

รายงาน

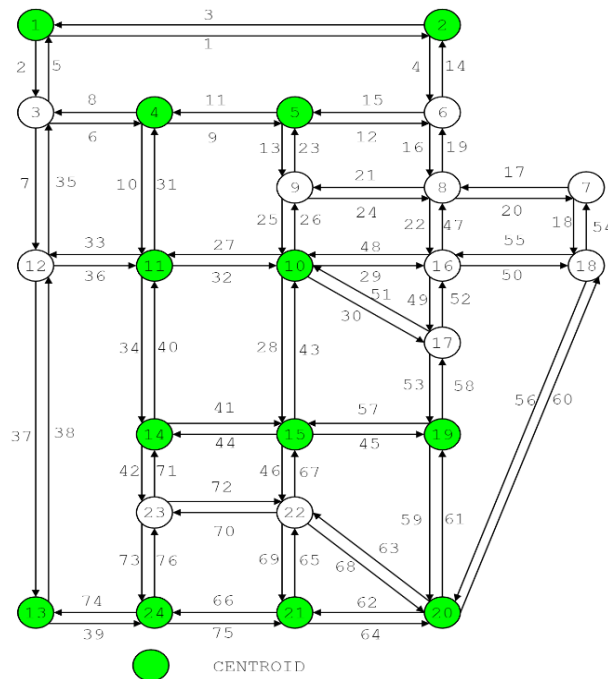
Final Term Project

User Equilibrium: Sioux Falls Network

1. บทนำ

เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของประชากรในพื้นที่หนึ่ง ระบบการเดินทางในพื้นที่นั้นๆจะได้รับผลกระทบโดยตรง โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของประชากรทุกๆ ปี สิ่งอำนวยความสะดวกสำหรับการเดินทางในพื้นที่นั้นๆ อาจไม่พร้อมที่จะรองรับการเดินทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาในการเดินทาง เช่น ปัญหาจราจรติดขัด สาเหตุเกิดจากถนนภายในพื้นที่นั้นไม่เพียงพอต่อปริมาณการเดินทางที่เพิ่มขึ้นในทุกๆ ปี โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีรูปแบบการเดินทางเดียวกัน เช่น การใช้รถยนต์อย่างเดียวเพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น การวางแผนในการพัฒนาระบบขนส่งเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถรองรับการเดินทางของประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT lane) และ เส้นทางสำหรับรถจักรยาน (Bike lane) เป็นหนึ่งในวิธีที่น่าสนใจที่ช่วยเพิ่มความสะดวกในการเดินทาง ลดปัญหาจราจรติดขัด รวมถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นการวางแผนและ การสร้างเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT lane) และ เส้นทางสำหรับรถจักรยาน (Bike lane) จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาการเดินทางในพื้นที่ที่มีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเพื่อออกแบบการสร้างเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT lane) และเส้นทางสำหรับรถจักรยาน (Bike lane) เพื่อลดปัญหาจราจรติดขัดที่เกิดขึ้นจากการใช้รถยนต์เป็นหลักในการเดินทางเท่านั้น ในระบบการเดินทางในเครือข่ายถนนในเมือง Sioux Falls ในรัฐเซาท์ดาโคตาของสหรัฐอเมริกา จากภาพที่ 1 ที่ประกอบด้วยจุดสังเกต (Node) 24 จุดที่เชื่อมโยงด้วยเส้นทาง (Link) เพื่อการเดินทาง 76 เส้นทาง การออกแบบเส้นทางใหม่สำหรับรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT lane) และรถจักรยาน (Bike lane) ในเส้นทางที่มีอยู่เดิมเพื่อเพิ่มทางเลือกในการเดินทางที่หลากหลายโดยไม่จำกัดเพียงการใช้รถยนต์เท่านั้น การเลือกประเภทของยานพาหนะในการเดินทางมีผลต่อเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นการคำนวณด้วย Modal Split จะช่วยให้เราทราบสัดส่วนของการเดินทางด้วยยานพาหนะต่าง ๆ และจากนั้นสามารถเลือกเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสมที่สุดด้วยการใช้ Shortest Path Algorithm และคำนวณปริมาณการเดินทางที่สมดุลด้วย Frank-Wolfe Algorithm ตลอดจนการเดินทางตามเส้นทางที่เลือก จากจุดเริ่มต้น (Origin, O) ไปยังจุดหมาย (Destination, D) หรือคู่ O-D ในแต่ละการเดินทางที่วางแผนไว้ในระบบนี้ โดยการศึกษานี้จะคำนวณเปรียบเทียบระยะเวลาการเดินทางที่เกิดขึ้นทั้งหมดซึ่งเป็นผลรวมของระยะเวลาการเดินทางที่เกิดขึ้นในแต่ละ link ระหว่าง Sioux Falls Network ที่ไม่ได้มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing) และระหว่าง Sioux Falls Network ที่มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With Project) ตลอดระยะเวลา 30 ปี และเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งประกอบไปด้วย Net Present Value, IRR และ B/C การวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรและเสริมสร้างระบบการเดินทางที่ยั่งยืนและมีความหลากหลายในการเลือกการเดินทางในชุมชน

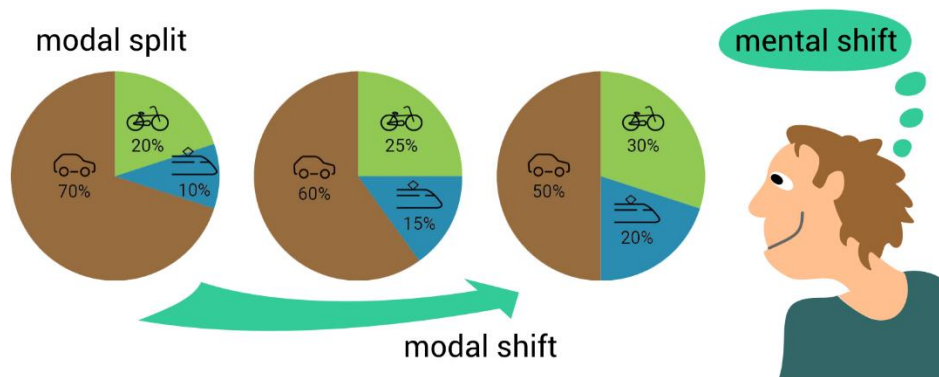


ภาพที่ 1 เครือข่ายถนนในเมือง Sioux Falls ในรัฐเซาท์ดาโคตาของสหรัฐอเมริกา
ประกอบด้วยจุดสังเกต (Node) เชื่อมโยงด้วยเส้นทาง (Link)

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1) Modal Split เป็นทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์และประเมินสัดส่วนของการใช้งานยานพาหนะต่าง ๆ ในการเดินทางของประชากรในพื้นที่หนึ่ง ๆ โดย Modal Split จะช่วยให้เราเข้าใจถึงแนวโน้มและการกระจายของการใช้งานยานพาหนะต่าง ๆ ซึ่งรวมถึงรถยนต์ส่วนตัว รถไฟฟ้า รถบัส รถจักรยาน และการเดินเท้า โดยปกติแล้ว Modal Split จะถูกแบ่งเป็นร้อยละของการใช้งานแต่ละประเภทของยานพาหนะในการเดินทางในพื้นที่ที่เราสนใจ เช่น ร้อยละของผู้โดยสารที่ใช้รถไฟฟ้า เปรียบเทียบกับร้อยละของผู้ใช้รถยนต์ส่วนตัว หรือร้อยละของผู้ใช้รถจักรยานเปรียบเทียบกับผู้ใช้รถบัส ดังภาพที่ 2

การคำนวณ Modal Split มักจะใช้ข้อมูลจากการสำรวจการเดินทางหรือการสำรวจการเดินทางของประชากรในพื้นที่นั้น เพื่อทราบถึงแนวโน้มและรูปแบบการใช้งานยานพาหนะในชุมชนหรือเขตพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งจะช่วยให้ผู้วางแผนการขนส่งสามารถวางแผนและปรับปรุงระบบการขนส่งให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพได้อย่างเหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้บริการในพื้นที่นั้น ๆ อีกทั้งยังช่วยให้เราสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานการขนส่งต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงใน Modal Split และการเลือกใช้งานยานพาหนะในอนาคตได้ด้วย การคำนวณ Modal Split เป็นหนึ่งในขั้นตอนสำคัญในการวางแผนและพัฒนาระบบการขนส่งในพื้นที่นั้น ๆ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้บริหารและผู้วิจัยสามารถทำนายแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงในการใช้งานยานพาหนะได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 2 Modal Split แบ่งเป็นร้อยละของการใช้งานแต่ละประเภทของยานพาหนะในการเดินทางในพื้นที่ที่เราสนใจ

2.2) Shortest Path Algorithm เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับการค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุดสองจุดในกราฟ (graph) โดยที่นักวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์และวิศวกรรมคอมพิวเตอร์มักใช้ทฤษฎีดังกล่าวในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางที่สั้นที่สุด โดยมักนำมาใช้ในหลายๆ แวดวง เช่น ในระบบเชิงกราฟ (graph theory), การจราจร, การค้นหาเส้นทางในระบบขนส่ง, ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์, และในงานที่เกี่ยวข้องกับการจำลองและการวิเคราะห์ข้อมูล (data analysis) โดยวิธีการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ Dijkstra's Algorithm ซึ่งพัฒนาโดยโปรแกรมเมอร์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ Edsger W. Dijkstra ในปี ค.ศ. 1956 วิธีการนี้ใช้หลักการของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและค่าน้ำหนักของเส้นทางในกราฟ เพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างจุดสองจุดในกราฟ

2.3) Flank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการเดินทางที่สมดุลของผู้ใช้บนเส้นทางในระบบขนส่งหรือเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการจราจรในสถานะและเวลาที่แตกต่างกัน โดยอัลกอริทึมนี้เป็นวิธีการที่ใช้ความแตกต่างในค่าอุปสรรค (ค่าอุปสรรคในที่นี้อาจเป็นค่าที่ผู้ใช้ต้องจ่ายหรือต้องแลกเปลี่ยนเมื่อทำการเลือกใช้เส้นทางการเดินทางต่าง ๆ ในระบบขนส่งหรือเครือข่ายนั้นๆ) ระหว่างเส้นทางในการปรับปรุงการเดินทางของผู้ใช้ในระบบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของความสมดุลของผู้ใช้ (user equilibrium) ซึ่งหมายถึงสถานะที่ไม่มีผู้ใช้บนเส้นทางใด ๆ สามารถเปลี่ยนแปลงเส้นทางของตนได้เพื่อลดค่าอุปสรรคของการเดินทางไปอีกได้ และสุดท้ายจะได้สถานะที่ไม่มีผู้ใช้ที่ปรับเปลี่ยนเส้นทางของตนเองอีกต่อไป นั่นคือ ผู้ใช้ไม่สามารถเปลี่ยนเส้นทางของตนเองให้ลดค่าอุปสรรคของการเดินทางได้อีกต่อไปโดยไม่ส่งผลกระทบต่อเส้นทางของตนเองของผู้ใช้คนอื่น ๆ ในระบบ

3. ขอบเขตข้อมูลการศึกษา

3.1) ข้อมูลโครงข่ายถนนของ Sioux Falls Network ในระบบการเดินทางในเครือข่ายถนนในเมือง Sioux Falls ในรัฐเซาท์ดาโคตาของสหรัฐอเมริกา จากภาพที่ 1 ที่ประกอบด้วยจุดสังเกต (Node) 24 จุดที่เชื่อมโยงด้วยเส้นทาง (Link) เพื่อการ

