การสำรวจและประเมินการเสื่อมสภาพของพื้นชั้นดาดฟ้าอาคาร เพื่อการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง[1] อภัย เบ็ญจพงศ์[1]
ธรรมมา เจียรธราวานิช[1,*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพฯ
[*]Corresponding author e-mail: thamma.j@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายทั้งในอาคารและบ้านเรือน ทั้งนี้หากมีการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในอาคารที่เริ่มมีการชำรุดทรุดโทรมจะต้องคำนึงถึงกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างก่อนการติดตั้ง เนื่องจากในอดีตวิศวกรไม่ได้คำนึงถึงการรับน้ำหนักของชั้นดาดฟ้าจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ และอีกหนึ่งปัญหาบริเวณชั้นดาดฟ้าเป็นส่วนที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อม เช่น แดด ฝน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะมีผลทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพส่งผลให้เกิดร้อยร้าวและนำไปสู่การเกิดสนิมภายในเหล็กเสริมทำให้กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยรวมลดลง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการประเมินความเสียหายของโครงสร้างและการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคาร ประสิทธิภาพพื้นดาดฟ้าอาคารจำนวน 7 หลัง ประกอบไปด้วยอาคาร 2/2 19 35 36 48 50 และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา ในพื้นที่เทคนิคกรุงเทพ งานวิจัยนี้เริ่มจากการสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น หลังจากนั้นจะกำหนดกลุ่มเป้าหมายและทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การทดสอบกำลังอัดประลัย ความสมบูรณ์ของคอนกรีตและกำลังการผลิตที่ได้จากการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์

จากผลการศึกษาพบว่า รอยร้าวของอาคารทุกอาคารมีรอยร้าวเกินมาตรฐาน ACI 224R-01 ทั้งนี้ในงานวิจัยได้เลือกอาคาร 19 และอาคารคณะศิลปศาสตร์ มาประเมินกำลังรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้าเพื่อรองรับแผงพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากทั้งสองอาคารมีอายุมากและมีรอยร้าวเฉลี่ยมากที่สุดในขณะเดียวกันยังมีคุณภาพและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำที่สุด โดยมีค่ากำลังอัดของคอนกรีต 225.19 และ 355.79 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เมื่อคำนวณกำลังรับน้ำหนักพบว่าพื้นดาดฟ้าอาคาร 19 และอาคารศิลปศาสตร์สามารถรับน้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างปลอดภัย ซึ่งหากมีการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ชั้น

ดาดฟ้าที่ทำการศึกษาพบว่าเครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 BTU ทั้งหมดในอาคารทั้ง 7 อาคารจะใช้เครื่องปรับอากาศทั้งหมด 55 เครื่อง ซึ่งสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้ทั้งหมด 292,215 บาท โดยประมาณต่อเดือน

คำสำคัญ : การเสื่อมสภาพ/ คอนกรีตเสริมเหล็ก/ แผงพลังงานแสงอาทิตย์

The Survey and Evaluation the Deterioration of Rooftop Floor for Installation of Solar Cell

Rattanasak Hongthong[1] Apai Benjapong[1]
Thamma Jairtalawanich[1,*]

[1]Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok
[*]Corresponding author e-mail: thamma.j@mail.rmutk.ac.th

Abstract

Nowadays, installation of photovoltaics cells is widely used in both buildings and houses. However, carrying capacity of building structure should be considered before installing photovoltaics cells at nearly damaged buildings. In the past, engineers did not consider carrying capacity of rooftop for photovoltaics cells. Another problem is that rooftop produces effect on the environment including sunlight, rain and carbon dioxide, bringing about concrete deterioration, cracks and rust on fabricated steel. As a result, carrying capacity of the total structure decreases.

This research aimed to evaluate damage and deterioration of reinforced concrete structure of 7 buildings consisting of Building No. 2/2, 19, 35, 36, 48, 50 and 52 inside Bangkok Technical College site. The research began with primarily visual survey. Then, the target group was determined and non-destructive testing was performed. The test included ultimate compressive strength, concrete completeness and production capacity of the installed photovoltaics cells.

The study showed that the cracks on all buildings exceeded the standards of ACI 224R-01 standard and Engineering Institute of Thailand. Building No. 19 and Liberal Arts Building were selected to conduct the evaluation of the rooftop carrying capacity supporting the photovoltaics cells. The two buildings were evaluated because they are old with the most cracks and the compressive strength of Building No. 19 was the less or 225.19 kg/cm^2. The results indicated

that if the photovoltaics cells were installed at the rooftops, the rooftops of Building No. 19 and Liberal Arts Building could carry the photovoltaics cells safely. The study also revealed that 55 18,000-BTU air conditioners will be needed to be installed inside the 7 buildings and can reduce electricity costs by approximately 292,215 baht per month.

