วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม
Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การประยุกต์ใช้วิธี AHP ร่วมกับ Fuzzy-TOPSIS ในการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างภาครัฐ

Hybrid AHP and Fuzzy-TOPSIS methods in subcontractor selection: Case studies of government construction projects

กณพ วัฒนา[1] อิสริยพร หลวงหาญ[2*] ขวัญนิธิ คำเมือง[3] ภาณุ บูรณจารุกร[3]

[1] สาขาวิขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมืองอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

[2*] สาขาวิชาวิศวกรรมโลจิสติกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมืองอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

[3] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000

Kanop Wattana[1] Itsariyaporn Luanghan[2*] Kwanniti Kammuang[3] Panu Buranajarukorn[3]

[1] Program of Engineering Management, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000

[2*] Program of Logistics Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000

[3] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000

* Corresponding author.

E-mail: itsariyaporn6027@gmail.com; Telephone: 0 8825 21933

วันที่รับบทความ 12 มีนาคม 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 23 มิถุนายน 2568; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 20 สิงหาคม 2568
วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 8 กันยายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ 17 กันยายน 2568

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเกณฑ์และการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงโครงการก่อสร้างอาคารโรงพยาบาลอุตรดิตถ์ โดยการประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) ร่วมกับวิธีการเรียงลำดับความชอบโดยความคล้ายคลึงกับปัญหาในอุดมคติแบบคลุมเครือ (Fuzzy-Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution: Fuzzy-TOPSIS) หรือ AHP-FTOPSIS จะทำให้การนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษานี้จะช่วยลดปัญหาการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงด้วยการเปรียบเทียบแบบรายคู่และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตัดสินใจสำหรับการหาคำตอบด้วยวิธีนี้ ภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่ในการก่อสร้างมุ่งเน้นการก่อสร้างที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม ผลการพัฒนาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงจากการทบทวนวรรณกรรม จาก 35 เกณฑ์ พิจารณาคงเหลือ 12 เกณฑ์ จากนั้นทำการประเมินการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง จำนวน 3 ราย โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโครงการ จำนวน 3 ราย ผลการคัดเลือก ผู้รับเหมาช่วงรายที่ 3 เท่ากับ 0.6678 เป็นผู้ผ่านการคัดเลือก รองลงมา ผู้รับเหมาช่วงรายที่ 1 เท่ากับ 0.3620 และผู้รับเหมาช่วงรายที่ 2 เท่ากับ 0.3615 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวยังช่วยเพิ่มความแม่นยำในการหาคำตอบ เนื่องจากมีการตรวจสอบความสอดคล้องของดัชนีข้อคำถาม และการอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการประเมิน อีกทั้งยังสามารถนำวิธีดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับปัญหาด้านโครงการก่อสร้างและปัญหาอื่น ๆ ได้ เช่น ปัญหาการคัดเลือกซัพพลายเออร์วัตถุดิบและกระบวนการผลิตสินค้า หรือบริการ

คำสำคัญ

ผู้รับเหมาช่วง โครงการก่อสร้างภาครัฐ การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น วิธีการเรียงลำดับความชอบโดยความคล้ายคลึงกับปัญหาในอุดมคติแบบคลุมเครือ

Abstract

This study aims to develop criteria and a selection framework for subcontractors in the construction project of Uttaradit Hospital by applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) in conjunction with the Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Fuzzy-TOPSIS), referred to as AHP-FTOPSIS. The application of this method in the study helps mitigate issues in subcontractor selection through pairwise comparison and enhances the reliability of decision-making under constraints related to limited construction space. The approach emphasizes minimizing adverse impacts on health, safety, and the environment. The development of subcontractor selection criteria began with a literature review, identifying an initial set of 35 criteria, which were then narrowed down to 12 criteria. Subsequently, the evaluation process was conducted to assess three subcontractors, using input from three experts involved in the hospital construction project. The results indicated that Subcontractor 3 had the highest score at 0.6678, followed by Subcontractor 1 at 0.3620, and Subcontractor 2 at 0.3615, respectively. Moreover, this method enhances the accuracy of results by ensuring consistency in the questionnaire index and leveraging expert judgment in the evaluation process. The approach is not only applicable to subcontractor selection in construction projects but can also be adapted for other decision-making problems, such as supplier selection for raw materials and production or service processes.

Keywords

sub-contractor, government construction project, multi-criteria decision making, AHP, Fuzzy-TOPSIS

1. คำนำ

ปัจจุบันโครงการก่อสร้างของภาครัฐต้องใช้งบประมาณและระยะเวลาในการดำเนินโครงการที่ชัดเจน ดังนั้น เพื่อให้โครงการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้รับจ้างก่อสร้าง (ผู้รับเหมาหลัก) จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีกระบวนการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง (Subcontractor) ในงานแต่ละประเภทให้มีประสิทธิภาพให้งานแล้วเสร็จตามรายละเอียดขอบเขตงาน และภายในระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ในงานก่อสร้างโครงการก่อสร้างหนึ่งประกอบด้วยงานหลายประเภท เช่น งานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม งานระบบประปาสุขาภิบาล งานระบบไฟฟ้า และงานเครื่องกลประกอบอาคาร เป็นต้น เมื่อพิจารณาการทำงานของผู้รับเหมาช่วงในงานสถาปัตยกรรม ซึ่งเป็นงานที่แสดงให้เห็นรูปทรงอาคาร การจัดแบ่งสัดส่วนพื้นที่การใช้งาน ความเรียบร้อย ความสวยงามของผิวพื้น ผิวผนัง ได้แก่ งานก่ออิฐ ฉาบปูนงานปูกระเบื้อง งานติดตั้งประตู หน้าต่าง และงานกระจกอลูมิเนียม เป็นต้น มักพบปัญหาความบกพร่องของงานก่อสร้างภายหลังที่ได้ทำงานแล้วเสร็จ หรือภายหลังการรับมอบงาน ซึ่งสาเหตุเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น วัสดุเสื่อมสภาพ หรือชำรุด ช่างก่อสร้างขาดทักษะและความชำนาญ [1]

โครงการก่อสร้างอาคารวินิจฉัยและรักษา โรงพยาบาลอุตรดิตถ์ เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชั้น มูลค่าก่อสร้าง 455,820,000 บาท พื้นที่ใช้สอยภายในอาคาร 20,336 ตารางเมตร มีมูลค่างานสถาปัตยกรรมรวม 99,118,220.29 บาท มีระยะเวลาในการดำเนินโครงการตามสัญญา 640 วัน ดังนั้น ผู้รับเหมาก่อสร้างจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยเทคนิคการคัดเลือกและการพิจารณาเกณฑ์คัดเลือกที่เหมาะสมกับโครงการ เพื่อให้ได้ผู้รับเหมาช่วงงานสถาปัตยกรรมสามารถดำเนินงานภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดและงานมีคุณภาพตามข้อตกลงที่ได้กำหนดไว้ในสัญญาจ้าง เนื่องจากโครงการก่อสร้างดังกล่าวตั้งอยู่ในโรงพยาบาล ผู้รับเหมาช่วงจำเป็นต้องปฏิบัติงานภายใต้ข้อจำกัดของพื้นที่และสภาพแวดล้อมโดยรวมของโครงการ ตามแนวคิดการก่อสร้างสีเขียวที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมที่คำนึงถึงสุขภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อมของคนงานและผู้ใช้บริการที่อยู่ในพื้นที่ใกล้โครงการก่อสร้างตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ

ทั้งนี้ การพิจารณาเลือกเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงงานสถาปัตยกรรมให้มีประสิทธิภาพ ผู้วิจัยจึงได้ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวกับการคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้าง (Contractor Selection) หรือ ผู้รับเหมาช่วง (Subcontractor Selection) เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้าง (Contractor Criteria Selection) ต้องอาศัยการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนในการตัดสินใจแก้ปัญหาที่

แตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง มักนิยมใช้วิธีดังต่อไปนี้ (1) วิธี Analytic Network Process (ANP) ประยุกต์ใช้ในการทบทวนการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงในงานอุตสาหกรรม XYZ [2] (2) วิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงในบริษัทรับเหมาก่อสร้าง [3] เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Polat [4] ที่ใช้ในการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงในการก่อสร้างบ้านอัจฉริยะ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [5] กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบบูรณาการและการประเมินตามสัดส่วนที่ซับซ้อนสำหรับการเลือกผู้จำหน่ายในการจัดการห่วงโซ่อุปทาน (3) วิธี Choosing-By-Advantages (CBA) ซึ่งเป็นการคัดเลือกผู้รับเหมาในอุตสาหกรรมก่อสร้าง [6] (4) การบูรณาการวิธี Analytic Hierarchy Process (AHP) และ วิธี PROMETHEE เกี่ยวกับการคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้างอาคาร [4] และ (5) วิธี Analytical Hierarchy Process (AHP) และ วิธี Technique for Others Reference by Similarity (TOPSIS) สำหรับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงในโครงการก่อสร้างอาคาร [7]

ทั้งนี้ เมื่อผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ยังมีเทคนิคอื่นที่เกี่ยวกับการคัดเลือก (Selection) ยกตัวอย่างเช่น การคัดเลือกซัพพลายเออร์ (Supplier Selection) ที่มีการใช้วิธี Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Fuzzy-TOPSIS) ได้แก่ งานวิจัยของ [8] ได้ใช้วิธี Fuzzy TOPSIS เพื่อจัดอันดับปัจจัยกำหนดการรักษาพนักงานในบริษัทก่อสร้าง: กรณีศึกษาในเกาหลีใต้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ [9] ที่ใช้ในการคัดเลือกซัพพลายเออร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หรือ การบูรณาการวิธี Fuzzy-AHP และ Fuzzy-TOPSIS สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] ที่ใช้การคัดเลือกซัพพลายเออร์สีเขียวของวัสดุไม้ ในขณะที่งานวิจัยของ [11] ได้นำวิธี Fuzzy-AHP และ Fuzzy-TOPSIS มาใช้เปรียบเทียบเพื่อหาข้อกำหนดเกี่ยวกับซอฟแวร์

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงงานสถาปัตยกรรมภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่และสภาพแวดล้อมของโครงการก่อสร้างอาคารภาครัฐ โรงพยาบาลอุตรดิตถ์ ซึ่งเป็นอาคารที่ให้บริการด้านสาธารณสุขและการรักษา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาประเด็นการคัดเลือกดังกล่าว โดยการประยุกต์ใช้วิธี AHP ร่วมกับ Fuzzy-TOPSIS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [12] เพื่อเสนอเป็นแนวทางในการจัดการลำดับความสำคัญของปัญหาของแต่ละทางเลือกที่ดีที่สุด ในขณะที่งานวิจัยของ [13] ได้กล่าวว่า การประเมินและการคัดเลือกซัพพลายเออร์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมีค่อนข้างจำกัด โดยเน้นเกณฑ์สุขภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม (Health Safety and Environmental: HSE) [14] อย่างไรก็ตาม การนำวิธี AHP มาเป็นวิธีในการพิจารณาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์อย่างเหมาะสม และนำวิธี Fuzzy-TOPSIS มาประยุกต์ใช้พิจารณาทางเลือกในการแก้ปัญหาอุดมคติเพื่อลดความคลาดเคลื่อน

โดยวิธีดังกล่าวมีจุดเด่นคือ เป็นการให้ระดับความสำคัญทางภาษาสำหรับการประเมินผลคัดเลือก เพื่อให้ผู้เชี่ยวชาญได้นำไปใช้ประกอบการตัดสินใจสิ่งสำคัญที่สุด คือ ประสิทธิภาพของรูปแบบความคลุมเครือทางภาษา จะมีค่าต่าง ๆ ที่แสดงเป็นตัวเลขอย่างชัดเจนในการวิเคราะห์หาคำตอบ ดังนั้น วิธี Fuzzy-TOPSIS จะช่วยลดปัญหาของการตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ในขณะที่วิธี AHP [15] มีจุดเด่นคือ อาศัยผู้มีประสบการณ์ทั้งด้านความรู้ ประสบการณ์ในการทำงานและคุณวุฒิ อีกทั้งยังเป็นผู้มีส่วนได้เสียกับปัญหาการตัดสินใจมาเป็นผู้ให้คะแนน อีกมุมหนึ่งของวิธีดังกล่าวยังเป็นการเปรียบเทียบความสำคัญของแต่ละเกณฑ์และแต่ละทางเลือก อีกทั้งยังมีการตรวจสอบความสอดคล้องของดัชนีส่งผลให้วิธี AHP มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ด้วยจุดเด่นดังกล่าวของวิธี AHP และ Fuzzy-TOPSIS จะทำให้การนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีศึกษานี้จะช่วยลดปัญหาการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงด้วยการเปรียบเทียบแบบรายคู่และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือในการตัดสินใจสำหรับการหาคำตอบด้วยวิธีดังกล่าว

จากงานวิจัยที่ผ่านมายังแสดงให้เห็นว่า ปัญหาการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงดังกล่าว พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่มีเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงไว้หลากหลายเกณฑ์ ซึ่งไม่ครอบคลุมบริบทของกรณีศึกษา ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำเกณฑ์ต่าง ๆ มาพัฒนาใหม่ โดยการรวบรวมและสอบถามไปยังผู้มีส่วนได้เสียของปัญหา รวมถึงการนำวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาให้เหมาะสม

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการหาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงงานสถาปัตยกรรม โครงการก่อสร้างอาคารของภาครัฐ ด้วยวิธี AHP-FTOPSIS โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

2.1 ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง

เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงมีการพิจารณาอยู่หลายเกณฑ์ด้วยกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขอบเขตของงานที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นผู้รับเหมาช่วงโครงการขนาดใหญ่ [16] หรือจะเป็นงานฝ้าเพดานและงานประตูเหล็ก [7] อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้นำเกณฑ์ (Criteria: C) การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงและผู้รับเหมาโครงการมาพิจารณา รวม 12 บทความ โดยใช้ความถี่ของการนำเกณฑ์ไปใช้ตั้งแต่ 3 บทความขึ้นไป ปรากฏดังตารางที่ 1 ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยมากที่สุด

ตารางที่ 1 สรุปผลการหาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง

ผู้วิจัย	เกณฑ์
[2]	ราคาที่ยื่นเสนอ,การจัดส่ง,ความสามารถด้านเทคนิค, การจัดการและองค์กร
[3]	คุณภาพ, ความสามารถทางเทคนิค,ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร,การจัดการและองค์กร,สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, ความสามารถด้านการเงิน
[4]	ราคาที่ยื่นเสนอ, คุณภาพ,ประวัติการทำงานที่ผ่านมา, ความสามารถด้านเทคนิค, ความสามารถด้านการเงิน, ผลงานที่ผ่านมา
[6]	คุณภาพ, ความสามารถด้านเทคนิค, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, ความเสี่ยง, เวลา,ผลงานที่ผ่านมา
[7]	ราคาที่ยื่นเสนอ, คุณภาพ, ความสามารถด้านเทคนิค, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, การจัดการและองค์กร, สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, เวลา
[14]	ราคาที่ยื่นเสนอ, คุณภาพ, การจัดส่ง, ประวัติการทำงานที่ผ่านมา, ความสามารถด้านเทคนิค, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, การจัดการและองค์กร, ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์, สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, ความสามารถด้านการเงิน

ตารางที่ 1 สรุปผลการหาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง (ต่อ)

ผู้วิจัย	เกณฑ์
[17]	ราคาที่ยื่นเสนอ, คุณภาพ, การจัดส่ง, ประวัติการทำงานที่ผ่านมา, การรับประกัน, สถานะทางการเงิน, ความสามารถด้านเทคนิค, การปฏิบัติตามขั้นตอน, การติดต่อสื่อสาร, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, ความต้องการ, การจัดการและองค์กร, การควบคุมการปฏิบัติงาน, การบริการซ่อมบำรุง, ทัศนคติ, ความประทับใจ, ความสามารถในการแพ็คสินค้า, ความสัมพันธ์กับคนงาน, ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์, จำนวนงานที่ผ่านมา, อุปกรณ์ที่ช่วยในการฝึกอบรม, ค่าตอบแทน
[18]	สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, ความสามารถด้านการเงิน, ประสิทธิภาพที่ผ่านมา, ผลงานที่ผ่านมา, ทรัพยากรที่มีอยู่ของผู้รับเหมา, ปริมาณงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน
[19]	ราคาที่ยื่นเสนอ, ความสามารถด้านเทคนิค, แผนการชำระเงิน, คนงาน, เครื่องมือและเครื่องจักรอุปกรณ์, ค่าปรับงานล่าช้า
[20]	ราคาที่ยื่นเสนอ, คุณภาพ, ความสามารถด้านเทคนิค, ปริมาณงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน
[21]	คุณภาพ, ความสามารถด้านเทคนิค, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม, ความสามารถด้านการเงิน, ผลงานที่ผ่านมา, ปริมาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน, นวัตกรรมใหม่ๆ
[22]	คุณภาพ, สถานะทางการเงิน, ความสามารถด้านเทคนิค, ชื่อเสียงและสถานภาพขององค์กร, การจัดการและองค์กร, สุขภาพ ความปลอดภัย และสิ่งแวดล้อม, ผลงานที่ผ่านมา, ทรัพยากรที่มีอยู่ของผู้รับเหมา

