

การวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนา และการระบุความสำคัญของสถานีในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง
ในกรุงเทพมหานคร



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Topological Evolution Analysis and Vital Station Identification in Bangkok Rail Transit
Network



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนา และการระบุความสำคัญ
ของสถานีในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน
กรุงเทพมหานคร

โดย

นางสาวพิชญา ณ บางช้าง

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเศษณ์ จารุมนีโรจน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเศษณ์ จารุมนีโรจน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมวล สุธีจาร์วัฒน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. สิริวิชญ์ สว่างนพ)

พิชญา ณ บางช้าง : การวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนา และการระบุความสำคัญของสถานีใน
เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร (Topological Evolution Analysis
and Vital Station Identification in Bangkok Rail Transit Network) อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์, หน้า.

เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครเป็นเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน
เมืองเครือข่ายแรกของประเทศไทย ซึ่งในปี พ.ศ. 2572 เครือข่ายดังกล่าวจะมีจำนวนสถานีทั้งหมด
285 สถานี และจะเป็นหนึ่งในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางที่มีขนาดใหญ่ติด 5 อันดับแรกของโลก
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารูปแบบการพัฒนาของเครือข่ายดังกล่าวตั้งแต่เปิดให้บริการในปี
พ.ศ. 2542 จนถึง พ.ศ. 2572 ในทุกลำดับการขยายผ่านทฤษฎีเครือข่ายซับซ้อน โดยอาศัยตัวชี้วัด
เครือข่ายทั้งหมด 7 ชนิดในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการพัฒนาเครือข่ายใน
ช่วงเวลาดังกล่าว นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาตัวชี้วัดรอยต่อเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย และ
เชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ เพื่อระบุสถานีที่มีความสำคัญ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการ
เสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับเครือข่ายในอนาคตได้

จากผลการวิจัยพบว่า ตัวชี้วัดระดับเครือข่ายโดยภาพรวม อันประกอบไปด้วย ค่าเส้นผ่าน
ศูนย์กลางเครือข่าย ดัชนีแกมมา และค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมี
ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree อยู่ในช่วง $[1.91, 2.27]$ สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง
Closeness สูงมักอยู่บริเวณกึ่งกลางของเครือข่าย ในขณะที่สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง
Betweenness สูงมักอยู่บนเส้นทางรัศมีที่เชื่อมต่อระหว่างกึ่งกลางเมืองและชานเมือง สำหรับผลจาก
ตัวชี้วัดรอยต่อที่ใช้เพื่อระบุความสำคัญของสถานีนั้น พบว่าสถานีที่มีความสำคัญเชิงประสิทธิภาพ
เครือข่ายสูงมักจะอยู่บริเวณสถานีที่มีค่า Degree สูง และเน้นไปในเส้นทางที่เป็นทางผ่านระหว่างจุด
เชื่อมต่อออกไปทางชานเมือง โดยมีการกระจายอยู่หลายจุดทั่วทั้งเครือข่าย ในขณะที่สถานีที่มี
ความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบสูงมักอยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่งของเครือข่ายเพียง
เท่านั้น

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5970266321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: RAIL TRANSIT NETWORK / NETWORK ANALYSIS / COMPLEX NETWORK THEORY / NODE IMPORTANCE

PIJAYA NA BANGXANG: Topological Evolution Analysis and Vital Station Identification in Bangkok Rail Transit Network. ADVISOR: ASST. PROF. PISIT JARUMANEEROJ, Ph.D., pp.

Bangkok Rail Transit Network (BRTN) is the first urban rail transit system in Thailand, whose number of stations will reach 285 in 2029, and will become one of the fifth world largest urban rail transit network. This research investigates the topological evolution of BRTN from 1999 to 2029 based on Complex Network Theory explained by 7 different network indicators. Additionally, in order to rank and prioritize stations within the BRTN network from 2018-2029, comprehensive importance indices are also developed, based on 2 different aspects, that is, Network Efficiency (COMe) and Effect Spreading (COMs).

The values of network level indicators, including Network Diameter, Gamma Index, and Network Standard Entropy, seemingly rise over time, where the average degree increases from 1.91 to 2.27. While the stations with high closeness are often located at the center of the network (central area), the stations with high betweenness tend to be those located on the radial lines connecting suburbs with the central area. Regarding the results from the proposed comprehensive indices, we find that stations with high COMe are often high-degree stations with good connections to the suburbs; and, the stations with high COMs are typically those densely located within specific areas.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้ ถ้าขาดอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ. ดร. พิเศษภู์ จารุมนิโรจน์ อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่คอยให้ คำปรึกษาวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบข้อบกพร่องต่างๆ อย่างสม่ำเสมอด้วยความเอาใจใส่อย่างดี

ขอขอบคุณ รศ. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร. ประมวล สุธีจารุวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อ. ดร. สิริวิชญ์ สว่างนพ ที่ได้สละเวลา พิจารณาวิทยานิพนธ์ และช่วยให้คำแนะนำในการปรับปรุงงานวิจัย ให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ ผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวถึงในที่นี้ทุกท่าน ที่ คอยให้กำลังใจในการทำงาน และให้ความช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	9
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ทฤษฎีเครือข่าย.....	11
2.2 ตัวชี้วัดเครือข่ายซับซ้อน.....	13
2.2.1 ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย.....	14
2.2.1.1 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย.....	14
2.2.1.2 ดัชนีแกมมา.....	15
2.2.1.3 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย.....	16
2.2.2 ตัวชี้วัดระดับสมาชิก.....	17
2.2.2.1 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree.....	18
2.2.2.2 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector.....	18
2.2.2.3 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness.....	19
2.2.2.4 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness.....	20

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์รูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชน	20
2.4 การเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิก	24
2.4.1 วิธีการทดสอบความอ่อนไหวประสิทธิภาพเครือข่าย	24
2.4.2 วิธีการทดสอบการแพร่กระจายผลกระทบ.....	26
2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการเสนอตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอด	30
2.6 การพัฒนาจากการทบทวนวรรณกรรม.....	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	32
3.1 ที่มาของข้อมูล	33
3.2 การเก็บข้อมูลและการนำเสนอรูปแบบเครือข่าย	33
3.2.1 การนำเสนอรูปแบบเครือข่าย	34
3.3 อัลกอริทึมสำหรับหาเส้นทางที่สั้นที่สุด.....	36
3.4 ตัวชี้วัดเครือข่าย.....	39
3.4.1 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย.....	39
3.4.2 ดัชนีแกมมา	40
3.4.3 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย	40
3.4.4 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree.....	42
3.4.5 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector.....	43
3.4.6 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness	44
3.4.7 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness.....	45
3.5 การพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอด.....	48
3.5.1 ความสำคัญด้านประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม.....	49
3.5.2 ความสำคัญด้านการแพร่กระจายผลกระทบ	50
3.5.2.1 แบบจำลอง SIR.....	51

3.5.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์	53
3.5.3 ค่า Monotonicity	55
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	57
4.1 แนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร	57
4.2 การวิเคราะห์การพัฒนารูปแบบเครือข่าย	59
4.2.1 จำนวนสถานี และจำนวนเส้นเชื่อมสถานี	60
4.2.2 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย	61
4.2.3 ดัชนีเกมมา	62
4.2.4 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย	64
4.2.5 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree	67
4.2.6 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector	69
4.2.7 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness	71
4.2.8 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness	73
4.3 การระบุความสำคัญของสถานี	76
4.3.1 การวิเคราะห์ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย	76
4.3.2 การวิเคราะห์ความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ	83
4.3.3 การเสนอแนวทางสำหรับการระบุความสำคัญในอนาคต	90
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	93
5.1 การพัฒนารูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร	93
5.2 การระบุความสำคัญของสถานี	95
5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัย	96
5.4 แนวทางการวิจัยในอนาคต	97
รายการอ้างอิง	98

ญ

หน้า

ภาคผนวก.....	102
ภาคผนวก ก.....	103
ภาคผนวก ข.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	126



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	แผนผังแนวเส้นทางเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2572	2
รูปที่ 1.2	เครือข่ายตัวอย่างพร้อมแสดงสมาชิกที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางสูงสุด.....	4
รูปที่ 1.3	แผนภาพการเสริมสร้างความแข็งแกร่งของเครือข่าย	5
รูปที่ 1.4	การรบกวนเครือข่ายโดยการปิดการเชื่อมต่อสถานี	6
รูปที่ 1.5	การลดลงของประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อจำลองการรบกวนแบบเรียงลำดับค่าความเป็นศูนย์กลางระหว่าง Degree และ Betweenness ในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในประเทศจีน	7
รูปที่ 1.6	สรุปภาพรวมของงานวิจัย.....	9
รูปที่ 2.1	ประเภทของเครือข่าย.....	12
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย.....	14
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างค่าดัชนีแกมมา.....	15
รูปที่ 2.4 (ก)	เครือข่ายสุ่มสมบูรณ์ และ (ข) เครือข่ายที่มีหนึ่งสมาชิกศูนย์กลาง	16
รูปที่ 2.5	กราฟการกระจายของค่าเฉลี่ยระยะการเดินทางกับจำนวนสถานีของเครือข่ายรถไฟในเขตเมือง จำนวน 32 เครือข่าย	21
รูปที่ 2.6	การจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าระยะเฉลี่ยการเดินทาง (Average Path Length, APL)....	22
รูปที่ 2.7	แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของเครือข่าย Stockholm ประเทศสวีเดน	23
รูปที่ 2.8	การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับแบบพิจารณาประสิทธิภาพเครือข่ายระหว่างเรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree Betweenness และแบบสุ่ม (Daniel J. S. et al., 2015).....	26
รูปที่ 2.9	การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับแบบพิจารณาประสิทธิภาพเครือข่ายบนเครือข่ายจริงที่มีจำนวนสมาชิกต่างกัน (AIDS, Dolphins, Airport และ Email).....	26

รูปที่ 2.10 จุด epidemic threshold ที่ความน่าจะเป็นวิกฤต (α_c) เท่ากับ 1.0 (Iyer S., et al., 2013).....	27
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงาน	32
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสถานีเชื่อมต่อระหว่างสาย (สถานีสำโรง).....	34
รูปที่ 3.3 แผนภาพเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2542	35
รูปที่ 3.4 แผนภาพแนวคิดของ Floyd Warshall อัลกอริทึม	36
รูปที่ 3.5 แนวคิดการหาค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของสมาชิกที่ 3	44
รูปที่ 4.1 แผนภาพแนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร	58
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของจำนวนสถานีและเส้นเชื่อมสถานี พ.ศ. 2542-2572.....	60
รูปที่ 4.3 การพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2542-2572	61
รูปที่ 4.4 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	62
รูปที่ 4.5 ดัชนีแกมมาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	63
รูปที่ 4.6 เครือข่ายที่มีแนวเส้นทางแยกตัว.....	63
รูปที่ 4.7 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	64
รูปที่ 4.8 ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางเมือง Guangzhou ประเทศจีน ปี ค.ศ. 1999-2020.....	65
รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลางบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2572.....	66
รูปที่ 4.10 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (ซ้าย) และ Degree correlation (ขวา) ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	67
รูปที่ 4.11 แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุด ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	68
รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	69

รูปที่ 4.13 แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector พร้อมชี้สถานีที่มีค่า ดังกล่าวสูงสุด ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567.....	70
รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	71
รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่า ดังกล่าวสูงสุดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567.....	72
รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายขนส่งมวลชน ทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572.....	74
รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่า ดังกล่าวสูงสุดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567.....	75
รูปที่ 4.18 กราฟความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย เมื่อปิดการเชื่อมจากมากไปน้อยด้วย วิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธี เทียบกับตัวชี้วัดรอยต่อที่พัฒนา.....	79
รูปที่ 4.19 แผนผังความเข้มข้นของตัวชี้วัดรอยต่อเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายที่ทำการพัฒนา พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุด บนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2561-2572	81
รูปที่ 4.20 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรอยต่อเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 10 อันดับแรกบน เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2572	82
รูปที่ 4.21 แผนผังความเข้มข้นของตัวชี้วัดรอยต่อเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบที่ การพัฒนา พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2561-2572.....	88
รูปที่ 4.22 เครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง พ.ศ. 2572 โดยแสดงบริเวณที่มีค่าตัวชี้วัดรอยต่อเชิง การเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ 10 อันดับแรก.....	89
รูปที่ 4.23 แผนผังขั้นตอนการระบุความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร.....	90
รูปที่ 4.24 แผนผังการทับซ้อนเครือข่ายขนส่งมวลชนและแผนผังเมืองกรุงเทพมหานคร.....	91

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542.....	8
ตารางที่ 2.1 เมตริกซ์ประชิดของเครือข่ายแบบมีทิศทาง (A_d) และแบบไม่มีทิศทาง (A_b).....	13
ตารางที่ 2.2 การประเมินความสัมพันธ์ที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	28
ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนตัลล์กับแบบจำลอง SIR ของเครือข่าย ตัวอย่าง.....	29
ตารางที่ 3.1 ที่มาของข้อมูลที่ใช้นในงานวิจัย.....	33
ตารางที่ 3.2 ชื่อสถานีและหมายเลขสถานีของเครือข่าย พ.ศ. 2542	35
ตารางที่ 3.3 เมตริกซ์ประชิด (Adjacency Matrix, A) ของเครือข่าย พ.ศ. 2542	36
ตารางที่ 3.4 อัลกอริทึมเทียมของ Floyd Warshall	37
ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณเมตริกซ์ระยะทาง (D) ในหน่วยกิโลเมตร ของเครือข่าย พ.ศ. 2542	38
ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ ค่าความสำคัญ degree (I).....	42
ตารางที่ 3.7 เส้นทางที่สั้นที่สุดทั้งหมดของเครือข่ายตัวอย่าง.....	47
ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายตัวอย่าง.....	47
ตารางที่ 3.9 สรุปตัวชี้วัดเครือข่ายสำหรับการวิเคราะห์เครือข่ายที่ใช้นในงานวิจัย	48
ตารางที่ 3.10 อัลกอริทึมเทียมของการคำนวณประสิทธิภาพเครือข่าย.....	50
ตารางที่ 3.11 อัลกอริทึมเทียมของแบบจำลอง SIR ที่ใช้นในงานวิจัย	52
ตารางที่ 3.12 ตัวอย่างชุดข้อมูลสำหรับแสดงการคำนวณ Kendall Tau's Correlation.....	54
ตารางที่ 4.1 แนวคิดเส้นทางให้บริการของเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร	57
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณตัวชี้วัดเครือข่าย พ.ศ.2542-2572	59
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย ด้วยวิธีวิเคราะห์ความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย โดยแสดงผลเป็นร้อยละของ	

ประสิทธิภาพที่ลดลงเทียบกับค่าประสิทธิภาพเริ่มต้น ที่การปิดการเชื่อมต่อสถานีที่มีค่าสูงสุด 20% แรก.....	77
ตารางที่ 4.4 ค่า Motonicity ของการเรียงลำดับแต่ละวิธี.....	80
ตารางที่ 4.5 ความน่าจะเป็นวิกฤตที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง SIR ของแต่ละเครือข่าย	84
ตารางที่ 4.6 สถานีที่มีค่าสูงสุด 10 อันดับแรกของการเรียงลำดับแต่ละวิธีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2572	85
ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์ของค่าการเรียงลำดับแต่ละวิธีเทียบกับผลลัพธ์จากการเรียงลำดับที่ได้จากแบบจำลอง SIR ที่ความน่าจะเป็นวิกฤต	85
ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณสัดส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมกับการระบุความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ.....	86
ตารางที่ ก.1 ลำดับการเปิดให้บริการเส้นทาง.....	103
ตารางที่ ก.2 สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มากที่สุด 5 อันดับแรก.....	105
ตารางที่ ก.3 สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector มากที่สุด 5 อันดับแรก.....	106
ตารางที่ ก.4 สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closness มากที่สุด 5 อันดับแรก.....	107
ตารางที่ ก.5 สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มากที่สุด 5 อันดับแรก.....	108
ตารางที่ ข.1 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวมยอดด้านประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2561-2564.....	110
ตารางที่ ข.2 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวมยอดด้านประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2565-2572.....	114
ตารางที่ ข.3 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวมยอดด้านการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2561-2564.....	118
ตารางที่ ข.4 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวมยอดด้านการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2565-2572.....	123

บทที่ 1

บทนำ

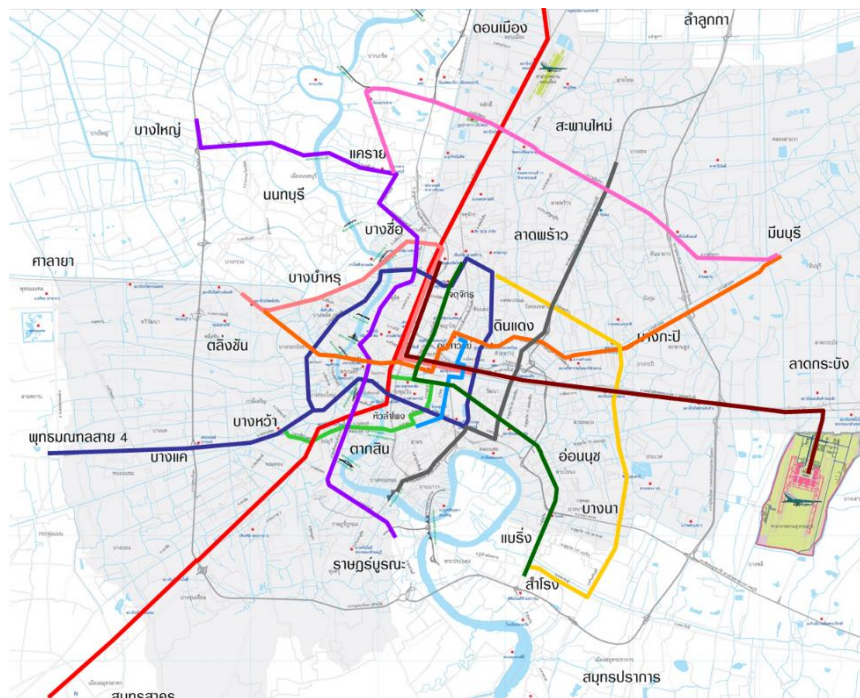
1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการคมนาคมเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในเมืองใหญ่ โดยเฉพาะปัญหาความแออัดที่เกิดขึ้นบนท้องถนน ส่งผลทำให้ผู้สัญจรต้องใช้เวลาในการเดินทางยาวนานขึ้น และอาจจะนำไปสู่ปัญหาประสิทธิภาพเครือข่ายการคมนาคมที่ต่ำลง (Cats O., 2017) สำหรับปัญหาการคมนาคมทางถนนในกรุงเทพมหานครนั้นถือว่าอยู่ในสภาวะวิกฤต โดยคนกรุงเทพมหานครสูญเสียเวลาไปกับปัญหาการจราจรติดขัดบนท้องถนนเฉลี่ย 64.1 ชั่วโมงต่อปี ซึ่งนับเป็นเมืองที่มีการจราจรติดขัดในช่วงเวลาเร่งด่วนตอนเย็นติดอันดับ 11 ของโลก และอันดับ 1 ของเอเชียในช่วง พ.ศ. 2559-2560 ที่ผ่านมา (Fernquest J., 2017)

เนื่องจากพื้นที่กรุงเทพมหานครเป็นพื้นที่ที่มีกิจกรรมต่างๆ กระจุกตัวกันอย่างหนาแน่น อีกทั้งผิวถนนที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่สามารถรองรับอุปสงค์การเดินทางได้ทั้งหมด การเพิ่มระบบขนส่งมวลชนอื่นที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงนับเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาคความแออัดดังกล่าวได้ดี โดยระบบขนส่งมวลชนที่เหมาะสมที่สุดในการแก้ไขปัญหานี้ คือ ระบบขนส่งมวลชนทางราง เนื่องจากระบบดังกล่าวมีแนวเส้นทางที่ไม่ทับซ้อนกันกับระบบการคมนาคมในรูปแบบอื่น (พนิต ภูจินดา, 2556)

ปัจจุบันรัฐบาลไทยได้ให้ความสำคัญและมุ่งเน้นการพัฒนาาระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตเมืองเป็นอย่างมาก เนื่องจากการขนส่งด้วยระบบดังกล่าวให้ผลประโยชน์สูงทั้งในด้านสังคม สิ่งแวดล้อม และเศรษฐกิจ (Litman T., 2005) ตามแผนแม่บทพัฒนาเครือข่ายคมนาคมทางรางระยะ 20 ปี (พ.ศ.2553-2572) เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจะมีเส้นทางเพิ่มขึ้นเป็น 12 สายหลัก และ 2 เส้นทางย่อย มีจำนวนสถานีรวม 285 สถานี หรือคิดเป็นระยะทางรวม 508 กิโลเมตร จากปัจจุบันที่มีรถไฟฟ้า (พ.ศ. 2560) เพียง 4 สาย มีจำนวนสถานี 72 สถานี ซึ่งคิดเป็นระยะทางรวมเพียง 108 กิโลเมตรเท่านั้น การขยายตัวดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นถึง 4 เท่าในมุมมองของจำนวนสถานี และ 4.7 เท่าในมุมมองของระยะทางรวมภายในระยะเวลาเพียง 12 ปี นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดการก่อสร้างในปี พ.ศ. 2572 ระบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครจะเป็นหนึ่งในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในเมืองที่มีขนาดใหญ่ 1 ใน 5 ของโลกอีกด้วย (รูปที่ 1.1

แสดงแผนผังแนวเส้นทางของเส้นทางของการเดินรถในอนาคต, สำนักนโยบายแผนการขนส่งและจราจร, 2553)



รูปที่ 1.1 แผนผังแนวเส้นทางเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2572

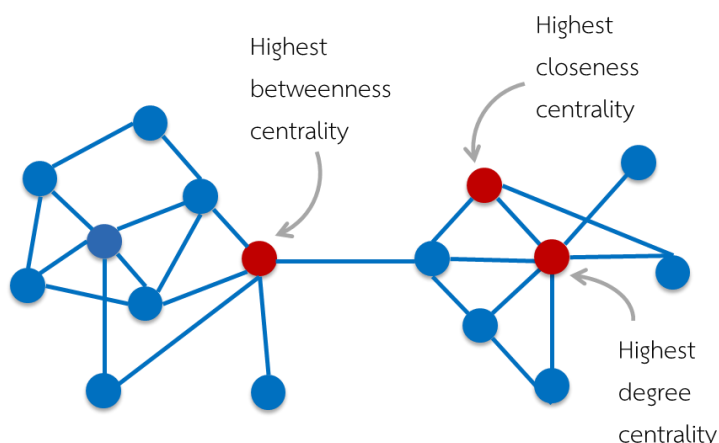
การขยายของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นการเพิ่มเส้นทางส่วนต่อขยายทีละลำดับ ซึ่งลำดับดังกล่าวมีผลต่อรูปแบบของผังเมืองจากการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เกิดขึ้นตามแนวเส้นทาง การต่อขยาย (กรมโยธาธิการและผังเมือง, 2556) และจำนวนผู้ใช้บริการในแต่ละช่วงของการขยาย (พนิต ภูจันดา, 2556) จึงมีหลากหลายงานวิจัยวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการพัฒนาบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง อาทิเช่น งานวิจัยผลกระทบของการเปิดใช้สถานีรถไฟฟ้าใต้ดินบางซื่อที่มีต่อชุมชนพื้นที่โดยรอบ โดยพบว่า การเปิดใช้สถานีบางซื่อส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของที่อยู่อาศัยเล็กน้อย และราคาที่ดินมีแนวโน้มสูงขึ้น (วิสิพร พจนะวาที, 2549) หรืองานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อที่อยู่อาศัยกับการเปิดให้บริการรถไฟฟ้าสายสีม่วง (สุทธิพัฒน์ พุฒิเลพงษ์, 2554) ทั้งสองงานวิจัยข้างต้นใช้วิธีการสำรวจและสุ่มเก็บตัวอย่างผู้พักอาศัยบนพื้นที่โดยรอบ

อย่างไรก็ดี Cast O. (2017) ได้เสนอว่าการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบเครือข่ายควรวิเคราะห์ในแบบองค์รวมมากกว่าการศึกษาคราวละบริเวณ หรือคราวละเส้นทาง เพราะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณหนึ่งๆ ย่อมมาจากการเปลี่ยนแปลงของสถานีอื่นร่วมด้วย ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทาง

วางในเมืองต่างๆ ผ่านทฤษฎีเครือข่ายซับซ้อน (Complex Network Theory) เช่น เครือข่ายรถไฟใต้ดินเมือง Guanzung (Zhu L., et al., 2016) เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางเมือง Stockhome ประเทศสวีเดน (Cats O., 2017) และเครือข่ายรถไฟเมือง Kualalumpur ประเทศมาเลเซีย (Rui D. et al., 2015) โดยมีการกำหนดให้จุดที่มีการเชื่อมต่อเป็นสมาชิก (Node) ของเครือข่าย และกำหนดให้ความสัมพันธ์ของสมาชิกที่อยู่ประชิดกันเป็นเส้นเชื่อม (Edge) (Ahmad K. N. et al., 2009) การสร้างเครือข่ายในลักษณะดังกล่าวส่งผลให้เราสามารถศึกษารูปแบบของเครือข่ายที่มีความซับซ้อนในแบบองค์รวมได้ อีกทั้งยังสามารถแสดงผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลขเชิงปริมาณได้อีกด้วย ด้วยเหตุดังกล่าวผู้วิจัยจึงเลือกใช้ทฤษฎีข้างต้นในการศึกษาปรากฏการณ์บนเครือข่ายที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครตามลำดับการพัฒนา

สิ่งที่อธิบายปรากฏการณ์บนเครือข่ายออกมาเป็นตัวเลขเชิงปริมาณจะถูกเรียกว่า ตัวชี้วัดเครือข่าย (Network Indicators) (Lü et al., 2016) ซึ่งตัวชี้วัดเครือข่ายมีหลายชนิด และตัวชี้วัดแต่ละชนิดจะมีความหมายแตกต่างกัน โดยทั่วไปแล้วตัวชี้วัดเครือข่ายมักถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับตามระดับการวิเคราะห์ คือ ระดับเครือข่าย และระดับสมาชิก ตัวชี้วัดระดับเครือข่ายจะให้ค่าตัวเลขออกมาเพียงหนึ่งค่าต่อหนึ่งเครือข่าย ซึ่งแสดงลักษณะของเครือข่ายโดยภาพรวม ส่วนตัวชี้วัดระดับสมาชิกจะให้ค่าตัวเลขออกมาตามจำนวนสมาชิกบนเครือข่าย เพื่อบ่งบอกค่าความสามารถเป็นรายสมาชิก ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวชี้วัดทั้งหมด 7 ชนิด ซึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับเครือข่าย 3 ชนิด และตัวชี้วัดระดับสมาชิก 4 ชนิด

ตัวชี้วัดเครือข่ายระดับสมาชิก หรือบางงานวิจัยเรียกว่า ค่าความเป็นศูนย์กลาง (Centrality) มักถูกนำไปใช้เพื่อบ่งบอกความสำคัญของแต่ละสมาชิกที่มีต่อเครือข่าย โดยค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดจะสะท้อนความสำคัญของความเป็นศูนย์กลางที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree จะสะท้อนความสำคัญของสมาชิกในการเป็นตัวกลางการเชื่อมต่อกับสมาชิกที่อยู่ประชิดกัน ในขณะที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness จะสะท้อนความสำคัญของสมาชิกในการรับภาระข้อมูล ส่วนค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness จะสะท้อนความสำคัญของสมาชิกในการส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ในบริบทของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง การวิเคราะห์ค่าความเป็นศูนย์กลางจะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของแต่ละสถานีที่มีต่อเครือข่ายทั้งหมด โดยค่าความเป็นศูนย์กลางสามารถนำเสนอได้ในรูปแบบของแผนผังความเข้มข้นตามพิกัด (intensity map) ซึ่งจะทำให้มองเห็นการกระจายความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลางของสถานีต่างๆ บนเครือข่ายได้ชัดเจนมากขึ้น (Barthélemy M., 2011) รูป 1.2 แสดงสมาชิกที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางสูงสุดทั้ง 3 ชนิดบนเครือข่ายตัวอย่าง

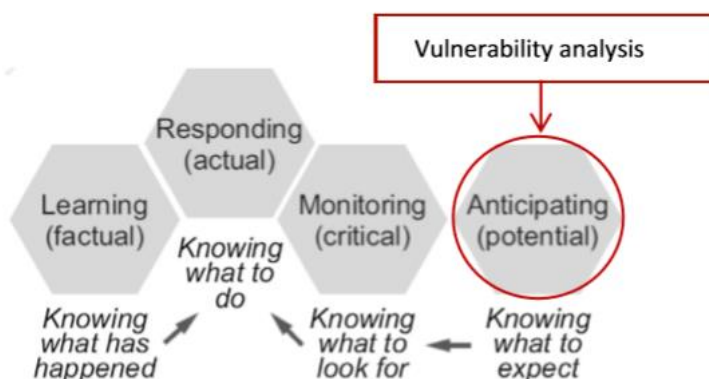


รูปที่ 1.2 เครือข่ายตัวอย่างพร้อมแสดงสมาชิกที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางสูงสุด

ผลจากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์ผ่านตัวชี้วัดเครือข่าย จะทำให้เรามองเห็นถึงความสัมพันธ์ของรูปแบบการขยายเครือข่ายและปรากฏการณ์ที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนสามารถนำไปต่อยอดเพื่อศึกษาการเลือกส่วนต่อขยายเครือข่าย รวมถึงการบริการจัดการสถานีในอนาคตได้ (Cats O., 2017)

ในประเด็นดังกล่าว Hollnagel (2011) ได้เสนอแผนภาพขั้นตอนการเสริมสร้างความแข็งแกร่ง (robustness) หรือความยืดหยุ่น (resilience) ให้กับเครือข่ายโดยทั่วไป (รูปที่ 1.3) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

- Anticipating เป็นขั้นตอนการระบุดูจุดอ่อนบนเครือข่ายที่มีความสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่ส่งผลกระทบต่อเครือข่ายมากเมื่อถูกรบกวน (knowing what to expect)
- Monitoring เป็นขั้นตอนการติดตามผลกระทบที่เกิดขึ้นในจุดตำแหน่งที่ถูกรบกวน (knowing what to look for)
- Learning เป็นการศึกษาเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อเครือข่ายถูกรบกวน (knowing what has happened)
- Responding เป็นการนำข้อมูลทั้งหมดจาก 3 ขั้นตอนก่อนหน้ามาประยุกต์ใช้ ซึ่งจะช่วยให้เราทราบว่าควรบริหารจัดการเครือข่ายอย่างไร (knowing what to do)



รูปที่ 1.3 แผนภาพการเสริมสร้างความแข็งแกร่งของเครือข่าย

จากแผนภาพของ Hollagel เราสามารถสรุปได้ว่า ขั้นตอนของการระบุจุดอ่อนบนเครือข่าย (Vulnerability Analysis) เป็นขั้นตอนแรกของการบริหารจัดการเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะนำไปสู่การเสริมสร้างความยืดหยุ่นและความแข็งแกร่งให้กับเครือข่าย ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นหาจุดดังกล่าว เพื่อป้องกันบริเวณที่เป็นจุดอ่อนของเครือข่ายไม่ให้ถูกรบกวน

เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางสามารถถูกรบกวนได้จากหลายสาเหตุ เช่น การถูกรบกวนจากระบบส่งสัญญาณขัดข้อง การถูกรบกวนจากปัญหาทางเทคนิค การถูกรบกวนจากปัญหาสภาพอากาศ (Daniel S. et al., 2015) การรบกวนดังกล่าวอาจส่งผลทำให้ผู้โดยสารไม่สามารถเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางในเส้นทางเดิมได้ นอกจากนี้การติดขัดของระบบการเดินรถที่ต่อเนื่องกันในแต่ละสถานีอาจนำไปสู่ประสิทธิภาพการเดินทางที่ต่ำลงด้วย

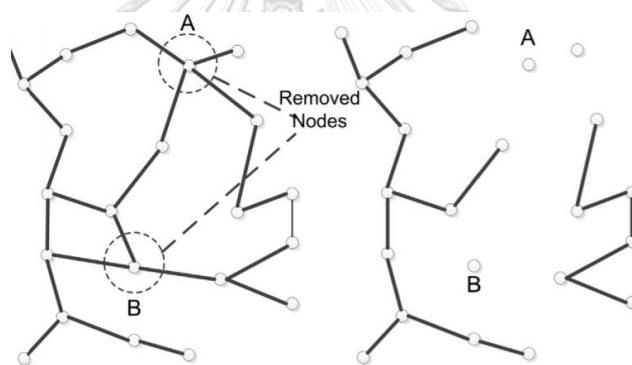
สำหรับเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของกรุงเทพมหานครนั้น เกิดเหตุการณ์ที่เครือข่ายถูกรบกวนอยู่บ่อยครั้ง เช่น เหตุการณ์สถานีสนามกีฬาแห่งชาติเกิดขัดข้องที่จุดสับรางทำให้ขบวนรถไฟฟ้าที่เข้าสถานีสนามกีฬาแห่งชาติไม่สามารถย้อนขบวนกลับมายังสถานีสยามได้ (3 พฤศจิกายน 2553) เหตุการณ์รถไฟฟ้าใต้ดินชนกันที่สถานีศูนย์วัฒนธรรมทำให้ผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บ (17 มกราคม 2548) เหตุการณ์รถไฟเสีย 1 ขบวนทำให้ผู้โดยสารตกค้างที่สถานีบางซื่อจำนวนมาก (2 ตุลาคม 2558) เหตุการณ์รถไฟแอร์พอร์ตเรลลิงค์ขัดข้องจากระบบจ่ายไฟที่สถานีรามคำแหง ทำให้ผู้โดยสารติดอยู่ภายในรถนาน 30 นาทีแบบไม่มีอากาศหายใจ (21 มีนาคม 2559) และเหตุการณ์อื่นๆ อีกกว่า 10 เหตุการณ์ (ฐานเศรษฐกิจ, 2559) อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมยังไม่พบงานวิจัยที่ระบุจุดอ่อน หรือระบุความสำคัญของสถานีบนเครือข่ายดังกล่าว

ในทางทฤษฎี เราสามารถใช้การเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิก เพื่อช่วยในการระบุสมาชิกที่ควรได้รับการป้องกันจากการถูกรบกวนได้ แต่เนื่องจากค่าความเป็นศูนย์กลางมีหลายชนิด

จึงมีการศึกษาเพื่อทดสอบว่าค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดเหมาะแก่การใช้เรียงลำดับสมาชิกที่ควรได้รับการป้องกันมากที่สุด โดยการศึกษาในมุมมองดังกล่าวมักถูกดำเนินการใน 2 ทิศทาง คือ

- เพื่อระบุความสำคัญของสมาชิกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่าย
- เพื่อระบุความสำคัญของสมาชิกที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบต่อเครือข่าย

การระบุความสำคัญของสมาชิกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครือข่าย มีแนวคิดมาจากการถูกรบกวนของเครือข่าย 2 รูปแบบ คือ การรบกวนเส้นเชื่อมต่อ และการรบกวนสมาชิกเครือข่าย (Florian K., 2005) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เครือข่ายระบบขนส่งมวลชนทางรางส่วนมากมักใช้รูปแบบการรบกวนสมาชิกเครือข่าย โดยให้สมาชิกเครือข่ายดังกล่าว (สถานี) ถูกรบกวนโดยการปิดการเชื่อมต่อสถานี แล้วพิจารณาถึงประสิทธิภาพของการเดินทางที่ลดต่ำลง การทดสอบรูปแบบดังกล่าวมักถูกอ้างถึงในชื่อ “การทดสอบความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย” (รูปที่ 1.4 แสดงการรบกวนเครือข่ายโดยการปิดการเชื่อมต่อสถานี)

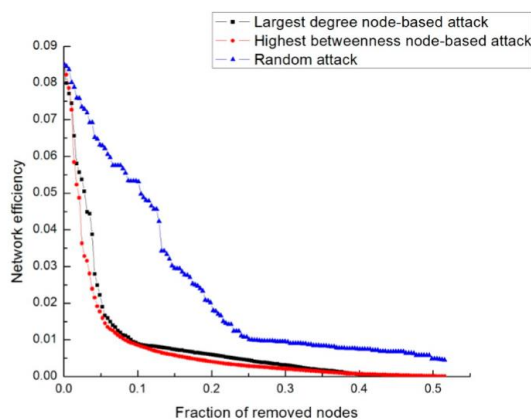


รูปที่ 1.4 การรบกวนเครือข่ายโดยการปิดการเชื่อมต่อสถานี

ในการระบุว่าค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดเหมาะสมกับการเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกมากที่สุดนั้น ได้มีการนำแนวคิดการเลือกปิดการเชื่อมต่อสมาชิกแบบเรียงลำดับตามความสำคัญจากมากไปน้อย เพื่อพิจารณาหาเหตุการณ์ที่เลวร้ายที่สุดที่เป็นไปได้ (Worst-Case Scenario) ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมเครือข่าย (Reggiani N. et al., 2015)

การทดสอบประสิทธิภาพเครือข่ายโดยการเรียงลำดับนี้สามารถทำได้โดยพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟของประสิทธิภาพเครือข่าย โดยถ้าพื้นที่ใต้กราฟของประสิทธิภาพเครือข่ายตามการเรียงลำดับแบบใดมีค่าน้อย แสดงว่าการเรียงลำดับนั้นมีความเหมาะสมในการเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกในเครือข่ายมากที่สุด รูปที่ 1.5 แสดงกราฟการลดลงของประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อจำลองการรบกวนแบบเรียงลำดับค่าความเป็นศูนย์กลางตาม Degree และ Betweenness ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในประเทศจีน (Daniel J. S. et al., 2015) การรบกวนดังกล่าวเกิดจากการตั้งสถานีออกเป็น

จำนวน 50% ของสถานีโดยสารทั้งหมด ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness จะบ่งบอกถึงความสำคัญของประสิทธิภาพเชิงเครือข่ายโดยรวมได้ดีกว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree



รูปที่ 1.5 การลดลงของประสิทธิภาพเครือข่ายเมื่อจำลองการรบกวนแบบเรียงลำดับค่าความเป็นศูนย์กลางระหว่าง Degree และ Betweenness ในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในประเทศจีน

