ [2]



$FeSO_4$ ที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาต่อให้ผลิตภัณฑ์ Hydrated Sulfate เช่น Melanterite ($2FeSO_4 \cdot 7H_2O$) และ Hydrated Jarosite ($Fe_3(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$) ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในเนื้อหิน สามารถทำให้เกิดการขยายตัวและแตกออกในที่สุด นอกจากนี้แล้ว $FeSO_4$ สามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ที่มีอยู่ในเนื้อมอร์ต้า ทำให้เกิดปฏิกิริยาตามสมการที่ (2) และ (3) ได้ผลิตภัณฑ์ยิปซัม และ $Fe(OH)_3$ ที่ตกตะกอนให้สีน้ำตาลแดงคล้ายสีสนิมนั่นเอง



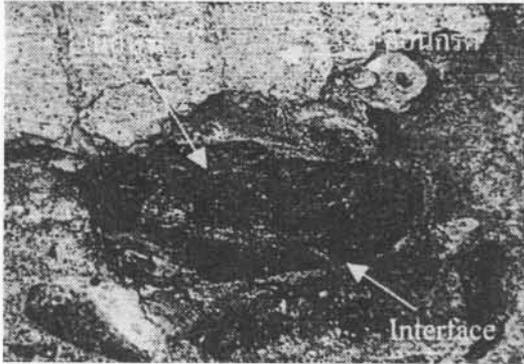
ส่วนกรดซัลฟูริก สามารถทำลายได้ทั้งส่วนประกอบของเนื้อหินและมอร์ต้า ซึ่งอาจทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ก่อให้เกิดการขยายตัวได้ เช่น Halotrichite [$(Fe,Mg)Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$] Potassium-Jarosite ($KFe_3(SO_4)_2 \cdot (OH)_6$) และยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ดังสมการที่ (4)



นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้รวมถึง Natrojarosite ($NaFe_3(SO_4)_2 \cdot (OH)_6$) ถ้ามี Na^+ มากเพียงพอ [3] และยังสามารถทำให้เกิด Ettringite ($Ca_3Al_2(SO_4)_6 \cdot 26H_2O$) ขึ้นได้เนื่องจากซัลเฟตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฟไรต์อาจทำปฏิกิริยากับ Monosulfate Hydrate หรือ Calcium Aluminate Hydrate [4] และยังสามารถเกิด Thaumascite ($Ca_3Si(CO_3)(SO_4)OH_6 \cdot 12H_2O$) ขึ้นได้ (Burkart ใน [5])

ดังนั้น เมื่อทราบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแล้ว ในขั้นต่อไปจึงจะทำการ XRD เพื่อตรวจสอบสารประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่าง

หินจริงที่เกิดปัญหาและบริเวณรอบๆ ส่วน Interface ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจะพบว่า ที่บริเวณรอบๆ เนื้อหินหรือ Interface จะพบว่า มีสีสนิมน้ำตาลแดง ซึ่งอาจจะเป็นสีของ $Fe(OH)_3$ ที่ได้จากสมการที่ 3 และสีขาวอาจเป็นสีของยิปซัมที่เกิดขึ้นทั้งจากสมการที่ 2 และ 4



รูปที่ 5 ตัวอย่างหินที่แสดงให้เห็นถึงส่วนเนื้อหิน (สีดำ) ส่วน Interface และส่วนคอนกรีตโดยรอบ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ด้วย XRD

รายละเอียด	สารประกอบ
เนื้อหิน	gypsum, mollestone, tricalcium aluminate, pyrite, และ ettringite
Interface	quartz, microline, albite, calcite, gypsum, muscovite, และ natrojarosite

ตารางที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ของส่วนเนื้อหินและส่วน Interface พบว่ามีการพบแร่ไฟไรต์ Ettringite และยิปซัมในเนื้อหิน ส่วนใน Interface พบผลิตภัณฑ์ Natrojarosite และยิปซัม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของไฟไรต์ จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าแร่ไฟไรต์ที่มีอยู่ในหินเป็นสาเหตุของการเกิดออกซิเดชัน และนำไปสู่การชำรุดที่ผิวทางวิ่ง

