บทความวิจัย

การศึกษาแนวทางการป้องกันผลกระทบของสารละลายซัลเฟตและคลอไรด์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใต้ดินบริเวณชายฝั่งทะเล โดยใช้กระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น และการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย

สุรางคนา ตรังคานนท์* ภราดร ขนงสุวรรณ และ สิรวิชญ์ ฤทธาภัย
สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7428 7015 อีเมล: surangkana.t@psu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.004
รับเมื่อ 17 พฤษภาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 2 สิงหาคม 2564 ตอบรับเมื่อ 26 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 6 กรกฎาคม 2566
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

อิทธิพลของสารละลายซัลเฟตและคลอไรด์ในน้ำทะเลส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ใต้ดินชายฝั่งทะเลเป็นอย่างมาก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกวัสดุก่อสร้างด้วยกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น และวัสดุก่อสร้างที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานภายใต้เกณฑ์ดังกล่าวด้วยวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย เพื่อหาแนวทางการป้องกันความเสียหาย โดยการทบทวนวรรณกรรม เก็บข้อมูลเบื้องต้นจากกรณีศึกษา แล้วทำการวิเคราะห์เนื้อหา จากนั้นให้ผู้เชี่ยวชาญ 5 ท่าน ที่มีประสบการณ์วิศวกรรมชายฝั่งมากกว่า 10 ปี ตรวจสอบความเที่ยงตรง และทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นพบว่า เกณฑ์ที่พิจารณาคัดเลือกวัสดุ ตามลำดับความสำคัญมี 5 เกณฑ์ คือ ความทนทาน ต้นทุนในการก่อสร้างและบำรุงรักษา ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง ความยากง่ายในการทำงาน และความยากง่ายในการจัดหาวัสดุ และจากการสำรวจความคิดเห็นเชิงประสบการณ์จากผู้ทำงาน 50 ท่าน ในการเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมตามเกณฑ์ เพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย พบว่า วัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ใน 3 ลำดับแรก คือ มารีนคอนกรีต รองลงมาคือ คอนกรีตประเภทที่ 5 ทนซัลเฟตสูง และคอนกรีตผสมกันซึม

คำสำคัญ: น้ำทะเล การกัดกร่อน โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใต้ดิน กระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น การรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย

การอ้างอิงบทความ: สุรางคนา ตรังคานนท์, ภราดร ขนงสุวรรณ และ สิรวิชญ์ ฤทธาภัย, "การศึกษาแนวทางการป้องกันผลกระทบของสารละลายซัลเฟตและคลอไรด์ที่ส่งผลต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กใต้ดินบริเวณชายฝั่งทะเล โดยใช้กระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นและการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1–12, เลขที่บทความ 233-045083, ก.ค.–ก.ย. 2566.

Research Article

A Study on the Protection Approaches of Sulphate and Chloride Solutions Affecting on Coastal Reinforced Concrete Sub-Structures by Using Analytic Hierarchy Process and Simple Additive Weighting

Surangkana Trangkanont*, Paradorn Khanongsuwan and Sirawit Rittapai
Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7428 7015, E–mail: surangkana.t@psu.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.07.004
Received 17 May 2021; Revised 2 August 2021; Accepted 26 August 2021; Published online: 6 July 2023
© 2023 King Mongkut’s University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Sulphate and Chloride concentrations in seawater have a significant impact on corrosion of steel-reinforced concrete substructures located in coastal environments. This research aims to find the criteria for selecting materials in a construction project using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Finding out the appropriate construction materials was conducted through Simple Additive Weighting (SAW) based on the criteria. Rigorous literature review coupled with preliminary data collection from case studies were carried out in order to perform content analysis. Then, five experts possessing more than 10 years of coastal engineering experience were asked to do content validation and Analytic Hierarchy Process (AHP). Weight assessment through prioritizations exposed 5 criteria for selecting the construction materials, consisting of material durability, construction and maintenance costs, construction or installation time, project complexity, and challenges in material procurement. After that, 50 participants with experience in coastal engineering were asked to complete an experience survey to identify factors affecting the selection of appropriate construction materials. By using simple Additive Weighting (SAW), the 3 prioritized list of appropriate materials were identified as marine concrete, sulphate resistant concrete and waterproof concrete.

Keywords: Seawater, Corrosion, Coastal Reinforced Concrete Sub-structure, Analytical Hierarchy Process (AHP) and Simple Additive Weighting (SAW)

Please cite this article as: S. Trangkanont, P. Khanongsuwan, and S. Rittapai, “A study on the protection approaches of sulphate and chloride solutions affecting on coastal reinforced concrete sub-structures by using analytic hierarchy process and simple additive weighting,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–12, ID. 233-045083, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ใต้ดินชายฝั่งทะเลได้รับผลกระทบจากสภาวะการกัดกร่อนของน้ำทะเลที่ซึมผ่านเข้าสู่น้ำใต้ดิน โดยความเข้มข้นของน้ำทะเลในน้ำใต้ดินขึ้นอยู่กับระยะระหว่างชายฝั่งถึงจุดก่อสร้าง ความสามารถในการยอมให้น้ำซึมผ่านและกักเก็บน้ำของดิน ช่วงการขึ้นและลงของน้ำทะเล [1], [2]

โครงสร้าง ค.ส.ล. ใต้ดิน สัมผัสน้ำทะเลในลักษณะบริเวณน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal Zone) ทำให้บางส่วนจมอยู่ใต้น้ำตลอดเวลา บางส่วนจมน้ำเมื่อน้ำขึ้น และบางส่วนอยู่เหนือน้ำตลอดเวลา ส่งผลให้โครงสร้างถูกกัดกร่อนไม่เท่ากัน โดยสภาวะเปียกสลับแห้งจะทำให้โครงสร้าง เสียหายมากที่สุด และถ้าช่วงหลังสัมผัสกับน้ำทะเลแล้วแห้งนานโอกาสที่โครงสร้างถูกทำลายจะมากขึ้น [3], [4]