การระบุความสำคัญของสมาชิกที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ มีแนวคิดมาจากแบบจำลองการแพร่กระจายของโรคระบาด ซึ่งมักถูกนำไปใช้เพื่อระบุสมาชิกที่เป็นจุดแพร่กระจายของเชื้อโรคแบบจำลองดังกล่าวถูกนำไปใช้ในหลากหลายเครือข่ายที่คำนึงถึงการแพร่กระจายผลกระทบจากการถูกรบกวน รวมไปถึงเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง โดย Zhou และคณะ (2015) กล่าวว่า การที่สถานีหนึ่งๆ ถูกรบกวนจะส่งผลกระทบต่อไปยังสถานีอื่นๆ ได้ เพราะแต่ละสถานีเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย เปรียบได้กับการแพร่ระบาดของโรคติดต่อที่สามารถติดต่อกันไปเรื่อยๆ ทั้งนี้แบบจำลอง SIR (Susceptible-infected-Recovery) เป็นหนึ่งในแบบจำลองที่มักถูกนำไปใช้ในการประเมินสถานีที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ โดย Yang และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการแพร่กระจายผลกระทบบนเครือข่าย Amazon ซึ่งเป็นเครือข่ายการซื้อขายผลิตภัณฑ์ผ่านเว็บไซต์ โดยพบว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness สามารถบ่งบอกการแพร่กระจายผลกระทบได้ดีที่สุด ส่วน Bimal และคณะ (2009) สรุปว่าค่าความเป็นศูนย์กลางที่บ่งบอกการแพร่กระจายผลกระทบบนเครือข่าย Facebook ได้ดีที่สุด คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

เนื่องจากผู้วิจัยประสงค์ที่จะระบุการเรียงลำดับสถานีที่มีความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการบริหารจัดการสถานี โดยจะทำการพัฒนาตัวชี้วัดสำหรับการเรียงลำดับความสำคัญใหม่ขึ้น แต่จะไม่ใช้การเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่ง เนื่องจากการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่ง

อาจทำให้เกิดความซ้ำซ้อนในการเรียงลำดับ กล่าวคือ เมื่อเรียงลำดับแล้วอาจมีหลายสถานีที่มีค่าความสำคัญลำดับเดียวกัน ซึ่งอาจไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียงลำดับได้อย่างแท้จริง

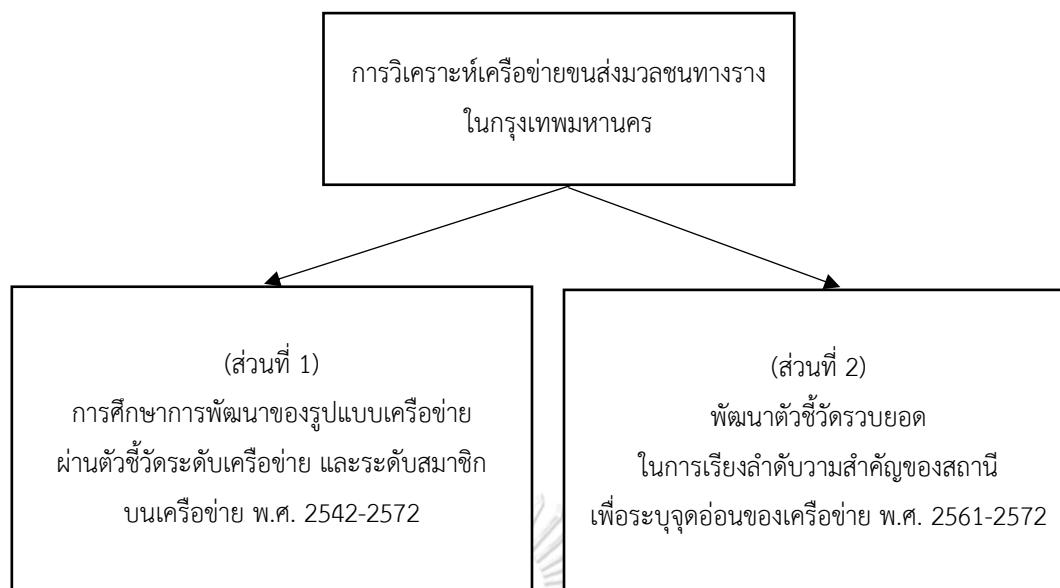
ตัวอย่างเช่น ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2542 มีเพียงแค่ 3 ค่า คือ 1 2 และ 4 ซึ่งจำนวนสถานีที่มีค่าดังกล่าวมีมากถึง 4 18 และ 1 สถานี ตามลำดับ

ตารางที่ 1.1 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542

เครือข่าย พ.ศ. 2542	ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (DC)		
	DC = 1	DC = 2	DC = 4
จำนวนสถานี	4	18	1

จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ที่ซ้ำกันค่อนข้างมาก โดยเฉพาะที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree เท่ากับ 2 ทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียงลำดับได้อย่างแท้จริง งานวิจัยนี้จะทำการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางทั้ง 4 ชนิด เพื่อสร้างตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอดขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่มีการพัฒนาตัวชี้วัดในลักษณะดังกล่าวขึ้น Yuhao Y. และคณะ (2015) ได้พัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดด้านประสิทธิภาพเครือข่ายของเครือข่ายรถไฟใต้ดินเมือง Beijing โดยให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลาง 2 ชนิดคือ Degree และ Betweenness Yuhao Y. และคณะ (2015) พบว่าที่น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ Betweenness เท่ากับ 0.6 และ 0.4 แล้วจะทำให้ค่าประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวมลดลงมากที่สุด

จากการศึกษาข้างต้น ภาพรวมของงานวิจัยการวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครนี้ จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (รูปที่ 1.6) คือ ส่วนที่ 1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปรากฏการณ์บนเครือข่ายตามช่วงเวลาการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร จากอดีตจนถึง พ.ศ. 2572 รวมเป็นระยะเวลา 31 ปี ผ่านตัวชี้วัดเครือข่ายทั้งระดับเครือข่าย และระดับสมาชิก จำนวน 7 ชนิด สำหรับส่วนที่ 2 ผู้วิจัยจะทำการพัฒนาตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอดขึ้น เพื่อใช้เรียงลำดับความสำคัญของสถานีในมุมมองประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม และในมุมมองจุดแพร่กระจายผลกระทบ ผ่านการทดสอบความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย และแบบจำลอง SIR ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการค้นหาและระบุตำแหน่งสถานีที่มีความสำคัญของเครือข่าย เพื่อบริหารจัดการสถานีต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1.6 สรุปภาพรวมของงานวิจัย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของกรุงเทพมหานคร ตามช่วงการพัฒนา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปี พ.ศ. 2572 โดยอ้างอิงจากกำหนดการเปิดให้บริการจริงผ่านตัวชี้วัดเครือข่ายแบบต่างๆ
2. พัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดในการเรียงลำดับสถานีที่มีความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม และระบุสถานีที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ ผ่านการทดสอบความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม และแบบจำลอง SIR บนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของกรุงเทพมหานครในอนาคต (พ.ศ. 2561-2572)

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ระบุที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัยและสมมติฐาน
3. รวบรวมข้อมูลที่เป็นในการคำนวณ
4. คำนวณตัวชี้วัดในการวิเคราะห์เครือข่าย
5. วิเคราะห์ และอภิปรายผลจากการคำนวณตัวชี้วัดเครือข่าย
6. คำนวณตัวชี้วัดการให้ความสำคัญรวบยอด
7. วิเคราะห์ และอภิปรายผลจากการคำนวณตัวชี้วัดรวบยอด
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาปรากฏการณ์บนเครือข่ายเป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีเครือข่าย ซึ่งเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางมีจำนวนสมาชิกและจำนวนเส้นเป็นเชื่อมจำนวนมาก ดังนั้นเราอาจนับว่าเครือข่ายดังกล่าวเป็นเครือข่ายซับซ้อน (Complex Network) ได้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครือข่ายซับซ้อนส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ Degree ของสมาชิกบนเครือข่าย เพื่อแบ่งประเภทของเครือข่ายตามลักษณะการเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตาม การศึกษาปรากฏการณ์บนเครือข่ายสามารถพิจารณาได้จากตัวชี้วัดอื่นอีกหลายชนิด ซึ่งสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย (Network Level) และ ตัวชี้วัดระดับสมาชิก (Node Level) ตัวชี้วัดระดับเครือข่ายเป็นตัวชี้วัดที่ใช้บ่งบอกลักษณะของเครือข่ายในภาพรวม ส่วนตัวชี้วัดระดับสมาชิกให้ความสำคัญกับสมาชิกในเครือข่าย โดยมีความหมายที่แตกต่างกันออกไป

ในทางทฤษฎีตัวชี้วัดระดับสมาชิกมักถูกเรียกว่า ค่าความเป็นศูนย์กลาง (Centrality) โดยค่าดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อบ่งบอกความสำคัญของสมาชิกและนำไปใช้ในการเรียงลำดับสมาชิกที่ควรได้รับการป้องกันบนเครือข่ายมากที่สุด ซึ่งเราจะทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม และวิธีวิเคราะห์การแพร่กระจายผลกระทบ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมทฤษฎีดังกล่าวในมุมมองของระบบขนส่งมวลชนเป็นหลัก

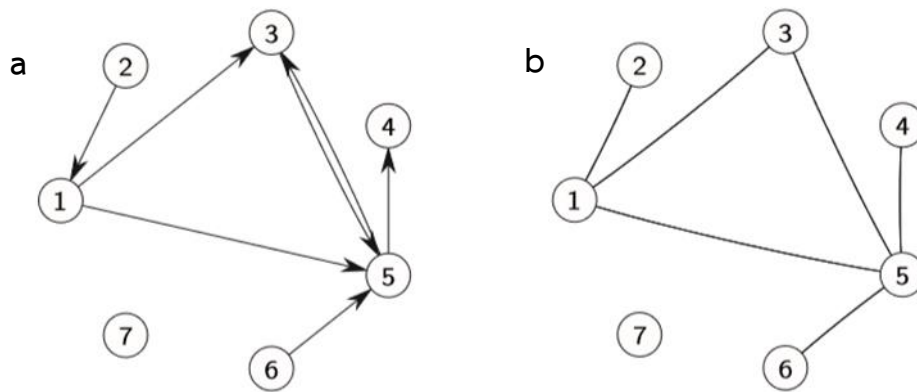
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1 ทฤษฎีเครือข่าย

คำว่าเครือข่าย (Graph or Network) ในทฤษฎีเครือข่ายถูกสร้างขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์หรือแก้ปัญหาบนเครือข่ายที่ต้องการ โดยกำหนดให้เครือข่ายมีสมาชิก (node) และเส้นเชื่อมระหว่างสมาชิก (edge) อาทิเช่น ปัญหาสะพานทั้งเจ็ดของ Euler ซึ่งใช้ทฤษฎีเครือข่ายในการพิสูจน์ว่าเขาสามารถเดินข้ามสะพานทั้งเจ็ดให้ครบ และกลับมาจุดเดิมโดยไม่เดินซ้ำสะพานเดิมได้หรือไม่ โดย Euler ได้กำหนดให้พื้นดินเป็นสมาชิก (node) และ สะพานเป็นเส้นเชื่อม (edge)

ในทฤษฎีเครือข่ายโดยทั่วไปเราจะกำหนดให้เครือข่าย $G=(V,E)$ โดย G คือ การควบคุมของเซตสมาชิก V และเซตของเส้นเชื่อม E โดยที่ $E =\{(i, j) \text{ เมื่อ } i, j \in V\}$

ทั้งนี้เครือข่ายสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ เครือข่ายแบบมีทิศทาง (Directed Graphs or Digraphs) และเครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง (Undirected Graphs) เครือข่ายแบบไม่มีทิศทางเป็นเครือข่ายที่มีน้ำหนักของเส้นทางระหว่างสมาชิก i ไป j เท่ากับน้ำหนักของเส้นทางระหว่างสมาชิก j ไป i เมื่อ i, j คือ คู่สมาชิกในเซต V ทั้งนี้หากมีเส้นทางคู่ใดคู่หนึ่งจาก i ไป j ไม่เท่ากับจาก j ไป i เครือข่ายนั้นจะถือว่าเป็นเครือข่ายแบบมีทิศทาง รูปที่ 2.1 แสดงภาพตัวอย่างเครือข่ายแบบมีทิศทาง (ซ้าย) และแบบไม่มีทิศทาง (ขวา)



รูปที่ 2.1 ประเภทของเครือข่าย

(a) เครือข่ายแบบมีทิศทาง (b) เครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าถึงแม้เซตสมาชิกของทั้งสองเครือข่ายจะเหมือนกัน คือ $V=(1,2,3,4,5,6,7)$ แต่เซตของเส้นเชื่อม E กลับแตกต่างกัน โดย

$$E_a = ((1,3), (1,5), (2,1), (3,5), (5,3), (5,4), (6,5))$$

$$E_b = ((1,2), (1,3), (1,5), (2,1), (3,1), (3,5), (4,5), (5,1), (5,3), (5,4), (5,6), (6,5))$$

สังเกตว่าบนเครือข่ายมีสมาชิกที่ 7 เป็นสมาชิกแยกตัว (Isolated Node) กล่าวคือไม่มีเส้นเชื่อมเส้นใดที่สามารถไปยังสมาชิก 7 ได้ นอกจากนี้เครือข่ายแบบมีทิศทางจะต้องมีหัวลูกศรเพื่อแสดงทิศทางของเส้นทาง ในขณะที่เครือข่ายแบบไม่มีทิศทางนั้นไม่จำเป็นต้องแสดงหัวลูกศรก็ได้

การกำหนดเส้นเชื่อมเป็นเซตคู่อันดับของสมาชิกที่ละคู่ นั้นยากต่อการนำไปใช้ ดังนั้นเราอาจเก็บข้อมูลของเครือข่ายในระบบเมตริกซ์ ที่เรียกว่า เมตริกซ์ประชิด (Adjacency Matrix, A) แทน โดยถ้าระหว่างสมาชิก i และ j มีเส้นทางที่เชื่อมต่อกันโดยตรง a_{ij} จะมีค่าเท่ากับ 1 และหากไม่มีเส้นทางเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างสมาชิก i และ j a_{ij} จะเท่ากับ 0 (สมการ 2-1 แสดงสมการของเมตริกซ์ประชิด)

$$A=a_{ij}=\begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } (i,j) \in E \\ 0 & \text{เมื่อ } (i,j) \notin E \end{cases} \quad (2-1)$$

ตารางที่ 2.1 เมตริกซ์ประชิดของเครือข่ายแบบมีทิศทาง (A_a) และแบบไม่มีทิศทาง (A_b)

A_a	1	2	3	4	5	6	7
1	-	0	1	0	1	0	0
2	1	-	0	0	0	0	0
3	0	0	-	0	1	0	0
4	0	0	0	-	0	0	0
5	0	0	1	1	-	0	0
6	0	0	0	0	1	-	0
7	0	0	0	0	0	0	-

A_b	1	2	3	4	5	6	7
1	-	1	1	0	1	0	0
2	1	-	0	0	0	0	0
3	1	0	-	0	1	0	0
4	0	0	0	-	1	0	0
5	1	0	1	1	-	1	0
6	0	0	0	0	1	-	0
7	0	0	0	0	0	0	-

ตารางที่ 2.1 แสดงเมตริกซ์ประชิดของเครือข่ายตัวอย่าง ในรูปที่ 2.1 (หน้า 13) จะเห็นได้ว่า เมตริกซ์ประชิดของเครือข่ายแบบไม่มีทิศทางจะเป็นเมตริกซ์แบบสมมาตร (Symmetric Matrix) นั่นคือ ครึ่งแนวทแยงมุมด้านบนขวา จะสมมาตรกับครึ่งแนวทแยงมุมด้านล่างซ้าย งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางแบบให้น้ำหนักเส้นเชื่อมโดยใช้ระยะทาง จึงจัดเครือข่ายดังกล่าวอยู่ในประเภทเครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง

2.2 ตัวชี้วัดเครือข่ายซับซ้อน

เมื่อเครือข่ายมีจำนวนสมาชิกและจำนวนเส้นเชื่อมเป็นจำนวนมาก จะทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ ทั้งในการศึกษารูปแบบเครือข่าย และการระบุความสำคัญของสมาชิกบนเครือข่าย เราจะถือว่าเครือข่ายที่มีจำนวนสมาชิกและจำนวนเส้นเชื่อมมากเป็นเครือข่ายซับซ้อน (Complex Network) ซึ่งจำเป็นต้องมีตัวชี้วัดเครือข่าย (Network Indicators) เพื่อใช้ในการอธิบายเครือข่ายออกมาเป็นค่าเชิงปริมาณ

ตัวชี้วัดเครือข่ายซับซ้อนแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มตามระดับการวิเคราะห์ คือ ตัวชี้วัดระดับสมาชิก และ ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย 3 ชนิด และตัวชี้วัดระดับสมาชิก 4 ชนิดที่แตกต่างกันออกไปได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network Diameter) ดัชนีแกมมา (Gamma Index) เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย (Network Standard Entropy) ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Degree Centrality) ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Eigenvector

(Eigenvector Centrality) ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness (Closeness Centrality) และค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Betweenness Centrality)

2.2.1 ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย

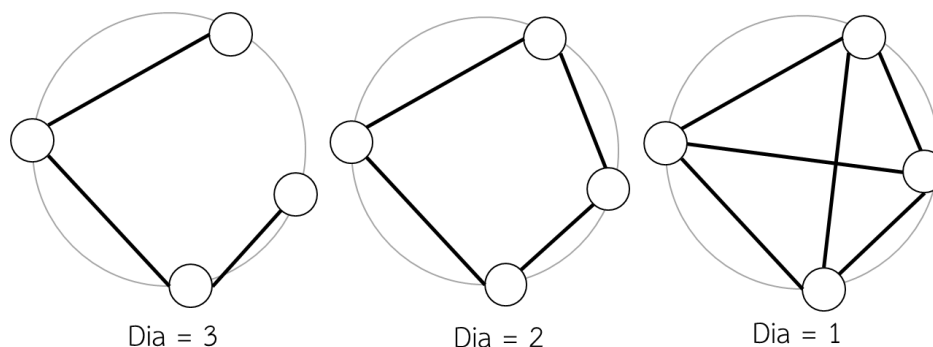
ตัวชี้วัดระดับเครือข่ายเป็นตัวชี้วัดที่ใช้ในการบ่งบอกคุณสมบัติของเครือข่าย ซึ่งมีจุดเริ่มต้นมาจากความต้องการหาค่าเชิงปริมาณในการเปรียบเทียบลักษณะของเครือข่ายที่แตกต่างกัน บางงานวิจัยมักเรียกตัวชี้วัดระดับเครือข่ายว่า ค่าลักษณะของเครือข่าย (Characteristic Value of Network) ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมมาทั้งหมด 3 ชนิด คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network Diameter) ดัชนีแกมมา (Gamma Index) และเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย (Network Standard Entropy)

2.2.1.1 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network Diameter, *Dia*) หมายถึง ระยะทางที่ยาวที่สุดของทุกคู่การเดินทางระหว่างสมาชิก *i* และ *j* เมื่อพิจารณาคู่สมาชิกทั้งหมดบนเครือข่ายในเซต *V* ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการกระจายระยะการเดินทางของเครือข่าย ทั้งนี้ค่า *Dia* เป็นตัวชี้วัดอย่างหยาบในการเปรียบเทียบการกระจายขนาดของเครือข่าย (Barthélemy M., 2011) สมการ 2-2 แสดงสมการการคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

$$Dia = \max \{ d_{ij} \} \quad \forall i, j \in V \quad (2-2)$$

เมื่อ d_{ij} คือ ระยะทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) จากสมาชิก *i* ไปยังสมาชิก *j* ทั้งนี้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่ายไม่ได้หมายถึงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของพื้นที่วงกลมระหว่างสมาชิกที่อยู่ใกล้กันที่สุด รูปที่ 2.2 แสดงเครือข่ายตัวอย่างที่อยู่ในพื้นที่วงกลมรัศมีเท่ากัน แต่กลับมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เท่ากัน (เมื่อกำหนดให้ระยะทางของเส้นเชื่อมบนเครือข่ายเท่ากับ 1 ทั้งหมด)



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

2.2.1.2 ดัชนีแกมมา

ดัชนีสำหรับวิเคราะห์เครือข่ายเชิงปริมาณเริ่มถูกนำเสนอในปี 1960 (Peter H., et al., 1972) โดยส่วนใหญ่เป็นดัชนีที่ไม่ซับซ้อนแต่มีคุณค่าต่อการวิเคราะห์รูปแบบของเครือข่าย และถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เครือข่ายขนส่งมวลชนอย่างหลากหลาย ยกตัวอย่างเช่น William G. (1960) ใช้ดัชนีแกมมา (Gamma Index, γ) ในการพิจารณาคูสมบัติของเครือข่ายทางหลวงระหว่างรัฐ เพื่อระบุความสามารถในการเข้าถึงเครือข่าย (Connectivity) ดังกล่าว สมการที่ 2-3 แสดงสมการในการคำนวณดัชนีแกมมา

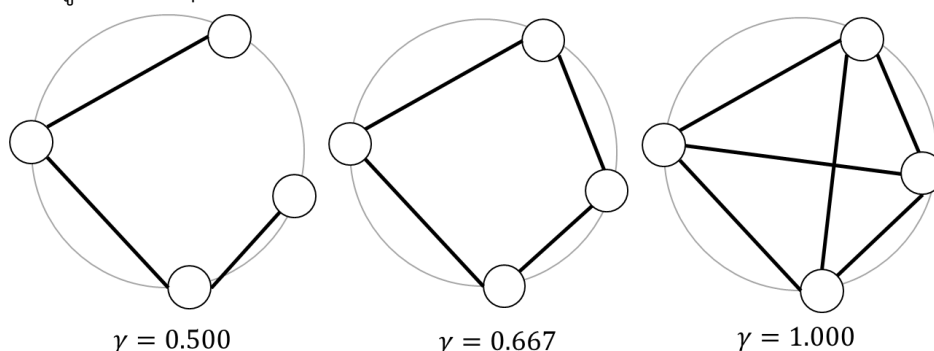
$$\gamma = \frac{M}{E_{max}} \quad (2-3)$$

โดย M คือ จำนวนเส้นเชื่อม และ E_{max} คือ จำนวนเส้นเชื่อมที่มากที่สุด แนวคิดของดัชนีแกมมาอยู่บนพื้นฐานของสัดส่วนระหว่างเส้นเชื่อม โดยเครือข่ายใดมีสัดส่วนของเส้นเชื่อมระหว่างสมาชิกต่อเส้นเชื่อมที่เป็นไปได้มากก็จะมีค่าดัชนีแกมมาตามไปด้วย ทั้งนี้เครือข่ายที่มีดัชนีแกมมาสูงจะแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเข้าถึงเครือข่ายได้มาก

สำหรับเครือข่ายที่ไม่ระนาบ (Non-Planar Network) E_{max} จะเท่ากับ $N(N-1)/2$ ในขณะที่เครือข่ายระนาบ (Planar Network) E_{max} จะมีค่า $3N-6$ ส่งผลให้สามารถเขียนสมการ 2-3 ด้วยสมการ 2-4 สำหรับเครือข่ายระนาบ

$$\gamma = \frac{M}{3N-6} \quad (2-4)$$

ดัชนีแกมมาเป็นตัวชี้วัดอย่างง่ายที่สามารถใช้วัดความหนาแน่นของเครือข่ายผ่านการนับจำนวนเส้นเชื่อมระหว่างสมาชิก รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของค่าดัชนีแกมมาบนเครือข่ายขนาดเล็ก ซึ่งพบว่าค่าดัชนีจะเพิ่มขึ้นถ้าหากจำนวนเส้นเชื่อมเพิ่มขึ้น และหากดัชนีแกมมามีค่าเท่ากับ 1.0 จะหมายความว่าทุกสมาชิกสามารถเข้าถึงกันได้โดยตรง เราจะเรียกเครือข่ายในลักษณะดังกล่าวว่าเครือข่ายสมบูรณ์ (Complete Network)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างค่าดัชนีแกมมา

2.2.1.3 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย

เอนโทรปี (Entropy) แสดงถึงอันดับความไม่เป็นระเบียบของระบบ ความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) ของระบบหมายความว่า ในแต่ละสมาชิกของเครือข่ายมีการเชื่อมต่อแบบสุ่ม (Random Connected) และเราเรียกเครือข่ายในลักษณะดังกล่าวว่า เครือข่ายสุ่ม (Random Network) ในขณะเดียวกันเครือข่ายที่มีความเป็นระเบียบ (Order) หมายถึง เครือข่ายที่มีสมาชิกจำนวนหนึ่งเป็นสมาชิกหลัก (Core Node) และมีสมาชิกส่วนใหญ่เป็นสมาชิกต่อพ่วง (Peripheral Node) เราเรียกเครือข่ายลักษณะที่มีระเบียบดังกล่าวว่า เครือข่ายขนาดอิสระ (Scale-Free Network)

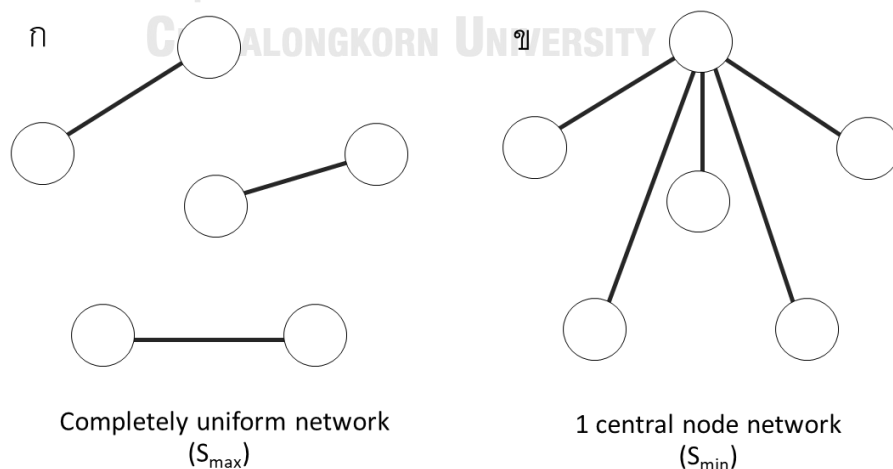
เอนโทรปีของเครือข่าย สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_s = -2 \sum_{i=1}^N l_i \ln l_i \quad (2-5)$$

เมื่อ l_i คือ ความสำคัญเชิง degree ของสมาชิก i โดย $l_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i}$ เมื่อ k_i คือ จำนวนสมาชิกเชื่อมต่อทางตรง หรือค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสมาชิก i (หัวข้อ 2.2.2.1)

ในสมการของค่าเอนโทรปีมาตรฐานจะมีการปรับค่าให้เป็นมาตรฐาน ด้วยการหารด้วยค่าเอนโทรปีของเครือข่ายสุ่มสมบูรณ์ (Completely Uniform) (รูปที่ 2.4ก) กล่าวคือ ความสำคัญของ degree ในทุกสมาชิกเท่ากับ $1/N$ ซึ่งจะให้ได้ค่าเอนโทรปีที่สามารถเป็นไปได้มากที่สุด ดังนี้

$$E_{\max} = -2 \left(\frac{1}{N} \ln \frac{1}{N} \right) \times N = \ln(N^2) \quad (2-6)$$



รูปที่ 2.4 (ก) เครือข่ายสุ่มสมบูรณ์ และ (ข) เครือข่ายที่มีหนึ่งสมาชิกศูนย์กลาง

เมื่อทุกสมาชิกในเครือข่ายเชื่อมต่อกับสมาชิกศูนย์กลาง (Central Node) ทั้งหมด หรือ ทุกสมาชิกเชื่อมต่อกับสมาชิกตัวใดตัวหนึ่งเพียงสมาชิกเดียว (รูป 2.4ข) $k_i = N-1$ และ $k_j = 1$ เมื่อสมาชิกที่เป็นสมาชิกศูนย์กลาง หมายถึง สมาชิกตัวแรก ($i=1$) และ สมาชิก j คือสมาชิกอื่นๆ ที่ไม่ใช่สมาชิก i จะทำให้ได้ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายที่มีค่าต่ำที่สุด (สมการ 2-7) ดังนี้

$$E_{min} = - \sum_{i=2}^N \frac{1}{2(N-1)} \ln \frac{1}{2(N-1)} - \frac{1}{2} \ln \frac{1}{2} = \ln 4(N-1) \quad (2-7)$$

และจะได้สมการเอนโทรปีมาตรฐาน (S) ดังแสดงในสมการ 2-8

$$S = \frac{E_s - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} = \frac{-2 \sum_{i=1}^N k_i \ln k_i - \ln(4(n-1))}{\ln N^2 - \ln(4(n-1))} \quad (2-8)$$

ทั้งนี้เมื่อทำการปรับค่ามาตรฐานแล้ว จะทำให้ค่าเอนโทรปีมาตรฐานมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

2.2.2 ตัวชี้วัดระดับสมาชิก

สำหรับตัวชี้วัดระดับสมาชิก หรือที่รู้จักกันในชื่อ ค่าความเป็นศูนย์กลาง (Centrality) มีแนวคิดมาจากการตอบคำถามที่ว่า รูปแบบของเครือข่ายส่งผลต่อความสำคัญของสมาชิกอย่างไร ทั้งนี้ค่าความเป็นศูนย์กลางจะถูกแสดงค่าออกมาบนทุกๆ สมาชิกของเครือข่าย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อบ่งบอกความสำคัญของสมาชิกบนเครือข่ายได้ เช่น การระบุผู้มีอิทธิพลใน twitter.com ที่สามารถแพร่กระจายข่าวสารได้อย่างรวดเร็วและกว้างขวาง (Lü et al., 2016)

ความสำคัญของสมาชิกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปแบบของเครือข่าย (Topological Structure) ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับการระบุความสำคัญของสมาชิกในเครือข่ายส่วนใหญ่จึงใช้ข้อมูลจากรูปแบบโครงสร้างของเครือข่ายเพียงเท่านั้น

คำว่า “ความสำคัญ” (Vital or Importance) มีความหมายในหลายแง่มุม จึงมีตัวชี้วัดระดับสมาชิกหลายชนิดเพื่อบอกความสำคัญของสมาชิกในแง่มุมที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าความเป็นศูนย์กลาง 4 ชนิด ในการแสดงความสำคัญของสมาชิกบนเครือข่ายใน 4 มุมมอง คือ

- ความสำคัญด้านการเป็นจุดศูนย์กลางการเชื่อมต่อประชิดกับสมาชิกเพื่อนบ้าน ผ่านค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree
- ความสำคัญด้านการเป็นจุดที่ได้อิทธิพลจากสมาชิกรอบข้าง ผ่านค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

- ความสำคัญด้านการอยู่ในตำแหน่งที่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้รวดเร็ว ผ่านค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness
- ความสำคัญด้านการเป็นจุดที่ต้องรองรับการเดินทางมาก ผ่านค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่วิเคราะห์เครือข่ายระบบขนส่งมวลชนทางราง ซึ่งเป็นเครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง (Undirected Network) ในหัวข้อนี้จึงผู้วิจัยจึงเลือกศึกษาค่าความเป็นศูนย์กลางที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์สำหรับเครือข่ายแบบไม่มีทิศทางเท่านั้น

นอกจากนี้เพื่อให้สามารถสร้างตัวชี้วัดในการวิเคราะห์เครือข่ายได้ เราจำเป็นต้องเก็บข้อมูลของสมาชิกและเส้นทางบนเครือข่ายทั้งหมดก่อน โดยการวิเคราะห์เครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง (Undirected Network) นั้น เราจะกำหนดให้ $G=(V,A)$ เมื่อ V คือ เซ็ตของสมาชิกบนเครือข่าย และ A คือเมตริกซ์ประชิด (Adjacency Matrix, A)

2.2.2.1 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Degree Centrality, DC) เป็นตัวชี้วัดที่ง่ายที่สุดที่ใช้ในการบ่งบอกความสำคัญด้านการเป็นศูนย์กลางการเชื่อมต่อทางตรงกับสมาชิกเพื่อนบ้าน โดยเราจะทำการนับเส้นเชื่อมต่อทางตรงของสมาชิกที่สนใจกับสมาชิกอื่น (หรือนับจำนวนสมาชิกเพื่อนบ้าน) ทั้งนี้เราสามารถคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ผ่านเมตริกซ์ประชิด A ได้จากสมการที่ 2-9

$$DC_i = \sum_{j \in V} a_{ij} \quad (2-9)$$

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากคำนวณได้ง่ายและอธิบายถึงความหมายของค่าความเป็นศูนย์กลางได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ ถ้าหากสมาชิกนั้นเป็นสมาชิกที่มีจำนวนการเชื่อมต่อทางตรงกับสมาชิกเพื่อนบ้านมาก สมาชิกนั้นก็จะมีค่าสำคัญต่อเครือข่ายมากด้วยเช่นกัน

2.2.2.2 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector (Eigenvector Centrality, EC) ถูกพัฒนาขึ้นจากค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ที่มีแนวคิดที่ว่า ความสำคัญของสมาชิกไม่สามารถระบุได้จากจำนวนสมาชิกเพื่อนบ้านเพียงเท่านั้น หากแต่ยังสามารถระบุผ่านความสำคัญของสมาชิกเพื่อนบ้านได้อีกด้วย (Martin T., et al., 2014) Wittenbaum G. และคณะ (1999) เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า การ

เกิดผลกระทบร่วมกัน (Mutual Enhancement Effect) สมการ 2-10 แสดงสมการการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของสมาชิก i ซึ่งหาได้จากสัดส่วนของผลรวมค่าความเป็นศูนย์กลางของสมาชิกเพื่อนบ้านทางตรง (Bonacich P., 2007) เมื่อค่า x_i แทนความสำคัญของสมาชิก i

$$x_i = c \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \quad (2-10)$$

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\vec{x} = cA\vec{x} \quad (2-11)$$

เมื่อ c คือ สัดส่วนของค่าคงที่ โดยทั่วไป $c = \frac{1}{\lambda}$ เมื่อ λ คือ ค่า Eigenvalue ที่มากที่สุดบนเครือข่าย

2.2.2.3 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness (Closeness Centrality, CC) ถูกใช้เพื่อบ่งชี้ความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว (Freeman L.C., 1979) โดยค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของสมาชิก i หาได้จากส่วนกลับของระยะทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางระหว่างสมาชิกที่สนใจไปยังสมาชิกอื่นๆ สมการ 2-12 แสดงการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness โดยในแต่ละการเดินทางจากสมาชิก i ไปยัง j จะปรับค่า (Normalize) ด้วยจำนวนการเชื่อมต่อสมาชิกที่เป็นไปได้มากที่สุด $N(N-1)$ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าดังกล่าวบนเครือข่ายที่ต่างกันได้

$$CC_i = \sum_{j \in V} \frac{N(N-1)}{d_{ij}} \quad (2-12)$$

เมื่อ d_{ij} คือ ระยะทางของเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) จากสมาชิก i ไปยังสมาชิก j และ N คือ จำนวนสมาชิกบนเครือข่าย

จากสมการ 2-12 จะเห็นว่า ยิ่งค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness มาก สมาชิกดังกล่าวก็จะมีมีความสำคัญต่อเครือข่ายมากขึ้นตามไปด้วย (Katz L., 1953) อย่างไรก็ตามสมการที่ 2-3 ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้บนเครือข่ายที่ขาดการเชื่อมต่อ หรือเครือข่ายที่แบ่งตัวออกเป็นเครือข่ายย่อยได้ เนื่องจากสมการคำนวณ 2-12 ส่งผลให้เราจำเป็นต้องกำหนดให้ d_{ij} เป็นค่ามากๆ สำหรับคู่ i, j ที่ขาดการ

เชื่อมต่อ หรือเราอาจปรับสมการ 2-12 ใหม่ โดยใช้สมการ 2-13 ช่วยในการคำนวณ CC กรณีที่เครือข่ายมีการเส้นทางที่แยกออกมา (Isolate)

$$CC_i = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2-13)$$

โดยให้ $d_{ij} = \infty$ เมื่อสมาชิก i และ j ไม่มีเส้นทางที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ ซึ่งส่งผลให้พจน์ของ $1/d_{ij} = 0$ กล่าวคือ เราอาจกำหนดให้ $1/d_{ij} = 0$ เมื่อมีการขาดการเชื่อมต่อระหว่างสมาชิก i และสมาชิก j นอกจากนี้ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness นี้ยังเป็นที่มาของค่าประสิทธิภาพเครือข่ายการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับสมาชิกอื่นบนเครือข่ายอีกด้วย (Zhang J., et al., 2013)

2.2.2.4 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Betweenness Centrality, BC) ถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Bavelas A. (1948) ในมุมมองกำลังของสมาชิกในการควบคุมการส่งผ่านของข้อมูลบนเครือข่าย ต่อมาในปี 1997 Freeman และคณะ (Freeman L. C., et al., 1991) ได้ประยุกต์ใช้ค่าความเป็นศูนย์กลางดังกล่าวในเครือข่ายแบบมีทิศทาง (Directed Network) และเครือข่ายแบบไม่มีทิศทาง (Undirected Network) เพื่อวิเคราะห์การรองรับภาระการเดินทางของสมาชิกบนเครือข่าย

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (BC_i) คำนวณได้จากจำนวนครั้งการเดินทางบนเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างทุกคู่สมาชิกที่ผ่านสมาชิก i ค่าดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ถึงภาระข้อมูลที่สมาชิก i ต้องรับไว้จากทุกคู่การเดินทาง โดยสมการ 2-14 แสดงสมการการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness

$$BC_i = \sum_{s \neq j} \frac{b_{sj}^i}{b_{sj}} \quad (2-14)$$

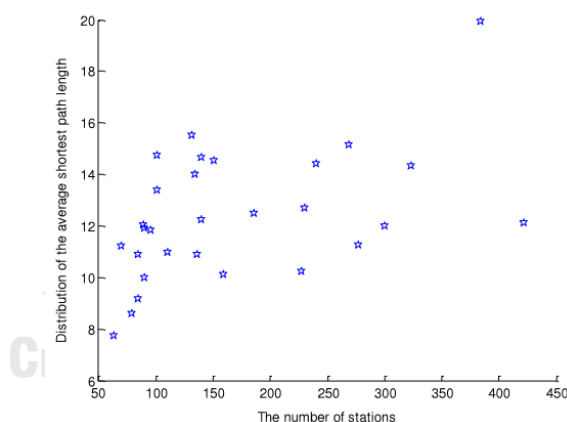
เมื่อ b_{sj} คือ จำนวนเส้นทางที่สั้นที่สุดทั้งหมดจากจากสมาชิก s ไป j และ b_{sj}^i คือ จำนวนเส้นทางที่สั้นที่สุดทั้งหมดจาก s ไป j ที่ผ่านสมาชิก i ถ้าหากค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของสมาชิกใดมีค่าสูงมาก แสดงว่าสมาชิกนั้นมีความสำคัญในการเป็นตัวกลางการส่งผ่านของข้อมูลมากด้วย (Freeman L. C., 1977)

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์รูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชน

การวิเคราะห์เครือข่ายขนส่งมวลชนมักจะพิจารณาในหลากหลายมิติ ทั้งในแง่ความครอบคลุมพื้นที่ การเข้าถึงเครือข่าย และประสิทธิภาพการเชื่อมต่อเครือข่าย โดยมีประเด็นพื้นฐาน