Keywords: deterioration/ reinforced concrete/ solar cell

บทนำ

พลังงานงานสะอาดเป็นสิ่งที่กำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายพลังงานสะอาดเป็นประเภทหนึ่งที่สามารถหาและนำไปใช้ได้งานง่าย คือ พลังงานแสงอาทิตย์ แต่ก่อนที่นำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้นั้นจำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวรับแสง ที่เรียกว่า แผงพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถติดตั้งได้บนพื้นที่ว่างทั้งบนหลังคาบ้านและหลังคาโรงงาน บนหลังคาโรงจอดรถ บนชั้นดาดฟ้าของอาคารและบนพื้นดิน ซึ่งตำแหน่งที่ดีในการเลือกติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต้องเป็นตำแหน่งที่สามารถรับแสงอาทิตย์ได้ดีตลอดทั้งวัน โดยต้องไม่มีสิ่งใดมาบดบังแสงอาทิตย์ และไม่ควรเป็นสถานที่ที่มีฝุ่นหรือไอระเหยจากน้ำมันมากเกินไป ดังนั้นในบริเวณพื้นที่เหมาะสมที่สุดคือบริเวณดาดฟ้าอาคาร นอกจากนี้ความกว้างของแผงขึ้นอยู่กับจำนวนไฟฟ้าที่ต้องการ ยิ่งต้องการไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์มากแผงพลังงานก็จะมีความกว้างมากด้วยเช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลโดยตรงต่อกำลังการรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้าของอาคารหากพื้นดาดฟ้าอาคารไม่ได้ออกแบบให้รับน้ำหนักเพิ่มเติมจากแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งโดยทั่วไปพื้นที่ชั้นดาดฟ้าของอาคารจะมีการเสื่อมสภาพรวดเร็วกว่าส่วนโครงสร้างของอาคารอื่น ๆ

ปกติในการออกแบบอาคารวิศวกรจะคำนวณน้ำหนักบรรทุกคงที่ในการออกแบบโครงสร้างจากแบบสถาปัตยกรรมและใช้น้ำหนักบรรทุกใช้งานตามที่กฎหมายกำหนด ดังนั้นหากในแบบสถาปัตยกรรมไม่ได้ระบุว่าจะมีการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์วิศวกรผู้ออกแบบมักจะไม่ได้คำนวณน้ำหนักดังกล่าวไว้ อีกทั้งสำหรับดาดฟ้าอาคารที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กกฎหมายกำหนดให้ใช้น้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำ 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตร (Peter, 2008) หากต้องการพลังงานที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ในปริมาณสูงจำเป็นต้องมีแผงรับพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อาจส่งผลโดยตรงต่อการรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้าอาคาร

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยหนึ่งที่น่ากังวลเกี่ยวกับพื้นดาดฟ้าอาคารที่สร้างมาเป็นเวลานาน มักประสบกับปัญหาการเสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่น (ธัชวีร์ และประวีณ, 2553) เนื่องจากต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ต้องสัมผัสความชื้นจากฝนตามฤดูกาลและความร้อนจากแสงอาทิตย์อยู่ตลอดเวลา ไม่เพียงเท่านั้นอาคารที่อยู่ในเมืองใหญ่มักประสบกับปัญหาการเสื่อมสภาพโดย คาร์บอเนชั่น (Carbonation) (Lawanisut, *et al.*, 2000) ซึ่งเป็นผลมาจากก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ที่อยู่ภายในอากาศที่มีปริมาณสูงเกินไป สภาวะแวดล้อมดังกล่าวอาจส่งผลให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพและเหล็กเสริมที่อยู่ภายในคอนกรีตเป็นสนิม ส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้าน้อยลง และหากต้องเพิ่มน้ำหนักให้โครงสร้างอาจทำให้

โครงสร้างเกิดการแตกร้าว และวิบัติตามมาได้

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการสำรวจและประเมินการเสื่อมสภาพของพื้นชั้นดาดฟ้าอาคารภายในพื้นที่เทคนิคกรุงเทพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้นชั้นดาดฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

วิธีการทดลอง

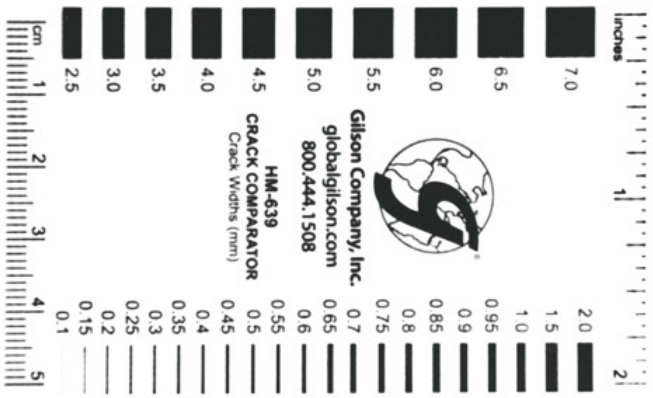
ในการดำเนินงานเพื่อศึกษาหาความเหมาะสมในการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจและประเมินประสิทธิภาพพื้นดาดฟ้าอาคารจำนวน 7 หลัง ประกอบไปด้วยอาคาร 2/2 19 35 36 48 50 และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา งานวิจัยนี้เริ่มจากเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการก่อสร้างอาคาร จากนั้นทำการสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น และทำการทดสอบแบบไม่ทำลาย การทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้คือ การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Smith hammer) การตรวจสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีตด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค การหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและระยะหุ้มของคอนกรีต เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้น และตรวจสอบว่าสามารถรองรับการติดตั้งแผงพลังแสงอาทิตย์ได้อย่างปลอดภัย

