

การใช้เครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence แบบพกพาเพื่อทดสอบสภาพของคอนกรีต Development of Portable Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analyzer for Concrete Inspection

รศ.กิตติพงษ์ สหามิตรมงคล¹, อชิซาคิ คานาดา², โยชิตะกะ คาโต², ทาเคโตะ อุโอะโมโตะ²

Raktipong Sahamitmongkol¹, Hisashi Kanada², Yoshitaka Kato², and Taketo Uomoto²

¹Regional Network Office for Urban Safety (RNUS), สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ถนนพหลโยธิน กม. 42 ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทร 02-524-6418, โทรสาร 02-524-5565, E-mail: sahamit@ait.ac.th

²International Center for Urban Safety Engineering (ICUS), the University of Tokyo

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการนำเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) Analysis เพื่อทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการศึกษาเริ่มจากการใช้เครื่องวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence แบบ energy dispersive type (EDXRF) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณคลอไรด์แตกต่างกัน และศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ เช่นระยะเวลาของการวัด, ค่าความต่างศักย์, และระยะห่างระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องวัดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการวัดปริมาณคลอไรด์และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพื้นที่ใต้สเปกตรัมและปริมาณคลอไรด์ในมอร์ตาร์ หลังจากนั้นได้มีการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการเจาะตัวอย่างในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้พบว่าเทคนิค XRF นั้นสามารถให้ผลที่แม่นยำถึงแม้จะใช้ปริมาณตัวอย่างทดสอบแค่ประมาณ 1 กรัม และสามารถทำการวัดได้ทันทีในสถานที่จริง นอกจากนี้เทคนิค XRF ยังสามารถวัดปริมาณคลอไรด์ที่ระยะลึกต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกับผลการวัดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการไตเตรชันมาก

Abstract

This technical paper presents the applicability of X-Ray Fluorescence (XRF) Analysis to make an in-situ measurement of chloride content in concrete structure. The method became feasible by the usage of energy dispersive type X-Ray Fluorescence analyzer. The study started with the experiment on cement paste specimens with various chloride contents. The effects of measurement duration distance between sample and detector and voltage of X-Ray generator on the measurement results were also investigated in order to determine the most appropriate measuring condition. The relationship between peak area under spectrum curve and chloride content was then derived from the experimental results. The relationship was used to determine chloride content of real reinforced concrete structure. The trial usage of

the XRF method to investigate the chloride content of real concrete structure reveals that 1 gram of sample can give an accurate result. The method can also be applied to measure chloride content of concrete at different depth from exposure surface. The results of XRF analysis is very close to those obtained from titration analysis.

1. คำนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-Destructive Test, NDT) เช่น การใช้คลื่นอัลตราโซนิก, การใช้คลื่นเรดาร์, การใช้กล้องรังสีอินฟราเรด มาช่วยในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้จะช่วยให้ผู้ตรวจสอบโครงสร้างหาข้อมูลเกี่ยวกับความเสียหายต่างๆ ของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามเทคนิคดังกล่าวสามารถตรวจสอบได้เพียงแค่ลักษณะทางกายภาพ (รอยแตกร้าว, ช่องว่างในคอนกรีต, หรือตำแหน่งของเหล็กเสริม) ได้ ในขณะที่ปัจจุบันยังไม่มีเทคนิค NDT ที่ช่วยในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ ทั้งๆที่ข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีนั้นช่วยให้ผู้ตรวจสอบโครงสร้างทราบต้นเหตุของการเสื่อมสภาพ และความเข้มข้นของสารที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพที่ระยะลึกต่างๆ

การวัดปริมาณคลอไรด์ในปัจจุบันนั้นต้องใช้ตัวอย่างทดสอบที่เจาะมาจากโครงสร้างจริงและทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ในห้องปฏิบัติการซึ่งมักจะใช้เวลาาน ในขณะที่คลอไรด์เป็นสาเหตุที่สำคัญที่ก่อให้เกิดการขึ้นสนิมของเหล็กเสริม และมีปริมาณโครงสร้างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพด้วยคลอไรด์เป็นจำนวนมาก ดังนั้นเทคนิคการวัดปริมาณคลอไรด์ที่สามารถลดขั้นตอนที่ยุ่งยากลงจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้สามารถประหยัดเวลาและงบประมาณ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีพื้นที่ที่ต้องตรวจสอบเป็นบริเวณกว้าง

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence Analysis ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer แบบ energy dispersive type

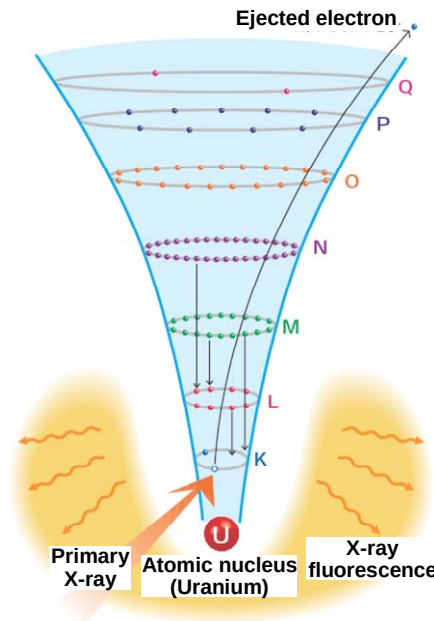
(EDXRF) ซึ่งสามารถพกพาได้ ซึ่งการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของเทคนิคดังกล่าวในการตรวจสอบปริมาณคลอรีนในตัวอย่างทดสอบและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

2. การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย X-Ray

Fluorescence Analysis

2.1 หลักการของวิธี X-Ray Fluorescence Analysis

X-Ray Fluorescence Analysis เป็นวิธีการที่ใช้ตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของสารต่างๆ โดยการวัดรังสี X-Ray ที่เปล่งออกมาจากวัสดุเป้าหมาย โดยขั้นตอนการทดสอบเริ่มต้นด้วยการฉายรังสี X-Ray ดั้งเดิม (Primary X-ray) ไปยังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบ เมื่อรังสี X-Ray กระแทกวัตถุเป้าหมายแล้วพลังงานของรังสี X-Ray ส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับ และที่เหลือจะกระจัดกระจายไป หาก X-Ray ดั้งเดิมมีพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนของวัตถุเป้าหมายจะหลุดออกมาจากวงแหวนชั้นใน (inner shell) ซึ่งจะทำให้เกิดภาวะไม่เสถียร (unstable state) ของอะตอม โดยอะตอมจะพยายามทำให้เกิดความเสถียรด้วยการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกออกไปเข้ามาตามลำดับชั้น การย้ายตำแหน่งของอิเล็กตรอนเพื่อให้เกิดภาวะเสถียรนี้ทำให้อิเล็กตรอนคายพลังงานออกมาด้วยการแผ่รังสี Characteristic X-ray ออกมา ซึ่งรังสี X-ray ดังกล่าวมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของพลังงานของชั้นดั้งเดิมและชั้นปลายทางของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ ปรากฏการณ์ย้ายตำแหน่งของอิเล็กตรอนพร้อมทั้งปล่อยรังสี X-ray (Secondary X-Ray) ออกมาดังกล่าวเรียกว่า X-Ray Fluorescence



รูปที่ 1 ภาพจำลองปรากฏการณ์ X-Ray Fluorescence ของ ยูเรเนียม [2]

รูปที่ 1 แสดงรูปอธิบายปรากฏการณ์ X-Ray Fluorescence ของยูเรเนียม โดยรังสี X-Ray ที่ถูกปล่อยออกมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น L ไป K เรียกว่า รังสี $K\alpha$, รังสี X-Ray ที่ถูกปล่อยออกมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้น M ไป L เรียกว่า รังสี $L\alpha$ และรังสีที่ถูกปล่อยออกมาเมื่ออิเล็กตรอนวิ่งข้ามชั้นเรียกว่า รังสี $\beta(\gamma)$ โดยปรกติพลังงานที่ใช้ในเทคนิค X-Ray Fluorescence คือ รังสี $K\alpha$ แต่การดึงอิเล็กตรอนในชั้น K ออกจะใช้พลังงานสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

Energy (keV)																K α line (red)						L α line (green)					
1 H Hydrogen																2 He Helium											
3 Li Lithium	4 Be Beryllium															5 B Boron	6 C Carbon	7 N Nitrogen	8 O Oxygen	9 F Fluorine	10 Ne Neon						
11 Na Sodium	12 Mg Magnesium															13 Al Aluminum	14 Si Silicon	15 P Phosphorus	16 S Sulfur	17 Cl Chlorine	18 Ar Argon						
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titanium	23 V Vanadium	24 Cr Chromium	25 Mn Manganese	26 Fe Iron	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Copper	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium	35 Br Bromine	36 Kr Krypton										
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon										
55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57-71 Lanthanoid	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon										
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Actinoid	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium																			
Lanthanoid			57 La Lanthanum	58 Ce Cerium	59 Pr Praseodymium	60 Nd Neodymium	61 Pm Promethium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium										
Actinoid			89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkelium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium										

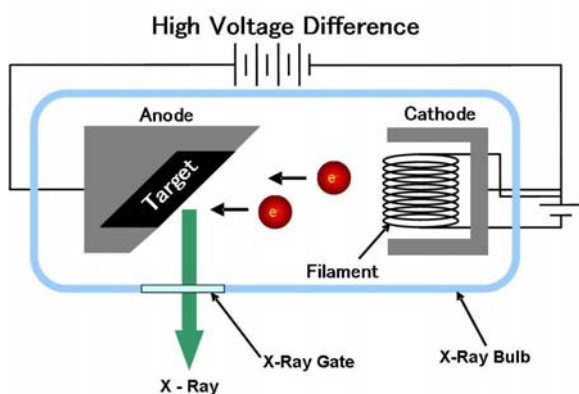
รูปที่ 2 ตารางธาตุและค่าระดับพลังงานเฉพาะของอะตอมแต่ละชนิด [3]

ในอะตอมที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นอะตอมที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 56 (แบเรียม) ขึ้นไป จะใช้การวัดรังสี $L\alpha$ แทน รูปที่ 2 แสดงค่าพลังงานเฉพาะของอะตอมชนิดต่างๆ (รังสี $K\alpha$ สำหรับ Be ถึง Cs และรังสี $L\alpha$ สำหรับ Ba ถึง U)