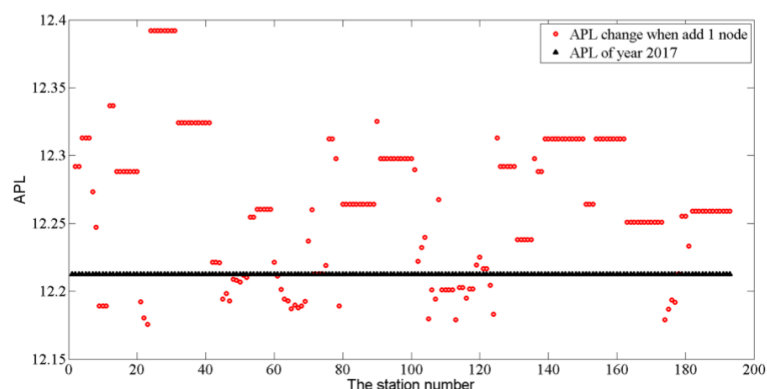
มาจากทฤษฎีเครือข่ายและการวิเคราะห์ข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยที่นำทฤษฎีเครือข่ายมาประยุกต์ใช้กับเครือข่ายการขนส่งมวลชนทั้งบนเครือข่ายถนน (Jenelius E., 2009) เครือข่ายรถไฟ (Wang J., et al., 2009) และเครือข่ายขนส่งสาธารณะ (Derrible S., 2012)

Derrible S. (2012) ได้ศึกษาค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness บนเครือข่ายรถไฟใต้ดินจำนวน 30 เครือข่ายทั่วโลก เพื่อศึกษาแนวโน้มของตัวชี้วัดดังกล่าว งานวิจัยดังกล่าวพบว่าเมื่อเครือข่ายมีจำนวนสมาชิกมากขึ้น ค่าเฉลี่ยความเป็นศูนย์กลาง Betweenness จะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล และการแจกแจงสะสมของค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่จะมีมากกว่าเครือข่ายที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากเครือข่ายขนาดใหญ่มีส่วนที่แต่ละสถานีต้องรองรับภาระการเดินทางทั้งหมดน้อยลง Jianhua z. และคณะ (2013) ศึกษาลักษณะของเครือข่ายรถไฟในเขตเมืองแบบไม่มีน้ำหนัก (Unweighted Network) จำนวน 32 เครือข่ายทั่วโลก พบว่า ค่าเฉลี่ย Degree ของสถานีอยู่ในช่วง [2,2.45] และค่าเฉลี่ยระยะการเดินทาง (Average Path Length) อยู่ในช่วง 10-16 กิโลเมตร รูปที่ 2.5 แสดงกราฟการกระจายของค่าเฉลี่ยระยะการเดินทางที่ Jianhua z. และคณะได้ทำการศึกษา



รูปที่ 2.5 กราฟการกระจายของค่าเฉลี่ยระยะการเดินทางกับจำนวนสถานีของเครือข่ายรถไฟในเขตเมือง จำนวน 32 เครือข่าย (Jianhua Z. et al., 2013)

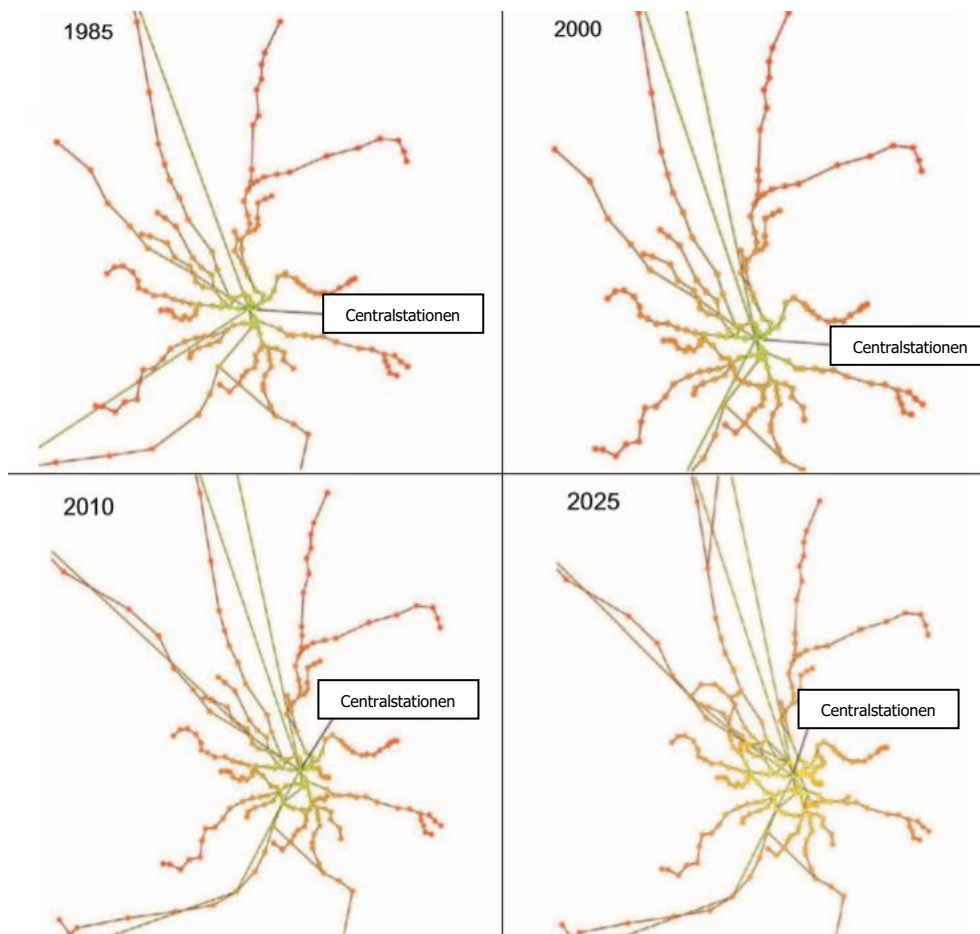
Rui D. และคณะ (2015) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าระยะเฉลี่ยการเดินทางระหว่างทุกคู่สถานี (Average Path Length, APL) โดยการจำลองการเพิ่มสถานี 1 สถานีต่อจากสถานีที่มีอยู่เดิมบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในเมืองกัวลาลัมเปอร์ ประเทศมาเลเซีย Rui D. และคณะ พบว่าการต่อฟ่วงสถานีส่วนมากจะทำให้ค่าเฉลี่ยระยะการเดินทางเพิ่มขึ้น และมีบางรูปแบบที่ทำให้ค่าดังกล่าวลดลง (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าระยะเฉลี่ยการเดินทาง (Average Path Length, APL) เมื่อเพิ่มสถานีหนึ่งสถานี ตามแต่ละหมายเลข (Rui D., et al., 2015)

Yang X.-H. และคณะ (2014) ศึกษารูปแบบการกระจายค่า Degree ของเครือข่ายรถประจำทางในประเทศจีน และรูปแบบการพัฒนาเครือข่ายดังกล่าวโดยการสุ่มเพิ่มเส้นทางการเปิดให้บริการ ถึงแม้ว่าวัตถุประสงค์ของงานนี้จะไม่ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายโดยตรง แต่ก็พบว่ารูปแบบเครือข่ายเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาและนโยบายของรัฐบาล

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การพัฒนาแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนข้างต้น ยังไม่มีการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness และ Betweenness โดยให้น้ำหนักเส้นทางของเครือข่าย (Weighted Network) เข้าร่วมด้วย งานวิจัยที่มีการให้น้ำหนักของเครือข่ายโดยใช้ระยะทาง คือ งานวิจัยของ Cats O. (2017) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดเครือข่ายบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในเมือง Stockholm ประเทศสวีเดน Cats O. (2017) ได้ทำการวิเคราะห์เครือข่ายดังกล่าวโดยใช้ตัวชี้วัดในระดับเครือข่ายและระดับสมาชิกรวมเป็นจำนวน 5 ชนิด คือ ระยะการเดินทางรวม ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness และ Directness รวมถึงแสดงผลค่าความเป็นศูนย์กลางออกมาในรูปแบบของแผนผังความเข้มข้น (Intensity Map) รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ตั้งแต่ปี 1985-2025 ซึ่งพบว่า ไม่มีการย้ายตำแหน่งของสถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness สูงสุด ตลอดระยะเวลา 41 ปี



รูปที่ 2.7 แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของเครือข่าย
Stockhome ประเทศสวีเดน

(Cats O., 2017)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำหรับในประเทศไทยมีการวิเคราะห์การเติบโตของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลแบบไม่มีน้ำหนัก (Unweighted Network) ผ่านตัวชี้วัดเครือข่าย 2 ชนิด คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Sadit T., 2003) โดยใช้โปรแกรม Pajek ช่วยในการวิเคราะห์ ผู้วิจัยได้แบ่งเครือข่ายออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเริ่มต้นระบบราง (พ.ศ. 2542) ช่วงขยายระบบราง (พ.ศ. 2554) และ แผนระบบรางสมบูรณ์ (พ.ศ. 2572) ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสถานีสยามลดลง และมีการกระจายความเป็นศูนย์กลาง Degree ไปยังสถานีวงเวียนใหญ่แทน ส่วนค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มีแนวโน้มลดลงจากสยามไปยังสถานีบางซื่อ แต่ยังไม่มีการศึกษาตัวชี้วัดเครือข่ายอื่นๆ รวมถึงการให้น้ำหนักเครือข่ายด้วยระยะทางระหว่างสถานีในประเทศไทย

2.4 การเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิก

ในหัวข้อ 2.2.2 ได้อธิบายไปแล้วว่าตัวชี้วัดระดับสมาชิก หรือค่าความเป็นศูนย์กลางสามารถบ่งบอกความสำคัญของสมาชิกบนเครือข่าย และสามารถนำไปใช้ในการเรียงลำดับความสำคัญได้อย่างไรก็ตาม ค่าความเป็นศูนย์กลางมีหลายชนิด จึงกำเนิดหลักการทดสอบว่า ค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดเหมาะแก่การเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกบนเครือข่ายมากที่สุด โดยเรียกการทดสอบดังกล่าวว่า การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับความสำคัญ (Performance Evaluation of Ranking Method) หรือในเครือข่ายขนส่งมวลชนมักถูกเรียกว่า “การค้นหาจุดอ่อนของเครือข่าย” (Vulnerability Concept)

แนวคิดดังกล่าวมีที่มาจากการรบกวนเครือข่ายบนสมาชิกที่เป็น “จุดอ่อน” (Vulnerable) ของเครือข่าย เพื่อค้นหาสมาชิกเครือข่ายที่ควรได้รับการป้องกันเป็นอันดับๆ หลักการรบกวนทำได้โดยการสร้างแบบจำลองการรบกวนด้วยวิธีปิดการเชื่อมต่อ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การรบกวนเส้นทางการเชื่อมต่อ (Edge Perturbation) และ การรบกวนสมาชิกเครือข่าย (Node Perturbation) การรบกวนสมาชิกเครือข่ายจะให้ผลกระทบต่อการเดินทางมากกว่าเพราะการรบกวนหนึ่งสมาชิกจะต้องปิดการเชื่อมต่อหลายเส้นทาง สำหรับงานวิจัยวิเคราะห์ระบบขนส่งมวลชนทางรางมักใช้รูปแบบการรบกวนสมาชิกเครือข่าย โดยกำหนดให้สถานีโดยสารเป็นสมาชิกของเครือข่าย Jenelius E. (2009) ได้ทำการจำลองรูปแบบการรบกวนเครือข่ายถนนของประเทศสวีเดน โดยปิดการเชื่อมต่อบนพื้นที่ที่ต้องการทราบผลกระทบ แล้วสร้างแบบจำลองถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการเดินทางที่เพิ่มขึ้นกับจำนวนประชากรบนพื้นที่ดังกล่าว ซึ่ง Jenelius E. (2009) พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะแบบเชิงเส้น โดยเมื่อจำนวนประชากรบนพื้นที่มาก ระยะเวลาการเดินทางที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นเมื่อถนนถูกปิดการเชื่อมต่อจะมากตามไปด้วย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง ผู้วิจัยได้เรียบเรียงหลักการทดสอบประสิทธิภาพด้วยการเรียงลำดับ โดยใช้การค้นหาจุดอ่อนบนเครือข่าย 2 วิธี คือ การทดสอบความอ่อนไหวประสิทธิภาพเครือข่าย (Network Efficiency Sensitive Method) และ การทดสอบการแพร่กระจายผลกระทบ (Spreading Effect Method) (Iyer S., et al., 2013)

2.4.1 วิธีการทดสอบความอ่อนไหวประสิทธิภาพเครือข่าย

หนึ่งในวิธีการทดสอบประสิทธิภาพด้วยการเรียงลำดับที่เป็นที่นิยมมาก คือ การพิจารณาความอ่อนไหวประสิทธิภาพเครือข่าย (Network Efficiency Sensitive Method) จากการรบกวนเครือข่ายโดยการปิดการเชื่อมต่อของสมาชิกตามลำดับที่ต้องการทดสอบ (รูปที่ 1.5 หน้า 6) วิธี

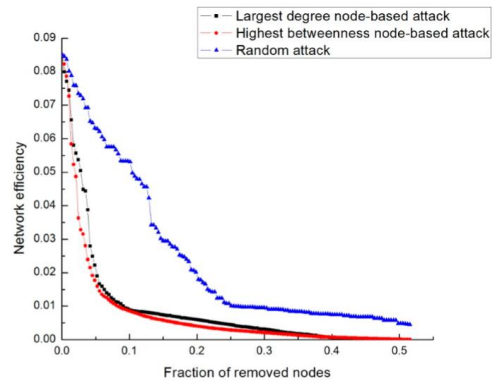
ดังกล่าวมีที่มาจากค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness โดยมองว่าประสิทธิภาพการเชื่อมต่อเทียบเคียงได้กับความสามารถในการเข้าถึงสมาชิกอื่นได้เร็วที่สุด แต่ตัวสมการได้ปรับเป็นให้พิจารณาในทุกคู่การเดินทาง สมการ 2-15 แสดงการคำนวณประสิทธิภาพเครือข่าย (Li. P.-X., et al., 2004)

$$\text{Eff}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} \frac{1}{d_{ij}} \quad \text{for } i \neq j \quad (2-15)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมดบนเครือข่าย และ d_{ij} คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดจากสมาชิก i ไปยังสมาชิก j เมื่อการเชื่อมต่อของสมาชิก i ถูกตัดขาดจะทำให้พจน์ $1/d_{ij} = 0$ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการเชื่อมต่อลดลง ทั้งนี้การปิดการเชื่อมต่อด้วยการเรียงลำดับแบบใดส่งผลให้ประสิทธิภาพเครือข่ายอ่อนไหวยากกว่า (ลดลงมากกว่า) แสดงว่าวิธีการเรียงลำดับนั้นเป็นวิธีที่ดีกว่า

Daniel J. S. และคณะ (2015) ได้ทำการเปรียบเทียบการเรียงลำดับความสำคัญของสถาบันบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง Shainghai ประเทศจีน จำนวน 3 วิธี คือ เรียงลำดับแบบสุ่ม (random attack) เรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (largest degree node-based attack) และการเรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (largest Betweenness node-based attack) โดยรูปที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพโดยการรบกวนสมาชิกเครือข่าย 50% ของสมาชิกทั้งหมดออกมาในรูปแบบของกราฟประสิทธิภาพเครือข่าย ซึ่งจะเห็นได้ว่าการรบกวนสมาชิกตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness จากมากไปน้อย จะทำให้เครือข่ายมีประสิทธิภาพลดลงมากที่สุด ดังนั้นการเรียงลำดับตามความสำคัญตามค่าความเป็นศูนย์กลางชนิด Betweenness จึงบ่งบอกถึงความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวมได้ดีกว่า Degree ส่วนการเรียงลำดับแบบสุ่มให้ประสิทธิภาพการเรียงลำดับต่ำที่สุด

ในงานวิจัยชิ้นเดียวกัน รูปที่ 2.8 แสดงอัตราการลดลงของประสิทธิภาพการเชื่อมต่อของเครือข่าย 4 เครือข่ายที่มีจำนวนสมาชิกต่างกัน พบว่าเมื่อเครือข่ายต่างกัน ผลการทดสอบด้วยวิธีการเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกที่เหมาะสมก็จะแตกต่างกันด้วย



รูปที่ 2.8 การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับแบบพิจารณาประสิทธิภาพเครือข่ายระหว่าง
เรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree Betweenness และแบบสุ่ม

(Daniel J. S. et al., 2015)

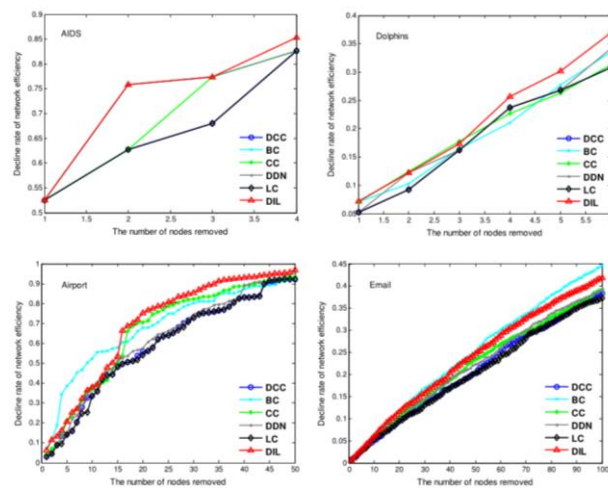


Fig. 4. The relation between decline rate of network efficiency and the number of nodes removed from the network. The top ten percent of the nodes are removed one by one from four real networks (AIDS, Dolphins, Airport and Email) according to the importance ranking lists produced by DCC, BC, CC, DDN, LC and DIL.

รูปที่ 2.9 การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับแบบพิจารณาประสิทธิภาพเครือข่ายบน
เครือข่ายจริงที่มีจำนวนสมาชิกต่างกัน (AIDS, Dolphins, Airport และ Email)

(Liu J., et al., 2016)

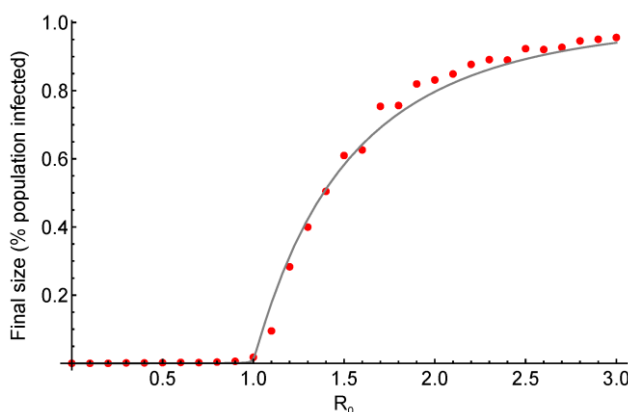
2.4.2 วิธีการทดสอบการแพร่กระจายผลกระทบ

แบบจำลองที่เป็นที่นิยมในการทดสอบการเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกด้านการแพร่กระจายผลกระทบ คือ แบบจำลอง SIR (Susceptible-infected-Recovery) ที่พิจารณาผลกระทบของสมาชิกอื่นเมื่อสมาชิกที่สนใจถูกปิดการเชื่อมต่อลง เนื่องจากการปิดการเชื่อมต่อของสมาชิกจะส่งผลกระทบไปถึงสมาชิกอื่นๆ ด้วย โดยเฉพาะสมาชิกเพื่อนบ้านทางตรง ทั้งนี้เราสามารถเรียกแบบจำลอง SIR ว่าวิธีการวิเคราะห์จุดอ่อนของเครือข่ายแบบพลวัต (Dynamic Vulnerability Analysis) (Zhou J., et al., 2015)

แบบจำลอง SIR สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการการแพร่ระบาดของโรคระบาด โดยเราจะกำหนดให้สมาชิกหนึ่งๆ มี 3 สถานะคือ สถานะเสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Susceptible) สถานะติดเชื้อ (Infected) และสถานะฟื้นตัว (Recovery) ในขั้นเริ่มต้นเราจะเลือกสมาชิกที่สนใจให้อยู่ในภาวะติดเชื้อ จากนั้นสมาชิกเพื่อนบ้านที่เชื่อมต่อดโดยตรงกับสมาชิกที่ติดเชื้อทุกสมาชิกจะอยู่ในสถานะเสี่ยง สมาชิกที่เสี่ยงจะมีความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนไปสู่สถานะติดเชื้อด้วยความน่าจะเป็นเท่ากับ α หากสมาชิกใดติดเชื้อ สมาชิกเพื่อนบ้านที่เชื่อมต่อทางตรงจะมีโอกาสติดเชื้อไปด้วย ด้วยความน่าจะเป็น α เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เราจะเก็บจำนวนครั้งที่สมาชิกติดเชื้อทั้งหมดในแต่ละรอบ t ($F(t)$) แบบจำลองนี้จะดำเนินไปจนกว่าในลำดับล่าสุดไม่มีสมาชิกที่ติดเชื้อแล้ว ($F(t)=0$)

จำนวนสมาชิกที่ติดเชื้อทั้งหมดจะบ่งบอกถึงความสำคัญในการกระจายเชื้อของสมาชิกที่ถูกกำหนดให้มีสถานะติดเชื้อเป็นตัวแรกได้ ยิ่งค่าผลรวม F ทั้งหมดมีค่ามาก แสดงว่าสมาชิกที่ติดเชื้อเริ่มต้นเป็นสมาชิกที่มีความสำคัญต่อการแพร่กระจายผลกระทบมากด้วย

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณจำนวนการติดเชื้อของสมาชิกนั้นขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ ถ้าความน่าจะเป็นสูงเกินไป จำนวนสมาชิกที่มีการติดเชื้ออาจมีมากเกินไป จนไม่สามารถจบการคำนวณได้ หรือหากค่าความน่าจะเป็นต่ำเกินไป ก็จะทำให้จำนวนการติดเชื้อน้อยจนไม่สามารถบ่งบอกข้อมูลอะไรได้เช่นกัน ด้วยเหตุดังกล่าว จึงมีข้อสงสัยว่าควรใช้ค่าความน่าจะเป็นในการติดเชื้อเท่าใดจึงจะเหมาะสมกับการวิเคราะห์สมาชิกที่เป็นจุดแพร่กระจาย Chakrabarti D. และคณะ (2008) ได้เสนอค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์แบบจำลอง SIR ที่เรียกว่าจุด Epidemic Thredhold ให้ได้ให้ค่านิยามว่าจุดดังกล่าวเป็นจุดที่ถือว่าเป็นเหตุการณ์ที่ความน่าจะเป็นในการติดเชื้ออยู่ในระยะเริ่มต้นของระยะแพร่กระจาย เนื่องจากจะเป็นการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อได้ดีที่สุด รูป 2.9 แสดงจุด Epidemic Thredhold ที่ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อวิกฤต (α_c) เท่ากับ 1.0



รูปที่ 2.10 จุด epidemic threshold ที่ความน่าจะเป็นวิกฤต (α_c) เท่ากับ 1.0

(Iyer S., et al., 2013)

ทั้งนี้จุด Epidemic Threshold ในแต่ละเครือข่ายจะเกิดขึ้นที่ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อไม่เท่ากัน ในงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับ มักใช้ค่าความน่าจะเป็นในการติดเชื้อของการวิเคราะห์แบบจำลอง SIR เท่ากับ $\alpha_c = \frac{\langle k \rangle}{\langle k \rangle - \langle k \rangle^2}$ เมื่อ $\langle k \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Iyer S., et al., 2013)

ผลลัพธ์ของการคำนวณจากแบบจำลอง SIR จะได้ค่าจำนวนครั้งการติดเชื้อ เมื่อกำหนดสมาชิกตัวติดเชื้อตัวแรก เราจะนำค่านี้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับอื่นๆ โดยเราจะทำการทดสอบความสอดคล้องของวิธีการเรียงลำดับที่เราสนใจ กับการเรียงลำดับที่ได้จากแบบจำลอง SIR ผ่านการคำนวณสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนดัลล์ (Kendall's tau correlation coefficient, τ)

สัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนดัลล์ เป็นวิธีการทางสถิติในการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล 2 ชุด (KENDALL M. G., 1938) โดยที่ตัวแปรทั้งหมดอยู่ในมาตรเรียงลำดับเดียวกัน ซึ่งมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง +1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุความสำคัญของสมาชิกเครือข่ายมักใช้ค่า τ ในการทดสอบประสิทธิภาพในการเรียงเรียงลำดับระหว่างตัวชี้วัดความสำคัญกับแบบจำลองการรบกวนเครือข่าย ยิ่งค่า τ มากแสดงว่าประสิทธิภาพของตัวชี้วัดดังกล่าวดี ทั้งนี้ในแบบจำลองการรบกวนเครือข่ายของ Ferguson G.A. (1980) ได้กำหนดการประเมินความสัมพันธ์ที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังแสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 การประเมินความสัมพันธ์ที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

เกณฑ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	การแปลความหมาย
$\tau = 0$	ชุดข้อมูลไม่มีความสัมพันธ์กันเลย
$ \tau < 0.5$	ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์กันน้อย
$0.5 < \tau < 0.7$	ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์ระดับปานกลาง
$ \tau > 0.7$	ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์ระดับสูง
$\tau = 1$	ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์ทางบวกสมบูรณ์
$\tau = 0$	ชุดข้อมูลมีความสัมพันธ์ทางลบสมบูรณ์

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทดสอบการเรียงลำดับ 4 วิธี คือ เรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree, Closeness, Betweenness, และ Eigenvector บนเครือข่ายแบบไม่มีทิศทางจำนวน 4 เครือข่าย เมื่อเทียบกับแบบจำลองของ SIR

- Amazon (Yang J., et al., 2013) เป็นเครือข่ายการซื้อขายผลิตภัณฑ์ผ่านเว็บไซต์
- Cond-mat (Leskovec J., et al., 2007) เป็นเครือข่ายของนักวิทยาศาสตร์ที่ได้รับการตีพิมพ์ใน www.arxiv.org ตั้งแต่ปี 1995-2003
- Email-Eron (Leskovec J., et al., 2009) เป็นเครือข่ายการสื่อสารผ่านอีเมลจำนวน 5 แสนที่อยู่
- Facebook (Viswanat B., et al., 2009) คือเครือข่ายสังคมออนไลน์ของ www.facebook.com เมื่อสมาชิก คือ ผู้ใช้งาน และเส้นเชื่อม คือ การตอบรับเป็นเพื่อนระหว่างผู้ใช้งาน

ตารางที่ 2.3 ค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนตัลล์กับแบบจำลอง SIR ของเครือข่ายตัวอย่าง

	Amazon	Cond-mat	Email-Eron	Facebook
Degree	0.2675	0.5657	0.4821	0.7348
Betweenness	0.2508	0.3277	0.4224	0.4880
Closeness	0.5968	0.7190	0.3271	0.7038
Eigenvector	0.3161	0.7350	0.5346	0.7373

จากผลการทดสอบความสอดคล้องผ่านสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนตัลล์ พบว่าผลการทดสอบใน 4 เครือข่ายตัวอย่างให้ค่าที่แตกต่างกัน แต่ส่วนมากค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ให้การเรียงลำดับสอดคล้องกับผลการคำนวณจากแบบจำลอง SIR มากที่สุด กล่าวคือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector เหมาะสมต่อการเรียงลำดับสมาชิกในการแพร่กระจายผลกระทบมากที่สุด ยกเว้นเครือข่าย Amazon ที่ให้การเรียงลำดับตามค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness เหมาะสมกว่า

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนตัลล์ในตาราง 2.3 กับหลักการประเมินความสัมพันธ์ในตาราง 2.2 พบว่า มีบางเครือข่าย เช่น Email-Eron ไม่เหมาะกับการเรียงลำดับแบบใดเลย เนื่องจากค่า $\tau < 0.5$ ซึ่งหมายถึง ความสอดคล้องของการเรียงลำดับทั้ง 4 กับแบบจำลอง SIR อยู่ในระดับต่ำ ซึ่งนำไปสู่การสร้างตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอดในหัวข้อถัดไป

2.5 งานวิจัยเกี่ยวกับการเสนอตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอด

จากการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับด้วยวิธีต่างๆ บางครั้งจะพบว่า การใช้ค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่งอาจไม่เหมาะกับการเรียงลำดับบนเครือข่ายดังกล่าวเลย จึงมีการสร้างตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอด (Comprehensive Node Importance Index) โดยการให้น้ำหนักกับค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิด William P. F. และคณะ (2014) ให้ข้อเสนอว่าเราไม่สามารถเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางตัวใดตัวหนึ่งได้ เนื่องจากแต่ละค่าสะท้อนความหมายออกมาแตกต่างกัน

ในเบื้องต้นการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางเป็นการให้น้ำหนักแบบของการพิจารณาแบบหลายเกณฑ์ (Multi-Attribute Method) อาทิเช่น Yuxian และคณะ (2014) เสนอวิธีการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางของสมาชิกโดยวิธีวิเคราะห์แบบลำดับชั้น (Analytical Hierarchy Method, AHP) และวิธี TOPIS (Technique for Order Preference by similarity to Ideal Solution) และให้ทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับทั้งสองวิธีด้วยแบบจำลอง SIR

ส่วน William (2014) ศึกษาการสร้างตัวชี้วัดรวบยอดในลักษณะเดียวกันบนเครือข่ายการท่องเที่ยว แต่ทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับด้วยการทดสอบความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย

วิธี TOPIS และ AHP เป็นการให้น้ำหนักโดยการประเมินข้อดี-ข้อเสีย ของค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิด ถ้าหากค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดมีข้อดีมากกว่า ก็จะให้น้ำหนักกับค่าความเป็นศูนย์กลางนั้นมากกว่า อย่างไรก็ตาม การประเมินข้อดี-ข้อเสีย ดังกล่าว เป็นการประเมินของผู้วิจัยแต่ละคน และขัดกับ William P. และคณะ ที่กล่าวว่า ค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดล้วนมีความสำคัญในแง่มุมแตกต่างกัน

Yuhao Y. และคณะ (2015) ได้ศึกษาการให้น้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลาง 2 ชนิด ในการสร้างตัวชี้วัดรวบยอดเพื่อเรียงลำดับสถานีเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของเมือง Beijing ประเทศจีน โดยได้ทำการทดลองการให้สัดส่วนน้ำหนักช่วง 0.1-0.9 ของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ Betweenness โดย Yuhao Y. และคณะ (2015) พบว่าการเรียงลำดับโดยใช้น้ำหนัก Degree เท่ากับ 0.6 และ น้ำหนัก Betweenness เท่ากับ 0.4 จะเป็นการเรียงลำดับสมาชิกที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวมได้ดีที่สุด

2.6 การพัฒนาจากการทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรม มีหลากหลายงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ตัวชี้วัดเครือข่ายซับซ้อนกับเครือข่ายขนส่งมวลชน แต่มีงานวิจัยจำนวนไม่มากนักที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดเครือข่ายในแต่ละช่วงการพัฒนาเครือข่าย ซึ่งผู้วิจัยยังไม่พบการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของกรุงเทพมหานครที่ทำการวิเคราะห์ผ่านตัวชี้วัดเครือข่ายซับซ้อน ทั้งหมด 7 ชนิด ในช่วงเวลาต่างๆ นอกจากนี้ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness และ Betweenness ส่วนใหญ่มักไม่พิจารณาระยะทางระหว่างสถานีร่วมด้วย

สำหรับการระบุจุดอ่อน หรือการระบุความสำคัญของสถานีทั้งด้านประสิทธิภาพเครือข่ายและด้านจุดแพร่กระจายผลกระทบ รวมถึงการพัฒนาตัวชี้วัดที่มีการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิด ยังไม่พบว่ามีการศึกษาด้วยเช่นกัน



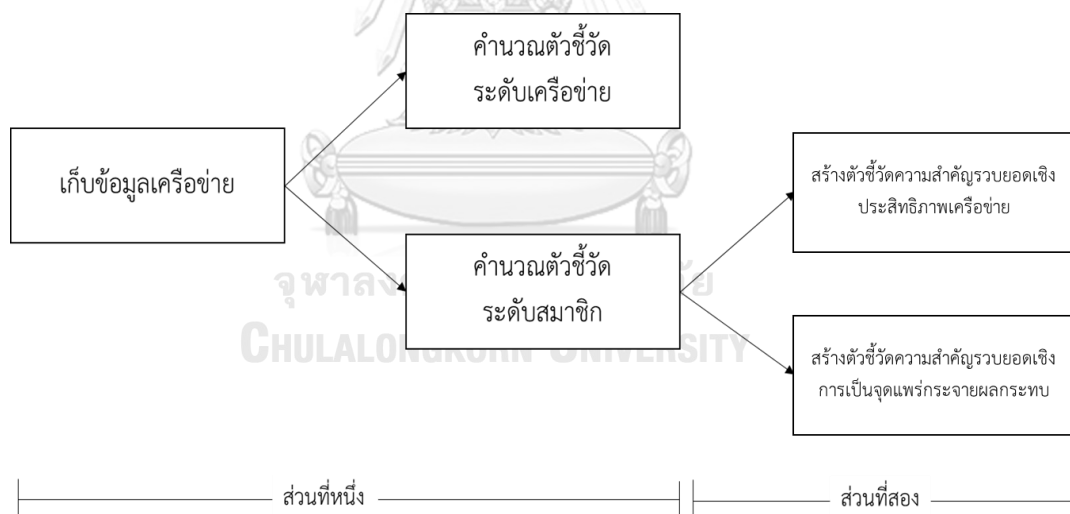
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการดำเนินงาน 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2542-2572 โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของตัวชี้วัดเครือข่ายระดับเครือข่าย 3 ชนิด และระดับสมาชิก 4 ชนิด รวมเป็น 7 ชนิด

ส่วนที่สอง การพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดสำหรับเรียงลำดับความสำคัญด้านประสิทธิภาพ และด้านการแพร่กระจายผลกระทบบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2561-2572 ด้วยการให้น้ำหนักค่าตัวชี้วัดเครือข่ายระดับสมาชิกทั้ง 4 ชนิด

จากขั้นตอนการดำเนินงาน 2 ส่วนนี้ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนการทำงานย่อยได้ 3 ขั้นตอน โดยรูปที่ 3.1 แสดงข้อมูลป้อนเข้า (input) ของแต่ละขั้นตอน



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงาน

1. เก็บรวบรวมข้อมูลรูปแบบเครือข่าย ตำแหน่งเครือข่ายตามพิกัด และลำดับการเปิดให้บริการตาม พ.ศ. เพื่อสร้างเครือข่ายสำหรับการวิเคราะห์แยกตามการเปิดให้บริการ ถ้าหากปีใดไม่มีการขยายเส้นทางเพิ่มเติม ให้ใช้เครือข่ายเดียวกันกับปีก่อนหน้า
2. คำนวณตัวชี้วัดเครือข่าย ทั้งระดับเครือข่าย (Network Level) และระดับสมาชิก (Node Level) ของเครือข่ายแต่ละ พ.ศ. โดยการแสดงผลของตัวชี้วัดระดับเครือข่ายจะ

แสดงในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงตาม พ.ศ. การให้บริการ ส่วนตัวชี้วัดระดับสมาชิก จะแสดงผลทั้งการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตาม พ.ศ. การเปิดให้บริการ และแผนผัง ความเข้มข้น (Intensity Map)

- นำผลการคำนวณเฉพาะตัวชี้วัดระดับสมาชิก ในข้อ 2 มาปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน แล้วนำมาเป็นพารามิเตอร์สำหรับสร้างตัวชี้วัดรวบยอดในส่วนที่สอง

3.1 ที่มาของข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณประกอบด้วย ตำแหน่งสถานี ลำดับการขยายเครือข่าย ละติจูดและลองจิจูดของแต่ละสถานี ดังแสดงสรุปในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ที่มาของข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปร	ที่มาของข้อมูล
ลำดับการเปิด-ปิดการให้บริการ	ตามตาราง ก.1
ตำแหน่งสถานี	แผนแม่บทการพัฒนาขนส่งมวลชนทางราง
ละติจูดและลองจิจูดของสถานี	Google maps (https://www.google.com/maps)

ลำดับการขยายเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางตามที่รวบรวมไว้ มีการต่อขยายเครือข่ายทั้งหมด 18 ครั้งในช่วงเวลา 31 ปี สำหรับข้อมูลตำแหน่งสถานีและละติจูด ลองจิจูดนั้น ผู้วิจัยเลือกใช้ตำแหน่งจากแผนแม่บทการพัฒนาขนส่งมวลชนทางรางระยะ 20 ปี และแบบแผนสอบถามความคิดเห็นของประชาชนในการระบอบเขตของสถานี

3.2 การเก็บข้อมูลและการนำเสนอรูปแบบเครือข่าย

กำหนดให้เครือข่าย $G = (V, E)$ เมื่อ V คือเซตของสถานี และ E คือ เซตของเส้นทางเชื่อมต่อระหว่างสถานีต้นทาง i ไปยังสถานีปลายทาง j หรือ $E = \{(i, j) \mid i, j \in V\}$ โดยเก็บข้อมูลการเชื่อมต่อเครือข่ายด้วยเมตริกซ์ประชิด (Adjacency matrix, A) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังแสดงในสมการ 3-1

$$A = a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } (i, j) \in E \\ 0 & \text{เมื่อ } (i, j) \notin E \end{cases} \quad (3-1)$$

นอกจากนี้กำหนดให้เมตริกซ์ระยะทาง U แทนข้อมูลระยะทางประชิดระหว่างสถานี โดย d_{ij} คือ ระยะทางประชิดระหว่างสถานีที่ติดกันในหน่วยกิโลเมตร โดยคำนวณจากละติจูดและลองจิจูดระหว่างสถานีตามการคำนวณในสมการ 3-2 (Koordinaten, 2014) ซึ่งเป็นการคำนวณระยะทางกระจัดระหว่างสถานีโดยคำนึงถึงส่วนโค้งของโลกด้วย ทั้งนี้เมตริกซ์ U จะมีประโยชน์ในการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

$$U_{ij} = \frac{[R \cdot \arccos(\sin(LAT_i) \sin(LAT_j) + \cos(LAT_i) \cos(LAT_j))] \times \cos(LONG_j - LONG_i)}{1000}$$

(3-2)

เมื่อ U_{ij} คือ ระยะทางระหว่างสถานี i และ j (กิโลเมตร)
 R คือ รัศมีของโลก (~ 6,371,000 เมตร)
 LAT_i คือ ละติจูดของสถานี i (เรเดียน)
 $LONG_i$ คือ ลองจิจูดของสถานี i (เรเดียน)

ในกรณีที่สองสถานีอยู่ห่างกันน้อยกว่า 500 เมตร จะให้สถานีทั้งสองเป็นสถานีเชื่อมต่อระหว่างสาย และจะใช้จุดกึ่งกลางระหว่างสถานีทั้งสองเป็นจุดเชื่อมต่อ รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างจุดเชื่อมต่อของสถานีสำโรง (สายสีเขียว) และสถานีสำโรง (สายสีเหลือง)