4.3 ผลการเสนอแนะแนวทางการป้องกัน

เมื่อทราบสาเหตุที่เกิดขึ้นแล้วว่าเกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไฟไรต์ที่มีอยู่ในหิน การเสนอแนะวิธีป้องกันการชำรุดที่อาจเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันแบบนี้ก็ทำได้โดยป้องกันไม่ให้เกิดการใช้หินที่มีแร่ไฟไรต์เจือปนในงานก่อสร้าง ซึ่งเบื้องต้นนี้ยังไม่ได้ศึกษาว่าหินที่มีแร่ไฟไรต์ Reactive ต่อมอร์ตาร์หรือไม่ แต่พิจารณาให้หลีกเลี่ยงหินที่มีแร่ไฟไรต์ ดังนั้นจึงสามารถเสนอแนะแนวทางป้องกันในเบื้องต้นได้ ดังนี้คือ

4.3.1 การสังเกตด้วยตาเปล่า วิธีนี้สามารถกระทำได้

เนื่องจากแร่ไฟไรต์พบมากในรูปของผลึกอยู่ในระบบ 3 แกนเท่า มีสีเหลืองอ่อนคล้ายเหลืองทอง ผิวเป็นเงาวาวคล้ายทองคำ โดยทั่วไปผลึกจะเป็นรูปลูกบาศก์ ส่วนผลึกรูปอื่นๆ ที่เกิดขึ้นได้แก่ Pyritohedron และ Octahedral อาจพบเป็นก้อนเป็นมวลเม็ด เป็นเนื้อเสมอกันแน่น [6]

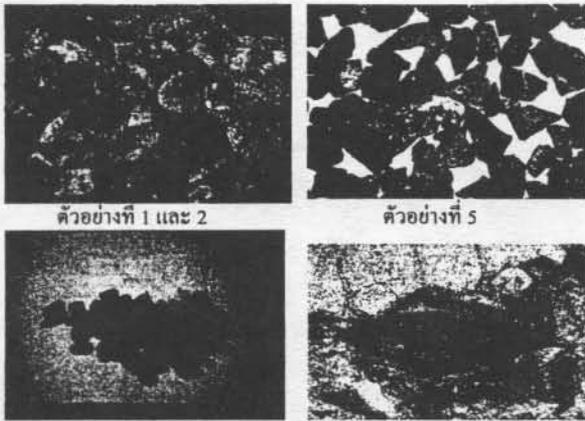
4.3.2 การตรวจสอบปริมาณ Fe_2O_3 และ S ในกรณีที่ไม่สามารถสังเกตแร่ไฟไรต์ได้ด้วยตาเปล่า ให้ทำการทดสอบทางเคมีเพื่อหาปริมาณ Fe_2O_3 และ S ผลการทดสอบในตารางที่ 5 เป็นผลทดสอบสำหรับหิน 10 ตัวอย่างที่มีบางตัวอย่างทราบว่า มีแร่ไฟไรต์ตกผลึกอยู่ (ตัวอย่างที่ 5) บางตัวอย่างมีสีคล้ายสีสนิม (ตัวอย่างที่ 1 และ 2) บางตัวอย่างมีสีน้ำตาลแดง (ตัวอย่างที่ 6) และบางตัวอย่างเกิดปัญหาออกซิเดชันของไฟไรต์จริงแต่ไม่สามารถสังเกตเห็นผลึกของไฟไรต์ได้ (ตัวอย่างที่ 7 และ 8) รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างหินตัวอย่างที่ใช้ทดสอบหาปริมาณ Fe_2O_3 และ S