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า สารละลายซัลเฟตและคลอไรด์ในน้ำทะเลส่งผลต่อโครงสร้าง ค.ส.ล. มากที่สุด โดยซัลเฟตจะส่งผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีต [5]–[9] ซึ่งความแข็งแรงของคอนกรีตที่ลดลงเกิดจากผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เหลือของปูนซีเมนต์กับน้ำ (สารประกอบแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) หรือ $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$), สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (C-S-H)gel และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)) ทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ในน้ำทะเลที่เข้ามาตามรูพรุนของคอนกรีต ทำให้เกิดยิปซัม หรือสาร ($Ca(SO)_4.2H_2O$) สารประกอบอัลคาไลน์แมกนีเซียม ซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) และเอททริงไกต์ (Ettringite หรือ $6CaO.Al_2O_3.3SO_3.32H_2O$) ที่ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของคอนกรีตลดลง

นอกจากนี้ อิออนของซัลเฟตทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่แทรกตัวอยู่ในรูพรุนคอนกรีต ทำให้เกิด $Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4).12H_2O$ หรือสารโทมาไซต์ (Thaumasite) ที่ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว [5] ทำให้อายุการใช้งานน้อยลง และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมมากขึ้น [5], [7] โดยอัตราการทำลายขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ผง ความเข้มข้นของซัลเฟตที่แวดล้อมคอนกรีตช่วงระยะเวลาการสัมผัสน้ำทะเล และความทึบน้ำของคอนกรีต [5]

ในน้ำทะเลมีเกลือคลอไรด์มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่งผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และความแข็งแรงของคอนกรีต โดยผลกระทบอย่างรุนแรงของคลอไรด์ที่มีต่อคอนกรีตนั้นเกิดจากสารละลายคลอไรด์ (Cl^-) เข้าไปในโพรงของคอนกรีต (Pore Solution) เมื่อน้ำขึ้นจะทำให้คอนกรีตมีสภาพอิ่มตัว และเมื่อน้ำลงคอนกรีตจะแห้งและมีคราบเกลือเมื่อน้ำขึ้นอีกครั้งทำให้ความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์ไม่เท่ากันจึงเกิดการแพร่ของอิออนคลอไรด์จากบริเวณที่เข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่เข้มข้นต่ำ ทำให้ความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงเรื่อยๆ ชั้นฟิล์มป้องกันที่ผิวของเหล็กเสริมจะถูกทำลาย ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างเหล็กกับน้ำซึ่งก่อให้เกิดสนิม [3], [4], [9]–[12]

กระบวนการเกิดสนิม จัดเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) ที่ประกอบไปด้วยขั้วให้ประจุ (Anode) และขั้วรับประจุ (Cathode) กล่าวคือ เมื่อเหล็ก ($Fe_{(s)}$) ที่มีสถานะเป็นของแข็ง อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นหรืออยู่ในน้ำและมีออกซิเจน เหล็กจะคายขั้วรับประจุหรืออิเลคตรอน ($2e^-$ และ $3e^-$) ออกมา และเปลี่ยนสถานะเป็นประจุเหล็ก ($Fe^{2+}_{(aq)}$ และ $Fe^{3+}_{(aq)}$) ในสารละลาย โดยอิเลคตรอนจะรวมตัวกับน้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) ทำให้ได้ประจุไฮดรอกซิล (OH^-) ออกมาในขั้นตอนสุดท้าย ซึ่งประจุไฮดรอกซิลจะไปทำปฏิกิริยากับประจุเหล็ก ทำให้เกิดสนิมเหล็ก ($Fe(OH_2)$) [11], [12]

เนื่องจากสนิมเหล็กเป็นสารประกอบที่มีปริมาณมาก โดยปริมาตรของสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นมากกว่าปริมาตรเหล็กที่สูญเสียไป ทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีต และเกิดการแตกร้าวส่งผลให้คอนกรีตไม่สามารถรับน้ำหนักตามที่ได้ออกแบบไว้ [3], [10]–[12] โดยอัตราการทำลายโครงสร้าง ค.ส.ล. ของอิออนคลอไรด์ [3], [11], [12] ขึ้นอยู่กับสภาวะความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน แรงดันน้ำ และความแตกต่างของความเข้มข้นเกลือคลอไรด์ ชนิดของปูนซีเมนต์ ระยะหุ้มเหล็กเสริม อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์

เนื่องจากผลกระทบเชิงลบของซัลเฟตและคลอไรด์ใน

น้ำทะเลที่ส่งผลต่อโครงสร้าง ค.ส.ล. ทางด้านความแข็งแรงและค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม ทำให้มีการศึกษามากมายถึงแนวทางป้องกันโดยการเลือกใช้วัสดุก่อสร้างเพื่อให้โครงสร้างมีความทนทาน (Durability) ภายใต้งบประมาณงานก่อสร้างและการดูแลรักษาที่เหมาะสม (Cost Effectiveness) และสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด (Availability) เพื่อให้สามารถกำหนดรายการประกอบแบบ [2], [4], [5], [11]–[13] ซึ่งส่วนใหญ่แล้วเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการออกแบบ (Detailed Design Phase) และจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าการใช้วัสดุต่าง ๆ เพื่อป้องกันการกัดกร่อนโครงสร้าง ค.ส.ล. ที่เกิดจากซัลเฟต และคลอไรด์เป็นเพียงการทดลอง เช่น การนำเถ้าถ่านมาใช้ผสมในคอนกรีตเพื่อลดความเสียหายที่เกิดจากซัลเฟต [7] และคลอไรด์ [13], [14] การสร้างโมเดลตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง ค.ส.ล. ที่เกิดจากใช้คอนกรีตซิลิกาฟูม [4] การชุบเหล็กด้วยโลหะ หรือสารเคลือบ และการห่อหุ้มโครงสร้าง ค.ส.ล. ด้วยแผ่นปิดกันชื้น [10] และการใช้ Epoxy Coating เพื่อลดผลระทบของคลอไรด์ และการติดตั้งโลหะเพื่อให้สูญเสียอิเลคตรอนแทนเหล็กเสริมในคอนกรีต [2], [12] จึงนำไปสู่วัตถุประสงค์การศึกษาเพื่อหาปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้และกำหนดประเภทของวัสดุที่ส่งผลกระทบในช่วงการก่อสร้าง (Construction Phase)

