



วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. UBU Engineering Journal

บทความวิจัย

การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งแบบหลายปัจจัยในโครงข่ายถนนในเมือง: กรณีศึกษาจังหวัดขอนแก่น

The multicriteria traffic environmental impact appraisal in urban road network: A case study of Khon Kaen

วรัญญู อุทธา¹ พนกฤษณ คลังบุญครอง^{1*} พนมชัย วีระยุทธศิลป์² วินัย ศรีอำพร³ สุรัตน์ ประมวลศักดิ์กุล³

¹ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

² สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Waranyu Auttha¹ Pongrid Klungboonkrong^{1*} Panomchai Veerayutsil² Winai Sriamporn³
Surat Pramualsakdikul³

¹ Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40000

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40000

³ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40000

* Corresponding author.

E-mail: ponklung@gmail.com; Telephone: 08 1544 2187

วันที่รับบทความ 24 เมษายน 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 13 พฤษภาคม 2563; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 22 พฤษภาคม 2563

วันที่ตอบรับบทความ 29 พฤษภาคม 2563

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งแบบหลายปัจจัยบนโครงข่ายถนนในพื้นที่ศูนย์กลางธุรกิจของเมือง ในเขตผังเมืองรวมเมืองขอนแก่น โดยประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model Method, MMM) บูรณาการกับวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process, AHP) ในการประเมินค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (Composite Environmental Impact Score, CEIS) ของช่วงถนน 39 ช่วง เพื่อประมาณการผลกระทบสิ่งแวดล้อม 3 ปัจจัย ได้แก่ (1) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) (2) ค่าระดับเสียงจากการจราจร และ (3) ความเสี่ยงของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุขณะข้ามถนน เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละช่วงถนนตามระดับของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งของบริเวณซึ่งกำลังเผชิญกับปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมและบ่งบอกสาเหตุของปัญหาดังกล่าวได้ ผลจากงานวิจัยพบว่าช่วงถนนที่มีค่า CEIS สูง ได้แก่ ช่วงถนนที่ 9 10 11 และ 12 บนถนนศรีจันทร์ โดยพบว่าค่าระดับเสียงจากการจราจรคือสาเหตุหลักของปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง ผลจากการประเมินครั้งนี้จะสามารถช่วยผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถจัดการปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรงบประมาณเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างตรงประเด็นและมีประสิทธิภาพสูงสุด

คำสำคัญ

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจร กระบวนการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มลพิษทางอากาศ มลพิษทางเสียง

Abstract

This paper described an evaluation of the multiple criteria traffic and transportation environmental impact on the Central Business District (CBD) road networks in the city of Khon Kaen. The Mathematical Model Method (MMM) approach was adopted to estimate the levels of traffic and transportation environmental impacts of 39 road segments for 3 factors including (1) CO concentrations; (2) Noise levels and (3) Pedestrian accident risk. The Analytic Hierarchy Process (AHP) method was also applied to calculate the Composite Environmental Impact Scores (CEIS) of those 39 road segments. The computed CEIS can be used to prioritize each road segment according to its degree of multiple criteria traffic & Transport environmental impacts, specify the problem locations and identify the likely causes of such problems. The results of research show that those road segments with high CEIS values are road segment No. 9, 10, 11 and 12 and traffic noise levels are the main cause of such problems. These findings can be used to assist decision makers to prioritize and relevantly and effectively allocate their limited budgets for solving problems.

Keywords

analytic hierarchy process; traffic environmental impact; multi attribute decision making; mathematical model method; air pollution; noise pollution

1. บทนำ

ในต้นศตวรรษที่ 21 มีประชากรทั่วโลกที่มีการตั้งถิ่นฐานอยู่ในเขตชุมชนเมืองกว่าร้อยละ 50 และคาดการณ์ว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 60 ในปี ค.ศ. 2030 [1] การเพิ่มขึ้นของประชากร เศรษฐกิจและสังคมรวมทั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศใช้ประโยชน์ที่ดิน ส่งผลให้การจราจรและการขนส่งบนท้องถนนคับคั่งมากขึ้น และก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น มลพิษทางอากาศ ค่าระดับเสียง การตัดขาดทางสังคม การล่อลวงการมองเห็นและความหวาดกลัว ในปี ค.ศ. 2015 องค์กรสหประชาชาติ (United Nation) ได้กำหนดเป้าประสงค์ของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals, SDGs) 17 ข้อและเป้าหมาย (Targets) อีก 169 เป้าหมาย [2] ใน SDGs มีเป้าประสงค์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ข้อที่ 11 คือ การทำให้เมืองและการตั้งถิ่นฐานของมนุษย์มีความปลอดภัยและยั่งยืน และ ข้อที่ 13 คือ การดำเนินการมาตรการเร่งด่วนเพื่อรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและผลกระทบ โดยเป้าประสงค์ทั้ง 2 ข้อได้ระบุเป้าหมายในการจัดการด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและการขนส่งทางถนนที่คับคั่งจากการเติบโตของประชากร เศรษฐกิจและสังคม รวมทั้งการขยายตัวของเมืองอย่างไร้ทิศทาง (City sprawling) ซึ่งเป็นการทำให้ประชาชนมีการพึ่งพาการสัญจรทางถนนมากขึ้น และผลักดันให้ประชาชนตัดสินใจไปตั้งถิ่นฐานห่างจากศูนย์กลางเมืองอันเป็นการทำลายสภาพชุมชนเมืองที่น่าอยู่ สถานการณ์เช่นนี้จะทำให้ระยะทางในการเดินทางเพิ่มมากขึ้นและนำไปสู่

ปัญหาการจราจรติดขัด การใช้พลังงานเชื้อเพลิงที่ไร้ประสิทธิภาพ [3, 4] และนำมาซึ่งปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของเมือง (เช่น มลพิษทางอากาศ เสียง ความเสี่ยงของคนเดินเท้าขณะข้ามถนน ความล่าช้าของคนเดินเท้า การตัดขาดทางสังคม ความลำบากในการเข้าออกพื้นที่เป็นต้น) สภาพแวดล้อม และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การประเมินระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและการขนส่งบนโครงข่ายถนนในเขตเมือง ได้รับการพัฒนาขึ้นหลายวิธี เช่น วิธี Amenity Sensitivity (AS) [5] วิธีความจุทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Capacity, EC) [6–10] วิธี Environmental Sensitivity Method (ESM) [11] วิธี Mathematical Model Method (MMM) [10, 12, 13] และวิธี Multi criteria Environmental Impacts Appraisal (MENIA) [10,14–17] เป็นต้น เพื่อช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งของช่วงถนนซึ่งกำลังเผชิญกับปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและการขนส่งในพื้นที่ศึกษา ปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมบางปัจจัยสามารถวัดค่าเป็นตัวเลขได้ (เช่น มลพิษทางอากาศ และมลพิษทางเสียง) แต่บางปัจจัยไม่สามารถวัดเป็นตัวเลขได้โดยตรง (เช่น การตัดขาดทางสังคม การล่อลวงการมองเห็น และความหวาดกลัว) รวมถึงระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมของแต่ละปัจจัย บางปัจจัยอาจส่งผลเพียงการก่อให้เกิดความรำคาญ ส่วนบางปัจจัยอาจส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพโดยตรง นอกจากนี้ คำนวณน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ จะผันแปรตามประเภทของถนน และประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดินริม

ถนนอีกด้วย จึงทำให้การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งมีความยุ่งยากและมีความซับซ้อนสูง [18] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้วิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการจราจรและขนส่งบนถนนประเภทต่าง ๆ และพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินริมถนนชนิดต่าง ๆ โดยวิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (MMM) โดยบูรณาการกับวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process, AHP) ในการประเมินค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม เนื่องจากวิธีดังกล่าวมีรากฐานทางทฤษฎีที่เข้มแข็งและความน่าเชื่อถือ สามารถนำผลการประเมินจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเทียบกับความมาตรฐานของผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับแต่ละปัจจัย และใช้วิธี AHP ในการพิจารณาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยที่ต่างกันไป สำหรับแต่ละประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน นอกจากนี้ยังสามารถระบุตำแหน่งของช่วงถนนที่มีปัญหา และสาเหตุหลักของปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมในแต่ละช่วงถนนบนโครงข่ายถนน รวมทั้งจัดลำดับความสำคัญของช่วงถนนตามระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่กำลังเผชิญอยู่ในพื้นที่ศึกษา

2. ทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวิธีการที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรที่ผ่านมา พบว่า วิธี AS และ วิธี ESM เป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และไม่ยุ่งยาก เหมาะกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ไม่ต้องการรายละเอียดมากนัก และอาศัยประสบการณ์และความเชี่ยวชาญของคนเป็นหลัก จึงอาจเป็นจุดอ่อนเมื่อเทียบกับวิธี EC ซึ่งมีรากฐานทางทฤษฎีที่เข้มแข็งและความน่าเชื่อถือ แต่วิธี EC อาศัยเพียงปริมาณจราจรเท่านั้นในการระบุมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม สำหรับ วิธี MMM จะเหมาะสำหรับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ต้องการข้อมูลรายละเอียดและพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ที่มากกว่าวิธี EC สำหรับวิธี MENIA เป็นวิธีที่เป็นการบูรณาการระหว่างวิธีการประเมินที่มีรากฐานทางทฤษฎีที่เข้มแข็งร่วมกับการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญ จึงเป็นวิธีที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ละปัจจัยและหลายปัจจัยเข้าด้วยกัน

สำหรับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งสามารถจำแนกตามขอบเขตของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบได้ 2 ประเภท ได้แก่ (1) ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณช่วงถนน (Link-based) และ (2) ผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่กว้าง (Area-wide) [7] ซึ่งในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบที่ชัดเจนเพื่อให้ที่จะคัดเลือกปัจจัยที่จะนำมาพิจารณาได้อย่างเหมาะสม ตัวอย่างปัจจัยที่จัดอยู่ในผลกระทบที่เกิดขึ้นในพื้นที่บริเวณช่วงถนน (Link-based) เช่น ความเสี่ยงและความล่าช้าของคนเดินเท้าข้ามถนน (Pedestrian accident risk and delay) ความยากลำบากในการเข้าถึงพื้นที่ (Difficulty of access) เป็นต้น หรือปัจจัยที่จัดอยู่ในผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่กว้าง (Area-wide) ได้แก่ มลพิษทางเสียง (Noise pollution) และมลพิษทางอากาศ (Air pollution) งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำวิธีการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งมาประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องมือต่าง ๆ เพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม โดยมีทั้งการพิจารณาปัจจัยเดียวและพิจารณาแบบหลายปัจจัย ซึ่งสามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการบูรณาการวิธี MMM ร่วมกับกระบวนการตัดสินใจแบบหลายปัจจัยโดยใช้ปัจจัยพิจารณามากกว่าหนึ่งปัจจัย โดยพบว่าสามารถจัดลำดับความสำคัญของตำแหน่งของช่วงถนนตามระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมและระบุสาเหตุของปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมา ได้ใช้วิธี Fuzzy scoring method ในการกำหนดเกณฑ์ช่วงคะแนนที่เป็นค่าพูดได้แก่ ต่ำ ปานกลาง และสูง ซึ่งเกณฑ์ที่แบ่งนั้น จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวเลขที่ชัดเจน

สำหรับงานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์ช่วงคะแนนต่าง ๆ จากผลการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญในพื้นที่ศึกษาโดยวิธี AHP เพื่อให้ค่าเกณฑ์ช่วงคะแนนที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษา

ตารางที่ 1 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง

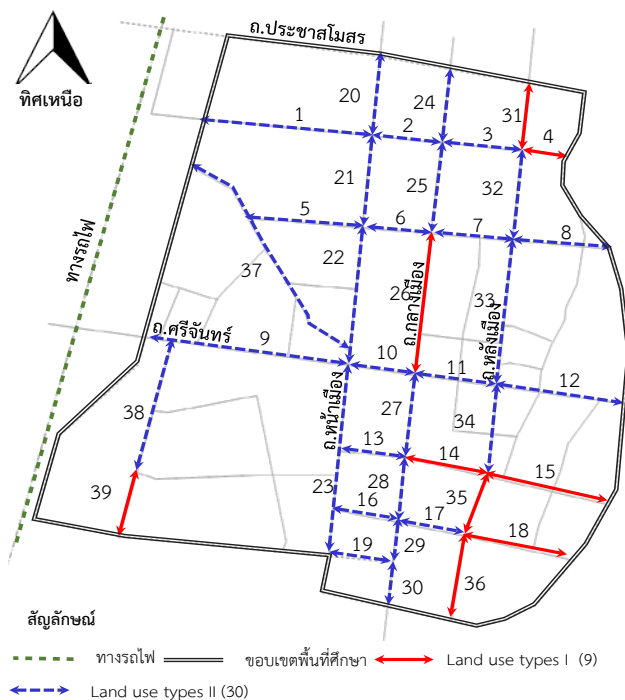
บทความ	สถานที่	วัตถุประสงค์	วิธีการที่ใช้	ปัจจัยที่พิจารณา	ผลการวิจัย
Song et al. [10]	เมืองซิดนีย์ , ประเทศออสเตรเลีย	เพื่อศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรบนโครงข่ายถนนในเขตเมือง	- ใช้วิธีค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต ในการรวมค่าความจุสิ่งแวดล้อมหลากหลายปัจจัยเข้าด้วยกัน โดยพิจารณาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยร่วมด้วย	- ค่าความล่าช้าเฉลี่ยของคนเดินเท้าขณะรอข้ามถนน - ความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุต่อคนเดินเท้า - ค่าระดับเสียง	ความล่าช้าของผู้เดินเท้าขณะรอข้ามถนนนั้นอาจไม่สามารถนำมาใช้เป็นมาตรวัดความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของผู้เดินเท้าได้
Klungboonrong and Taylor [14]	เมืองจิลลอง , ประเทศออสเตรเลีย	ประยุกต์ใช้เครื่องมือ SIMESEPT ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง โดยเปรียบเทียบวิธี ESM และ วิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	- SIMESEPT - ESM - แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (MMM)	- ความยากลำบากในการเข้าถึง - มลพิษทางเสียง - ความปลอดภัยของคนเดินเท้า	วิธี MMM มีความเหมาะสมกว่า วิธี ESM เนื่องจาก วิธี MMM มีการพิจารณาเก็บรวบรวมข้อมูลในพื้นที่จริง มาพิจารณาด้วย
Klungboonrong and Taylor [19]	เมืองขอนแก่น , ประเทศไทย	ประยุกต์ใช้ SIMESEPT ในการตรวจสอบและประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง ในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย โดยเปรียบเทียบ วิธี TAHP FCAHP และ FMADM	- SIMESEPT - วิธี TAHP - FCAHP - FMADM	- ความยากลำบากในการเข้าถึง - มลพิษทางเสียง - ความปลอดภัยของคนเดินเท้า	ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือ SIMESEPT สามารถระบุและจัดลำดับความสำคัญของตำแหน่งของช่วงถนนที่มีปัญหาและระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ และปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาเหล่านั้น
วรัญญู อุทธา และพนกฤษณคลังบุญครอง [9]	เมืองขอนแก่น , ประเทศไทย	ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งบนแบบหลายปัจจัย ที่เกิดขึ้นบนช่วงถนน (Link-base)	- ความจุทางสิ่งแวดล้อม - การตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (MADM)	- ความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุในการข้ามถนน - มลพิษทางเสียง - ความยากลำบากในการเข้าถึงพื้นที่	เมื่อพิจารณาหาค่าความจุทางสิ่งแวดล้อมโดยแยกแต่ละปัจจัย พบว่า ปัจจัยความเสี่ยงของคนเดินเท้าขณะข้ามถนน เป็นสาเหตุหลักของปัญหา
ภาคิน ธนณรงค์และคณะ [20]	เมืองขอนแก่น , ประเทศไทย	ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งแบบหลายปัจจัย ที่เกิดขึ้นเชิงพื้นที่ (Area-wide)	- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (MMM) - วิธีการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (MADM)	- PM2.5 - ค่าระดับเสียงที่เกิดจากการจราจร - CO ₂	สาเหตุหลักของปัญหาผลกระทบในพื้นที่โดยรอบช่วงถนนในงานวิจัยเกิดจากระดับเสียงที่เกิดจากการจราจร

3. พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตของพื้นที่ศึกษาเป็นบริเวณศูนย์กลางธุรกิจการค้า (CBD) ของเทศบาลนครขอนแก่น ภายในพื้นที่ผังเมืองรวมเมืองขอนแก่น โดยมีแนวเส้นทางเลียบเมือง (ทล.230) เป็นขอบเขตของการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้พิจารณาโครงข่ายถนนเฉพาะถนนสายสำคัญภายในเขตพื้นที่ผังเมืองรวมและแบ่งช่วงถนนออกเป็น 39 ช่วง หรือที่เรียกว่าการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งบนช่วงถนน (Link-based) โดย

พิจารณาจุดที่ใช้เป็นตัวแทนในการประเมินผลกระทบของแต่ละช่วงถนนจากการวัดระยะห่างจากจุดกึ่งกลางถนนถึงพื้นที่ด้านหน้าของอาคารที่ใกล้ที่สุดที่ติดกับริมถนน โดยแบ่งพื้นที่การรับผลกระทบสิ่งแวดล้อมออกตามลักษณะความอ่อนไหวของประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน โดยแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 พื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมมาก (เช่น หอพัก โรงเรียน อาคารเรียน และโรงพยาบาล) ประเภทที่ 2 พื้นที่ที่มีลักษณะความอ่อนไหวต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมในระดับปานกลาง (เช่น

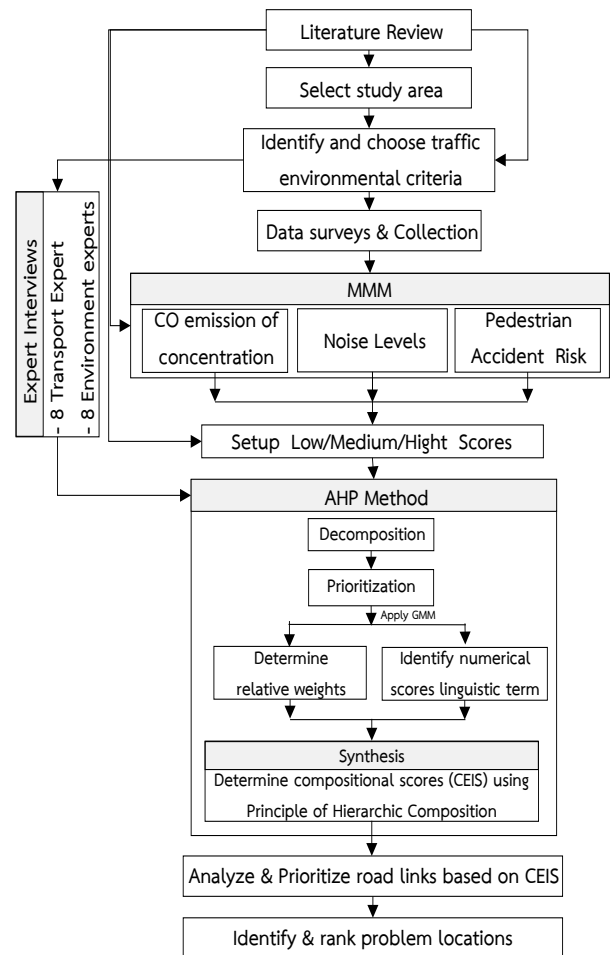
ตลาด ศูนย์อาหาร และสำนักงานต่าง ๆ) และประเภทที่ 3 พื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมน้อย (เช่น เขตแปลงเกษตร โรงงาน และสนามกีฬา) [11] และพิจารณาการแบ่งช่วงถนนแต่ละช่วงตามลักษณะทางกายภาพของถนน (เช่น ลักษณะหน้าตัดของถนน จำนวนช่องจราจร ความกว้างถนน และตำแหน่งของทางแยก) และ ซึ่งจากการสำรวจข้อมูลลักษณะทางกายภาพของถนนและลักษณะความอ่อนไหวของการใช้ประโยชน์ที่ดิน สามารถแบ่งช่วงถนนในโครงข่ายถนนทั้งหมดได้เป็น 39 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การแบ่งช่วงถนนและขอบเขตในการพิจารณาผลกระทบสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ศึกษา [21]

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งแบบหลายปัจจัย บนโครงข่ายถนนสายหลักภายในพื้นที่ศูนย์กลางธุรกิจและการค้า ในเขตผังเมืองรวมเมืองขอนแก่น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ร่วมกับการประยุกต์ใช้กระบวนการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย โดยวิธี AHP เพื่อใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งแบบหลายปัจจัย โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 ขั้นตอนการวิจัย

4.1 การเลือกปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อม

การทบทวนบทความทางวิชาการและผลงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งซึ่งใช้พื้นที่ศึกษาในเมืองขอนแก่น [9], [14], [20] พบว่า ปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งออกได้ 5 ปัจจัย คือ (1) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (2) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และ (3) ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($\text{PM}_{2.5}$) (4) ค่าระดับเสียงจากการจราจร (Noise level) และ (5) ความเสี่ยงของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุ (Pedestrian accident risk) ขณะข้ามถนน งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกปัจจัย โดยพิจารณาจากการทบทวนงานวิจัยดังกล่าว เพื่อใช้เป็นปัจจัยในการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญในการหาค่าน้ำหนักความสำคัญในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมแบบแยกรายปัจจัย และแบบหลายปัจจัย ซึ่งได้พิจารณาคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อระดับพื้นที่ขนาดเล็ก (บริเวณช่วงถนน) จำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ค่าระดับเสียง

จากการจราจร ความเข้มข้นของก๊าซ CO และความเสียหายของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุขณะข้ามถนน โดยพิจารณาตัดปัจจัย CO₂ เนื่องจากเป็นปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบในลักษณะพื้นที่กว้างจึงไม่เหมาะในการนำมาพิจารณาสำหรับพื้นที่ขนาดเล็ก สำหรับปัจจัย PM_{2.5} ถูกตัดออก เนื่องจากเป็นปัจจัยที่เป็นมลพิษทางอากาศเช่นเดียวกับ CO ในงานวิจัยนี้จึงเลือกมาเพียง 1 ปัจจัยเพื่อใช้เป็นตัวแทนของมลพิษทางอากาศ

4.2 การสำรวจและรวบรวมข้อมูล

การสำรวจและเก็บรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ ในพื้นที่ศึกษาได้พิจารณาจากค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากแบบจำลองเลือกใช้สำหรับแต่ละปัจจัย ข้อมูลดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลสภาพจราจร (เช่น ปริมาณจราจรบนช่วงถนน สัดส่วนของยานพาหนะประเภทต่าง ๆ และความเร็วเฉลี่ยของกระแสจราจร) ซึ่งได้ใช้ข้อมูลจากโครงการออกแบบรายละเอียดระบบขนส่งสาธารณะจังหวัดขอนแก่นและผลกระทบสิ่งแวดล้อม [21] ลักษณะทางกายภาพของถนน (เช่น ลักษณะหน้าตัดของช่วงถนน ลักษณะการแบ่งทิศทางจราจร ชนิดผิวจราจร จำนวนช่องจราจร ความกว้างของช่องจราจร) และประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินริมถนนโดยจำแนกเป็น 3 ประเภท คือ พื้นที่ที่มีความอ่อนไหวต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมมาก ปานกลาง และน้อยตามลำดับ [11] และทำการสำรวจรูปแบบของการใช้ประโยชน์ที่ดินตามแนวเส้นทางของแต่ละช่วงถนนโดยพิจารณาจากพื้นที่ที่ติดกับริมถนน ซึ่งถือว่าเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบโดยตรง

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นบนโครงข่ายถนนในเมือง โดยส่วนใหญ่รูปแบบของการวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ประเด็นผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่นำมาพิจารณาจะต้องสามารถคำนวณค่าเป็นเชิงตัวเลขได้ [14] จึงได้คัดเลือกปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ค่าระดับเสียงจากการจราจร และ ความเสี่ยงของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุขณะข้าม