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณ Fe_2O_3 และ S

#	รายละเอียดของตัวอย่างหิน	Fe_2O_3 (%)	S(%)
1	หินปูนมีสีสนิม	0.19	Nil
2	หินปูนมีสีสนิม	0.11	Nil
3	หินปูนทั่วไป	0.15	Nil
4	หินปูนทั่วไป	1.3	Nil
5	หินปูนที่มีไฟไรต์ตกผลึก	21.64	15.59
6	หินปูนมีสีน้ำตาลแดง	6.06	0.04
7	หินที่เกิดปัญหาจริงที่ศาลา	15.65	9.53
8	หินที่เกิดปัญหาจริงที่ศาลา	9.25	7.26
9	หินปูนทั่วไป	0.36	Nil
10	หินปูนทั่วไป	1.59	0.08

ผลที่ได้จากตารางที่ 5 พบว่าตัวอย่างที่ 5, 7 และ 8 มีปริมาณของ Fe_2O_3 และ S สูงมากผิดปกติของหินปูนทั่วไป จึงนำผลที่ได้ของ 3 ตัวอย่างนี้ไปคำนวณหาปริมาณ Fe และ S เพื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนของปริมาณ Fe และ S ที่มีอยู่ในแร่ไฟไรต์ ตารางที่ 6 แสดงผลที่ได้จากการเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าตัวอย่างที่ 5, 7 และ 8 มีสัดส่วนปริมาณของ Fe และ S ใกล้เคียงกับของไฟไรต์มาก แต่ตัวอย่างที่ 7 และ 8 ไม่สามารถเห็นไฟไรต์ด้วยตาเปล่าได้ ดังนั้นวิธีตรวจสอบปริมาณ Fe_2O_3 และ S จึงน่าจะนำมาใช้ได้ในการตรวจสอบว่าหินที่ใช้ น่าจะมีแร่ไฟไรต์เจือปนอยู่หรือไม่

เป็นที่น่าสังเกตต่อไปว่าปริมาณของ Fe_2O_3 ที่มีอยู่ในตัวอย่างที่ 6 มีสูงมากผิดปกติของหินปูนทั่วไป ซึ่งไม่น่าจะส่งผลดี



ตัวอย่างที่ 6
รูปที่ 6 ภาพตัวอย่างหินที่นำมาทดสอบ
หาปริมาณ Fe_2O_3 และ S

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณ Fe และ S
เปรียบเทียบกับสัดส่วนของปริมาณ Fe และ S
ในแร่ไพไรต์ (FeS_2)

#	รายละเอียดตัวอย่างหิน	Fe(%)	S(%)
5	หินปูนที่มีไพไรต์คกผลึก	49.3	50.7
7	หินที่เกิดปัญหาที่คาคลี	53.5	46.5
8	หินที่เกิดปัญหาที่คาคลี	47.1	52.9
	แร่ไพไรต์	46.6	53.4

ต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีต จึงควรหลีกเลี่ยงการใช้หินดังกล่าวในงานก่อสร้างทั่วไปด้วยเช่นกัน

4.3.3 การตรวจสอบด้วยวิธี XRD วิธีนี้สามารถกระทำได้ง่ายเพียงขั้นตอนการเลือกตัวอย่าง ควรกระทำด้วยความระมัดระวัง เพื่อให้ตัวอย่างหินที่ได้เป็นตัวแทนของหินที่จะถูกนำมาใช้งานจริง

ในกรณีที่ต้องการตรวจสอบว่าหินที่มีแร่ไพไรต์อยู่สามารถทำปฏิกิริยากับมอร์ต้าได้เร็วหรือไม่ ให้นำหินที่ส่งสัปปะแช่น้ำปูนอิ่มตัว ถ้าทำปฏิกิริยาเร็ว จะมีตะกอนของ Ferrous Sulfate สีเขียวน้ำเงินเคลือบบางๆ ที่ผิวของหินเกิดขึ้น ภายในเวลา 2-3 นาที และเมื่อนำมาผึ่งในอากาศสักครู่ สีจะเปลี่ยนไปเป็นสีน้ำตาล (Midgley อ้างถึงใน [7] และ [8])

