การประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นและแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ในการคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับบนทางหลวงแผ่นดิน: กรณีศึกษา แยกทางหลวงหมายเลข 12 ตัดทางหลวงชนบท มห.4040

Application of analytical hierarchy process and the traffic micro-simulation model on highway interchange selection: Case study of highway no.12 and rural road no. morhor 4040

พชร ศรสุโพธิ์[1] วุฒิไกร ไชยปัญหา[2,*] ปฏิภาณ แก้ววิเชียร[3] และ ธนพล พรหมรักษา[4]

1

2,3,4

Corresponding author; E-mail address: patchara.sr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

กรมทางหลวงชนบทได้ดำเนินการก่อสร้างถนนทางหลวงชนบท หมายเลข มห. 4040 เพื่อเป็นถนนที่สามารถรองรับการขยายตัวของชุมชนและตัวเมืองมุกดาหาร แต่จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการจราจรและระดับการให้บริการในอนาคตของทางแยกถนนโครงการ ตัดกับทางหลวงหมายเลข 12 ได้สะท้อนถึงโอกาสในการเกิดปัญหาการจราจรติดขัดในอนาคตหลังจากเปิดให้บริการ การศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นร่วมกับการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ในการประเมินค่าตัวคูณและค่าคะแนนความสำคัญของปัจจัยสำหรับใช้ในการตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับ ผลการศึกษาพบว่า ในกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักด้านวิศวกรรมจราจรสูงที่สุด (53.27%) และการให้ค่าตัวคูณของทุกเกณฑ์รองด้วยผลลัพธ์ของแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคสามารถทำให้การคำนวณค่าคะแนนของทางเลือกมีความสมเหตุสมผล โดยทางเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับที่มีความเหมาะสมสูงสุด คือ รูปแบบทางเลือกที่ 3 การก่อสร้างทางยกระดับบนทางหลวงหมายเลข 12 ร่วมกับ วงเวียน (99.91 คะแนน) ซึ่งวิธีการนี้จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการใช้พิจารณาตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับสำหรับหน่วยงานที่มีภารกิจหลักในการศึกษาและออกแบบงานในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: ทางแยกต่างระดับ, แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค, กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น

Abstract

Department of Rural Roads has been constructing rural road no. morhor 4040 that can support the expansion of the city of Mukdahan. However, from the results of the analysis of traffic volumes and future service levels of the project road junctions, Intersection with Highway no.12 reflects the potential for future traffic congestion after opening. This study applied the Analytical Hierarchy Process (AHP) together with the traffic micro-simulation model to evaluate the multiplier and score of the factors used in the interchange selection. The results showed that the experts gave the traffic engineering weights the highest (53.27%). The multiplier values of all secondary criteria with the results of the micro simulation model can make the alternative score reasonable. Alternative 3 is the best alternative that construction overpass along Highway no.12 with roundabout (Score = 99.91%). This approach is an alternative option for the interchange selection for agencies whose primary mission of road study and design in the future.

Keywords: interchange, traffic micro-simulation, analytical hierarchy process.

1. บทนำ

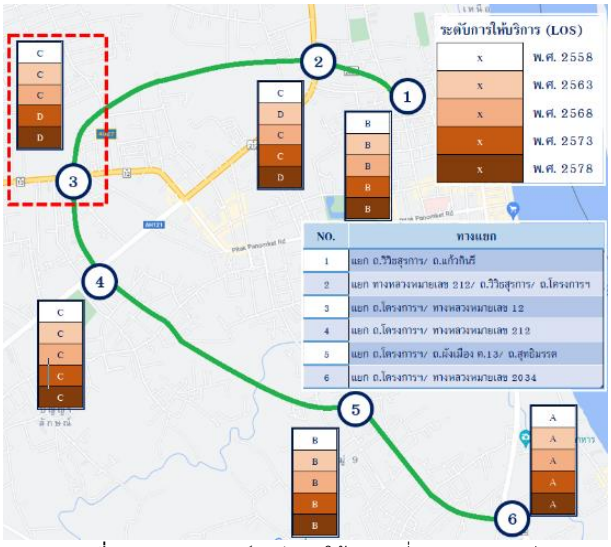
1.1

กรมทางหลวงชนบท ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของผลกระทบจากปัญหาด้านการขนส่งและจราจรที่เกิดขึ้นกับเมืองมุกดาหาร และเพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของโครงข่ายเส้นทางคมนาคมขนส่งและเป็นการรองรับยุทธศาสตร์การพัฒนาจังหวัด จึงได้ดำเนินการก่อสร้างโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมสาย ง2 และ ง3 หรือ ทางหลวงชนบท มห. 4040 เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามแผนงานบูรณาการพัฒนาพื้นที่เขตเศรษฐกิจพิเศษโครงการพัฒนาทางหลวงชนบทเพื่อสนับสนุนเขตเศรษฐกิจพิเศษชายแดน (Special Economic Zone, SEZ) เริ่มต้นโครงการถนนสาย ง2 ที่ถนนวิวิธสุ รการ บรรจบกับถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ระยะทางประมาณ 3.100 กิโลเมตร และถนนสาย ง3 เริ่มต้นจากถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 (ต่อจากถนนสาย ง2) บรรจบกับถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2034 ระยะทางประมาณ 4.458 กิโลเมตร รวมระยะทางทั้งสิ้นประมาณ 7.558 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1

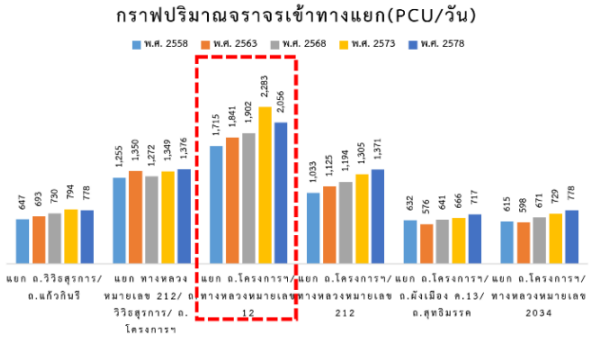


รูปที่ 1 โครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 (มห.4040) ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร [1]

ผลการศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร [1] ในปีเปิดโครงการปี พ.ศ.2558 และทุกๆ 5 ปี นับตั้งแต่เปิดให้บริการไปจนถึงปีที่ 20 พบว่า การวิเคราะห์ระดับการให้บริการที่ทางแยก (Level of Service, LOS) ที่ทางถนนโครงการฯ ตัดกับทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 (หมายเลข 3) มีระดับการให้การบริการอยู่ในระดับ D ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาการจราจรติดขัด และยังมีปริมาณจราจรเข้าสู่ทางแยกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทางแยกอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3



รูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์ระดับการให้บริการที่ทางแยก ทุก 5 ปี



รูปที่ 3 ปริมาณจราจรเข้าสู่ทางแยก ทุก 5 ปี

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการจราจรในอนาคตและระดับการให้บริการของทางแยกถนนโครงการฯ ตัดกับ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ข้างต้น ได้สะท้อนถึงโอกาสในการเกิดปัญหาการจราจรติดขัดบริเวณทางแยกในอนาคต ถึงแม้ว่าในการศึกษาดังกล่าวจะได้กำหนดแนวทางในการรองรับสภาพปัญหาการจราจรติดขัดไว้โดยการปรับปรุงรอบสัญญาณไฟจราจรแต่ไม่สามารถทำให้ระดับการให้บริการของทางแยกในเขตเมืองดีขึ้นจนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

การศึกษานี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการวางแผนแนวทางรองรับและบรรเทาปัญหาการจราจรที่อาจจะเกิดขึ้น จึงจะทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Micro Simulation) ในการวิเคราะห์และประเมินทางเลือกในการจัดการจราจรบริเวณทางแยก ร่วมกับการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลาดับชั้น Analytical Hierarchy Process (AHP) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งใน Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) เพื่อให้เป็นแนวทางเสนอแนะอีกรูปแบบหนึ่งในการจัดลำดับความสำคัญและการคัดเลือกทางเลือกในการจัดการจราจรบริเวณทางแยกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยสามารถลดทอนความยุ่งยากและซับซ้อนในการวิเคราะห์และการรวบรวมข้อมูล จนสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

1.2

เพื่อวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกในการจัดการจราจรบริเวณทางแยกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด จากตัวชี้วัดจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ตามลาดับชั้น

2. ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 *(Analytical Hierarchy Process, AHP)*

กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น เป็นกระบวนการทางทฤษฎี Multiple-Criteria Decision Making ที่นิยมใช้กันอย่างแผ่หลายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้การวิเคราะห์เพื่อช่วยในการตัดสินใจหาทางเลือกที่ดีที่สุด โดยการแยกแยะองค์ประกอบของปัญหาที่เป็นนามธรรมและรูปธรรมออกเป็นส่วนๆ แล้วนำองค์ประกอบเหล่านั้นมาแบ่งเป็นระดับชั้นจากบนสู่ล่างในรูปของแผนภูมิลำดับชั้น จัดเรียงตามลำดับความสำคัญและผลกระทบที่มีต่อปัญหา ผู้ใช้ AHP สามารถเชื่อมโยงองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกันโดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาลำดับความสำคัญและใช้เหตุผลที่ถูกต้องอันเกิดจากประสบการณ์และความสำคัญในปัญหานั้นเป็นพื้นฐาน นอกจากนี้เพื่อความถูกต้อง AHP ยังได้กำหนดมาตรฐานความสอดคล้องขึ้น เพื่อตรวจสอบความมีเหตุผลของการวินิจฉัย และเพื่อให้มั่นใจว่าการตัดสินใจนั้นมีเหตุผลที่สามารถยอมรับได้

มีงานวิจัยและโครงการด้านการขนส่งและจราจรหลายงาน ที่มีการประยุกต์ใช้ทฤษฎี AHP ตัวอย่าง ดังสรุปในตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1 ตัวอย่างงานวิจัยและปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับ AHP

ผู้เขียน (ปี)	ชื่อเรื่อง	เกณฑ์		
		ด้านวิศวกรรม	ด้านเศรษฐศาสตร์	ด้านสิ่งแวดล้อม
มาโนช ชาวสวน (2545) [2]	แบบจำลองการคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับชั้น	สมรรถนะในการรองรับปริมาณความปลอดภัยจากอุบัติเหตุ ความสะดวกในการก่อสร้าง	ค่าก่อสร้างและค่าบำรุงรักษา ค่าเวนคืนที่ดินและทรัพย์สิน	ผลกระทบต่ออาคารใกล้เคียง ผลกระทบต่อสภาพเศรษฐกิจ ผลกระทบต่อการสัญจร ความสวยงาม
สมคเน เสมทัพพระ (2548) [3]	การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัย ที่ใช้ในการพิจารณาปรับปรุงทางแยกระดับราบของกรมทางหลวง โดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับชั้น	อุบัติเหตุ ปริมาณการจราจร เรขาคณิต และการมองเห็นของทางแยก ผลกระทบที่จะเกิดกับแผนการก่อสร้างในอนาคต	ค่าเวนคืน ค่าก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการใช้ทาง (สภาพปัจจุบัน) ค่าบำรุงรักษา	ผลกระทบที่จะเกิดกับสภาพทาง กายภาพ ดิน น้ำฝุ่น ละออง ผลกระทบที่จะเกิดต่อประชาชน ผลกระทบที่จะเกิดกับการใช้ที่ดินบริเวณทางแยก
นันทวัน	การศึกษา	การ	ค่าก่อสร้าง	คุณภาพอากาศ