4.3.1 การคำนวณหาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีการทับซ้อน (Superposition) กล่าวคือความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศที่กระจายตัวถึงผู้รับนั้นเกิดจากผลรวมของแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีลักษณะเป็นจุด (Point source) หลายๆจุดรวมตัวกันจนกลายเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่มีลักษณะเป็นเส้น (Line source) ซึ่งเป็นสมมติฐานของแบบจำลอง นอกจากนั้น แบบจำลองดังกล่าวยังตั้งสมมติฐานอีกว่ามุมที่เกิดจากกระแสลมที่ทำแนวกับถนนมีความสัมพันธ์กันน้อยมาก จึงไม่นำผลของการกระจายตัวในด้านข้างมาใช้ในการคำนวณ [22] สำหรับปริมาณการปล่อยมลพิษต่อหน่วยความยาวของแหล่งกำเนิด (กรัม/เมตร/วินาที) ในงานวิจัยนี้ คำนวณได้จากวิธี Bottom-Up 2 Approach [23-25] ดังสมการ (1)

$$Q_L = \sum_e \sum_i \sum_j (Ef_{kij} \times D_e \times V_{ije}) \quad (1)$$

โดยที่ Q_L คือปริมาณการปล่อยมลพิษรวม (g/m/s) Ef_{kij} คือค่า Emission factors ของยานพาหนะแต่ละประเภท (g) V_{ije} คือปริมาณการจราจรบนช่วงถนน (veh/day) D_e คือ ระยะทางของช่วงถนน (m)

จาก Q_L สามารถคำนวณค่าความเข้มข้นของ CO ที่กระจายตัว ดังสมการ (2)

$$C = \frac{Q_L}{(2\pi u \sigma_z)^{1/2}} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

โดยที่ u คือความเร็วลมเฉลี่ย (m/s); H คือ ความสูงของแหล่งกำเนิด (m); Z คือระยะจากแหล่งกำเนิดถึงจุดที่สนใจในแนวดิ่ง (m); σ_z คือสัมประสิทธิ์การกระจายในแนวดิ่ง และ C คือความเข้มข้นของมลพิษ (kg/m³) [22] สำหรับค่าอัตราการปล่อยมลพิษ (Emission Factors) ของ CO ของยานพาหนะแต่ละประเภทที่พิจารณาในงานวิจัยนี้ อ้างอิงข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง โครงการศึกษาและจัดทำ Baseline การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคขนส่งในจังหวัดน่านและการศึกษาแนวทางในการส่งเสริมกิจกรรม

ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคขนส่ง [23] ซึ่งสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Emission factors ของก๊าซ CO สำหรับยานพาหนะแต่ละประเภท [23–25]

ประเภทของยานพาหนะ	สมการ Emission factor	R ²
รถจักรยานยนต์	$y = -0.0043x^2 + 0.2677x + 0.3223$	0.51
รถยนต์นั่งส่วนบุคคล	$y = -0.0003x^2 + 0.0266x - 0.1739$	0.74
รถกระบะ	$y = 0.0006x^2 - 0.073x + 2.6906$	0.85
รถโดยสาร 6ล้อ	$y = -0.00003x^2 - 0.0429x + 4.4218$	0.63
รถบรรทุก	$y = 0.0009x^2 - 0.1545x + 9.0299$	0.84

หมายเหตุ: x = ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ Y = Emission Factor

4.3.2 การคาดการณ์ค่าระดับเสียงที่เกิดจากการจราจร

เสียงการจราจรและขนส่งบนท้องถนนเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักของปัญหาผลกระทบที่เกิดจากการจราจรจากสภาพแวดล้อมในเมือง ในอดีตมีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดการณ์ค่าระดับเสียงที่เกิดจากการจราจรในประเทศต่าง ๆ หลายหลายวิธี [26–29] ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากกรมการขนส่ง (Department of Transport, DoT) ในประเทศอังกฤษที่เรียกว่า Calculation of Road Traffic Noise (CoRTN) [29] ในการคำนวณค่าระดับเสียงที่เกิดจากการจราจรแบบจำลองของ CoRTN มีพื้นฐานทางทฤษฎีและขั้นตอนของการคำนวณที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการคาดการณ์ค่าระดับเสียงที่เกิดจากการจราจรและขนส่งบนถนนในเขตเมืองในหลายประเทศ [30–32] สำหรับขั้นตอนการคำนวณค่าระดับเสียงโดยวิธี CoRTN แสดงในรูปที่ 3

การคำนวณจะเริ่มต้นจากการคำนวณค่าระดับเสียงพื้นฐาน (Basic Noise Level, BNL) สำหรับช่วงถนนหนึ่งค่าระดับเสียงที่ได้จะอยู่ในหน่วยของ L_{10} (18 h) หรือ L_{10} (1 h) dB (A) ซึ่งค่า BNL ที่ใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ในหน่วยของ L_{10} (18 h) จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

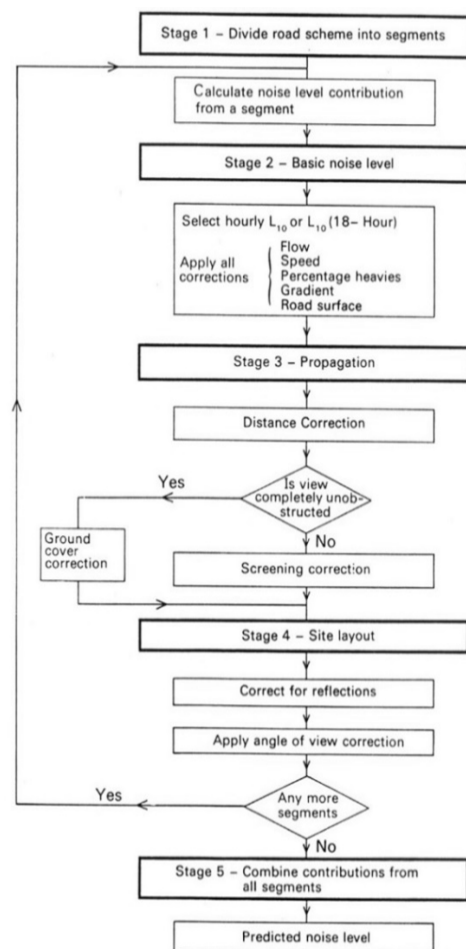
$$L_{10}(18\text{--hour}) = 29.1 + 10 \log_{10} Q \quad (3)$$

โดยที่ Q คือปริมาณจราจรในช่วงระยะเวลา 18 ชั่วโมง (จาก 6:00 น. - 24:00 น.) หลังจากหาค่า BNL ของการจราจรบนช่วงถนนใด ๆ ได้แล้วจะต้องคำนวณค่าปรับแก้ (Corrections) ต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณค่าระดับ

เสียงสุดท้าย (Final Noise Level, FNL) ณ จุดรับเสียง (Receptor point) จากช่วงถนนที่พิจารณา โดยจะสามารถคำนวณได้จากค่าผลรวมทางพีชคณิตของ BNL และค่าปรับแก้ทั้งหมด ดังสมการ (4)

$$FNL = BNL + \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

โดยที่ FNL คือค่าระดับเสียงสุดท้าย, BNL คือค่าระดับเสียงพื้นฐาน และ C_i คือค่าปรับแก้ที่ i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$



รูปที่ 3 ขั้นตอนการคำนวณค่าระดับเสียงจากการจราจรโดยวิธี CoRTN [29]

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าปรับแก้ต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย ค่าปรับแก้เนื่องจากความเร็วและปริมาณรถบรรทุก (C_{sh}) ค่าปรับแก้เนื่องจากความลาดชันของแนวนอน (C_g) ค่าปรับแก้เนื่องจากประเภทของผิวถนน (C_{rs}) ค่าปรับแก้เนื่องจากระยะห่างจากแนวของแหล่งกำเนิดเสียง (C_d) ค่าปรับแก้สำหรับการมีสิ่งกีดขวาง (C_s) ค่าปรับแก้เนื่องจากมุมของการ