เนื่องจากอะตอมแต่ละประเภทมีกลุ่มระดับพลังงานที่ต่างกัน อะตอมต่างๆจะแผ่ X-ray ที่กลุ่มระดับพลังงานเฉพาะของอะตอมนั้นๆ คุณสมบัตินี้เป็นหลักการพื้นฐานในการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence โดยการวัดจะแสดงผลของความเข้มข้นของรังสี X-ray ที่ระดับพลังงานต่างๆออกมา และปริมาณของอะตอมเป้าหมายจะสามารถคำนวณได้จาก ความเข้มข้นของรังสี X-ray ที่ระดับพลังงานเฉพาะของอะตอมชนิดนั้นๆ

2.2 การฉายรังสี X-Ray ตั้งต้นและการเลือกโลหะเป้าหมาย

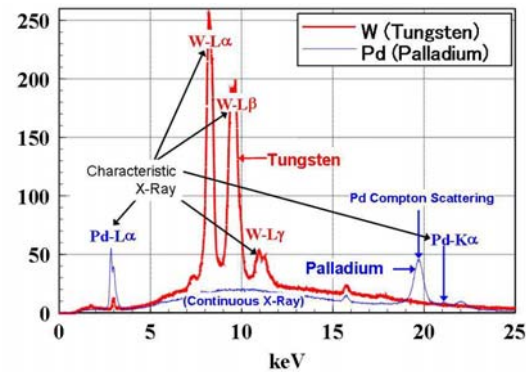
ในเทคนิค X-Ray Fluorescence นั้น X-Ray ตั้งต้น (Primary X-Ray) ที่เหมาะสมนั้นจำเป็นต่อการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ออกจากอะตอม ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องฉายรังสี X-Ray เพื่อฉายรังสี X-Ray ตั้งต้น โดยรูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องฉายรังสี X-Ray ดังกล่าว



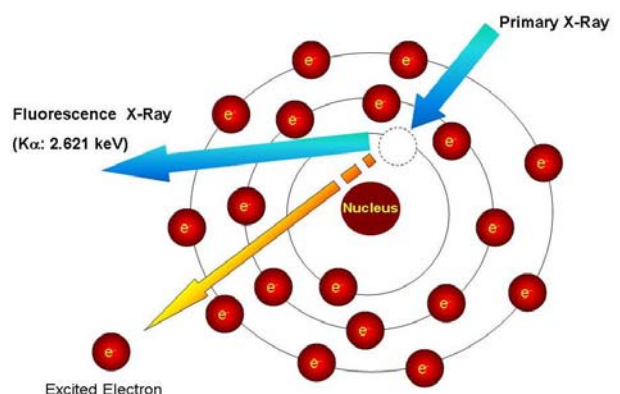
รูปที่ 3 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องฉายรังสี X-Ray

เครื่องฉายรังสี X-Ray ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ ขั้วบวกซึ่งประกอบด้วยโลหะเป้าหมาย (Target) และขั้วลบซึ่งเป็นขดลวดไฟฟ้า (Filament) โดยอิเล็กตรอนในขดลวดจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนอันเกิดจากกระแสไฟฟ้า หลังจากที่ถูกอิเล็กตรอนได้รับพลังงานเพียงพอที่จะเคลื่อนตัวตามความต่างศักย์ไปยังโลหะเป้าหมายที่ขั้วบวก ทันทีที่อิเล็กตรอนชนกับโลหะดังกล่าว พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนประมาณ 99% จะกลายเป็นความร้อนและส่วนที่เหลืออีก 1 % จะกลายเป็นรังสี X-ray (Continuous X-Ray) ดังที่แสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้การชนกันจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนของโลหะเป้าหมายเคลื่อนตัวออกมา และทำให้เกิดรังสี X-ray (Characteristic X-Ray) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะเป้าหมาย (ดูรูปที่ 4) พลังงานของ Characteristic X-Ray จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของโลหะชนิดของโลหะที่จะนำมาใช้เป็นโลหะเป้าหมายนั้นจะถูกพิจารณาตาม

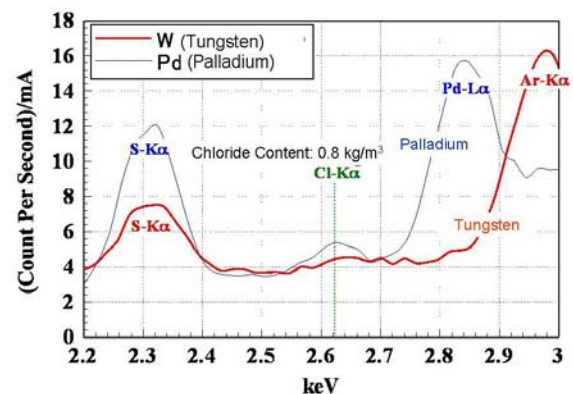
วัตถุที่ต้องการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งจะต้องไม่เป็นวัตถุชนิดเดียวกันเพราะจะทำให้ และต้องมีค่าพลังงานเฉพาะให้ใกล้เคียงกับค่าพลังงานเฉพาะของวัตถุที่จะตรวจสอบ ซึ่งจะสังเกตได้ว่าโลหะชนิดเดียวจะมี Characteristic X-Ray อยู่หลายแบบ (เช่น $K\alpha$, $K\beta$, ..., $L\alpha$, $L\beta$, $L\gamma$ ในรูปที่ 4)