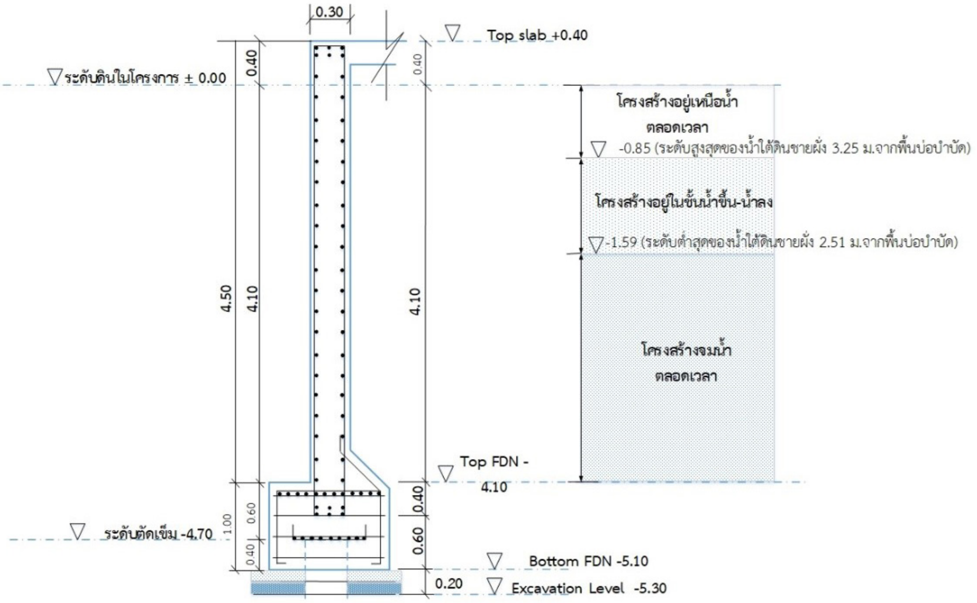
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การวิจัยเริ่มจากศึกษางานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. ของโรงแรมแห่งหนึ่งในบริเวณชายฝั่งทะเลภาคใต้ ซึ่งห่างจากชายทะเลประมาณ 460 เมตร และจากการตรวจสอบระดับน้ำใต้ดินบริเวณก่อสร้างเป็นเวลาต่อเนื่องกัน 30 วัน พบว่า โครงสร้าง ค.ส.ล. ดังกล่าว บางส่วนจมน้ำตลอดเวลา บางส่วนจมน้ำบางเวลา และบางส่วนไม่จมน้ำเลยดังรูปที่ 1 ทำให้โครงการนี้ถูกเลือกเป็นกรณีศึกษา

ผู้รับเหมาหลัก ผู้รับเหมาช่วง ผู้ควบคุมงาน และตัวแทนเจ้าของโครงการจำนวน 12 คน ได้ถูกสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth Interview) แบบก่อสร้าง รายการประกอบแบบและงานก่อสร้างได้ถูกศึกษา เพื่อให้ได้ข้อมูลทั่วไป และรายละเอียด [15], [16] ในงานวิศวกรรมชายฝั่งที่เกี่ยวข้องกับเกณฑ์ในการเลือกวัสดุและวัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้โดยการวิเคราะห์เนื้อหา (Content Analysis) โดยที่บทสัมภาษณ์และเอกสารในกรณีศึกษาต่างๆ ถูกนำมาถอดคำ แล้วจัดกลุ่มคำใหม่ และตั้งชื่อกลุ่มคำ เพื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีที่ได้ทบทวนมา และสรุปลักษณะเฉพาะข้อมูลทั้งหมด [17] พบว่านอกจากปัจจัยด้านความทนทาน ภายใต้งบประมาณงานก่อสร้างและการดูแลรักษา และสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาดแล้ว ยังมีปัจจัยความยากง่ายในการนำวัสดุไปใช้งาน (User Friendly) และระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทำงานหรือติดตั้ง (Construction Time) เพราะเกี่ยวข้องกับความต้องการผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน การรับประกันผลงาน และระยะเวลาสัญญาโครงการ ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยดังกล่าวเป็นปัญหาที่ไม่มีการกล่าวถึงจากการศึกษาก่อนหน้านี้

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในส่วนของการใช้วัสดุพบว่า โครงสร้าง ค.ส.ล. ชายฝั่งทะเล มีการใช้ คอนกรีตประเภท 5 (Sulphate-resistant Portland Cement) [3], [14] คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทางทะเล (Marine Concrete) [18] คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมหรือเถ้าลอย [6] ในขณะที่กรณีศึกษาใช้ คอนกรีตกันซึม (Waterproof Concrete) และแผ่นปิดกันซึม โดยวัสดุงานประเภทกันซึม [19] สามารถแบ่งเป็น ชนิดทาเคลือบ (Coating) และชนิดแผ่นสำเร็จรูป (Membrane) จะเห็นได้ว่าวัสดุที่กล่าวมามีคุณลักษณะที่ต่างกัน จึงนำไปสู่การศึกษาเพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมภายใต้ปัจจัยก่อนหน้านี้

การคัดเลือกวัสดุ โดยใช้เกณฑ์ 1) ความทนทาน 2) งบประมาณงานก่อสร้างและการดูแลรักษา 3) ความสามารถหาซื้อได้ในท้องตลาด 4) ความยากง่ายในการนำวัสดุไปใช้งาน และ 5) ระยะเวลาที่ต้องใช้ในการทำงาน หรือติดตั้ง ถูกนำไปตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหา (Content Validity) กับผู้เชี่ยวชาญทางวิศวกรรมชายฝั่งที่มีประสบการณ์ทางด้านนี้ไม่น้อยกว่า 10 ปี จำนวนอย่างน้อย 5 ท่าน เนื่องจากเป็นจำนวนที่เพียงพอต่อการนำผลการตรวจสอบความเที่ยงตรงของเนื้อหามาพัฒนาแบบสอบถามได้ [20] โดย