มองเห็น (C_a) และค่าปรับแก้เนื่องจากการสะท้อนของเสียง (C_r) สำหรับค่าระดับเสียงสุดท้ายที่คำนวณได้โดยวิธี CoRTN จะอยู่ในหน่วยของ L_{10} (18 h) dB(A) ซึ่งในขั้นตอนสุดท้าย จะต้องปรับแก้ค่าระดับเสียงให้อยู่ในหน่วยของ L_{eq} โดย L_{eq} คือระดับเสียงต่อเนื่องที่มีพลังงานเทียบเท่ากัน หรือเป็นค่าเฉลี่ยของพลังงานของเสียงตามปกติอาจทำการตรวจวัดระดับเสียงดังกล่าวตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งค่า L_{eq} (24h) จะมีค่าเท่ากับค่า L_{10} (18h) – 3 dB (A) [4]

4.3.3 การประเมินความเสี่ยงของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุขณะข้ามถนน

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองของ Song [10] ซึ่งพัฒนามาจากการรวบรวมข้อมูลสถิติอุบัติเหตุทางถนนในนครซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย โดยมีรูปแบบของสมการ ความเสี่ยงของการเกิดอุบัติเหตุรถยนต์ชนคนเดินเท้าขณะข้ามถนน(R)ดังสมการ(5)

$$R = 1.85 \times (1 - e^{-q_2 \alpha}) \times q_2^{0.713} \times S_v^{0.733} \times t_c^{0.523} \times 10^{-6} \quad (5)$$

โดยที่ q_2 คือปริมาณจราจร (veh/s), S_v คือความเร็วเฉลี่ย (m/s), t_c คือเวลาที่ใช้ในการข้ามถนนที่ความกว้างประสิทธิภาพ (s), α คือช่องว่างวิกฤตของคนเดินเท้า (s) ซึ่งแบบจำลองนี้เคยมีการนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสี่ยงของคนเดินเท้าที่จะเกิดอุบัติเหตุขณะข้ามถนนในพื้นที่ศึกษาแล้ว [9], [14], [33]

4.3.4 เกณฑ์ค่าคะแนนระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ในการจำแนกเกณฑ์ช่วงคะแนนจะได้รับการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา และใช้วิธีทางสถิติจัดกลุ่มโดยวิธีการวิเคราะห์การจัดกลุ่ม (Cluster analysis) โดยวิธีการจำแนกเกณฑ์ช่วงคะแนนที่เป็นค่าพูดได้แก่ ต่ำ ปานกลาง และสูง ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเกณฑ์ที่แบ่งนั้น จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของค่าตัวเลขที่ชัดเจนซึ่งได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญโดยวิธี AHP

ตารางที่ 3 การแบ่งเกณฑ์ค่าคะแนนระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อม

ปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อม	หน่วย	เกณฑ์ค่าคะแนนระดับความรุนแรง			อ้างอิง
		ต่ำ (Low)	ปานกลาง (Medium)	สูง (High)	
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO)*	mg/m ³	ต่ำกว่า 0.052	0.052 – 0.217	มากกว่า 0.217	[19]
ค่าระดับเสียงจากการจราจร	dB(A)	ต่ำกว่า 65	65 – 70	มากกว่า 70	[20]
ความเสี่ยงของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน	ไม่มีหน่วย	ต่ำกว่า 1×10^{-5}	$(1 - 2) \times 10^{-5}$	มากกว่า 2×10^{-5}	[34]

หมายเหตุ *จำแนกโดยวิธีทางสถิติ (Cluster analysis) [19]

4.4 การสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ

ในงานวิจัยได้สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์หรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับงานด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง จำนวน 16 คนโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ (1) ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมจราจรขนส่งจำนวน 8 คน และ (2) ผู้เชี่ยวชาญด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจำนวน 8 คน โดยประยุกต์ใช้วิธี AHP ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะพิจารณาปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อม 3 ปัจจัย บนโครงข่ายถนนสายหลักในพื้นที่ศึกษา ภายใต้ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินทั้ง 3 ประเภท รวมทั้งพิจารณาค่าน้ำหนักความสำคัญ (ค่าคะแนน) ของระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับแต่ละปัจจัย

4.5 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytical Hierarchy Process, AHP)

AHP เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการกระบวนการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (MADM) ที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย AHP เป็นวิธีการที่ทำความเข้าใจได้ง่าย (Simplicity) มีความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) อยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีที่น่าเชื่อถือ (Theoretical robustness) สามารถจัดการกับปัญหาทั้งที่มีปัจจัยที่อยู่ในรูปแบบของนามธรรมและที่เป็นรูปธรรมได้ สามารถรวมกลุ่มของการตัดสินใจได้ สามารถวิเคราะห์ความอ่อนไหวได้ง่าย และที่สำคัญสามารถวัดค่าความเที่ยงตรงหรือความสอดคล้องในการตัดสินใจของผู้ให้สัมภาษณ์แต่ละคนและทั้งกลุ่มของผู้เชี่ยวชาญได้ [34] และจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งาน AHP ในด้านต่าง ๆ พบว่าวิธี AHP ได้ถูกนำมาใช้งานด้านการประเมินผลกระทบ

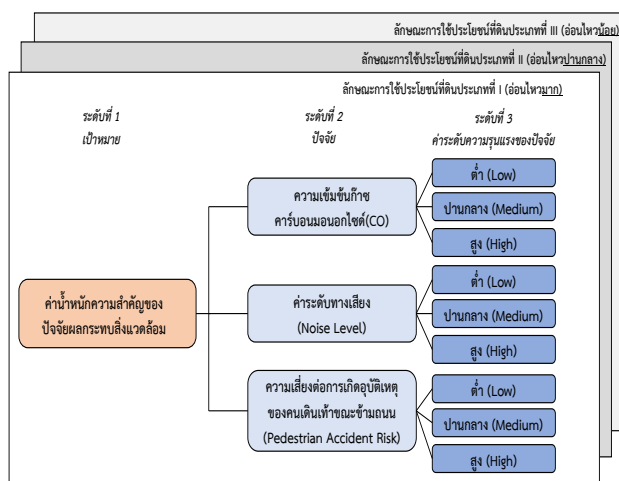
สิ่งแวดล้อม (Environmental Impact Assessment) มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 20 [35]

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้วิธี AHP ในการคำนวณหาค่าผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน [36] คือ การจำแนกองค์ประกอบ การตัดสินใจ (Decomposition) การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization) และการสังเคราะห์ (Synthesis)

4.5.1 การจำแนกองค์ประกอบการตัดสินใจ

(Decomposition)

ผู้ตัดสินใจจะกำหนดองค์ประกอบในการตัดสินใจต่าง ๆ โดยขึ้นอยู่กับความรู้ ประสบการณ์และความเชี่ยวชาญของผู้ตัดสินใจ เพื่อนำไปใช้ในการจัดรูปแบบโครงสร้างการตัดสินใจ โครงสร้างลำดับชั้น (Hierarchy structure) นี้เป็นสิ่งที่สำคัญ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบการตัดสินใจทั้งหมด จากลำดับชั้นจากระดับสูงสุดจนถึงระดับต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 โครงสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ (Hierarchy Structure)

4.5.2 การจัดลำดับความสำคัญ (Prioritization)