รวบรวมข้อมูลเบื้องต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ พื้นที่วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ เดิมชื่อสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ เริ่มก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2495 ซึ่งมีอาคารบางส่วนที่เริ่มก่อสร้างพร้อมกับก่อตั้งมหาวิทยาลัยและอีกหลายอาคารก่อสร้างในเวลาถัดมา ดังนั้นเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับประวัติการก่อสร้างอาคารที่ทำการสำรวจพร้อมทั้งพยายามค้นหาแบบก่อสร้างที่มี เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการทำวิจัยต่อไป

การสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น

การสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้นเป็นการตรวจสอบการเสื่อมสภาพเบื้องต้น โดยทำการจดบันทึกลักษณะความเสียหาย เช่น การหลุดล่อนของคอนกรีต การแตกร้าว พร้อมทั้งบันทึกตำแหน่งที่เกิดและวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นด้วยแผ่น Comparator card ดังแสดงภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผ่น Comparator card ที่ใช้ในการวัดความกว้างของรอยแตกร้าว

การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ตั้งอยู่ในใจการเมืองและมีการจราจรที่หนาแน่น ซึ่งอาคารที่ตั้งอยู่ในเมืองใหญ่และมีการจราจรที่หนาแน่นย่อมมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงตามมา ก๊าซดังกล่าวเมื่อรวมตัวกับความชื้นส่งผลให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ งานวิจัยได้นี้วัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพันธ์ยี่ห้อ Extech Instruments รุ่น Co250 โดยทำการเก็บข้อมูลเป็น 2 ช่วงเวลา 8.00-9.30 น.และ 17.00-18.30 น. ของทุกวันทั้ง 7 อาคาร เป็นเวลา 1 เดือนดังแสดงในภาพที่ 2

ภาพที่ 2 การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์บนดาดฟ้าอาคาร

ทดสอบกำลังอัดด้วยค้อนกระแทก (Schmidt hammer) (กฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6, 2527)

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตในสนามสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและส่งผลกระทบกับโครงสร้างเดิมน้อยสุดคือ การทดสอบด้วยค้อนกระแทก เครื่องมือชนิดนี้เป็นการวัดแรงสะท้อนกลับคอนกรีตว่ามีค่าเท่าไร จากนั้นจึงทำการแปลผลค่าที่ได้เป็นกำลังอัดของคอนกรีต งานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลด้วยค้อนกระแทกจำนวน 4-6 จุด ในแต่ละพื้นดาดฟ้าของแต่ละอาคาร แต่ละจุดจะประกอบไปด้วย 16 จุดย่อยในลักษณะตารางกริด โดยแต่ละจุดจะห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3

ภาพที่ 3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Schmidt hammer)

ก่อนทำการทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตในสนามด้วยค้อนกระแทก จำเป็นต้องตรวจสอบสภาพผิวของพื้นคอนกรีตที่ทำจะการทดสอบให้เรียบด้วยหินเจียเสียก่อน เพราะถ้าผิวโค้งนูนหรือผิวเว้าจะมีผลต่อการสะท้อนกลับของ Rebound hammer (RN) เนื่องจากผิวที่โค้งนูนจะทำให้ค่าที่อ่านได้ต่ำกว่าค่าความเป็นจริง ส่วนผิวที่เว้าจะทำให้ค่าที่อ่านได้สูงกว่าค่าความเป็นจริง เมื่อทำการทดสอบแล้วเสร็จนำค่าการสะท้อนกลับทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย แล้วตรวจสอบว่าค่าสะท้อนกลับที่ตำแหน่งใดมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกิน 6 หน่วย ถ้ามีให้ทำการทดสอบตำแหน่งนั้นใหม่ ถ้าทดสอบแล้วยังไม่ได้ให้ตัดค่าที่ตำแหน่งนั้นทิ้งแล้วหาค่าเฉลี่ยใหม่ นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามสมการที่ (1)

ข้อมูลที่ได้จากทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตจะเป็นข้อมูลสะท้อนกลับ (RN) ซึ่งต้องนำข้อมูลสะท้อนกลับที่ได้ไปคำนวณหากำลังอัดของคอนกรีตโดยใช้สมการของ JSCE G504 2007 (Khedari *et al*., 2001) หลังจากนั้นนำข้อมูลกำลังอัดที่ได้แต่ละจุดที่ทำการทดสอบมาทำการหาค่าเฉลี่ยเป็นกำลังอัดของพื้นดาดฟ้าอาคาร

$$fc' = 176.4 + (12.466 \times RN) \quad \ldots(1)$$

โดยที่

fc' = กำลังอัดคอนกรีต (ksc)

RN = ค่าการสะท้อนกลับ

การทดสอบคุณภาพคอนกรีตด้วยคลื่น (Ultrasonic test) (กฎกระทรวง มหาดไทย ฉบับที่ 6, 2527)

การทดสอบด้วยวิธีนี้เป็นการใช้หัวส่งสัญญาณ (Transmitter) ส่งคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic pulse) ผ่านเข้าภายในเนื้อคอนกรีตและรับสัญญาณด้วยหัวรับสัญญาณ (Receiver) หากคอนกรีตมีคุณภาพดีคลื่นจะเดินทางผ่านได้เร็ว