ในเบื้องต้นได้ทำการตรวจสอบว่าหินที่มีแร่ไพไรต์อยู่สามารถทำปฏิกิริยากับมอร์ต้าได้เร็วหรือไม่ โดยใช้หินจากตัวอย่างที่เห็นว่าไม่มีไพไรต์คกผลึกอยู่ และหินจากตัวอย่างที่เกิดปัญหาออกซิเดชันของไพไรต์จริงแต่ไม่สามารถสังเกตเห็นผลึกของไพไรต์ได้ และใช้วิธีการตามที่ได้กล่าวถึงไปแล้ว ผลการทดสอบพบว่าวิธีทดสอบดังกล่าวใช้ไม่ได้ผลสำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีอยู่

ทั้งนี้ สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่าการตรวจสอบความไวในการเกิดปฏิกิริยาของหินที่เสนอแนะไว้ นั้น น่าจะเหมาะสมสำหรับรูปแบบหนึ่งรูปแบบใดของแร่ไพไรต์ที่มีอยู่ในหิน ตามปกติรูปแบบของแร่ไพไรต์ที่เกิดขึ้นในหินหรือถ่านหิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบด้วยกันคือ 1) Framboidal Pyrite (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า $25 \mu m$) 2) Finely Disseminated Euhedral Grains (เส้นผ่านศูนย์กลาง $1-10 \mu m$) 3) มวลเม็ดหยาบที่แทนที่วัสดุเดิม (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า $25 \mu m$) และ 4) มวลเม็ดหยาบที่อยู่ใน Cleats หรือ Joints (Caruccio และคณะ : Horne และคณะ อ้างถึงใน [9]) โดยรูปแบบไพไรต์พื้นฐานที่มีอยู่ในรูปของ Framboidal Pyrite และ Euhedral Frains ซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถที่จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วกว่าไพไรต์ที่มีอยู่ในรูปของมวลเม็ดหยาบ ซึ่งมักจะมีคามเสถียรมากกว่า

นอกจากนี้แล้วยังเป็นที่น่าสังเกตว่ามาตรการป้องกันการใช้หินที่มีแร่ไพไรต์ไม่ได้ถูกระบุไว้ในมาตรฐาน ว.ส.ท. [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [11] และวิธีทดสอบหินตาม ASTM C33 [12] ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรให้มีการตรวจสอบแร่ไพไรต์ก่อนการใช้หินเพื่อการก่อสร้างต่อไปโดยเฉพาะการก่อสร้างสนามบินที่กำลังดำเนินการอยู่ในปัจจุบันในประเทศไทย

4.4 ผลการเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหารอยแตกที่เกิดขึ้น

เมื่อทราบสาเหตุที่เกิดขึ้นและแนวทางป้องกันแล้ว จะได้ทำการเสนอแนะแนวทางแก้ไขรอยแตกที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งขั้นตอนที่ควรทำคือ กำจัดคอนกรีตส่วนที่เสียหายออกไปโดยไม่ให้กระทบต่อคอนกรีตที่อยู่รอบๆ ทำความสะอาดพื้นผิวบริเวณที่เสียหาย และเก็บเศษวัสดุต่างๆ ให้เรียบร้อย จากนั้นหาด้วยสารยึดระหว่างคอนกรีตเก่าและใหม่ และเทวัสดุซ่อมที่เลือกใช้ ทั้งไว้จนรับน้ำหนักได้ ผลการเปรียบเทียบความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ที่มีให้เลือกอยู่ในท้องตลาด ระหว่างเกรท์ ซีเมนต์มอร์ต้าร์ และอีพอกซีมอร์ต้าร์ พบว่าวัสดุที่เหมาะสมในการซ่อมสนามบินคือ อีพอกซีมอร์ต้าร์ เนื่องจากแข็งตัวเร็ว ซึ่งเหมาะกับการใช้งานซ่อมที่ต้องการเปิดใช้งานเร็ว