รูปที่ 4 ลักษณะพิเศษของ X-Ray ตั้งต้นที่ได้จากการใช้โลหะเป้าหมายต่างกัน



รูปที่ 5 การปลดปล่อยพลังงานของคลอไรด์อะตอม

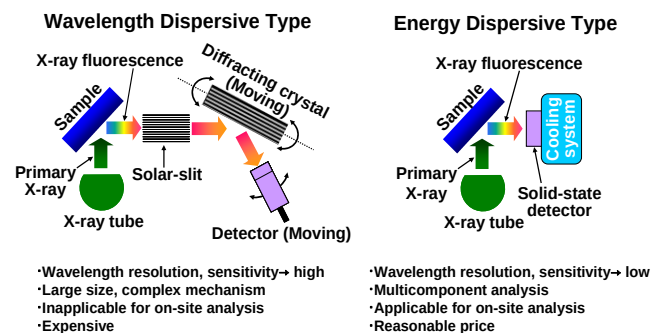


รูปที่ 6 ความสามารถในการวัดปริมาณคลอไรด์ของโลหะเป้าหมายแต่ละชนิด

รูปที่ 4 แสดง Characteristic X-ray เมื่อใช้ทั้งสแตน (W) และ พาลลาเดียม (Pd) เป็นโลหะเป้าหมาย เมื่อพิจารณาค่าระดับพลังงานเฉพาะของคลอไรด์ที่ 2.621 keV (kilo electron volts) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2 และรูปที่ 5 จะพบว่าค่าระดับพลังงานเฉพาะของ พาลลาเดียมที่ 2.838 (Pd-L α) นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าระดับพลังงานเฉพาะของคลอไรด์จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้วัดปริมาณคลอไรด์ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทั้งสแตนเป็นโลหะเป้าหมาย จะพบว่าการใช้พาลลาเดียมนั้นสามารถใช้วัดปริมาณคลอไรด์ได้ดีกว่าถึงแม้ว่าจะมีปริมาณคลอไรด์ในตัวอย่างทดสอบไม่มาก (ดังแสดงในรูปที่ 6) ถึงแม้ว่าทั้งสแตนจะมีเลขอะตอมมากกว่า ซึ่งจะทำให้ Continuous X-Ray มีค่าสูงกว่าแต่การใช้รังสี Pd-L α วัดปริมาณคลอไรด์นั้นมีประสิทธิภาพกว่ามาก นอกจากนี้ยังสามารถใช้เงิน (Ag) เป็นโลหะเป้าหมายได้ด้วย (Ag-L α : 2.984 keV)

2.3 ชนิดของเครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer

เครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ wavelength dispersive type (WDXRF) และ energy dispersive type (EDXRF) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 โดยเครื่อง WDXRF จะมีการแยกสเปกตรัมตามความยาวคลื่นโดยใช้ผลึกกระจายแสงและติดตั้งตัวรับรังสี X-ray ในตำแหน่งที่เหมาะสม (ตาม Bragg's Laws) ซึ่งเครื่องชนิดนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ที่ต้องการแยกรังสี X-Ray ตามความยาวคลื่นและมีความแม่นยำสูงแต่ตัวเครื่องมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถพกพาเพื่อทำการวัดในโครงสร้างคอนกรีตจริงได้



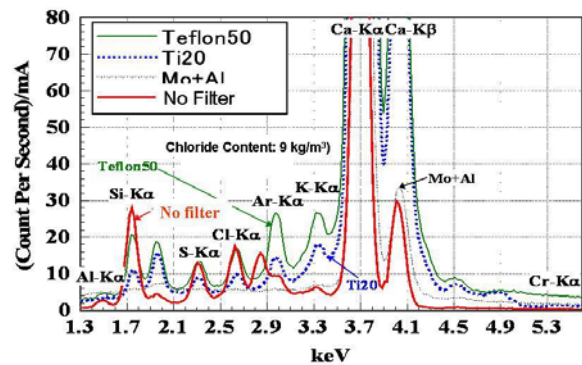
รูปที่ 7 ประเภทของเครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer

ในขณะที่เครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer แบบ EDXRF อาศัยหลักการที่ว่าขนาดของสัญญาณเป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับพลังงานโฟตอนของรังสี X-Ray ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ซึ่งจะทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ผลึกกระจายแสงและมีขนาดเล็กลง โดยความแม่นยำของการวัดของเครื่องแบบ EDXRF จะน้อยกว่าเครื่องแบบ WDXRF แต่จะสามารถวัดตัวอย่างทดสอบหลายตัวอย่างได้ในระยะเวลาอันสั้นและสามารถพกพาไปทำการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตในสถานที่จริงได้

โดยงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Analyzer แบบ EDXRF ที่มีตัวรับรังสี X-Ray แบบ SSD (Silicon Drift Detector)

2.4 การกรองรังสี X-Ray

ใน X-Ray Fluorescence Analysis นั้นจะต้องมีการกรองรังสี X-Ray ให้มีความเหมาะสมกับการวัดองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างทดสอบ โดยการกรองจะทำให้ปริมาณรังสี (Background) ซึ่งเป็นส่วนที่สะท้อนมาจาก Primary X-Ray ที่มีระดับพลังงานใกล้เคียงกับระดับพลังงานเฉพาะของตัวอย่างทดสอบนั้นมีค่าน้อยลง และจะส่งผลให้วัดค่าความเข้มข้นได้ดีขึ้น รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมจากการใช้ตัวกรองแบบต่างๆ (Teflon 50, Ti20, Mo+Al) เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวกรองรังสี X-Ray