เพื่อตรวจสอบว่าคุณภาพของคอนกรีตอยู่ในระดับใด งานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลด้วยคลื่น จำนวน 4 - 6 จุด ในแต่ละพื้นดาดฟ้าของแต่ละอาคาร แต่ละจุดจะประกอบไปด้วย 16 จุดย่อย ในลักษณะตารางกริด โดยแต่ละจุดจะห่างกันประมาณ 10 เซนติเมตร โดยตำแหน่งที่ทำการทดสอบจะเป็นตำแหน่งเดียวกับการทดสอบโดยใช้ค้อนกระแทก ดังแสดงในภาพที่ 4

ภาพที่ 4 การตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีต

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและวัดระยะหุ้มของคอนกรีต

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและระยะหุ้มของคอนกรีตด้วยเครื่อง Profometer เป็นการตรวจสอบหาขนาดเหล็กเสริมโดยไม่ทำลายพื้นผิวคอนกรีต โดยอาศัยหลักการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเครื่องจะสร้างสนามแม่เหล็กกระแสไฟฟ้ารอบเหล็กเสริมและทำการเหนี่ยวนำเป็นช่วง ๆ ซึ่งจะสามารถบอกตำแหน่งและขนาดของเหล็กเสริมที่อยู่ภายในเนื้อคอนกรีตได้ ดังแสดงในภาพที่ 5 เครื่องวัดระยะหุ้มเหล็ก

ภาพที่ 5 การหาตำแหน่งของเหล็กเสริมและระยะหุ้มคอนกรีต

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้า

เมื่อทำการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายหลังจากนั้นได้นำผลที่ได้มาใช้คำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้นโดยอาศัยการออกแบบวิธีกำลัง และการออกแบบพื้นตามวิธีที่ 2 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยมาใช้ในการตรวจสอบ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2545) โดยมีสมการเบื้องต้นดังต่อไปนี้

การคำนวณกำลังรับโมเมนต์ดัดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\phi M_n \geq M_u \text{ โดยที่ } \phi=0.90 \quad (2)$$

การคำนวณกำลังต้านทานแรงเฉือนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$\phi V_n \geq V_u \text{ โดยที่ } \phi=0.85 \quad (3)$$

ผลการทดลอง

ประวัติอาคารที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเหมาะสมในการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์โดยทำการมุ่งเน้นกลุ่มอาคารที่มีชั้นดาดฟ้าเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ในพื้นที่วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ โดยอาคารที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย อาคาร 2/2 19 35 36 48 50 และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา จากการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นทำให้สามารถทราบอายุอาคารและระบบโครงสร้างของพื้นชั้นดาดฟ้า ซึ่งเกือบทุกอาคารที่ทำการทดสอบให้ระบบพื้นหล่อในที่วางบนคาน มีเพียงอาคารวิศวกรรมสำรวจ (อาคาร 35) ที่ใช้พื้นสำเร็จรูป และอาคารเฉลิมพระเกียติ 80 พรรษาที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงเป็นพื้นชั้นดาดฟ้า

การวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้น

งานวิจัยนี้ทำการเก็บข้อมูลเป็น 2 ช่วงเวลา 08.00 - 09.30 น. และ 17.00 - 18.30 น. ของทุกวันทั้ง 7 อาคาร เป็นเวลา 1 เดือน ดังนั้นผลการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แสดงในตารางที่ 1 จึงเป็นค่าเฉลี่ยทั้ง 30 วัน จากผลการทดสอบพบว่าอาคารคณะบริหารธุรกิจมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด และรองลงมาคืออาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ซึ่งทั้งสองอาคารอยู่ติดถนนนราธิวาสราชนครินทร์ และอาคารที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยที่สุดคือ อาคาร 36 เนื่องจากอยู่ภายในมหาวิทยาลัยและห่างจากถนนโดยรอบ ทั้งนี้หากปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณมากจะส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตในระยะยาวทำให้เกิดความเสียหายที่ผิวคอนกรีตซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายในชั้นของเหล็กเสริมได้ ความชื้นจากคอนกรีตที่ระเหยขึ้นมาจะกลั่นตัวกลายเป็นหยดน้ำบนผิวหน้าของคอนกรีตได้ ทำให้วัสดุปิดผิวบวมหรือถึงกับหลุดร่อนออกมา (Peter, 2008)

การสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น

ในงานวิจัยนี้ทุกอาคารได้ทำการสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น โดยสังเกตลักษณะและมีรูปแบบการแตกร้าว จากนั้นยังได้ทำการวัดความกว้างของรอยร้าวด้วยแผ่น Comparator card ความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบพื้นดาดฟ้าอาคารจากการสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้นพบว่ามีรอยร้าวเกิดขึ้น 2 รูปแบบ คือ การแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีตซึ่งลักษณะของรอยร้าวจะมีลักษณะแบบแตกรายงาและอีกรูปแบบคือ รอยร้าวที่เกิดจากแรงดึงที่บริเวณฐานรองรับ (คานชั้นหลังคา) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวของพื้นส่งผลให้เกิดแรงดึงที่บริเวณฐานรองรับ รอยร้าวลักษณะนี้จะเกิดเป็นแนวยาวต่อเนื่องกันอย่างเห็นได้ชัดเรียกร้อยร้าวลักษณะนี้ว่า รอยร้าวที่เกิดจากแรงดัด ดังแสดงในภาพที่ 6