เสนชู (2553) [4]	วิเคราะห์รูปแบบทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมในเขตชุมชนเมือง กรณีศึกษา:ทางแยกแคราย-ทางหลวงหมายเลข 302 (ถนนรัตนาธิเบศร์) กับทางหลวงหมายเลข 306 (ถนนติวานนท์)	เปลี่ยนแปลงทางแนวราบ การเปลี่ยนแปลงทางแนวดิ่ง ความล่าช้าเฉลี่ยของบริเวณทางแยก ระดับการให้บริการของทางแยกต่าง	ค่าเวนคืน ค่าบำรุงรักษา ค่าใช้จ่ายผู้ใช้ทาง	เสียง และการสั่นสะเทือน การโยกย้ายเวนคืนที่ดินบ้านเรือน ผลกระทบต่อสาธารณูปโภค ผลกระทบต่อทัศนียภาพ ผลกระทบต่อการประกอบธุรกิจและชีวิตความเป็นอยู่ของประชาชนในพื้นที่

ตารางที่ 2 ตัวอย่างงานวิจัยและปัจจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับ AHP (ต่อ)

ผู้เขียน (ปี)	ชื่อเรื่อง	เกณฑ์		
		ด้านวิศวกรรม	ด้านเศรษฐศาสตร์	ด้านสิ่งแวดล้อม
วรวิทย์ หมั่นวงศ์ (2564) [5]	การศึกษาวิเคราะห์รูปแบบทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมในเขตนอกเมือง กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 35 (ถนนพระราม 2) กับทางหลวงชนบท สค. 2055	เรขาคณิตทางแนวราบ เรขาคณิตทางแนวดิ่ง ระยะเวลาในการก่อสร้าง ความเร็วเฉลี่ยที่ผ่านทางแยก ความพร้อมของสถานที่ก่อสร้าง	มูลค่าการก่อสร้าง มูลค่าการเวนคืน มูลค่าการบำรุงรักษา มูลค่าประหยัดค่าใช้ยานพาหนะ มูลค่าประหยัดเวลาเดินทาง มูลค่าประหยัดจากอุบัติเหตุ	การโยกย้ายครัวเรือน การประกอบธุรกิจ การจราจรขณะก่อสร้าง ระบบสาธารณูปโภค
Irena Ištoka Otković (2021) [6]	Combining Traffic Microsimulation Modeling and Multi-Criteria Analysis for Sustainable Spatial-Traffic Planning	functional traffic criteria functional traffic criterion of bicycle traffic functional traffic criterion of pedestrian traffic functional traffic criterion for stationary traffic	Construction Maintenance Fuel consumption	Carbon monoxide (CO) Nitrogen oxide emission (NOx) Volatile organic compounds (VOC)

2.2

2.2.1

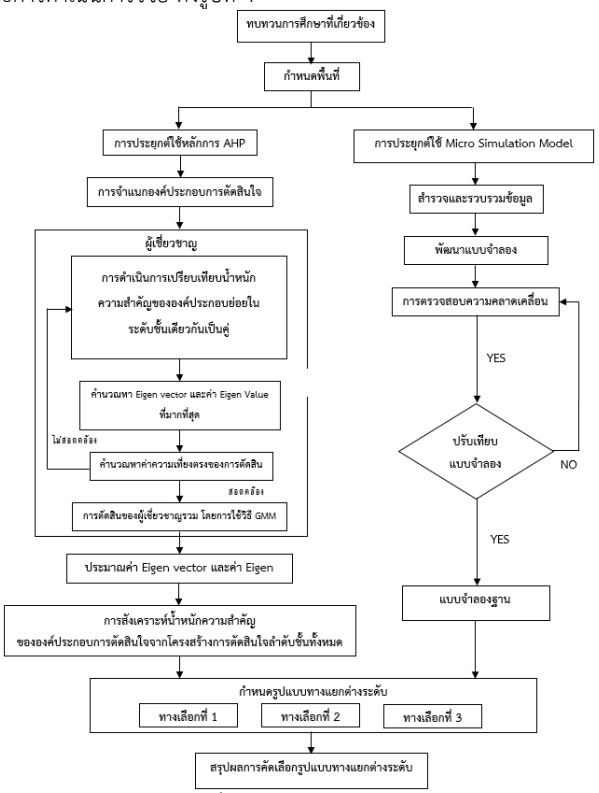
Dowling et al. (2004) [7] แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคเป็นการจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ ของยานพาหนะ (Vehicle) รายคันโดยอาศัยหลักการพื้นฐานการจำลองการการขับขี่ตามกันของยานพาหนะ (Car Following Rules) และการจำลองเปลี่ยนช่องจราจร (Lane Changing Rules) ซึ่งถูกกำหนดให้กับยานพาหนะแต่ละคันก่อนที่จะปล่อย เข้าสู่แบบจำลอง โดยใช้หลักการกระจายตัวทางสถิติขึ้นอยู่กับต้นทางและปลายทางของยานพาหนะแต่ละประเภทรวมไปถึงลักษณะการขับขี่ในแต่ละประเภท ซึ่งการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคนั้น ต้องคำนึงถึงการปรับเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

2.2.2 VISSIM

จากการทบทวนผลการศึกษาทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวกับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของแต่ละโปรแกรมที่เป็นที่นิยมและใช้ในการจำลองสภาพการจราจรอย่างแพร่หลายในปัจจุบันข้างต้น พบว่า โปรแกรม VISSIM มีความเหมาะสมในการจำลองสภาพการจราจรสำหรับการศึกษาครั้งนี้ โดยภาพรวมโปรแกรม VISSIM มีความสามารถเทียบเคียงกับโปรแกรมอื่นๆ ในการจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งมีฟังก์ชันที่ครอบคลุมในการประยุกต์ใช้จำลองสภาพการจราจรและมีข้อได้เปรียบสำคัญที่เหนือกว่าหลายๆ โปรแกรม คือ สามารถจำลองการเคลื่อนที่ด้านข้างระหว่างช่องจราจรและการจำลองรถจักรยานยนต์ได้เสมือนจริงมากกว่าโปรแกรมอื่น (Mahmod and Arem, (2008) [8] พร้อมทั้งมีแบบจำลองพฤติกรรมการขับขี่ไม่ตามช่องจราจรหลัก (Non-Lane Based Behavior)PTV (2014) [9] ซึ่งทำให้การจำลองมีความคล้ายคลึงสภาพจริงและสามารถเลียนแบบพฤติกรรมการขับขี่ของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ที่มีฟังก์ชันการทำงานครบถ้วนและครอบคลุมและเหมาะสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลองด้านการจราจรในระดับจุลภาคอย่างยิ่ง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