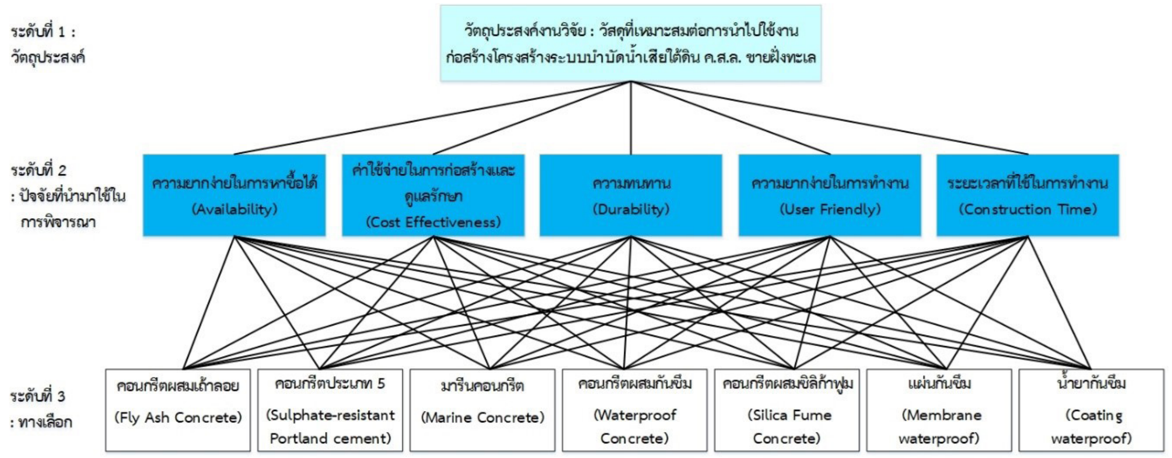
รูปที่ 1 ระดับน้ำใต้ดิน ณ เวลา 08.00 น. และ 16.00 น. เมื่อเทียบกับโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. ในโครงการกรณีศึกษา

ผู้เชี่ยวชาญจะพิจารณาและให้คะแนนแต่ละเกณฑ์ ดังนี้ +1 หมายถึง เห็นควรให้ใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา 0 หมายถึง ไม่แน่ใจ และ –1 หมายถึง ไม่เห็นด้วย จากนั้นทำการคำนวณค่าเฉลี่ยดัชนีความสอดคล้องระหว่างเกณฑ์ที่ใช้และวัตถุประสงค์ ถ้าคะแนนมากกว่า 0.5 [21] ถือว่าเกณฑ์นั้นควรนำมาใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุ ผลที่ได้คือ เกณฑ์ดังกล่าวเป็นเกณฑ์ที่ผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นพ้องต้องกันว่าใช้ในการพิจารณาเลือกวัสดุเพื่อก่อสร้าง โครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. ชายฝั่งทะเล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผ่านกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น และการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย

2.1 กระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process - AHP)

เนื่องจากการคัดเลือกวัสดุเพื่อใช้ในงานวิศวกรรมชายฝั่งทะเล มีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงซึ่งสอดคล้องกับกระบวนการตัดสินใจแบบวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) ที่มุ่งเน้นไปที่การตัดสินใจเลือกทางเลือกที่มีเกณฑ์หลากหลายให้พิจารณา ภายใต้วัตถุประสงค์ที่ต้องการ ทำให้สามารถตัดสินใจภายในกรอบโครงสร้างความต้องการที่ชัดเจน [22], [23], [24] ผู้เชี่ยวชาญที่ตอบรับแบบสอบถามความเที่ยงตรงของเนื้อหาได้ถูกขอร้องให้ทำการประเมินปัจจัยดังกล่าวโดยการใช้วิธีการ AHP เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญในระดับที่ 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาคัดเลือกวัสดุ ภายใต้โครงสร้างวัตถุประสงค์งานวิจัยดังรูปที่ 2 โดย ระดับที่ 1 คือวัตถุประสงค์ และระดับที่ 3 คือ วัสดุทางเลือกที่นำมาใช้งาน

โดยวิธี AHP ผู้เชี่ยวชาญทำการเปรียบเทียบเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาตามวัตถุประสงค์งานวิจัยทีละคู่ (Pairwise Comparison) ว่าปัจจัยใดสำคัญกว่ากันระหว่างคู่ที่พิจารณา จากนั้นนำค่าประเมินและค่าตอบแทนจากค่าประเมินของผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านที่ได้จากการเปรียบเทียบแต่ละคู่มากรอกลงในตารางเป็นเมตริกซ์เพื่อหาผลรวมในแต่ละปัจจัย แล้วนำข้อมูลการประเมินและค่าตอบแทนแต่ละช่องเหล่านั้นมาหารด้วยผลรวม เพื่อทำให้เป็นข้อมูลบรรทัดฐาน (Normalization) แล้วคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญ (Prioritization) หรือ ไอเกนเวคเตอร์ (Eigenvector) และค่าไอเกน (Eigen Value) สูงสุด เพื่อหาค่าดัชนีความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Index; CI) ที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 2 โครงสร้างกระบวนการวิเคราะห์แบบลำดับชั้นเพื่อจัดลำดับการเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการก่อสร้างโครงสร้างระบบบำบัดน้ำเสียใต้ดิน ค.ส.ล. บริเวณชายฝั่งทะเล

หาค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio; CR) ซึ่งคำนวณโดยการนำค่า CI หารด้วยค่าดัชนีเชิงสุ่มความสอดคล้องกัน (Random Consistency Index; RI) โดยที่ค่า RI ของเมตริกซ์ หรือจำนวนปัจจัย ซึ่งในที่นี้ คือ 5 จะมีค่า RI เท่ากับ 1.12 [22], [24]

สำหรับตารางเมตริกซ์ที่มีขนาดมากกว่า 4×4 ขึ้นไป ค่า CR $\leq$ 0.10 จะถือว่าการเปรียบเทียบปัจจัยโดยผู้เชี่ยวชาญนั้นมีความสอดคล้องกัน [22]

2.2 การรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting; SAW)

เกณฑ์การคัดเลือก และข้อมูลปฐมภูมิวัสดุถูกนำมาพัฒนาเป็นแบบสอบถาม เพื่อหาวัสดุที่เหมาะสมกับโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. ชายฝั่งทะเล โดยข้อมูลปฐมภูมิวัสดุได้จากวิธีการตรวจสอบสามเส้า เพื่อให้มั่นใจว่าวัสดุที่ถูกนำพัฒนาแบบสอบถามมีความเที่ยงตรง และความถูกต้อง [25] ดังนั้นวัสดุที่ถูกค้นพบใน การอ้างอิงวรรณกรรม วัสดุที่มีการขาย/บริการในท้องตลาด และวัสดุที่ได้จากการเก็บข้อมูลโดยวิธีต่างๆ ในกรณีศึกษาหรือวรรณกรรมเชิงปฏิบัติการ จะถูกนำพัฒนาแบบสอบถาม จากนั้นเก็บข้อมูลโดยใช้การสำรวจ (Survey Method) เนื่องจากง่ายต่อการแสดงความคิดเห็นในกรณีคำถามปลายปิดและเปิด และมีความรวดเร็วในการตอบแบบสอบถาม [26]