การวัดความกว้างของรอยร้าวในแต่ละอาคารจะทำการวัดความกว้างทุกรอย แล้วจากนั้นนำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนความกว้างของพื้นดาดฟ้าแต่ละอาคาร ต่อจากนั้นนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานของ ACI 224R-01 (American Concrete Institute, 2001)

มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุมคุณภาพงานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 สำหรับงานวิจัยนี้โครงสร้างที่ทำการศึกษาคือพื้นดาดฟ้าซึ่งต้องเผชิญกับความชื้นจากฝนตามฤดูกาล ดังนั้นความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้คือ 0.3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความชื้นสัมพัทธ์ของอาคาร

อาคาร	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	CO_2 (ppm)
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (อาคาร 19)	59	281
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ (อาคาร 35)	60	286
อาคาร 36	58	277
คณะวิศวกรรมศาสตร์ (อาคาร 48)	62	287
คณะบริหารธุรกิจ (อาคาร 50)	60	290
เฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา	58	281
คณะศิลปศาสตร์ (อาคาร 2/2)	59	282

(ก) (ข)

ภาพที่ 6 การแตกร้าวของพื้นชั้นดาดฟ้า
(ก) เกิดจากการหดตัว (ข) เกิดจากแรงดัด

ผลจากการสำรวจพบว่าวทุกอาคารมีความกว้างของรอยร้าวเฉลี่ยเกินค่าเกินกว่าที่มาตรฐาน ACI 224R-01 กำหนด อาคารที่มีความกว้างรอยร้าวของรอยร้าวเฉลี่ยมากที่สุดคือ อาคารวิศวกรรมโยธาซึ่งเป็นอาคารที่มีอายุการใช้งานมานานถึง 62 ปีมีความกว้างของรอยร้าวเฉลี่ย 0.85 มิลลิเมตรและอาคารคณะศิลปศาสตร์มีความกว้างของรอยร้าว 0.70 มิลลิเมตร สำหรับอาคารวิศวกรรมสำรวจแม้ว่าจะมีรอยร้าวกว้างเฉลี่ย 0.80 มิลลิเมตร ซึ่งรองลงมาจากอาคารวิศวกรรมโยธาแต่รอยร้าวดังกล่าวเป็นเพียงรอยร้าวของคอนกรีตทับหน้าเท่านั้น จึงไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างแต่อาจส่งผลให้เกิดการรั่วซึมเมื่อเกิดฝนหรือมีน้ำขัง และมี 2 อาคารที่ไม่สามารถวัดความกว้างของรอยร้าวได้เนื่องจากมีการใช้น้ำยากันซึมคือ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา และอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์

การทดสอบหากำลังอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก

ผลการคำนวณหากำลังอัดของพื้นดาดฟ้าทุกอาคารแสดงในตารางที่ 2 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าอาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธามีกำลังอัดของคอนกรีตต่ำที่สุดคือมีค่ากำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับ 225.19 ksc และอาคารที่มีกำลังอัดของคอนกรีตมากที่สุดคืออาคารคณะบริหารธุรกิจ (อาคาร 50) 355.79 ksc เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับอายุของอาคารแต่ละหลังพบว่าข้อมูลที่ได้มีความสอดคล้องกับอายุการใช้งานของอาคารอย่างเห็นได้ชัด อาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาเป็นอาคารที่มีอายุการใช้งานมานานมากที่สุดคือ 64 ปี กำลังอัดของคอนกรีตจึงมีค่าต่ำที่สุด ในทางกลับกันอาคารคณะบริหารธุรกิจผ่านการใช้งานมาน้อยกว่าทุกอาคารที่สามารถเก็บข้อมูลได้ผลของกำลังอัดของคอนกรีตก็มีค่ามากที่สุด และมีอาคารที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้คืออาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ (อาคาร 48) และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษาเพราะมีการปูกันซึมไว้ก่อนหน้า เนื่องจากการสำรวจด้วยวิธีการนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือยิงไปที่เนื้อคอนกรีตโดยตรงโดยไม่มีสิ่งใดกั้นขวางระหว่างเครื่องมือกับคอนกรีตที่ต้องการทดสอบ

การทดสอบความสมบูรณ์ของคอนกรีต

คุณภาพของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบด้วยคลื่น Ultrasonic เป็นการนำความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบใช้ในการยืนยันผลของการทดสอบด้วยค้อนกระแทกอีกทางหนึ่ง ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ผลการทดสอบด้วยคลื่น Ultrasonic สอดคล้องกับผลการทดสอบกับการทดสอบด้วยค้อนกระแทก เห็นได้จากอาคารที่มีกำลังอัดของคอนกรีตพื้นชั้นดาดฟ้าต่ำเช่น อาคารวิศวกรรมโยธา ความเร็วคลื่นก็จะมีค่าต่ำด้วยเช่นกัน ในทำกลับกันหากกำลังอัดของพื้นชั้นดาดฟ้าทีได้มีค่าสูง เช่น อาคารคณะบริหารธุรกิจความเร็วคลื่นก็จะมีค่าสูง