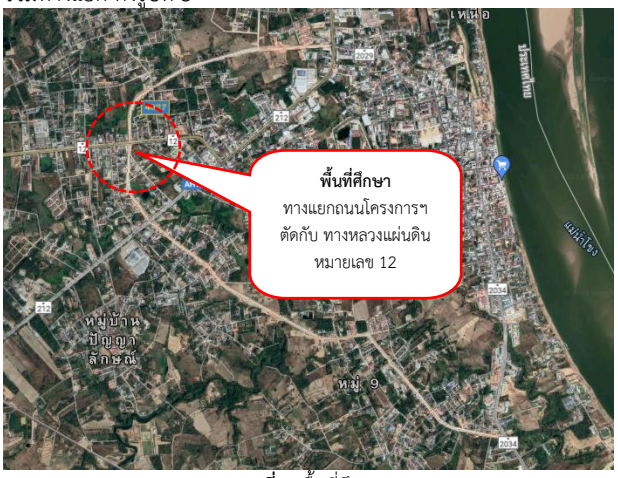
ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารายงานผลการศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร และนำข้อมูลที่ได้จากรายงานดังกล่าวพัฒนาแบบจำลองระดับจุลภาค เพื่อนำมาผลที่ได้มาวิเคราะห์ รูปแบบทางแยกที่มีความเหมาะสมร่วมกับการวิเคราะห์ในกระบวนการ AHP โดยสรุปวิธีการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1

โครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวม ถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร หรือ ทางหลวงชนบทหมายเลข มห. 4040 ก่อสร้างเพื่อรองรับการท่องเที่ยว การค้าชายแดน และการขยายตัวของเมือง และการก่อสร้างแนวถนนตัดใหม่นั้นยังเป็นการเพิ่มจุดตัดทางร่วมทางแยก ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 พื้นที่ศึกษา

3.2 AHP

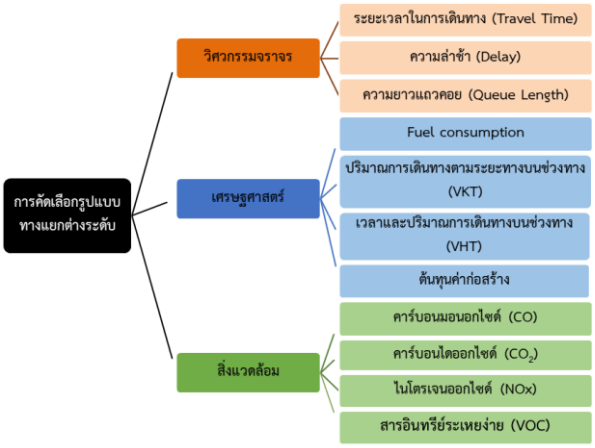
สำหรับเกณฑ์ที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับด้วยวิธี AHP ประกอบด้วย 3 เกณฑ์ ได้แก่ ด้านวิศวกรรมจราจร ด้านเศรษฐกิจ และด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดเกณฑ์รองที่มีลักษณะเป็นอัตนัย (Subjective) ซึ่งทำให้การให้ค่าตัวคูณของปัจจัยขึ้นอยู่กับมุมมองของผู้ให้ค่าตัวคูณจนอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้อยู่ภายในอคติ (Bias) งานวิจัยนี้จึงกำหนดหลักเกณฑ์รองด้านต่างๆ โดยพิจารณาจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคทั้งหมด อย่างไรก็ตามเนื่องจากมูลค่าในการก่อสร้างนับเป็นเกณฑ์ที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการพิจารณาคัดเลือกรูปแบบทางแยกหรือโครงการ มูลค่าในการก่อสร้างจึงถูกนำมาพิจารณาด้วยเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์ที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับจากผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาค

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง
ด้านวิศวกรรมจราจร	ระยะเวลาในการเดินทาง (Travel Time)
	ความล่าช้า (Delay)
	ความยาวแถวคอย (Queue Length)
ด้านเศรษฐศาสตร์	อัตราการใช้น้ำมัน (Fuel Consumption)
	ปริมาณการเดินทางตามระยะทางบนช่วงทาง (VKT)
	เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT)
	ต้นทุนค่าก่อสร้าง
ด้านสิ่งแวดล้อม	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)
	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2)
	ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)
	สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)

3.2.1

ผู้วิจัยได้จำแนกองค์ประกอบต่างๆ ของกระบวนการตัดสินใจออกเป็นส่วนย่อย เพื่อเข้าสู่การจัดรูปแบบโครงสร้างการตัดสินใจ (Hierarchy Structure) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์กันขององค์ประกอบการในตัดสินใจส่วนย่อย ๆ ทั้งหมด เป็นโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้นจากซ้ายไปขวา ตามแผนภูมิโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภูมิโครงสร้างการตัดสินใจแบบลำดับชั้น

3.2.2

ขั้นตอนนี้จะเป็นการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญ ในแต่ละองค์ประกอบการตัดสินใจในแต่ละระดับชั้นของโครงสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ โดยการให้ค่าน้ำหนักความสำคัญที่พิจารณาเปรียบเทียบเป็นคู่ (ผู้ตัดสินใจ) ซึ่งตัวเลขค่าคะแนนน้ำหนักความสำคัญมีรากฐานทางทฤษฎีและการทดลองที่มีเหตุมีผลรองรับและสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างเป็นระบบและมีประสิทธิภาพ ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดค่าคะแนนความสำคัญเปรียบเทียบ 1 – 10 โดย 1 ให้คำจำกัดความว่าการวินิจฉัยของทั้งสองปัจจัยมีผลเท่ากัน ส่วนตัวเลขที่มีค่ามากกว่า 1 แสดงถึงการวินิจฉัยว่าปัจจัยหนึ่งสำคัญมากกว่าปัจจัยหนึ่งตั้งแต่เล็กน้อย ปานกลาง ไปจนถึงมากตามลำดับตัวเลขที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2- 9