เมื่อพิจารณาเกณฑ์ทั้งหมด 35 เกณฑ์ พบว่า มีเพียง 12 เกณฑ์ คิดเป็นร้อยละ 34.29 ของจำนวนเกณฑ์ทั้งหมด โดยผู้วิจัยได้ใช้ความถี่ในการคัดเลือกเกณฑ์การพิจารณาจากบทความวิจัยอยู่ระหว่าง 3 – 11 คิดเป็นร้อยละ 25.00 – 91.67 ซึ่งถือว่าเหมาะสมเมื่อเทียบจำนวนของบทความวิจัยทั้งหมด 12 บทความ

2.2 วิธี AHP (วิธีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น)

AHP หรือ Analytic Hierarchy Process เป็นวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) ที่พัฒนาโดย Professor Thomas L. Saaty

ในช่วงทศวรรษ 1980 [23] จุดเด่นของวิธีนี้คือการเปรียบเทียบทางเลือกแบบรายคู่ (Pairwise Comparison) ซึ่งช่วยให้ผู้ตัดสินใจสามารถประเมินความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ได้อย่างเป็นระบบ กระบวนการ AHP เริ่มจากการกำหนดเป้าหมายหลัก จากนั้นแยกปัญหาออกเป็นลำดับชั้น (Hierarchy) ได้แก่ ระดับของเป้าหมาย เกณฑ์ และทางเลือก แล้วดำเนินการเปรียบเทียบแบบรายคู่เพื่อสร้างเมตริกซ์การตัดสินใจ จากนั้นนำข้อมูลในเมตริกซ์การตัดสินใจดังกล่าวมาคำนวณค่าน้ำหนัก (Weight) ของแต่ละเกณฑ์ และตรวจสอบความสอดคล้องของการให้คะแนนด้วยดัชนี CR (Consistency Ratio) ซึ่งค่าดัชนีนี้ไม่ควรเกิน 0.1 สำหรับข้อดีของวิธี AHP เหมาะสำหรับปัญหาที่มีความซับซ้อนที่มีโครงสร้างแบบลำดับชั้น สามารถรองรับทั้งเกณฑ์เชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในหลายบริบท เช่น การจัดลำดับความสำคัญของโครงการ การจัดซื้อจัดจ้าง และการประเมินความเสี่ยง [24,25]

ตารางที่ 2 ค่าคะแนนความสำคัญในการเปรียบเทียบแบบรายคู่ [26]

ค่าระดับคะแนนความสำคัญ	ความหมาย
9	สำคัญสูงสุด
7	สำคัญมากที่สุด
5	สำคัญมาก
3	สำคัญปานกลาง
1	สำคัญเท่ากัน
2,4,6,8	ความสำคัญอยู่ระหว่างชั้น

ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้มีการดัดแปลงขั้นตอนการหาคำตอบงานวิจัยของ [22] ดังนี้

เมื่อผู้ประเมินจะทำการเปรียบเทียบเกณฑ์การพิจารณาแบบรายคู่ จำเป็นต้องสร้างเมตริกซ์การตัดสินใจ ดังสมการที่ (1) และให้ค่าน้ำหนักความสำคัญดังตารางที่ 2 เพื่อพิจารณาความสำคัญของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ต่อจากนั้นในสมการที่ (2) เป็นการหาค่าลักษณะเฉพาะเวกเตอร์ (λ_{max}) และหาค่าปกติของเมตริกซ์แต่ละตัว

$$Aw = \lambda_{max} w \quad (2)$$

หลังจากนั้นเพื่อวัดค่าความสอดคล้องของข้อมูลที่ผู้เชี่ยวชาญแต่ละรายประเมิน ให้ใช้สมการที่ (3) – (4) โดยกำหนดให้ ดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index: CI) เมื่อได้ค่า CI เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการคำนวณหาอัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ration: CR) โดยให้ใช้ดัชนีสุ่มตามจำนวนเกณฑ์ที่ใช้ในการศึกษา สำหรับการศึกษาครั้งนี้มี 12 เกณฑ์ กำหนดให้ค่าดัชนีการสุ่มตัวอย่าง (Random Index: RI) เท่ากับ 1.58 [3] อย่างไรก็ตาม ค่า CR ไม่ควรมากกว่า 0.10 เพราะจะทำให้ผลการเปรียบเทียบแบบรายคู่ถูกปฏิเสธ

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

2.3 วิธี Fuzzy-TOPSIS (วิธีการเรียงลำดับความชอบโดยความคล้ายคลึงกับปัญหาในอุดมคติแบบคลุมเครือ)

วิธีการเรียงลำดับความชอบโดยความคล้ายคลึงกับปัญหาในอุดมคติ (TOPSIS) เป็นวิธีการวิเคราะห์ การตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ซึ่งพัฒนามาจาก Hwang และ Yoon ในปี 1981 และพัฒนาเพิ่มเติมโดย Yoon ในปี 1987 และ Hwang, Lai และ Liu ในปี 1993 เรียกว่า “Fuzzy-TOPSIS” ซึ่งจะนำไปใช้ในการประเมินทางเลือกหลากหลายรายการ โดยเทียบกับเกณฑ์ที่เลือก โดยหลักการของ TOPSIS ทางเลือกอื่นที่ใกล้เคียงกับ Fuzzy Positive Ideal Solution (FPIS) มากที่สุด และไกลจาก Fuzzy Negative Ideal Solution (FNIS) มากที่สุด จะถูกเลือกว่าเหมาะสมที่สุด FPIS ประกอบด้วย ค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละทางเลือก [27]

ทั้งนี้ เกณฑ์เงื่อนไขทางภาษาแบบฟัซซี่สำหรับการให้ค่าคะแนนตัดสินใจของแต่ละเกณฑ์และแต่ละทางเลือกเป็นการ

ให้คะแนนเชิงคุณภาพ ซึ่งเป็นรูปแบบที่ทำให้ผู้ประเมินเข้าใจง่ายและสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คะแนนทางภาษาแบบฟัซซี่ [28]

คะแนนความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ (C)	**คะแนนของแต่ละทางเลือก (S)**	**ตัวเลขคะแนนแบบฟัซซี่**
สำคัญเท่ากัน (EI)	ต่ำมาก (MP)	(1,1,3)
สำคัญน้อย (WI)	ต่ำ (F)	(1,3,5)
ค่อนข้างสำคัญ (SI)	ปานกลาง (MG)	(3,5,7)
สำคัญมาก (VI)	สูง (G)	(5,7,9)
สำคัญอย่างยิ่ง (II)	สูงมาก (VG)	(7,9,9)

อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยได้มีการดัดแปลงขั้นตอนการหาคำตอบงานวิจัยของ [13] สำหรับการศึกษาดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดให้มีผู้รับเหมาช่วงที่ต้องการได้รับการประเมิน n_c คน $S_1 \ldots S_{n_c}$ โดยมีผู้ประเมินทั้งหมด n_d คน $DM_1 \ldots DM_{n_d}$ โดยผู้ประเมินจะทำการประเมินแต่ละความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าคะแนนทางภาษาของแต่ละเกณฑ์ตามคอลัมน์ที่ 1 ในตารางที่ 3 จากนั้นผู้ประเมินจะทำการประเมินผู้รับเหมาช่วงตามเกณฑ์ที่เลือกมาพิจารณา จะได้ค่าคะแนนทางภาษาแต่ละเกณฑ์ในแต่ละทางเลือกตามคอลัมน์ที่ 2 ในตารางที่ 3 จากนั้นนำคะแนนทางภาษาที่ได้มาเปลี่ยนเป็นตัวเลขคะแนนแบบฟัซซี่ตามคอลัมน์ที่ 3 ในตารางที่ 3 เราจะได้ $x_{ijk} = (a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk})$ เป็นคะแนนตัวเลขแบบฟัซซี่สำหรับทางเลือก S_i ในเกณฑ์ที่ C_j ของผู้ประเมิน DM_k และ $w_{jk} = (w_{jk1}, w_{jk2}, w_{jk3})$ แทนตัวเลขคะแนนฟัซซี่ สำหรับเกณฑ์ C_j ของผู้ประเมิน DM_k