ตามไปด้วย สำหรับอาคารที่มีการปูกันซึมเช่น อาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ (อาคาร 48) และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา ผลให้ค่าความเร็วคลื่นไม่น่าเชื่อถือเนื่องจากเป็นอาคารที่พึ่งก่อสร้างมาไม่นาน แต่ความเร็วคลื่นบ่งบอกว่าคอนกรีตมีความพรุนสูง เมื่อนำผลของความเร็วคลื่นมาเปรียบเทียบกับผลของกำลังอัดที่ได้จากค้อนกระแทก แสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ของทั้งสองเครื่องมือมีความสอดคล้องกัน

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบ

ลำดับ	อาคาร	อายุ (ปี)	ระบบโครงสร้างพื้น	ลักษณะการแตกร้าว	รอยร้าวเฉลี่ย (มม.)	ค่าการสะท้อน (RN)	กำลังอัด (ksc)	ความเร็วคลื่น (m/s)	ระยะหุ้มคอนกรีต (cm)
1	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (อาคาร 19)	64	SB	FC	0.85	32.26	225.19	2,759.32	60
2	สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ (อาคาร 35)	60	PS	FC	0.8	39.72	317.98	2,914.69	55
3	อาคาร 36	55	SB	FC	0.6	37.95	295.94	3,045.63	55
4	คณะวิศวกรรมศาสตร์ (อาคาร 48)	55	SB	มีกันซึม				2,953.61 (มีกันซึม)	55
5	คณะบริหารธุรกิจ (อาคาร 50)	55	SB	FC,SC	0.75	42.76	355.79	3,554.86	55
6	อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา	55	PT	มีกันซึม				2,664.97 (มีกันซึม)	55
7	คณะศิลปศาสตร์ (อาคาร 2/2)	55	SB	FC,SC	0.7	35.43	264.58	3,012.68	50

หมายเหตุ : SB-ระบบโครงสร้างพื้นหล่อในที่วางบนคาน PS-ระบบโครงสร้างพื้นหล่อในที่วางบนคาน PT-ระบบโครงสร้างพื้นอัดแรง FC-รอยร้าวเนื่องจากแรงดัด SC-รอยร้าวรายงาเนื่องจากการหดตัว

ตารางที่ 3 ความกว้างของรอยร้าวที่ยอมให้ตามมาตรฐาน ACI 224R-01

ประเภทโครงสร้าง	ความกว้างของรอยร้าว	
	นิ้ว	มิลลิเมตร
โครงสร้างที่สัมผัสอากาศแห้ง	0.016	0.41
โครงสร้างที่สัมผัสอากาศชื้น,ความชื้นและดิน	0.012	0.30
โครงสร้างที่สัมผัสกับสารเคมี	0.007	0.18
โครงสร้างบริเวณชายฝั่ง	0.006	0.15
โครงสร้างเก็บกักน้ำ	0.004	0.10

ระยะหุ้มของคอนกรีต

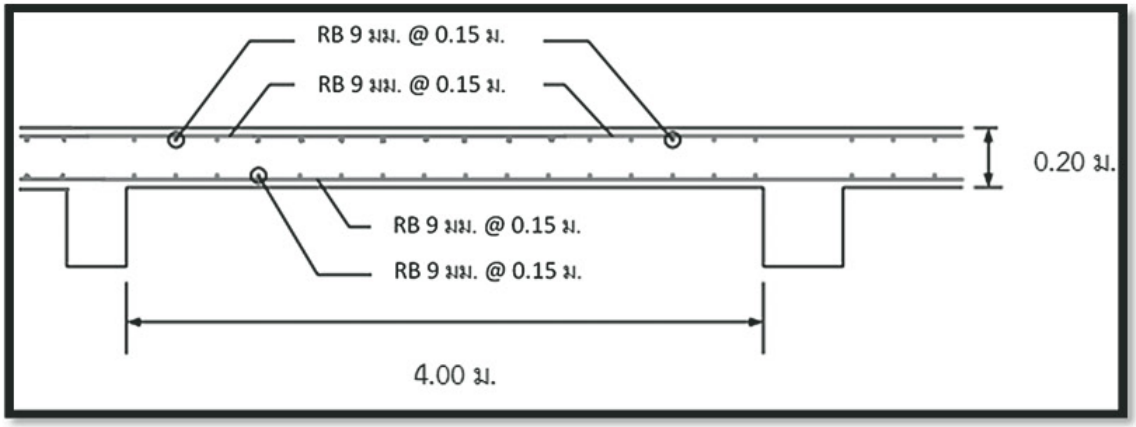
ระยะหุ้มของคอนกรีต คือ ระยะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมไว้ซึ่งระยะหุ้มของคอนกรีตวัดจากผิวของคอนกรีตไปถึงผิวของเหล็กเสริม ระยะหุ้มของคอนกรีตทำหน้าที่ป้องกันเหล็กเสริมเพื่อไม่ให้เกิดสนิมเมื่อต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมต่างๆ มาตรฐาน ACI Code (American Concrete Institute, 2010) ระบุว่าเมื่อผิวคอนกรีตต้องสัมผัสกับความชื้นควรมีระยะหุ้มคอนกรีต 50 มิลลิเมตร ตำแหน่งที่ทำการทดสอบหาระยะหุ้มของคอนกรีตเป็นตำแหน่งเดียวกันกับที่ทำการทดสอบหากำลังอัด ผลการหาระยะหุ้มของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่าระยะเหล็กหุ้มคอนกรีตเฉลี่ยที่ได้มากกว่า 50 มิลลิเมตรทุกอาคาร