3.2.3

ในการกำหนดจำนวนผู้เชี่ยวชาญในการให้ค่าน้ำหนักด้วยวิธี AHP Gómez Romero et al., (2019) [10] กล่าวโดยสรุปว่า จำนวนผู้เชี่ยวชาญไม่สำคัญแต่สำคัญที่คุณภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญที่ประกอบด้วยนักวิชาการและผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ในด้านการออกแบบ ศึกษา และวิเคราะห์ความเหมาะสมของโครงการด้านงานทาง ทั้งสิ้น 3 ด้าน ได้แก่ ด้านวิศวกรรมจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม โดยจะใช้ผู้เชี่ยวชาญด้านละ 5 ท่าน รวม 15 ท่าน ซึ่งเป็นจำนวนที่ใกล้เคียงกับหลายๆการศึกษาในอดีต [2][5] ทั้งนี้ผู้เชี่ยวชาญที่ร่วมให้ค่าน้ำหนักด้วยวิธี AHP ในงานวิจัยนี้เป็นผู้ที่มีความรู้เฉพาะด้านโดยตรง มีประสบการณ์ในการทำงานมากกว่า 10 ปี และมีการศึกษาระดับปริญญาโทขึ้นไป

3.2.4

เมื่อผู้เชี่ยวชาญได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์หลักและเกณฑ์รอง ในแต่ละชั้นของโครงสร้างลำดับชั้นแล้ว โดยทั่วไปกระบวนการตัดสินใจสังเคราะห์น้ำหนักแบบ AHP จะประยุกต์ใช้หลักการ “Principle of Hierarchy Composition” ในการสังเคราะห์น้ำหนักความสำคัญแต่ละค่าของแต่ละเกณฑ์

3.2.5

การวิเคราะห์ความสอดคล้องกันของเหตุผล สามารถทำได้โดยพิจารณาจากจำนวนปัจจัย ถ้าจำนวนปัจจัยเท่ากับ 3 ค่า CR ไม่ควรเกิน 7% และถ้าจำนวนปัจจัยเกินกว่า 4 ค่า CR ไม่ควรเกิน 10% ทั้งนี้ถ้าหาก CR มีค่าเกินกว่ามาตรฐานดังกล่าว แสดงว่าเหตุผลนั้นไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องทบทวนการวินิจฉัยที่ได้ทำไปแล้วใหม่

3.3 *VISSIM*

3.3.1

ผู้วิจัยทำการกำหนดปริมาณจราจรนำเข้า จากผลการศึกษาและคาดการณ์ปริมาณการจราจรในอนาคตโครงการก่อสร้างถนนตามผังเมืองรวมถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมเมืองมุกดาหาร บริเวณทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ตัดกับทางหลวงชนบทหมายเลข 4040 โดยเลือกใช้ข้อมูลปริมาณจราจรจากการคาดการณ์ปริมาณจราจรในปีที่ 20

3.3.2

(1) การสำรวจความเร็วเฉพาะจุด ในการศึกษาครั้งนี้ เนื่องจากโครงการก่อสร้างในปัจจุบันยังไม่แล้วเสร็จ ผู้วิจัยจะทำการเก็บข้อมูลบริเวณทางแยกใกล้เคียง คือบริเวณทางแยกทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 12 ตัดกับ ทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 238 ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับถนนโครงการ ในการเก็บข้อมูลความเร็วจะใช้ Rader Gun ซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการวัดความเร็วเฉพาะจุด หรือ Time mean speed หรือ Spot speed ที่สะดวกต่อการใช้งาน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การสำรวจความเร็ว

(2) การสำรวจระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย (Standstill distance) ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจด้วยวิธีการบันทึกภาพจากวิดีโอบริเวณด้านข้างของช่วงถนนและทำการถอดข้อมูลระยะหยุดนิ่งเฉลี่ยของรถสองคันที่จอดต่อกันแต่ละคู่เฉพาะรถยนต์ส่วนบุคคลเป็นตัวแทนของข้อมูล ด้วยโปรแกรมตัดต่อและจับเวลาจากกล้องวีดีโอ ตัวอย่างการสำรวจระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การสำรวจระยะหยุดนิ่งเฉลี่ย

3.3.3 *VISSIM*

เมื่อได้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM โดยมีรายละเอียดขั้นตอนสำคัญ ดังนี้

(1) การสร้างแนวถนนโครงข่ายแบบจำลอง

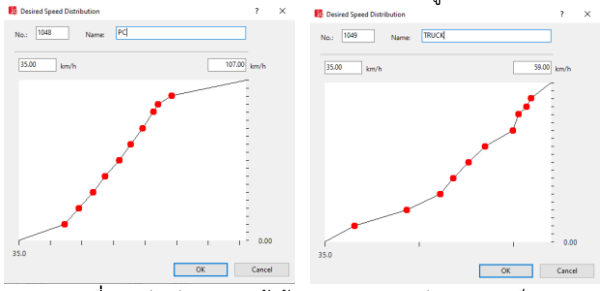
เริ่มจากการนำเข้าแบบแปลนโครงการเพื่อเป็นแนวในการสร้างลิงค์หรือแนวถนนโดยแต่ละลิงค์จะกำหนดช่องจราจรทั้งขนาดความกว้างจำนวนช่องจราจรและลักษณะของถนนตามข้อมูลที่ได้รวบรวม ซึ่งแต่ละลิงค์จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยคอนเน็คเตอร์ ทำให้เกิดเป็นโครงข่ายถนน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การสร้างแนวถนนโครงข่ายแบบจำลอง

(2) การนำเข้าข้อมูล

เป็นการนำเข้าข้อมูลข้อมูลปริมาณจราจร ในแต่ละประเภทและทิศทาง จากนั้นจะเป็นการกำหนดความเร็วที่ได้จากการสำรวจ (รูปที่ 10) รวมไปถึงการติดตั้งระบบไฟจราจรและการกำหนดพื้นที่เก็บข้อมูล