เดินทาง 76 เส้นทาง จากเดิมที่โครงข่ายถนนนี้การใช้รถยนต์เป็นหลักในการเดินทางเท่านั้น การออกแบบเส้นทางใหม่สำหรับรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT lane) และรถจักรยาน (Bike lane) ในเส้นทางที่มีอยู่เดิมเพื่อเพิ่มทางเลือกในการเดินทางที่หลากหลาย โดยไม่จำกัดเพียงการใช้รถยนต์เท่านั้น และการคำนวณหาเส้นทางที่ใช้เวลาการเดินทางที่สั้นที่สุดและปริมาณการเดินทางที่เป็นไปตามเงื่อนไขของความสมดุลของผู้ใช้ (user equilibrium) จากโครงข่ายนี้

3.2) ข้อมูลปริมาณการเดินทาง (Demand) ของคู่ O-D คือ ข้อมูลที่บอกถึงจำนวนการเดินทางระหว่างจุดเริ่มต้น (Origin) และจุดหมาย (Destination) ในระบบขนส่งที่มีอยู่ โดยในที่นี้ระบบขนส่ง Sioux Falls Network ซึ่งประกอบไปด้วยจุดสังเกต (Node) ทั้งหมด 24 จุด เราจะเห็นข้อมูลนี้แสดงในรูปของตารางที่เรียกว่า O-D Matrix ขนาด 24 x 24 ซึ่งในตารางนี้จะแสดงปริมาณการเดินทางระหว่างทุกคู่ O-D ทั้งหมด 576 คู่ โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการเดินทางคือ 1.8% ต่อปี ซึ่งหมายความว่าปริมาณการเดินทางจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีโดยเฉลี่ยถึง 1.8% โดยข้อมูลดังกล่าวนี้จะใช้สำหรับการคำนวณเส้นทางการเดินทางสำหรับ Sioux Falls Network ที่ไม่ได้มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing)

สำหรับข้อมูล O-D Matrix ที่ใช้ในการคำนวณเส้นทางการเดินทางสำหรับ Sioux Falls Network ที่มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) จะใช้ข้อมูล O-D Matrix นี้ คูณด้วยสัดส่วนของประเภทยานพาหนะแต่ละประเภท โดยคำนวณสัดส่วนของประเภทยานพาหนะแต่ละประเภทได้จาก Modal Split

3.3) ข้อมูลพารามิเตอร์ BPR Function ของ Sioux Falls Network ข้อมูลศึกษาจากข้อมูลการจราจรและโครงข่ายการขนส่งของ Sioux Falls Network ในรัฐเซาท์ดาโคตาของสหรัฐอเมริกา ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในโมเดลการจราจร ซึ่งเป็นค่าคงที่ในสมการ BPR Function ของเส้นทางที่เชื่อม (Link) ระหว่างจุดสังเกต (Node) ดังตารางที่ 2 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์สำหรับเส้นทางที่เชื่อมระหว่างจุดสังเกต (Node) 1 คู่ ยกตัวอย่างเส้นทางที่เชื่อม (Link) ระหว่างจุดสังเกต (Node) ดังภาพที่ 6 เพื่อประมาณค่าเวลาการเดินทางในแต่ละเส้นทางของยานพาหนะแต่ละประเภท โดยที่ระยะเวลาการเดินทางของยานพาหนะแต่ละประเภทแตกต่างกันเนื่องจากมีความเร็วที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3 ข้อมูลมาจากการวัดการจราจรและข้อมูลของระบบการขนส่งในเขต Sioux Falls ในปัจจุบันหรือในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ในการศึกษา การใช้ข้อมูลเหล่านี้เพื่อคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ BPR Function เป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงโมเดลการจราจรและโครงข่ายการขนส่งในเขต Sioux Falls เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการเดินทางในเครือข่ายถนน แสดงสมการ BPR Function ดังนี้ $t_a = \text{free flow time} (1 + a l (V_a / \text{capacity})^{\text{beta}})$; V_a คือ ปริมาณจราจรที่ผ่าน link นั้นๆ



ภาพที่ 3 ยกตัวอย่างเส้นทางที่เชื่อม (Link) ระหว่างจุดสังเกต (Node)

Link	initial node	terminal node	distance (km)	time (minute)	free flow time (minute)	al	beta	capacity
1	1	2	6	6	6	0.15	4	25900.2

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ในสมการ BPR Function ของเส้นทางที่เชื่อม(Link) ระหว่างจุดสังเกต (Node)

Mode	Average speed
Automobile	60 km/hr
LRT	35 km/hr
Bike	20 km/hr

ตารางที่ 2 ระยะเวลาการเดินทาง (time, free flow time) ของแต่ละประเภทแตกต่างกันเนื่องจากมีความเร็วที่แตกต่างกัน

3.4) ข้อมูลสำหรับการเลือกประเภทยานพาหนะในขั้นตอน Modal Split ประกอบไปด้วยการเดินทางด้วยประเภทยานพาหนะ 3 ประเภท คือ รถยนต์ (Automobile) รถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT) และรถจักรยาน (Bike) สำหรับบางเส้นทางที่มีการเดินทางด้วยประเภทยานพาหนะที่มากกว่า 1 ประเภท จำเป็นต้องพิจารณาสมการอรรถประโยชน์ของแต่ละประเภทยานพาหนะ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ระยะเวลาการเดินทางและค่าใช้จ่าย เพื่อให้ผู้ใช้เลือกใช้ยานพาหนะที่เหมาะสมกับความสะดวกสบายของการเดินทาง โดยกำหนดให้ t คือ เวลา (time) หน่วย นาที (minute) และ f คือ ค่าโดยสาร (fee) หน่วย บาท (Bath) เท่ากับ 15 บาท ซึ่งสมการอรรถประโยชน์นี้จะแสดงค่าความพึงพอใจในการเลือกใช้ยานพาหนะประเภทต่างๆ ในเส้นทางเชื่อม(link) ที่เริ่มจากจุดสังเกต i (Node i) ไปยังจุดสังเกต j (Node j) โดยค่าความพึงพอใจที่มากกว่าแสดงถึงความพึงพอใจที่จะเลือกใช้ยานพาหนะประเภทนั้นมากกว่า โดยสมการอรรถประโยชน์ดังกล่าวมีรูปดังนี้

$$\text{สมการอรรถประโยชน์ของรถยนต์ (Automobile) : } U_{\text{Automobile}}^{ij} = V_{\text{Automobile}}^{ij} + E_{\text{Automobile}}^{ij} = 1.56 - 3.81t_{\text{Automobile}}^{ij} + E_{\text{Automobile}}^{ij}$$

$$\text{สมการอรรถประโยชน์ของรถไฟฟ้ารางเบา (LRT) : } U_{\text{LRT}}^{ij} = V_{\text{LRT}}^{ij} + E_{\text{LRT}}^{ij} = 1.12 - 1.41t_{\text{LRT}}^{ij} - 1.6f_{\text{LRT}}^{ij} + E_{\text{LRT}}^{ij}$$

$$\text{สมการอรรถประโยชน์ของรถจักรยาน (Bike) : } U_{\text{Bike}}^{ij} = V_{\text{Bike}}^{ij} + E_{\text{Bike}}^{ij} = -1.25t_{\text{Bike}}^{ij} + E_{\text{Bike}}^{ij}$$

สมการอรรถประโยชน์ของการใช้รถยนต์ (Automobile) จะลดลงเมื่อเวลาการเดินทาง (time) เพิ่มขึ้น ผู้ใช้บริการที่ให้ความสำคัญกับการประหยัดเวลา มีแนวโน้มที่จะเลือกรถยนต์มากกว่า ส่วนสมการอรรถประโยชน์ของการใช้รถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT) ก็ลดลงเมื่อเวลาการเดินทาง (time) และค่าโดยสาร (fee) เพิ่มขึ้น ผู้ใช้บริการที่ให้ความสำคัญกับเวลาและค่าใช้จ่ายที่มีแนวโน้มที่จะเลือกใช้ขนส่งสาธารณะ ในขณะที่สมการอรรถประโยชน์ของการใช้จักรยาน (Bike) ลดลงเมื่อเวลาการเดินทาง (time) เพิ่มขึ้น ผู้ใช้บริการที่ให้ความสำคัญกับการออกกำลังกายและไม่ต้องการใช้เวลามากในการเดินทาง มีแนวโน้มที่จะเลือกใช้จักรยาน

การคำนวณความเป็นไปได้ (Probability) จากสมการอรรถประโยชน์ของ Modal Split เป็นการหาค่าความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้โดยสารจะเลือกใช้วิธีการเดินทางแต่ละประเภท เช่น รถยนต์ (Automobile) รถไฟฟ้ารางเบา (LRT) หรือ จักรยาน (Bike) โดยพิจารณาจากสมการอรรถประโยชน์ของแต่ละประเภทยานพาหนะที่มีอยู่ ความเป็นไปได้นี้จะแสดงอยู่ในรูปสัดส่วนที่มีการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะประเภทต่างๆ (ยกตัวอย่างเช่น $P_{\text{Automobile}} = 0.5$, $P_{\text{LRT}} = 0.3$ และ $P_{\text{Bike}} = 0.2$) ซึ่งเป็นสัดส่วน % ของ

จำนวนการเดินทางที่เกิดขึ้นในแต่ละคู่ O-D โดยความเป็นไปได้ (Probability) ของประเภทยานพาหนะทั้ง 3 รูปแบบสามารถคำนวณได้ดังสมการ ดังนี้

ความเป็นไปได้ (Probability) ในการใช้รถยนต์ (Automobile) : $P_{\text{Automobile}} = e^{V_{\text{Automobile}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}})$

ความเป็นไปได้ (Probability) ในการใช้รถไฟฟ้ารางเบา (LRT) : $P_{\text{LRT}} = e^{V_{\text{LRT}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}})$

ความเป็นไปได้ (Probability) ในการใช้รถจักรยาน (Bike) : $P_{\text{Bike}} = e^{V_{\text{Bike}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}})$

3.4) ข้อมูลสำหรับการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ ประกอบไปด้วย ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาที่ประมาณเป็น 800 ล้านบาทต่อกิโลเมตร และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทางสำหรับจักรยานที่ประมาณเป็น 5 ล้านบาทต่อกิโลเมตร โดยมีอัตราผลตอบแทนที่เฉลี่ย (Discount Rate) ทุกปี 7% และมีมูลค่าของเวลาที่สูญเสียประมาณ 100 บาทต่อชั่วโมง จะถูกใช้เพื่อประเมินผลกระทบทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการดังกล่าว โดยการคำนวณ NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return) และ B/C (Benefit-Cost Ratio) เพื่อให้ผู้ตัดสินใจสามารถตัดสินใจเกี่ยวกับการลงทุนหรือการพัฒนาโครงการได้โดยมีข้อมูลพอเพียงในด้านเศรษฐศาสตร์ แสดงสมการคำนวณได้ดังนี้

- $$\text{NPV (Net Present Value)} = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+i)^n}$$

กำหนดให้

NPV คือ มูลค่าสุทธิปัจจุบันของโครงการหรือลงทุน (Net Present Value)

CF_t คือ รายได้หรือค่าใช้จ่ายในปีที่ t

i คือ อัตราผลตอบแทนที่เฉลี่ย (Discount Rate)

n คือ จำนวนปีทั้งหมดในการวิเคราะห์

- IRR (Internal Rate of Return) คือ อัตราผลตอบแทนที่เฉลี่ย (Discount Rate, i)