ในขั้นตอนนี้เป็นการคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยต่าง ๆ โดยการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญแต่ละคน โดยเปรียบเทียบองค์ประกอบการตัดสินใจทีละคู่ (Pairwise comparisons) ที่อยู่ในระดับเดียวกันของโครงสร้างลำดับชั้น เพื่อกำหนดหาค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ (Relative

weights) งานวิจัยนี้ได้สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานด้านผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งจำนวน 16 คนโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ นักวิชาการด้านวิศวกรรมจราจรจำนวน 8 คน และนักวิชาการด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมจำนวน 8 คน โดยการขอให้ผู้เชี่ยวชาญเปรียบเทียบเป็นคู่ โดยใช้สเกลสัดส่วน (Ratio scales) ซึ่งให้ค่าคะแนน (1 ถึง 9) เปรียบเทียบองค์ประกอบการตัดสินใจเป็นคู่ [37] เช่น ค่าคะแนน 1 หมายถึง ทั้งสองปัจจัยมีน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์เท่ากัน และค่าคะแนน 9 หมายถึง ปัจจัยหนึ่งมีน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์มากกว่าปัจจัยหนึ่งมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ให้อยู่ในรูปแบบของตารางเมตริกซ์จัตุรัส A เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญ $a_{ij} = w_i / w_j$ สำหรับสมาชิกของการตัดสินใจทั้งหมด ในระดับชั้นเดียวกัน และค่าของส่วนกลับ $a_{ji} = 1 / a_{ij}$ จะอยู่ในรูปเมตริกซ์ $A = \{a_{ij}\}$ สมการ $AW = \lambda_{\max} W$ ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญสำหรับแต่ละองค์ประกอบการตัดสินใจได้โดยวิธี Normalized Principle Right Eigenvector ($W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$) ของเมตริกซ์จัตุรัส A โดยทั่วไปค่าของ $\lambda_{\max}$ ที่พบจะมีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ n เมื่อค่าของ $\lambda_{\max}$ มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า n เมตริกซ์ A ที่พิจารณาจะมีความสอดคล้องและเชื่อถือได้ซึ่งเป็นเหตุผลที่ใช้ $\lambda_{\max}$ เป็นตัวที่แสดงความเที่ยงตรงของการวินิจฉัยของเมตริกซ์ A ดังนั้นดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index, CI) ได้ถูกสร้างขึ้นเป็นดัชนีชี้วัดจากการทดสอบเมตริกซ์จัตุรัสสุ่ม (500 ตัวอย่าง) เรียกว่า ดัชนีความสอดคล้องสุ่ม (Random Consistency Index, RCI) ซึ่งค่าอัตราส่วนระหว่าง CI และ RCI เรียกว่า อัตราส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio, CR) โดยทั่วไปค่า CR จะยอมรับได้เมื่อมีค่าน้อยกว่า 0.10 [37] ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Normalization of the Geometric Mean of the Row (NGM) [38] ในการประมาณค่า Principle Right Eigenvector (W) และค่า Largest Eigenvalue ($\lambda_{\max}$) ของเมตริกซ์จัตุรัส A

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างการทำ Pairwise comparison เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของระดับความรุนแรงในแต่ละปัจจัย

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักความสำคัญของกลุ่มสำหรับปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง และระดับความรุนแรงของแต่ละปัจจัย (3 ปัจจัย)

ปัจจัย	ค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของแต่ละปัจจัย ตามประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน			ค่าคะแนนของระดับความรุนแรง ของแต่ละปัจจัย		
	ประเภทที่ 1*	ประเภทที่ 2**	ประเภทที่ 3***	Low	Medium	High
(1) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	0.2369 (2)	0.2555 (2)	0.2481 (3)	0.1388	0.3208	1.0000
(2) ค่าระดับเสียงจากการจราจร	0.2333 (3)	0.2269 (3)	0.2769 (2)	0.1528	0.3267	1.0000
(3) ความเสี่ยงต่อคนเดินเท้าขณะข้ามถนน	0.5298 (1)	0.5176 (1)	0.4750 (1)	0.1332	0.3102	1.0000

หมายเหตุ *การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่ 1 มีค่า $\lambda_{\max} = 3.0079$ และ CR = 0.0076, **การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่ 2 มีค่า $\lambda_{\max} = 3.0002$ และ CR = 0.0002, ***การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่ 3 มีค่า $\lambda_{\max} = 3.0002$ และ CR = 0.000

วิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean Method, GMM) ได้ถูกใช้ในการรวมผลการวินิจฉัยของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนให้เป็นลักษณะของกลุ่มข้อมูล เพื่อค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของกลุ่ม ในโครงสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ ซึ่งผลจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 16 คน สามารถสรุปค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของกลุ่ม (Group relative weights) ได้ดังตารางที่ 4 พบว่า อัตราส่วนความสอดคล้องกลุ่ม (Group Consistency Ratio, GCR) มีค่าน้อยกว่า 0.10 ซึ่งยอมรับได้

4.5.3 การสังเคราะห์ (Synthesis)

เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง และค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของระดับความรุนแรงในแต่ละปัจจัยแล้ว จึงประยุกต์ใช้หลักการ “Principle of Hierarchy Composition” ในการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์รวม (Global Relative Importance) เพื่อนำไปพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุด [36-38]

5. การวิเคราะห์และอภิปรายผลการวิจัย

5.1 การคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของแต่ละปัจจัยโดยวิธี AHP

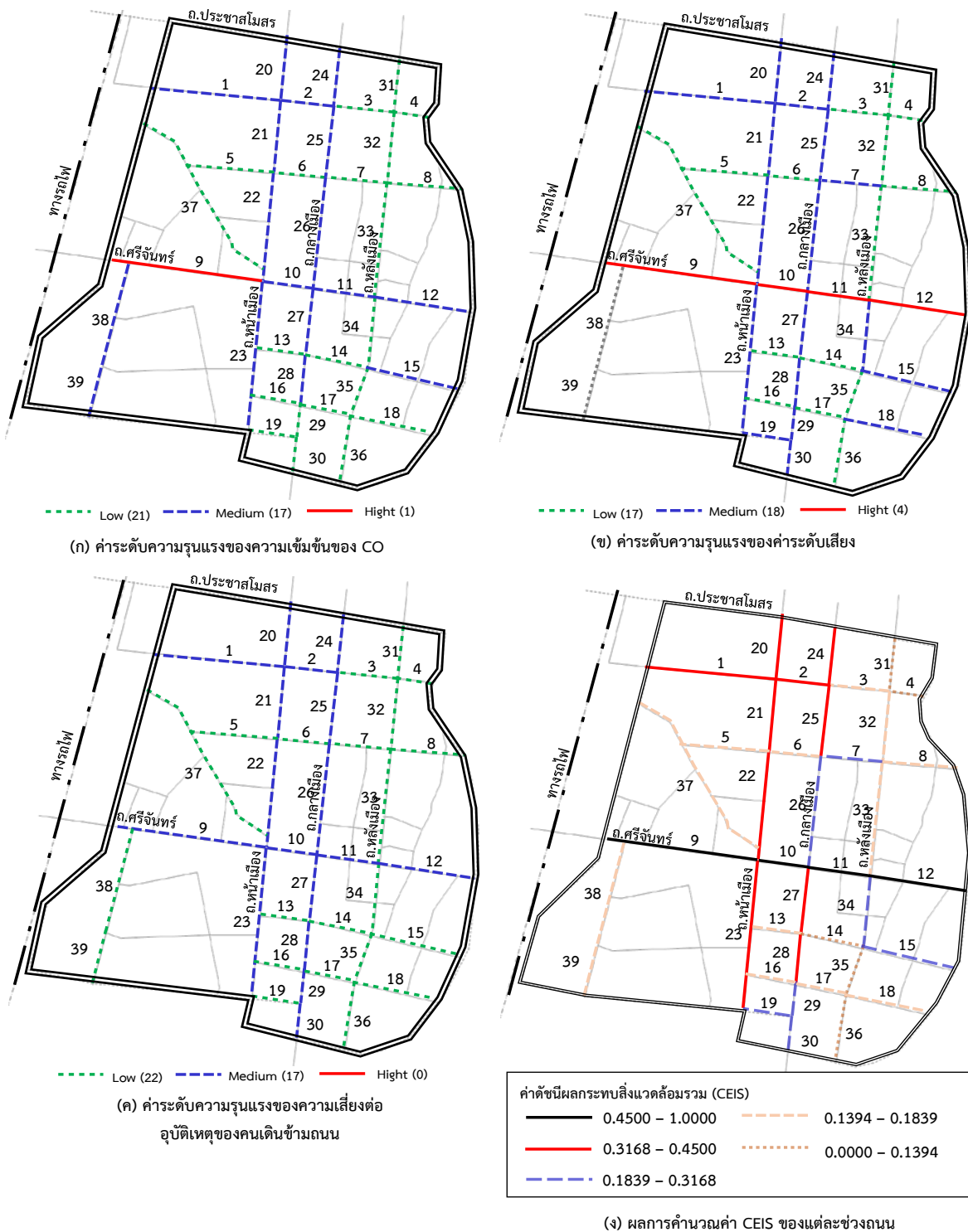
จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนเพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่ง และค่าคะแนนของระดับความรุนแรงตั้งแต่ระดับต่ำ (L) ปานกลาง (M) และสูง (H) สำหรับแต่ละปัจจัย งานวิจัยนี้ได้คัดเลือก 3 ปัจจัยเพื่อนำมาพิจารณา ได้แก่ (1) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) (2) ค่าระดับเสียงจากการจราจร และ (3) ความเสี่ยงต่อคนเดินเท้าขณะข้ามถนน