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมจากการใช้ตัวกรองชนิดต่างๆ

Teflon50 นั้นทำให้ Background Spectrum ที่ระดับพลังงานที่ใช้วัด S, Cl, Al น้อยลง ดังนั้นจึงใช้ในกรณีที่ต้องการตรวจหาปริมาณ S, Cl, Al โดย Ti20 จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการวัดปริมาณ Cr ในขณะที่ Mo+Al นั้นจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของการวัด Cd ด้วยการลด Background Spectrum ที่ระดับพลังงานต่ำ (ระดับพลังงานของ Cd-K α มีค่าเท่ากับ 23.10 keV)

อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวกรองดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีความเหมาะสมกับการกระตุ้นอะตอมที่มีขนาดกลางถึงใหญ่ ซึ่งเป็นการวัดองค์ประกอบทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่ค่อนข้างมาก ซึ่งการศึกษานี้ใช้พลังงานในระดับที่น้อยกว่า ซึ่งการไม่ใช้ตัวกรองจะทำให้กระตุ้นอะตอมของคลอไรด์ได้ดีกว่าในกรณีนี้ ดังนั้นจึงไม่มีการใช้ตัวกรองในกรณีที่ตรวจวัดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตในงานวิจัยชิ้นนี้

3. การวัดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธี EDXRF

3.1 การติดตั้งอุปกรณ์

ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2 ว่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตนั้นสามารถวัดได้จาก ระดับพลังงานของ Cl-K α นั้นมีค่า 2.621 keV ดังนั้น

จึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ของเครื่อง EDXRF และตั้งค่าที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นต่อการวัด โดยพลาสมาเดิมถูกเลือกให้เป็นโลหะเป้าหมายของหลอดรังสี X-Ray เนื่องจาก X-Ray ของพลาสมาเดิมนั้นสามารถกระเด็นคลอไรด์ได้เต็มที่ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้านี้

3.2 ตัวอย่างการทดสอบ

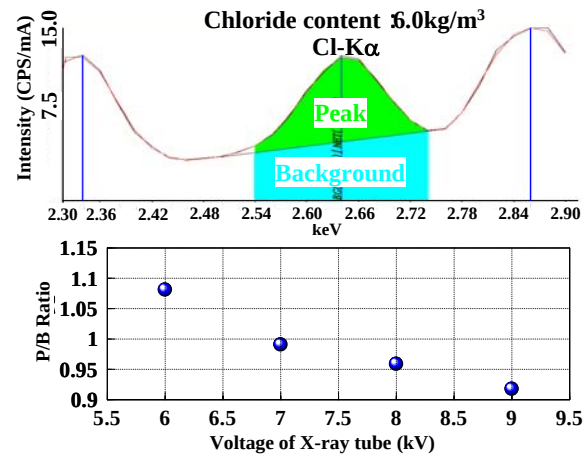
การทดสอบนี้ใช้ตัวอย่างทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณคลอไรด์ในระดับต่างๆ โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 0.4 (ดังแสดงในตารางที่ 1) คลอไรด์ถูกผสมในตัวอย่างทดสอบด้วยการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ลงในน้ำก่อนที่จะเติมลงในขั้นตอนการผสม ในกรณีของ N40-0 นั้นจะมีปริมาณคลอไรด์จากซีเมนต์และน้ำที่ใช้เท่ากับ 0.124 กก.ต่อลูกบาศก์เมตรและตัวอย่างทดสอบอื่นจะมีปริมาณคลอไรด์มากขึ้นตามปริมาณเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ใส่เพิ่ม โดยค่าศักย์ไฟฟ้า, ระยะโฟกัสระหว่างตัวอย่างทดสอบและเครื่องวัด (Focal Distance, ดูรูปที่ 10) และระยะเวลาที่ใช้วัดเป็น ตัวแปรในงานวิจัยนี้ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 รายการตัวอย่างการทดสอบและปริมาณคลอไรด์

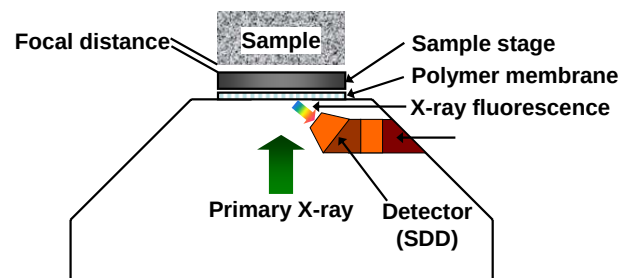
No.	Chloride content	No.	Chloride content
N40-0	None	N40-3.0	3.0 [0.154]
N40-0.4	0.4 [0.021]	N40-6.0	6.0 [0.308]
N40-0.6	0.6 [0.031]	N40-9.0	9.0 [0.462]
N40-0.8	0.8 [0.041]	N40-12.0	12.0 [0.615]
N40-1.0	1.0 [0.051]	N40-15.0	15.0 [0.769]
N40-1.2	1.2 [0.062]	N40-20.0	20.0 [1.025]
N40-1.5	1.5 [0.077]	Unit: kg/m ³ [wt %]	

ตารางที่ 2 รายการตัวอย่างการทดสอบและปริมาณคลอไรด์

Target Material		X-ray filter
Palladium		Nonuse
Voltage of X-ray tube	Focal distance	Measurement time
6~9kV	0~7mm	30, 60, 120, 180s