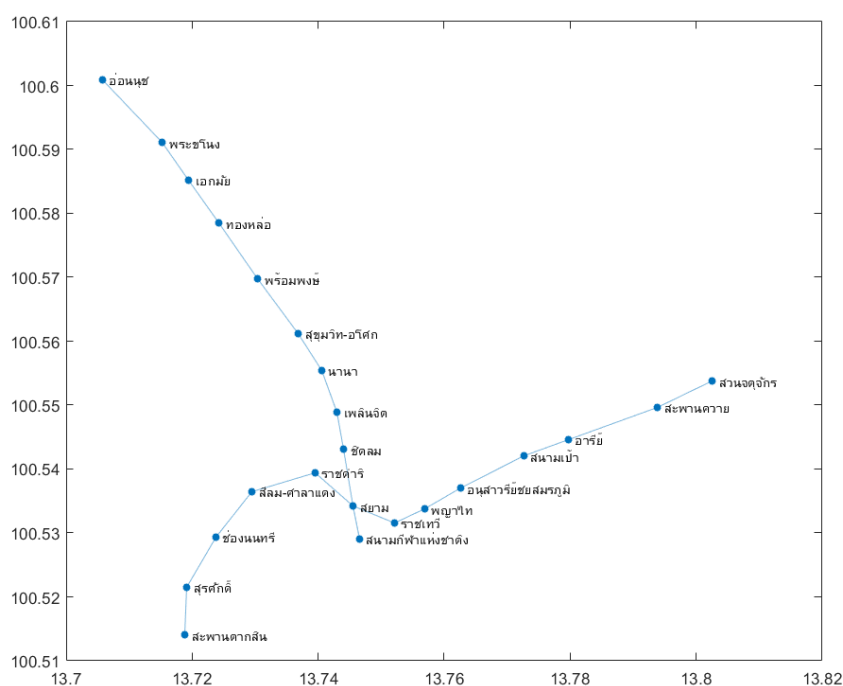


รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสถานีเชื่อมต่อระหว่างสาย (สถานีสำโรง)

3.2.1 การนำเสนอรูปแบบเครือข่าย

การนำเสนอรูปแบบเครือข่ายจะใช้รูปแบบการแสดงผลตามพิภพทางภูมิศาสตร์ ซึ่งจะให้เห็นภาพแผนผังของเครือข่ายอย่างชัดเจน การแสดงผลในลักษณะดังกล่าวจะไม่แสดงตัวเลขระยะทาง

บนเครือข่ายออกมา แต่สามารถมองเห็นได้จากพิกัดตามแผนผัง รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของเครือข่ายขนส่งมวลขนทางรางของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2542 ซึ่งประกอบไปด้วย 23 สถานี และ 22 เส้นเชื่อม ตาราง 3.3 แสดงเมตริกซ์ประชิดของเครือข่ายดังกล่าว โดยกำหนดให้แถวและหลักของเมตริกซ์เป็นหมายเลขสถานี ดังกำหนดตามตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แผนภาพเครือข่ายขนส่งมวลขนทางรางในกรุงเทพมหานคร ปี พ.ศ. 2542

ตารางที่ 3.2 ชื่อสถานีและหมายเลขสถานีของเครือข่าย พ.ศ. 2542

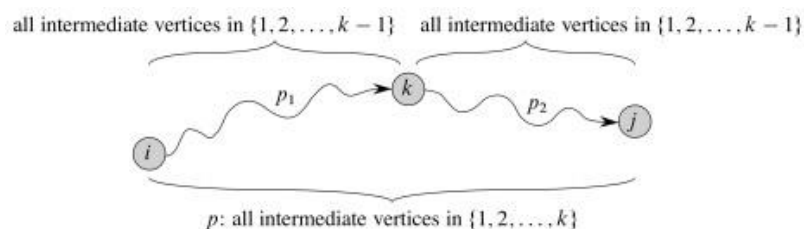
หมายเลขสถานี	ชื่อสถานี	หมายเลขสถานี	ชื่อสถานี
1	สีลม	13	ราชเทวี
2	สุขุมวิท	14	พญาไท
3	สวนจตุจักร	15	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ
4	อ่อนนุช	16	สนามเป้า
5	พระขนิษฐา	17	อารีย์
6	เอกมัย	18	สะพานควาย
7	ทองหล่อ	19	สนามกีฬาแห่งชาติ
8	พร้อมพงษ์	20	ราชดำริ
9	นานา	21	ชองนันทรี
10	เพลินจิต	22	สุรศักดิ์
11	ชิดลม	23	สะพานตากสิน
12	สยาม		

ตารางที่ 3.3 เมตริกซ์ประชิด (Adjacency Matrix, A) ของเครือข่าย พ.ศ. 2542

A	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
2	0	-	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	1	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1	0	0	0	0	0
18	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0
21	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	1	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-

3.3 อัลกอริทึมสำหรับหาเส้นทางที่สั้นที่สุด

ในงานวิจัยฉบับนี้เลือกใช้อัลกอริทึมของ Floyd Warshall สำหรับการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในแต่ละการเดินทางระหว่างทุกคู่สถานี ซึ่งจะประโยชน์สำหรับการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลางในกลุ่มที่พิจารณาเส้นทาง อาทิเช่น ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness และ Closeness



รูปที่ 3.4 แผนภาพแนวคิดของ Floyd Warshall อัลกอริทึม

เมื่อพิจารณาเครือข่าย G ฟังก์ชัน $D(i,j,k)$ หมายถึง เส้นทางที่สั้นที่สุดจากสถานี i ไปยังสถานี j ที่สามารถใช้สถานีใน $(1,2,3...k)$ เป็นสถานีระหว่างทาง ในการคำนวณแต่ละขั้นจะเปรียบเทียบการ

เดินทางจาก i ไป j เมื่อกำหนดให้สามารถผ่านสถานีในเซต $(1,2,3..k-1)$ ก็กับผ่านสถานีในเซต $(1,2,3..k)$ ถ้าหากการผ่านสถานี k แล้วระยะทางการเดินทางน้อยลง จะทำให้การเดินทางควรผ่านสถานี k สมการ 3-3 แสดงความสัมพันธ์เวียนเกิด (Recurrent) และตารางที่ 3.4 แสดงอัลกอริทึมเทียมของ Floyd warshall

$$D(i,j,k) = \min (D(i,j,k-1) , D(i,k,k-1) + D(k,j,k-1)) \quad \forall i,j,k \in V \quad (3-3)$$

ตารางที่ 3.4 อัลกอริทึมเทียมของ Floyd Warshall

1	Input: A Network $G = (N, A)$ with nonnegative arc length.
2	for all node pairs $[i, j] \in N \times N$
3	$d[i, j] = \infty$ and $pred[i, j] = 0$
4	for all nodes $i \in N$ do $d[i, i] = 0$
5	for each arc $(i, j) \in A$ do $d[i, j] = c_{ij}$ and $pred[i, j] = i$
6	for each $k = 1$ to N do
7	for each $[i, j] \in N \times N$
8	if $d[i, j] > d[i, k] + d[k, j]$ then
9	$d[i, j] = d[i, k] + d[k, j]$ and $pred[i, j] = pred[k, j]$
10	Output: all-pairs shortest paths and predecessor list

ตาราง 3.3 แสดงผลการคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างทุกคู่สถานีของเครือข่ายตัวอย่าง

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณเมตริกชี้ระยะทาง (D) ในหน่วยกิโลเมตร ของเครือข่าย พ.ศ. 2542

หมายเลข และ ชื่อสถานี	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1 สีลม	0.0	5.2	8.9	10.7	9.2	8.4	7.5	6.3	4.4	3.7	3.0	2.0	2.8	3.4	4.1	5.4	6.2	7.9	2.6	1.2	1.0	2.0	2.8
2 สุขุมวิท	5.2	0.0	10.0	5.5	4.0	3.2	2.3	1.2	0.7	1.5	2.2	3.1	3.9	4.5	5.2	6.5	7.3	8.9	3.7	4.0	6.2	7.1	8.0
3 สวนจตุจักร	8.9	10.0	0.0	15.5	14.0	13.2	12.3	11.2	9.3	8.5	7.9	6.9	6.1	5.5	4.8	3.6	2.7	1.1	7.5	7.8	9.9	10.9	11.7
4 อ่อนนุช	10.7	5.5	15.5	0.0	1.5	2.3	3.2	4.4	6.3	7.0	7.7	8.6	9.4	10.0	10.7	12.0	12.8	14.5	9.2	9.5	11.7	12.7	13.5
5 พระชนม	9.2	4.0	14.0	1.5	0.0	0.8	1.7	2.9	4.8	5.5	6.2	7.1	7.9	8.5	9.2	10.5	11.3	13.0	7.7	8.0	10.2	11.2	12.0
6 เอกมัย	8.4	3.2	13.2	2.3	0.8	0.0	0.9	2.1	4.0	4.7	5.4	6.4	7.1	7.7	8.4	9.7	10.5	12.2	6.9	7.2	9.4	10.4	11.2
7 ทองหล่อ	7.5	2.3	12.3	3.2	1.7	0.9	0.0	1.2	3.1	3.8	4.5	5.5	6.2	6.8	7.5	8.8	9.6	11.3	6.0	6.3	8.5	9.5	10.3
8 พรหมพงษ์	6.3	1.2	11.2	4.4	2.9	2.1	1.2	0.0	1.9	2.7	3.3	4.3	5.1	5.6	6.4	7.6	8.4	10.1	4.9	5.2	7.3	8.3	9.1
9 นานา	4.4	0.7	9.3	6.3	4.8	4.0	3.1	1.9	0.0	0.8	1.4	2.4	3.1	3.7	4.5	5.7	6.5	8.2	2.9	3.3	5.4	6.4	7.2
10 เพลินจิต	3.7	1.5	8.5	7.0	5.5	4.7	3.8	2.7	0.8	0.0	0.6	1.6	2.4	3.0	3.7	4.9	5.8	7.4	2.2	2.5	4.7	5.6	6.4
11 จิตลม	3.0	2.2	7.9	7.7	6.2	5.4	4.5	3.3	1.4	0.6	0.0	1.0	1.7	2.3	3.1	4.3	5.1	6.8	1.5	1.9	4.0	5.0	5.8
12 สยาม	2.0	3.1	6.9	8.6	7.1	6.4	5.5	4.3	2.4	1.6	1.0	0.0	0.8	1.4	2.1	3.3	4.2	5.8	0.6	0.9	3.0	4.0	4.8
13 ราชเทวี	2.8	3.9	6.1	9.4	7.9	7.1	6.2	5.1	3.1	2.4	1.7	0.8	0.0	0.6	1.3	2.6	3.4	5.1	1.3	1.7	3.8	4.8	5.6
14 พญาไท	3.4	4.5	5.5	10.0	8.5	7.7	6.8	5.6	3.7	3.0	2.3	1.4	0.6	0.0	0.7	2.0	2.8	4.5	1.9	2.2	4.4	5.4	6.2
15 อู่สารีย์ชัยฯ	4.1	5.2	4.8	10.7	9.2	8.4	7.5	6.4	4.5	3.7	3.1	2.1	1.3	0.7	0.0	1.2	2.1	3.7	2.7	3.0	5.1	6.1	6.9
16 สนามเป้า	5.4	6.5	3.6	12.0	10.5	9.7	8.8	7.6	5.7	4.9	4.3	3.3	2.6	2.0	1.2	0.0	0.8	2.5	3.9	4.2	6.4	7.4	8.2
17 อารีย์	6.2	7.3	2.7	12.8	11.3	10.5	9.6	8.4	6.5	5.8	5.1	4.2	3.4	2.8	2.1	0.8	0.0	1.7	4.7	5.0	7.2	8.2	9.0
18 สะพานควาย	7.9	8.9	1.1	14.5	13.0	12.2	11.3	10.1	8.2	7.4	6.8	5.8	5.1	4.5	3.7	2.5	1.7	0.0	6.4	6.7	8.9	9.9	10.7
19 สนามกีฬาฯ	2.6	3.7	7.5	9.2	7.7	6.9	6.0	4.9	2.9	2.2	1.5	0.6	1.3	1.9	2.7	3.9	4.7	6.4	0.0	1.5	3.6	4.6	5.4
20 ราชดำริ	1.2	4.0	7.8	9.5	8.0	7.2	6.3	5.2	3.3	2.5	1.9	0.9	1.7	2.2	3.0	4.2	5.0	6.7	1.5	0.0	2.2	3.1	4.0
21 ช่องนนทรี	1.0	6.2	9.9	11.7	10.2	9.4	8.5	7.3	5.4	4.7	4.0	3.0	3.8	4.4	5.1	6.4	7.2	8.9	3.6	2.2	0.0	1.0	1.8
22 สุรศักดิ์	2.0	7.1	10.9	12.7	11.2	10.4	9.5	8.3	6.4	5.6	5.0	4.0	4.8	5.4	6.1	7.4	8.2	9.9	4.6	3.1	1.0	0.0	0.8
23 สะพานตากสิน	2.8	8.0	11.7	13.5	12.0	11.2	10.3	9.1	7.2	6.4	5.8	4.8	5.6	6.2	6.9	8.2	9.0	10.7	5.4	4.0	1.8	0.8	0.0

3.4 ตัวชี้วัดเครือข่าย

ตัวชี้วัดเครือข่ายเป็นส่วนหนึ่งของทฤษฎีเครือข่ายซับซ้อนที่ช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ เกี่ยวกับเครือข่ายที่มีความซับซ้อน อาจเป็นเครือข่ายขนส่งมวลชนหรือไม่ใช่ก็ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวชี้วัดพื้นฐานที่เหมาะสมสำหรับการอธิบายปรากฏการณ์บนเครือข่ายขนส่งมวลชน โดยแบ่งเป็นตัวชี้วัดสำหรับการวิเคราะห์ระดับเครือข่าย 3 ชนิด (หัวข้อ 3.4.1-3.4.3) และตัวชี้วัดสำหรับการวิเคราะห์ระดับสมาชิก 4 ชนิด (หัวข้อ 3.4.4-3.4.7) ทั้งนี้ตารางที่ 3.6 สรุปตัวชี้วัดที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด

ในตัวชี้วัดระดับเครือข่ายจำเป็นการอธิบายสมบัติโดยรวมของเครือข่าย โดยสิ่งที่ผู้วิจัยต้องการจากการคำนวณตัวชี้วัดระดับเครือข่ายคือ ความเข้าใจในรูปแบบการพัฒนาแบบคร่าวๆ ของเครือข่าย ทั้งลักษณะการเชื่อมต่อและการกระจายตัวของเครือข่าย ส่วนตัวชี้วัดระดับสมาชิกจะเป็นการบอกสมบัติของแต่ละสถานี การบ่งบอกความเป็นศูนย์กลางของสมาชิกในความหมายที่แตกต่างกัน จึงมีการเรียกตัวชี้วัดระดับสมาชิกว่า “ค่าความเป็นศูนย์กลาง” (Centrality)

แม้ว่าจะมีหลากหลายงานวิจัยพัฒนาค่าความเป็นศูนย์กลางเป็นจำนวนมากกว่า 30 ชนิด (Li et al., 2015) แต่โดยพื้นฐานของค่าความเป็นศูนย์กลางมีเพียง 4 ชนิดคือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree, ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector, ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness, และค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness สำหรับค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดอื่นๆ จะเป็นการพัฒนาต่อยอดไปจากค่าความเป็นศูนย์กลางเหล่านี้ ซึ่งจะต้องเพิ่มข้อมูลนอกเหนือจากรูปแบบการเชื่อมต่อ สำหรับงานวิจัยนี้จึงเลือกเฉพาะค่าความเป็นศูนย์กลางระดับพื้นฐาน เนื่องจากขอบเขตของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเฉพาะสมบัติของสถานีที่เกิดจากรูปแบบของเครือข่ายเท่านั้น

3.4.1 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network Diameter, Dia) เป็นตัวชี้วัดอย่างง่ายที่สุดในการบ่งบอกการกระจายการเข้าถึงเครือข่าย โดย Dia หมายถึงระยะทางเดินทางมากที่สุดจากการเดินทางของทุกคู่สมาชิก สมการ 3-4 แสดงการคำนวณค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

$$Dia = \max \{ d_{ij} \} \quad \forall i, j \in V \quad (3-4)$$

เมื่อ d_{ij} คือ ระยะทางที่สั้นที่สุด (shortest path) จากสมาชิก i ไปยังสมาชิก j ในทุก $i, j \in V$

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับเครือข่าย พ.ศ. 2542 มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่ายเท่ากับ 15.5 กิโลเมตร เป็นเส้นทางระหว่างสถานีอ่อนนุช กับสถานีสวนจตุจักร พิจารณาได้จากค่าที่มากที่สุดในเมตริกซ์ระยะทาง (ตาราง 3.3 หน้า 38)

3.4.2 ดัชนีแกมมา

ความสามารถในการเชื่อมต่อเครือข่ายสามารถวัดได้จากดัชนีแกมมา (Gamma Index, γ) แนวคิดของดัชนีแกมมา มาจากการนับจำนวนเส้นเชื่อมระหว่างสมาชิก ค่าดังกล่าวสามารถหาได้จากสัดส่วนจำนวนเส้นเชื่อมตามจริง และจำนวนเส้นเชื่อมที่เป็นไปได้มากที่สุดตามทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ 3-5 ดัชนีแกมมาจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเครือข่ายเป็นเครือข่ายสมบูรณ์ (Complete Graph) ซึ่งหมายความว่า ทุกสมาชิกสามารถเชื่อมต่อไปยังสมาชิกอื่นได้โดยตรง (ภาพเครือข่ายสมบูรณ์สามารถดูได้ที่หัวข้อ 2.3.2)

$$\gamma = \frac{M}{3N-6} \quad (3-5)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสถานี และ M คือ จำนวนเส้นเชื่อมหรือเส้นทางระหว่างสถานี

ตัวอย่างการคำนวณ

เครือข่ายปี พ.ศ. 2542 มีจำนวนสถานีเท่ากับ 23 สถานี และจำนวนเส้นเชื่อมเท่ากับ 22 สถานี ซึ่งเราสามารถคำนวณดัชนีแกมมาได้ดังนี้

$$\gamma = \frac{22}{3(23) - 6} = 0.349$$

ผลการคำนวณค่าดัชนีแกมมา 0.349 ค่อนข้างต่ำ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูป 3.3 แล้ว จะพบว่าเครือข่ายดังกล่าวมีจำนวนเส้นเชื่อมไม่มากนัก และห่างจากความเป็นเครือข่ายสมบูรณ์มาก

3.4.3 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย

เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย (S) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงระดับของความเป็นระเบียบของเครือข่าย (degree of order) (Zhu L., et al., 2016) ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายสามารถคำนวณได้จากสมการ 3-6 โดยค่า S จะอยู่ในช่วง $[0,1]$

$$S = \frac{E_s - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} = \frac{-2 \sum_{i=1}^N l_i \ln l_i - \ln(4(n-1))}{\ln N^2 - \ln(4(n-1))} \quad (3-6)$$

เมื่อ l_i คือ ความสำคัญเชิง degree หรือ สัดส่วนของ degree ของสถานี i เทียบกับผลรวม degree ทั้งหมด ($l_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^N k_i}$)

ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย จะต้องคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Degree Centrality, DC) ของแต่ละสถานีออกมาก่อน (อธิบายการคำนวณค่า DC ในหัวข้อถัดไป) ตาราง 3.6 แสดงผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของเครือข่าย พ.ศ. 2542 และ ค่าความสำคัญของสถานี (l)

- ประสิทธิภาพเอนโทรปีของเครือข่าย (E)

$$E = -2(0.0455 \ln(0.0455) + 0.0455 \ln(0.0455) + \dots + 0.0227 \ln(0.0227)) = 6.1821$$

- ประสิทธิภาพเอนโทรปีต่ำสุดของเครือข่าย (E_{min})

$$E_{min} = \ln(4 \times (23-1)) = 4.4773$$

- ประสิทธิภาพเอนโทรปีสูงสุดของเครือข่าย (E_{max})

$$E_{max} = \ln(23^2) = 6.2710$$

- เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย (S)

$$S = \frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} = \frac{3.0910 - 2.2387}{6.2710 - 2.2387} = 0.9504$$

ผลการคำนวณค่าเอนโทรปีมาตรฐานเท่ากับ 0.9504 ถือว่าค่อนข้างสูง แสดงถึงความไม่เป็นระเบียบของเครือข่ายสูง หมายความว่า รูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายส่วนใหญ่เป็นแบบสถานีต่อพวง ซึ่งมี Degree เท่ากับ 2 ทั้งนี้รูปแบบของเครือข่ายดังกล่าวเข้าใกล้รูปแบบเครือข่ายสุ่มสมบูรณ์ (Completely Uniform Network) มากกว่าเครือข่ายจุดศูนย์กลางเดียว (1-Central Node Network)

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ ค่าความสำคัญ degree (I)

หมายเลขสถานี	สถานี	DC	I
1	สีลม	2	= $2/44 = 0.0455$
2	สุขุมวิท	2	0.0455
3	สวนจตุจักร	1	0.0227
4	อ่อนนุช	1	0.0227
5	พระโขนง	2	0.0455
6	เอกมัย	2	0.0455
7	ทองหล่อ	2	0.0455
8	พร้อมพงษ์	2	0.0455
9	นานา	2	0.0455
10	เพลินจิต	2	0.0455
11	ชิดลม	2	0.0455
12	สยาม	4	0.0909
13	ราชเทวี	2	0.0455
14	พญาไท	2	0.0455
15	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	2	0.0455
16	สนามเป้า	2	0.0455
17	อารีย์	2	0.0455
18	สะพานควาย	2	0.0455
19	สนามกีฬาแห่งชาติ	1	0.0227
20	ราชดำริ	2	0.0455
21	ช่องนนทรี	2	0.0455
22	สุรศักดิ์	2	0.0455
23	สะพานตากสิน	1	0.0227
	ผลรวม DC	44	

3.4.4 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Degree Centrality, DC) หาได้จากการนับจำนวนการเชื่อมต่อทางตรงระหว่างสมาชิกที่สนใจกับสมาชิกอื่น ยกตัวอย่างเช่น เครือข่ายแบบไม่มีทิศทางในรูปที่ 2.1 (หน้า 13) สมาชิกที่ 3 และสมาชิกที่ 6 มีค่า Degree เท่ากับ 2 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 3-7

$$DC_i = \sum_{j \in V} a_{ij} \quad (3-7)$$

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มากขึ้น ผู้วิจัย จึงได้นำสมการสหสัมพันธ์ระหว่าง Degree (Degree Correlation, r) จากสมการ Pearson มาใช้ ดัง แสดงในสมการ 3-8

$$r = \frac{M^{-1} \sum_i j_i k_i - [M^{-1} \sum_i 0.5(j_i + k_i)]^2}{M^{-1} \sum_i 0.5(j_i^2 + k_i^2) - [M^{-1} \sum_i 0.5(j_i + k_i)]^2} \quad (3-8)$$

เมื่อ j_i และ k_i คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของปลายเส้นทางสองด้านของเส้นเชื่อม (edge) i เมื่อ $i=1..M$ ถ้าสถานีที่มี Degree มากเชื่อมต่อกับสถานีที่มี Degree มากด้วย สหสัมพันธ์ของ Degree จะเป็นไปในทิศทางบวก ($r > 0$) ซึ่งหมายความว่า ลักษณะการเชื่อมต่อของสถานีส่วนใหญ่เป็นแบบการเชื่อมต่อภายใน แต่ถ้าหากสถานีที่มี Degree มากเชื่อมต่อกับสถานีที่มี Degree น้อย สหสัมพันธ์ของ Degree จะเป็นไปในทิศทางทางลบ ($r < 0$) หมายความว่า ลักษณะการเชื่อมต่อส่วนใหญ่เป็นแบบขยายออกไปทางชานเมืองรอบนอกตามแนวรัศมี

ตัวอย่างการคำนวณ

ตาราง 3.4 แสดงผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree โดยใช้ข้อมูลจากเมตริกซ์ ประชิต A ถ้าต้องการหาค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสถานี i ให้หาผลรวมในทุกคอลัมน์ $j=1..23$ ของแถว i เช่น ที่สถานีอ่อนนุช ($i=4$)

$$DC_{i=4} = 0+0+0+0+1+0+0+\dots+0 = 1$$

ดังนั้น ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสถานีอ่อนนุช ($i=4$) มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า สถานีอ่อนนุชมีเส้นทางเชื่อมต่อทางตรงเส้นทางเดียว คือ เชื่อมต่อกับสถานีพระขนิ่ง ($j=5$)

3.4.5 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector (Eigenvector centrality, EC) เป็นการพิจารณา Degree ของสมาชิกเพื่อนบ้าน ซึ่งหมายรวมถึงอิทธิพลของสมาชิกเพื่อนบ้านที่มีผลต่อสมาชิกที่สนใจ ด้วย สมการ 3-11 แสดงการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลางดังกล่าว (Bonacich P. & Lloyd P., 2001)

$$x_i = c \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \quad (3-11)$$

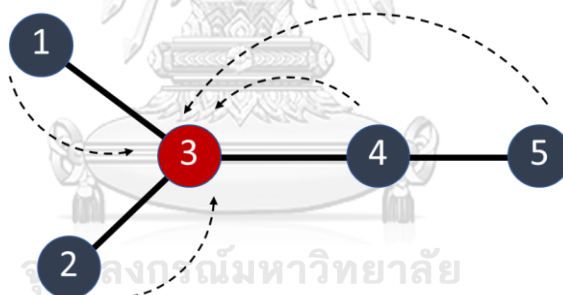
เมื่อ

x_i คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของสมาชิก i

a_{ij} คือ ค่าการเชื่อมต่อจากเมตริกซ์ประชิด (adjacency matrix)

x_{ij} คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

แนวคิดของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector เริ่มต้นมาจากหลักการง่ายๆ ว่า ถ้าหากเรา รู้จักคนที่มีชื่อเสียงหรือมีอิทธิพลมาก เราก็จะมีแนวโน้มที่จะมีอิทธิพลมากตามไปด้วย ส่วนในมุมมอง ของขนส่งมวลชนทางราง สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector มาก หมายถึงสถานีที่มีอยู่ ติดกับสถานีที่มีการเชื่อมต่อมากๆ โดยเฉลี่ยทั่วทั้งเครือข่าย รูปที่ 3.5 จะเป็นแสดงภาพการให้แบ่ง คะแนนของ Degree จากสถานีอื่นๆ มายังสมาชิกหมายเลข 3 ตัวอย่างของขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร เช่น สถานีราชเทวีที่ตัวมันเองอาจมีความสำคัญ Degree ค่อนข้างน้อย แต่เมื่อได้รับ อิทธิพลจากสถานีสยามที่มีความสำคัญ Degree สูง สถานีราชเทวีจะได้รับความสำคัญจากสถานีสยาม มาด้วย แต่สถานีหนึ่งๆ จะไม่ได้รับความสำคัญกับแค่สถานีที่อยู่ติดกับมันเท่านั้น แต่จะได้รับจากสถานี อื่นๆ ทั้งเครือข่ายโดยเฉลี่ย



รูปที่ 3.5 แนวคิดการหาค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของสมาชิกที่ 3

3.4.6 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness (Closeness centrality, CC) หาได้จากการนับผลรวม ของจำนวนการเชื่อมต่อระหว่างสมาชิกทั้งหมด ดังแสดงในสมการ 3-10

$$CC_i = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \in V} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3-10)$$

เมื่อ CC_i คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของสมาชิก i d_{ij} คือ จำนวนเส้นทางที่น้อย ที่สุดที่ใช้เดินทางจากสมาชิก i ไปสถานี j และ N คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมดบนเครือข่าย จากสมการ

ถ้าหากค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness มาก แสดงว่าสถานีนี้นั้นมีความสำคัญในเชิงการเชื่อมต่อที่รวดเร็วมากด้วย

สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness มาก แสดงว่าเป็นสถานีที่มีความใกล้ชิดกับสถานีอื่นๆ มากด้วย โดยพิจารณาจากระยะทางในทุกการเดินทางที่ออกจากสถานีนั้นๆ หรืออาจเรียกสถานีนั้นว่า “สถานีที่ไปไหนก็ใกล้” ซึ่งบริเวณที่มีลักษณะดังกล่าวมักเป็นจุดศูนย์กลางเมือง หรือจุดศูนย์กลางเครือข่าย ซึ่งเป็นจุดที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินทางของเครือข่าย จึงมีหลายงานวิจัยปรับสมการของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ไปใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของเครือข่ายโดยเฉลี่ยด้วย

ตัวอย่างคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของสถานีอ่อนนุช ($i=4$) ซึ่งต้องคำนวณจากเมตริกซ์ระยะทาง D (ตาราง 3.3) และสมการที่ 3-10

$$CC_{i=4} = \frac{1}{23(23-1)} \left(\frac{1}{10.7} + \frac{1}{5.5} + \frac{1}{10.5} + 0 + \frac{1}{1.5} + \frac{1}{2.3} + \dots + \frac{1}{13.5} \right) = 0.01337$$

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness จะไม่ถูกคำนวณ เมื่อสถานีต้นทาง (i) และสถานีปลายทาง (j) เป็นสถานีเดียวกัน ดังนั้นที่ $j=4$ จึงมีค่า $1/d_{ij} = 0$

3.4.7 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness

แนวคิดของค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มาจากในแต่ละการเดินทางนั้น ไม่ได้มีเพียงต้นทางและปลายทาง แต่ยังต้องผ่านสมาชิกอื่นๆ เพื่อไปยังปลายทางนั้นๆ ด้วย ถึงแม้ว่าบางสมาชิกจะไม่ได้เป็นต้นทางหรือปลายทางที่สำคัญ แต่อาจมีความสำคัญในด้านการเป็นจุดผ่านของการเดินทางเพื่อไปยังสถานีอื่นๆ สูงก็ได้ ในแง่ของระบบขนส่งมวลชนทางรางถ้าหากสถานีที่เป็นทางผ่านเหล่านั้นถูกรบกวน อาทิเช่น การเกิดเหตุจลาจลภายในสถานี อาจจำเป็นต้องมีการปิดเส้นทางการเดินทางที่ผ่านสถานีนั้น ซึ่งทำให้ไม่สามารถเดินทางไปยังจุดหมายปลายทางที่ต้องการได้เช่นกัน

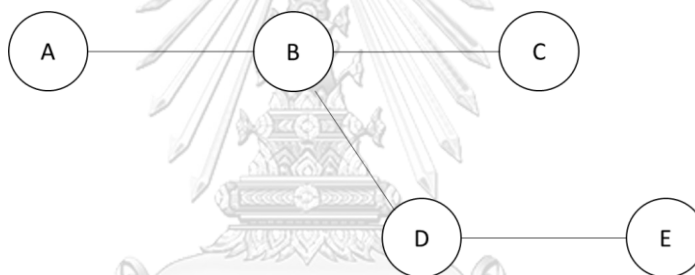
ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Betweenness Centrality, BC) บ่งบอกจำนวนครั้งการเดินทางบนเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่างทุกคู่สมาชิกที่ผ่านสมาชิกที่สนใจ ค่าดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ถึงภาระข้อมูลที่สมาชิกต้องรับไว้ โดยเส้นทางการเดินทางจากทุกคู่สมาชิกใดๆ จะคำนวณได้จากอัลกอริทึมของ Floyd Warshall ดังแสดงในหัวข้อ 3.3 ข้างต้น การคำนวณ BC สามารถคำนวณได้จากสมการ 3-9

$$BC_i = \sum_{s,j \in V} \frac{b_{sj}^i}{b_{sj}} \quad (3-9)$$

เมื่อ BC_i คือค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของสมาชิก i b_{sj}^i คือจำนวนเส้นทางที่น้อยที่สุดทั้งหมดจากสมาชิก s ไป j และ b_{sj}^i คือจำนวนเส้นทางที่สั้นที่สุดจากสถานี i ไปยังสถานี j ทุก i, j ในเซต V ที่ผ่านสมาชิก i ถ้าหากค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มากแสดงว่าสมาชิกดังกล่าวมีความสำคัญในการเป็นตัวกลางการผ่านของเส้นทางมาก

ตัวอย่างการคำนวณ

ผลจากการคำนวณเส้นทางที่สั้นโดยสั้นที่สุด โดยใช้อัลกอริทึมของ Floyd Warshall (หัวข้อ 3.4.2) นอกจากจะได้ระยะทางระหว่างคู่สถานีแล้ว ยังสามารถเก็บสถานีที่เป็นเส้นทางผ่านได้ด้วย เพื่อให้ง่ายต่อการยกตัวอย่าง รูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างเครือข่าย โดยมีจำนวนสมาชิก 4 สมาชิก และให้ระยะทางระหว่างทุกสถานีเท่ากันทั้งหมด



รูปที่ 3.5 เครือข่ายตัวอย่างสำหรับแสดงตัวอย่างการคำนวณ

ตารางที่ 3.7 เส้นทางที่สั้นที่สุดทั้งหมดของเครือข่ายตัวอย่าง

สถานีต้นทาง	สถานีปลายทาง	เส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path)
A	B	A-B
A	C	A-B-C
A	D	A-B-D
A	E	A-B-D-E
B	C	B-C
B	D	B-D
B	E	B-D-E
C	D	C-B-D
C	E	C-B-D-E
D	E	D-E

จากตารางที่ 3.7 เมื่อเราได้เส้นทางผ่านระหว่างทุกคู่สถานีแล้ว เราจะต้องทำการนับจำนวนจำนวนสมาชิกที่เป็นทางผ่านของการเดินทาง เช่น ถ้าต้องการหาค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของสถานี A จะต้องพิจารณาทุกคู่การเดินทางว่า มีสถานี A อยู่บนเส้นทางกี่ครั้ง ตาราง 3.8 แสดงผลการนับจำนวนทางผ่านของแต่ละสถานี และค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายตัวอย่าง จะเห็นว่าสถานี B เป็นสถานีที่ต้องรองรับการเดินทางมากที่สุด

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายตัวอย่าง

สถานี	จำนวนครั้งการเป็นทางผ่าน	ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness
A	4	$= 4/27 = 0.1481$
B	9	0.3333
C	4	0.1481
D	6	0.2222
E	4	0.1481
ผลรวมจำนวนครั้งการเป็นทางผ่าน	27	

ตารางที่ 3.9 สรุปตัวชี้วัดเครือข่ายสำหรับการวิเคราะห์เครือข่ายที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวชี้วัด	ตัวแปร	การแปลความจากตัวชี้วัด	ระดับการวิเคราะห์
ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย	Dia	การกระจายระยะการเดินทางของเครือข่าย	เครือข่าย
ดัชนีแกมมา	γ	ความสามารถในการเชื่อมต่อของเครือข่าย โดยพิจารณาจำนวนเส้นเชื่อม	เครือข่าย
มาตรฐานเอนโทรปีของเครือข่าย	S	ความเป็นไม่ระเบียบของเครือข่าย	เครือข่าย
ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree	DC	การเป็นตัวกลางการเชื่อมต่อโดยตรงกับสมาชิกเพื่อนบ้าน	สมาชิก
ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness	BC	ภาระในการรองรับการเดินทางของสมาชิก	สมาชิก
ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness	CC	ความสามารถในการสร้างความใกล้ชิดระหว่างสมาชิก	สมาชิก
ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector	EC	การได้รับอิทธิพลจากสมาชิกเพื่อนบ้าน	สมาชิก

3.5 การพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอด

เป้าหมายของการพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอด คือ การระบุเมตริกซ์ W ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ $W = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ เมื่อ w_1, w_2, w_3, w_4 คือ น้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree, Eigenvector, Betweenness, และ Closeness ที่ทำการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) แล้ว สมการ 3-12 แสดงการให้น้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดเพื่อสร้างตัวชี้วัดรวบยอด

$$COM_i = w_1 NDC_i + w_2 NEC_i + w_3 NCC_i + w_4 NBC_i \quad (3-12)$$

เมื่อ COM_i คือ ค่าความสำคัญรวบยอดของสถานี i และ NDC_i, NEC_i, NCC_i และ NBC_i คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree, Eigenvector, Closeness, และ Betweenness ของสถานี i ที่ทำการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

เนื่องจากค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดมีความหมายแตกต่างกัน การสร้างตัวชี้วัดรวบยอดจึงจำเป็นต้องปรับค่าดังกล่าวให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันก่อนนำมาให้น้ำหนัก โดยการนำค่าความเป็นศูนย์กลางของแต่ละสถานี มาหารด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางที่มากที่สุดบนเครือข่ายนั้นๆ ซึ่งจะส่งผลให้สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางมากที่สุดบนเครือข่ายนั้นๆ มีค่าความเป็นศูนย์กลางเท่ากับ 1

ทั้งนี้ การพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดนั้น มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อสร้างตัวชี้วัดที่สามารถใช้ในการเรียงลำดับสถานีที่มีความสำคัญด้านประสิทธิภาพเครือข่าย (Network Efficiency) และการสร้างตัวชี้วัดที่ใช้ในการเรียงลำดับสถานีที่มีความสำคัญด้านการแพร่กระจายผลกระทบ (Spreading Effect) โดยเครือข่ายแต่ละปี พ.ศ. จะได้ค่าของ W ออกมาสองชุด สำหรับแต่ละวัตถุประสงค์

3.5.1 ความสำคัญด้านประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม

วิธีการหาสถานีที่มีความสำคัญด้านประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวม จะใช้วิธีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย ซึ่งมีแนวคิดมาจากการปิดการเชื่อมต่อสถานี ทั้งนี้การปิดเส้นเชื่อมรอบสถานีที่ถูกปิดนั้น จะทำให้สถานีดังกล่าวขาดการเชื่อมต่อการเดินทางไปยังสถานีอื่นๆ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมต่อลดลงในที่สุด สมการ 3-13 แสดงสมการการคำนวณผลรวมประสิทธิภาพเครือข่ายโดยรวมหลังการรบกวน

$$\text{Eff}(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} \frac{1}{d_{ij}} \quad \text{for } i \neq j \quad (3-13)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสมาชิกทั้งหมดบนเครือข่าย และ d_{ij} คือ ระยะทางที่สั้นที่สุดจากสมาชิก i ไปยังสมาชิก j เมื่อการเชื่อมต่อของสมาชิก i ถูกตัดขาดจะทำให้พจน์ $1/d_{ij} = 0$

สำหรับลำดับขั้นการปิดการเชื่อมต่อสถานี จะดำเนินการตามค่าตัวชี้วัดรวบยอดจากมากไปน้อย เป็นจำนวน 50% ของจำนวนสถานีทั้งหมด โดยมีลำดับสำหรับการคำนวณ ดังนี้

1. เตรียมข้อมูลค่าความเป็นศูนย์กลางทั้ง 4 ชนิด ของแต่ละสถานี
2. เลือกชุดของการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางที่ปรับบรรทัดฐานแล้วแต่ละชนิด (W) ตั้งแต่ $[0,1]$ ตามสมการ 3-12 โดยที่ $w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$
3. คำนวณค่าตัวชี้วัดรวบยอดของแต่ละสถานี แล้วเรียงลำดับสถานีที่มีค่าดังกล่าวจากมากไปน้อย
4. ปิดเส้นทางการเชื่อมต่อของสถานีที่มีค่าความสำคัญมากที่สุดกับสถานีเพื่อนบ้าน ด้วยการตัดเมตริกซ์ประชิด (A) ในแถวและคอลัมน์ของสถานีที่ถูกปิด