ที่ทำให้ $\text{NPV}_{\text{with project}} - \text{NPV}_{\text{Do nothing}} = 0$

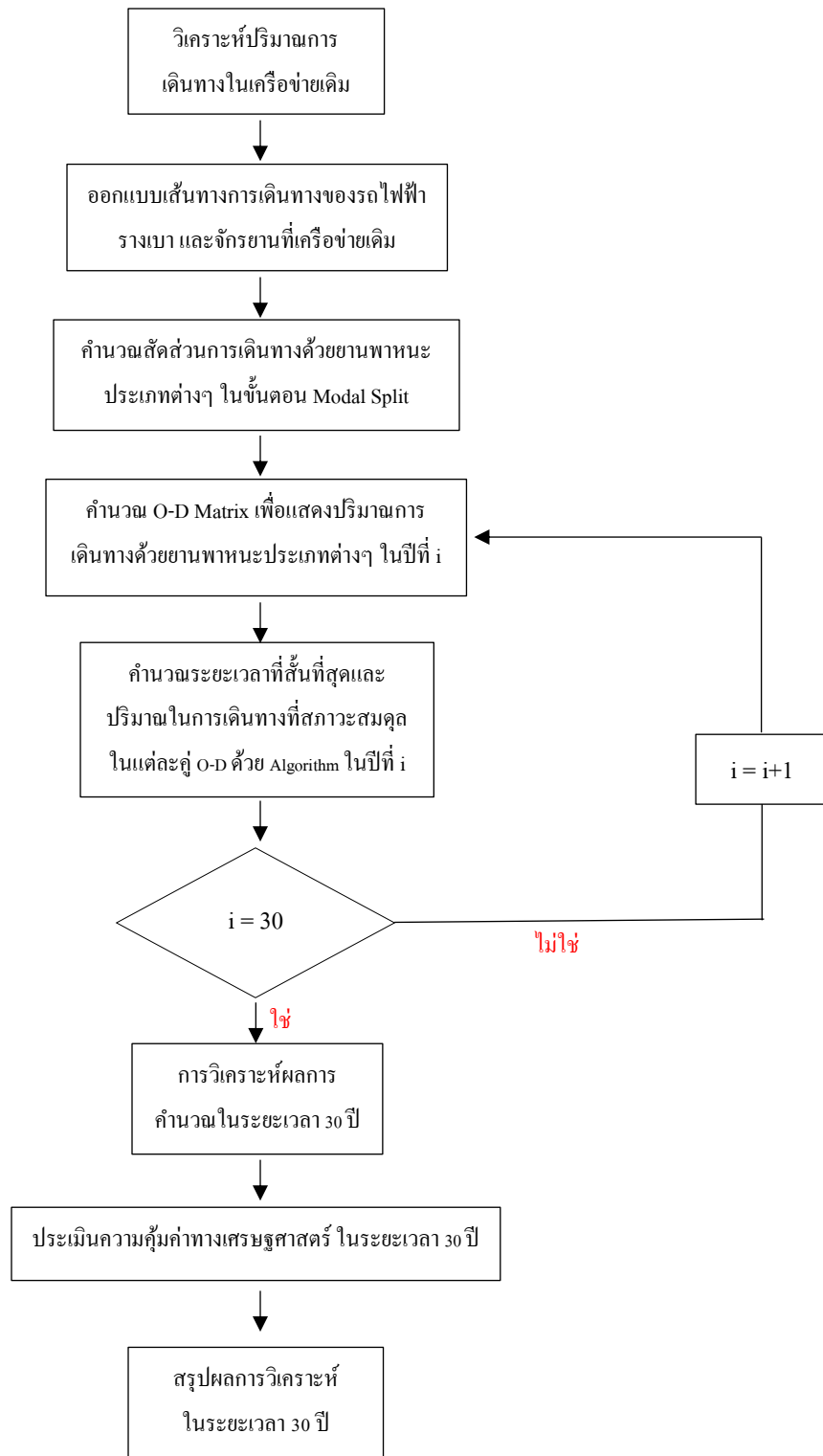
ซึ่งแสดงอัตราผลตอบแทนที่ไม่ขาดทุน (ไม่ทำกำไรหรือขาดทุน)

- Benefit Cost Ratio คือ อัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์ (Benefit) และต้นทุนของโครงการ (Cost) โดยคำนวณจากการหารผลประโยชน์ทั้งหมดของโครงการด้วยต้นทุนทั้งหมดของโครงการ เมื่อ $B/C > 1$ แสดงว่าผลประโยชน์มากกว่าต้นทุน ซึ่งถือว่าเป็นโครงการที่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในขณะที่เมื่อ $B/C < 1$ แสดงว่าต้นทุนมากกว่าผลประโยชน์ ซึ่งอาจหมายถึงว่าโครงการนั้นไม่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4. การดำเนินการและวิเคราะห์การศึกษา

รวบรวมข้อมูลศึกษา





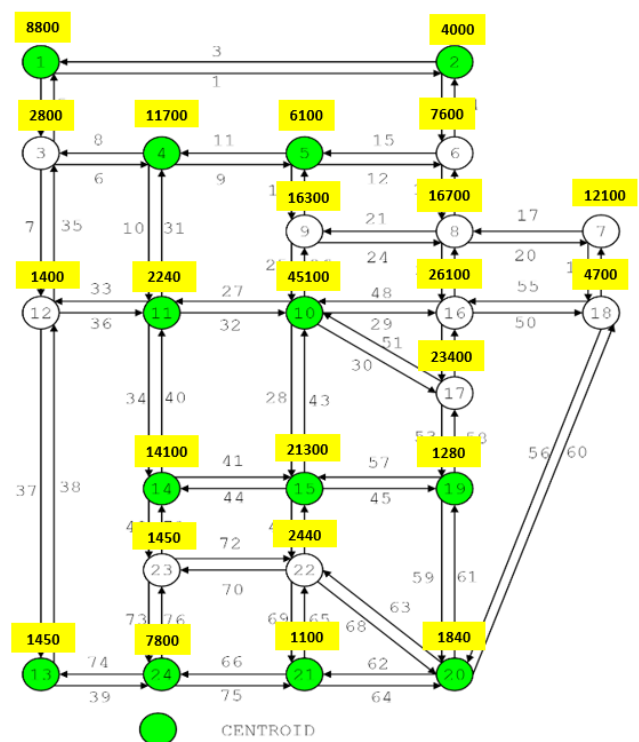
4.1) การออกแบบเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT) และรถจักรยาน (Bike) ที่เครือข่ายเดิม

การออกแบบเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา (Light Rail Transit; LRT) กำหนดให้ประกอบไปด้วย 20 link และรถจักรยาน (Bike) 36 link รวมทั้งขาไปและขากลับ โดยให้เส้นทางที่ออกแบบผ่าน และใกล้เคียงจุดสังเกต (Node) ที่มีการเข้าถึงสูง (Trip Attraction) เช่น ศูนย์การค้า สถานีรถไฟหรือรถไฟฟ้า สถานีรถประจำทาง โรงเรียน มหาวิทยาลัย และอื่นๆ ที่มีการเข้าถึงจำนวนมากจากประชาชนหรือมีกิจกรรมเศรษฐกิจอื่นๆ ที่สำคัญ โดยปริมาณการเข้าถึงที่จุดสังเกต(Node) ต่างๆ ทั้ง 24 จุด ดังตารางที่ 1 และภาพที่ 3 มาจากการคำนวณด้วย Shortest Path และ Flank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium Algorithm จาก Sioux Falls Network ที่ไม่ได้มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing) ในปีฐาน (Base year) เพื่อสังเกตปริมาณการเดินทางที่เกิดขึ้นก่อนพิจารณาการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน

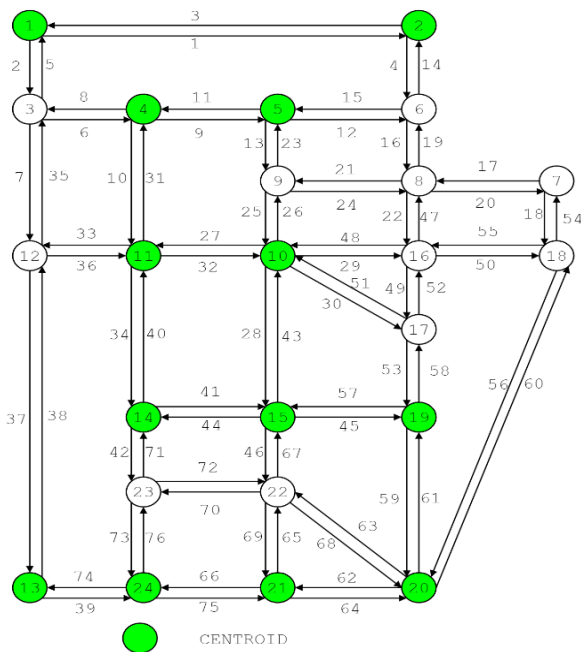
การเลือกจุดที่มีการเข้าถึงสูงเป็นส่วนสำคัญเพราะมีผลต่อความสะดวกสบายและการใช้บริการของประชาชน การเลือกจุดที่มีการเข้าถึงสูงในการออกแบบเส้นทาง LRT และ Bike Lane จึงช่วยให้การให้บริการขนส่งสาธารณะและการใช้จักรยานเป็นที่นิยมมากขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีประชากรหนาแน่นและการจราจรแน่นอ้น การเลือกทำเส้นทางผ่านและใกล้จุดที่มีการเข้าถึงสูงจึงช่วยให้มีความสะดวกสบายและลดการใช้รถส่วนตัวที่จะทำให้การจราจรติดขัดลดลงได้ และยังส่งเสริมการใช้จักรยานเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในการเดินทางในเมืองได้อีกด้วย การออกแบบเส้นทางดังกล่าวมีประโยชน์อย่างมากในการสร้างสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมและเพื่อสร้างการเคลื่อนไหวที่มีประสิทธิภาพในเมืองที่พัฒนาอยู่ต่อไป

Node Destination	Demand Attraction
1	8800
2	4000
3	2800
4	11700
5	6100
6	7600
7	12100
8	16700
9	16700
10	16300
11	45100
12	22400
13	14000
14	14500
15	14100
16	21300
17	26100
18	23400
19	4700
20	12800
21	18400
22	11000
23	24400
24	7800

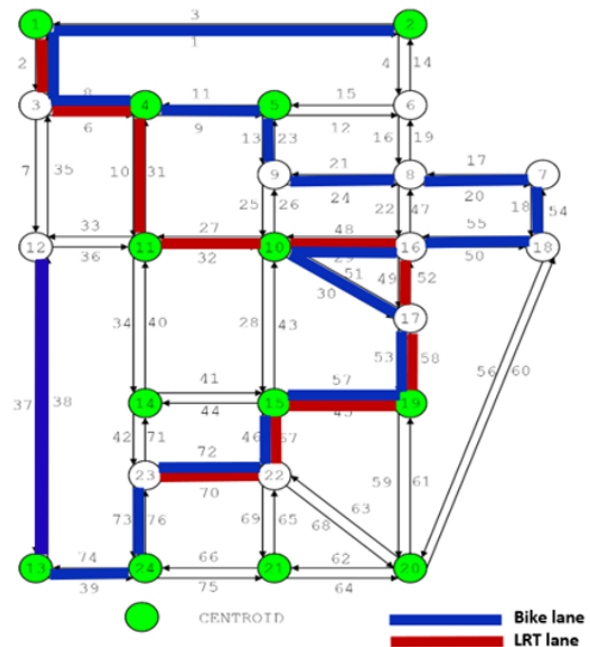
ตารางที่ 3 ปริมาณการเข้าถึงที่จุดสังเกต (Node) ต่างๆ ทั้ง 24 จุด