โครงสร้างแบบสอบถามจะประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 สำรวจข้อมูลเฉพาะของผู้ตอบแบบสอบถาม เช่น อายุ ประสบการณ์ ตำแหน่ง

ส่วนที่ 2 สำรวจความคิดเห็นของผู้ตอบแบบสอบถามที่มีต่อวัสดุต่าง ๆ ตามปัจจัย ซึ่งประกอบด้วย 1) คอนกรีตประเภท 5 2) คอนกรีตผสมเถ้าลอย 3) มารีนคอนกรีต 4) คอนกรีตผสมกันซึม 5) คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม 6) แผ่นกันซึม และ 7) น้ำยาทาเคลือบกันซึม โดยให้ผู้ตอบแบบสอบถามให้คะแนนจาก 1 ถึง 5 โดยเลข 1 หมายถึง ปัจจัยที่พิจารณาส่งผลกระทบเชิงลบต่อการนำวัสดุไปใช้งานมากที่สุด และ 5 หมายถึง ปัจจัยที่พิจารณาส่งเสริมการใช้งานวัสดุมากที่สุด

ส่วนที่ 3 เป็นคำถามปลายเปิดเพื่อสำรวจความคิดเห็นและข้อเสนอแนะของผู้ตอบแบบสอบถาม

กลุ่มตัวอย่างถูกคัดเลือกโดยการสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) เพราะต้องการเก็บข้อมูลเฉพาะด้าน [27] จากผู้มีประสบการณ์ด้านวิศวกรรมชายฝั่ง ดังนั้นกลุ่มผู้ทำแบบสอบถามกลุ่มแรกจึงเป็นผู้ที่ทำงานในกรณีศึกษาดังกล่าว จากนั้นใช้วิธีการชุ่มตัวอย่างแบบลูกโซ่ (Snowball Sampling) ให้ได้กลุ่มตัวอย่างเพิ่ม เนื่องจากเป็นการยากที่จะ

ทราบว่าใครมีประสบการณ์ทางด้านนี้ [27] จากนั้นทำการสอบถามโดยตรง อีเมล และสัมภาษณ์ทางโทรศัพท์ เพื่อเก็บข้อมูล เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการเพียงค่าคะแนนเฉลี่ยเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ SAW เท่านั้น ซึ่งจากทฤษฎีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์กลาง (Central Limit Theorem) พบว่า จำนวนตัวอย่าง ≥ 30 เป็นจำนวนที่มากเพียงพอต่อการหาค่าเฉลี่ยที่ได้จากจำนวนประชากรไม่ว่าจะมีการกระจายตัวแบบธรรมชาติหรือไม่ธรรมชาติก็ตาม [28], [29]

การคำนวนโดยใช้วิธี SAW คะแนนวัสดุแต่ละประเภทได้จากนำค่าน้ำหนักความสำคัญที่ได้จากกระบวนการ AHP มาคูณกับคะแนนเฉลี่ยที่ได้จากผู้ตอบแบบสอบถาม วัสดุที่ได้คะแนนรวมมากที่สุด คือ ทางเลือกที่ดีที่สุด [23] สำหรับก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. บริเวณชายฝั่งทะเล

3. ผลการทดลอง

ผลการวิจัยมี 2 ส่วน ส่วนแรกนำเสนอผลที่ผู้เชี่ยวชาญประเมินปัจจัยด้วยวิธีการ AHP เพื่อให้ค่าน้ำหนักความสำคัญ และส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่นำผลการให้คะแนนของผู้ตอบแบบสอบถามมาร่วมคำนวณด้วยวิธีการ SAWเพื่อให้ได้วัสดุที่เหมาะสมต่อการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. บริเวณชายฝั่งทะเล

3.1 ผลการวิจัยจากกระบวนการตัดสินในแบบวิเคราะห์ลำดับชั้น

แบบสอบถามเพื่อการประเมินความเที่ยงตรงของเนื้อหาหรือปัจจัยได้ถูกส่งไปยังผู้เชี่ยวชาญจำนวน 10 ท่าน มีเพียง 5 ท่าน ที่ตอบกลับมา และได้ทำการประเมินเปรียบเทียบคู่ปัจจัยตามกระบวนการ AHP โดยตารางที่ 1 แสดงข้อมูลส่วนบุคคลของผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ค่าน้ำหนักความสำคัญที่ได้จะนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยหลังจากที่ได้ตรวจสอบค่า CR พบว่า เป็นไปดังตารางที่ 2 โดยปัจจัยที่ผู้เชี่ยวชาญทุกคนให้ความสำคัญมากที่สุด คือ ความทนทาน คิดเป็นค่าน้ำหนักที่ 0.42 รองลงมา คือ ค่าก่อสร้างและดูแลรักษาตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งมีค่า 0.28 ลำดับที่ 3 คือ ระยะเวลาที่ใช้การทำงาน มีค่า 0.13 ซึ่งลำดับที่ 1 และ 2 สอดคล้องกับการศึกษาก่อนหน้านี้ที่พบว่าเป็นปัจจัยที่มีการกล่าวถึงมากที่สุด

ในส่วนของลำดับที่ 3 ระยะเวลาในการก่อสร้าง แม้ไม่เคยมีการกล่าวถึงในงานวิจัยที่ได้ทบทวนมา แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าระยะเวลาในการทำงานก่อสร้างนั้น จัดเป็นส่วนหนึ่งของเกณฑ์วัดความสำเร็จ (Success Criteria) ของโครงการก่อสร้าง [30] เนื่องจากทุกโครงการมีระยะเวลาสัญญาเป็นตัวกำหนด สำหรับปัจจัยทางด้านความยากง่ายในการทำงานและความยากง่ายในการจัดซื้อพบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญน้อย คือ 0.09 และ 0.07 ตามลำดับ