5. สรุปผลการทดลอง

สาเหตุของรอยแตกเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-5 ซม. บนพื้นคอนกรีตผิวทางวิ่งสนามบินคาคลี เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแร่ไพไรต์ ที่เป็นส่วนประกอบในหินบางส่วนที่ใช้ในงานก่อสร้างสนามบิน ซึ่งเมื่อแร่ดังกล่าวทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ความชื้นและซีเมนต์เพส จะได้ผลิตภัณฑ์คือ ยิปซัมและจาร์โซลต์ที่ตรวจพบได้จากผล XRD ของคอนกรีตรอบๆ หิน

ที่เกิดปัญหาทรอยแตก สำหรับการป้องกันสามารถทำได้โดยหลีกเลี่ยงการใช้หินที่มีแร่ไพไรต์เป็นส่วนประกอบ ทำได้โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า การส่งวิเคราะห์ทางเคมีหาปริมาณ Fe_2O_3 และ S และการตรวจสอบโดยวิธี XRD สำหรับวัสดุที่เหมาะสมในการซ่อมคือ อีพอกซีเมอร์ตาร์ท

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทัพอากาศผ่านคณะกรรมการบริหารการวิจัยและพัฒนากองทัพอากาศ ขอขอบคุณ ร.อ.ณัฐ ลิ่มสุวรรณ แผนกช่างโยธา กองบิน 4 ในการอำนวยความสะดวกในการเข้าสนามบิน และการให้ข้อมูลของสนามบิน ขอขอบคุณ น.ต.หญิง สันสนีย์ อังโฆษาชนะวานิช ภาควิชาเคมี รร.นายเรืออากาศ ที่ให้ความอนุเคราะห์ห้องทดลองเคมี ขอขอบคุณ คุณชนันท์พงษ์ จริงจิตร กรมทรัพยากรธรณี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์หาแร่ในหิน และขอขอบคุณ คุณบุญรอด คุปติทัฬหี และคุณนฤชา เกษมสำราญ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล XRD

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] อุบลศรี ชัยสามและเยาวลักษณ์ นิสสภ, **คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานการใช้งานและมาตรฐานการซื้อขายในตลาดแร่**, กรมทรัพยากรธรณี, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2537.
- [2] Shayan, A., Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyretic aggregates, **Cement and concrete research**, Vol. 18, pp. 723–730, 1988.

[3] Rose, A. W., and Cravotta, C.A., III, [in press], Geochemistry of coal mine drainage, in Smith, M.W., and Brady, K.B.C., eds., **The prediction and prevention of acid drainage from surface coal mines in Pennsylvania** : Harrisburg, Pennsylvania Department of Environmental Protection chapter 1.

[4] Kurtis, K.E., and P. Monteiro, Analysis of durability of advanced cementitious materials for rigid pavement construction in California, **Technical report No. FHWA/CA/OR-99/02**, April 1999.

[5] Orndorff, Z.W., Evaluation of sulfidic materials in Virginia highway corridors, **Ph.D. Dissertation**, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.

[6] วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ, **วิทยากร**, สถาบันราชภัฏจันทรเกษม, 2539.

[7] A.M. Neville, **Properties of concrete**, 4th ed., pp.140–141, 1995.

[8] Am. Soc. Test. Mat., Standard descriptive nomenclature for constituents of natural mineral aggregates, **Annual book of ASTM Standards**, Vol. 04.02, C294–86 (reapproved 1991), 1991.

[9] Merritt, R.D., Alaska's low-sulfur goals hold leading edge in future pacific-rim and U.S. coal trade, Alaska Division of Geological and Geophysical Surveys, 1987.

[10] ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้างสำหรับโครงสร้างคอนกรีต, **มาตรฐาน ว.ส.ท. 1014-40**, พิมพ์ครั้งที่ 1, ตุลาคม 2540.

[11] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มวลผสมคอนกรีต (มอก.566-2528)**, 2528.

[12] Am. Soc. Test. Mat., Standard specification for concrete aggregates, **Annual book of ASTM Standards**, Vol.04.02, C33–90, 1991.

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อ น.ต.ชนกร พิระพันธ์ุ, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ โทรศัพท์ 0-2534-4951 หรือ petevmi@alum.mit.edu