

การพัฒนาวิธีการทดสอบการเสื่อมสภาพของคอนกรีตด้วยรังสีอินฟราเรดแบบใกล้

Development of New Method to Inspect Deteriorated Concrete using NIR Spectroscopic Technique

รักติพงษ์ สหमितมงคล¹, ฮิซาชิ คานะกะ², โยชิตะกะ คาโตะ², ทาเคโตะ อุโอะโมโตะ²

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

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

ถนนพหลโยธิน กม. 42 ค.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

บทความนี้อธิบายการพัฒนาวิธีการฉายรังสีอินฟราเรดแบบใกล้ (Near-Infrared, hereinafter NIR) เพื่อทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตเพื่อที่จะช่วยให้สามารถตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโครงสร้างที่เสื่อมสภาพได้โดยไม่ต้องทำการเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบปริมาณมาก โดยการทดสอบขั้นแรก ใช้เครื่องแยกรังสีอินฟราเรดแบบใกล้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพหรือสารที่เกี่ยวข้อง เช่น คลอไรด์, แคลเซียมไฮดรอกไซด์, และซัลเฟต ต่อการสะท้อนหรือดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในตัวอย่างทดสอบที่เป็นซีเมนต์เพสต์ โดยพบว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ของซีเมนต์เพสต์นั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอนุพันธ์อันดับที่สองของอัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นเฉพาะขององค์ประกอบนั้นๆ โดยความรู้ดังกล่าวสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System เพื่อทดสอบหาการกระจายตัวของสารต่างๆ บนผิวคอนกรีตที่เป็นสองมิติ โดยผลการทดสอบการกระจายตัวดังกล่าวให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบด้วย EPMA Analysis แต่มีความยุ่งยากในการปฏิบัติน้อยกว่ามาก

Abstract

This research is an attempt to develop new non-destructive testing technique to determine the chemical compositions of the deteriorated concrete structure. The development started with the usage of "Near-Infrared Spectrometer" (NIR Spectrometer) to study the unique optical properties of deteriorating substances or related chemicals such as chloride ion, calcium hydroxide, or sulfate. These substances show unique reflectance and absorbance to infrared ray with specific wavelength. It was found that the concentration of each substance in cement paste specimens can be calculated from the second derivatives of absorbance spectrum. Consequently, the obtained knowledge of optical properties can be applied to measure

the distribution of substances on two-dimensional concrete surface by using "Near-Infrared Spectral Imaging System". The results obtained from this newly-developed technique are very similar to those obtained from EPMA analysis while the operation is much easier.

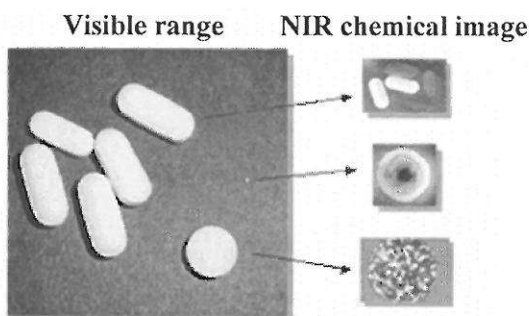
1. คำนำ

การตรวจสอบด้วยตาเปล่านั้นเป็นขั้นตอนแรกของการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามก็ตามข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยตาเปล่าเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอที่จะประเมินระดับและสาเหตุของการเสื่อมสภาพได้อย่างถูกต้องเพียงพอ ด้วยเหตุนี้การเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบจากสถานที่จริงมักจะเป็นวิธีที่ถูกเลือกเพื่อตรวจสอบลักษณะการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นๆ แต่วิธีการดังกล่าวมีราคาสูงหากพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบกว้างมาก และจะทำให้เกิดริ้วรอยในโครงสร้างซึ่งต้องการการซ่อมแซมปิดริ้วรอยดังกล่าวหลังจากการตรวจสอบ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดจากการเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่างๆ จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อให้การตรวจสอบโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การทดสอบแบบไม่ทำลายส่วนใหญ่ (เช่น การตรวจด้วยคลื่นอัลตราโซนิก, การตรวจสอบด้วยคลื่นเรดาร์, หรือการตรวจสอบด้วยกล้องอินฟราเรดเพื่อจับความร้อน) นั้นสามารถทดสอบได้เพียงแค่ลักษณะทางกายภาพ เช่น ความกว้างหรือความลึกของรอยแตกร้าว, ตำแหน่งของเหล็กเสริม, หรือช่องว่างในคอนกรีต แต่ไม่สามารถตรวจสอบลักษณะทางเคมีของคอนกรีตได้

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมุ่งพัฒนาการใช้เทคนิคการแยกสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดแบบใกล้ (Near-Infrared Spectrometry, NIR Spectrometry) เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของคอนกรีต ซึ่งจะสามารถใช้ในการประเมินปริมาณของสารที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพได้