ซึ่งสามารถสรุปค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์โดยวิธีค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean Method, GMM) ของทั้ง 3 ปัจจัยได้ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าค่าลำดับความสำคัญสัมพัทธ์ของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมอันดับที่ 1 คือ ความเสี่ยงต่อคนเดินเท้าขณะข้ามถนน ส่วนค่าน้ำหนักความสำคัญสัมพัทธ์ของมลพิษทางเสียง และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่ 1 และ 2 สำหรับในพื้นที่ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทที่ 3 จะสลับระหว่างลำดับที่ 2 และ 3

5.2 การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม

5.2.1 การคำนวณค่าระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมสำหรับแต่ละปัจจัย

จากการคำนวณระดับความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งสำหรับ 3 ปัจจัยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในแต่ละสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินและประเภทของถนน โดยพิจารณา 3 ปัจจัย พบว่า (1) ปัจจัยมลพิษทางเสียงมีค่าระดับความรุนแรง “สูง (High)” จำนวน 4 ช่วงถนน “ปานกลาง (Medium)” จำนวน 18 ช่วงถนน และ “ต่ำ (Low)” จำนวน 17 ช่วงถนน (2) ปัจจัยความเข้มข้นของก๊าซ CO มีค่าระดับความรุนแรง “สูง (High)” จำนวน 1 ช่วงถนน “ปานกลาง (Medium)” จำนวน 18 ช่วงถนน และ “ต่ำ (Low)” จำนวน 17 ช่วงถนน และ (3) ปัจจัยความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน มีค่าระดับความรุนแรง “สูง (High)” จำนวน 0 ช่วงถนน “ปานกลาง (Medium)” จำนวน 17 ช่วงถนน และ “ต่ำ (Low)” จำนวน 22 ช่วงถนน ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 5 ค่าระดับคะแนนความรุนแรงของผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งสำหรับปัจจัย (ก) ความเข้มข้นของ CO (ข) ค่าระดับเสี่ยง และ (ค) ความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุของคนเดินข้ามถนน และ (ง) ผลการคำนวณค่า CEIS ของแต่ละช่วงถนน ในพื้นที่ศึกษา

5.2.2 การคำนวณค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (Composite Environmental Impact Score, CEIS)

ค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (CEIS) เป็นค่าที่คำนวณได้จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับวิธีการ MADM ซึ่ง CEIS สามารถคำนวณได้จากวิธี

Simple Additive Weight (SAW) ดังสมการ $CEIS_{ik} = \sum w_{jk} s_{ijk}$ เมื่อ $CEIS_{ik}$ คือค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (CEIS) ของช่วงถนน i สำหรับการให้ประโยชน์ที่ดินประเภท k w_{jk} คือค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อม j สำหรับการให้ประโยชน์

ที่ดินประเภท k s_{ijk} คือค่าคะแนนของช่วงถนน i ของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อม j สำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดินประเภท k เมื่อพิจารณาการจัดลำดับความสำคัญของช่วงถนนจากมากไปหาน้อย ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงว่าบริเวณช่วงถนนต่าง ๆ ที่พิจารณานั้นกำลังเผชิญปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรจากรุนแรงมากไปน้อยตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณค่า CEIS ของช่วงถนนที่ 1 ซึ่งมีประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีความอ่อนไหวปานกลาง (Land Use Type II) มีค่า CEIS เท่ากับ $[(0.255 \times 0.327) + (0.227 \times 0.321) + (0.518 \times 0.310)] = 0.3168$ โดยสาเหตุหลักของปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมของช่วงถนนที่ 1 สามารถระบุได้จากค่าที่มากที่สุดของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักความสำคัญและค่าคะแนนของแต่ละปัจจัย พบว่าสาเหตุของปัญหาที่ช่วงถนนที่ 1 คือ ปัจจัยความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน $(0.518 \times 0.310 = 0.160)$ ค่าระดับเสียง $(0.255 \times 0.327 = 0.083)$ และ CO $(0.227 \times 0.321 = 0.073)$ ตามลำดับ

ผลของการคำนวณค่า CEIS ของช่วงถนนทั้ง 39 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5 (ง) พบว่า ช่วงถนนที่มีความสำคัญต่อปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรมากที่สุด ซึ่งมีค่า CEIS สูงที่สุดเท่ากับ 0.6429 คือช่วงถนนที่ 9 และเมื่อจัดกลุ่มของข้อมูลเป็น 5 กลุ่ม (รูปที่ 5 (ง)) โดยวิธี Cluster Analysis พบว่าช่วงถนนที่ค่า CEIS สูงในกลุ่มแรก มีจำนวน 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงถนนที่ 9 มีค่า CEIS = 0.643 ช่วงถนนที่ 10 11 และ 12 มีค่า CEIS เท่ากันคือ 0.4889

6. สรุปผลการวิจัย

จากการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการจราจร ทั้งในลักษณะแยกรายปัจจัยและรวมหลายปัจจัย ในรูปแบบผลกระทบตามช่วงถนนต่าง ๆ ในเขตผังเมืองรวมเมืองขอนแก่น ด้วยวิธี MMM ดำเนินการร่วมกับ MCDM ซึ่งได้ใช้วิธี AHP ด้วยวิธี SAW ในการคำนวณหาค่าดัชนีผลกระทบสิ่งแวดล้อมรวม (CEIS) เพื่อใช้ในการจัดลำดับความรุนแรงของพื้นที่ศึกษาในช่วงถนนต่าง ๆ จำนวน 39 ช่วง สามารถสรุปได้ว่าเมื่อพิจารณาในลักษณะแยกรายปัจจัยพบว่า มลพิษทางเสียงมีช่วงถนนที่มีค่าระดับความรุนแรง “สูง” จำนวน 4 ช่วง สำหรับความเข้มข้นของก๊าซ CO มีค่าระดับความรุนแรง “สูง” เพียง 1 ช่วง ในขณะที่ปัจจัยความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน

ไม่มีว่ามีช่วงถนนใดที่มีค่าระดับความรุนแรง “สูง” และเมื่อคำนวณค่า CEIS พบว่าช่วงถนนที่ค่า CEIS สูงจำนวน 4 ลำดับแรก ได้แก่ ช่วงถนนที่ 9 10 11 และ 12 (ซึ่งอยู่บนถนนศรีจันทร์) จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาของช่วงถนนที่ 9 พบว่า ค่าระดับเสียงจากการจราจรคือสาเหตุหลัก รองลงมาคือ ความเข้มข้นของก๊าซ CO และ ความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน ตามลำดับ สำหรับช่วงถนนที่ 10 11 และ 12 ที่มีค่า CEIS เท่ากัน พบว่า ค่าระดับเสียงจากการจราจรคือสาเหตุหลักเช่นกัน รองลงมาคือ ความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุของคนเดินเท้าขณะเดินข้ามถนน และ ความเข้มข้นของก๊าซ CO ตามลำดับ

ถนนศรีจันทร์เป็นเส้นทางสายหลักในเมืองขอนแก่น ที่มีปริมาณการจราจรที่หนาแน่น และสภาพทางกายภาพของถนนที่มีเขตทางที่คับแคบ รวมทั้งที่ตั้งของอาคารที่อยู่ที่อยู่ใกล้กับริมถนน จึงเป็นสาเหตุที่ส่งผลให้การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งของช่วงถนนที่อยู่บนถนนศรีจันทร์ มีค่าระดับความรุนแรงที่สูงกว่าช่วงถนนอื่น ๆ ในพื้นที่ศึกษา