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าคะแนนรวมแบบฟัซซี่ สำหรับแต่ละทางเลือก โดยกำหนดให้ $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ เป็นค่าคะแนนรวมแบบฟัซซี่ สำหรับผู้รับเหมาช่วง S_i ในเกณฑ์ C_j โดยหาได้จาก

$$a_{ij} = \min_k (a_{ijk}),\ b_{ij} = \frac{1}{n_d}\sum_{k=1}^{n_d} b_{ijk},\quad c_{ij} = \max_k (c_{ijk}) \qquad (5)$$

และนำมาสร้างเป็นค่าคะแนนรวมแบบฟัซซี่ปรับมาตรฐาน

ขั้นตอนที่ 3 หลังจากได้ค่าคะแนนฟัซซี่รวม จะทำการหาค่า $\tilde{r}_{ij}$ โดยแบ่งเกณฑ์การพิจารณาต้นทุนกับผลประโยชน์

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*}\right) \qquad (6)$$

เมื่อ $c_j^* = \max_i (c_{ij})\ \forall j$ และในกรณีเกณฑ์ที่พิจารณาเป็นต้นทุน

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}}\right) \qquad (7)$$

เมื่อ $a_j^* = \min_i (a_{ij})\ \forall j$ จะได้ค่าคะแนนรวมฟัซซี่ในแต่ละเกณฑ์สำหรับผู้รับเหมาช่วงแต่ละราย ที่อยู่รูปแบบปรับให้เป็นมาตรฐาน $\tilde{R}$ โดย

$$\tilde{R} = \left[\tilde{r}_{ij}\right]_{n_c \times n_m} \text{ เมื่อ } i = 1,\ldots, n_c \text{ และ } j = 1,\ldots, n_m \qquad (8)$$

จากนั้นจะนำมาหาเมตริกซ์ของค่าคะแนนรวมแบบฟัซซี่ที่ได้ ทำให้เป็นมาตรฐานแล้วมาปรับน้ำหนัก จะได้เป็นเมตริกซ์การตัดสินใจแบบฟัซซี่ที่เป็นมาตรฐานปรับน้ำหนัก (Weighted Normalized Fuzzy Detection Matrix) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\tilde{P} = \left[\tilde{p}_{ij}\right]_{n_c \times n_m} \text{ เมื่อ } i = 1,\ldots, n_c \text{ และ } j = 1,\ldots, n_m \qquad (9)$$

โดย $\tilde{p}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \times W_j$

เมื่อ W_j คือ ค่าน้ำหนักเฉลี่ยของแต่ละเกณฑ์ โดยได้จากกระบวนการ AHP

ขั้นตอนที่ 4 ในงานวิจัยนี้ได้มีการการคำนวณค่าคำตอบอุดมคติเชิงบวกแบบฟัซซี่ (Fuzzy Positive Ideal Solution: FPIS), A+ และค่าคำตอบอุดมคติเชิงลบแบบฟัซซี่ (Fuzzy Negative Ideal Solution: FNIS), A- ซึ่งใช้การ

กำหนดค่าเป็น V_i^+ และ V_i^- ตามลำดับ ของแต่ละเกณฑ์ i โดยแบ่งว่าเกณฑ์นั้นเป็นผลประโยชน์ (Benefit) $V_i^+ = (1,1,1)$ และ $\tilde{D}_i^- = (0,0,0)$ หรือเป็นต้นทุน (Cost) $V_i^+ = (0,0,0)$ และ $V_i^- = (1,1,1)$ หลังจากนั้นจะมาหาระยะห่างรวมระหว่างค่าคะแนนฟัซซี่รวมที่เป็นมาตรฐานปรับน้ำหนักแล้วของผู้รับเหมาช่วงแต่ละรายในแต่ละเกณฑ์กับค่า FPIS และ FNIS ได้จากสมการ

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^{n_m} d_p\left(\tilde{p}_{ij}, \tilde{p}_j^+\right) \text{ สำหรับ } i=1,\ldots,n_c \quad (10)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^{n_m} d_p\left(\tilde{p}_{ij}, \tilde{p}_j^-\right) \text{ สำหรับ } i=1,\ldots,n_c \quad (11)$$

โดย d_i^+ และ d_i^- เป็นระยะห่างรวมของคะแนนฟัซซี่รวมของผู้รับเหมาช่วงกับ FPIS และ FNIS ตามลำดับ โดยค่า $d_p(a,b)$ เป็นการหาระยะทางระหว่างค่าคะแนนฟัซซี่ a และ b แบบยุคลิด (Euclidean Distance) โดย $a=(a_1, a_2, a_3)$ และ $b=(b_1, b_2, b_3)$ หาได้โดย

$$d_p(a,b) = \sqrt{\frac{1}{3}\left(a_1-b_1\right)^2 + \left(a_2-b_2\right)^2 + \left(a_3-b_3\right)^2} \quad (12)$$

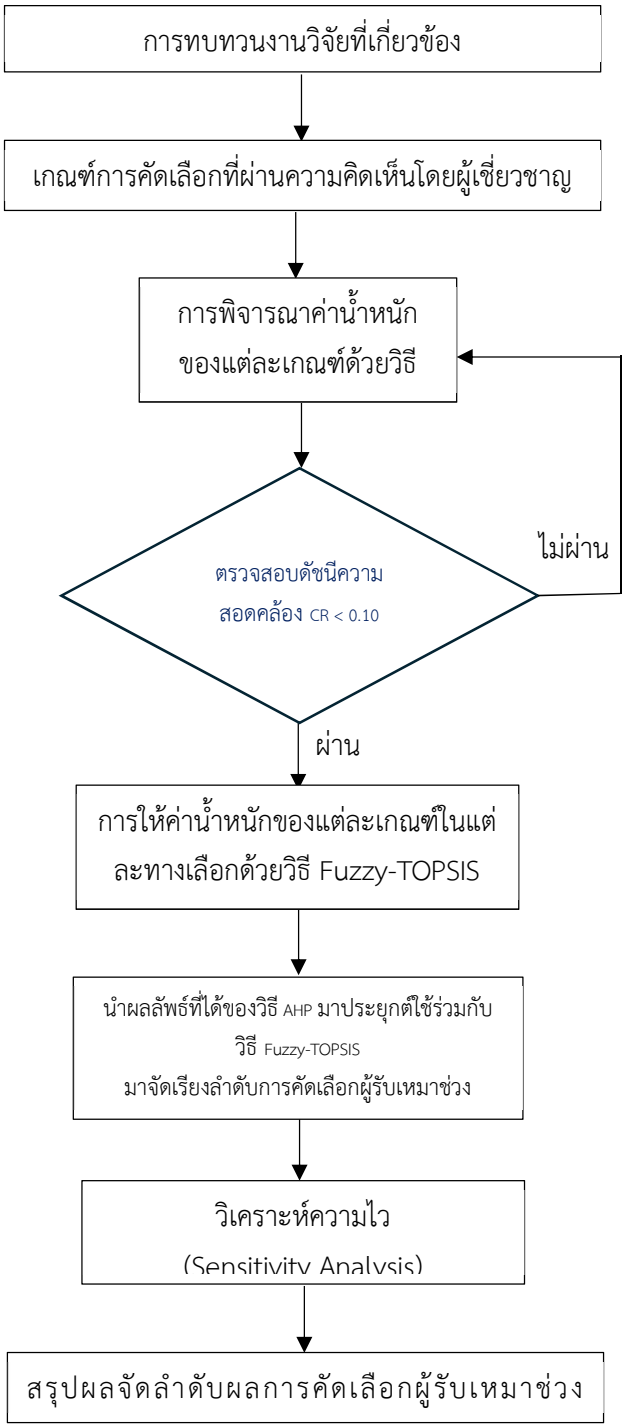
เมื่อได้ค่าระยะห่างรวมของผู้รับเหมาช่วงแต่ละรายกับค่า FPIS และ FNIS แล้ว จะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิด (Closeness Coefficient) ได้ โดยใช้สมการที่ (13)

$$CC_i = \frac{d_i^+}{\left(d_i^+ + d_i^-\right)} \text{ สำหรับ } i=1,\ldots,n_c \quad (13)$$