รูปที่ 10 ตัวอย่างการนำเข้าข้อมูลการกระจายตัวของความเร็ว

(3) การประมวลผลแบบจำลอง

เป็นขั้นตอนในการกำหนดรายละเอียดในการประมวลผลแบบจำลอง โดยสามารถปรับค่าต่างๆ เช่น ความเร็วในการประมวลผลแบบจำลอง การสุ่มหมายเลขผลที่ได้จากแบบจำลอง (Seed) เป็นต้น



รูปที่ 11 ตัวอย่างภาพจากประมวลผล (Run) แบบจำลอง

(4) การปรับเทียบแบบจำลอง

เกณฑ์สำหรับการปรับเทียบแบบจำลองระดับจุลภาคได้นำมาจาก Wisconsin Department of Transportation (Wisconsin DOT) [11] โดยใช้ค่าสถิติ GEH ในการปรับเทียบ ดังแสดงในสมการที่ 1

$$GEH = \sqrt{\frac{(simulated - observed)}{0.50 \times (simulated + observed)}} \quad (1)$$

เมื่อ

simulated คือ ค่าที่ได้จากการประมวลผลแบบจำลอง
observed คือ ค่าที่ได้จากสำรวจจริง

Quadstone Paramics (2007) [12] กล่าวว่า ค่าของ GEH ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดความสอดคล้องและคุณภาพของข้อมูล ซึ่งค่า GEH < 5.0 แสดงว่าการตรวจสอบปริมาณจราจรที่ได้จากการประมวลผลในแบบจำลองที่พิจารณามีความสอดคล้องอย่างดีกับผลการสำรวจจริงในภาคสนาม

ตารางที่ 4 ผลการปรับเทียบแบบจำลอง

ทิศทาง	ทิศทางการเดินรถ	ปริมาณจราจรจากผลคาดการณ์ (คัน/ชม.)	ปริมาณการจราจรจากแบบจำลอง (คัน/ชม.)	% ความแตกต่าง	GEH<5	ผ่าน/ไม่ผ่าน
ทิศมุ่งเหนือ	ซ้าย	121	117	3.31	0.37	✓
	ตรง	466	479	2.79	0.60	✓
	ขวา	30	30	0	0.00	✓
ทิศมุ่งใต้	ซ้าย	56	58	3.57	0.26	✓
	ตรง	655	631	3.66	0.95	✓
	ขวา	468	478	2.14	0.46	✓
ทิศมุ่งตะวันออก	ซ้าย	360	372	3.33	0.63	✓
	ตรง	458	438	4.37	0.94	✓
	ขวา	126	135	7.14	0.79	✓
ทิศมุ่งตะวันตก	ซ้าย	27	31	14.81	0.74	✓
	ตรง	500	496	0.80	0.18	✓
	เขวา	27	31	14.81	0.74	✓

3.4

ผู้วิจัยได้กำหนดรูปแบบทางแยกต่างระดับ เพื่อลดจุดตัดของกระแสจราจรและเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาการจราจรติดขัด โดยได้นำเสนอรูปแบบทางแยกต่างระดับทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังนี้

(1) รูปแบบที่ 1 ทางแยกต่างระดับแบบสะพานข้ามทางแยก (Overpass) ก่อสร้างในแนวทางหลวงหมายเลข 12

เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับแบบสะพานข้ามทางแยก (Overpass) ก่อสร้างในแนวทางหลวงหมายเลข 12 ยกระดับข้ามบริเวณทางแยก ขนาด 4 ช่องจราจร(ทิศทาง ไป กระดับข้

2.4			ต้นทุนค่าก่อสร้าง	39.99
3.1	ด้านสิ่งแวดล้อม	24.82	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	32.44
3.2			คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2)	18.93
3.3			ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)	27.26
3.4			สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)	21.37

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 7 ค่าน้ำหนักที่ได้ในแต่ละเกณฑ์ มีค่าน้ำหนักที่ไม่เท่ากัน ทำให้ทราบว่าผู้เชี่ยวชาญนั้นให้ค่าน้ำหนักของเกณฑ์หลักด้านวิศวกรรมจราจรมากที่สุด เท่ากับ 53.27 คะแนน

4.2 VISSIM

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลเพื่อให้ได้ค่าตัวชี้วัดด้านการจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม จากแบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาคทางแยกต่างระดับ ทั้ง 3 รูปแบบ ได้แก่ ระยะเวลาในการเดินทาง, ความล่าช้า, ความยาวแถวคอย, ปริมาณการเดินทางตามระยะทางบนช่วงทาง (VKT), เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT), การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง, คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2), ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx), สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับจุลภาค ด้านวิศวกรรมจราจร

รูปแบบทางแยกต่างระดับ	ระยะเวลาในการเดินทาง (วินาที)	ความล่าช้า (วินาที/คัน)	ความยาวแถวคอย (เมตร)
รูปแบบที่ 1 สะพานยกระดับตามแนวทล.12	167.98	36.97	36.97
รูปแบบที่ 2 อุโมงค์ทางลอดตามแนวทล. 12	169.45	38.54	38.54
รูปแบบที่ 3 สะพานยกระดับทล.12+วงเวียน	152.09	20.91	20.91

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับจุลภาค ด้านเศรษฐศาสตร์

รูปแบบทางแยกต่างระดับ	ปริมาณการเดินทางตามระยะทางบนช่วงทาง (VKT) (คัน-กิโลเมตร)	เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT) (คัน-วินาที)	การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร)	ค่าก่อสร้าง (ล้านบาท)*
รูปแบบที่ 1	247.50	45,327.49	416.54	319
รูปแบบที่ 2	247.34	45,745.59	418.05	699
รูปแบบที่ 3	245.88	40,494.16	355.20	324