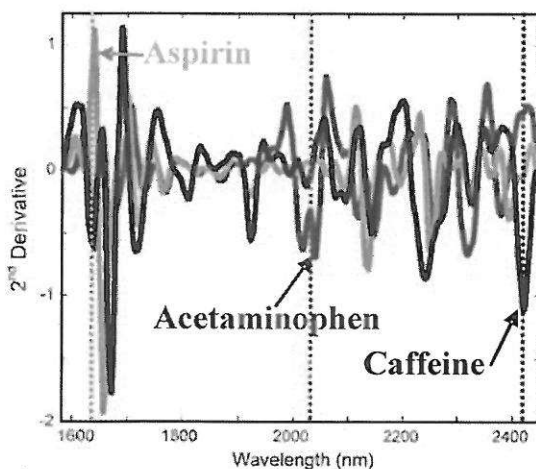
2. เทคนิคการแยกสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดแบบใกล้

เทคนิคการแยกสเปกตรัมรังสีอินฟราเรดแบบใกล้ (NIR) นั้นถูกพัฒนาเป็นครั้งแรกในอุตสาหกรรมอาหารและเกษตรกรรม โดยอาศัยความเข้าใจในพฤติกรรมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่สะท้อนหรือถูกดูดซับจากวัตถุต่างๆ ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามส่วนประกอบของวัตถุนั้นๆ ดังนั้นส่วนประกอบของวัตถุต่างๆ จึงสามารถถูกตรวจสอบได้ ถ้าพฤติกรรมการสะท้อนรังสีอินฟราเรดถูกตรวจวัด โดยรูปที่ 1 แสดงตัวอย่างรูปถ่ายของยาเม็ดที่ได้จากเทคนิค NIR รูปซ้ายแสดงภาพถ่ายจากกล้องธรรมดา ส่วนภาพขวาแสดงภาพถ่ายจาก NIR ที่ระดับอัตราส่วนการขยายต่างๆ

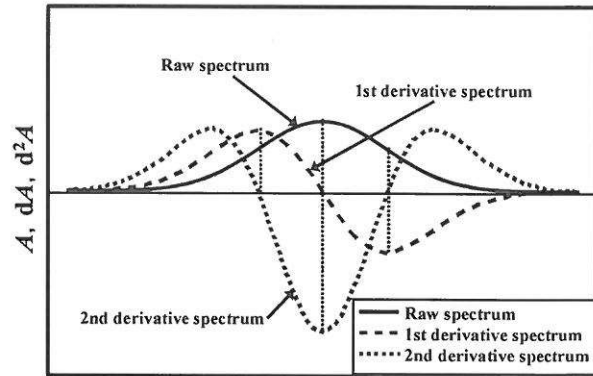


รูปที่ 1 ภาพถ่ายของยาเม็ดที่ได้จากเทคนิค NIR [1]

การกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ สามารถถูกตรวจสอบได้ เพราะว่องค์ประกอบแต่ละชนิดนั้นมีคุณสมบัติสะท้อนแสงได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ ความเข้มข้นขององค์ประกอบแต่ละชนิดที่จุดต่างๆ ก็สามารถถูกคำนวณได้จากขนาดของคลื่นที่ความยาวเฉพาะขององค์ประกอบแต่ละชนิดซึ่งจะเป็นความยาวคลื่นที่ทำให้ความเข้มข้นของรังสีสะท้อนมีค่ามากที่สุด (Local Peak)



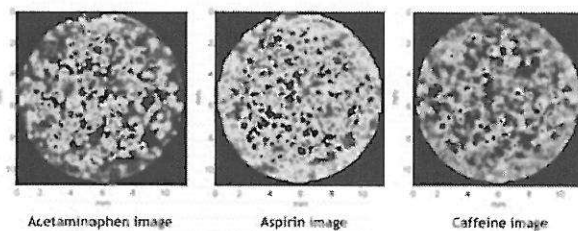
รูปที่ 2 พฤติกรรมการสะท้อนรังสีอินฟราเรดขององค์ประกอบต่างๆ ในยาเม็ด [2]



รูปที่ 3 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของรังสีสะท้อนและอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง

ในภาพที่ 2 แกนนอนแสดงความยาวคลื่นต่างๆ ในขณะที่แกนตั้งแสดงค่าอนุพันธ์อันดับที่สองของสเปกตรัม (2^{nd} Derivative Spectrum) โดยจุดที่อนุพันธ์อันดับที่สองมีค่าน้อยที่สุดจะเป็นจุดที่ความเข้มข้นของรังสีสะท้อน (Raw Spectrum) มีค่ามากที่สุด (ดูรูปที่ 3 ประกอบ) ดังนั้นเมื่อพิจารณารูปที่ 2 จะพบว่า ค่าความยาวคลื่นเฉพาะของแอสไพริน, อะเซตามิโนเฟน, และคาเฟอีน มีค่าเท่ากับ 1637 nm, 2042 nm, และ 2420 nm ตามลำดับ