ผลการประเมินของผู้เชี่ยวชาญ C มีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากผู้เชี่ยวชาญท่านอื่น ในเรื่องของค่าก่อสร้างและดูแลรักษาตลอดอายุการใช้งาน เมื่อสอบถามกลับไปพบว่าในหน่วยงานราชการ โดยทั่วไปใช้แบบก่อสร้างมาตรฐาน ซึ่งมีระบุข้อกำหนดรายการประกอบแบบ การคัดเลือกวัสดุใหม่เพื่อกำหนดราคากลาง จัดตั้งและของบประมาณทำได้ยาก จึงให้ความสำคัญส่วนนี้น้อย

ตารางที่ 1 ข้อมูลส่วนบุคคลของผู้เชี่ยวชาญ

ผู้เชี่ยวชาญ	หน่วยงาน	ตำแหน่ง	ประสบการณ์วิศวกรรมชายฝั่งทะเล (ปี)
A	มหาวิทยาลัย	อาจารย์พิเศษ (วิศวกรรมชายฝั่ง)	39
B	กรมเจ้าท่า	วิศวกรโยธาชำนาญการพิเศษ	21
C	กรมเจ้าท่า	หัวหน้าส่วนวิศวกรรม	23
D	มหาวิทยาลัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (วิศวกรรมชายฝั่ง)	19
E	มหาวิทยาลัย	รองศาสตราจารย์ (วิศวกรรมชายฝั่ง)	12

ข้อสรุปจากผลการคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญเฉลี่ยถูกส่งกลับไปยังผู้เชี่ยวชาญทุกท่านอีกครั้ง เพื่อให้ข้อคิดเห็น ซึ่งทุกท่านให้ข้อคิดเห็นตรงกันว่า ค่าน้ำหนักปัจจัยที่ได้มีความเหมาะสม

ตารางที่ 2 ค่าลำดับหรือน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย

ผู้เชี่ยวชาญ		A	B	C	D	E	ค่าเฉลี่ยความสำคัญ
ปัจจัย	ต้นทุนก่อสร้างและดูแลรักษา	0.34	0.31	0.07	0.28	0.38	0.276
	ความยากง่ายในการทำงาน	0.09	0.09	0.07	0.14	0.08	0.094
	ความทนทาน	0.30	0.41	0.59	0.44	0.38	0.424
	ความยากง่ายในการจัดหาวัสดุ	0.07	0.05	0.08	0.08	0.08	0.072
	ระยะเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง	0.20	0.14	0.19	0.06	0.08	0.134
	ค่า CR	0.08	0.05	0.10	0.10	0.00	
รวม							**1.000**

3.2 ผลการวิจัยจากการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย

ข้อมูลของผู้ตอบแบบสอบถาม 50 ท่าน เป็นไปดังตารางที่ 3 โดย 25 ท่าน มีประสบการณ์วิศวกรรมชายฝั่งทะเลมากกว่า 3 ปีขึ้นไป และ 13 ท่านมีประสบการณ์ 1–3 ปี โดยทั้ง 2 กลุ่มนี้ คิดเป็น 76.0 เปอร์เซ็นต์ ของทั้งหมด และทุกคนมีตำแหน่งงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ผู้จัดการและวิศวกรโครงการ ผู้ควบคุมงาน วิศวกรสนามและสำนักงาน โฟร์แมน และผู้รับเหมาช่วง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3 ข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน (คน)	ร้อยละ
เพศ	ชาย	39	78.0
	หญิง	11	22.0
	รวม	50	100.0
ตำแหน่ง	ผู้จัดการโครงการ	3	7.5
	วิศวกรโครงการ	1	2.5
	วิศวกรสนาม	15	37.5
	วิศวกรสำนักงาน	6	15.0
	ผู้ควบคุมงาน	2	5.0
	โฟร์แมน	6	15.0
	ผู้รับเหมาช่วง	7	17.5
	รวม	50	100.0
หน่วยงาน	ภาคเอกชน		
	-เจ้าของงาน	2	4.0
	-ผู้รับเหมา	43	86.0
	-ที่ปรึกษา	3	6.0

ตารางที่ 3 ข้อมูลส่วนบุคคลของผู้ตอบแบบสอบถาม (ต่อ)

ข้อมูลทั่วไป		จำนวน (คน)	ร้อยละ
หน่วยงาน (ต่อ)	ภาครัฐ	2	4.0
	รวม	50	100.0
ประสบการณ์	1–3 ปี	13	26.0
	3–5 ปี	10	20.0
	5–10 ปี	11	22.0
	10 ปีขึ้นไป	4	8.0
	ไม่ระบุ	12	24.0
	รวม	50	100.0
การศึกษา	ประกาศนียบัตรวิชาชีพขั้นสูง	8	16.0
	ปริญญาตรี	37	74.0
	> ปริญญาตรี	0	0.0
	ไม่ระบุ	5	10.0
	รวม	50	100.0

เมื่อนำข้อมูลคะแนนและค่าน้ำหนักความสำคัญมาคำนวณโดยวิธีการ SAW ได้ผลดังตารางที่ 4 พบว่า มารีนคอนกรีตจัดเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด เพราะมีคะแนน 4.08 รองลงมา คือ คอนกรีตประเภท 5 คอนกรีตผสมกันซึม คอนกรีตผสมเถ้าลอย และคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม ซึ่งมีคะแนน 3.83, 3.76, 3.70 และ 3.54 ตามลำดับ สำหรับน้ำยาเคลือบกันซึม และแผ่นกันซึม มีคะแนนอยู่ที่ 3.08 และ 3.06 ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์พบว่า กลุ่มวัสดุคอนกรีตมีความเหมาะสมมากกว่ากลุ่มวัสดุกันซึม เนื่องจากมีค่าคะแนน

ตารางที่ 4 ผลการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่ายของวัสดุก่อสร้าง