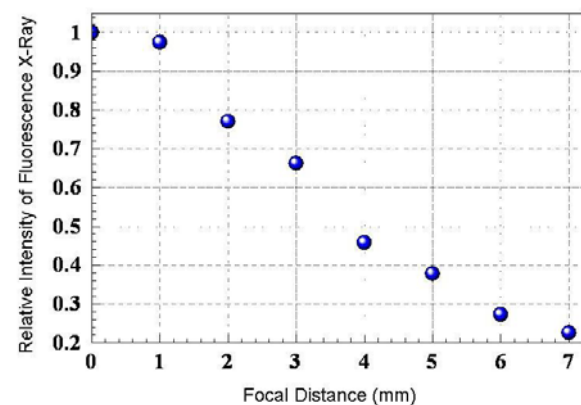


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง P/B และความต่างศักย์ของเครื่องฉายรังสี X-Ray

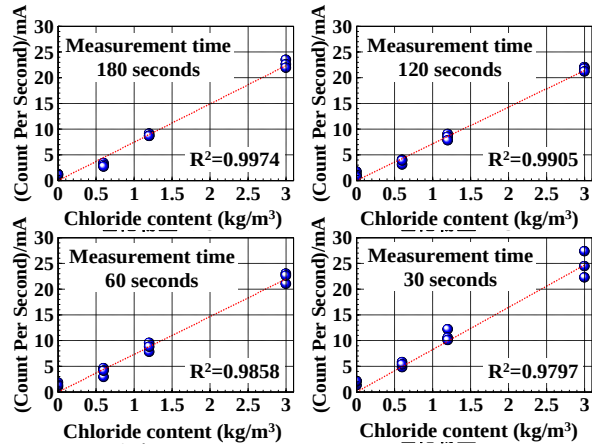


รูปที่ 10 การติดตั้งอุปกรณ์

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าของหลอดรังสี X-Ray และ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของส่วนยอดและพื้นที่ของส่วนฐาน (Peak to Background Ratio, P/B ratio) เมื่อศักย์ไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดและค่าพื้น (P/B ratio) มีค่าลดลง ดังนั้นการวัดด้วยศักย์ไฟฟ้าต่ำจึงมีความเหมาะสมในการวัดปริมาณคลอไรด์ รูปที่ 10 แสดงการติดตั้งตัวตรวจวัด (SSD Detector) ซึ่งจะทำการตรวจวัด X-Ray Fluorescence ที่ออกมาจากตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 11 ผลของระยะห่างต่อความเข้มข้นของรังสี X-Ray



รูปที่ 12 ผลของระยะเวลาของการวัดต่อผลการวัด

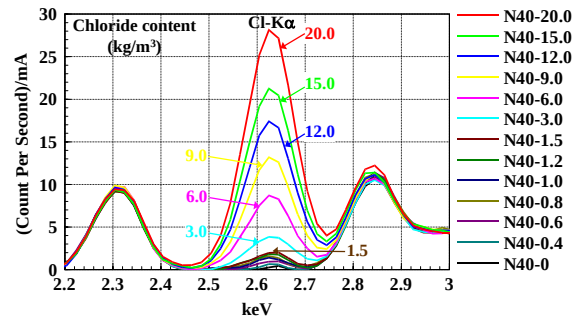
รูปที่ 11 แสดงผลของระยะห่างระหว่างเครื่องวัดรังสี X-Ray และตัวอย่างทดสอบต่อความเข้มข้นของรังสี X-Ray Fluorescence ที่วัดได้ โดยพบว่า ความเข้มข้นมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างมีค่ามากขึ้น โดยความเข้มข้นจะลดลงถึง 80% ด้วยระยะห่าง 7 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากการสูญเสียพลังงาน (Attenuation) เมื่อรังสี X-Ray เดินทางผ่านอากาศ ดังนั้นการวัดให้ระยะทางมีค่าน้อยที่สุดจะทำให้การวัดมีประสิทธิภาพมากที่สุด

รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนแปลงของผลการวัด อันเนื่องมาจากระยะเวลาของการตรวจวัดที่แตกต่างกัน จากผลการทดสอบจะพบได้ว่า ผลการทดสอบจะมีค่าที่ค่อนข้างแน่นอน เมื่อระยะเวลาที่ใช้วัดนานกว่า 30 วินาที และความถูกต้องจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการวัดยาวนานขึ้น ($R^2 = 0.9974$ เมื่อระยะเวลาวัดเท่ากับ 180 วินาที)

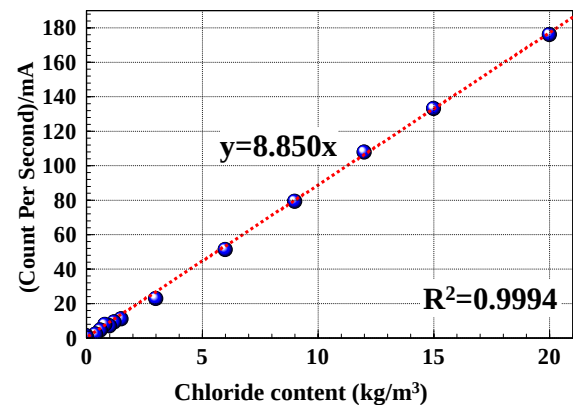
3.3 การเตรียม Calibration Curve

รูปที่ 13 แสดงค่า X-Ray Fluorescence ที่หักค่า Background ออกไปแล้ว ที่บริเวณระดับพลังงาน 2.621 keV ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่ามากขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถช่วยให้สามารถแปลงค่าของ X-Ray Fluorescence ไปเป็นปริมาณคลอไรด์ได้ด้วยการสร้าง Calibration Curve จากผลการทดลองที่ได้ ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการวัดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้

รูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์และ พื้นที่ของกราฟที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากคลอไรด์ (Peak Area) ดังแสดงในรูปที่ 9 นั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับที่ดีมาก ดังนั้นปริมาณคลอไรด์นั้นจึงสามารถคำนวณได้จาก Peak Area โดยปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการวัดจะเป็นปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด ซึ่งรวมถึงคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) และคลอไรด์ที่ถูกยึดไว้ (Fixed Chloride)

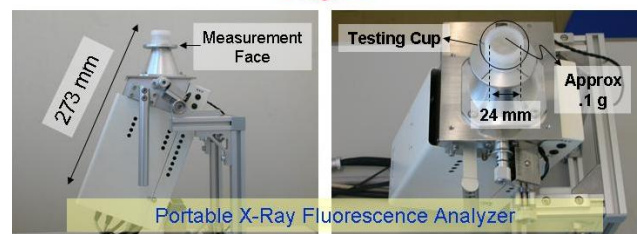


รูปที่ 13 ค่าความเข้มข้นของ X-Ray Fluorescence ที่ 2.621 keV ของตัวอย่างทดสอบที่มีปริมาณคลอไรด์ต่างๆ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Peak Area กับปริมาณคลอไรด์

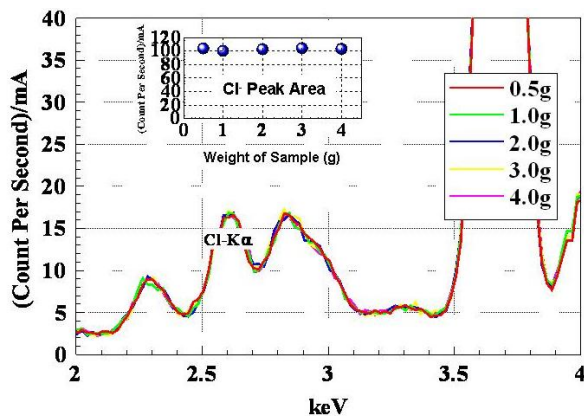
4. การใช้เทคนิค XRF ในงานตรวจสอบจริง



รูปที่ 15 การทดลองใช้ Portable XRF Analyzer ในงานจริง

4.1 การวัดปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีต

ข้อดีของการใช้เครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence แบบพกพาคือความสามารถในการวัดองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างจริง ในขณะที่การวัดปริมาณสารเคมีทั่วไปเช่นการไทเทรชันเพื่อหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตนั้นต้องการ การทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งอาจจะใช้เวลาหลายวัน ดังนั้นการใช้เครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence แบบพกพาจะช่วยลดความยุ่งยากและย่นระยะเวลาของการตรวจสอบโครงสร้าง รูปที่ 15 แสดงการใช้เครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence วัดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต

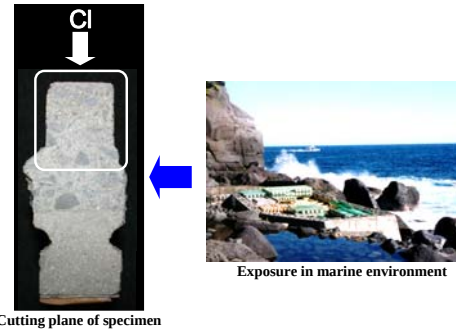


รูปที่ 16 การทดลองใช้ Portable XRF Analyzer ในงานจริง

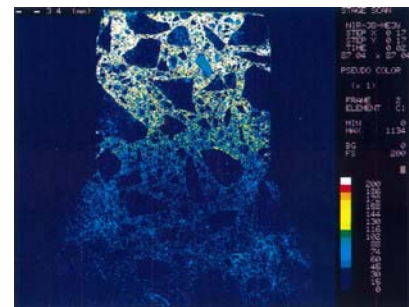
ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 16 ว่าปริมาณของตัวอย่างทดสอบนั้นไม่มีผลต่อผลการทดสอบ โดยตัวอย่างการทดสอบที่มีน้ำหนักเพียง 1 กรัมก็จะมีปริมาณเพียงพอต่อการวัดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการดังกล่าว

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบวัดปริมาณคลอไรด์ของคอนกรีตที่มีระยะจากผิวคอนกรีตต่างกัน เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการวัดปริมาณคลอไรด์จากผิวโครงสร้างโดยตรง โดยทำการวัดปริมาณคลอไรด์ในหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตซึ่งถูกเก็บไว้ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นทะเล (ดูรูปที่ 17) ผลการวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี EPMA ของตัวอย่างทดสอบดังกล่าวถูกแสดงไว้ในรูปที่ 18 เพื่อเป็นการอ้างอิง โดยบริเวณสีขาวเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณคลอไรด์มาก