ภาพที่ 4 เครือข่ายถนนที่แสดงปริมาณการเข้าถึงที่จุดสังเกต(Node) ต่างๆ ทั้ง 24 จุด



ภาพที่ 5 เครือข่ายถนนเดิมที่มีเส้นทางการเดินทางเฉพาะรถยนต์เท่านั้น



ภาพที่ 6 เครือข่ายถนนที่มีการเพิ่มเส้นทางการเดินทางของรถไฟฟ้ารางเบาและจักรยาน

4.2) คำนวณสัดส่วนการเดินทางด้วยยานพาหนะประเภทต่างๆ ในขั้นตอน Modal Split

จากภาพที่ 6 ในเส้นทางที่มีทางเลือกการเดินทางด้วยประเภทยานพาหนะมากกว่า 1 ประเภท สมการอรรถประโยชน์ของแต่ละประเภทยานพาหนะจะพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น เวลาการเดินทางและค่าใช้จ่าย โดยสมการอรรถประโยชน์นี้จะช่วยในการคำนวณสัดส่วนการใช้งานยานพาหนะประเภทต่าง ๆ ในเส้นทางนั้น ๆ โดยการพิจารณาระยะทางในแต่ละเส้นทาง (Link) ระหว่างจุดสังเกต (Node) คู่หนึ่งซึ่งอาจแตกต่างกันรวมถึงความเร็วในการเดินทางของยานพาหนะแต่ละประเภทที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 ทำให้ระยะเวลาในการเดินทางด้วยยานพาหนะประเภทต่าง ๆ จึงมีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับระยะทางของเส้นทางนั้น ๆ ระยะเวลาการเดินทางในแต่ละ link เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะ โดยราคาโดยสารของรถไฟฟ้ารางเบาเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเลือกใช้ยานพาหนะในแต่ละประเภท และยานพาหนะที่มีค่าอรรถประโยชน์มากกว่าจะมีสัดส่วนในการเลือกใช้ยานพาหนะประเภทนั้นมากกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีโอกาสที่ยานพาหนะบางประเภทไม่ได้ถูกเลือกใช้เนื่องจากสมการอรรถประโยชน์มีค่าต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับยานพาหนะประเภทอื่น ๆ ซึ่งส่งผลให้ความเป็นไปได้มีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่ามีความน่าจะเป็นที่ยานพาหนะบางประเภทจะไม่ถูกเลือกใช้เลยในบางเส้นทาง ซึ่งสัดส่วนที่คำนวณเป็นสัดส่วนของปริมาณการเดินทางในแต่ละจุดเริ่มต้น (Origin, O) และจุดหมาย (Destination, D) หรือเรียกว่าคู่ O-D ที่แสดงอยู่ในรูป O-D Matrix ขนาด 24 x 24 โดยการกำหนดข้อมูลของปัจจัยที่มีผลต่อสมการอรรถประโยชน์สำหรับการ

เดินทางด้วยรถยนต์ที่มีอยู่ในทุกเส้นถนนที่เชื่อมจุดต่างๆ (Link)ซึ่งในบางคู่ O-D สามารถเดินทางได้ในหลายเส้นทาง ในการกำหนดเวลาในการเดินทางจะกำหนดจากเส้นทางที่ใช้เวลาการเดินทางที่สั้นที่สุดด้วยการคำนวณจาก Shortest Path Algorithm ที่จะคำนวณระยะเวลาการเดินทางที่สั้นที่สุดของทุกคู่ O-D ซึ่งแสดงในตาราง Matrix ส่วนการกำหนดระยะเวลาการเดินทางของรถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยานจะระบุระยะเวลาการเดินทางตามเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งคู่ O-D สามารถเดินทางได้เส้นทางเดียว

4.2.1) คำนวณระยะเวลาการเดินทางของแต่ละประเภทยานพาหนะ ยกตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนการใช้งานยานพาหนะประเภทต่างๆ ที่คู่ O-D จากจุดที่ 19 (Node 19) ไปยังจุดที่ 17 (Node 17) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วและระยะทาง ดังตารางที่ 4 ได้ค่า $t_{Automobile}^{19,17} = 2$ นาที, $t_{LRT}^{19,17} = 3.43$ นาที และ $t_{Bike}^{19,17} = 6$ นาที

Link 58 (Node19 --> Node 17)

Mode	Distance (km)	Speed (km/hr)	Time (hr)	Time (minute)
Automobile	2	60	0.033	2
LRT	2	35	0.057	3.43
Bike	2	20	0.1	6

ตารางที่ 4 เวลาในการเดินทางที่คู่ O-D จากจุดที่ 19 (Node 19) ไปยังจุดที่ 17 (Node 17)

4.2.2) คำนวณค่าความพึงพอใจ จากสมการอรรถประโยชน์ของแต่ละประเภทยานพาหนะซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาการเดินทางและค่าโดยสารของรถไฟฟ้ารางเบา $t_{LRT}^{19,17}$ โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 15 บาท

- ค่าความพึงพอใจจากสมการอรรถประโยชน์ของรถยนต์ (Automobile) :

$$V_{Automobile}^{19,17} = 1.56 - 3.81t_{Automobile}^{19,17} = 1.56 - 3.81(2) = -6.06$$

- ค่าความพึงพอใจจากสมการอรรถประโยชน์ของรถไฟฟ้ารางเบา (LRT) :

$$V_{LRT}^{19,17} = 1.12 - 1.41t_{LRT}^{19,17} - 1.6t_{LRT}^{19,17} = 1.12 - 1.41(3.43) - 1.6(15) = -27.714$$

- ค่าความพึงพอใจจากสมการอรรถประโยชน์ของรถจักรยาน (Bike) :

$$V_{Bike}^{19,17} = -1.25t_{Bike}^{19,17} = -1.25(6) = -7.5$$

การเปรียบเทียบค่าความพึงพอใจจากสมการอรรถประโยชน์ในที่นี้เป็นการวิเคราะห์ว่ายานพาหนะประเภทใดมีความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกใช้มากที่สุดในการเดินทางในเส้นทางนี้ จากผลการคำนวณข้างต้นสามารถเรียงลำดับได้ว่ารถยนต์ถูกเลือกใช้เป็นอันดับแรก รองลงมาเป็นรถจักรยาน และรถไฟฟ้ารางเบา โดยความน่าจะเป็นหรือสัดส่วนการเลือกใช้นานพาหนะประเภทต่างๆ สามารถคำนวณได้ในขั้นตอนถัดไป

4.2.3) คำนวณความเป็นไปได้ (Probability) ในการเลือกใช้ยานพาหนะแต่ละประเภทโดยสามารถคำนวณได้จากค่าความพึงพอใจของยานพาหนะทั้ง 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

รถยนต์ (Automobile) : $P_{\text{Automobile}} = e^{V_{\text{Automobile}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}}) = e^{-6.06} / (e^{-6.06} + e^{-27.714} + e^{-7.5}) = 0.815$

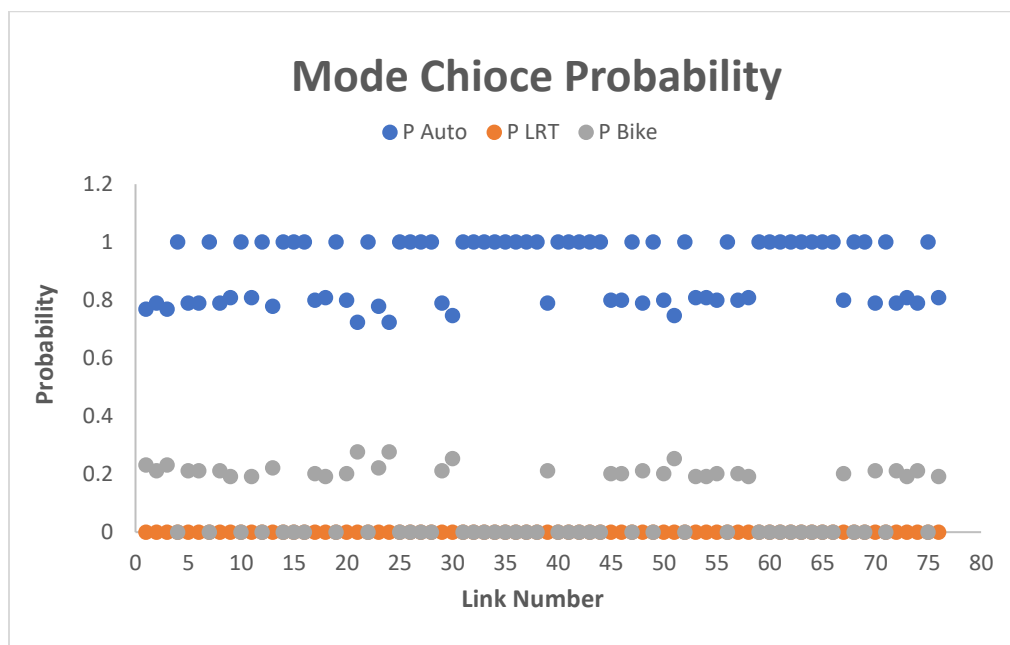
รถไฟฟ้ารางเบา (LRT) : $P_{\text{LRT}} = e^{V_{\text{LRT}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}}) = e^{-27.714} / (e^{-6.06} + e^{-27.714} + e^{-7.5}) = 0.000$

รถจักรยาน (Bike) : $P_{\text{Bike}} = e^{V_{\text{Bike}}} / (e^{V_{\text{Automobile}}} + e^{V_{\text{LRT}}} + e^{V_{\text{Bike}}}) = e^{-7.5} / (e^{-6.06} + e^{-27.714} + e^{-7.5}) = 0.185$

พบว่าที่เส้นทางเชื่อมจุดสังเกตที่ 58 (Link 58) จากจุดสังเกตที่ 19 (Node 19) ไปยังจุดสังเกตที่ 17 (Node 17) มีสัดส่วนการเดินทางด้วยรถยนต์ 0.815 รถจักรยาน 0.185 รถไฟฟ้ารางเบา 0.000 แสดงถึงการเลือกใช้รถยนต์ และรถจักรยานเพียงเท่านั้น ยิ่งไปกว่านั้นในถนนสายนี้ไม่มีการใช้งานของรถไฟฟ้ารางเบาเลย ซึ่งเกิดจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ยานพาหนะแต่ละประเภท ดังที่ได้คำนวณไว้ในข้อ 4.2.2 เมื่อเปรียบเทียบค่าความพึงพอใจของรถไฟฟ้ารางเบา กับยานพาหนะประเภทอื่นพบว่า มีค่าน้อยกว่ามาก จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ไม่มีการเลือกใช้รถไฟฟ้ารางเบาเลยนอกจากนี้ปัจจัยหลักที่ทำให้ไม่มีการใช้งานรถไฟฟ้ารางเบา คือปัจจัยด้านเวลาที่มากกว่ารถยนต์ และค่าโดยสาร 15 บาท ที่ส่งผลให้มีค่าความพึงพอใจที่ต่ำมาก