ความเข้มข้นและอัตราส่วนผสมขององค์ประกอบต่างๆ จะถูกคำนวณจากการวิเคราะห์รูปถ่ายที่ได้จากเทคนิค NIR ซึ่งเป็นเทคนิคถูกใช้ตรวจสอบคุณภาพในขั้นตอนการผลิตยาในปัจจุบัน การกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ ในยาเม็ดถูกแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ ในยาเม็ด [2]

3. การใช้เทคนิค NIR เพื่อตรวจสอบสารที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพในคอนกรีต

สาเหตุและระดับของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตนั้นสามารถถูกประเมินได้จาก ปริมาณคลอไรด์, แคลเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมซัลเฟต, เจลอัลคาไลน์ซิลิกา, หรือคราบสนิม บนผิวคอนกรีต โดยงานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งประเด็นไปที่ การตรวจสอบปริมาณคลอไรด์, การเกิดคาร์บอนชั่น, และการกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟูริก ด้วยเทคนิค NIR

3.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

หากพิจารณาการเสื่อมสภาพที่เกี่ยวกับความคงทนของคอนกรีตแล้วส่วนใหญ่จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการทดสอบนี้จึงใช้ตัวอย่างการทดสอบที่เป็นซีเมนต์เพสต์ โดยตัวอย่างการทดสอบมีขนาด 40 มม. × 40 มม. × 160 มม. โดยตารางที่ 1 แสดงรายการตัวอย่างการทดสอบ ซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ชนิดที่ 1 และ อัตราส่วนระหว่างน้ำและวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.5

ตารางที่ 1 รายการตัวอย่างการทดสอบและปริมาณคลอไรด์

Sample No.	Chloride content (kg/m ³)	Sample No.	Chloride content (kg/m ³)
N-50	Not contained	N7-50	9.0
N1-50	1.2	N8-50	11.0
N2-50	1.5	N9-50	16.0
N3-50	2.0	N10-50	20.0
N4-50	3.0	N11-50	25.0
N5-50	4.5	N12-50	30.0
N6-50	6.0		

ตัวอย่างทดสอบ N-50 ถูกใช้เพื่อทดสอบคาร์บอนชั่นและการกัดกร่อนด้วยกรดซัลฟูริก โดยจะถูกนำไปวางในตู้เร่งปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น และแช่ในกรดซัลฟูริก

3.2 การวัดแถบรังสีอินฟราเรดแบบใกล้

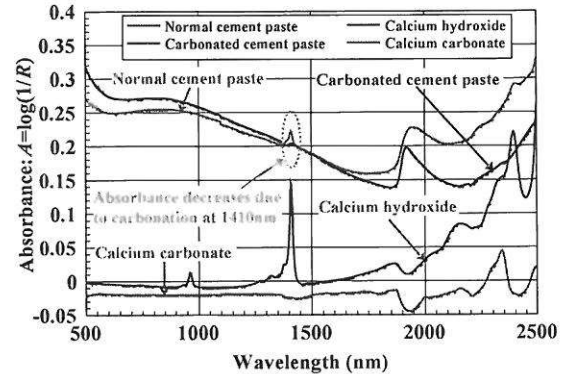
สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่สะท้อนมาจากตัวอย่างทดสอบถูกวัดด้วย เครื่อง Near-Infrared Spectrometer (FOSS NIR System 6500 Series) อัตราการสะท้อนของรังสีอินฟราเรดจากการทดสอบถูกคำนวณโดยเปรียบเทียบกับค่าสะท้อนของรังสีอินฟราเรดของ แบเรียมซัลเฟต (BaSO₄) ซึ่งเป็นแผ่นสีขาว อัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับอัตราการสะท้อนรังสีอินฟราเรด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$A = \log(1/R) \quad (1)$$

โดย A คือ อัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ

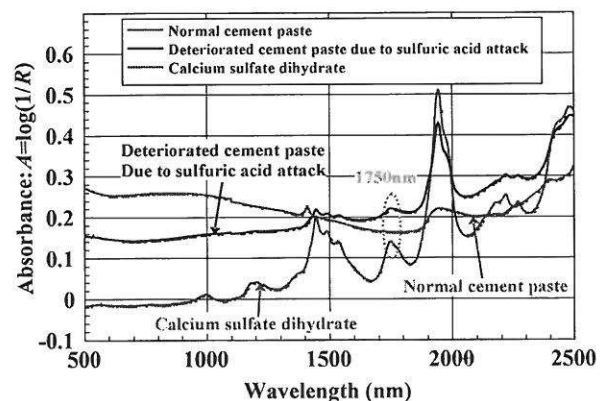
R คือ ค่าการสะท้อนรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นต่างๆ