ปัจจัยที่นำมาพิจารณา		ต้นทุนก่อสร้างและดูแลรักษา	ความยากง่ายในการทำงาน	ความทนทาน	ความยากง่ายในการจัดซื้อ	ระยะเวลาก่อสร้าง	รวม	ลำดับ
ค่าน้ำหนักความสำคัญ		**0.276**	**0.094**	**0.424**	**0.072**	**0.134**	**1.000**	
วัสดุ	คอนกรีตประเภท 5	3.12	3.84	4.24	3.32	4.24	3.83	2
	คอนกรีตผสมเถ้าลอย	3.50	4.12	3.68	3.16	4.20	3.70	4
	มารีนคอนกรีต	3.38	4.20	4.46	3.86	4.34	4.08	1
	คอนกรีตผสมกันซึม	3.72	4.30	3.32	4.48	4.48	3.76	3
	คอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม	3.04	3.70	3.76	2.74	4.22	3.54	5
	แผ่นกันซึม	3.12	2.82	2.94	4.00	2.96	3.06	7
	น้ำยาทาเคลือบกันซึม	3.44	2.88	2.70	4.26	3.04	3.08	6

ความทนทาน ความเร็ว และความง่ายในการทำงานมากกว่า ขณะที่ต้นทุนในการก่อสร้าง และดูแลรักษาไม่ได้ต่างกันมากนัก แต่กลุ่มวัสดุกันซึมสามารถจัดซื้อได้ง่ายกว่า

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลวิจัยพบว่า มารีนคอนกรีตเป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุด จากการพิจารณาเรื่องความทนทาน ระยะเวลา และความสะดวกในการทำงาน เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติ พบว่า มารีนคอนกรีต มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานที่ทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นทำให้รูพรุนในคอนกรีตน้อยลง ช่วยลดการแพร่ของแมกนีเซียมอิออนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C3A) อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนหน้านี้ [3], [14] ที่ระบุว่าปริมาณแคลเซียมอลูมิเนตที่ต่ำจะลดการกัดกร่อนที่เกิดจากสารละลายซัลเฟตได้ นอกจากนี้ยังพบว่ามารีนคอนกรีตมีคุณสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ และยึดจับคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตประเภทอื่น [18]

แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ยังไม่มีผลิตภัณฑ์ใดที่ได้รับการรับรองมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 2919-2561 คอนกรีตสภาพแวดล้อมทางทะเล [31] ดังนั้น การออกแบบคอนกรีตที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมทางทะเล จึงกำหนดคุณลักษณะผ่านทางรายการประกอบแบบ เช่น ระยะหุ้มเหล็กเสริม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ค่าความต้านทานซัลเฟต และการแทรกซึมของคลอไรด์ ค่าความทึบน้ำ ค่าการซึมผ่านน้ำ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและสภาพแวดล้อมที่โครงสร้าง ค.ส.ล. ต้องเผชิญ ตามมาตรฐานอื่น ๆ ที่ได้รับการยอมรับทั้งในส่วนของการทดสอบและคุณสมบัติของวัสดุ เช่น American Society for Testing and Materials; ASTM และการออกแบบ American Concrete Institute; ACI [9]

คอนกรีตประเภท 5 เป็นวัสดุที่เหมาะสมรองลงมา จากการพิจารณาเรื่องความทนทาน ระยะเวลา และความสะดวกในการทำงาน เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติพบว่า ทนต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต [3], [14] ได้ดี แต่มีความต้านทานคลอไรด์น้อย ขณะที่คอนกรีตผสมกันซึม เป็นวัสดุที่เหมาะสมอันดับ 3 เพราะหาซื้อได้ง่าย ทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว เมื่อพิจารณาจากคุณลักษณะพบว่า เป็นคอนกรีตที่ใช้กับโครงสร้าง ค.ส.ล. ทั่วไปในบริเวณที่ไม่ต้องการให้มีการซึมผ่านน้ำ สามารถผสมเองหน้างานได้ ทำให้ได้รับความนิยมและหาซื้อได้ด้วยราคาถูกที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ แต่ความทนทานต่อสภาพแวดล้อมทางทะเลน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทคอนกรีตด้วยกัน

คอนกรีตผสมเถ้าลอยและคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูมเป็นวัสดุที่เหมาะสมอันดับ 4 และ 5 ตามลำดับ จากการพิจารณาเรื่อง ระยะเวลา ความสะดวก และความทนทาน ในการทำงาน เมื่อพิจารณาจากคุณสมบัติพบว่า มีความทึบน้ำ และทนต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี [5], [12] แต่เถ้าลอยมักถูกมองในแง่ของการนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้งาน

นอกจากนี้ไม่มีหลักฐานเชิงประจักษ์ของความทนทานสำหรับสิ่งก่อสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล และมีความกังวลเรื่องสารตกค้างในเถ้าลอยที่อาจส่งผลถึงระบบนิเวศน์ ในขณะที่ซิลิกาฟูมไม่มีผลิตในประเทศไทย [32] การขนส่ง และการเก็บรักษามีค่าใช้จ่ายสูง

แผ่นกันซึมและน้ำยาทากันซึมจัดเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุด ไม่ว่าจะพิจารณาจากเกณฑ์ใดก็ตาม ยกเว้นความสะดวกในการจัดซื้อ เนื่องจากเพิ่มขั้นตอน และระยะเวลาก่อสร้าง นอกจากนี้การติดตั้งแผ่นกันซึม หรือทาเคลือบสารกันซึมในสภาพแวดล้อมที่ต้องสูบน้ำออกตลอดเวลาเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก ต้องอาศัยช่างที่มีฝีมือ มีความอดทนและละเอียดรอบคอบ เพราะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผ่นกันซึม และสารทาเคลือบกันซึม

ดังนั้น ในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน ค.ส.ล. บริเวณชายฝั่งทะเล การเลือกวัสดุควรคำนึงถึงปัจจัยทางด้านความทนทานตลอดอายุการใช้งาน ภายใต้งบประมาณการก่อสร้าง และดูแลรักษาที่เหมาะสม ทำงานได้สะดวกรวดเร็ว และหาซื้อง่าย โดยปัจจุบันพบว่า วัสดุที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ภายใต้ปัจจัยดังกล่าว คือ มารีนคอนกรีต คอนกรีตประเภท 5 และคอนกรีตผสมกันซึมตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

[1] P. Witthawatchutikul, P. Thamrongwang, and S.Rouysungnern. (1983, September) Effect of ocean tides on groundwater level. RFD., Bangkok, Thailand. [online] (in Thai). Available: https://frc.forest.ku.ac.th/frcdatabase/bulletin/ws_document/R092604.pdf

[2] J. Sangsuwan and N. Chuthong. (2011). The effect of steel corrosion in concrete structure for Marine environment. RMUTP., Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1041/teched_54_03.pdf;jsessionid=E3CC2B1DF2BB4012E64CBD09D2B2EBC3?sequence=1.