4.3) การวิเคราะห์สัดส่วนการเดินทางระหว่างจุด Node

ความเป็นไปได้หรือสัดส่วนในการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะในการเดินทางระหว่างจุดสังเกต (Node) 2 จุด ที่เดินทางด้วยถนนสายเดียว จากโครงข่าย Sioux Falls จากภาพที่ 6 ซึ่งมีถนนที่เชื่อมระหว่างจุดสังเกต (Node) 2 จุด ทั้งหมด 76 สาย และถนนดังกล่าวมีทั้งถนนที่มีการเดินทางด้วยรถยนต์เพียงอย่างเดียว การเดินทางด้วยรถยนต์กับรถจักรยาน การเดินทางด้วยรถยนต์กับรถไฟฟ้ารางเบา และการเดินทางด้วยรถยนต์ รถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยาน ดังกราฟที่ 1



กราฟที่ 1 ความเป็นไปได้หรือสัดส่วนในการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะ
ในการเดินทางระหว่างเส้นทางเชื่อมจุดสังเกต (Link) ทั้งหมด 76 เส้น

จากการวิเคราะห์สัดส่วนการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะในกรณีที่เส้นทางเชื่อมจุดสังเกต (Link) นั้นมีการเดินทางด้วยยานพาหนะมากกว่า 1 ประเภท พบว่าในเส้นทาง (Link) ที่มีการเดินทางด้วยรถยนต์กับรถจักรยานพบว่ารถยนต์มีสัดส่วนประมาณ 0.8 และรถจักรยานมีสัดส่วนประมาณ 0.2 ในระหว่างที่ในเส้นทาง (Link) ที่มีการเดินทางด้วยรถยนต์ รถจักรยาน และรถไฟฟ้ารางเบา พบว่ามีการแบ่งสัดส่วนการเลือกใช้เพียงแค่อัตราส่วนกับรถจักรยานเท่านั้น โดยไม่มีการเลือกใช้รถไฟฟ้ารางเบาเลยในทุกเส้นทาง สาเหตุหลักคือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาที่มากกว่ารถยนต์และค่าโดยสารสำหรับรถไฟฟ้ารางเบา ทำให้ความพึงพอใจในการใช้งานรถไฟฟ้ารางเบาไม่คุ้มค่าอย่างยิ่งขึ้นและระยะทางที่สั้นทำให้มีการเลือกเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางเป็นการเดินทางระหว่าง Node ด้วยรถจักรยาน มากกว่าการใช้รถไฟฟ้ารางเบาที่ต้องจ่ายค่าโดยสารเท่ากับการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาในระยะไกล

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สัดส่วนการใช้งานยานพาหนะในเส้นทางที่มีอยู่ โดยพบว่าในบางเส้นทางมีการใช้งานรถยนต์และรถจักรยาน โดยมีสัดส่วนการใช้งานรถยนต์เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่บางเส้นทางอื่น ๆ มีการใช้งานเฉพาะรถยนต์และรถจักรยานโดยไม่มีการใช้งานรถไฟฟ้ารางเบาเลย การวิเคราะห์สัดส่วนการใช้งานยานพาหนะในเส้นทางต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงการเลือกใช้งานพาหนะต่าง ๆ ตามเงื่อนไขและสิ่งแวดล้อมในแต่ละสถานการณ์ โดยการใช้รถยนต์และรถจักรยานมีสัดส่วนมากกว่ารถไฟฟ้ารางเบาในทางที่ไม่มีการใช้งานร่วมกันของทั้งสามประเภทของยานพาหนะในเส้นทางนี้

4.4) กำหนด O-D Matrix เพื่อแสดงปริมาณการเดินทางด้วยยานพาหนะประเภทต่างๆ

จากข้อมูล O-D Matrix ที่บอกถึงจำนวนการเดินทางระหว่างจุดเริ่มต้น (Origin, O) และจุดหมาย (Destination, D) จากเดิมที่มีการเดินทางด้วยรถยนต์เท่านั้น เป็นการเดินทางที่มีการเลือกประเภทยานพาหนะมากขึ้น คือการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยาน สำหรับบาง o-d จึงมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยานโดยปริมาณการเดินทาง (Demand) ของทางเลือกในการเดินทางใหม่นี้ สามารถคำนวณได้จาก

ปริมาณการเดินทาง (Demand) ของคู่ O-D \times สัดส่วนหรือความเป็นไปได้ในการเลือกใช้งานพาหนะประเภทนั้นๆ

ยกตัวอย่างเช่น ปริมาณการเดินทาง (Demand) ของคู่ O-D จากจุดที่ 19 (Node 19) ไปยังจุดที่ 17 (Node 17) จากเดิมที่มีการเดินทางด้วยรถยนต์เท่านั้น 1700 เมื่อมีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยาน แสดงตัวอย่างการคำนวณปริมาณการเดินทางด้วยยานพาหนะประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

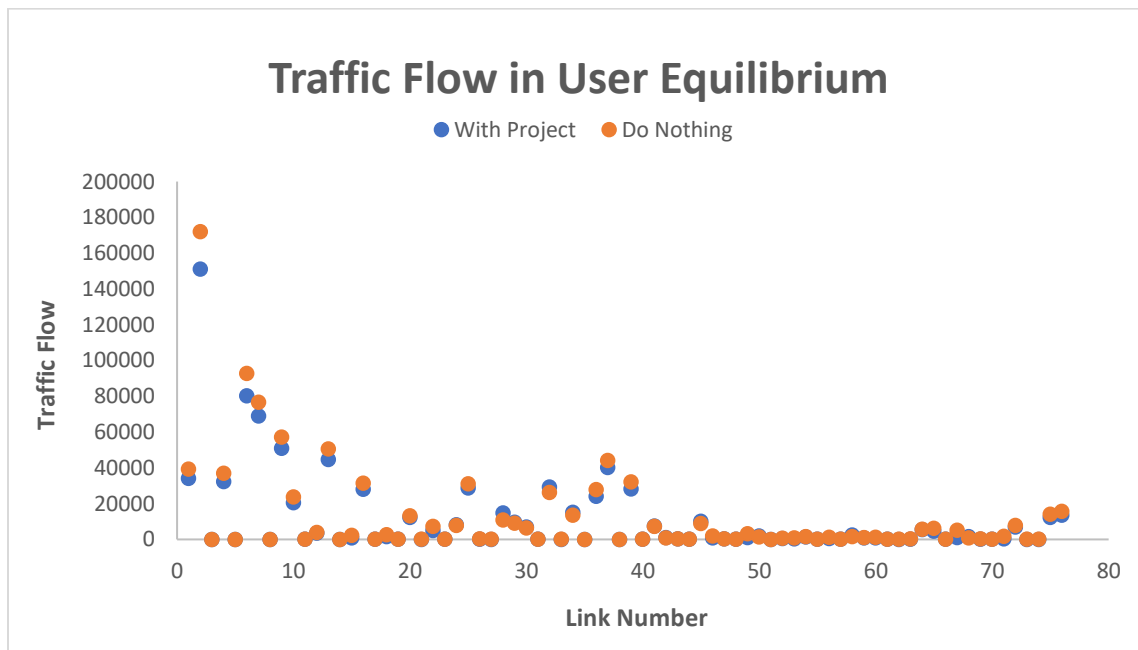
ปริมาณการเดินทาง (Demand) ด้วยรถยนต์(Automobile)	=	1700×0.815	=	1374.373
ปริมาณการเดินทาง (Demand) ด้วยรถไฟฟ้ารางเบา(Light Rail Transit)	=	1700×0.000	=	0.000
ปริมาณการเดินทาง (Demand) ด้วยรถจักรยาน(Bike)	=	1700×0.185	=	325.637

4.5) คำนวณระยะเวลาที่สั้นที่สุดและปริมาณในการเดินทางที่สภาวะสมดุลในแต่ละคู่ O-D ด้วย Algorithm

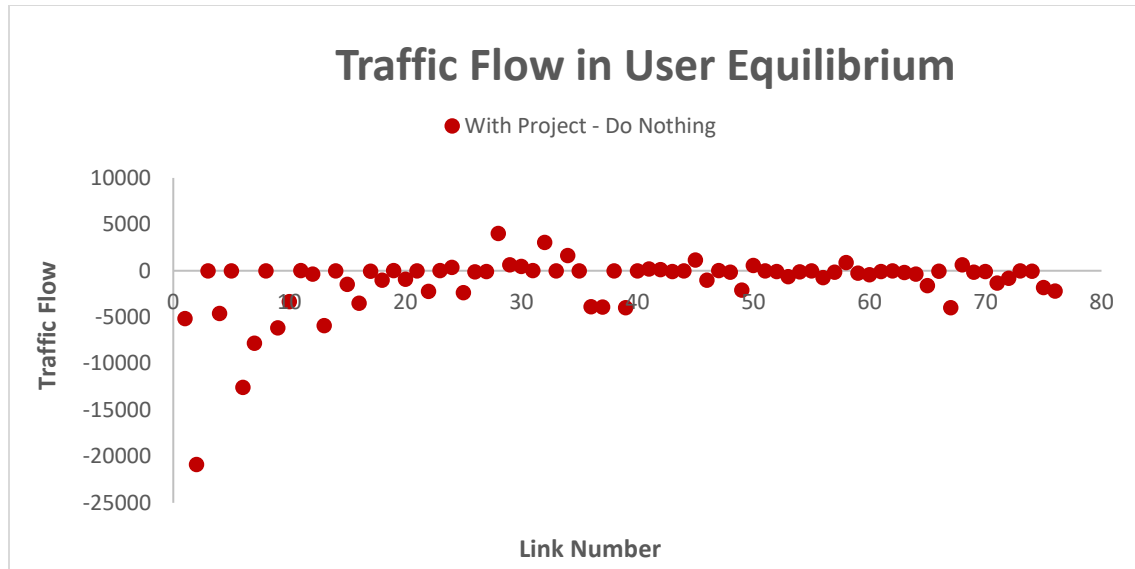
ประกอบไปด้วย Shortest Path Algorithm ที่ใช้สำหรับเลือกเส้นทางที่ใช้เวลาสั้นที่สุดของแต่ละคู่ O-D และ Frank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการเดินทางที่สมดุลของผู้ใช้บนเส้นทางในระบบขนส่งหรือเครือข่ายที่มีการจราจรในสภาวะและเวลาที่แตกต่างกัน

โดยข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้สำหรับการคำนวณด้วย Algorithm นี้ ประกอบไปด้วย ข้อมูลโครงข่ายของ Sioux Falls Network ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่ใช้ในโมเดลการจราจรซึ่งเป็นค่าคงที่ในสมการ BPR Function ของเส้นทางที่เชื่อม(Link)ระหว่างจุดสังเกต (Node) ข้อมูลเหล่านี้เพื่อคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ BPR Function เป็นส่วนหนึ่งของการปรับปรุงโมเดลการจราจรและโครงข่ายการขนส่งในเขต Sioux Falls เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการเดินทางในเครือข่ายถนน แสดงสมการ BPR Function ดังนี้ $t_a = \text{free flow time} (1 + a l (V_a / \text{capacity})^{\text{beta}})$