รูปที่ 5-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรด (Absorbance) และความยาวคลื่น ผลที่แสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ยของผลจากการวัด 50 ครั้งจากตัวอย่างทดสอบชิ้นเดียวกัน ซึ่งการวัดดังกล่าวใช้เวลาไม่เกิน 1 นาที



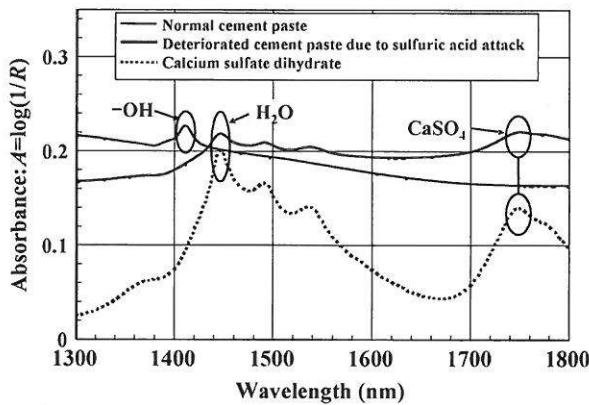
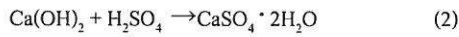
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับและความยาวคลื่นของซีเมนต์เพสต์ธรรมดาและซีเมนต์เพสต์ที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น

รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมเนื่องจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น โดยสเปกตรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ก็ถูกแสดงเพื่อเป็นการอ้างอิง จะเห็นว่าอัตราการดูดซับรังสีที่ความยาวคลื่น 1410 nm นั้นหายไปเมื่อเกิดการคาร์บอนชั่นขึ้นในคอนกรีต นั่นเป็นเพราะว่าเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) กลายเป็น แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จะยังผลให้ความสามารถดูดซับคลื่นของ ไฮดรอกซิล (OH⁻) ที่ความยาวคลื่น 1410 nm หายไป ดังนั้นความยาวคลื่น 1410 nm จึงเป็นความยาวคลื่นเฉพาะสำหรับการตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น และ อัตราความเป็นด่างของคอนกรีตด้วย



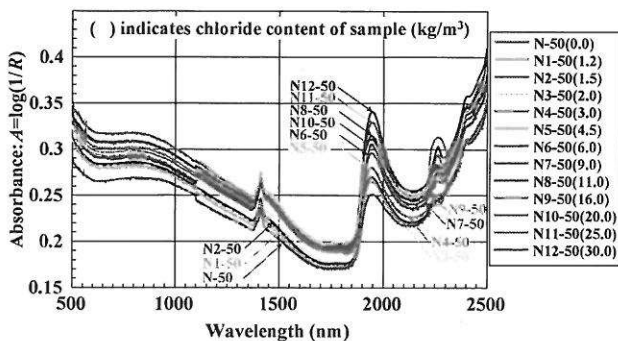
รูปที่ 6 ผลของกรดซัลฟูริกต่ออัตราการดูดซับรังสีของซีเมนต์เพสต์

รูปที่ 6 แสดงผลของการกักกร่อนของกรดซัลฟริกซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในระบบระบายน้ำเสียต่อการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัม ซึ่งสเปกตรัมของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ถูกแสดงในรูปเดียวกันเพื่อการอ้างอิง ซึ่งแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรตเป็นผลจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และ กรดซัลฟริก (H_2SO_4) ดังสมการปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

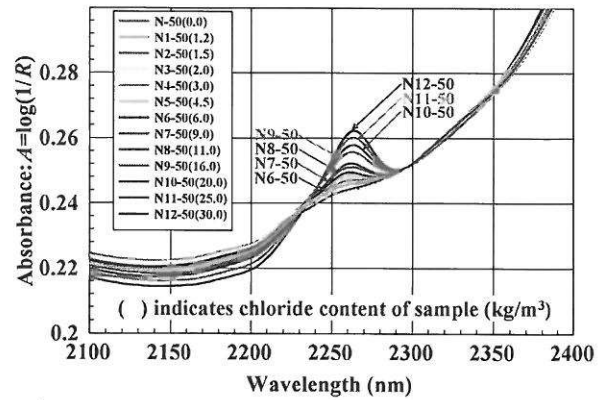


รูปที่ 7 ผลของกรดซัลฟริกต่ออัตราการดูดซับรังสีของซีเมนต์เพสต์

นอกจากนี้ยังมีการเกิดจุดสูงสุดที่เกิดขึ้นใหม่อันเนื่องมาจากปริมาณของน้ำ (H_2O) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ในขณะที่จุดสูงสุดอันเนื่องมาจาก ไฮดรอกซิล (OH^-) นั้นหายไปเนื่องจากกรดทำปฏิกิริยากับด่างในคอนกรีต ตามผลการทดสอบข้างต้น ความยาวคลื่นที่ 1750 nm จึงถูกเลือกเป็นความยาวคลื่นเฉพาะที่สามารถใช้ประเมินความรุนแรงของการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการกักกร่อนของกรดซัลฟริก