ซึ่งผลจากการประเมินครั้งนี้จะสามารถช่วยผู้ที่มีอำนาจตัดสินใจสามารถจัดการปัญหาผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดสรรงบประมาณเพื่อแก้ไขปัญหาได้อย่างตรงประเด็นและมีประสิทธิภาพสูงสุด

สำหรับงานวิจัยในอนาคตสามารถขยายพื้นที่ศึกษาให้กว้างขึ้นเพื่อให้ครอบคลุมถึงลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินทุกประเภท รวมถึงจำนวนปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งที่นำมาพิจารณาให้มีความหลากหลาย เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการจราจรและขนส่งได้ในหลายแง่มุม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทางด้านข้อมูลและเทคนิคอย่างดียิ่งจาก นายณัฐพล พรสัตยวงศ์ และ นายวิรุฬห์ ยศมิบุญ และขอขอบคุณการสนับสนุนทางด้านเครื่องมือและทุนวิจัยจากทางศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chavez- Baeza C, Sheinbaum- Pardo C. Sustainable passenger road transport scenarios to reduce fuel consumption, air pollutants and GHG (greenhouse gas) emissions in the Mexico City Metropolitan Area. *Energy*. 2014; 66:624–34.
- [2] United Nations. *The Sustainable Development Goals Report 2016*. United Nations Publications. New York, USA; 2016.
- [3] Cervero R. *Transport Infrastructure and the Environment: Sustainable Mobility and Urbanism*. Oakville; 2013.
- [4] Klungboonkrong P. *Sustainable Urban Transportation Planning: Principle and Practice*. 1st ed. khonkaen: KKU PRINTING; 2018.
- [5] Loder and Bayly, Victoria. *Road Safety and Traffic Authority. Road-amenity Classification: A Practical Tool for Traffic Management*. Hawthorn: Road Safety and Traffic Authority; 1980.
- [6] Holdsworth J, SINGLETON DJ. Environmental traffic capacity of roads. In: *Papers of the Fifth Australian Transport Research Forum*. Sydney: Hemming Group, Limited; 1979. p. 219–38.
- [7] Shiran G, Hidas P. Area-wide environmental capacity based on air pollution: an urban development evaluation tool. In: *Proceedings of the 18th Australian Road Research Board Transport Research Conference and Transit NZ Land Transport Symposium*. 1996. p. 249–63.
- [8] Colin Buchanan. *Traffic in Towns: A Study of the Long Term Problems of Traffic in Urban Areas*. London, United Kingdom; 1963.
- [9] วรัญญ อุทธา และพนกฤษณ คลังบุญครอง. การประเมินค่าความจุทางสิ่งแวดล้อมด้านการจราจรจากหลากหลายปัจจัยบนโครงข่ายถนนในมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยใช้กระบวนการตัดสินใจอย่างเป็นลำดับขั้น. In: *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 22*. 2560. p. 393–405.
- [10] Song L, Black JA, Dunne M. Environmental Capacity Based on Pedestrian Delay and Accident Risk. *Road & Transport Research*. 1993;2(3):40–9.
- [11] Singleton DJ, Twiney PJ. Environmental sensitivity of arterial roads. In: *Proceedings of the 10th Australian Transport Research Forum*. Melbourne: ARRB; 1985. p. 165–82.
- [12] Troutbeck RJ. The characteristics of the times drivers are stopped at unsignalised intersections. In: *Daganzo CF, editor. Transportation and Traffic Theory*. Elsevier Science Publishers; 1993. p. 575–94.
- [13] Affum JK, Taylor MAP. Integration of models for transport planning and analysis and Geographic Information Systems. In: *Papers of the Australasian Transport Research Forum 20(1)*. 1996. p. 15 p.
- [14] Klungboonkrong P, Taylor MAP. The experiences in evaluating the multicriteria traffic environmental impacts in urban road networks using SIMSEPT. *Journal of Advanced Transportation*. 2002; 311–22.
- [15] Klungboonkrong P, Taylor MAP. An Integrated Planning Tool for Evaluating Road Environmental Impacts. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 1999 Sep; 14(5):335–45.
- [16] Klungboonkrong P. A microcomputer- aided system for the multicriteria environmental impact evaluation: The City of Unley case study, Australia. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 1999; 3(1):99–114.
- [17] Widianono DJ, Samuels SE. Towards a general model for the environmental capacity of roads. In: *Proceedings of the 9th Road Engineering Association of Asia and Australasian (REAAA) Conference*. 1998. p. 287–92.
- [18] พนกฤษณ คลังบุญครอง และ ชีระ เกียรติมานะโรจน์. กระบวนการสืบค้นความรู้สำหรับการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อม. In: *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8*. 2545. p. 129–34.
- [19] Klungboonkrong P, Taylor MAP. A

- microcomputer-based-system for multicriteria environmental impacts evaluation of urban road networks. *Computers, Environment and Urban Systems*. 1998; 22(5):425–46.
- [20] ภาคิน ธนณรงค์ พนกฤษณ คลังบุญครอง วินัย ศรีอำพร สุรัตน์ ประมวลศักดิ์กุล และ ขาดิชาญ ไวยสุระสิงห์. การประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมด้านการจราจรหลายปัจจัยเชิงพื้นที่ กรณีศึกษาเมืองขอนแก่น. *วารสารวิจัย มข.* 2563; 20(2).
- [21] OTP. *Final Report of the study design details of the public transport system in Khon Kaen province, and environmental impact*. 2017.
- [22] Caltrans. *CALINE4 – A Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Concentrations Near Roadways, Final Report prepared by the Caltrans Division of New Technology and Research* (Report No. FHWA/CA/TL-84/15). 1989.
- [23] SIRDC. *A study on the development of greenhouse gas emission baseline model in transport sector of a regional city prototype and evaluating the feasibility of reducing greenhouse gas emission in transport sector of Thailand, (in Thai)*. Thailand; 2012.
- [24] Long S. The consequences of electric vehicle and mass transit system development and land use planning on the transport related performances and energy and environmental aspects: the Khon Kaen case study. Khon Kaen University, Thailand; 2017.
- [25] Klungboonkrong P, Jaensirisak S, Satiennam T. Potential performance of urban land use and transport strategies in reducing greenhouse gas emissions: Khon Kaen case study, Thailand. *International Journal of Sustainable Transportation*. 2017;11(1):36–48.
- [26] Garg N, Maji S. A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. *Environmental Impact Assessment Review*. 2014; 46:68–81.
- [27] Pamanikabud P, Vivitjinda P. Noise prediction for highways in Thailand. *Transp Res Part D Transp Environ*. 2002; 7(6):441–9.
- [28] Barry TM, Reagan JA. *FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model*, FHWA- RD- 77- 108. Washington, DC; 1978.
- [29] UK DoT. *Calculation of Road Traffic Noise (CoRTN)*. London; 1988.
- [30] Quiñones-Bolaños EE, Bustillo-Lecompte CF, Mehrvar M. A traffic noise model for road intersections in the city of Cartagena de Indias, Colombia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016; 47:149–61.
- [31] Peng J, Parnell J, Kessissoglou N. A six-category heavy vehicle noise emission model in free-flowing condition. *Applied Acoustics*. 2019; 143:211–21.
- [32] Woolley J, Klungboonkrong P, TAYLOR M, Yue WL. Review Of Relationships Between Traffic Congestion And Noise And Air Emissions. In: *ARRB TRANSPORT RESEARCH LTD CONFERENCE, 19TH*. SYDNEY, NEW SOUTH WALES, AUSTRALIA; 1998.
- [33] Klungboonkrong P, Bejrananda M, Faiboun N. The Application of the Environmental Adaptation Concept to A Collector Road in KKU, Thailand. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*. 2016; 35(3):280–8.
- [34] Klungboonkrong P. Development of A Decision Support Tool for The Multicriteria Environmental Impact Evaluation of Urban Road Networks. University of south Australia.; 1998.
- [35] Huang IB, Keisler J, Linkov I. Multi- criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*. 2011 Sep; 409(19):3578–94.
- [36] Saaty TL. *The Analytic Hierarchy Process: Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill international book company; 1980.
- [37] Saaty TL, Vargas LG. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Boston, MA: Springer US; 2001. (International Series in Operations

Research & Management Science; vol. 34).

- [38] Saaty TL. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. 1990 Sep; 48(1):9–26.