เมื่อ CC_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดของผู้รับเหมาช่วงคนที่ i โดยผู้รับเหมาช่วงที่มีค่า CC_i มากที่สุดจะได้เป็นผู้ได้รับคัดเลือก

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ส่วนนี้เป็นการแสดงขั้นตอนการดำเนินงานและผลการวิเคราะห์ข้อมูลของการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงกรณีศึกษา ด้วยวิธี AHP-FTOPSIS รายละเอียดปรากฏดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

จากรูปที่ 1 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ว่า เมื่อผู้วิจัยทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมา หรือผู้รับเหมาช่วงโครงการก่อสร้าง หลังจากนั้นดำเนินการพิจารณาคัดเลือกเกณฑ์โดยอาศัยความถี่ของเกณฑ์ที่มีซ้ำกันของแต่ละบทความ ตั้งแต่ 3 บทความขึ้นไป ต่อจากนั้นนำเกณฑ์ที่ได้มาออกแบบสอบถามด้วยวิธี AHP กำหนดค่าน้ำหนักโดยผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนสำคัญกับโครงการ และออกแบบสอบถามด้วยวิธี Fuzzy-TOPSIS สำหรับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง หลังจากนั้นจึงนำมาใช้วิธี AHP-FTOPSIS ในการพิจารณาคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง ต่อจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ความไวเพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าน้ำหนัก หลังจากนั้นสรุปผลการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง

3.1 ผลการพัฒนาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง

เมื่อทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงหรือผู้รับเหมาโครงการแล้ว พบว่า เกณฑ์ที่ผ่านการพัฒนาจากเดิม 35 เกณฑ์ คงเหลือเพียง 12 เกณฑ์ที่มีความสอดคล้องกับกรณีศึกษา ปรากฏดังตารางที่ 4 หลังจากนั้นจึงนำเกณฑ์ที่พัฒนาแล้ว ไปดำเนินการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญด้วยวิธี AHP-FTOPSIS ต่อไป

3.2 ผลการกำหนดค่าน้ำหนักเกณฑ์ด้วยวิธี AHP

สำหรับขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีผู้ประเมินที่มีส่วนสำคัญกับโครงการดำเนินการให้ค่าคะแนนของแต่ละเกณฑ์ จำนวน 3 คน [8] ประกอบด้วย ผู้บริหารบริษัท (ผู้รับเหมาหลักโครงการ) จำนวน 1 คน ผู้จัดการโครงการ จำนวน 1 คน และวิศวกรโครงการ จำนวน 1 คน ซึ่งเป็นบุคคลที่มีประสบการณ์ในการทำงาน อย่างน้อย 5 ปี และมีอำนาจตัดสินใจของโครงการ ดังนั้น ข้อมูลจากแบบสอบถามจึงมีความเหมาะสมและครบถ้วน ทั้งนี้ การคำนวณด้วยวิธี AHP ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ R studio Version 4.2.1 ในการหาคำตอบ โดยโปรแกรมดังกล่าวมีจุดเด่น คือ มีความรวดเร็วในการหาคำตอบ และให้คำตอบที่แม่นยำและถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้ Spreadsheet ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดจากการที่ต้องนำเข้าข้อมูลในตารางเมตริกซ์ อีกทั้งยังเป็นโปรแกรม Opensource ที่บุคคลทั่วไปสามารถติดตั้งและใช้งานได้ ส่วนจุดด้อย คือ โปรแกรมนี้สามารถคำนวณหาคำตอบได้ ตั้งแต่ 3 ทางเลือกขึ้นไป

ตารางที่ 4 เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง

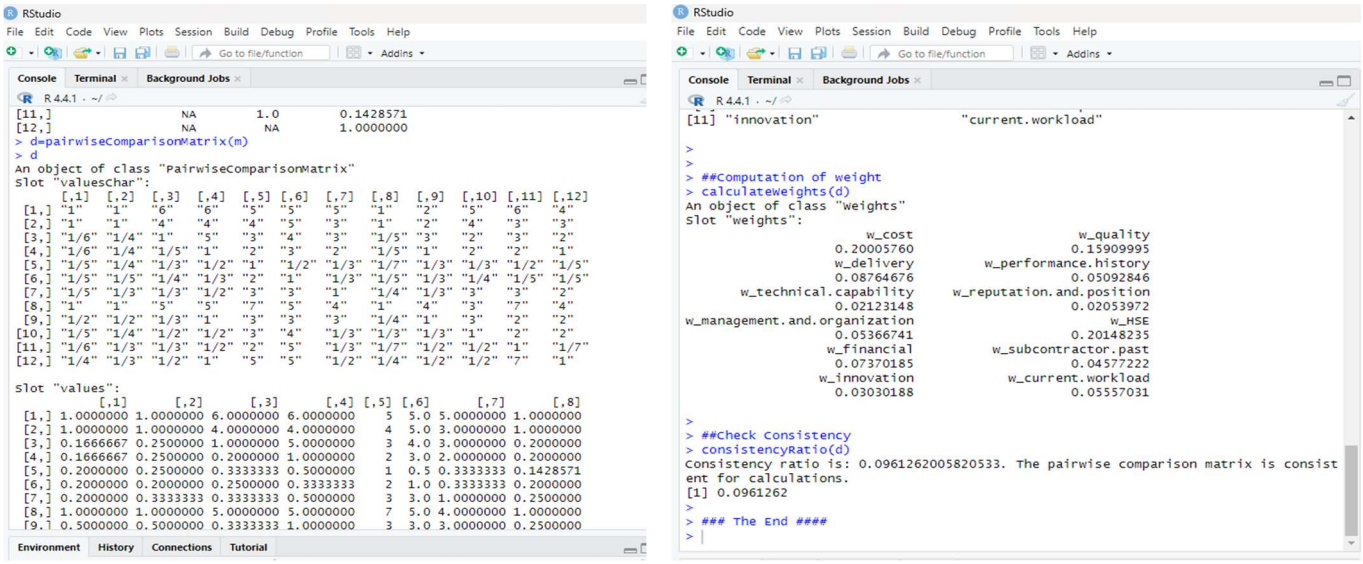
รหัส	เกณฑ์ (C)
C_1	ราคาที่ยื่นเสนอ
C_2	คุณภาพ
C_3	การจัดส่ง
C_4	ประวัติการทำงาน
C_5	ความสามารถด้านเทคโนโลยี
C_6	ชื่อเสียงและสถานภาพทางสังคม
C_7	การจัดการและองค์กร
C_8	สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม
C_9	ความสามารถทางด้านการเงิน
C_{10}	ประสบการณ์ที่ผ่านมาของผู้รับเหมาช่วง
C_{11}	นวัตกรรมที่ใช้ในโครงการ
C_{12}	ปริมาณงานที่มีอยู่ในปัจจุบัน

โดยพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง (S) ประกอบด้วย 12 เกณฑ์ ปรากฏดังตารางที่ 5-6 ตามขั้นตอนการหาคำตอบของโปรแกรม R studio ตามลำดับ ทั้งนี้ สามารถยกตัวอย่างการประเมินเกณฑ์ (C_1) ของผู้เชี่ยวชาญ รายที่ 1 (DM_1) ดังนี้

เมื่อบันทึกข้อมูลลงใน Spreadsheet เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้นำเข้าข้อมูลผ่านคำสั่งการคำนวณหาคำตอบวิธี AHP ปรากฏดังรูปที่ 2 ซึ่งเป็นตัวอย่างการประเมินของผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1

ตารางที่ 5 ตัวอย่างผลการประเมินค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์ของผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1 (DM_1)