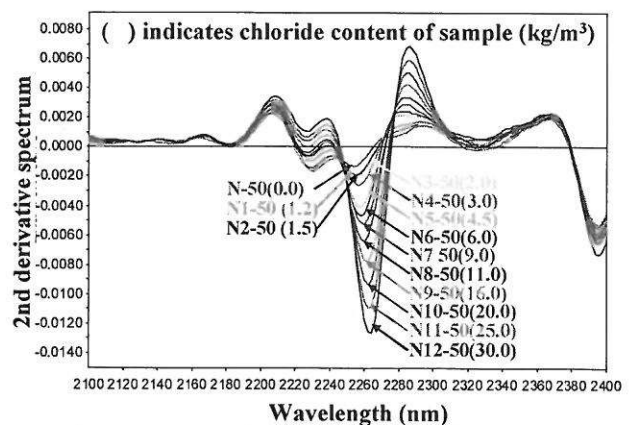
รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมอันเนื่องมาจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมอันเนื่องมาจากปริมาณคลอไรด์ หลังจากการ ที่ความยาวคลื่น 2266 nm

รูปที่ 8 แสดงผลของปริมาณคลอไรด์ต่ออัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดของคอนกรีต โดยอัตราการดูดซับที่ความยาวคลื่น 2266 nm จะมากขึ้นเมื่อปริมาณคลอไรด์ไอออนของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น รูปที่ 9 ทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมของตัวอย่างทดสอบต่างๆ หลังจากทำการปรับแก้ให้ค่าอัตราการซึมซับที่ความยาวคลื่น 2290 nm เท่ากัน (baseline offset at 2290 nm) จะพบได้ว่าความสูงของจุดยอดจะมากขึ้นเมื่อปริมาณของคลอไรด์มีมากขึ้น

อย่างไรก็ตามความสูงของจุดสูงสุดที่เปลี่ยนไปเป็นเปอร์เซ็นต์นั้นมีความน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของอัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดจึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง เพราะความคลาดเคลื่อนในการวัดอัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดเพียงเล็กน้อย จะทำให้การประเมินปริมาณคลอไรด์ผิดพลาดไปเป็นอย่างมากได้



รูปที่ 10 อนุพันธ์อันดับที่สองของสเปกตรัมที่เปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากคลอไรด์ (คำนวณจากรูปที่ 8)

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับที่สองของอัตราการดูดซับรังสีอินฟราเรดกับความยาวคลื่น โดยจะพบได้ว่าค่าอนุพันธ์ของอนุพันธ์อันดับที่สองจะน้อยลงเมื่อปริมาณของคลอไรด์มีค่ามากขึ้น และอัตราส่วนในการเปลี่ยนแปลงก็มีค่าเหมาะสม ในการนำมาใช้เป็นตัวแปรเพื่อประเมินความเข้มข้นของคลอไรด์แทนการใช้ค่าอัตราการดูดซับคลื่นอินฟราเรดเป็นตัวแปร

3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคลอไรด์กับอนุพันธ์อันดับที่ 2 ของสเปกตรัม

วิธีการคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบจากผลการวัดด้วยเทคนิค NIR นั้นเป็นสิ่งจำเป็นต่อการใช้เทคนิคการวัดส่วนประกอบของคอนกรีตด้วยเทคนิค NIR ในสถานที่จริง ซึ่งในหัวข้อนี้จะเสนอข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ไอออนกับอนุพันธ์อันดับที่สองของสเปกตรัมของการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ 2266 nm เป็นตัวอย่าง โดยความสัมพันธ์ดังอยู่บนสมมติฐานว่า ความเข้มข้นขององค์ประกอบใดๆ (ซึ่งในกรณีนี้คือความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน) นั้นมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linear Relationship) กับค่าอนุพันธ์อันดับที่สองของสเปกตรัมของการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นเฉพาะขององค์ประกอบนั้นๆ (ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2266 nm) โดยจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$C = a + b A''_i \quad (3)$$

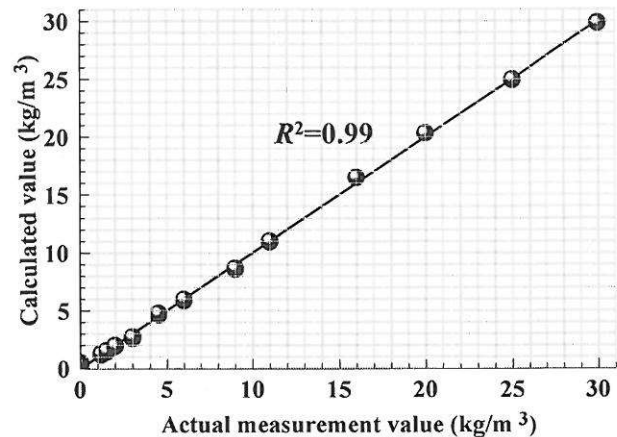
โดยที่ C คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบเป้าหมาย (kg/m^3)
 a, b คือ ค่าคงที่
 A''_i คือ ค่าอนุพันธ์ลำดับที่สองของสเปกตรัมการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นเฉพาะขององค์ประกอบนั้นๆ (i)