5. คำนวณค่าการลดลงของประสิทธิภาพ โดยใช้ค่าประสิทธิภาพเริ่มต้น ลบออกด้วยค่าประสิทธิภาพที่คงเหลือ
6. ทำการปิดการเชื่อมต่อสถานีตาม ข้อที่ 4 ที่ละสถานีจนครบ 50% ของสถานีทั้งหมด
7. หาผลรวมของค่าการลดลงของประสิทธิภาพทั้งหมด
8. ปรับค่าน้ำหนักตามข้อ 2 ใหม่อีกครั้ง จนครบชุดของการให้น้ำหนัก
9. เลือกชุดของการให้น้ำหนัก (W) ที่ให้ค่าผลรวมการลดลงของประสิทธิภาพมากที่สุด เป็นคำตอบ

ตารางที่ 3.10 อัลกอริทึมเทียมของการคำนวณประสิทธิภาพเครือข่าย

1	Input: A Network $G=(V,A)$ and indicators value of all stations
2	Sort all stations from the largest to the smallest value
3	Calculate Initial Network Efficiency
4	Initial iteration ($t = 0$)
5	For i to %removed station in S
6	$t = t+1$
7	Remove station i by cutting row i and column i of the adjacency matrix
8	Calculate Network Efficiency
9	Mark the reduced value (t) as Initial efficiency – Remaining Network
10	efficiency
11	end
12	Sum the reduced value of all iterations t
13	Output: sum of the reduced Network efficiency

3.5.2 ความสำคัญด้านการแพร่กระจายผลกระทบ

ในการหาความสำคัญด้านการแพร่กระจายผลกระทบ จะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนย่อยดังนี้

- การคำนวณหาจำนวนการแพร่กระจายผลกระทบของแต่ละสถานีผ่านแบบจำลอง SIR (Susceptible-Infected-Recovery)
- หาชุดน้ำหนัก (เมตริกซ์ W) ที่สอดคล้องกับผลจากแบบจำลอง SIR มากที่สุด ผ่านค่าสัมประสิทธิ์ของเคนดัลล์ (Kendall tau's correlation)

3.5.2.1 แบบจำลอง SIR

วิธีหาความสำคัญของสถานที่ที่มีการแพร่กระจายผลกระทบมาก มีแนวคิดมากจากการแพร่กระจายของโรคระบาด ซึ่งจะทำให้การค้นหาสมาชิกบนเครือข่ายที่แพร่กระจายเชื้อโรคได้มากที่สุดผ่านแบบจำลอง SIR โดยกำหนดให้สมาชิกบนเครือข่ายมี 3 สถานะคือ สถานะปกติ (Normal State) สถานะต้องสงสัย (Susceptible State) และสถานะติดเชื้อ (Infected State) สถานะทั้งสามสามารถเปลี่ยนกลับไป-มาได้ โดยสมาชิกจะเปลี่ยนจากสถานะต้องสงสัยเป็นสถานะติดเชื้อ ด้วยโอกาสเท่ากับความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ (Infection Probability) ส่วนสถานะติดเชื้อจะกลับเป็นสถานะปกติทันทีเมื่อเข้าสู่ iteration ใหม่ ดังนั้น สถานะติดเชื้อจะเปลี่ยนกลับเป็นสถานะต้องสงสัยหรือสถานะปกติได้เสมอ

สำหรับลำดับของอัลกอริทึมในการคำนวณแบบจำลอง SIR มีรายละเอียด ดังนี้

1. ให้สถานที่ที่ต้องการหาความสำคัญ มีสถานะติดเชื้อเป็นสถานะแรก
2. ให้สถานที่เพื่อนบ้านของสถานที่ติดเชื้อทั้งหมดมีสถานะต้องสงสัย
3. ทำการสุ่มเลขตั้งแต่ 0-1 ตามจำนวนของสถานที่ต้องสงสัย
4. ถ้าหากสถานียหมายเลขสุ่มของสถานที่ต้องสงสัยมีค่า น้อยกว่า ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ (α) ให้สถานียดังกล่าวเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะติดเชื้อ ถ้าหากหมายเลขสุ่มของสถานที่ต้องสงสัยมีค่า มากกว่า ความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ ให้สถานียนั้นเปลี่ยนสถานะเป็นสถานะปกติ
5. ทำการนับจำนวนสถานที่ติดเชื้อทั้งหมด เก็บเป็นค่า F
6. ถ้าหากในรอบการคำนวณยังมีสถานที่ติดเชื้ออยู่ (ค่า F มากกว่า 0) ให้ทำการคำนวณข้อ 2-5 ใหม่อีกครั้ง แต่ถ้าหากภายในรอบการคำนวณไม่มีสถานที่ติดเชื้ออยู่เลย ($F=0$) ให้จบการคำนวณ
7. ทำซ้ำข้อ 1-7 อีกครั้ง ทั้งหมด 1,000 รอบ แล้วนำค่า F ในแต่ละรอบมาเฉลี่ย จะได้ค่าความสำคัญของสถานที่ให้ติดเชื้อเป็นสถานะแรก

ในเบื้องต้นจะใช้ค่าความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ (transfers rate, α) เท่ากับ Epidemic Threshold (α_c) ซึ่งเป็นจุดที่มีการนิยามว่าเป็นจุดที่มีจำนวนผู้ติดเชื้อเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรือจุดเริ่มต้นของการแพร่ระบาด ในงานวิจัยนี้จะใช้ $\alpha = \langle k \rangle / \langle k \rangle^2$ เมื่อ $\langle k \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ย Degree ของเครือข่าย

ตารางที่ 3.11 อัลกอริทึมเทียมของแบบจำลอง SIR ที่ใช้ในงานวิจัย

1	Input: A Network $G = (V,A)$ and inflection probability (α)
2	for calculation round = 1 to 1000
3	for all nodes $i \in V$ do $d[i, i] = 0$
4	mark station i as <i>Infected</i>
5	set initial iteration $t = 0$, $F(t) =$ large number
6	while the number of earliest inflected station in infected list > 0 ($F(t) > 0$)
7	$t = t+1$
8	Reset <i>Susceptible</i> list
9	for station i in <i>Infected</i> list
10	for neighbor j of i
11	mark station j as <i>Susceptible</i>
12	end
13	end
14	Reset <i>infected</i> list
15	eliminate repeated station in <i>Susceptible</i> list
16	for all k susceptible nodes
17	If k is <i>Infected</i> with probability α
18	mark station k as <i>inflected</i>
19	$F(t) = F(t) + 1$
20	end
21	end
22	end
23	end
24	end
25	Calculate the average $F(t)$ of station i
26	Output: number of average infected nodes for all stations in the Network

จะเห็นได้ว่าการคำนวณค่าความสำคัญผ่านแบบจำลอง SIR จะได้จำนวนการติดเชื้อของของสถานที่ที่ติดเชื้อเป็นสถานีแรก ดังนั้นเราสามารถเรียงลำดับสถานีที่มีค่า F จากมากไปน้อยได้ ในขั้นตอนต่อไปเราจะใช้ผลจากการคำนวณจากแบบจำลอง SIR ไปหาชุดน้ำหนักที่เหมาะสมในการสร้างตัวชี้วัดรวบยอดด้านการแพร่กระจายผลกระทบ ผ่านค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์

3.5.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์ (Kendall's tau correlation coefficient, τ) ใช้ในการแสดงความสอดคล้องในการเรียงลำดับเปรียบเทียบระหว่าง 2 วิธี โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ τ ทดสอบความสอดคล้องในการเรียงลำดับของวิธีที่ทดสอบกับแบบจำลอง SIR

ค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนดัลล์จะอยู่ในช่วง $[-1,1]$ โดย τ แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเรียงลำดับแบบทางเดียวกันหรือตรงข้ามกัน ถ้าค่า τ เท่ากับ 1 แสดงว่าการเรียงลำดับทั้งสองวิธีเหมือนกันทั้งหมด แต่กลับกันหากค่า τ เท่ากับ -1 แสดงว่าการเรียงลำดับทั้งสองวิธีสวนทางกันทั้งหมด ดังนั้นค่า τ ยิ่งเข้าใกล้ 1 จะสื่อให้เห็นถึงการเรียงลำดับระหว่างวิธีที่พิจารณากับประสิทธิภาพเครือข่ายหรือจากแบบจำลอง SIR มีความสอดคล้องกันมาก ทั้งนี้หากกำหนดให้ X คือ เซ็ตของการเรียงลำดับจากมากไปน้อยด้วยวิธีที่ต้องการทดสอบ และ Y คือ เซ็ตของการเรียงลำดับจากมากไปน้อยด้วยแบบจำลอง SIR

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{0.5n(n-1)} \quad (3-14)$$

เมื่อ

n_c คือ จำนวนที่มีการเรียงลำดับสอดคล้องกัน (concordant node)

n_d คือ จำนวนที่มีการเรียงลำดับไม่สอดคล้องกัน (discordant node)

n คือ จำนวนสมาชิกบนเครือข่าย

n_c จะถูกนับจำนวนเมื่อลำดับของการเรียงทั้งสองวิธีเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ $x_i > y_i$, $x_j > y_j$ และ n_d จะถูกนับจำนวนเมื่อการเรียงลำดับทั้งสองวิธีไม่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ $x_i > y_i$ และ $x_j < y_j$ หรือ $x_i < y_i$ และ $x_j > y_j$ อย่างไม่ก็ติ หากลำดับในเซตใดเซตหนึ่งมีค่าเท่ากัน จะไม่จัดอยู่ในทั้ง n_c และ n_d

ตัวอย่างการคำนวณ

ตาราง 3.12 แสดงตัวอย่างข้อมูลสมมติ 2 ชุด ดังนี้

ตารางที่ 3.12 ตัวอย่างชุดข้อมูลสำหรับแสดงการคำนวณ Kendall Tau's Correlation

อันดับ	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
1	สถานี A	สถานี A
2	สถานี B	สถานี D
3	สถานี C	สถานี C
3	สถานี D	สถานี B

จากตัวอย่างข้อมูลในตารางที่ 3.12 แต่ละชุดมีจำนวนข้อมูลเท่ากับ 4 ($n=4$) ซึ่งจะต้องเทียบความสอดคล้องทั้งหมด 6 คู่ คือ (A,B) (A,C) (A,D) (B,C) (B,D) (C,D)

- เทียบระหว่าง (A, B) ชุดที่ 1 และ 2 อันดับของ A มากกว่า B ทั้งคู่ ดังนั้น การเทียบระหว่าง (A,B) ถือเป็น concordant pair
- เทียบระหว่าง (A,C) ชุดที่ 1 และ 2 อันดับของ A มากกว่า C ทั้งคู่ ดังนั้น การเทียบระหว่าง (A,C) ถือเป็น concordant pair
- เทียบระหว่าง (A,D) ชุดที่ 1 และ 2 อันดับของ A มากกว่า C ทั้งคู่ ดังนั้น การเทียบระหว่าง (A,C) ถือเป็น concordant pair
- เทียบระหว่าง (B,C) ชุดที่ 1 ค่า B มากกว่า C แต่ชุดที่ 2 อันดับของ B เท่ากับ C จะไม่ถือว่าคู่ (B,C) เป็น concordant pairs หรือ discordant pairs
- เทียบระหว่าง (B,D) ชุดที่ 1 ให้อันดับของ B มากกว่า D แต่ชุดที่ 2 ให้อันดับของ B น้อยกว่า D ดังนั้น การเทียบระหว่าง (A,C) ถือเป็น discordant pair
- เทียบระหว่าง (C,D) ชุดที่ 1 ให้อันดับของ C เท่ากับ D และ ชุดที่ 2 ให้อันดับของ C น้อยกว่า จะไม่ถือว่าคู่ (C,D) เป็น concordant pairs หรือ discordant pairs

จากการเทียบคู่อันดับทั้ง 6 คู่ของชุดข้อมูลตัวอย่าง จะได้จำนวน concordant pairs (n_c) = 3 และ discordant pairs (n_d) = 1 จะได้ Kendall tau correlation เท่ากับ 0.3333 ดังแสดงในสมการด้านล่าง

$$\tau = \frac{3-1}{0.5 \times 4(4-1)} = 0.3333$$

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณของชุดตัวอย่าง จะพบว่าความสัมพันธ์ในการเรียงลำดับของข้อมูลชุดที่ 1 และชุดที่ 2 มีความสอดคล้องกันในระดับต่ำ ($\tau < 0.5$) อ้างอิงจากตารางที่ 2.2 (หน้า 28)

3.5.3 ค่า Monotonicity

อีกหนึ่งการทดสอบผลการเรียงลำดับความสำคัญ คือ ค่า Monotonicity (M) ที่จะช่วยอธิบายเกี่ยวกับความสามารถในการแบ่งแยกการเรียงลำดับสมาชิก โดยเราจะพิจารณาจากการให้ค่าซ้ำของวิธีที่ต้องการทดสอบ ยิ่งจำนวนสมาชิกมีลำดับซ้ำกันน้อย วิธีการเรียงลำดับนั้นจะเป็นวิธีการเรียงลำดับที่ดี สมการ 3-15 แสดงสมการการคำนวณค่า Monotonicity

$$M(R) = \left(1 - \frac{\sum_{r \in R} n_r(n_r - 1)}{n(n-1)} \right)^2 \quad (3-15)$$

เมื่อ R คือ เวกเตอร์ลำดับของสถานี n คือ จำนวนสถานีสทั้งหมด และ n_r คือ จำนวนสถานีสที่มีลำดับ r เหมือนกัน โดยที่ M จะอยู่ในช่วง $[0,1]$ ถ้าค่า M เข้าใกล้ 1 แสดงว่าการเรียงลำดับนั้นมีความซ้ำซ้อนต่ำ แต่กลับกันถ้าค่า M เข้าใกล้ 0 แสดงว่าการเรียงลำดับมีความซ้ำซ้อนสูง

ตัวอย่างการคำนวณ 1

จากชุดข้อมูลตัวอย่างที่ 1 (ตาราง 3.12 หน้า 52) ซึ่งมีจำนวนข้อมูล 4 ข้อมูล ($n=4$) แต่มีจำนวนเซตลำดับเท่ากับ 3 คือ $R = (1,2,3)$

ที่ $R=1$	มีลำดับของสถานีส A เพียงสถานีสเดียว	ดังนั้น $n_{r=1} = 1$
ที่ $R=2$	มีลำดับของสถานีส B เพียงสถานีสเดียว	ดังนั้น $n_{r=2} = 1$
ที่ $R=3$	มีลำดับของสถานีส C และ สถานีส D	ดังนั้น $n_{r=3} = 2$

ค่า Monotonicity (M) ของข้อมูลดังกล่าวเท่ากับ

$$M(R) = \left(1 - \frac{1(1-1)+1(1-1)+2(2-1)}{4(4-1)} \right)^2 = 0.6944$$

ตัวอย่างการคำนวณ 2

จากชุดข้อมูลค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542 จากผลตามตารางที่ 3.6 (หน้า 42) จะพบว่าที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree เท่ากับ 1 มีจำนวน 4 สถานี, ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree เท่ากับ 2 มีจำนวน 18 สถานี, และค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree เท่ากับ 4 มีจำนวน 1 สถานี ถ้าหากนำค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มาใช้ในการเรียงลำดับ จะได้ค่า Monotonicity ดังนี้

$$M(R) = \left(1 - \frac{4(4-1) + 18(18-1) + 1(1-1)}{23(23-1)} \right)^2 = 0.1380$$

ค่า $M = 0.1380$ ถือว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ (เข้าใกล้ 0) ดังนั้น ข้อมูลชุดค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของแต่ละสถานีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางปี พ.ศ. 2542 ไม่สามารถนำไปใช้ในการเรียงลำดับความสำคัญของสถานีในเครือข่ายดังกล่าวได้ เนื่องจากมีความซ้ำซ้อนของการเรียงลำดับมากเกินไป

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 แนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร

ลำดับการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางไม่สามารถเป็นไปตามต้นแบบการขยายที่ให้ความสามารถในการเข้าถึงสูงสุดในทุกช่วงลำดับการขยายได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านรูปแบบของผังเมือง ทำให้ต้องมีการวางลำดับการพัฒนาตามความเหมาะสมของผังเมือง และนโยบายของหน่วยงานวางแผนในแต่ละเมืองด้วย เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครก็เช่นกัน เพื่อความเข้าใจในลำดับการขยายของเครือข่ายดังกล่าว ตารางที่ 4.1 แสดงเส้นทางทั้งหมดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง และประเภทของสายให้บริการ ในขณะที่รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพแนวคิดอย่างง่ายของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร

ตารางที่ 4.1 แนวคิดเส้นทางให้บริการของเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร

ประเภท	สายให้บริการ	รายละเอียด
เส้นทางรัศมี	สายสีเขียวอ่อน	เชื่อมต่อฝั่งเหนือ
	สายสีเขียวเข้ม	เชื่อมต่อฝั่งใต้
	สายสีม่วง	เชื่อมต่อปริมณฑล และตะวันตก
	สายสีส้ม	เชื่อมต่อฝั่งตะวันตก และตะวันออก
เส้นทางวงแหวน	สายสีน้ำเงิน	วงแหวนชั้นใน (เต็มวง)
	สายสีชมพู	วงแหวนชั้นนอก รองรับการเดินทางทิศเหนือ
	สายสีเหลือง	วงแหวนชั้นนอก รองรับการเดินทางทิศตะวันออก
รถไฟฟ้าชานเมือง	สายสีแดงอ่อน	เชื่อมต่อฝั่งตะวันตก-ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ
	สายสีแดงเข้ม	เชื่อมต่อฝั่งเหนือ (ดอนเมือง) และท่าอากาศยาน
	สายท่าอากาศยาน	เชื่อมต่อกลางเมือง และท่าอากาศยาน

ตารางที่ 4.1 แนวคิดเส้นทางให้บริการของเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร (ต่อ)

ประเภท	สายให้บริการ	รายละเอียด
เส้นทางเชื่อมต่อภายใน	สายสีฟ้า	เส้นทางเชื่อมต่อภายใน ระหว่างวงแหวนชั้นใน
	สายสีเทา	เส้นทางเชื่อมต่อภายใน ตะวันออก-ใต้
	สายสีทอง	เส้นทางเชื่อมต่อภายใน ระหว่างสายสีเขียวอ่อนกับสายสีม่วง
	สายสีน้ำตาล	เส้นทางเชื่อมต่อภายใน ระหว่าง ตะวันตก-ตะวันออก



รูปที่ 4.1 แผนภาพแนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร

(ก) เส้นทางรัศมี (ข) เส้นทางวงแหวน (ค) เส้นทางรถไฟชานเมือง

ประเภทของแนวเส้นทางบนเครือข่ายประกอบไปด้วย 3 รูปแบบ คือ เส้นทางรัศมี (Radial line) เส้นทางวงแหวน (Ring line) เส้นทางรถไฟชานเมืองและเส้นทางเชื่อมต่อภายใน เส้นทางรัศมีเป็นเส้นทางเชื่อมต่อจากกลางเมืองออกไปในแนวรัศมีในทางทิศเหนือ (สายเขียวอ่อน) ทิศใต้ (สายสีเขียวเข้ม) ทิศตะวันตก (สายสีม่วง) และทิศตะวันออก (สายสีส้ม) เส้นทางวงแหวนมีไว้เพื่อเชื่อมต่อการเดินทางในแต่ละเส้นทางรัศมี ซึ่งแนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร มีทั้งวงแหวนรอบใน และวงแหวนรอบนอก สำหรับวงแหวนชั้นในจะมีลักษณะเป็นวงแหวนเต็มวง ห่างจากจุดศูนย์กลางเศรษฐกิจประมาณ 2-5 กิโลเมตร ส่วนวงแหวนรอบนอกจะเป็นลักษณะไม่เต็มวง อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเศรษฐกิจประมาณ 10-20 กิโลเมตร ส่วนเส้นทางรถไฟชานเมือง มีไว้เพื่อเชื่อมต่อชานเมืองกับท่าอากาศยานสุวรรณภูมิและตอนเมือง โดยมีเส้นเชื่อมต่อภายในอุทกวงไว้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงระหว่างแต่ละเส้นทางให้บริการ

แนวคิดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครดังกล่าว อยู่ในแผนแม่บทการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2553-2572) แต่มีการปรับเวลาการขยายเส้นทาง

เนื่องจากมีความล่าช้าในการก่อสร้างเรื่อยมา โดยตาราง ก.1 ในภาคผนวกแสดงลำดับการเปิด-ปิด ให้บริการของเส้นทางของเครือข่ายดังกล่าวที่มีการปรับเวลาการขยายเรียบร้อยแล้ว

4.2 การวิเคราะห์การพัฒนารูปแบบเครือข่าย

ตาราง 4.1 สรุปผลการคำนวณตัวชี้วัดเครือข่ายทั้ง 7 ชนิดบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง ในกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2542-2572 พร้อมทั้งจำนวนสถานี (N) และจำนวนเส้นเชื่อม (M) โดยตัวชี้วัดในระดับสมาชิกจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนสถานีทั้งหมด

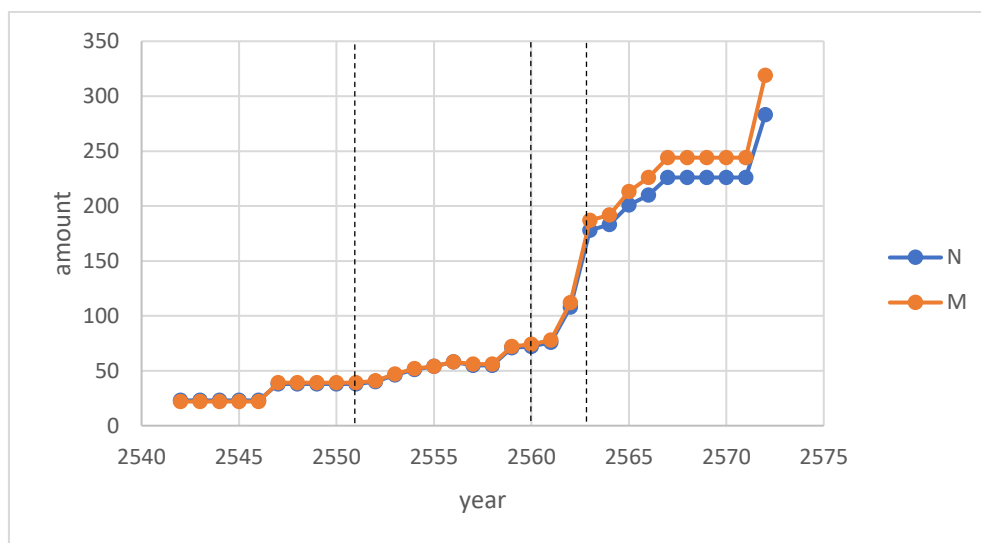
ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณตัวชี้วัดเครือข่าย พ.ศ.2542-2572

พ.ศ.	N	M	Dia (km)	γ	S	DC	EC	CC ($\times 10^3$)	BC ($\times 10^2$)
2542	23	22	15	0.349	0.9504	1.91	0.147	13.37	4.35
2547	38	39	18	0.361	0.9545	2.05	0.118	6.25	2.63
2552	40	41	18	0.361	0.9576	2.04	0.113	4.60	2.50
2553	46	47	35	0.356	0.9539	2.03	0.100	3.66	2.17
2554	51	52	35	0.354	0.9539	2.00	0.091	3.46	1.96
2555	54	54	36	0.346	0.9671	2.04	0.085	2.92	1.96
2556	58	58	39	0.345	0.9611	2.04	0.080	2.60	1.96
2557	55	56	39	0.352	0.9632	2.03	0.084	2.93	1.82
2559	71	72	39	0.348	0.9713	2.03	0.068	1.61	1.41
2560	72	74	55	0.352	0.9753	2.06	0.067	1.82	1.39
2561	79	81	55	0.351	0.9759	2.05	0.061	1.58	1.32
2562	111	115	55	0.352	0.9827	2.07	0.044	0.95	0.93
2563	181	190	63	0.354	0.9830	2.10	0.022	0.44	0.56
2564	186	195	63	0.353	0.9835	2.10	0.021	0.53	0.55
2565	204	216	63	0.356	0.9831	2.12	0.021	0.39	0.50
2566	213	229	63	0.362	0.9827	2.15	0.025	0.38	0.48
2567	229	247	63	0.363	0.9817	2.16	0.021	0.43	0.44
2572	285	323	77	0.379	0.9781	2.27	0.022	0.28	0.35

ตัวชี้วัดระดับเครือข่าย (Network level indicators)

4.2.1 จำนวนสถานี และจำนวนเส้นเชื่อมสถานี

เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเติบโตของเครือข่ายได้อย่างชัดเจน รูปที่ 4.2 แสดงจำนวนสถานี (N) และจำนวนเส้นเชื่อมสถานี (M) ตามแต่ละช่วงเวลา ในที่นี้เราสามารถแบ่งช่วงของการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครออกได้เป็น 4 ช่วง



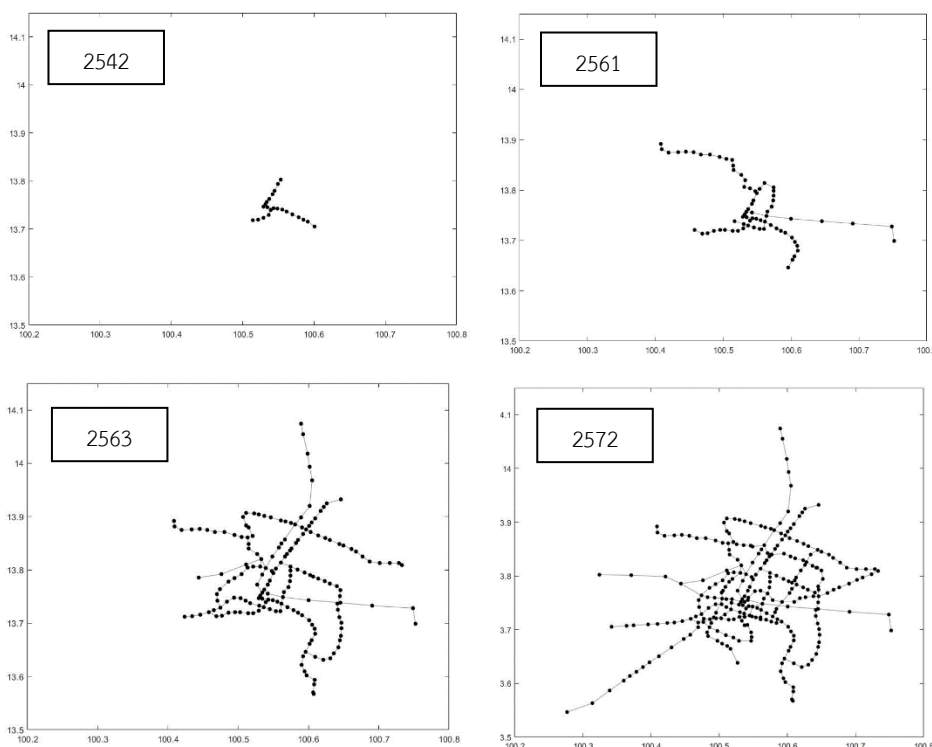
รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงของจำนวนสถานีและเส้นเชื่อมสถานี พ.ศ. 2542-2572

(1) ระยะเวลาที่ 1 (พ.ศ. 2542-2551) เป็นช่วงสิบปีแรกของการเริ่มต้นระบบราง จำนวนสถานีเติบโตขึ้นเล็กน้อยจาก 23 เป็น 40 สถานี ภายในระยะเวลา 10 ปี เหตุการณ์สำคัญของระยะดังกล่าว คือ การเปิดให้บริการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าสายวงแหวน โดยเปิดให้บริการเพียง 1/3 ของวงแหวนทั้งหมด

(2) ระยะเวลาที่ 2 (พ.ศ. 2552-2560) ช่วงถัดมาจำนวนสถานีเพิ่มขึ้นแบบคงที่ ในปีพ.ศ. 2552 มีการอนุมัติแผนพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครระยะ 20 ปี (พ.ศ.2553-2572) ช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ในช่วงดำเนินการของแผนเร่งรัดตามมติ ครม. ซึ่งเปิดให้บริการเส้นทางใหม่ 2 เส้นทาง คือ สายเชื่อมต่อท่าอากาศยาน (ช่วงพญาไท-สุวรรณภูมิ) และ สายรัศมีทางเหนือเชื่อมต่อจากศูนย์กลางออกไปทางทิศเหนือ (สายสีม่วง)

(3) ระยะเวลาที่ 3 (พ.ศ. 2561-2563) ในช่วง 3 ปีนี้เป็นช่วงที่จำนวนสถานีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตามแผนแม่บทการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางระยะ 20 ปี โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2563 มีจำนวนสถานีเพิ่มขึ้นจากการเปิดให้บริการสายรถไฟฟ้าใหม่ถึง 4 สาย ประกอบด้วย สายรัศมี 3 สาย และส่วนต่อขยายสายวงแหวนสีน้ำเงิน

(4) ระยะเวลาที่ 4 (พ.ศ. 2564-2572) ในช่วงปี พ.ศ. 2564-2567 จำนวนสถานีเพิ่มขึ้นแบบคงที่ แต่หลังจากนั้นยังไม่มีกำหนดลำดับการเปิดให้บริการออกมาอย่างชัดเจน จำนวนสถานีจึงมีค่าเท่ากัน ส่วนในปี พ.ศ. 2572 ที่เครือข่ายสมบูรณ์ตามแผนการพัฒนาขนส่งมวลชนทางรางระยะ 20 ปี จะประกอบไปด้วยสถานีจำนวน 285 สถานี ซึ่งคิดเป็นระยะทางรวมประมาณ 508 กิโลเมตร

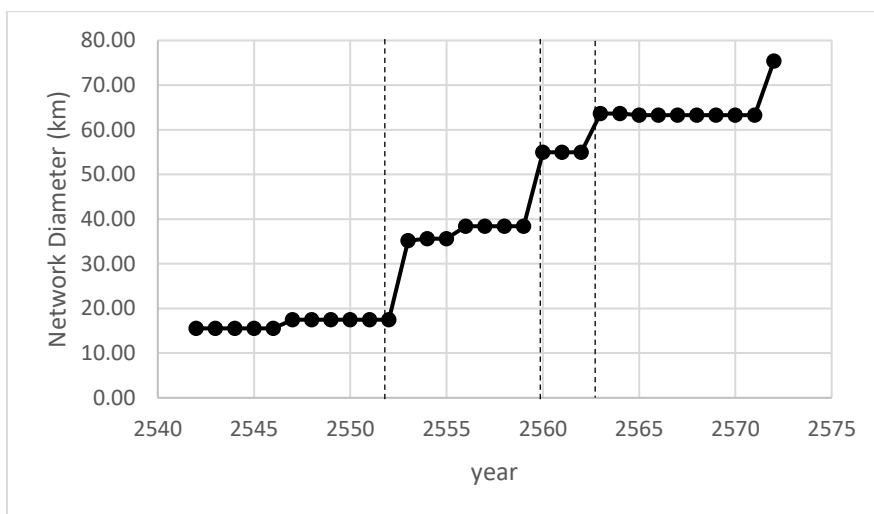


รูปที่ 4.3 การพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2542-2572

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.2 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย

ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network diameter, Dia) แสดงการกระจายระยะการเดินทางของเครือข่าย การเปลี่ยนแปลงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเครือข่ายจะเกิดขึ้นเมื่อมีการขยายเส้นทางต่อจากเส้นทางเดิม หรือเปิดให้บริการสายรถไฟใหม่ การเปลี่ยนแปลงของค่าเส้นผ่านศูนย์กลางในหน่วยกิโลเมตรของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางของกรุงเทพมหานครสามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

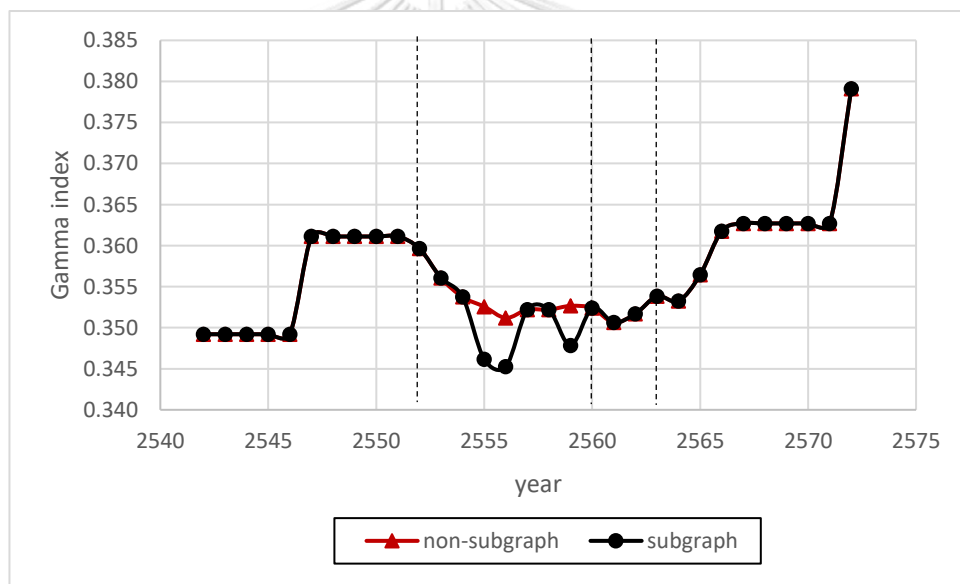
จากการแบ่งเส้นทางการพัฒนาเครือข่ายออกเป็น 4 ช่วง จะพบว่าช่วงระยะที่ 2 เป็นช่วงที่มีการขยายเส้นทางไปยังชานเมือง ทำให้ค่า *Dia* เพิ่มขึ้นแบบก้าวกระโดด โดยเพิ่มขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2553 จากการเปิดให้บริการเส้นทางสายท่าอากาศยาน และก้าวกระโดดอีกครั้งในปี พ.ศ. 2560 ที่มีการเชื่อมต่อเส้นทางระหว่างเส้นทางสายสีม่วงและเครือข่ายหลัก สำหรับในระยะที่ 3 ถึงแม้ว่าจำนวนสถานีจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก แต่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลับไม่ได้เพิ่มขึ้นมากนัก เนื่องจากในระยะดังกล่าวเน้นไปที่การขยายในแนวตะวันตก-ตะวันออก ยกเว้นปี พ.ศ. 2563 ซึ่งมีการเปิดให้บริการเส้นทางสายรัศมีทางเหนือ (สายสีแดงเข้ม) ทำให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 55 (สถานีสุวรรณภูมิ-คลองบางไผ่) เป็น 63 กิโลเมตร (สถานีธรรมศาสตร์-เคหะสมุทรปราการ) และตามแผนการพัฒนา พ.ศ. 2572 เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครจะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 77 กิโลเมตร (สถานีธรรมศาสตร์-มหาชัย)

4.2.3 ดัชนีแกมมา

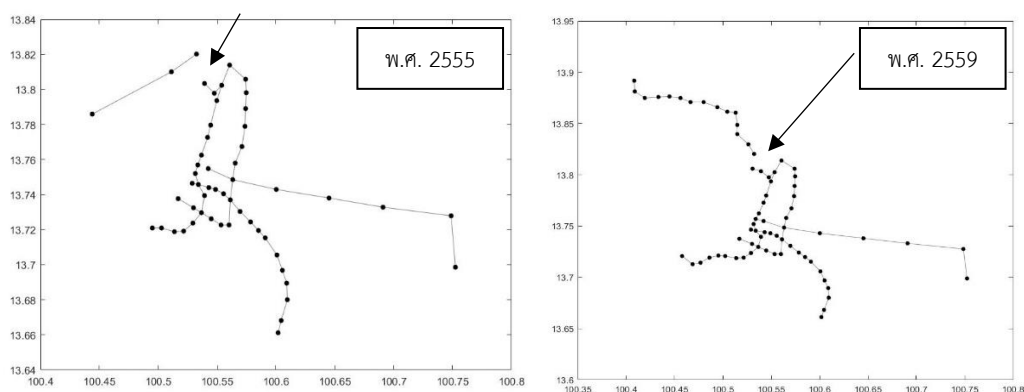
ดัชนีแกมมาเป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนถึงความสามารถการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายโดยพิจารณาจากจำนวนสถานีและจำนวนเส้นเชื่อมที่เป็นไปได้ รูปที่ 4.5 แสดงดัชนีแกมมาตามแต่ละช่วงการพัฒนา

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าดัชนีแกมมามีแนวโน้มไม่ไปในทางเดียวกับจำนวนสถานีที่เพิ่มขึ้นเสมอไป การเปลี่ยนแปลงของดัชนีแกมมาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครค่อนข้างกว้างตัวตามแต่ละช่วงการพัฒนา โดยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนครั้งแรกใน พ.ศ. 2547

จากการเปิดให้บริการบางส่วนของสายวงแหวนสีน้ำเงิน ในระยะที่ 2 ค่าดัชนีแกมมาเริ่มตกลง เนื่องจากการพัฒนาเน้นไปทางการขยายเส้นทางส่วนต่อจากเดิมออกไปในแนวรัศมี รวมถึงพบจุดต่ำสุดของดัชนีแกมมา 2 ตำแหน่งคือ พ.ศ. 2555-2556 และ พ.ศ. 2559 ซึ่งทั้ง 2 ช่วงเกิดการไม่เชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายหลักกับเครือข่ายย่อย (subgraph) ตามรูปที่ 4.6 โดยในปี พ.ศ. 2555 มีการเปิดให้บริการรถไฟฟ้าสายสีแดงอ่อนช่วงตลิ่งชัน-บางซื่อ ซึ่งตามแผนแม่บทการพัฒนาเส้นทางดังกล่าวจะต้องเชื่อมต่อกับเครือข่ายหลักที่สถานีกลางบางซื่อ แต่เส้นทางดังกล่าวยังดำเนินการไม่สำเร็จ รวมถึงมีการผูกสัญญาซื้อขายขบวนรถไฟกับช่วงบางซื่อ-รังสิต ที่ยังดำเนินการไม่เสร็จสิ้น ทำให้ต้องปิดบริการไปในปี พ.ศ.2557 ดัชนีแกมมาจึงกลับขึ้นมามีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในปีดังกล่าว ส่วนในปี พ.ศ. 2559 เกิดเครือข่ายย่อยอีกครั้งที่เส้นทางรถไฟฟ้าสีม่วงช่วงเตาปูน-คลองบางไผ่ ซึ่งในปี พ.ศ. 2560 มีการเชื่อมต่อเส้นทางบางซื่อ-เตาปูน ระหว่างสายสีน้ำเงินและสายสีม่วง ดัชนีแกมมาจึงกลับมา มีค่าสูงขึ้นตามปกติดังเดิม