เกณฑ์	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	ค่าน้ำหนัก
C_1	1.000	1.000	6.000	6.000	5.000	5.000	5.000	1.000	2.000	5.000	6.000	4.000	0.2001
C_2	1.000	1.000	4.000	4.000	4.000	5.000	3.000	1.000	2.000	4.000	3.000	3.000	0.1591
C_3	0.167	0.250	1.000	5.000	3.000	4.000	3.000	0.200	3.000	2.000	3.000	2.000	0.0875
C_4	0.167	0.250	0.200	1.000	2.000	3.000	2.000	0.200	1.000	2.000	2.000	1.000	0.0509
C_5	0.200	0.250	0.333	0.500	1.000	0.500	0.333	0.143	0.333	0.333	0.500	0.200	0.0212
C_6	0.200	0.200	0.250	0.333	2.000	1.000	0.333	0.200	0.333	0.250	0.200	0.200	0.0205
C_7	0.200	0.333	0.333	0.500	3.000	3.000	1.000	0.250	0.333	3.000	3.000	2.000	0.0537
C_8	1.000	1.000	5.000	5.000	7.000	5.000	4.000	1.000	4.000	3.000	7.000	4.000	0.2015
C_9	0.500	0.500	0.333	1.000	3.000	3.000	3.000	0.250	1.000	3.000	2.000	2.000	0.0737
C_{10}	0.200	0.250	0.500	0.500	3.000	4.000	0.333	0.333	0.333	1.000	2.000	2.000	0.0458
C_{11}	0.167	0.333	0.333	0.500	2.000	5.000	0.333	0.143	0.500	0.500	1.000	0.143	0.0303
C_{12}	0.250	0.333	0.250	1.000	5.000	5.000	0.500	0.250	0.500	0.500	7.000	1.000	0.0556



รูปที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณหาคำตอบของผู้เชี่ยวชาญรายที่ 1 ด้วยโปรแกรม R studio

จากผลการวิเคราะห์ตามตารางที่ 6 สามารถยกตัวอย่างการคำนวณการหาคำตอบของ เกณฑ์ที่ 1 จากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน ดังนี้ การหาค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ $\frac{(0.2001 + 0.1970 + 0.2015)}{3} = 0.1995$ อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง จำนวน 12 เกณฑ์ พบว่า เกณฑ์ที่มีค่าน้ำหนักสูงสุด ได้แก่ C_1 มีค่าเท่ากับ 0.1995, C_2 มีค่าเท่ากับ 0.1614 และ C_8 มีค่าเท่ากับ 0.1493 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ผลการประเมินค่าน้ำหนักแต่ละเกณฑ์ของผู้เชี่ยวชาญ 3 ราย

เกณฑ์	DM_1	DM_2	DM_3	ค่าน้ำหนักเฉลี่ย
C_1	0.2001	0.1970	0.2015	0.1995
C_2	0.1591	0.1841	0.1409	0.1614
C_3	0.0875	0.1308	0.0230	0.0804
C_4	0.0509	0.0995	0.0353	0.0619
C_5	0.0212	0.0770	0.0685	0.0556
C_6	0.0205	0.0642	0.0444	0.0430
C_7	0.0537	0.0617	0.1201	0.0785
C_8	0.2015	0.0563	0.1900	0.1493
C_9	0.0737	0.0443	0.0721	0.0634
C_{10}	0.0458	0.0315	0.0468	0.0413
C_{11}	0.0303	0.0253	0.0291	0.0282
C_{12}	0.0556	0.0286	0.0282	0.0375
CR	0.0961	0.0946	0.0947	

ตารางที่ 7 ผลการให้คะแนนทางภาษาของแต่ละเกณฑ์ในผู้รับเหมาช่วงแต่ละราย

เกณฑ์	DM_1			DM_2			DM_3		
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3
C_1	G	G	VG	G	G	G	VG	VG	VG
C_2	G	MG	MG	G	MG	G	VG	G	VG
C_3	G	G	MG	MG	F	G	G	VG	VG
C_4	MG	F	F	MG	F	G	G	G	VG
C_5	MG	MG	MG	MG	MG	G	MG	G	G
C_6	F	G	MG	F	G	G	F	G	G
C_7	MG	MG	MG	MG	F	MG	MG	G	G
C_8	F	MG	MG	MP	MG	MG	G	VG	G
C_9	MG	MG	MG	MG	MG	MG	G	G	G
C_{10}	MG	G	MG	F	G	G	G	G	VG
C_{11}	MG	G	F	F	MG	MG	MG	G	G
C_{12}	F	F	MG	MG	G	MG	MG	VG	G

3.3 ผลการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงโดยการประยุกต์ใช้วิธี AHP-FTOPSIS

โดยพิจารณาจากวัตถุประสงค์ของการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง ประกอบด้วย 12 เกณฑ์ และ 3 ทางเลือก ปรากฏดังตารางที่ 7-8 ทั้งนี้ สามารถยกตัวอย่างการคำนวณเกณฑ์ (C_1) ของผู้รับเหมาช่วงรายที่ 1 (ทางเลือก) ดังนี้

จากตารางที่ 7 แสดงให้เห็นค่าภาษาของการตัดสินใจเลือกผู้รับเหมาช่วงในแต่ละเกณฑ์ทางเลือก ยกตัวอย่างเช่น C_1, S_1, DM_1, DM_2, DM_3 มีค่าภาษา คือ G, G, VG มีค่าตัวเลขคะแนนแบบฟัซซี่ คือ (5,7,9) (5,7,9) (7,9,9) จากนั้นจึงดำเนินการคำนวณหาคำตอบโดยใช้สมการที่ (5) – (9)

จากตารางที่ 8 ใช้สมการที่ (10) – (13) ในการหาคำตอบผลการจัดลำดับความสำคัญของผู้รับเหมาช่วง พบว่าผู้รับเหมาช่วงรายที่ 3 มีค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดสูงสุดเท่ากับ 0.6678 รองลงมา ผู้รับเหมาช่วงรายที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดเท่ากับ 0.3620 และสุดท้ายผู้รับเหมาช่วงรายที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ความใกล้ชิดเท่ากับ 0.3615 ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ผลการคำนวณหาระยะห่างรวมระหว่างค่าคะแนนฟัซซี่รวม

เกณฑ์	S_1		S_2		S_3	
	$d_p\left(\tilde{p}_{1j}, \tilde{p}_j^+\right)$	$d_p\left(\tilde{p}_{1j}, \tilde{p}_j^-\right)$	$d_p\left(\tilde{p}_{2j}, \tilde{p}_j^+\right)$	$d_p\left(\tilde{p}_{2j}, \tilde{p}_j^-\right)$	$d_p\left(\tilde{p}_{3j}, \tilde{p}_j^+\right)$	$d_p\left(\tilde{p}_{3j}, \tilde{p}_j^-\right)$
C_1	0.0303	0.9707	0.0303	0.9698	0.0418	0.9996
C_2	0.8710	0.1329	0.8955	0.1220	0.9070	0.6430
C_3	0.0179	0.9839	0.0472	0.9669	0.0001	0.9999
C_4	0.9596	0.0439	0.9628	0.0439	0.5795	0.7687
C_5	0.9604	0.0418	0.9624	0.0407	0.5797	0.7656
C_6	0.0267	0.9781	0.0069	0.9933	0.0001	0.9999
C_7	0.9441	0.0590	0.9489	0.0557	0.5820	0.7452
C_8	0.9261	0.0936	0.9032	0.1058	0.5817	0.7557
C_9	0.0144	0.9869	0.0144	0.9869	0.0001	0.9999
C_{10}	0.9771	0.0274	0.9710	0.0313	0.5780	0.7943
C_{11}	0.9835	0.0193	0.9844	0.0187	0.5777	0.7991
C_{12}	0.9781	0.0256	0.9755	0.0266	0.5780	0.7936
d_i^+	7.6820		7.7025		5.0057	
d_i^-	4.3630		4.3616		10.0646	
CC_i	0.3620		0.3615		0.6678	
ผลการจัดลำดับ	2		3		1	

3.4 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis)

งานวิจัยครั้งนี้ ได้มีการวิเคราะห์ความไวเพื่อเป็นการพิจารณาผลกระทบของเกณฑ์ค่าน้ำหนักต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการจัดลำดับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง [12] นอกจากนี้การวิเคราะห์ความไวในกระบวนการ MCDM ถือเป็นแนวทางที่ควรปฏิบัติ เพราะความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของค่าน้ำหนักในแต่ละเกณฑ์อาจส่งผลต่อค่าน้ำหนักโดยรวม [29] โดยผู้วิจัยได้นำค่าความไว ประกอบด้วย 10%, 20%, 40%, 60%, 80% และ 90% มาปรับค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ที่ส่งผลต่อค่า d_i^+ และ d_i^- ปรากฏดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความไว

% ความไว	d_i^+			d_i^-			ผลการเรียงลำดับ
	S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	
10%	8.4581	8.4727	5.5063	4.7992	4.7978	11.0711	$S_3 > S_1 > S_2$
20%	9.2270	9.2430	6.0069	5.2354	5.2339	12.0775	$S_3 > S_1 > S_2$
40%	10.7648	10.7835	7.0080	6.1077	6.1062	14.0905	$S_3 > S_1 > S_2$
60%	12.3027	12.3240	8.0091	6.9800	6.9786	16.1034	$S_3 > S_1 > S_2$
80%	13.8405	13.8645	9.0103	7.8523	7.8509	18.1163	$S_3 > S_1 > S_2$
90%	14.6094	14.6347	9.5109	8.2885	8.2870	19.1228	$S_3 > S_1 > S_2$

จากผลการวิเคราะห์ความไวต่อค่าอุดมคติเชิงบวก (d_i^+) และค่าอุดมคติเชิงลบ (d_i^-) พบว่า ไม่ส่งผลต่อการจัดลำดับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงกรณีศึกษา เนื่องจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความไวที่ได้ไม่มีผลต่อลำดับผู้รับเหมาช่วง

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงในงานสถาปัตยกรรมมีการพิจารณาเกณฑ์ที่หลากหลายในโครงการก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์สำคัญในการพิจารณาเกณฑ์ด้านสุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการก่อสร้าง ทั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแบบจำลองการตัดสินใจ MCDM เพื่อให้ผู้บริหารโครงการสามารถตัดสินใจเลือกผู้รับเหมาช่วงในงานสถาปัตยกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการประยุกต์ใช้วิธี AHP-FTOPSIS มาช่วยในการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงจำนวน 3 ทางเลือก

ผลการศึกษาพบว่า ผู้รับเหมารายที่ 3 ผ่านการคัดเลือกด้วยค่าน้ำหนัก 0.6678 อันดับที่ 2 ผู้รับเหมารายที่ 1 ค่าน้ำหนัก 0.3620 และอันดับสุดท้าย ผู้รับเหมารายที่ 2 ค่าน้ำหนัก 0.3615 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ [10] ที่เปรียบเทียบวิธี Fuzzy-AHP และวิธี Fuzzy-TOPSIS โดยให้เหตุผลว่า วิธีดังกล่าวส่งผลให้ค่าคะแนนสูงกว่าวิธี AHP และวิธี TOPSIS ซึ่งส่งผลให้ลำดับที่ 1 ตรงกัน อย่างไรก็ตาม อาจกล่าวเพิ่มเติมได้อีกว่า วิธีปกติที่ไม่มีการเพิ่มวิธี Fuzzy เข้าไปจำเป็นต้องให้การอบรมความรู้ในการประเมินอย่างชัดเจน ในขณะที่วิธี Fuzzy-TOPSIS เป็นตัวแปรด้านภาษาที่เข้าใจง่าย ซึ่งไม่จำเป็นต้องอบรมผู้ประเมิน ทั้งนี้อาจเป็นจุดอ่อนสำหรับผู้ประเมินในการศึกษาครั้งนี้จึงทำให้ผลลัพธ์มีความแตกต่างกัน ส่วนมุมมองในการหาคำตอบ พบว่า วิธี AHP มีการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าวิธี Fuzzy-TOPSIS สอดคล้องกับงานวิจัยของ [11]

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าน้ำหนักเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง สูงสุด 3 อันดับแรก จากทั้งหมด 12 เกณฑ์ พบว่า เกณฑ์ C_1 มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.1995 เกณฑ์ C_2 มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.1614 และ เกณฑ์ C_8 มีค่าน้ำหนักเท่ากับ 0.1493 ตามลำดับ ตรงข้ามกับงานวิจัยของ [7] ที่ให้เกณฑ์สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม เกณฑ์คุณภาพและเกณฑ์ราคา มีความสำคัญอันดับ 1, 2, 3 ตามลำดับ ทั้งนี้ผู้วิจัยมองว่ายังคงสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้ ที่มุ่งเน้นการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่ สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นการก่อสร้างอาคารในโรงพยาบาล ตรงกันข้ามกับการคัดเลือกผู้รับเหมาช่วง ในขณะที่งานวิจัยนี้ ให้ความสำคัญกับเกณฑ์คุณภาพ และเกณฑ์สุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม ซึ่งตรงกันข้ามกับงานวิจัยของ [21] ที่ให้ความสำคัญกับเกณฑ์ความสามารถทางเทคนิค เท่ากับ 0.2267 เกณฑ์คุณภาพเท่ากับ 0.1547 และเกณฑ์ประวัติการทำงาน เท่ากับ 0.1262 ตามลำดับ เช่นกับงานวิจัยของ [25] ที่ให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์สุขภาพและความปลอดภัย ต่ำสุดเท่ากับ 0.1310 ในขณะที่ให้ค่าน้ำหนักเกณฑ์ความสามารถด้านเทคนิคสูงสุดเท่ากับ 0.2430

ทั้งนี้ การศึกษาดังกล่าวยังสะท้อนให้เห็นว่า การบริหารโครงการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพควรพิจารณาคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงที่ให้ความสำคัญกับประเด็นสุขภาพ ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อมด้วย เพื่อแสดงถึงความรับผิดชอบต่อสังคมส่วนรวม อีกทั้งวิธี AHP-FTOPSIS ยังแสดงให้เห็นถึงการพิจารณาแบบสนับสนุนการตัดสินใจที่สำคัญในโครงการก่อสร้าง ในขณะที่ผลการวิเคราะห์ความไว ไม่พบว่าความคลาดเคลื่อนของค่าน้ำหนักที่ส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ เมื่อเทียบกับเกณฑ์อื่น ๆ ผลจากการได้ผู้รับเหมาช่วงที่ดี ทำให้โครงการกรณีศึกษาได้รับประโยชน์ดังนี้ (1) โครงการแล้วเสร็จตามเวลาที่กำหนด (2) ผลงานของผู้รับเหมาช่วงส่งผลให้โครงการโดยภาพรวมมีคุณภาพ และ (3) โครงการดังกล่าวสามารถดำเนินการภายใต้งบประมาณที่ระบุไว้

การศึกษาครั้งนี้เป็นกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารของภาครัฐ ซึ่งมีรูปแบบ และกระบวนการดำเนินงานภายใต้ระเบียบของหน่วยงานราชการ อีกทั้งยังเป็นโครงการก่อสร้างนอกเขตกรุงเทพ และปริมณฑล ทำให้การคัดเลือกผู้รับเหมาช่วงภายในท้องถิ่นมีข้อจำกัด ทั้งนี้ผู้บริหารโครงการยังคำนึงถึงการส่งเสริมอาชีพและรายได้ให้กับท้องถิ่นเป็นสำคัญ ข้อจำกัดของการศึกษาครั้งนี้เป็นโครงการก่อสร้างภาครัฐ ยังพบว่า ผู้รับเหมาช่วงที่มีโอกาสเข้ามาเป็นทางเลือกมีจำนวนน้อย เนื่องจากต้องเป็นผู้ประกอบการที่มีลักษณะโครงสร้าง

ธุรกิจที่ชัดเจนและมีประสบการณ์ในการดำเนินงานร่วมกับโครงการภาครัฐ อีกทั้งวิธีการหาคำตอบของ AHP-FTOPSIS อาจไม่ใช่วิธีการที่แม่นยำ หากมีการเปลี่ยนวิธีการหรือมีจำนวนผู้เชี่ยวชาญในการประเมินเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ปัจจัยดังกล่าวอาจใช้เครื่องมืออื่น ๆ ด้าน MCDM ที่มีลักษณะการวิเคราะห์และบูรณาการทั้งแบบปรนัย (Subjective Rating) และแบบวัตถุประสงค์ (Objective Rating) ได้ ยกตัวอย่างงานวิจัยของ [30] ได้นำเทคนิค Bayesian Best–Worst Method (BWM), Fuzzy- Analytic Hierarchy Process (FAHP), Entropy Weight Method (EWM), Game Theory มาเปรียบเทียบร่วมกัน งานวิจัยของ [31] ได้นำเทคนิค BWM และ FTOPSIS มาคัดเลือกการใช้เทคโนโลยีที่ยั่งยืนในการผลิตแบบเติมแต่ง