โดยค่าของ a, b จะถูกคำนวณด้วยวิธี Linear Regression Analysis จากผลการทดลองที่แสดงในหัวข้อก่อนหน้านี้โดยจะได้สมการสำหรับปริมาณคลอไรด์ไอออน ดังนี้

$$C = 0.79 - 2461 \cdot A''_{2266} \quad (4)$$

โดยที่ C คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (kg/m^3)
 A''_{2266} คือ ค่าอนุพันธ์ลำดับที่สองของสเปกตรัมของการดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 2266 nm

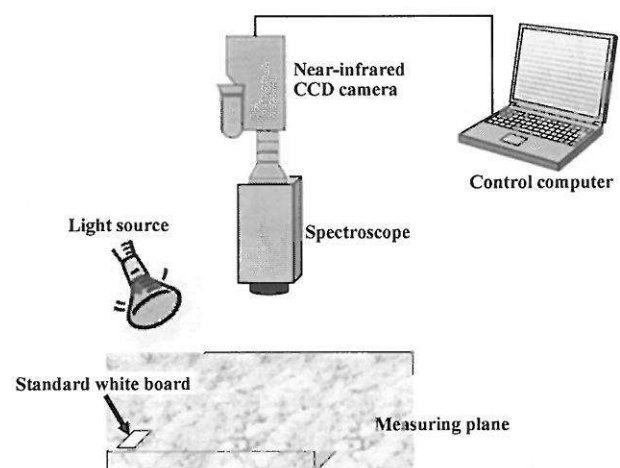
ปริมาณของคลอไรด์ไอออนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 โดยอาศัยค่าอนุพันธ์ลำดับที่ 2 ที่ความยาวคลื่น 2266 nm โดยรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณคลอไรด์ที่ผสมไว้ในตัวอย่างการทดสอบและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการที่ 4 โดยผลที่ได้แสดงถึงระดับความแม่นยำที่ดีมาก ($R^2 = 0.99$)



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดจริงและค่าที่ได้จากสมการ

4. การทดสอบหาสารที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพด้วยระบบประมวลผลจากการฉายรังสีอินฟราเรดแบบใกล้

เครื่อง Near-Infrared Spectrometer นั้นมีข้อจำกัดว่าสามารถวัดสเปกตรัมได้ทีละจุด ดังนั้นระบบ Spectral Imaging System จึงถูกนำมาใช้เพื่อความสามารถในการตรวจสอบพื้นที่ผิวคอนกรีตสองมิติบริเวณกว้างได้ในคราวเดียว โดยรูปที่ 12 แสดงอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบ Near-Infrared Imaging System



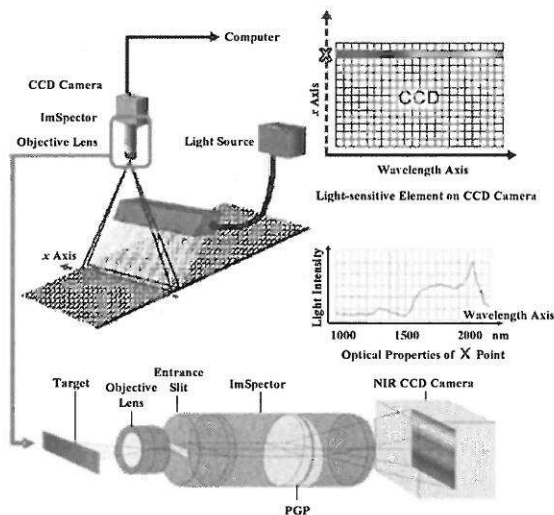
รูปที่ 12 อุปกรณ์ที่จำเป็นของระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System

อุปกรณ์ที่จำเป็นได้แก่ ต้นกำเนิดรังสีอินฟราเรดแบบไกส (หลอดไฟอินฟราเรด), ตัวแวนแยกแสงเป็นสีต่างๆ (Imaging Spectroscopy) และ กล้อง CCD (Charge-Coupled Device) สำหรับรับรังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดที่ถูกแยกเป็นสเปกตรัมจะถูกตรวจจับด้วยหน่วยรับแสงในกล้อง CCD (ดูรูปที่ 13) โดยในการศึกษานี้ได้มีการทดลองระบบดังกล่าวในการตรวจสอบตัวอย่างคอนกรีตที่เสื่อมสภาพจากปฏิกิริยาคาร์บอนชั่นและคลอไรด์ไอออน