V_a หมายถึง ปริมาณจราจรที่ผ่าน link นั้นๆ โดยปริมาณนี้เป็นการเดินทางที่สมดุลของผู้ใช้ (User Equilibrium) บนเส้นทางในระบบขนส่ง หรือเครือข่ายที่มีการจราจร ในสถานการณ์และเวลาที่แตกต่างกัน ซึ่งสมดุลเมื่อไม่มีผู้ใช้นั้นเส้นทางใด ๆ ที่มีความต้องการที่จะเปลี่ยนเส้นทางเพื่อลดระยะทางหรือเวลาในการเดินทางได้ และไม่มีใครสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางโดยไม่เพิ่มระยะเวลาในการเดินทางของตนเองได้อีก ซึ่งคำนวณด้วยวิธี Frank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium รวมถึงมีข้อมูลปริมาณการเดินทาง (Demand) ที่คู่ O-D ทั้งหมดที่เดินทางด้วยรถยนต์แล้วถูกแบ่งกับปริมาณการเดินทางด้วยรถไฟฟ้าและรถจักรยานแล้ว (With project) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับกรณีที่ยังไม่มีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing) แสดงการเปรียบเทียบของปริมาณจราจรที่ผ่าน link นั้นๆ ในสภาวะสมดุล (User Equilibrium) ในกราฟที่ 2 และปริมาณจราจรที่ลดลง ในกราฟที่ 3

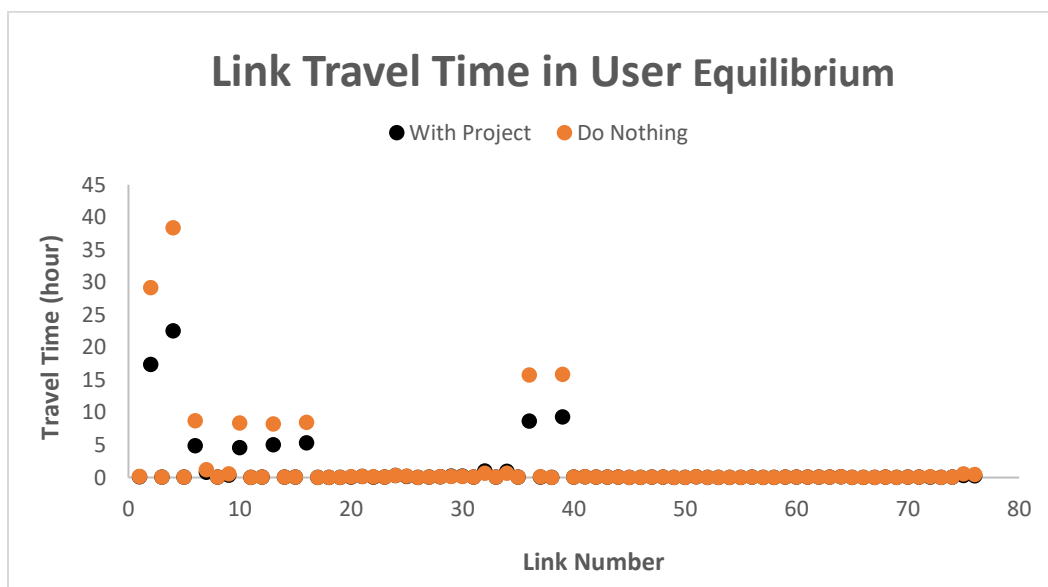


กราฟที่ 2 การเปรียบเทียบของปริมาณจราจรที่ผ่านในสภาวะสมดุล (User Equilibrium)

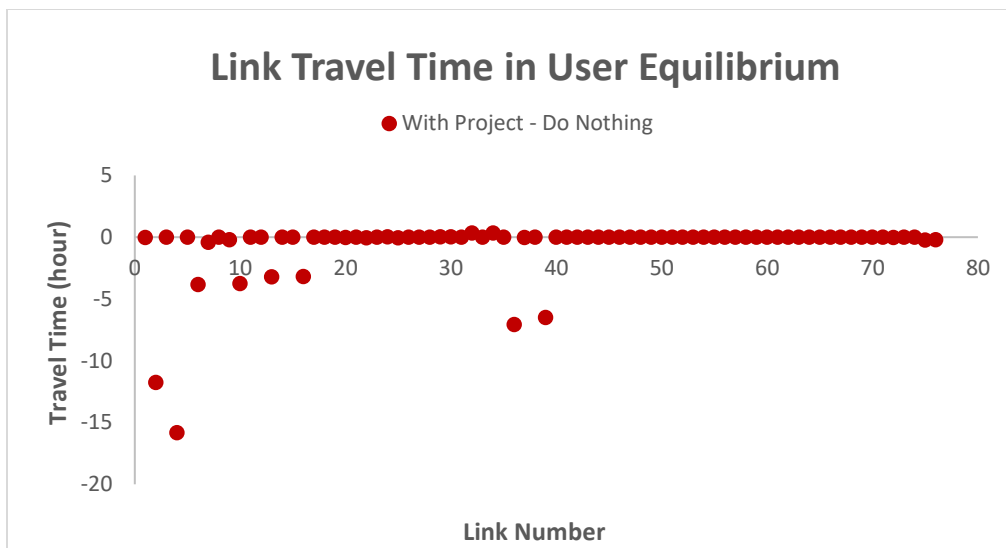


กราฟที่ 3 ปริมาณจราจรที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะสมดุล (User Equilibrium)

พบว่าการลดปริมาณจราจรที่เห็นได้ชัดเกือบทุกเส้นทางในโครงข่าย เป็นการแสดงถึงการแยกไปใช้ยานพาหนะประเภทอื่นๆ ซึ่งทำให้ปริมาณจราจรบนถนนลดลง ส่งผลให้ระยะเวลาการเดินทางด้วยรถยนต์ลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน link ที่ 2 ที่มีการลดลงของปริมาณจราจรถึง 20,868 การลดลงของปริมาณจราจรนี้ช่วยลดปัญหาจราจรติดขัดซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่ 4 ที่แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางผ่าน link ในกรณีที่มีการใช้และไม่มีการใช้รถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project กับ Do nothing) พบว่าเมื่อมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน ระยะเวลาการเดินทางลดลงได้ และระยะเวลาการเดินทางที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะสมดุล (User Equilibrium) ดังกราฟที่ 5 ที่ระยะเวลาการเดินทางที่ลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน link ที่ 4 ที่ระยะเวลาลดลงจากการเดินทางผ่านรวมถึง 15.83 ชั่วโมง



กราฟที่ 4 การเปรียบเทียบของระยะเวลาการเดินทางในสภาวะสมดุล (User Equilibrium)



กราฟที่ 5 ระยะเวลาการเดินทางที่เปลี่ยนแปลงในสภาวะสมดุล (User Equilibrium)

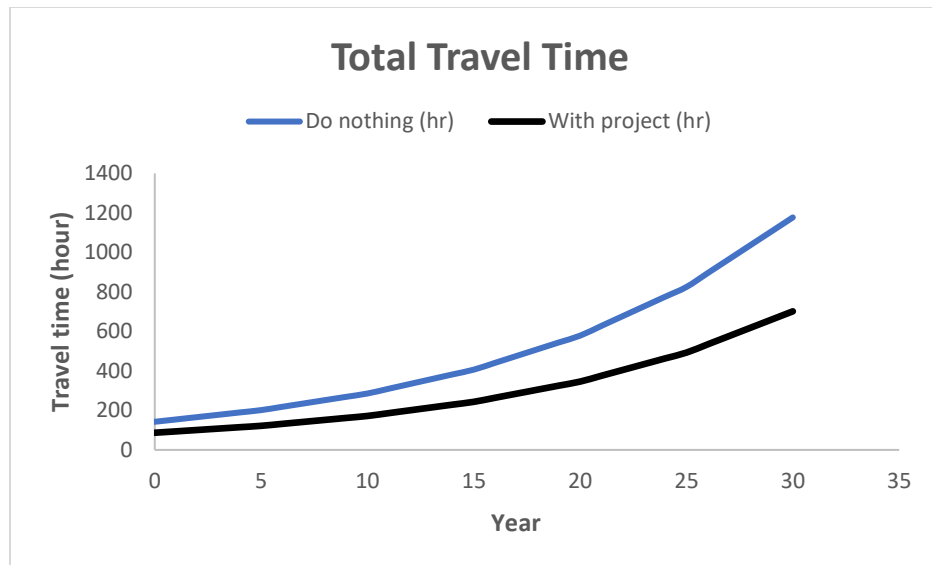
พบว่า การออกแบบถนนสำหรับประเภทยานพาหนะต่างๆ ใน link นั้น มีผลต่อการแบ่งสัดส่วนการเดินทางด้วยยานพาหนะต่างๆ โดยการคำนวณสมการอรรถประโยชน์ในขั้นตอน Modal Split ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยการเลือกใช้ประเภทยานพาหนะต่างๆ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณจราจรที่เดินทางด้วยรถยนต์ลดลงตามกราฟด้านบน รวมถึงลดระยะเวลาเนื่องจากการลดลงของปริมาณจราจรด้วย ในขณะที่เดียวกัน link บางส่วนที่ไม่ได้มีการออกแบบให้มีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบา และรถจักรยานยังคงมีการเดินทางด้วยรถยนต์เหมือนเดิม แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจราจรในบาง link พบว่าระยะเวลาการเดินทางที่เปลี่ยนแปลงใน link นั้นๆ มีน้อยมาก หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย เนื่องจากปริมาณจราจรที่ link รับได้ (Capacity) อยู่ในระดับที่ยอมรับได้มากพอ ไม่เกิดการลดลงของเวลาแม้มีการลดลงของปริมาณจราจร

ในขณะที่เดียวกันพบว่าบาง link ในโครงข่ายถนนมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณจราจรอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ปริมาณจราจรที่ link นั้นรับได้ (Capacity) ไม่เพียงพอต่อปริมาณที่เพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการจราจรติดขัดเช่นเดียวกัน การลดปริมาณจราจรนี้ได้ช่วยลดปัญหาการติดขัดที่เกิดขึ้นใน link นั้นๆ และระยะเวลาในการเดินทางใน link นั้นๆ ก็ลดลงตามไปด้วย เนื่องจากการลดปริมาณจราจรช่วยลดความหนาแน่นของการจราจร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ระยะเวลาการเดินทางลดลงใน link นั้นๆ อีกด้วย

5.การวิเคราะห์ผลการคำนวณในระยะเวลา 30 ปี

วิเคราะห์การเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางรวม (Total travel time) ซึ่งเป็นผลรวมของระยะเวลาการเดินทางที่คำนวณจากผลรวมของระยะเวลาในการเดินทางที่คำนวณด้วยสมการ BPR Function ของเส้นทางที่เชื่อม(Link)ระหว่างจุดสังเกต(Node) ในสถานะสมดุล (User Equilibrium) แสดงถึงระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเดินทางทั้งหมดในโครงข่ายนั้น ๆ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการเดินทางทุกๆ เส้นทางหรือลิงก์ภายในโครงข่าย โดยรวมเป็นผลรวมของเวลาที่ใช้ในการเดินทางในทุกๆ ส่วนของโครงข่ายที่สัมพันธ์กันในระบบ ซึ่งการคำนวณจะใช้สมการ BPR Function หรือ Bureau of Public Roads Function เพื่อหาค่าระยะเวลาการเดินทางในแต่ละลิงก์ โดยพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการเดินทาง เช่น ปริมาณจราจร ความเร็วเฉลี่ย