*หมายเหตุ : งานวิจัยนี้ได้นำค่าก่อสร้างรูปแบบทางแยกต่างระดับ จากโครงการสำรวจออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาจราจรบริเวณทางแยก บนถนนสาย ชร. 5023 ต.รอบเวียง อ.เมือง จ.เชียงราย โดยกรมทางหลวงชนบท ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพของทางแยกต่างระดับใกล้เคียงกับรูปแบบทางแยกต่างระดับในงานวิจัยนี้ [13]

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับจุลภาค ด้านสิ่งแวดล้อม

รูปแบบทางแยกต่างระดับ	คาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) (กรัม)	คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) (กก./วินาที)	ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) (กรัม)	สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC) (กรัม)
รูปแบบที่ 1	7,691.53	2,933.36	1,496.49	1,782.59
รูปแบบที่ 2	7,719.43	2,964.89	1,501.92	1,789.05
รูปแบบที่ 3	6,558.98	2,512.05	1,276.14	1,520.11

4.3

สำหรับการระบุค่าตัวคูณแบบสัดส่วนของสมการเชิงเส้น (Linear Equation) จะพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าตัวชี้วัดของรูปแบบที่ดีที่สุด (อาจจะมากที่สุดหรือน้อยที่สุดขึ้นอยู่กับตัวชี้วัดที่พิจารณา) ให้มีค่าตัวคูณเท่ากับ 1.00 ส่วนรูปแบบทางเลือกอื่นๆ จะมีค่าตัวคูณตามสัดส่วนของสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ตัวอย่างสมการที่ 2

$$MSdi = 1.00 - \left[\frac{Sdi - Sd\min}{Sd\max} \right] \quad (2)$$

โดยที่ $MSdi$ = ค่าตัวคูณความล่าช้าของรูปแบบ i
Sdi = ค่าตัวชี้วัดความล่าช้าของรูปแบบ i
$Sd\min$ = ค่าตัวชี้วัดความล่าช้าที่น้อยที่สุด
$Sd\max$ = ค่าตัวชี้วัดความล่าช้าที่มากที่สุด

ตารางที่ 9 ค่าตัวคูณจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับจุลภาค

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองระดับจุลภาค	ค่าตัวคูณรูปแบบทางแยกต่างระดับ		
	รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
ระยะเวลาในการเดินทาง (MStt)	0.91	0.9	1
ความล่าช้า (MSd)	0.58	0.54	1
ความยาวแถวคอย (MSq)	0.46	0.44	1
VKT (MSvkt)	0.99	0.99	1
VHT (MSvht)	0.86	0.85	1
การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง (MSf)	0.89	0.89	1
ต้นทุนค่าก่อสร้าง (MSc)	1	0.46	0.99
คาร์บอนมอนอกไซด์ (MSco)	0.85	0.85	1
คาร์บอนไดออกไซด์ (MSco2)	0.86	0.85	1
ไนโตรเจนออกไซด์ (MSnox)	0.85	0.85	1
สารอินทรีย์ระเหยง่าย (MSvoc)	0.85	0.85	1

4.4

ผลจากการวิเคราะห์แบบลำดับชั้น (AHP) โดยการพิจารณาของผู้เชี่ยวชาญ เป็นค่าน้ำหนัก จะถูกนำมาคูณกับค่าตัวคูณแต่ละเกณฑ์ซึ่งได้จากผลการวิเคราะห์ค่าตัวชี้วัดด้านการจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค เพื่อสรุปเป็นค่าคะแนนของแต่ละทางเลือก จากคะแนนเต็ม 100 คะแนน ดังตารางที่ 10-11

ตารางที่ 10 ผลค่าคะแนนรูปแบบทางแยกต่างระดับ

No.	เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง	ค่าคะแนนทางแยกต่างระดับ		
			รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
1.1	ด้านวิศวกรรมจราจร	ระยะเวลาในการเดินทาง	15.44	15.27	16.96

1.2		ความล่าช้า	13.21	12.30	22.78
1.3		ความยาวแถวคอย	6.22	5.95	13.52

ตารางที่ 11 ผลค่าคะแนนรูปแบบทางแยกต่างระดับ (ต่อ)

No.	เกณฑ์หลัก	เกณฑ์รอง	ค่าคะแนนทางแยกต่างระดับ		
			รูปแบบที่ 1	รูปแบบที่ 2	รูปแบบที่ 3
2.1	ด้านเศรษฐศาสตร์	การบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิง	3.65	3.65	4.10
2.2		ปริมาณการเดินทางตามระยะทางบนช่วงทาง (VKT)	4.21	4.21	4.25
2.3		เวลาและปริมาณการเดินทางบนช่วงทาง (VHT)	4.13	4.08	4.80
2.4		ต้นทุนค่าก่อสร้าง	8.76	4.03	8.67
3.1	ด้านสิ่งแวดล้อม	คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	6.84	6.84	8.05
3.2		คาร์บอนไดออกไซด์ (CO2)	4.04	3.99	4.70
3.3		ไนโตรเจนออกไซด์ (NOx)	5.75	5.75	6.76
3.4		สารอินทรีย์ระเหยง่าย (VOC)	4.51	4.51	5.31
รวมคะแนน			76.76	70.58	99.91

5. สรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นและแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค ในการคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับบนทางหลวงแผ่นดิน: กรณีศึกษา แยกทางหลวงหมายเลข 12 ตัดทางหลวงชนบท มห.4040 ในการศึกษานี้ได้พิจารณาเกณฑ์ที่ใช้การคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับด้วยวิธี AHP ประกอบด้วย 3 เกณฑ์หลัก ได้แก่ ด้านวิศวกรรมจราจร ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านสิ่งแวดล้อม และกำหนดเกณฑ์รองที่พิจารณาจากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคทั้งหมด 11 เกณฑ์รอง ผลการวิเคราะห์และจัดลำดับความสำคัญที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ 15 ท่าน พบว่า ผู้เชี่ยวชาญให้ค่าน้ำหนักด้านวิศวกรรมจราจรสูงที่สุด (53.27%) รองลงมาคือด้านสิ่งแวดล้อม (24.82%) และด้านเศรษฐศาสตร์ (21.91%) ตามลำดับ และจากผลการให้ค่าตัวคูณจากแบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคแสดงให้เห็นว่ารูปแบบทางแยกต่างระดับรูปแบบที่ 3 ทางแยกต่างระดับแบบสะพานข้ามทางแยก ก่อสร้างในแนวทางหลวงหมายเลข 12 ร่วมกับวงเวียน เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมที่สุด โดยได้ค่าคะแนนรวมที่ 99.91 คะแนนจากคะแนนเต็ม 100 คะแนน