4.1 การตรวจสอบพื้นที่ที่เกิดการคาร์บอนชั่นด้วยระบบ

Near-Infrared Spectral Imaging System

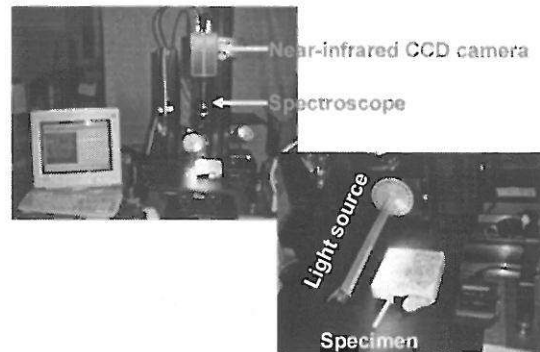
ระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System ได้ถูกทดสอบในการนำไปใช้ประเมินการเสื่อมสภาพของคอนกรีตที่เกิดการคาร์บอนชั่น โดยอ้างอิงจากการทดลองโดยเครื่อง Near-Infrared Spectrometer ที่นำเสนอไปข้างต้น โดย Spectroscopy ตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่สะท้อนออกมาจากผิวตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 14 แสดงการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบจริง



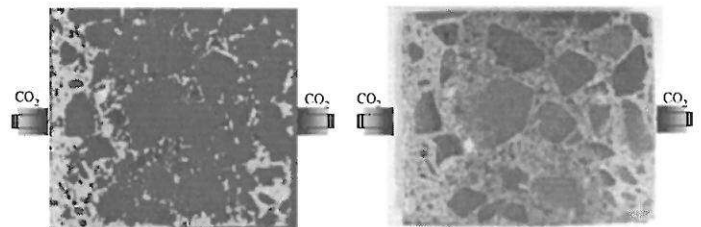
รูปที่ 13 ขั้นตอนการทำงานของระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System

รูปที่ 15 แสดงรูปถ่ายสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1410 nm เทียบกับรูปถ่ายของตัวอย่างทดสอบที่ถูกทดสอบความเป็นด่างด้วย phenolphthalein โดยรูปทางซ้ายมือแสดงรูปถ่ายจาก Near-Infrared Spectral Imaging System โดยจุดที่มีสีเข้มหมายถึงจุดที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น เพราะว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) นั้นดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 1410 nm ได้ดี ดังนั้นรูปถ่ายสเปกตรัมจึงแสดงผลที่เข้มกว่า ส่วนรูปทางขวาเป็นรูปถ่ายธรรมดา

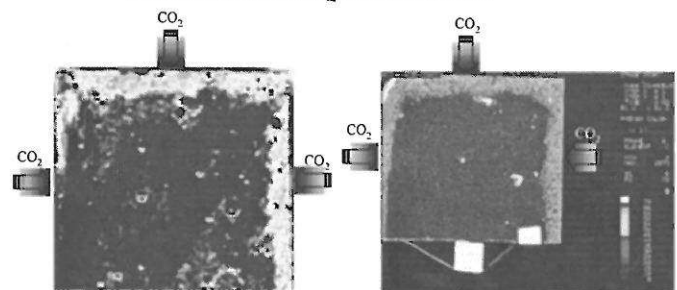
ของตัวอย่างทดสอบเดียวกันหลังทดสอบความเป็นกรดด้วย ด้วย phenolphthalein แล้ว



รูปที่ 14 ภาพถ่ายของเครื่องมือระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System



รูปที่ 15 รูปถ่ายสเปกตรัมเทียบกับรูปถ่ายธรรมดาของตัวอย่างทดสอบ หลังการวัดพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั่น



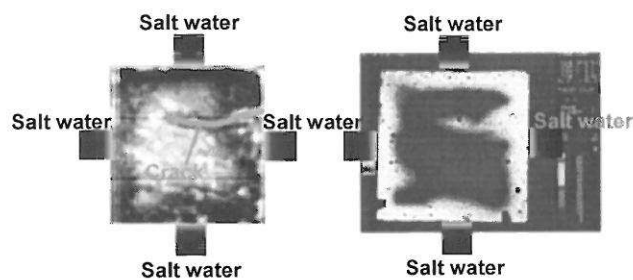
รูปที่ 16 รูปถ่ายสเปกตรัมเทียบกับการทดสอบด้วยวิธี EPMA Analysis (คาร์บอนชั่น)

รูปที่ 16 แสดงรูปถ่ายสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 1410 nm เทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธี EPMA Analysis ของตัวอย่างการทดสอบเดียวกัน โดยจะเห็นได้ว่าการทดสอบทั้งสองวิธีให้ผลการทดสอบที่คล้ายคลึงกันมาก