จากการรวบรวมข้อมูลของอาคารและจากผลการทดสอบแบบไม่ทำลายซึ่งประกอบไปด้วย การสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้น ความกว้างของรอยร้าว คุณภาพและกำลังอัดของคอนกรีต พบอาคารที่มีการเสื่อมสภาพมากที่สุดคือ อาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (อาคาร 19) รองลงมาคืออาคารคณะศิลปศาสตร์ (อาคาร 2/2) ซึ่งอาคารทั้งสองหลังหากต้องการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักให้พื้นดาดฟ้าจำเป็นต้องมีการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักของพื้น ดังนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลอาคารทั้งสองเพิ่มเติมอีก 2 วิธี คือ การตรวจสอบตำแหน่งและปริมาณของเหล็กเสริมพื้นคอนกรีต และความหาความหนาพื้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการคำนวณหากำลังรับน้ำหนัก เพื่อให้แน่ใจว่าอาคารสามารถรับน้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างปลอดภัย

การตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริม

การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมพื้นดาดฟ้าแต่ละอาคารจะเลือกพื้นที่มีความกว้าง และยาวมากที่สุดเป็นตัวแทนของพื้นชั้นดาดฟ้าทั้งชั้น สำหรับอาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธาพื้นที่เลือกทำการทดสอบมีความขนาด 5x5 เมตร จากการตรวจสอบเหล็กเสริมพบว่าเหล็กเสริมพื้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 มิลลิเมตร

ระยะห่างของเหล็กเท่ากับ 15 เซนติเมตร จัดวางในลักษณะตะแกรง และพื้นมีความหนาเท่ากับ 20 เซนติเมตร อาคารคณะศิลปศาสตร์พื้นที่เลือกทำการทดสอบมีขนาด 4x8 เมตร ใช้เหล็กเสริมขนาด 9 มิลลิเมตร ระยะห่างของเหล็กเท่ากับ 15 เซนติเมตร จัดวางในลักษณะตะแกรง และพื้นมีความหนาเท่ากับ 20 เซนติเมตร ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ผลการสำรวจเหล็กเสริมและความหนาพื้นของคณะศิลปศาสตร์

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้า

การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของพื้นอาศัยการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กตามวิธีที่ 2 ของ วสท. ผลจากการทดสอบแบบไม่ทำลายแสดงให้เห็นว่าอาคารที่มีการเสื่อมสภาพ และหากต้องการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกให้พื้นดาดฟ้าจำเป็นต้องมีการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักที่รับได้ คืออาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และอาคารคณะศิลปศาสตร์ ดังนั้นจึงเลือกประเมินกำลังรับน้ำหนักของอาคารทั้งสองหลังเพื่อให้แน่ใจว่า หากต้องติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์ บนพื้นดาดฟ้าอาคารจะไม่ส่งผลกระทบใด ๆ กับโครงสร้างพื้น

คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายประกอบไปด้วย กำลังอัดของคอนกรีต 225.19 และ 264.58 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับอาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และคณะศิลปศาสตร์ตามลำดับ ทั้งสองอาคารใช้เหล็กเกรด SR24 มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ผลการคำนวณแสดงในตารางที่ 4 ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าอาคารทั้งสองหลังสามารถรับน้ำหนักแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างปลอดภัย

ตารางที่ 4 ผลการคำนวณน้ำหนักบรรทุก

อาคาร	กำลังรับน้ำหนักของพื้น (กก./ม.^{2})	น้ำหนักบรรทุกประลัยของพื้น (กก./ม.^{2})
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา	1,033.56	912
คณะศิลปศาตร์	1,122.44	912

หมายเหตุ : น้ำหนักบรรทุกประลัยประกอบด้วย
1) น้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ รวมกับน้ำหนักโครงติดตั้งเท่ากับ 50 กก./ม.^{2} (น้ำหนักของแผงอย่างเดียว 14.10 กก./ม.^{2})
2) น้ำหนักบรรทุกคงที่ (480 กก./ม.^{2})
3) น้ำหนักบรรทุกจร (100 กก./ม.^{2})