ทั้งนี้ทางแยกต่างระดับรูปแบบที่ 3 เป็นรูปแบบทางแยกต่างระดับที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีความโดดเด่นในเกณฑ์การตัดสินใจด้านวิศวกรรม (เวลาในการเดินทาง, ความล่าช้า และความยาวแถวคอย) ที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอื่นๆ ซึ่งสะท้อนถึงความคล่องตัวและประสิทธิภาพในการให้บริการการจราจร ในขณะที่เกณฑ์การตัดสินใจในด้านเศรษฐศาสตร์ รูปแบบที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในด้านค่าใช้จ่ายเมื่อพิจารณาจากระยะทางและเวลาโดยรวมที่ผู้ขับขี่ต้องใช้ในการเดินทางผ่านทางแยก ซึ่งสะท้อนโดยตรงจากปริมาณการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น ในขณะที่ราคาก่อสร้างต่ำกว่ารูปแบบที่ 2 และใกล้เคียงกับรูปแบบที่ 1 เช่นเดียวกันกับเกณฑ์การตัดสินใจด้านสิ่งแวดล้อม รูปแบบที่ 3 ยังคงเป็นรูปแบบทางแยกที่ทำให้เกิดผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดเมื่อพิจารณาจากการปลดปล่อยมลพิษทั้งหมด

เนื่องจากงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะเกณฑ์การตัดสินใจที่สามารถประมวลผลได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองระดับจุลภาคเท่านั้น แต่ในการวิเคราะห์ในบางโครงการที่ผลของเกณฑ์ด้านวิศวกรรม ด้านเศรษฐกิจ และด้านสิ่งแวดล้อม มีความแตกต่างหรือมีส่วนสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของโครงการอย่างมาก อาจจำเป็นต้องพิจารณาเกณฑ์รองในด้านอื่นๆเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้จะเป็นอีกหนึ่งทางเลือกหนึ่งในการใช้พิจารณาตัดสินใจคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับสำหรับหน่วยงานที่มีภารกิจหลักในการศึกษาและออกแบบงานทางในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้ขอขอบคุณ สำนักสำรวจออกแบบ กรมทางหลวงชนบท และแขวงทางหลวงชนบทมุกดาหาร ผู้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับงานวิจัยนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

[1] กรมทางหลวงชนบท. (2552). รายงานผลการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลในการคาดการณ์ปริมาณจราจร งานสำรวจออกแบบรายละเอียดและศึกษาผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น(IEE) โครงการก่อสร้างถนนคามผังเมืองรวม ถนนสาย ง2 และ ง3 ผังเมืองรวมมุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร, หน้า 52-65.

[2] มาโนช ชาวสวน. (2545). แบบจำลองการคัดเลือกรูปแบบทางแยกต่างระดับโดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับชั้น วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[3] สมคเน เสมทัพพระ. (2548). การวิเคราะห์ลำดับความสำคัญของปัจจัย ที่ใช้ในการพิจารณาปรับปรุงทางแยกระดับราบของกรมทางหลวง โดยกระบวนการวิเคราะห์เป็นลำดับขั้น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมและการบริหารการก่อสร้าง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

[4] นันทวัน เสนชู. (2553). การศึกษาวิเคราะห์รูปแบบทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมในเขตชุมชนเมือง กรณีศึกษา: ทางแยกแคราย-ทางหลวงหมายเลข 302 (ถนนรัตนาธิเบศร์). วิศวกรรมสาร มก, ปีที่ 22, ฉบับที่ 70, หน้า 57-69.

[5] วรวิทย์ หมั่นวงศ์. (2564). การศึกษาวิเคราะห์รูปแบบทางแยกต่างระดับที่เหมาะสมในเขตนอกเมือง กรณีศึกษาทางหลวงหมายเลข 35 (ถนนพระราม 2) กับทางหลวงชนบท สค. 2055. , ปีที่ 12, ฉบับที่ 3, หน้า 34-46.

[6] Irena Ištoka Otkovi´c. (2021). Combining Traffic Microsimulation Modeling and Multi-Criteria Analysis for Sustainable Spatial-Traffic Planning. *Land*, 10(7), 666, PP.1-26.

[7] Dowling, R., Skabardonis,A and Alexiadis.v. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volumn II*, Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Model Software, CA, PP.100-102.

[8] Mahmod, M., and van Arem, B. (2008). Environmentally Friendly Traffic Management using Integrated Road-Vehicle Systems. *15th World Congress on Intelligent Transport Systems*, New York, USA, November 16-20, 2008.

[9] PTV Planning Transport Verkehr AG. (2014) VISSIM User manual.

[10] Gomez ´ Romero, J., Soto Flores, R., & Garduno ˜ Rom´ an, S. (2019). Determination of the Weightings of Hydroelectric Sustainability Criteria by Combining AHP and GP extended Methods. *Ingeniería*, 24(2), PP.116-142.

[11] Wisconsin DOT. (2002). Paramics Calibration and Validation Guideline, Freewey System Operational Assessment, Technical Report I-33, District 2, Milwaukee, WI. June 2002.

[12] Quadstone Paramic. (2007). Estimate User Manual. Scotland, Quadstone Paramics Ltd.

[13] กรมทางหลวงชนบท. (2562) โครงการสำรวจออกแบบเพื่อแก้ไขปัญหาจราจรบริเวณทางแยก บนถนนสาย ชร. 5023 ต.รอบเวียง อ.เมือง จ.เชียงราย.