รูปที่ 4.5 ดัชนีแกมมาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572



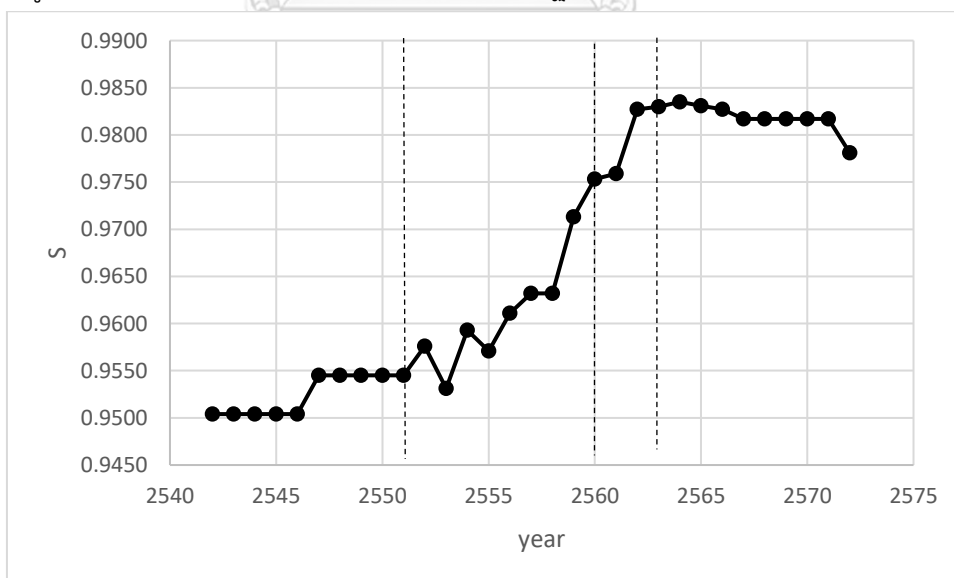
รูปที่ 4.6 เครือข่ายที่มีแนวเส้นทางแยกตัว

ในอนาคต หากการดำเนินการเป็นไปตามแผนการเปิดให้บริการ ในระยะที่ 3 (พ.ศ.2561-2563) และระยะที่ 4 (พ.ศ.2564-2572) ดัชนีแกมมาจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มเดียวกันกับการเพิ่มขึ้นของจำนวนสถานี ยกเว้นในปี พ.ศ.2564 ที่ค่าดัชนีแกมมาลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากการขยายเส้นทางรถไฟสายสีน้ำเงินช่วงบางแค-พุทธมณฑลสาย 4 ซึ่งเป็นการขยายออกไปทางชานเมืองในทิศตะวันตก

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cats O. (2017) ในการวิเคราะห์ขนส่งมวลชนทางรางเมือง Stockholm ประเทศสวีเดน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950-2025 ให้ค่าดัชนีแกมมาอยู่ในช่วง [0.339,0.370] โดยในปีแรกที่มีการเปิดให้บริการเครือข่ายดังกล่าวหรือ ค.ศ. 1950 มีค่าดัชนีแกมมาเท่ากับ 0.350 ใกล้เคียงกับเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร ส่วนในปี ค.ศ. 1967-2010 ค่าดัชนีแกมมาจะต่ำกว่า 0.350 โดยค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.339 เป็นช่วงที่มีการขยายเส้นทางออกไปทางชานเมืองเป็นจำนวนมาก ส่วนตามแผนเครือข่ายสมบูรณ์ของเมือง Stockholm ในปี ค.ศ. 2025 มีค่าดัชนีแกมมาเท่ากับ 0.370 น้อยกว่าแผนเครือข่ายสมบูรณ์ของกรุงเทพมหานครในปี พ.ศ. 2572 (ค.ศ. 2029) คาดว่าโดยภาพรวมแล้วเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครตามแผนการพัฒนาระดับสมบูรณ์จะมีความสามารถในการเข้าถึงมากกว่าเล็กน้อย

4.2.4 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย

รูปที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย พ.ศ. 2542-2572

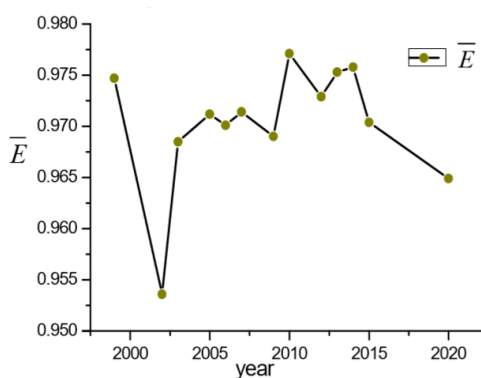


รูปที่ 4.7 เอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

โดยภาพรวมค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายอยู่ในระดับสูง ($S > 0.95$) ซึ่งนำไปสู่ข้อสรุปว่าเครือข่ายดังกล่าวประกอบไปด้วยสถานีต่อพ่วง (Peripheral Node) ที่มีค่า Degree เท่ากับ 2 เป็นส่วนใหญ่ และมีจำนวนสถานีไม่มากที่เป็นสถานีหลัก (Core Node) ซึ่งมีการเชื่อมต่อกับสถานีอื่นมากกว่า 2 สถานี หรืออาจกล่าวได้ว่าความเป็นระเบียบของเครือข่ายเข้าใกล้ลักษณะ Completely Uniform Network มากกว่าลักษณะ 1-Central Node Network (รูปที่ 2.4 หน้า 16)

ในระยะที่ 1 ค่า S สูงขึ้น โดยมีค่าสูงขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2547 ซึ่งมีการเปิดให้บริการสายวงแหวนสีน้ำเงินและการขยายเส้นทางสายสีเขียวอ่อนช่วงสะพานตากสิน-ถนนตากสิน ส่วนในระยะที่ 2 โดยรวมค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก สอดคล้องกับค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางเครือข่ายที่เพิ่มมากขึ้น (หัวข้อ 4.2.2) ซึ่งตีความได้ว่า ระยะนี้เป็นระยะที่มีการขยายเครือข่ายออกไปทางชานเมืองมากขึ้น โดยเฉพาะในปี พ.ศ. 2552 (สะพานตากสิน-วงเวียนใหญ่) 2554 (อ่อนนุช-แบริ่ง) 2556 (วงเวียนใหญ่-บางหว้า) และ 2559 (เตาปูน-คลองบางไผ่) ส่วนในระยะที่ 3 ค่าเอนโทรปีมาตรฐานเพิ่มขึ้นสูงในปี พ.ศ. 2562 ที่มีการเปิดให้บริการสายวงแหวนสีน้ำเงินแบบครบวง โดยในปี พ.ศ. 2564 จะมีค่า S สูงสุดที่ 0.9835 และหลังจากนั้นค่าจะค่อยๆ ลดลง แสดงว่าเครือข่ายในระยะที่ 4 มีแนวโน้มของการเกิดสถานีหลักที่เป็นจุดเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น

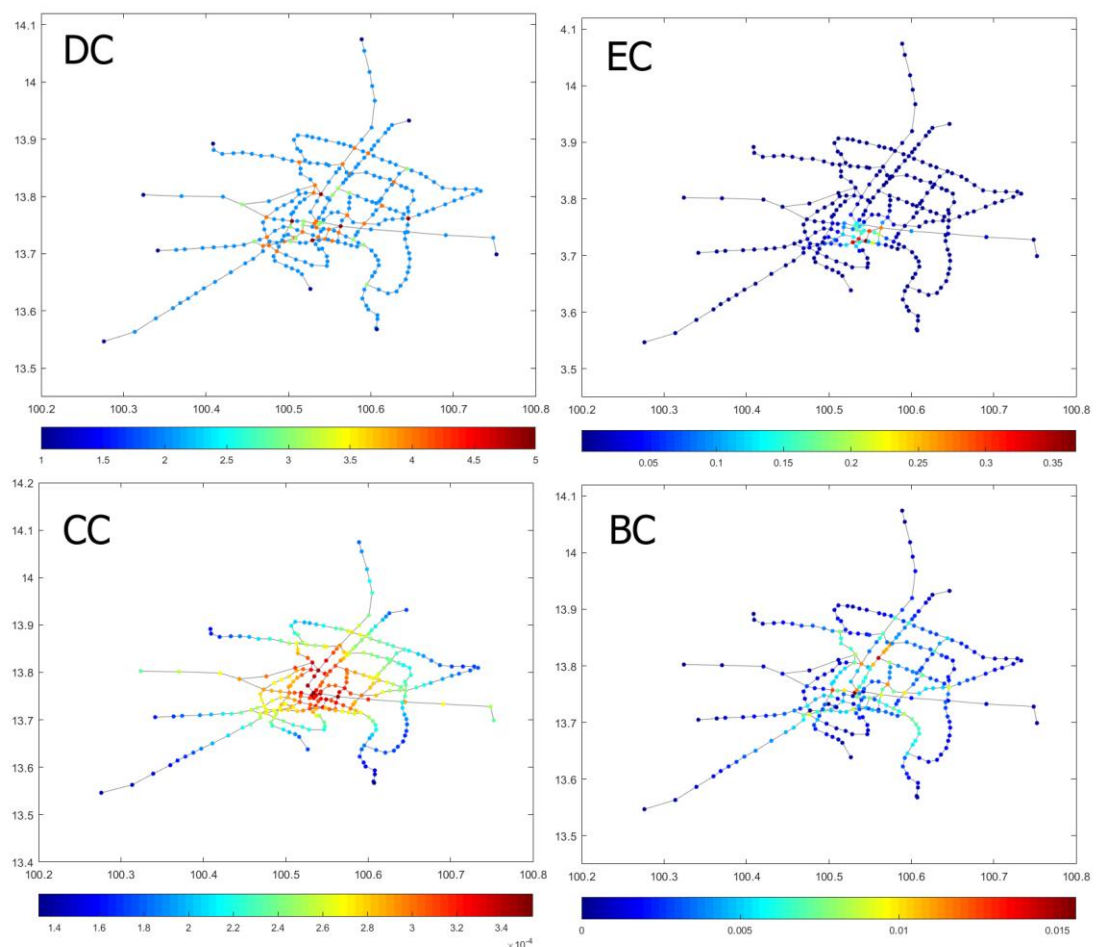
เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Zho L. (2016) ทำการวิเคราะห์ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางเมือง Guangzhou ประเทศจีน ค.ศ.1999-2020 พบว่ามีค่า S อยู่ในช่วง $[0.9536-0.9747]$ ใกล้เคียงกับเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร การพัฒนาของขนส่งมวลชนทางรางเมือง Guangzhou ค่อนข้างต่างจากเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครที่สามารถแบ่งได้ว่าระยะที่ 1-3 เป็นการขยายออกทางชานเมืองเป็นหลัก ส่วนระยะที่ 4 เป็นการเชื่อมต่อภายใน แต่เครือข่ายเมือง Guangzhou มีการขยายเครือข่ายแบบสถานีต่อพ่วงและขยายแบบเชื่อมต่อภายในสลับกันไปมาตลอดระยะเวลาการพัฒนา



รูปที่ 4.8 ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางเมือง Guangzhou ประเทศจีน ปี ค.ศ. 1999-2020

ตัวชี้วัดระดับสมาชิก

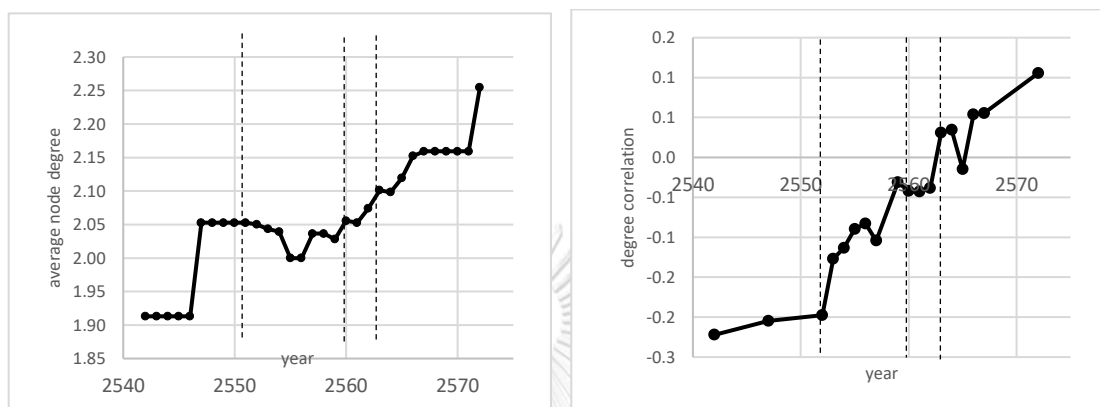
ตั้งแต่หัวข้อ 4.2.1-4.2.3 เป็นผลลัพธ์จากตัวชี้วัดในระดับเครือข่าย ต่อจากนี้จะเป็นผลลัพธ์ของตัวชี้วัดระดับสมาชิก ซึ่งจะเป็นการแสดงความสำคัญด้านความเป็นศูนย์กลางของแต่ละสถานีบนเครือข่ายออกมา โดยผลการคำนวณตัวชี้วัดค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (DC), Betweenness (BC), Closeness (CC) และ Eigenvector (EC) พบว่ารูปแบบปรากฏการณ์บนเครือข่ายที่เกิดขึ้นแตกต่างกันไปตามแต่ละช่วงเวลา รูปที่ 4.9 แสดงความแตกต่างของรูปแบบความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลางทั้ง 4 ชนิดบนเครือข่ายสมบูรณ์ ในปี พ.ศ. 2572 โดยชื่อของสถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางสูงสุด 5 อันดับแรกของแต่ละช่วงการพัฒนาอยู่ในภาคผนวก ก.2-ก.5



รูปที่ 4.9 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลางบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2572

4.2.5 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree

การพัฒนาของค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วง [1.91,2.27] ซึ่งเป็นการแจกแจงแบบเบ้ขวา (heavy-tail distribution) ในทำนองเดียวกันกับการศึกษาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางอื่นๆ เช่น ในงานวิจัยของ Derrible (Derrible S., 2012)



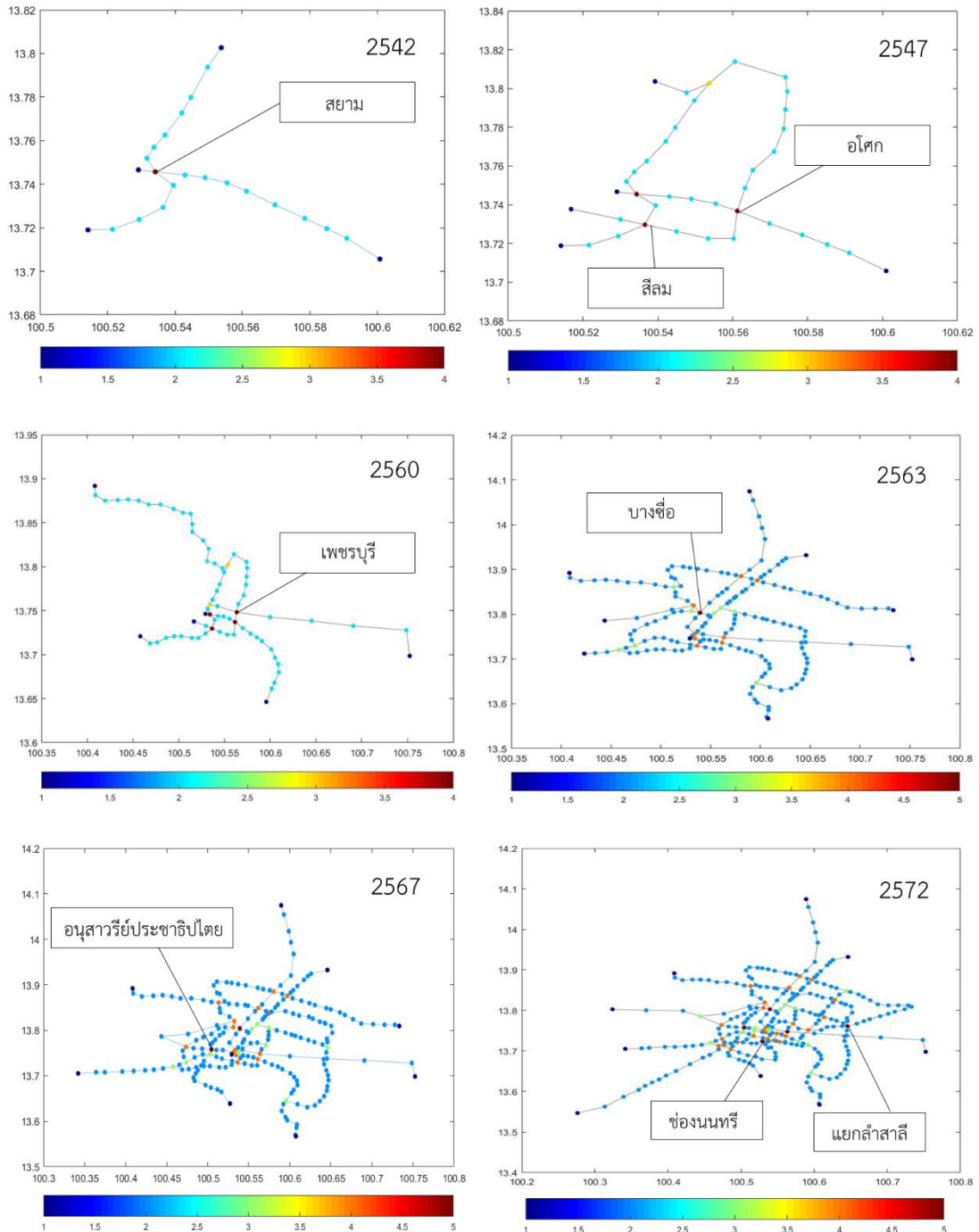
รูปที่ 4.10 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (ซ้าย) และ Degree correlation (ขวา) ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มากขึ้น ค่าสหสัมพันธ์ของการเชื่อมต่อ Degree (Degree Correlation) ได้ถูกคำนวณและแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 (ขวา) โดยเราพบว่าจุดเปลี่ยนผันของค่าดังกล่าวอยู่ที่ปี พ.ศ. 2563 ซึ่งก่อนหน้าค่าดังกล่าวจะอยู่ในมิติลบ หมายความว่า การเชื่อมต่อของสถานีส่วนมากเน้นไปทางการเชื่อมต่อแบบขยายตัวออกจากเส้นทางเดิม ส่วนหลังปี พ.ศ. 2563 ค่าดังกล่าวจะอยู่ในทางบวก ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงการขยายเครือข่ายแบบเน้นการเชื่อมต่อภายในเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเชื่อมต่อระหว่างเส้นทางการเดินทาง จึงสรุปได้ว่า ระยะที่ 1-3 ของการขยายเครือข่ายนี้ยังคงเน้นไปทางการเพิ่มความครอบคลุมของเส้นทาง แล้วจึงเริ่มการเพิ่มการเชื่อมต่อภายในในระยะที่ 4 ยกเว้น พ.ศ. 2565 ที่มีค่าต่ำกว่าศูนย์เล็กน้อย

หากพิจารณาลักษณะของการเติบโตของค่า Degree Correlation บนเครือข่าย จะพบว่าหากการเชื่อมต่อเป็นแบบการเปิดบริการเส้นทางใหม่ โดยมีจุดเชื่อมต่อสถานีกับเส้นทางเดิม ค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าหากเป็นการต่อขยายจากเส้นทางเดิม ค่าดังกล่าวจะลดลง จากรูป 4.10 (ขวา) ค่าดังกล่าวตกลง 3 ครั้ง คือ พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2565 ซึ่งมีขยายเส้นทางรัศมีตะวันตก (สายสีเขียวอ่อน) เส้นทางรัศมีทางเหนือ (สายสีม่วง) และสายเชื่อมต่อภายในระหว่างเส้นทางรัศมีตะวันตก-ตะวันออก (สายสีน้ำตาล) ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้น

ทั้งนี้หากพิจารณาการเชื่อมต่อสมาชิกของ Degree Correlation กับค่าเอนโทรปีมาตรฐาน จะต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่ายจะพิจารณา Degree ของสมาชิกเป็น

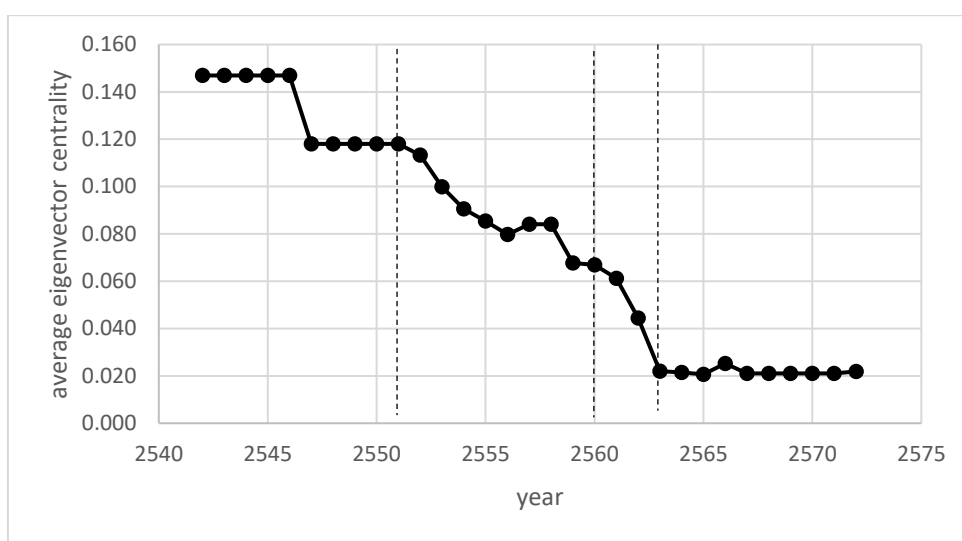
สัดส่วนของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสถานีนั้นต่อสถานีทั้งหมด แต่ Degree Correlation จะพิจารณาที่ละคู่เส้นเชื่อม (Edge) ว่าสมาชิกที่ปลายทั้งสองข้างของเส้นเชื่อมมีลักษณะการเชื่อมต่อแบบเดียวกันหรือไม่ ซึ่งให้ผลการคำนวณเป็นไปในแนวทางเดียวกัน



รูปที่ 4.11 แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

4.2.6 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector เป็นการพัฒนาความหมายต่อยอดมาจากค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มาจากแนวคิดที่ว่าสถานีหนึ่งๆ ควรได้อิทธิพลจากค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ของสถานีโดยรอบด้วย อาทิเช่น สถานีราชเทวีอาจไม่ได้มีความสำคัญด้านการเชื่อมตรงทางตรงมาก แต่สถานีราชเทวีนั้นอยู่ชิดกับสถานีสยาม สถานีราชเทวีก็ควรจะได้รับมีความสำคัญจากสถานีสยามที่มี Degree มากด้วย รูปที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

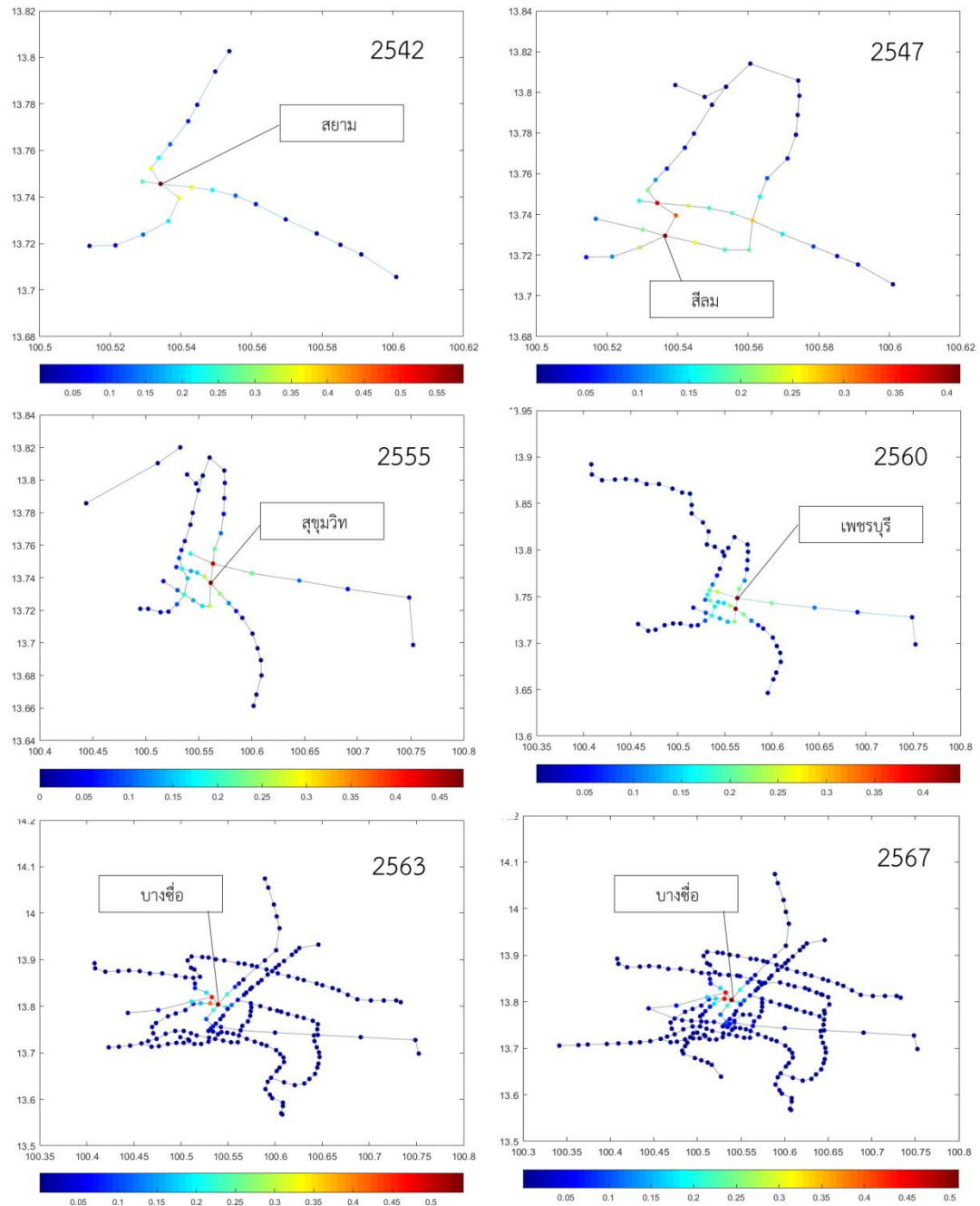


รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

แนวโน้มของค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ลดลง แสดงให้เห็นถึงการกระจายภาระในการเป็นศูนย์กลางของสถานี อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยพบการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นศูนย์กลางดังกล่าวใน 2 ช่วงปี คือ พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นปีที่ปิดให้บริการเส้นทางสายสีแดงอ่อนตลิ่งชัน-บางซื่อ ที่ไม่เชื่อมต่อกับเครือข่ายหลัก และ พ.ศ.2566 การเปิดให้บริการสายสีส้มตะวันตก (ตลิ่งชัน-ศูนย์วัฒนธรรม) ซึ่งเป็นเส้นทางที่ช่วยเชื่อมต่อกับสถานีในเส้นทางเดิม 4 สถานี

รูปที่ 4.13 แสดงแผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector โดยสถานีสีแดง หมายถึง สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector มาก ซึ่งผู้วิจัยพบว่าระยะที่ 1 บริเวณค่าความเป็นศูนย์กลางสูงจะอยู่ที่สถานีสยาม ระยะที่ 2 อยู่ที่บริเวณสถานีสุขุมวิท ระยะที่ 3 จะย้ายมายังบริเวณสถานีบางซื่อ ซึ่งมีกำหนดการเป็นจุดเชื่อมต่อที่มีขนาดใหญ่และเป็นศูนย์กลางของระบบราง ล้อมรอบไปด้วยสถานีบางซื่อ เตาปูน สามเสน และกำแพงเพชร จนกระทั่งปี พ.ศ. 2572 จะย้าย

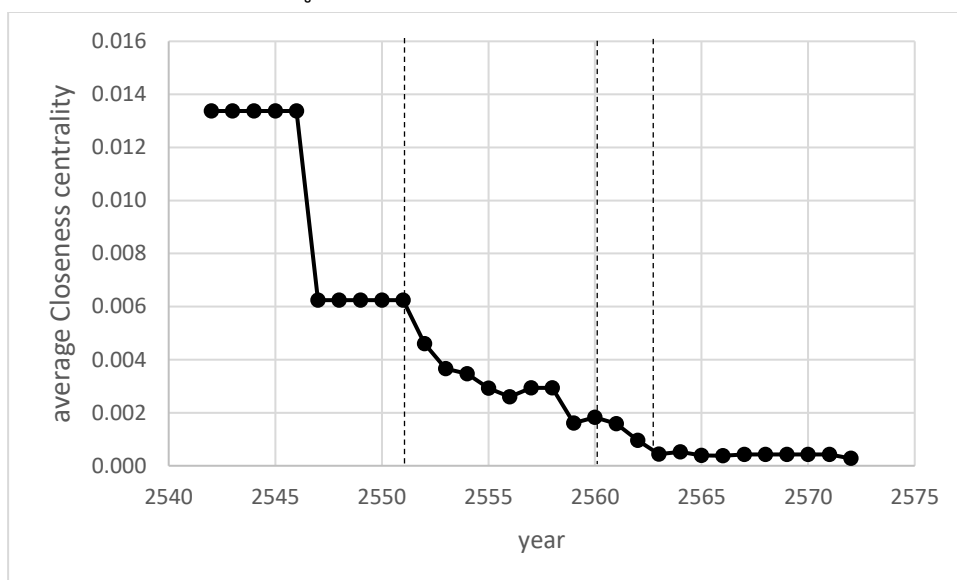
กลับมาที่บริเวณสถานีสีลม ใกล้เคียงกับบริเวณจุดศูนย์กลาง Eigenvector เดิมในระยะที่ 1 ซึ่งถูกล้อมรอบไปด้วยสถานีสามย่าน ลุมพินี ราชดำริ และช่องนนทรี



รูปที่ 4.13 แผนผังความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector พร้อมชี้สถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุด ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567

4.2.7 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness แสดงสถานีที่มีความสำคัญในด้านการเชื่อมต่อการเดินทางที่รวดเร็ว หรืออาจเรียกสถานีที่มีค่า CC สูงว่า “สถานีที่ไปไหนก็ใกล้” รูปที่ 4.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ซึ่งจะพบว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness โดยเฉลี่ยลดลง แสดงถึงการกระจายค่าความเป็นศูนย์กลางดังกล่าวออกไปยังสถานีอื่นๆ มากขึ้นเช่นเดียวกับกับค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector

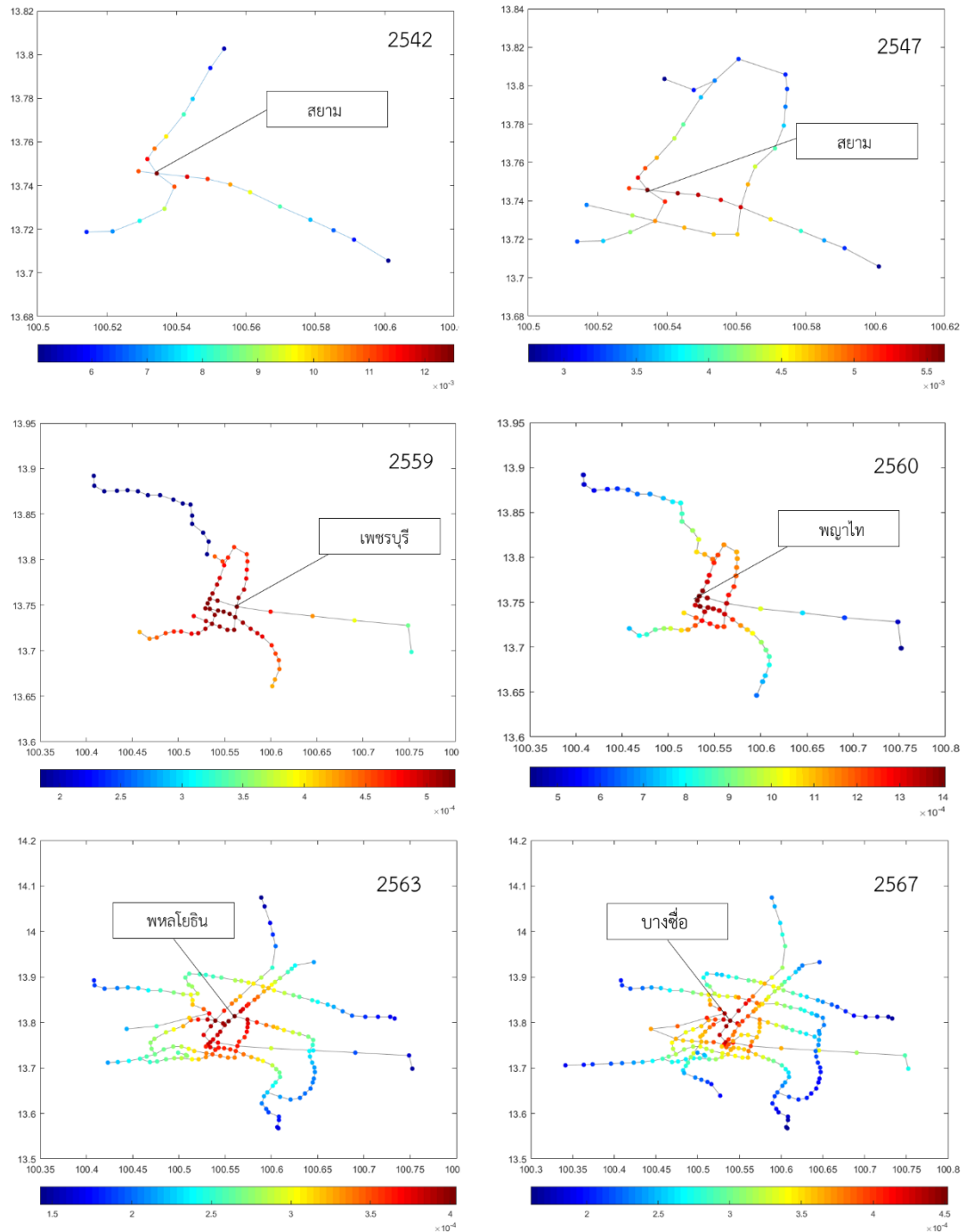


รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางใน กรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572

จากรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness ในระยะที่ 1 มีค่าสูงอยู่ที่บริเวณสถานีสยาม และย้ายมาที่บริเวณสถานีเพชรบุรีในระยะที่ 2 ซึ่งเป็นบริเวณที่สะดวกต่อการเชื่อมต่อกับชานเมืองทั้งเส้นทางชานเมือง (สายท่าอากาศยาน) สายรัศมีทางตะวันตก-ใต้ (สายสีเขียวอ่อน) และ ส่วนของสายรัศมีทางตะวันออก (สายสีเขียวเข้ม) จนกระทั่งปี พ.ศ. 2560 ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสายรัศมีทางเหนือ (สายสีม่วง) กับเครือข่ายหลัก ทำให้สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลางสูงย้ายมาอยู่บริเวณสถานีพญาไท

ตามแผนแม่บทในระยะที่ 3 บริเวณศูนย์กลางจะย้ายไปอยู่ที่สถานีพหลโยธิน เนื่องจากเป็นระยะที่มีการขยายเครือข่ายทางด้านทิศเหนือมากขึ้น ทั้งสายรถไฟฟ้าชานเมืองสีแดงเข้ม และการเปิดบริการสายสีชมพูที่รองรับผู้โดยสารทางทิศเหนือ ทำให้จุดศูนย์กลางของเครือข่ายเคลื่อนตัวไปทางเหนือเล็กน้อย ในระยะที่ 4 สถานีศูนย์กลางย้ายไปอยู่บริเวณบางซื่อ ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อของรถไฟฟ้า

ชานเมืองและสายรัศมีหลายสาย อย่างไรก็ตาม ในเครือข่ายสมบูรณปี พ.ศ. 2572 ความเป็นศูนย์กลางสูงสุดจะกลับมายังบริเวณสถานีพญาไทอีกครั้ง (รูปที่ 4.9 หน้า 66)



รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567

โดยสรุปแล้วสถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness สูงที่สุด มักจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของเครือข่าย และค่าดังกล่าวจะค่อยๆ ลดน้อยลงเมื่อห่างจากจุดกึ่งกลางเครือข่ายออกไปทางชานเมืองมากขึ้น บริเวณกึ่งกลางของเครือข่ายมีความสำคัญในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการเดินทางของเครือข่าย กล่าวคือ เมื่อมีสถานีเหล่านี้แล้วจะช่วยให้การเดินทางของเครือข่ายเข้าถึงกันและกันได้เร็วขึ้น หรือเข้าถึงกันได้ง่ายมากขึ้น ถ้าหากพิจารณาเครือข่ายปี พ.ศ. 2559 ซึ่งเป็นเครือข่ายที่มีแนวเส้นทางแยกตัวระหว่างสายสีม่วง และเครือข่ายหลัก จะพบว่าในสถานีที่อยู่บนแนวเส้นทางของสายสีม่วงนั้นให้ค่า CC ต่ำในทุกๆ สถานี เนื่องมาจากสถานีเหล่านั้นเข้าถึงสถานีอื่นๆ โดยรวมได้น้อยนั่นเอง

จากการที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness แสดงการเข้าถึงซึ่งกันและกันระหว่างสถานีนั้นๆ กับสถานีอื่นๆ ทำให้เราอาจเรียกได้ว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness คือการแสดงความสามารถในการเข้าถึงของแต่ละสถานี คล้ายกับค่าดัชนีแกมมาที่แสดงความสามารถในการเข้าถึงของเครือข่ายโดยรวม โดยที่บริเวณที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness สูง อาจคาดการณ์ได้ว่าจะมีจำนวนผู้ใช้บริการมาก หรือมีการใช้ประโยชน์ที่ดินในบริเวณโดยรอบสถานีนั้นๆ มากด้วย อาทิเช่น การเชื่อมต่อระหว่างสถานีเตาปูน-บางซื่อ ช่วยให้ผู้ใช้บริการรถไฟฟ้าสายสีม่วงเพิ่มมากขึ้นเป็น 40,000 คนต่อวันโดยประมาณ สอดคล้องกับค่า CC ของสถานีบนแนวเส้นทางสายสีม่วงในปี พ.ศ. 2560 ที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

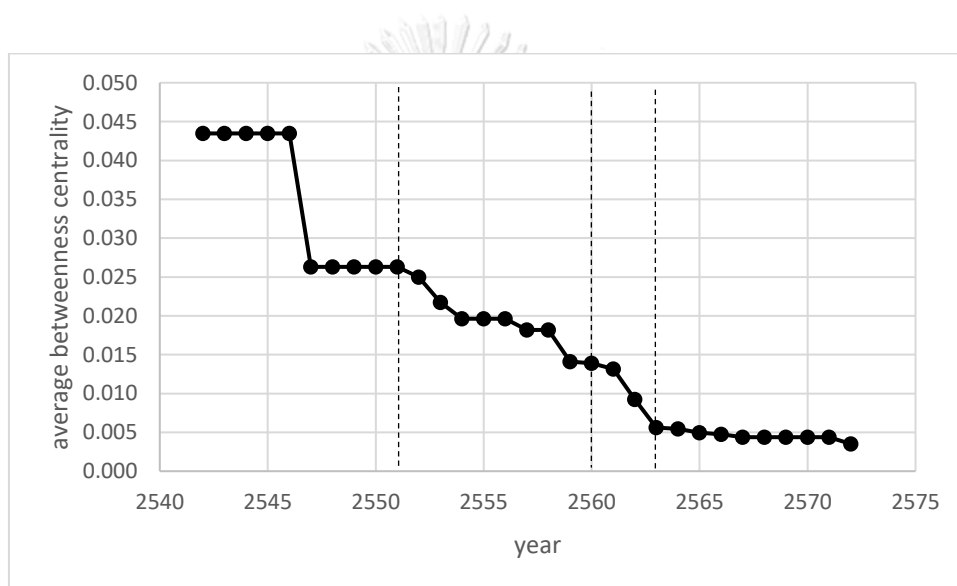
4.2.8 ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness

ค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Betweenness Centrality, BC) แสดงความมาก-น้อย ในการเป็นทางผ่านของการเดินทาง หรือภาระที่ต้องรองรับการเดินทางของแต่ละสถานีบนเครือข่าย โดยพิจารณาจากจำนวนครั้งที่สถานีที่อยู่บนเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) จากทุกคู่การเดินทาง ดังนั้นถึงแม้ว่าสถานีบางสถานีอาจไม่ได้เป็นจุดศูนย์กลางของการเชื่อมต่อ หรือจุดกึ่งกลางของเครือข่าย แต่ถ้าหากสถานีที่จำเป็นจะต้องถูกผ่านบ่อยๆ ถูกรบกวน หรือเกิดความเสียหาย ก็จะมีส่งผลกระทบต่อการเดินทางในหลายๆ ปลายทางด้วย

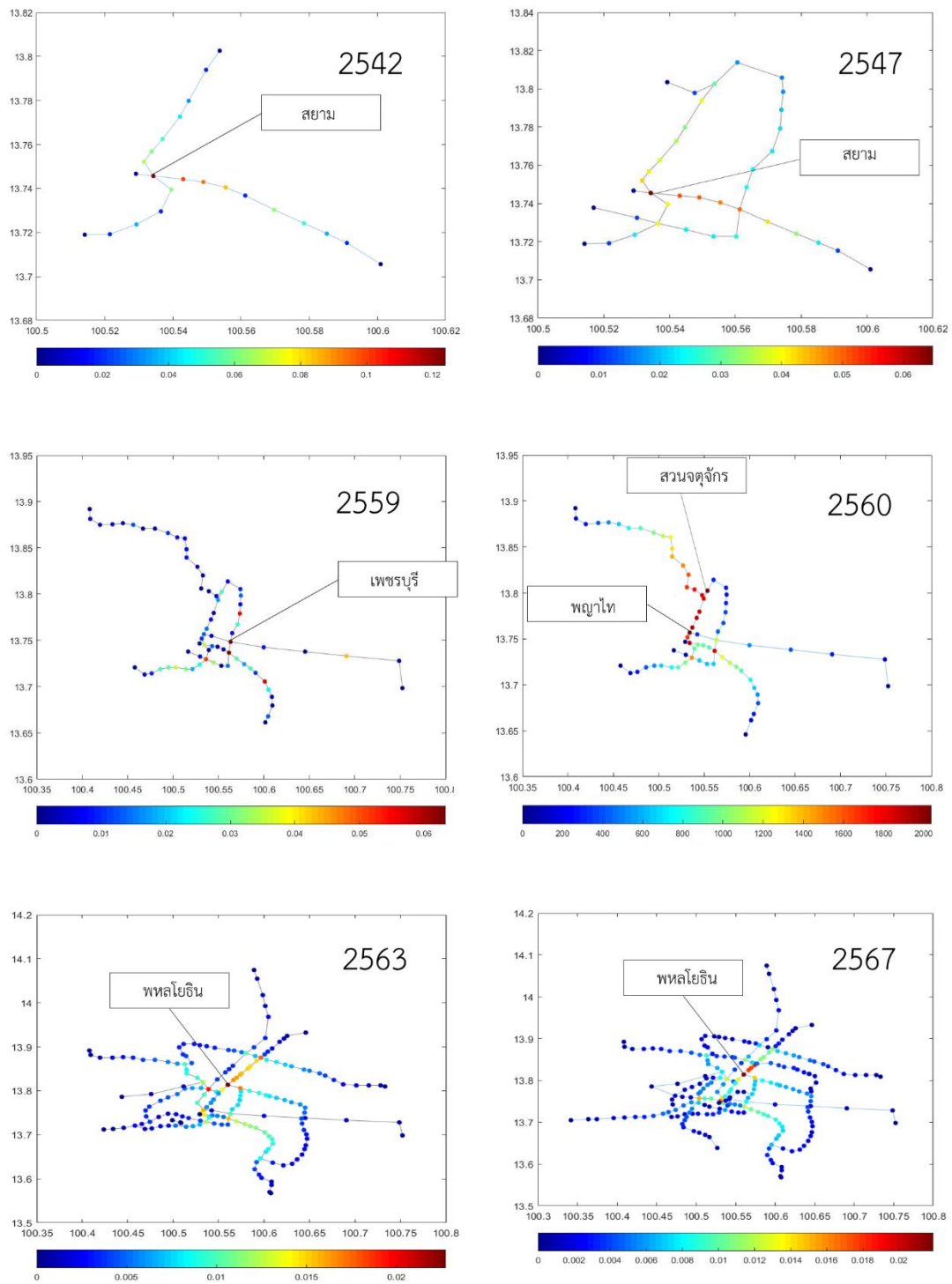
ผลของค่าเฉลี่ยความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มีแนวโน้มเดียวกับค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness และ Eigenvector แต่จากแผนผังความเข้มข้นจะพบว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness นั้นจะแตกต่างออกไปจาก Closeness อย่างชัดเจน จากแผนผังความเข้มข้นรูปที่ 4.17 พบว่าค่า Betweenness ไม่จำเป็นต้องอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางของเครือข่ายเหมือนกับ Closeness แต่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness สูงในสถานีที่อยู่บนเส้นทางผ่านไปยังเส้นทางรอบนอก เช่น ในปี พ.ศ. 2563 เส้นทางที่มีความเข้มข้นสูง คือ เส้นทางส่วนต่อขยายสายสีเขียวเข้ม

ช่วงพหุโยธิน-มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นเส้นทางผ่านไปยังรถไฟเส้นทางเหนือ และสาย ตะวันออก

นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของความเข้มข้นค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ระหว่างเครือข่ายที่มีแนวเส้นทางแยกตัว และเครือข่ายที่ไม่มีแนวเส้นทางแยกตัว อาทิเช่น จากปี พ.ศ. 2559 ไปยัง พ.ศ. 2560 ที่มีการเชื่อมต่อเส้นทางสายรัศมีทางเหนือสายสีม่วง กับเครือข่ายหลักทำให้ รูปแบบของความเข้มข้นเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน (รูปที่ 4.17) สถานที่ที่มีความเข้มข้นสูงจะย้ายมา อยู่ที่เส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างใจกลางเมือง (สายสีเขียวเข้ม) กับเส้นทางรัศมีดังกล่าว รองลงมาคือ สถานที่สวนจตุจักรที่เป็นสถานีเชื่อมต่อระหว่างสายสีเขียวเข้ม และสายวงแหวนสีน้ำเงิน



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ของเครือข่ายขนส่งมวลชน ทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2572



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2542-2567

4.3 การระบุความสำคัญของสถานี

การระบุความสำคัญของสถานีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครเป็นการประยุกต์ใช้ผลการคำนวณตัวชี้วัดค่าความเป็นศูนย์กลางในงานวิจัยส่วนก่อนหน้ามาพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดเพื่อเรียงลำดับสถานีที่เป็นจุดสำคัญบนเครือข่ายจากมากไปน้อย ซึ่งเราได้ทำให้เราสามารถระบุความสำคัญของสถานีที่มีความสำคัญเป็นลำดับต้นๆ บนเครือข่ายดังกล่าวได้ โดยแบ่งความสำคัญของสถานีออกเป็น 2 เชิง คือ ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย และความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

ในงานวิจัยก่อนหน้าส่วนมากมักเลือกการศึกษาความสำคัญของสถานีโดยการเลือกใช้ค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่งเป็นหลัก ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แนวคิดของ William G. (2011) ที่กล่าวว่าเราไม่สามารถใช้ค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่งในการเรียงลำดับความสำคัญของสมาชิกได้ เนื่องจากค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดจะสะท้อนความสำคัญของสมาชิกออกมาแตกต่างกัน ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาตัวชี้วัดสำหรับการระบุความสำคัญหรือการเรียงลำดับขึ้นมาใหม่ โดยเรียกตัวชี้วัดดังกล่าวว่า “ตัวชี้วัดรวบยอด” พัฒนาซึ่งถูกขึ้นจากการให้สัดส่วนน้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลาง 4 ชนิด คือ Degree, Eigenvector, Closeness, Betweenness ตามสมการ 3-12 โดยมีความคาดหวังเบื้องต้นว่า เมื่อนำตัวชี้วัดรวบยอดไปทดสอบประสิทธิภาพในการเรียงลำดับแล้ว จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ค่าความเป็นศูนย์กลางเพียงชนิดเดียวในการเรียงลำดับความสำคัญในทั้งสองเชิง

4.3.1 การวิเคราะห์ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย

ในการวิเคราะห์ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย ผู้วิจัยได้อาศัยหลักการวิเคราะห์ความอ่อนไหวประสิทธิภาพเครือข่าย ผ่านแบบจำลองการรบกวนสถานี โดยทำการปิดการเชื่อมต่อรอบสถานีที่ถูกรบกวน เพื่อพิจารณาว่าถ้าไม่มีสถานีนั้นๆ แล้วประสิทธิภาพเครือข่ายจะลดลงมากน้อยเพียงไร ทั้งนี้ถ้าหากการปิดสถานีนั้นๆ ทำให้ประสิทธิภาพลดลงมากก็แสดงว่าสถานีดังกล่าวมีความสำคัญต่อเครือข่ายในเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายมากจามไปด้วย

เพื่อทดสอบว่าวิธีการเรียงลำดับแบบใดที่เหมาะสมต่อความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย เราจึงได้ทำการปิดการเชื่อมต่อสถานีตามลำดับความสำคัญของสถานีจากตัวชี้วัดต่างๆ จากมากไปน้อย (แสดงรายละเอียดแบบจำลองการรบกวนสถานีในหัวข้อ 3.5.1)

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละประสิทธิภาพเครือข่ายที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเริ่มต้น เมื่อปิดการเชื่อมต่อของสถานีเป็นจำนวน 20% แรก ซึ่งจะพบว่าค่าความเป็นศูนย์กลางที่ให้ประสิทธิภาพในการเรียงลำดับที่ดีที่สุด คือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (DC) รองลงมา คือ ค่า

ความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (BC) นั้นหมายความว่า ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายให้น้ำหนักกับความสำเร็จในการเป็นตัวกลางการเชื่อมต่อ และความสำคัญกับสถานีที่เป็นทางผ่านการเดินทางมาก สำหรับตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนา โดยการให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดพบว่า การให้น้ำหนักค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree, Eigenvector, Closeness, และ Betweenness เท่ากับ 0.7 0.0 0.1 และ 0.2 จะทำให้ค่าประสิทธิภาพเครือข่ายลดลงมากที่สุด ในทุกปี พ.ศ. และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเรียงลำดับตัวค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่งพบว่าเมื่อใช้ตัวชี้วัดรวบยอดที่พัฒนาขึ้นจะให้ค่าการทดสอบประสิทธิภาพที่ดีมากกว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางตัวใดตัวหนึ่ง กล่าวคือการเรียงลำดับด้วยตัวชี้วัดรวบยอดให้ประสิทธิภาพการเรียงลำดับดีกว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางอื่นๆ

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณการทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย ด้วยวิธีวิเคราะห์ความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย โดยแสดงผลเป็นร้อยละของประสิทธิภาพที่ลดลงเทียบกับค่าประสิทธิภาพเริ่มต้น ที่การปิดการเชื่อมต่อสถานีที่มีค่าสูงสุด 20% แรก

พ.ศ. ที่ให้บริการ	วิธีการเรียงลำดับ				ตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนา
	DC	EC	CC	BC	
2561	57.63	44.21	32.41	53.66	59.7014
2562	62.59	36.70	32.60	55.52	62.6384
2563	69.71	39.67	59.67	44.35	71.1808
2564	69.88	40.11	45.78	59.78	70.5445
2565	70.50	36.98	42.39	58.18	70.6281
2566	68.52	39.77	38.65	58.37	68.9663
2567	71.40	39.48	57.33	42.54	72.1827
2572	68.33	28.92	61.21	38.56	70.4973

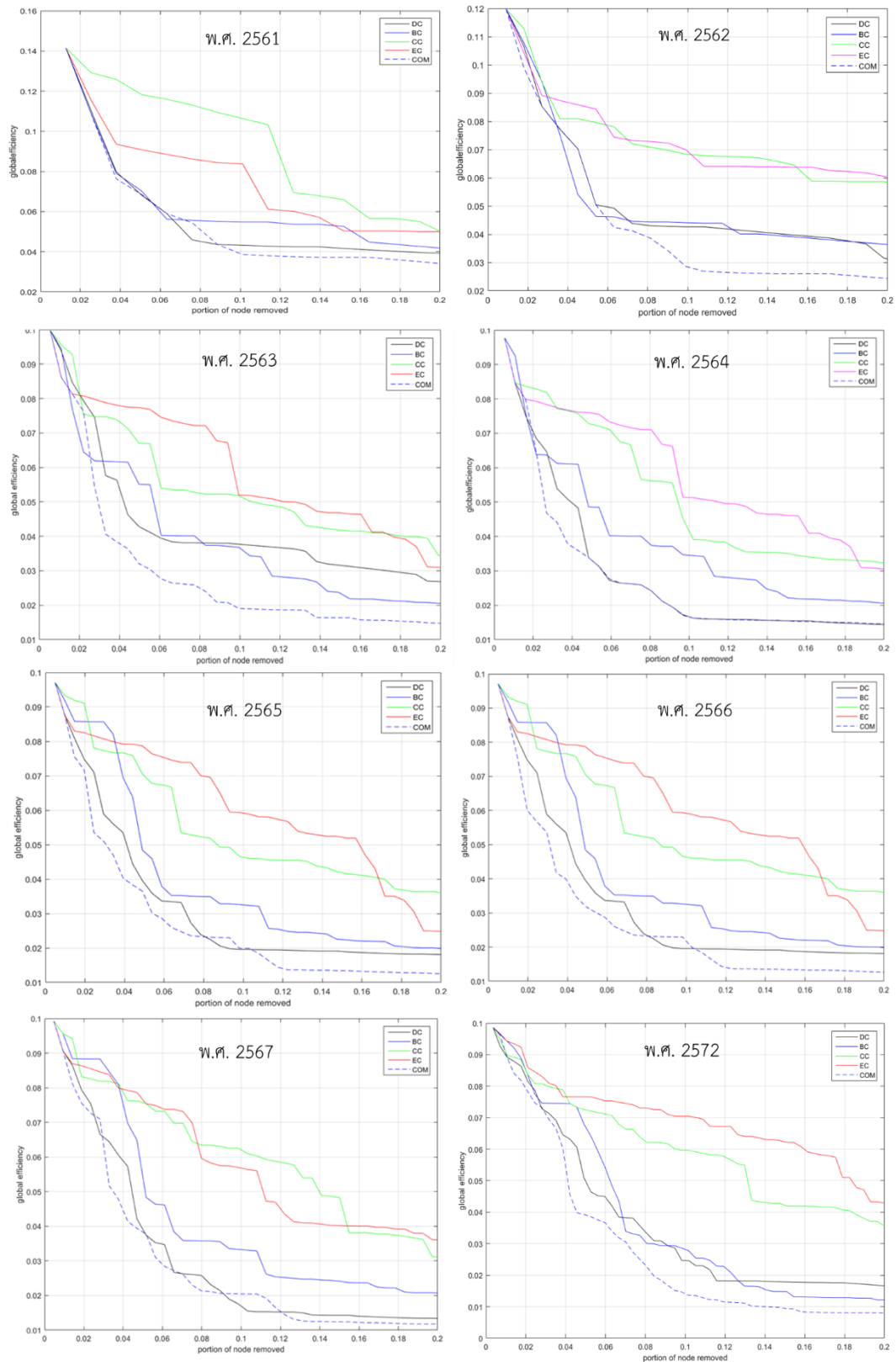
เมื่อพิจารณาที่ค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิด (รูปที่ 4.17) จะพบว่า การเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (เส้นสีน้ำเงิน) มีแนวโน้มที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในบรรดาค่าความเป็นศูนย์กลางที่เลือกทดสอบ ยกเว้นในปี พ.ศ. 2563 ที่เมื่อพิจารณาพื้นที่ได้กราฟแล้ว ไม่แน่ชัดว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (เส้นสีน้ำเงิน) หรือ Betweenness (เส้นสีดำ) ให้ประสิทธิภาพดีกว่า

ในขณะที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness (เส้นสีเขียว) และ Eigenvector (เส้นสีแดง) มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพต่ำ แสดงว่าการระบุความสำคัญของสถานีเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย จะให้ความสำคัญกับสถานีที่มีความเป็นตัวกลางการเชื่อมต่อมาก รองลงมาคือ ความสำคัญด้านการเป็นทางผ่านการเดินทาง ส่วนความสำคัญด้านการช่วยให้การเดินทางรวดเร็ว และด้านการได้รับอิทธิพลจากเพื่อนบ้าน จะมีความสำคัญในเชิงดังกล่าวน้อย

จากกราฟความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย (รูปที่ 4.18) ยังพบว่าตัวชี้วัดที่ได้พัฒนาขึ้นทำให้เครือข่ายมีความอ่อนไหวมากที่สุดโดยภาพรวม (เส้นประ) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่น้อยกว่าการเรียงลำดับด้วยวิธีอื่นๆ (เส้นทึบ) โดยเฉพาะปี พ.ศ. 2562 2563 2565 2567 และ 2572 ที่ตัวชี้วัดที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างชัดเจน ในขณะที่ พ.ศ. 2561 ช่วงการเรียงลำดับที่ 10% แรก (8 สถานีแรก) ค่อนข้างใกล้เคียงกับการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ส่วนในปี พ.ศ. 2564 จะให้ประสิทธิภาพดีกว่า Degree ในช่วง 5% แรก (93 สถานีแรก) แต่สถานีที่มีอันดับหลังจากนั้นประสิทธิภาพจะค่อนข้างใกล้เคียงกับ Degree

อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณา คือ การเรียงลำดับซ้ำ เนื่องจากถ้าการเรียงลำดับด้วยตัวชี้วัดที่ให้ค่าของสถานีเหมือนกันมากๆ จะทำให้ไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียงลำดับได้อย่างแท้จริง เพราะเมื่อเรียงลำดับแล้วจะถือว่ามีความสำคัญเท่ากัน ซึ่งการเรียงลำดับซ้ำสามารถพิจารณาได้จากค่า Monotonicity ตามสมการที่ 3-15 ตาราง 4.4 แสดงค่า Monotonicity ของการเรียงลำดับแต่ละวิธี

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนาไม่มีการเรียงลำดับซ้ำเลย ($M=1.000$) ในทุกเครือข่าย ในขณะที่การเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่งให้การเรียงลำดับซ้ำบางส่วน และค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มีการเรียงลำดับซ้ำสูงมาก (ค่า Monotonicity มีค่าเข้าใกล้ 0) ดังนั้น ถึงแม้ว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree จะให้การทดสอบประสิทธิภาพการเรียงลำดับเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายเหมาะสมใกล้เคียงกับตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนาขึ้น แต่เมื่อพิจารณาค่า Monotonicity แล้วจะสรุปได้ว่าค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเรียงลำดับ



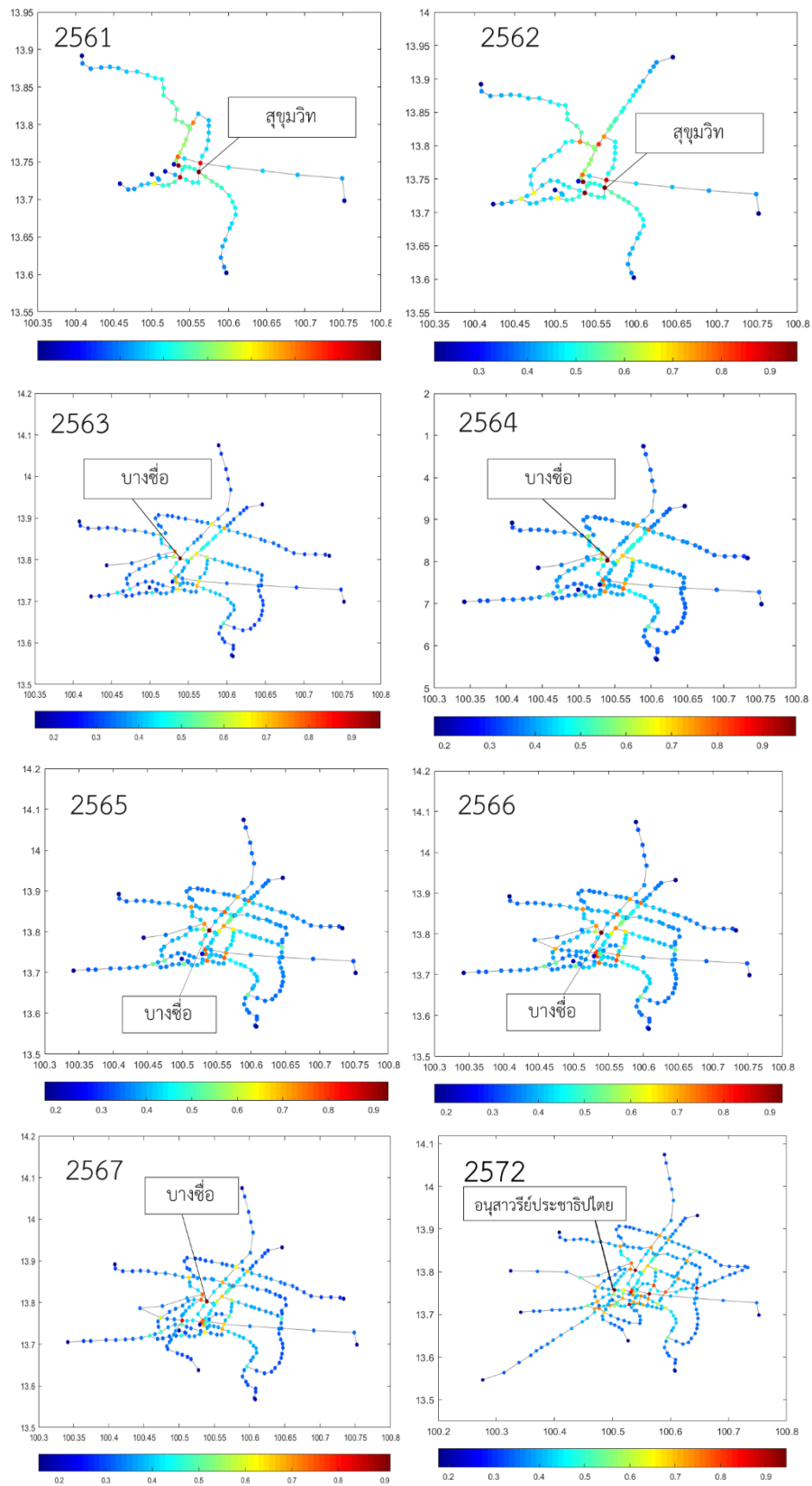
รูปที่ 4.18 กราฟความอ่อนไหวของประสิทธิภาพเครือข่าย เมื่อปิดการเชื่อมจากมากไปน้อยด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 4 วิธี เทียบกับตัวชี้วัดรวมยอดที่พัฒนา

ตารางที่ 4.4 ค่า Motonicity ของการเรียงลำดับแต่ละวิธี

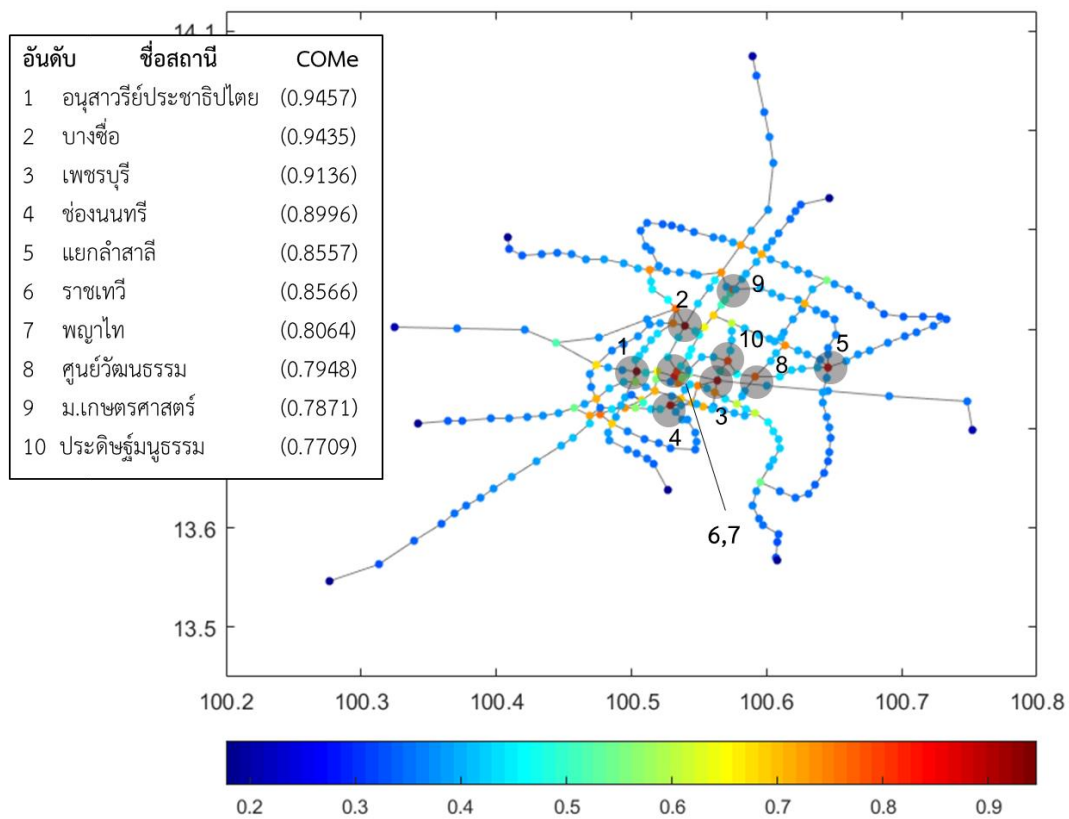
พ.ศ.	ตัวชี้วัดที่ใช้ในการเรียงลำดับ				ตัวชี้วัดรวม ยอดที่พัฒนา
	DC	EC	CC	BC	
2561	0.0993	1.0000	0.9935	0.9525	1.0000
2562	0.0849	1.0000	1.0000	0.9689	1.0000
2563	0.0781	1.0000	1.0000	0.9789	1.0000
2564	0.0744	1.0000	0.9992	0.9770	1.0000
2565	0.0756	1.0000	1.0000	0.9810	1.0000
2566	0.0866	1.0000	1.0000	0.9845	1.0000
2567	0.0833	1.0000	0.9992	0.9853	1.0000
2572	0.1210	1.0000	0.9995	0.9876	1.0000

เนื่องจากตัวชี้วัดรวมยอดเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายที่ถูกสร้างขึ้น ถือเป็นตัวชี้วัดระดับสมาชิกที่แสดงค่าประจำตัวของแต่ละสถานีออกมา ดังนั้นตัวชี้วัดดังกล่าวสามารถถูกนำเสนอในรูปแบบแผนผังความเข้มข้นได้เช่นกัน รูปที่ 4.19 แสดงแผนผังความเข้มข้นของเครือข่ายในช่วงปี พ.ศ. 2561-2564 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุดย้ายจากบริเวณสถานีสุขุมวิท ไปยังสถานีบางซื่อในปี พ.ศ. 2563 แล้วจะกลับมายังสถานีบริเวณสถานีอนุสาวรีย์ประชาธิปไตยในเครือข่ายสมบูรณ์ปี พ.ศ. 2572

อย่างไรก็ตามจะพบว่า สถานีที่มีตัวชี้วัดรวมยอดเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูง จะกระจายอยู่ทั่วเครือข่ายตามสถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree สูง และเน้นไปในเส้นทางที่ถูกผ่านมาก ระหว่างจุดเชื่อมต่อนั้นๆ กับบริเวณชานเมือง เพราะฉะนั้นสำหรับการบริหารจัดการเครือข่ายจะต้องมีการกำหนดหน่วยงานซ่อมบำรุงรักษาที่กระจายอยู่ตามบริเวณที่มีค่า Degree สูงๆ ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.20 แสดงตำแหน่งสถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวมยอดเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 10 อันดับแรกของเครือข่ายปี พ.ศ. 2572



รูปที่ 4.19 แผนที่ความเข้มข้นของตัวชี้วัดรอยต่อเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายที่ทำการพัฒนา พร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุด บนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2561-2572



รูปที่ 4.20 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 10 อันดับแรกบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2572

จากรูปที่ 4.20 จะพบว่าสถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย 10 อันดับแรกจะกระจายอยู่ตามบริเวณที่มีจุดเชื่อมต่อมากๆ ทว่าทั้งเครือข่าย สถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุด 4 อันดับแรกเป็นสถานีที่เป็นจุดเชื่อมต่อรอบทิศทางของตัวเมืองชั้นในทั้ง 4 ทิศ คือ อนุสาวรีย์ประชาธิปไตย (ทิศตะวันตก) บางซื่อ (ทิศเหนือ) เพชรบุรี (ทิศตะวันออก) และช่องนนทรี (ทิศตะวันตก) ซึ่งล้อมรอบสถานีใจกลางเมืองในอันดับที่ 6 และ 7 คือบริเวณสถานีราชเทวี และพญาไท สำหรับสถานีแยกลำสาลีเป็นสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดเป็นอันดับ 5 เป็นสถานีที่เป็นจุดเชื่อมต่อของรถไฟฟ้าหลายสายทางทิศตะวันออก ทั้งสายสีเหลือง สายสีน้ำตาล และสายสีส้ม นับเป็นจุดเปลี่ยนการเดินทางสำคัญของการเดินทางทางทิศตะวันออก ส่วนสถานีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (อันดับ 9) เป็นสถานีบนสายสีเขียวเข้ม และสายสีน้ำตาล อันเป็นสถานีที่มีความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสำหรับการเดินทางรอบนอกในทางทิศเหนือ

4.3.2 การวิเคราะห์ความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

การวิเคราะห์ความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบเป็นการค้นหาความสำคัญของสมาชิกในการแพร่กระจายผลกระทบไปยังสมาชิกอื่นๆ ผ่านแนวคิดที่ว่าสถานีทุกสถานีเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายผ่านเส้นรางรถไฟ ถ้าสถานีใดถูกรบกวนหรือเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้ต้องหยุดการทำงาน ผลกระทบนั้นจะส่งผลไปยังสถานีอื่นๆ ถัดไปตามเส้นรางระหว่างสถานี โดยเราจะทำการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลอง SIR (Susceptible-Infection-Recovery model) ที่มีแนวคิดเลียนแบบการแพร่กระจายของโรคระบาด โดยแบ่งสถานีบนเครือข่ายออกเป็น 3 สถานะ คือ สถานะปกติ สถานะสุ่มเสี่ยง และสถานะติดเชื้อ เราจะเริ่มกำหนดให้สถานีที่สนใจเป็นสถานีติดเชื้อสถานีแรก และสถานีเพื่อนบ้านที่เชื่อมต่อกับสถานีนั้นโดยตรงจะเปลี่ยนจากสถานะปกติเป็นสถานะสุ่มเสี่ยง ซึ่งสถานีที่มีสถานะสุ่มเสี่ยงจะเปลี่ยนเป็นสถานะติดเชื้อต่อไปด้วยค่าความน่าจะเป็นในการติดเชื้อ (Infection probability, α) เมื่อไม่มีสถานีใดเปลี่ยนเป็นสถานะติดเชื้อแล้วก็จะจบการคำนวณ แล้วนับจำนวนครั้งทั้งหมดที่มีการติดเชื้อที่เกิดจากสถานีเริ่มต้น ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เราได้ค่าการแพร่กระจายเชื้อโรคหรือค่าการแพร่กระจายผลกระทบของสถานีที่สนใจนั้นๆ

ในการค้นหาวิธีการเรียงลำดับความสำคัญเชิงการแพร่กระจายผลกระทบที่เหมาะสม เราจะทำการเปรียบเทียบความสอดคล้องของวิธีการเรียงลำดับที่ต้องการทดสอบ กับการเรียงลำดับจากแบบจำลอง SIR ซึ่งหากวิธีการเรียงลำดับที่ทดสอบสอดคล้องกับแบบจำลอง SIR มาก แสดงว่าวิธีการเรียงลำดับนั้นเหมาะสมที่จะใช้ในการบ่งบอกความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

จากแบบจำลอง SIR จำนวนครั้งในการติดเชื้อจะขึ้นอยู่กับค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ (แสดงรายละเอียดของแบบจำลองในหัวข้อ 3.5.2) ซึ่งถ้าความน่าจะเป็นมากเกินไป จำนวนสมาชิกที่มีการติดเชื้ออาจมีมากเกินไป จนไม่สามารถจบการคำนวณได้ หรือถ้าหากค่าความน่าจะเป็นน้อยเกินไป ก็จะทำให้จำนวนการติดเชื้อน้อยจนไม่สามารถบ่งบอกข้อมูลอะไรได้ ดังนั้นในงานวิจัยที่ผ่านมาจึงมีการเลือกใช้ค่าความน่าจะเป็นที่จุดวิกฤต (Epidemic Threshold Probability, α_c) เป็นค่าความน่าจะเป็นในการติดเชื้อสำหรับการคำนวณในแบบจำลอง SIR

ความหมายของค่าความน่าจะเป็นที่จุดวิกฤต คือ เป็นค่าความน่าจะเป็นที่ทำให้จำนวนครั้งที่มีการติดเชื้อของสมาชิกเริ่มสูงขึ้นแบบก้าวกระโดด (รูปที่ 2.2) ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่เครือข่ายอยู่ในระยะเริ่มต้นของการแพร่กระจายผลกระทบ จึงเป็นจุดที่ควรใช้ในการวิเคราะห์เพื่อป้องกันการแพร่กระจายในระยะที่สูงขึ้นต่อไป โดยค่าของจุดดังกล่าวจะขึ้นกับจำนวนการเชื่อมต่อของเครือข่าย เครือข่ายที่มีจำนวนการเชื่อมต่อมากย่อมมีการติดเชื้อที่ง่ายกว่า ค่าความน่าจะเป็นวิกฤตจึงต่ำกว่าเครือข่ายที่มีจำนวนการเชื่อมต่อน้อย คำนวณผ่านสมการ $\alpha_c = \frac{1}{\langle k \rangle}$ เมื่อ $\langle k \rangle$ คือ ค่าเฉลี่ย Degree ของ

เครือข่าย ตารางที่ 4.5 แสดงความน่าจะเป็นวิกฤตที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง SIR ของแต่ละเครือข่ายปี พ.ศ. 2561-2572

ตารางที่ 4.5 ความน่าจะเป็นวิกฤตที่ใช้ในการคำนวณในแบบจำลอง SIR ของแต่ละเครือข่าย

พ.ศ.	จำนวนสถานี	ค่าเฉลี่ยค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree	ค่าความน่าจะเป็นวิกฤต
2561	79	2.05	0.488
2562	111	2.07	0.483
2563	181	2.10	0.476
2564	186	2.10	0.477
2565	204	2.12	0.472
2566	213	2.15	0.465
2567	229	2.16	0.464
2572	285	2.27	0.441

ผลจากการคำนวณที่ได้จากแบบจำลอง SIR ที่จุดวิกฤตทำให้เราได้การเรียงลำดับสมาชิกที่มีค่าการแพร่กระจายจากมากไปน้อยด้วย ตารางที่ 4.6 แสดงสถานีที่มีจำนวนครั้งที่ทำให้สถานีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2572 ใกล้เคียงเข้ามา 10 อันดับแรก

จากตาราง 4.6 พบว่าแนวโน้มของการเรียงลำดับที่ใกล้เคียงกับการคำนวณจากแบบจำลอง SIR มากที่สุด คือ การเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ซึ่งมีการเรียงลำดับโดยมี 7 สถานีที่ ติด 10 อันดับแรกเหมือนกัน แต่ยังคงสลับลำดับกันอยู่บ้าง ตารางที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละวิธี กับการเรียงลำดับด้วยแบบจำลอง SIR บนเครือข่าย พ.ศ. 2561-2572 ผ่านค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์ (สมการ 3-14)

ตารางที่ 4.6 สถานที่ที่มีค่าสูงสุด 10 อันดับแรกของการเรียงลำดับแต่ละวิธีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2572

วิธีที่ใช้ในการเรียงลำดับ

อันดับ	DC	EC	CC	BC	SIR
1	ชองนนทรี	ลุมพินี	พญาไท	ราชเทวี	ชองนนทรี
2	เพชรบุรี	ชองนนทรี	เพชรบุรี	พหลโยธิน	ลุมพินี
3	อนุสาวรีย์ ประชาธิปไตย	สีลม	ราชปรารภ	อนุสาวรีย์ประชาธิปไตย	เพลินจิต
4	บางซื่อ	เพลินจิต	ราชวิถี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	สีลม
5	แยกลำสาลี	เพชรบุรี	บางซื่อ	พญาไท	เพชรบุรี
6	ลุมพินี	คลองเตย	ราชเทวี	บางซื่อ	คลองสาน
7	สีลม	สุขุมวิท	สามเสน	ศูนย์วัฒนธรรม	ราชเทวี
8	เพลินจิต	สยาม	เพลินจิต	พหลโยธิน 24	ยศเส (แดง)
9	คลองเตย	ราชปรารภ	พระราม 9	รัชโยธิน	คลองเตย
10	สุขุมวิท	ราชเทวี	ประตูน้ำ (ส้ม)	เสนานิคม	สยาม

ตารางที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนตัลล์ของค่าการเรียงลำดับแต่ละวิธีเทียบกับผลลัพธ์จากการเรียงลำดับที่ได้จากแบบจำลอง SIR ที่ความน่าจะเป็นวิกฤต

พ.ศ.	DC	EC	CC	BC
2561	0.2321	0.8105	0.8059	0.3522
2562	0.2229	0.7417	0.7171	0.3979
2563	0.1986	0.7498	0.6878	0.4325
2564	0.1940	0.7575	0.8161	0.4520
2565	0.1995	0.7371	0.6761	0.4700
2566	0.2120	0.8169	0.6932	0.3961
2567	0.2178	0.7835	0.7971	0.3972
2572	0.2313	0.7962	0.6962	0.3624

จากตาราง 4.7 พบว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector จะให้ความสอดคล้องกับผลลัพธ์จากแบบจำลอง SIR มากที่สุด ยกเว้นปี พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2567 ที่ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closness ให้ประสิทธิภาพการเรียงลำดับดีกว่าเล็กน้อย ในขณะที่วิธีการเรียงลำดับ