กำลังไฟฟ้าได้จากแผงพลังงานแสงอาทิตย์จากการติดตั้งบนพื้นที่ดาดฟ้า

เมื่อทำการติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์รุ่น Single crystalline silicon solar cell หรือ Mono crystalline silicon solar cell โดยการเลือกใช้แผงขนาด 300 วัตต์ (ขนาด 2.00 x 1.00 เมตร) และใช้อินเวอร์เตอร์ 1 ตัว โดยที่แผงพลังงานแสงอาทิตย์ไปรับแสงแดดปกติ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ไฟฟ้า 300 วัตต์ ใน 1 วัน หากได้รับแสงแดดเต็มที่ (เฉลี่ยประมาณ 5 ชั่วโมง) ก็จะได้พลังงานไฟฟ้ารวม 1,500 วัตต์ หากนำไปเปรียบเทียบกับการเปิดเครื่องปรับอากาศขนาด 18,000 BTU โดยคิดการใช้งานเป็นเวลา 8 ชั่วโมง จะได้พลังงานไฟฟ้าทดแทนดัง ซึ่งจะใช้ไฟฟ้า 42,184 วัตต์ หรือเดือนละ 1,265,520 วัตต์ ซึ่งจะคิดเป็น 1,266 หน่วยการไฟฟ้า โดยคิด 1,000 วัตต์เท่ากับ 1 หน่วย ถ้าคิดค่าการใช้ไฟฟ้าที่หน่วยละ 4.20 บาท จะสามารถคิดเป็นราคาค่าไฟฟ้าในการใช้เครื่องปรับอากาศ 1 ตัวเท่ากับ 5,313 บาท/เดือน โดยที่ผลจากการวิจัยหากเราใช้เครื่องปรับอากาศทั้งหมดในอาคารทั้ง 7 อาคารจะใช้เครื่องปรับอากาศทั้งหมด 55 เครื่อง ซึ่งสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าได้ทั้งหมด 292,215 บาท โดยประมาณต่อเดือน

สรุป

ผลจากการการสำรวจสภาพแวดล้อมเบื้องต้นพบรอยร้าวที่เกิดขึ้น 2 รูปแบบ คือรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว และรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัดมักบริเวณตามแนวคาน และทุกอาคารที่ทำการสำรวจมีความกว้างของรอยร้าวเกินกว่าที่มาตรฐาน ACI 224R-01 กำหนด และมีสองอาคารไม่สามารถมองเห็นรอยร้าวได้เนื่องจากมีชั้นวัสดุกันซึมห่อหุ้มผิวหน้าของพื้นคอนกรีต ได้แก่ อาคารคณะ

วิศวกรรมศาสตร์ (อาคาร 48) และอาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา (อาคาร 52)

จากการทดสอบกำลังอัดของโครงสร้างพื้นชั้นดาดฟ้าของอาคารโดยใช้เครื่องมือ Schmidt hammer มีความสอดคล้องกับการทดสอบความสมบรูณ์ของคอนกรีต อาคารที่มีกำลังของคอนกรีตต่ำก็จะได้ความเร็วคลื่นซึ่งเป็นตัวบอกคุณภาพของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่ที่ต่ำด้วย

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จะขึ้นกับสภาพแวดล้อมของอาคารเป็นสำคัญเช่นอาคารอาคารคณะบริหารธุรกิจมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากทั้งสองอาคารมีสภาพแวดล้อมที่เหมือนกันคืออยู่ติดกับถนนนราธิวาสฯ ซึ่งมีการจราจรที่หนาแน่น ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีที่มากจะส่งผลให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชั่นตามมาได้

อภิปรายผล

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจมาคำนวณกำลังรับน้ำหนักของพื้นดาดฟ้า โดยเลือกอาคารสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (อาคาร 19) และอาคารคณะศิลปศาสตร์ เนื่องจากเป็นอาคารที่มีความกว้างของรอยร้าวมาก และคุณสมบัติของคอนกรีตอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ พบว่าทั้งสองอาคารสามารถรองรับน้ำหนักของแผงพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างปลอดภัย และเมื่อติดตั้งแผงพลังงานแสงอาทิตย์เต็มพื้นที่ดาดฟ้าทั้ง 7 อาคารสามารถประหยัดค่าไฟฟ้าไปได้ 292,215 ต่อเดือน เมื่อใช้เครื่องปรับอากาศ 18,000 BTU 8 ชั่วโมงต่อวัน และควรมีการทดสอบการเสื่อมสภาพเนื่องจากคาร์บอเนชั่น และการทดสอบโอกาสที่จะเกิดสนิม เพื่อให้ทราบถึงระดับความลึกที่เกิดการเสื่อมสภาพและวัดโอกาสที่เกิดสนิมของของเหล็กเสริมที่อยู่ภายใน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ หน่วยงานที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ปี พ.ศ. 2559 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สำหรับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527). กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.

กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2551). **มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กรมโยธาธิการและผังเมือง.

ธัชวีร์ ลีละวัฒน์ และประวีณ ชมปรีดา. (2553). กรณีศึกษาการตรวจสอบอาคารคอนกรีตที่เกิดสนิมเนื่องจากคาร์บอเนชั่นในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล. **วารสารคอนกรีต สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย**, 9(1), 1-10.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. (2545). **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง.** พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

American Concrete Institute. (2001). **Control of cracking in concrete structures**. (ACI 224R-0 1). U.S.A./Farmington Hills: Country Club Drive.

American Concrete Institute. (2010). **Building code requirements for reinforce concrete**. (ACI 318M-08). U.S.A./Farmington Hills: Country Club Drive.

Japan society of civil engineers. (2007). **Standard specifications for concrete structure-2007**. Japan: JSCE.

Khedari, J., *et al*. (2001). Thailand climatic zones. **Journal of Renewable Energy**, 25(2), 267-280.

Lawanisut, W., *et al*. (2000). Reliability and sensitivity analysis of deteriorating reinforced concrete beams. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6**, 115-120.

Michels, C., *et al*. (2008). Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. **Journal of Energy and Buildings**, 40 (4), 445-451.

Peter, H. (2008). **Concrete Repair and Maintenance Illustrated ฉบับภาษาไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: หจก.อินเตอร์-พับลิชชิ่ง.