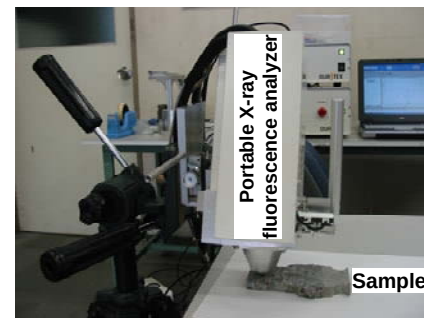
รูปที่ 19 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์จากผิวหน้าตัดโดยตรง รูปที่ 20 แสดงผลการวัดซึ่งได้มาจากค่าเฉลี่ยของการวัดที่จุดสามจุดที่มีระยะห่างจากผิวคอนกรีตเท่ากัน และไม่เป็นมวลรวม โดยทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดด้วยวิธีใดเรตรง์ชันจากตัวอย่างทดสอบเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก



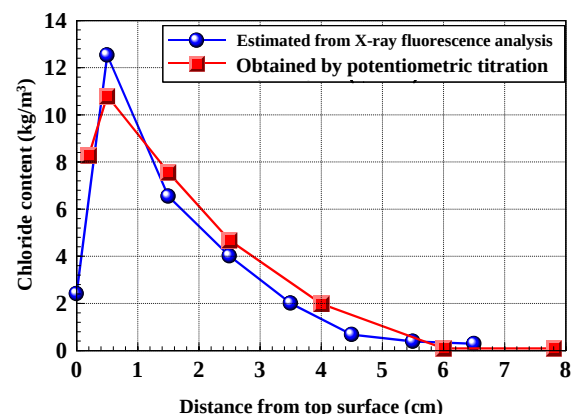
รูปที่ 17 ตัวอย่างทดสอบเพื่อวัดค่าคลอไรด์ที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 18 ผลการวัดปริมาณคลอไรด์ด้วยเครื่อง EPMA



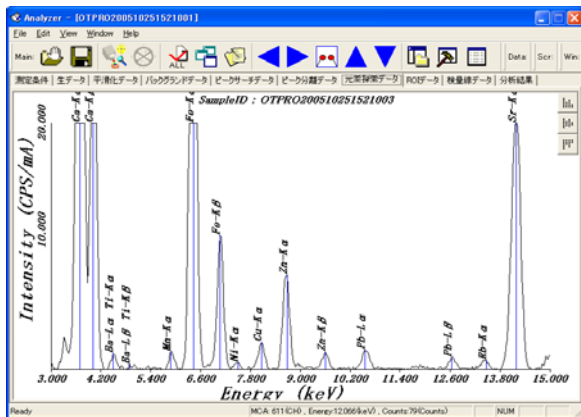
รูปที่ 19 การติดตั้งเครื่องเพื่อวัดปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต



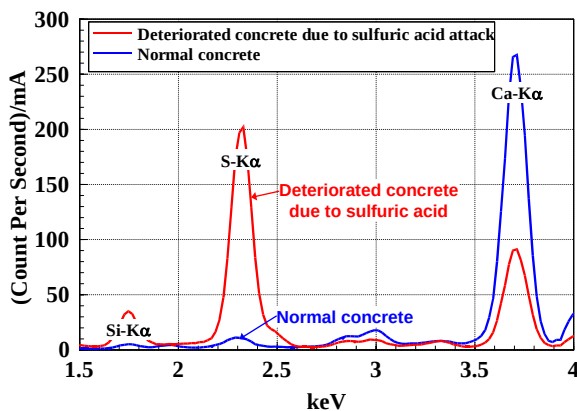
รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธี XRF และการไทเทรชัน

4.2 การตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ

เนื่องจากเครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence นั้นสามารถวิเคราะห์หาอะตอมของธาตุต่างๆ ได้ตั้งแต่ ^{12}Mg ถึง ^{92}U ดังนั้นวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้ได้กับการตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เช่น Mg, Al, Si, S, K, Ca หรือ Fe ได้ (รูปที่ 21) โดยรูปที่ 22 แสดงตัวอย่างในกรณีของคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากกรดซัลฟูริก โดยปริมาณของ X-Ray Fluorescence ที่ 2.307 keV นั้นมีค่ามากขึ้นอันเนื่องมาจากปริมาณซัลเฟอร์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณแคลเซียมที่ลดลงแสดงให้เห็นว่ามีการสลายตัวของซีเมนต์เพสต์ ส่วนปริมาณซิลิกาที่มากขึ้นนั้นเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของมวลรวมที่มากขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพสต์ที่หุ้มอยู่ถูกกรดกัดกร่อนออกไป



รูปที่ 21 ความสามารถในการวัดอะตอมต่างๆ ของ XRF



รูปที่ 22 ผลการทดสอบ XRF ของคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากกรดซัลฟูริกกัดกร่อน

5. สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า การใช้เครื่องวิเคราะห์ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence แบบพกพานั้นเป็นวิธีการที่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างคอนกรีตได้ โดยวิธีการ

ดังกล่าวนี้จะช่วยประหยัดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบโครงสร้าง โดยวิธีการดังกล่าวนี้สามารถตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพของคอนกรีตได้เกือบทุกชนิด

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Kanada, Y. Ishikawa, and T. Uomoto, "Development of New Method to Detect Deleterious Substances of Concrete Using Near-Infrared Spectral Imaging System", Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation, Chiang Mai, Thailand, October 28-29, 2004
- [2] Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI), "Bits of knowledge: X-ray fluorescence analysis", Spring-8 News, No.6, 2001.3
- [3] Princeton Gamma-Tech, Inc., "X-ray Critical Absorption and Emission Energies in keV", Nuclear Products Catalog, 2002