5. ข้อเสนอแนะการวิจัยครั้งนี้

ส่วนเกณฑ์การคัดเลือกดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกิจกรรมอื่น อาทิเช่น งานติดตั้งระบบประปาและสุขภัณฑ์ งานระบบไฟฟ้า และงานระบบท่อทางการแพทย์ รวมถึงงานซ่อมบำรุงต่าง ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน อีกทั้งยังนำไปใช้กับอาคารสาธารณะต่าง ๆ ได้ เช่น อาคารสถานศึกษา โรงพยาบาล อาคารสำนักงานของภาครัฐ รวมถึงอาคารที่พักอาศัย ได้แก่ โรงแรม อพาร์ทเม้นท์ และคอนโดมิเนียม เป็นต้น ในด้านวิธีการหาคำตอบสามารถเพิ่มเติมหรือพัฒนาเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาโครงการ หรือผู้รับเหมาช่วงแต่ละกิจกรรมให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์การศึกษา ทั้งนี้ อาจมีการพัฒนาเกณฑ์ต่าง ๆ ขึ้นมาใหม่ ภายใต้บริบทที่เหมาะสมกับกรณีศึกษา เช่น แนวคิดลีน รวมถึงกรณีศึกษาในงานอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมการยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตอาหาร อุตสาหกรรมบริการด้านโลจิสติกส์ เป็นต้น อีกทั้งควรเพิ่มวิธี TOPSIS, Ranking of Alternatives with Weights of Criterion (RAWEC), Particle Image Velocimetry (PIV), and Root Assessment Method (RAM) [32] และวิธี PROMETHEE [33] เพื่อให้ได้ผลการคัดเลือกมีความชัดเจนเหมาะสมกับโครงการที่ศึกษานั้น ๆ ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหาร และวิศวกรโครงการก่อสร้างอาคารวินิจฉัยและรักษา โรงพยาบาลอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้เข้าไปมีส่วนร่วมในการศึกษาปัญหา และแลกเปลี่ยนแนวทางการปฏิบัติงาน ตลอดจนข้อมูลอันเป็นประโยชน์กับงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] วรพันธ์ จิตต์อาจหาญ และมงคล อัศวดิลกฤทธิ์. การศึกษาปัญหางานโครงสร้างและงานสถาปัตยกรรมภายหลังการส่งมอบงานอาคารชุดแนวราบ. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 27, วันที่ 24-26 สิงหาคม 2565 จ.เชียงราย;* 2565. CEM07-1-CEM07-7.

[2] Septian A. subcontractor selection review industry XYZ with analytic network process (ANP) method. *Proceedings of the 6th International Seminar on Science and Technology.* 2020. 558-562.

[3] Ariyanti FD, Putri AC. Selection of subcontractor vendor using analytic hierarchy process (AHP) method in construction company. *Proceedings of the 4th International Conference on Eco Engineering Development.* 2020.

[4] Polat G. Subcontractor selection using the integration of the AHP and PROMETHEE methods. *Journal of Civil Engineering and Management.* 2016;22(8): 1042–1054.

[5] Deretarla Ö, Erdebilli B, Gündoğan M. An integrated analytic hierarchy process and complex proportional assessment for vendor selection in supply chain management. *Decision Analytics Journal.* 2023;6: 100155.

[6] Demirkesen S, Bayhan HG. Subcontractor selection with Choosing-By-Advantages (CBA) method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471.

[7] Putri CG, Nusraningrum D. Subcontractors selection of building construction project using analytical hierarchy process (AHP) and

technique for others reference by similarity (TOPSIS) methods. *Journal of Theoretical and Applied Management.* 2022;15(2): 261-273.

[8] Park CJ, Kim SY, Nguyen MV. Fuzzy TOPSIS application to rank determinants of employee retention in construction companies: south Korean case. Sustainability. 2021;13: 5787.

[9] Rouyendegh BD, Yildizbasi A, Ustunyer P. Intuitionistic Fuzzy TOPSIS method for green supplier selection problem. *Soft Computing.* 2020;24: 2215–2228.

[10] Ramadhanti VI, Pulansari F. Integration of fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS for green supplier selection of mindi wood raw materials. *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*. 2022;6(1): 1-13.

[11] Nazim M, Mohammad WC, Sadiq M. A comparison between fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods to software requirements selection. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61: 10851–10870.

[12] Issa U, Saeed F, Miky Y, Alqurashi M, Osman E. Hybrid AHP-Fuzzy TOPSIS approach for selecting deep excavation support system. *Buildings*. 2022; 12(295).

[13] Sarwar A, Xu J, Zeng Z, Hashim M. AHP and FUZZY TOPSIS methods for green supplier selection and evaluation. *International Journal of Advanced Research*. 2017;5(3): 625-635.

[14] Haddad AN, da Costa BBF, de Andrade LS, Hammad A, Soares CAP. Application of fuzzy-TOPSIS method in supporting supplier selection with focus on HSE criteria: a case study in the oil and gas industry. *Infrastructures.* 2021;6(8): 105.

[15] Vardin AN, Ansari R, Khalilzadeh M, Antucheviciene J, Bausys R. An Integrated decision support model based on BWM and Fuzzy-VIKOR techniques for contractor selection in construction projects. *Sustainability*. 2021;13:6933.

[16] Koçak S, Kazaz A, Ulubeyli S, Subcontractor selection with additive ratio assessment method. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation.* 2018;1(1): 18-32.

[17] Nugrohoc R. E, Iskandar M. S. Application of AHP for Supplier Selection in Construction Companies. *Saudi Journal of Engineering and Technology*. 2020;5(4): 179-186.

[18] Balubaid M, Alamoudi R. Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) to Multi-Criteria Analysis for Contractor Selection. *American Journal of Industrial and Business Management.* 2015;5: 581-589.

[19] Ulubeyli S, Kazaz A, Arslan V. A structured selection process for small and medium enterprises in construction industry: case of international projects. *Periodicals of Engineering and Natural Scinces*. 2017;5(3): 263-270.

[20] Fridkin S, Kordova S. Examining criteria for choosing subcontractors for complex and multi-systems projects. *Sustainability*. 2022; 14:14988.

[21] Tantarto T, Hermawan P. Proposed improvement of subcontractor selection process at PT Bangun Beton. *European Journal of Business and Management Research.* 2023;8(4): 146-153.

[22] Das P, Prasad PS. Selection of construction contractor by analytical hierarchy process (AHP). *International Journal of Scientific Research and Engineering Development*. 2021;4(4): 320-326.

[23] Razi PZ, Ramli NI, Ali MI, Ramadhansyah PJ. Selection of contractor by using analytical hierarchy process (AHP). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 712: 012014.

[24] Sharma A, Batra RK. Application of the analytical hierarchy process (AHP) in the selection of contractors/consultants. *International Journal*

of Current Engineering and Scientific Research. 2016;3(1): 128-134.

[25] Chiang FY, Yu VF, Luarn P. Construction Contractor Selection in Taiwan using AHP. *International Journal of Engineering and Technology.* 2017;9(3): 211-215.

[26] Nurjaman I, Listyantoko RA. Analytic hierarchy process for determination of decision making in the selection of contractors. *Industry Xplore*. 2023; 8(1).

[27] Ulfiana D, Suharyanto S. Analysis of fuzzy TOPSIS method in determining priority of small dams construction. *Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan.* 2019;21(2): 46 – 53.

[28] Kuei-Hu C, Hsin-Hung L, Bo-Jiun H. Combining the fuzzy analytic hierarchy process method with the weighted aggregated sum product assessment method to address internet platform selection problems in an environment with incomplete information. *Applied Sciences.* 2024;14: 4390.

[29] Chia-Nan W, Chao-Fen P, Hoang-Phu N, Pei-Chun F. Integrating Fuzzy AHP and TOPSIS Methods to Evaluate. *Mathematics*. 2023; 11: 1793.

[30] Janmontree J, Shinde A, Zadek H, Sebastian Trojahn S, Ransikarbum K. A strategic hydrogen supplier assessment using a hybrid MCDA framework with a game theory-driven criteria analysis. *Energies*. 2025;18: 3508.

[31] Anussornnitisarn P, Nivasanon C, Kim NN, Ransikarbum K. Sustainable technology selection in additive manufacturing: an integrated fuzzy decision analysis framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025;138: 1177–1196.

[32] Giang NT, Thinh HX, Giang NT. Comparing subjective weighting methods in multi-criteria decision-making: an application to electric bicycle ranking. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2025;15(2): 21963-21969.

[33] Schär S, Pohl E, Geldermann J. Analysing the compensatory properties of the outranking approach PROMETHEE. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2025;32: e70013.