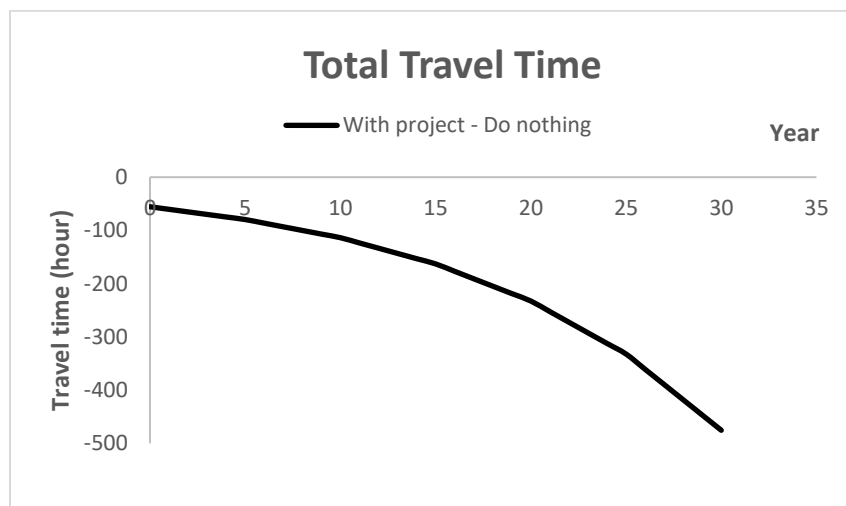
หรือความหนาแน่นของการจราจร ซึ่งทั้งหมดนี้จะถูกรูปเป็นผลรวมเพื่อหาเวลาการเดินทางรวมในโครงข่ายทั้งหมดว่าใช้เวลาเท่าไรในการเดินทางทั้งหมดในระบบโดยรวม แสดงระยะเวลาการเดินทาง แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางรวม (Total travel time) ในกรณีที่โครงข่ายมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) กับกรณีที่ยังไม่มีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing) ตลอดระยะเวลา 30 ปี ดังกราฟที่ 6



กราฟที่ 6 การเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางรวม (Total travel time)

ในกรณีที่ไม่มีโครงการ (With project) และไม่มีโครงการ (Do nothing)

จากกราฟที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาในการเดินทางรวม (Total travel time) ตลอดระยะเวลา 30 ปี โดยปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้น 1.8% ต่อปีส่งผลให้เกิดระยะเวลาการเดินทางรวม (Total travel time) สูงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเวลาผ่านไปหลายปี พบว่ากรณีที่โครงข่ายมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) ช่วยลดระยะเวลาการเดินทางรวมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังกราฟที่ 7



ดังกราฟที่ 7 เมื่อเวลาผ่านไปหลายปี ระยะเวลาการเดินทางรวมลดลงมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

ผลลัพธ์นอกจากจะคำนวณเวลาการเดินทางสั้นที่สุดของแต่ละคู่ O-D ได้จาก Shortest Path Algorithm และปริมาณการเดินทางที่สมดุลของผู้ใช้บนเส้นทางในระบบขนส่งหรือเครือข่ายที่มีการจราจรในสถานะและเวลาที่แตกต่างกัน จาก Frank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium ยังมีการแสดงเส้นทางในการเดินทางแต่ละคู่ O-D โดยแสดงเป็นข้อมูล link ที่เดินทางผ่าน และปริมาณจราจร ข้อมูลนี้บ่งบอกว่าในการเดินทางจากสถานที่หนึ่งไปอีกสถานที่หนึ่งมีปริมาณการเดินทาง และใช้เวลาการเดินทางเท่าไร โดยสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมการเดินทางจากสถานที่หนึ่งไปอีกสถานที่หนึ่งในระยะเวลา 30 ปี ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ยกตัวอย่าง แสดงข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณการเดินทาง และใช้เวลาการเดินทางจาก Node ที่ 13 ไปยัง Node ที่ 17 ได้ดังตารางที่ 5

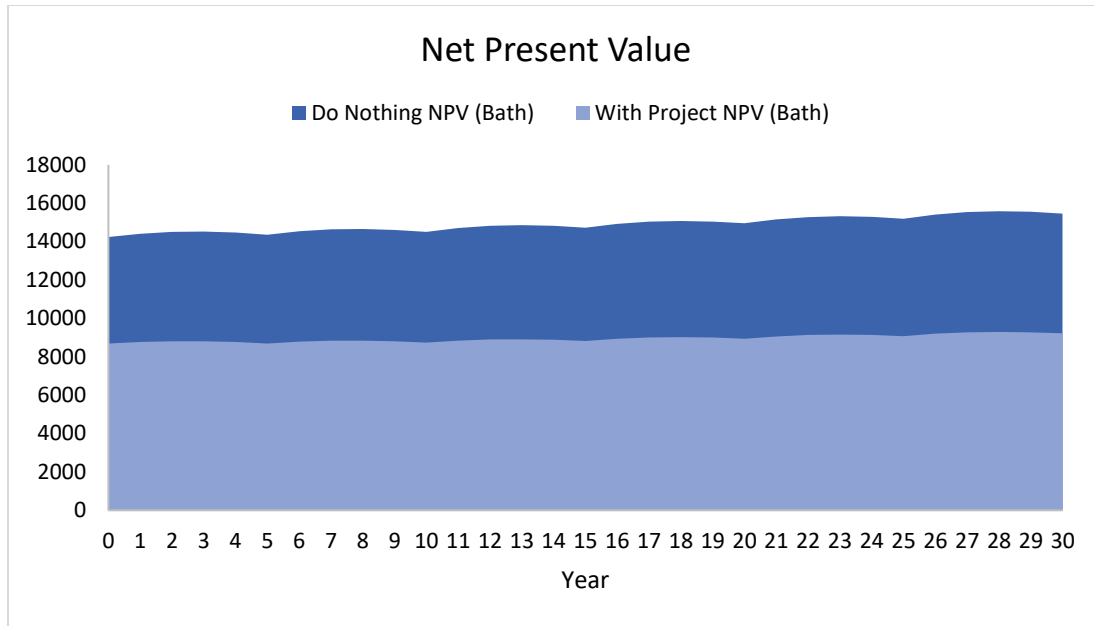
Year	O	D	Demand	Link Numbers in Updated Shortest Paths	O-D Travel Time
0	13	17	493.2401802	[39, 76, 72, 67, 45, 58]	592.214
5	13	17	539.2589202	[39, 75, 65, 67, 45, 58]	838.113
10	13	17	589.5711555	[39, 75, 65, 67, 45, 58]	1190.005
15	13	17	644.5774644	[39, 75, 65, 67, 45, 58]	1695.869
20	13	17	704.7157985	[39, 75, 65, 67, 45, 58]	2423.925
25	13	17	770.4649698	[39, 75, 65, 67, 45, 58]	3450.001
30	13	17	842.348463	[39, 76, 72, 67, 45, 58]	4933.597

ตารางที่ 5 ข้อมูลการเดินทางจาก Node ที่ 13 ไปยัง Node ที่ 17

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าในระยะเวลา 30 ปี มีความเปลี่ยนแปลงในปริมาณการเดินทางและเส้นทางในการเดินทาง โดยเริ่มตั้งแต่ปีที่ 0 ถึง ปีที่ 30 ปริมาณการเดินทางมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ชัดเจนในการเพิ่มประชากรหรือการเพิ่มความต้องการในการเดินทาง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการเดินทางอย่างต่อเนื่อง จึงอาจทำให้เส้นทางในการเดินทางในระบบขนส่งเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีการเลือกใช้เส้นทางที่ให้เวลาการเดินทางที่สั้นที่สุดเพื่อลดระยะเวลาการเดินทางของผู้ใช้ จึงทำให้เส้นทางในการเดินทางมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การเปรียบเทียบข้อมูลในระยะเวลาต่างๆ ช่วยให้เรารู้ถึงแนวโน้มและการเปลี่ยนแปลงในพฤติกรรมในการเดินทางของประชาชน ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญในการวางแผนและพัฒนาโครงข่ายขนส่งในอนาคต

6. ประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ในระยะเวลา 30 ปี

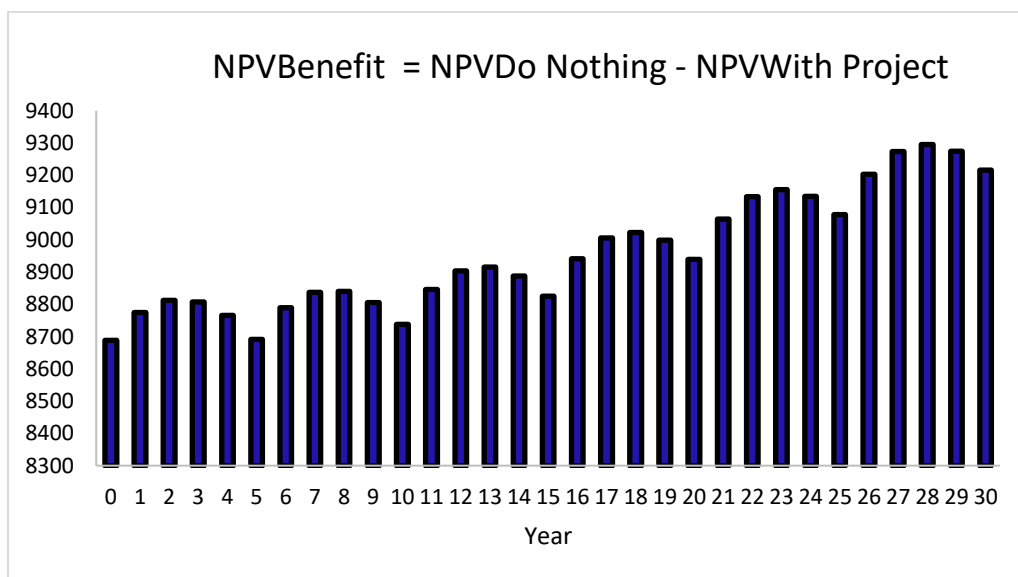
การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นการประเมินราคาโดยพิจารณาจากเวลาในการเดินทางรวมทั้งหมด (Total Travel Time) โดยผลประโยชน์ของโครงการ คือ มูลค่าของระยะเวลาการเดินทางที่ลดลงตลอด 30 ปี ซึ่งสามารถคำนวณได้จากมูลค่าของเวลาที่มีความเท่ากับ 100 บาทต่อชั่วโมง แสดงมูลค่าของเวลาการเดินทางรวม (Total Travel Time) ในแต่ละปี ทั้งในกรณีที่โครงข่ายมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) และกรณีที่ยังไม่มีโครงข่ายเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (Do nothing) ในรูปของ Net Present Value ในแต่ละปี ในกราฟที่ 9



กราฟที่ 9 มูลค่าของเวลาการเดินทางรวม (Total Travel Time)