[3] C. Kererat and S. Thaipum. (2016, July). Chloride penetration of reinforced concrete structure in marine environment, case study: Hua Hin and Pranburi in Prachup Khiri Hhan province. RMUTR., NPT. Thailand [Online] (in Thai). Available: https://repository.rmutr.ac.th/bitstream/handle/123456789/491/Fulltext.pdf

[4] M. Safehian and A. A. Ramezanianpour, "Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 287–294, 2013.

[5] S. Aimjaboak (2013). Reinforced concrete durability: concrete durability from sulphate erosion. UDRU., UDN. Thailand [online] (in Thai). Available: https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/content/upload/File/Doc/Dura_Con_PART2.pdf

[6] CPAC ACADEMY (Undated), *Cement and applications*. [Online] (in Thai). Available: https://www.cpacacademy.com/download/cpacacademy_com/E-CEMENTAPP%20U04.pdf

[7] R. Chaileecharen, P. Krammart, J. Tangpagasit, and N. Chumuang, "Sulfate resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag," *Journal of Engineering, RMUTT*, vol. 14, no. 1, pp. 13–23, 2016 (in Thai).

[8] S. Pavitpok, "Chloride penetration resistance of concrete and corrosion of steel after 7-year exposure in marine environment," M. Eng. thesis, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 2019 (in Thai).

[9] *Concrete work standard for durability and service life*, DPT Standard 1332-55 (1st ed.), 2012 (in Thai).

[10] S. Srisompong, N. Mondopyai, and A. Khruthphum, "Building structures with survive in a flooded environment," *Journal of the Faculty of Architecture King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*, vol. 10, no. 1, pp. 39–56, 2010 (in Thai).

[11] S. Aimjaboak (2013A). Reinforced concrete durability: concrete durability from choloride erosion. UDRU., Udon Thani, Thailand [online] (in Thai). Available: https://engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/content/upload/File/Doc/Dura_Con_PART1.pdf

[12] J. Sangsuwan. (2013, July) Influence of sacrificial anode cathodic protection on the chloride profile in concrete. RMUTP., Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/1810/TECH_58_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[13] W. Chalee, P. Ausapanit, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash concrete in marine environment for long term design life analysis," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 1242–1249, 2010.

[14] P. Suwanmaneechot and W. Chalee, "Chloride penetration and steel corrosion in Portland cement type V concrete containing fly ash from fluidized-bed and pulverized combustions under marine exposure," *The Journal of KMUTNB*, vol. 22, no. 3, pp. 526–538, 2012 (in Thai).

[15] E. J. Halcomb and P. M. Davidson, "Is verbatim transcription of interview data always necessary?," *Applied Nursing Research*, vol. 19, no. 1, pp. 38–42, 2006.

[16] C. Boyce and P. Neale. (2006, May). *Conducting in-depth interviews: a guide for designing and conducting in-depth interviews for evaluation input*. [Online]. Available: https://donate.pathfinder.org/site/DocServer/m_e_tool_series_indepth_interviews.pdf;jsessionid=00000000.app20103a?NONCE_TOKEN=49DBE09042EBD8DCE9BF989EC313CE0F

[17] H.-F. Hsieh and S. E. Shannon, "Three approaches to qualitative content analysis," *Qualitative Health Research*, vol. 15, no. 9, pp. 1277–1288, 2005.

[18] CPAC ACADEMY (2021). *CPAC marine concrete* [Online] (in Thai). Available: http://www.cpacacademy.com/index.php?tpid=0055

[19] J. Roong-in, "Waterproof and humidity-proof system in Thailand," *The Journal of Industrial Technology Suan Sunandha Rajabhat University*, pp. 88–94, 2007 (in Thai).

[20] P. Pasunon, "Validity of questionnaire for social science research," *Journal of Social Sciences Srinakharinwirot University*, vol. 18 pp. 375–396, 2016 (in Thai).

[21] R. C. Turner and L. Carlson, "Indexes of Item-Objective Congruence for Multidimensional Items," vol. 3, no. 2, pp. 163-171, 2003.

[22] P. Yourawd, "Application of the AHP method of logistics service providers selection: A case study of a commercial bank," M.S. thesis, Department of Integration Supply Chain Management, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2009 (in Thai).

[23] A. Saravisutra, "Multi-criteria decision making: Comparison between SAW, AHP and TOPSIS concept and methods," *Princess of Naradhiwas University Journal*, vol.8, no.2, pp.180–192. May-Aug 2016.

[24] W. Phankong, T. Maneesri, and C. Maneesri, "Application analytic hierarchy process for evaluation of biomass plant location," *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 34, no. 2, pp. 37–43, 2016 (in Thai).

[25] M. Q. Patton, "Enhancing the quality and credibility of qualitative analysis," *Health Services Research*, vol. 34, no. 5, pp. 1189–1208, 1999.

[26] A. Makulsawatudorn, M. Emsley, and K. Sinthawanarong, "Critical factor influencing construction productivity in Thailand," *The Journal of KMUTNB*, vol. 14, no. 3, pp. 1–6, 2004 (in Thai).

[27] J. Adam, H. T. A. Khan, R. Raeside, and D. White, *Research methods for graduate business and social science students*. New Delhi: Response Books, 2007.

[28] C. Srikaewsaew (2003). *Statistic, chapter 1: basic statistics* [Online] (in Thai). Available: https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter1/central-limit-theorem

[29] W. W. LaMorte (2016). *The role of probability*. [Online]. Available: https://www.bath.ac.uk/publications/library-guides-to-citing-referencing/attachments/ieee-style-guide.pdf

[30] S. Trangkanont, P. Tulyakanit, and P. Chaimon, "Critical success factors in construction project management: A unit price contract," *CRMA Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 123–141, 2018 (in Thai).

[31] Thai industrial standard institute (2020). *Webboard* [Online] (in Thai). Available: https://service.tisi.go.th/tisi-webboard/web/index.php?r=question%2Fview&id=64

[32] C. Jaturapitakkul (2007). *Silica fume* [Online] (in Thai). Available: https://thaitca.or.th/wp-content/uploads/2020/04/journal1.pdf