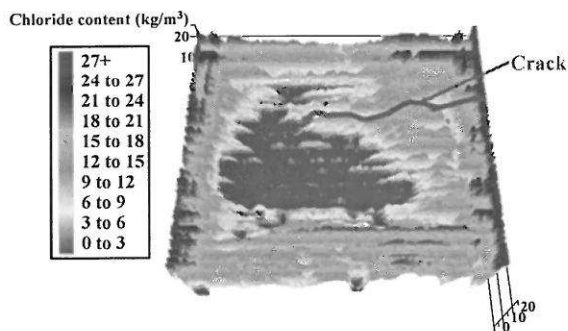
4.3 การตรวจหาการซึมผ่านของคลอไรด์ด้วยระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System

นอกจากนี้ ระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System ยังถูกทดสอบให้ตรวจหาปริมาณคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างทดสอบ

โดยรูปที่ 17 เปรียบเทียบผลการทดสอบด้วย Near-Infrared Spectral Imaging System ที่ความยาวคลื่น 2266 nm และ ผลการทดสอบด้วย EPMA Analysis โดยตัวอย่างการทดสอบถูกแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เพื่อให้คลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปในผิวคอนกรีต ดังจะเห็นได้จากรูปทางซ้ายมือของรูปที่ 17 ว่าพื้นที่ที่มีคลอไรด์ไอออนจะมีสีเข้ม เพราะว่าคลอไรด์ไอออนจะดูดซับรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 2266 nm ได้ดี นอกจากนี้ระดับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนที่จุดต่างๆ ยังสามารถคำนวณได้จากรูปถ่ายสเปกตรัม และ สมการที่ 4 โดยผลการตรวจสอบถูกแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 ภาพถ่ายสเปกตรัมเทียบกับผลการทดสอบด้วยวิธี EPMA Analysis (ปริมาณคลอไรด์ไอออน)



รูปที่ 18 การกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างไม่ทดสอบ จาก ระบบ Near-Infrared Spectral Imaging System

ผลการทดสอบที่นำเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตด้วยเทคนิค NIR สามารถช่วยลดความยุ่งยากและเวลาในการเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบ โดยเทคนิคดังกล่าวนี้สามารถวัดปริมาณของคลอไรด์ไอออน, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และซัลเฟตได้โดยการวัดอัตราการดูดซับคลื่นอินฟราเรดที่ความยาวคลื่นเฉพาะสำหรับสารแต่ละชนิด โดยความเข้มข้นของสารแต่ละตัวสามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์ลำดับที่สองของสเปกตรัมของการดูดซับรังสีอินฟราเรด

นอกจากนี้เทคนิคดังกล่าวยังสามารถใช้ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผิวคอนกรีตสองมิติได้ด้วย ระบบ Near-

Infrared Spectral Imaging System ซึ่งผลการวัดที่ได้จากวิธีการดังกล่าวนี้ใกล้เคียงกับผลการวัดด้วยวิธี EPMA

ผลการทดสอบในงานวิจัย ชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าเทคนิคใหม่นี้มีความสามารถที่จะตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตได้ โดยที่ไม่ต้องทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อไปทดสอบในห้องทดลองเหมือนในวิธีเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ยังมีความจำเป็นต้องพัฒนาให้วิธีการใหม่นี้สามารถนำไปใช้งานได้กับโครงสร้างจริงซึ่งอาจจะมีความสกรปรบนพื้นผิว หรือมีความขรุขระมากซึ่งอาจจะกระทบต่อทิศทางการสะท้อนของรังสีอินฟราเรด และ ผลจากแสงอาทิตย์ซึ่งอาจจะรบกวนการวัดความเข้มข้นของรังสีอินฟราเรด

5. สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่า เทคนิค NIR นั้นสามารถวัดองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตได้ค่อนข้างแม่นยำ และมีความเร็วค่อนข้างสูง ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและงบประมาณได้เมื่อเทียบกับวิธีการเจาะเก็บตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีในห้องทดลองและพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบมีความกว้างมาก อย่างไรก็ตามควรจะมีการทดสอบคอนกรีตหลายๆชนิดด้วยวิธีการนี้เพื่อยืนยันความถูกต้องของวิธีการ ก่อนนำไปใช้ตรวจสอบโครงสร้างจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. T. Japan Inc., "Product catalogue of near-infrared spectral imaging system" (In Japanese)
- [2] Spectral Dimensions Inc., "Product catalogue of MatrixNIR"
- [3] Japan society of civil engineers, "Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structure", 2002. (In Japanese)
- [4] F. M. Howari, P. C. Goodell, S. Miyamoto, " Spectral Properties of Salt Crusts Formed on Saline Soils", Journal of Environmental Quality, 31:1453-1461, 2002