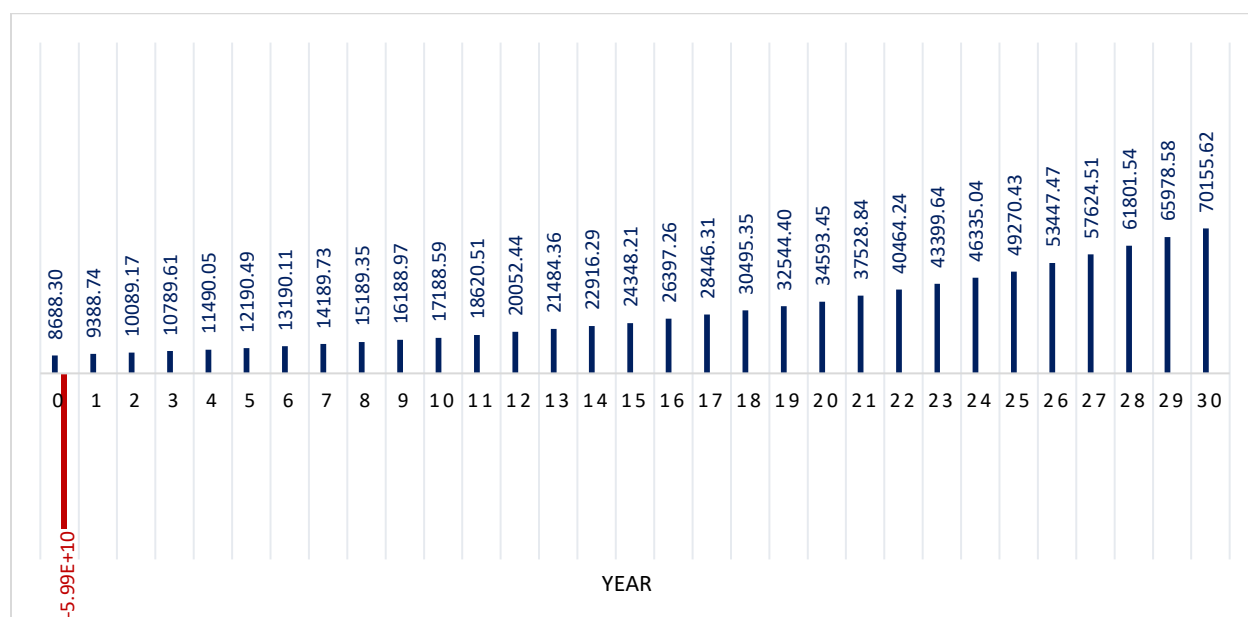
ในแต่ละปี ทั้งในกรณี With project และกรณีที่ Do Nothing

จะพบว่าในกรณีที่โครงข่ายมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการเดินทางในทุกๆ ปีได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่การลดค่าใช้จ่ายนี้เกิดจากการลดปัญหาการจราจรติดขัดและระยะเวลาในการเดินทางโดยรวมในโครงข่าย การเพิ่มการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยานช่วยลดความหนาแน่นของการจราจรบนถนนซึ่งส่งผลให้ลดความล่าช้าและเวลาที่ใช้ในการเดินทางลง โดยผลกระทบเชิงบวกนี้ทำให้ผู้ใช้บริการในโครงข่ายนั้นสามารถเดินทางได้อย่างสะดวกสบายและมีความคุ้มค่ามากยิ่งขึ้น โดยกราฟที่ 10 จะแสดงผลประโยชน์ที่เกิดจากการลดค่าใช้จ่ายที่สอดคล้องกับระยะเวลาการเดินทางที่ลดลงตลอด 30 ปี



กราฟที่ 10 ผลประโยชน์ที่เกิดจากการลดค่าใช้จ่ายที่ลดลงตลอด 30 ปี

มูลค่าการก่อสร้างสามารถคำนวณได้จากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบาที่ประมาณเป็น 800 ล้านบาทต่อกิโลเมตร และค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทางสำหรับจักรยานที่ประมาณเป็น 5 ล้านบาทต่อกิโลเมตร โดยเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบาที่ออกแบบมีระยะทาง 74 km คิดราคาก่อสร้างเป็น 5920 ล้านบาท และเส้นทางเลนรถจักรยานที่ออกแบบมีระยะทาง 144 km คิดราคาก่อสร้างเป็น 720 ล้านบาท รวมค่าใช้จ่ายการก่อสร้างทั้งหมด เท่ากับ 5992 ล้านบาท แสดงในรูปของ Cash flow ที่ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและผลประโยชน์ที่ได้ของโครงการก่อสร้างเส้นทางรถไฟฟ้ารางเบา และเส้นทางเลนรถจักรยานเพื่อวางแผนการเงินและตัดสินใจทางการเงินช่วยให้เข้าใจเกี่ยวกับการได้รับและจ่ายเงินในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ดังกราฟที่ 11



กราฟที่ 11 Cash flow ของโครงข่ายที่มีโครงการ (With project) ตลอด 30 ปี

โดยผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นตลอด 30 ปี คือผลรวมของมูลค่าการเดินทางที่ลดซึ่งแปลงอยู่ในรูปมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 184682.27 บาท โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายพบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 รวมทั้ง IRR (Internal Rate of Return) ที่มีค่าน้อยกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับในการลงทุนหรือโครงการใดๆ (Minimum Acceptable Rate of Return, MARR) ซึ่งแสดงถึงความไม่คุ้มค่าในการดำเนินการโครงการนี้

7. สรุปผลการวิเคราะห์ในระยะเวลา 30 ปี

การศึกษานี้เป็นการประเมินความคุ้มค่าในการออกแบบเส้นทางสำหรับยานพาหนะประเภทใหม่ที่เพิ่มเข้ามาในโครงข่ายขนส่ง Sioux Falls Network คือ รถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน เพื่อประเมินผลกระทบต่อการเดินทางและความคุ้มค่าของโครงการ ซึ่งใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ในการคำนวณระยะเวลาการเดินทาง และข้อมูลปริมาณการเดินทางของทุกการเดินทางระหว่างจุดต้นทางและปลายทาง (O-D) โดยการคำนวณระยะเวลาการเดินทางจาก BPR function และปริมาณการเดินทางที่สมดุลจาก Frank-Wolfe Algorithm for User Equilibrium Algorithm

สำหรับบางเส้นทางที่มีการออกแบบเส้นทางการเดินทางเพิ่มเติมทำให้เส้นทางการเดินทางนั้นมีการเลือกประเภทของยานพาหนะในการเดินทาง โดยเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางเป็นปัจจัยหลักในการเลือกพบว่าส่วนใหญ่แล้วยังคงมีการแบ่งสัดส่วนระหว่างรถยนต์ และรถจักรยาน ในขณะที่รถไฟฟ้ารางเบานั้นมีการเลือกใช้ในสัดส่วนที่น้อยมาก ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากปัจจัยในด้านของเวลาการเดินทางที่ช้ากว่ารถยนต์เนื่องจากความเร็วในการเดินทางที่ต่ำกว่า รวมถึงปัจจัยที่ต้องจ่ายค่าโดยสาร ในขณะที่รถยนต์และรถจักรยานมีเพียงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเวลาในการเดินทางเพียงเท่านั้น ถึงแม้รถไฟฟ้ารางเบาจะมีความพึงพอใจแฝงที่เป็นค่าคงที่ที่แสดงในสมการอรรถประโยชน์ของรถไฟฟ้ารางเบา จากสมการอรรถประโยชน์ที่แสดงถึงค่าความพึงพอใจในการเลือกใช้ยานพาหนะทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าความเป็นไปได้ในการเลือกใช้รถยนต์มีมากเป็นส่วนใหญ่ รองลงมาคือรถจักรยาน ในขณะที่ความเป็นไปได้ในการเลือกใช้รถไฟฟ้ารางเบาน้อยมากเมื่อเทียบกับรถยนต์ และรถจักรยาน รวมทั้งการวิเคราะห์ผ่านเส้นทางระหว่างจุด(Node) ที่ผ่านเพียงเส้นทางเดียวเท่านั้น พบว่ามีเพียงการเดินทางด้วยรถยนต์และ รถจักรยานเพียงเท่านั้น เนื่องจากการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาเป็นการเดินทางที่ใช้เวลานานกว่ารถยนต์ และต้องเสียค่าโดยสารที่มีค่าเท่ากับการเดินทางในเส้นทางที่ไกลกว่า

จากนั้นสามารถเลือกเส้นทางการเดินทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุดด้วยการใช้ Shortest Path Algorithm และคำนวณปริมาณการเดินทางที่สมดุลด้วย Frank-Wolfe Algorithm เพื่อเปรียบเทียบปริมาณจราจรที่เกิดขึ้นในสถานะสมดุล และ และระยะเวลาการเดินทางรวม(Total travel time) ในโครงข่ายเดิม (Do Nothing) และ โครงข่ายเดิมที่มีการออกแบบเส้นทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบา (Light rail transit, LRT) และรถจักรยานยนต์ (Bike) เมื่อเวลาผ่านไปหลายปี พบว่ากรณีที่โครงข่ายมีการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ารางเบาและรถจักรยาน (With project) ช่วยลดระยะเวลาการเดินทางรวมมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในระยะเวลา 30 ปี มีความเปลี่ยนแปลงในปริมาณการเดินทางและเส้นทางการเดินทาง โดยเริ่มตั้งแต่ปีที่ 0 ถึง ปีที่ 30 ปริมาณการเดินทางมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ชัดเจนในการเพิ่มประชากรหรือการเพิ่มความต้องการในการเดินทางจากนั้น สำหรับเปรียบเทียบความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีอัตราผลตอบแทนที่เฉลี่ย (Discount Rate) ทุกปี 7% และมีมูลค่าของเวลาที่สูญเสียประมาณ 100 บาทต่อชั่วโมง โดยการคำนวณ NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return) และ B/C (Benefit-Cost Ratio) โดยมูลค่าการก่อสร้างสามารถคำนวณได้จากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างทางสำหรับรถไฟฟ้ารางเบา 5920 ล้านบาท และเส้นทางเลนรถจักรยาน 720 ล้านบาท รวมค่าใช้จ่ายการก่อสร้างทั้งหมด เท่ากับ 5992 ล้านบาท ผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นตลอด 30 ปี คือ ผลรวมของมูลค่าการเดินทางที่ลดลงซึ่งแปลงอยู่ในรูปมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 184,682.27 บาท โดยการคำนวณอัตราส่วนระหว่างผลประโยชน์และค่าใช้จ่ายพบว่ามีความน้อยกว่า 1 รวมทั้ง IRR (Internal Rate of Return) ที่มีค่าน้อยกว่าอัตราผลตอบแทนขั้นต่ำที่ยอมรับในการลงทุนหรือโครงการใดๆ (Minimum Acceptable Rate of Return, MARR) ซึ่งแสดงถึงความไม่คุ้มค่าในการดำเนินการ โครงการนี้ เนื่องจากยังคงมีการเลือกใช้รถยนต์เป็นส่วนใหญ่ ในทางกลับกันมีการเลือกใช้รถไฟฟ้ารางเบาน้อยส่งผลให้ไม่สามารถลดเวลาการเดินทางได้เท่าที่ควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลต่างๆ เช่น ปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกใช้ยานพาหนะและค่าใช้จ่าย เพื่อปรับปรุงโครงการให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ภาคผนวก

Input data for Shortest Path Frank Wolfe Algorithm for User Equilibrium

O-D Demand จัดเรียงข้อมูลด้วย OD Rearrange Format Python Coding

O	D	Demand
1	1	0
1	2	76.85248
1	3	78.91817
1	4	373.2465
1	5	144.6244
1	6	300
1	7	500
1	8	800
1	9	329.6302
1	10	1113.225
1	11	0.066668

.	.	.
.	.	.
24	18	0
24	19	99.0529
24	20	400
24	21	500
24	22	1092.711
24	23	565.9183
24	24	0

Network Data

link_num	a_node	b_node	time	fftt	al	beta	cap
1	1	2	6	6	0.15	4	25900.2
2	1	3	4	4	0.15	4	23403.47
3	2	1	6	6	0.15	4	25900.2
4	2	6	5	5	0.15	4	4958.181
5	3	1	4	4	0.15	4	23403.47
.
.
.
72	23	22	4	4	0.15	4	5000
73	23	24	2	2	0.15	4	5078.508
74	24	13	4	4	0.15	4	5091.256
75	24	21	3	3	0.15	4	4885.358
76	24	23	2	2	0.15	4	5078.508