ด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ Betweenness ให้ความสอดคล้องในการเรียงลำดับกับแบบจำลอง SIR ค่อนข้างต่ำ ซึ่งสมเหตุสมผลกับความเป็นจริง เนื่องจากตำแหน่งที่มีการเกาะกลุ่มของสมาชิกที่การเชื่อมต่อมากๆ และสามารถเดินทางไปสมาชิกอื่นๆ ได้ง่าย จะสามารถแพร่กระจายผลกระทบไปยังสมาชิกอื่นๆ ได้ง่ายกว่า ตาราง 4.8 แสดงผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความสอดคล้องของเคนตัลล์ (τ) ของตัวชี้วัดรบกวนเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบโดยการให้สัดส่วนน้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลางทั้ง 4 ชนิด กับแบบจำลอง SIR และค่า Monotonicity (M)

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณสัดส่วนน้ำหนักที่เหมาะสมกับการระบุความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

เครือข่าย พ.ศ.	ค่าความเป็นศูนย์กลาง				τ	M
	DC	EC	CC	BC		
2561	0.15	0.77	0.06	0.02	0.9059	1.000
2562	0.21	0.62	0.15	0.02	0.8524	1.000
2563	0.08	0.80	0.10	0.02	0.7723	1.000
2564	0.19	0.34	0.45	0.02	0.8357	1.000
2565	0.04	0.88	0.06	0.02	0.7696	1.000
2566	0.03	0.89	0.06	0.02	0.8003	1.000
2567	0.02	0.90	0.05	0.03	0.8277	1.000
2572	0.02	0.89	0.07	0.02	0.8412	1.000

จากตารางที่ 4.8 พบว่าโดยภาพรวมแล้วในส่วนของความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ จะให้สัดส่วนน้ำหนักกับค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector มากที่สุด (อยู่ในช่วง 0.62-0.90) ส่วนค่าความเป็นศูนย์กลางอื่นๆ จะอยู่ในระดับเดียวกัน คือ มีสัดส่วนต่ำกว่า 10% ยกเว้น พ.ศ. 2562 ที่มีการให้สัดส่วนค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree และ Closeness เท่ากับ 0.21 และ 0.15 ตามลำดับ จากผลดังกล่าวเราอาจกล่าวได้ว่าจุดที่แพร่กระจายผลกระทบมักเป็นจุดที่เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อ กับจุดที่อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางการเดินทางของเครือข่าย ส่วนในปี พ.ศ. 2564 ที่มีการให้สัดส่วนน้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness มากที่สุดเท่ากับ 0.45 รองลงมาคือ ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector เท่ากับ 0.34 ซึ่งอาจตีความได้ว่าจุดแพร่กระจายผลกระทบในปีดังกล่าวให้ความสำคัญด้านการเป็นตำแหน่งกึ่งกลางบนเครือข่ายมากที่สุด รองลงมา คือ จุดที่มีการเกาะกลุ่มของการเชื่อมต่อมากๆ สำหรับความสำคัญด้านการเป็นทางผ่านการเดินทาง มีความสำคัญน้อยที่สุดในการบ่งบอกความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

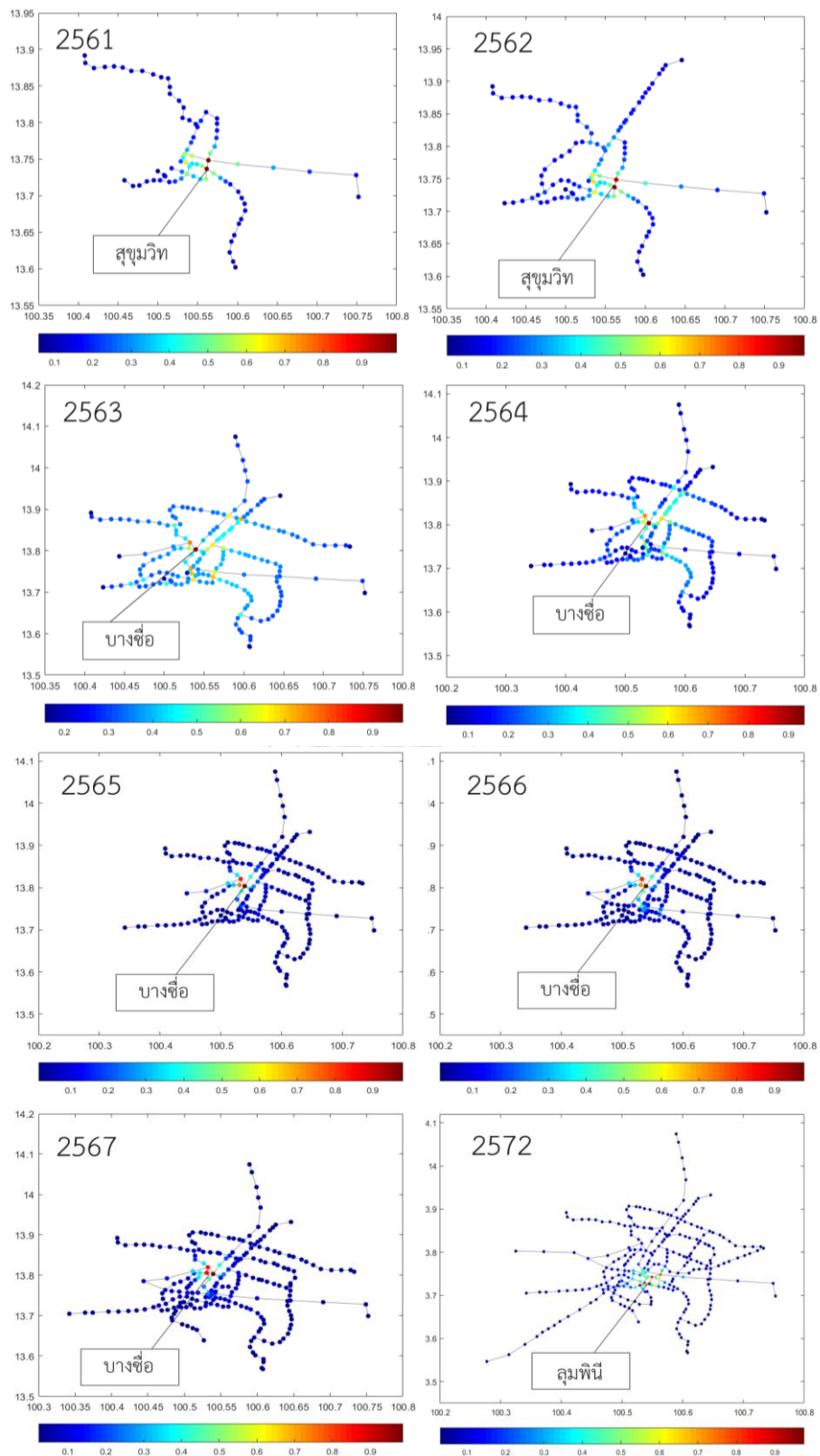
เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์ พบว่าตัวชี้วัดที่พัฒนาขึ้นมีค่าความสอดคล้องอยู่ในระดับสูงทั้งหมด ($T > 0.7$) และยังมีค่ามากกว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดอื่น ตลอดจนมีค่า Monotonicity ที่สูงซึ่งแสดงว่าไม่มีการเรียงลำดับซ้ำเลย ($M=1.000$) ดังนั้นตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนาจึงเหมาะสมสำหรับการเรียงลำดับเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบมากที่สุด

โดยภาพรวมตัวชี้วัดรวบยอดที่ทำการพัฒนาให้ประสิทธิภาพการเรียงลำดับเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบได้ดีมากกว่าการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลางชนิดใดชนิดหนึ่ง ยกเว้นเครือข่ายปี พ.ศ. 2566 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเคนดัลล์ของการเรียงลำดับด้วยตัวชี้วัดรวบยอดไม่แตกต่างกันกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเรียงลำดับด้วยค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ชนิดเดียวมากนัก ในมุมมองของความง่ายต่อการใช้งาน อาจสามารถเลือกใช้ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector ชนิดเดียวในการเรียงลำดับโดยไม่จำเป็นต้องสร้างตัวชี้วัดรวบยอดบนเครือข่าย พ.ศ. 2566 รวมถึงวิธีการเรียงลำดับดังกล่าวก็ไม่มีควมซ้ำซ้อนในการเรียงลำดับอีกด้วย ($M=1.0000$)

ในทำนองเดียวกันกับการแสดงผลค่าความเป็นศูนย์กลางในหัวข้อ 4.2 ตัวชี้วัดรวบยอดสามารถถูกนำเสนอออกมาเป็นแผนผังความเข้มข้นได้เช่นกัน รูปที่ 4.21 แสดงแผนผังความเข้มข้นของตัวชี้วัดรวบยอดเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบที่ทำการพัฒนา พบว่าในปี พ.ศ. 2561 และ พ.ศ. 2562 ความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบจะอยู่ที่บริเวณสถานีเพชรบุรีและสุขุมวิท ในขณะที่ปี พ.ศ. 2563 และ 2564 ความสำคัญดังกล่าวจะไปอยู่ที่บริเวณสถานีบางซื่อ ซึ่งมีการเกาะกลุ่มของสถานีที่มีการเชื่อมต่อมากๆ มาอยู่รวมกัน

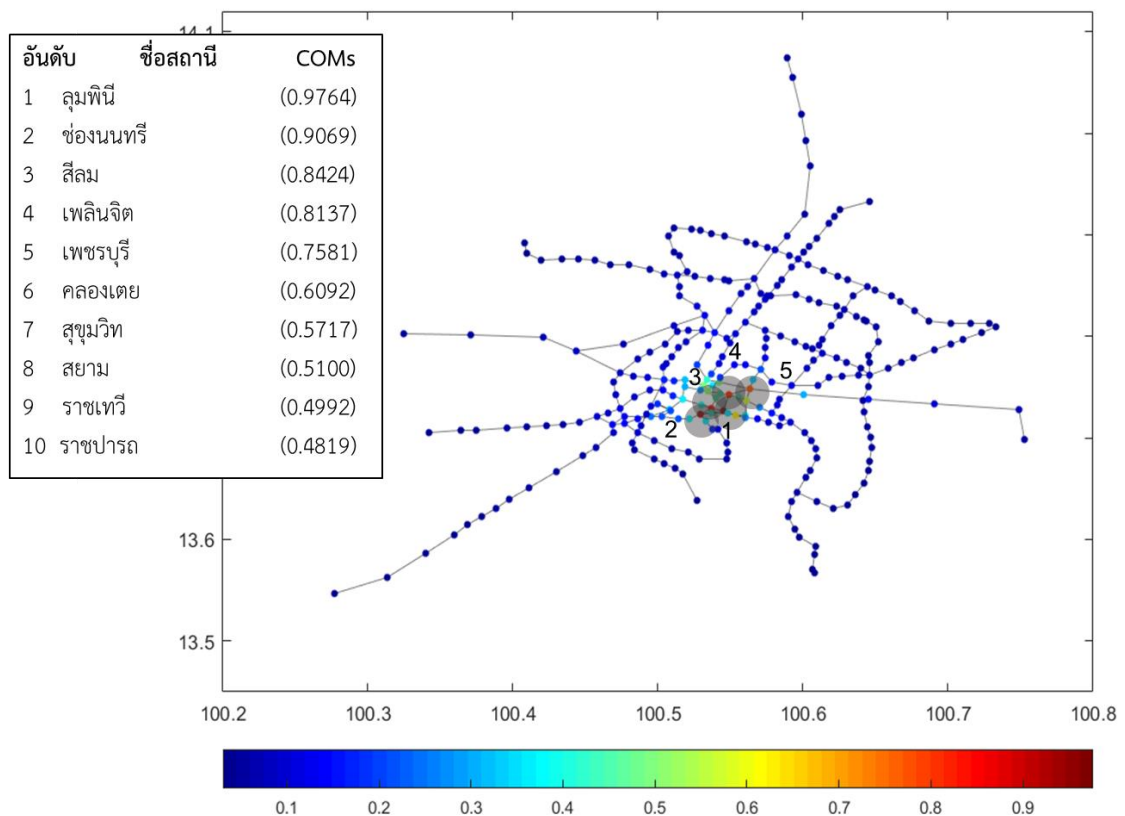
พ.ศ. 2565-2567 บริเวณสถานีบางซื่อ มีความสำคัญในเชิงดังกล่าวมากขึ้น (สังเกตจากสถานีอื่นๆ มีสีน้ำเงินเข้มขึ้นแสดงว่ามีสัดส่วนความสำคัญที่น้อยลง) เมื่อเปรียบเทียบกับปี พ.ศ. 2564 สุดท้ายใน พ.ศ. 2572 บริเวณที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบจะย้ายกลับมาอยู่กึ่งกลางเยื้องไปในทิศตะวันออกเฉียงใต้ บริเวณสถานีลุมพินี

เมื่อเปรียบเทียบการระบุความสำคัญทั้ง 2 ทิศทาง คือ ความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่าย (รูปที่ 4.19 หน้า 81) และความสำคัญเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ (รูปที่ 4.21) แล้ว จะพบว่าภาพรวมความสำคัญที่มากที่สุดจะย้ายไปยังบริเวณสถานีกลางบางซื่อในปี พ.ศ. 2563-2567 หรือกึ่งกลางทางด้านเหนือ-ตะวันตก และในปี พ.ศ. 2572 จะย้ายกลับมาอยู่กึ่งกลางเยื้องไปในทิศตะวันออกเฉียงใต้ บริเวณสถานีลุมพินี หรือบริเวณสถานีสีลม เหมือนกันกับปี พ.ศ. 2561



รูปที่ 4.21 แผนผังความเข้มข้นของตัวชี้วัดรอยต่อเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบที่ทำการพัฒนาพร้อมชี้ตำแหน่งสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงสุดบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2561-2572

รูปที่ 4.22 แสดงภาพขยายของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครปี พ.ศ. 2572 โดยแสดงบริเวณสถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ 10 อันดับแรก จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสถานีที่มีค่าดังกล่าวสูงจะเกาะกลุ่มกันอยู่บริเวณตัวเมืองชั้นในของเครือข่ายในปีดังกล่าว ในขณะที่สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายสูงๆ อาจไม่ได้อยู่ในบริเวณรอบๆ สถานีที่มีค่าสูงสุด แต่มีการกระจายความสำคัญออกไปในหลายๆ ตำแหน่งบนเครือข่ายมากกว่า ดังนั้นการพิจารณาทั้งสองเชิงไปด้วยกันจะเหมาะสมกับการบริหารจัดการเครือข่ายเพื่อเป้าหมายของการเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับเครือข่าย โดยที่ผู้วิจัยแนะนำให้พิจารณาความสำคัญเชิงประสิทธิภาพเครือข่ายเพื่อดูสถานีที่ทำให้เครือข่ายอ่อนไหวมากเมื่อถูกรบกวนก่อน แล้วเน้นพิจารณาบริเวณสถานีที่เป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบมากๆ เป็นพิเศษ

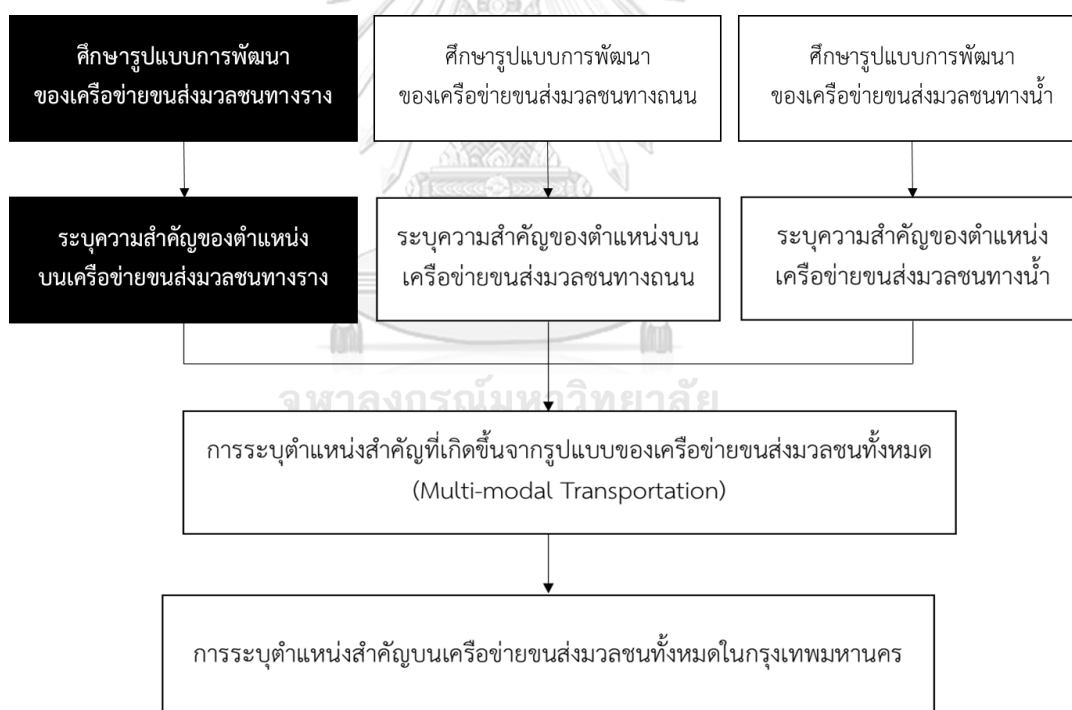


รูปที่ 4.22 เครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง พ.ศ. 2572 โดยแสดงบริเวณที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดเชิงการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ 10 อันดับแรก

4.3.3 การเสนอแนวทางสำหรับการระบุความสำคัญในอนาคต

จากการศึกษาการระบุความสำคัญของสถานีข้างต้นเป็นเพียงข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการระบุความสำคัญของสถานีที่เกิดจากรูปแบบการพัฒนาเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในการเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครในอนาคต อย่างไรก็ตามเราควรพิจารณาเครือข่ายขนส่งมวลชนหลักอื่นๆ ไปพร้อมๆ กัน สำหรับเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครที่สำคัญมี 3 เครือข่ายหลัก คือ เครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง (รถไฟฟ้า) เครือข่ายขนส่งมวลชนทางถนน (รถประจำทาง) และเครือข่ายขนส่งมวลชนทางน้ำ (เรือ) (สำนักนโยบายและขนส่งมวลชน, 2553)

เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยการระบุความสำคัญของตำแหน่งในอนาคตต่อไป ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางการวิจัยเกี่ยวกับการระบุความสำคัญของระบบเครือข่ายขนส่งมวลชนของกรุงเทพมหานครในอนาคตต่อยอด อันประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก (รูปที่ 4.23) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.23 แผนผังขั้นตอนการระบุความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร

(1) การศึกษารูปแบบการพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชน

ภายใต้ทฤษฎีเครือข่ายซับซ้อนได้กล่าวว่าคุณค่าความเป็นศูนย์กลาง (Centrality) เป็นตัวชี้วัดที่สามารถบ่งบอกความเป็นศูนย์กลางของแต่ละสมาชิกบนเครือข่ายออกมาเป็นค่าตัวเลขได้ ซึ่งสมาชิกที่

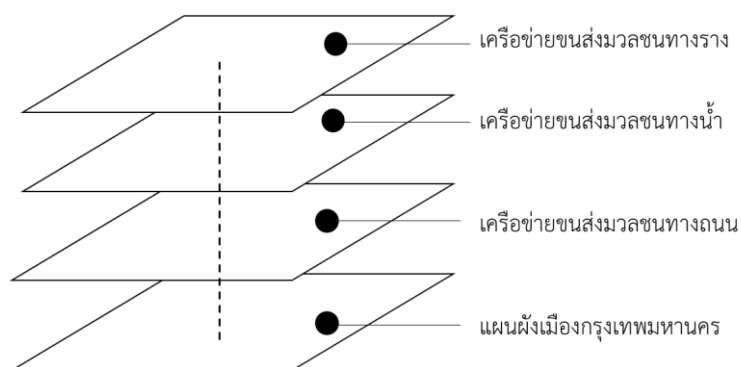
มีค่าความเป็นศูนย์กลางมากก็จะมีค่าสำคัญมาก เพื่อให้เกิดความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดและรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย ซึ่งเราได้ดำเนินการทำไปแล้วในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง (รูปที่ 4.24 สีที่บ) หากแต่ควรทำในเครือข่ายอื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เพื่อความเข้าใจในนโยบายและรูปแบบการพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชนอื่นๆ

(2) การระบุความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนที่เกิดจากรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายในแต่ละเครือข่าย

ในขณะที่ค่าความเป็นศูนย์กลางแต่ละชนิดนั้นให้ความหมายค่าความเป็นศูนย์กลางแตกต่างกัน เราจึงจำเป็นต้องพัฒนาตัวชี้วัดรวบยอดในการระบุความสำคัญบนเครือข่ายขึ้นมา โดยจะต้องพิจารณาเครือข่ายขนส่งมวลชนทั้งสามแยกกันเพื่อพิจารณาดำเนินการสำคัญบนเครือข่ายที่เกิดจากรูปแบบของเครือข่ายนั้นๆ ซึ่งจะมีประโยชน์ในเชิงการบำรุงรักษาเครือข่ายขนส่งมวลชนแต่ละประเภท ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำในส่วนของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครแล้ว (รูปที่ 4.22 สีที่บ)

(3) การระบุความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนที่เกิดจากรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายแบบต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multi-modal Public Transportation)

สำหรับขั้นตอนนี้จะนำผลการคำนวณของเครือข่ายทั้งสามมาพิจารณาพร้อมกัน ซึ่งจะช่วยให้ได้บริเวณที่มีความสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานครทั้งหมด โดยเราจะต้องเพิ่มเติมข้อมูลแผนที่เมืองกรุงเทพมหานคร เพราะตำแหน่งของสถานีในแต่ละเครือข่ายไม่เหมือนกัน รูปที่ 4.24 แสดงแผนผังการทับซ้อนของเครือข่ายขนส่งมวลชนและแผนผังเมืองกรุงเทพมหานคร อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีเทคโนโลยี GIS (Geographic Information System) ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลของสถานีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนลงบนแผนผังเมืองกรุงเทพมหานครที่ได้มาจากภาพถ่ายจากดาวเทียมได้ ทำให้เราไม่ต้องเก็บข้อมูลแผนผังเมืองของกรุงเทพมหานครเอง



รูปที่ 4.24 แผนผังการทับซ้อนเครือข่ายขนส่งมวลชนและแผนผังเมืองกรุงเทพมหานคร

รูปที่ 4.25 แสดงการทับซ้อนของเครือข่ายขนส่งมวลชนหลักทั้งสาม และแผนผังเมืองกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญในการพิจารณาระบบขนส่งมวลชนแบบต่อเนื่องหลายรูปแบบ ส่วนเส้นประสื่อถึงการเชื่อมโยงข้อมูลของทุกเครือข่ายเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งจะต้องเพิ่มข้อมูลในเรื่องของการเปลี่ยนรูปแบบการเดินทางระหว่างเครือข่าย ผลลัพธ์ของขั้นตอนนี้ผู้วิจัยมีความคาดหวังว่าจะได้ความสำคัญของสถานีในระบบเครือข่ายขนส่งมวลชนในกรุงเทพมหานคร ที่เกิดจากรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย

(4) การระบุตำแหน่งสำคัญบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทั้งหมดในกรุงเทพมหานคร

ในขั้นตอนนี้เราต้องเพิ่มเติมปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกใช้การเดินทางของแต่ละรูปแบบขนส่งมวลชน นอกจากรูปแบบการเชื่อมต่อ เพื่อให้การระบุความสำคัญบนเครือข่ายมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น อาทิเช่น จำนวนประชากรบนพื้นที่ เพื่อนำไปให้น้ำหนักกับเครือข่ายขนส่งมวลชน ซึ่งหากต้องการให้น้ำหนักกับเครือข่ายในอนาคตจะต้องอาศัยการพยากรณ์ร่วมด้วย ทั้งนี้หากเรานำข้อมูลเหล่านี้ไปให้น้ำหนักกับสถานีร่วมกับผลการคำนวณจากตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอด จะทำให้เราสามารถระบุบริเวณหรือเส้นทางที่มีแนวโน้มของจำนวนผู้ใช้บริการมากได้

ในมุมมองดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการคาดการณ์ปริมาณผู้โดยสาร ซึ่งปัจจุบันคาดการณ์จากหลักการ Trip Generation ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้ในการวางแผนลำดับการสร้างของเครือข่ายขนส่งมวลชนต่างๆ ด้วย ผ่านหลักการสำรวจและสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ (สำนักนโยบายแผนการขนส่งและจราจร, 2553) สำหรับงานวิจัยในอนาคตเราสามารถเปรียบเทียบวิธี Trip Generation กับวิธีที่เรานำเสนอเพื่อหาความสอดคล้องของทั้งสองวิธี เปรียบเสมือนการตรวจสอบรูปแบบเครือข่ายที่วางไว้ว่าเป็นไปตามที่วางแผนไว้หรือไม่ได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยการวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนา และระบุความสำคัญของสถานีในเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครนี้ ได้ใช้ทฤษฎีเครือข่ายซับซ้อน (Complex Network Theory) ซึ่งประกอบไปด้วยตัวชี้วัดเครือข่ายต่างๆ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบของเครือข่าย โดยที่เครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานครเป็นเครือข่ายที่ยังไม่มีการวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดจากของรูปแบบเครือข่ายที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างละเอียด รวมไปถึงการระบุความสำคัญของสถานี

อาจเรียกว่าจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการระบุความสำคัญของสถานี เพื่อช่วยในการบริหารจัดการในการเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับเครือข่ายต่อไป แต่เพื่อให้เกิดความเข้าใจว่าอิทธิพลจากรูปแบบเครือข่ายที่ส่งผลต่อความสำคัญที่เกิดขึ้นอย่างไรด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องมีการวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนาของเครือข่ายก่อน เป็นที่ทราบว่าทำไมงานวิจัยนี้จึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์รูปแบบการพัฒนา และการระบุความสำคัญของสถานี

5.1 การพัฒนารูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในกรุงเทพมหานคร

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเครือข่ายตั้งแต่เริ่มระบอบราง จนถึงเครือข่ายสมบูรณ์ตามแผนแม่บทระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2542-2572) ผ่านตัวชี้วัดเครือข่าย 6 ชนิด ได้แก่ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเครือข่าย (Network Diameter) ดัชนีแกมมา (Gamma Index) ค่าเอนโทรปีมาตรฐานของเครือข่าย (Network Standard Entropy) ค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree (Degree Centrality) ค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector (Eigenvector Centrality) ค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness (Closeness Centrality) และค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness (Betweenness Centrality) โดยที่ตัวชี้วัด 2 ชนิดแรกเป็นตัวชี้ระดับเครือข่าย และ 4 ชนิดหลังเป็นตัวชี้วัดระดับสมาชิก ซึ่งแต่ละชนิดจะสะท้อนความหมายของความเป็นศูนย์กลางออกมาแตกต่างกัน ได้แก่ DC แสดงความเป็นศูนย์กลางในการเชื่อมต่อทางตรง EC แสดงความเป็นศูนย์กลางในของการถูกล้อมรอบด้วยสถานีที่มี DC สูงหรือแสดงบริเวณที่มีการเกาะกลุ่มของการเชื่อมต่อมากๆ CC แสดงความเป็นศูนย์กลางที่ช่วยให้การเดินทางเร็วขึ้น หรือ “สถานีที่ไปไหนก็ใกล้” และ BC แสดงความเป็นศูนย์กลางในการเป็นทางผ่านของการเดินทาง

จากผลการดำเนินงาน ได้แบ่งระยะการเติบโตของเครือข่าย BRTN ออกเป็น 4 ระยะ แสดงถึงการเติบโตใน 4 ลักษณะ โดยภาพรวมในระยะแรกและระยะที่สอง (ระยะอดีต) เป็นระยะที่เริ่มก่อตั้งระบบราง จำนวนสถานียังคงน้อยมาก และยังไม่ครอบคลุมการเดินทางในเมือง เมื่อเปรียบเทียบกับเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางอื่น ๆ อาทิเช่น เครือข่าย Paris Metro และ เครือข่าย Newyork subway ที่มีจำนวนสถานีมากกว่า 280 สถานี ในระยะที่สองเป็นระยะที่ค่าตัวชีวิตเครือข่ายหลายชนิดแปรปรวน อาทิเช่น ดัชนีแกมมา ที่ค่าตกลงอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะใน พ.ศ. ที่เกิดการขาดการเชื่อมต่อของเส้นทาง (subline) ใน พ.ศ. 2555-2556 และ พ.ศ. 2559 ส่วนค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเครือข่ายเพิ่มขึ้นสูงในระยะที่ 2 เช่นกัน นับว่าในสองระยะแรกเป็นระยะของการขยายเครือข่ายในแนวรัศมีออกไปทางชานเมือง

ระยะที่ 3 ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนสถานีเพิ่มขึ้นสูง แต่การเพิ่มของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเครือข่ายไม่ได้เพิ่มขึ้นสูงตาม ระยะดังกล่าวยังคงมีการขยายเครือข่ายในแนวรัศมีอยู่บ้าง (จากผลการคำนวณค่าเอนโทรปีมาตรฐาน และ Degree Correlation) แต่ระยะการเดินทางสูงสุดในสองปีแรกยังคงอยู่ที่ระหว่างสถานีสุวรรณภูมิ-คลองบางไผ่ ไม่เกินกว่าระยะที่สองมากนัก ระยะที่ 4 จะเห็นชัดเจนว่าค่าดังกล่าวค่อนข้างคงที่ ยกเว้นในปี พ.ศ. 2572 ที่มีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางเครือข่ายอยู่ที่ 75.39 กิโลเมตร ระยะดังกล่าวคือระยะระหว่างสถานี

สำหรับตัวชี้วัดระดับสมาชิก หรือที่เรียกว่า ค่าความเป็นศูนย์กลาง จะสามารถบ่งบอกค่าตัวเลขเชิงปริมาณออกมาได้เป็นรายสถานี และแสดงผลออกมาเป็นแผนผังความเข้มข้นเพื่อให้วิเคราะห์ผลได้ง่ายขึ้น พบว่า สถานีที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness สูงในปลายระยะที่ 3 จะขยับขึ้นทางทิศเหนือของสายให้บริการเดิมเล็กน้อย (สีเขียวเข้ม) กระจายตัวรอบสถานีพหลโยธิน เนื่องมาจากการเปิดให้บริการสายรัศมีทางทิศเหนือหลายเส้นทาง หลังจากนั้นจะย้อนกลับมาอยู่ที่บริเวณสถานีพญาไท ใน พ.ศ. 2572 ซึ่งเป็นสายให้บริการเดิม ส่วนค่าความเป็นศูนย์กลาง Betweenness ให้ผลการคำนวณให้แบบเดียวกัน แต่จะเน้นเป็นเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างกลางเมืองกับชานเมือง

งานวิจัยส่วนแรกนี้เน้นไปทางการศึกษาเพื่อความเข้าใจในรูปแบบการขยายเครือข่าย และความเข้าใจในความหมายของตัวชี้วัด บทสรุปของงานวิจัยนี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการขยายแบบใดเหมาะสมมากกว่ากันด้วยข้อจำกัดเรื่องความรู้ทางด้านอื่น เช่น ด้านการพัฒนาผังเมือง ด้านเทคนิคระบบเครือข่าย หรือด้านเทคโนโลยี ซึ่งในอนาคตถ้าหากมีการรวบรวมความรู้ในหลากหลายศาสตร์ น่าจะสามารถนำวิธีการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไปใช้ประยุกต์กับเครือข่ายดังกล่าวได้

5.2 การระบุความสำคัญของสถานี

การระบุความสำคัญของสถานีมีเป้าหมายเพื่อเสริมสร้างความแข็งแกร่งให้กับเครือข่าย โดยการเรียงลำดับความสำคัญของสถานีสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบริหารจัดการเครือข่ายรายสถานี เพื่อให้สามารถระบุบริเวณที่ควรป้องกันเป็นลำดับต้นๆ บนเครือข่ายได้ โดยการพัฒนาตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอด (Comprehensive Node Importance Index) ผ่านหลักการให้น้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลาง 4 ชนิด คือ Degree, Eigenvector, Closeness, และ Betweenness ซึ่งการให้น้ำหนักของค่าความเป็นศูนย์กลางจะช่วยให้เราสามารถอธิบายได้ว่า การที่ความสำคัญไปอยู่ที่บริเวณดังกล่าว เกิดจากรูปแบบการเชื่อมต่อในลักษณะใด อาทิเช่น ถ้าหากตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอดให้น้ำหนักกับค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มากที่สุด แสดงว่าบริเวณที่มีความสำคัญจะเป็นบริเวณที่มีรูปแบบการเชื่อมต่อทางตรงมากๆ

ตัวชี้วัดความสำคัญรวบยอดที่ทำการพัฒนาประกอบด้วย 2 เชน คือ เชนประสิทธิภาพเครือข่าย และเชนการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ โดยที่ Li (2015) ได้กล่าวไว้ว่าถ้าสามารถระบุความสำคัญของเครือข่ายใน 2 เชนนี้ได้จะสามารถช่วยให้เครือข่ายมีความแข็งแกร่งต่อไปได้ด้วย โดยที่ในแต่ละเชนจะมีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน สำหรับความสำคัญเชนประสิทธิภาพเครือข่ายจะมองในมุมมองของประสิทธิภาพการเดินทางโดยเฉลี่ยทั้งเครือข่าย บริเวณใดที่ช่วยให้การเดินทางสั้นลง จะถือว่าเป็นบริเวณที่มีความสำคัญในเชนดังกล่าวมาก ส่วนความสำคัญเชนการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบจะเป็นมุมมองของการแพร่กระจายผลกระทบการติดขัดในการเดินทาง เช่นถ้าหากเส้นทางรางของสถานีหนึ่งๆ เสียหาย สถานีที่อยู่ติดกันก็อาจจะส่งผลกระทบต่อกันด้วย เนื่องจากมีเส้นทางรางเส้นทางเดียวกัน เปรียบได้กับการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน จะส่งผลให้รถติดแพร่กระจายตามแนวถนนออกไปเรื่อยๆ จากจุดเกิดเหตุ เป็นต้น

ผลการวิจัยพบว่า ความสำคัญเชนการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบมีแนวโน้มการกระจายความเข้มข้นออกจากบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ที่มีความสำคัญด้านการช่วยในการเดินทางที่รวดเร็ว (CC สูง) และบริเวณที่มีการเกาะกลุ่มของสถานีที่มีการเชื่อมต่อมากๆ (EC สูง) ส่วนความสำคัญเชนประสิทธิภาพเครือข่ายจะอยู่บริเวณที่เป็นจุดเปลี่ยนผ่านการเดินทาง (Transfers Hub) โดยเน้นไปในเส้นทางที่เป็นทางผ่านการเดินทางมาก (BC สูง) และกระจายอยู่ทั่วเครือข่ายมากกว่าตัวชี้วัดรวบยอดเชนการเป็นจุดแพร่กระจายผลกระทบ

สถานีที่มีความสำคัญมากที่สุดในทั้งสองเชน ในปี พ.ศ. 2561-2562 คือ สถานีสุขุมวิท ซึ่งเป็นสถานีเชื่อมต่อระหว่างสายวงแหวนสีน้ำเงิน และสายรัศมีสีเขียวอ่อน ซึ่งเป็นบริเวณเศรษฐกิจที่สำคัญ ส่วน พ.ศ. 2563-2567 สถานีที่มีความสำคัญทั้งสองเชนมากที่สุด คือ สถานีบางซื่อ ซึ่งถูกวางไว้ให้เป็นสถานีกลางการเชื่อมต่อทั้งจากทิศเหนือและทิศตะวันตก กับในเมืองที่เป็นจุดศูนย์กลางเศรษฐกิจ

อย่างไรก็ตามการ ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการระบุความสำคัญของสถานีบนเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางที่เกิดจากรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการระบุสถานีที่มีความสำคัญจะต้องขึ้นกับปริมาณผู้โดยสารบนสถานีนั้นๆ ด้วย ผู้วิจัยจึงได้เสนอแนวทางการระบุความสำคัญของสถานีสำหรับงานวิจัยในอนาคตในหัวข้อ 4.3.3 เพื่อให้สามารถคาดการณ์ปริมาณผู้โดยสารบริเวณสถานีนั้นๆ ได้ โดยจะต้องมีการเพิ่มเติมข้อมูลทั้งเครือข่ายขนส่งมวลชนรูปแบบอื่น (ทางถนน, ทางน้ำ), ข้อมูลแผนผังเมืองกรุงเทพมหานคร, จำนวนประชากรในแต่ละพื้นที่ และข้อมูลอื่นๆ ที่จะเป็ประโยชน์สำหรับการพยากรณ์การเลือกใช้เส้นทางการเดินทางของผู้โดยสาร ผู้วิจัยคาดหวังว่าจะสามารถคาดการณ์รูปแบบการเดินทางของผู้คนในกรุงเทพมหานครได้ และสามารถระบุความสำคัญของบริเวณต่างๆ บนเครือข่ายขนส่งมวลชนได้มีความสมจริงยิ่งขึ้นต่อไป

5.3 ข้อจำกัดในงานวิจัย

ภายใต้กรอบงานของการศึกษารูปแบบเครือข่ายขนส่งมวลชนทางราง ผู้วิจัยพิจารณาเฉพาะมิติของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางเท่านั้น โดยไม่พิจารณาถึงปัจจัยอื่น ภายใต้กรอบงานดังกล่าวมีข้อจำกัดของงานแบ่งออกเป็นสามประเด็นดังนี้

ประเด็นแรก คือ ระยะทางระหว่างสถานีที่เกิดจากการคำนวณผ่านพิกัดตามภูมิศาสตร์ (ตามสมการ 3-2 หน้า 33) ทำให้ระยะทางที่เกิดขึ้นเป็นระยะทางโดยประมาณเท่านั้น วิธีการแก้ไขให้มีความใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น คือ การใช้ระยะทางจริง ซึ่งจะมีข้อจำกัดด้านข้อมูลระยะทางจริงของสายที่ให้บริการใต้ดิน

ประเด็นที่สอง คือ การเลือกการเดินทางบนเส้นทางที่ใช้ระยะทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) ในค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness และ Betweenness ซึ่งความเป็นจริงแล้วการเลือกการเดินทางของผู้โดยสารอาจไม่ได้ตัดสินใจแค่เรื่องระยะทาง อาจมีเรื่องของระยะเวลา ความสามารถในการบรรจุผู้โดยสารของขบวนรถ หรือจำนวนครั้งที่ต้องเปลี่ยนเส้นทาง

ประเด็นที่สาม คือ ความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะของสมาชิกในแบบจำลอง SIR เราได้ใช้ค่าความน่าจะเป็นวิกฤตเป็นเกณฑ์ของความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเลือกเปลี่ยนสถานะของสมาชิก และให้ค่าความน่าจะเป็นในการฟื้นตัวของสมาชิกเท่ากับ 1 หรือสมาชิกทุกสมาชิกสามารถฟื้นตัวกลับสู่สถานะปกติได้ทันทีในรอบถัดไป ในความเป็นจริงแล้ว การฟื้นตัวนั้นเหมือนกับระยะเวลาการซ่อมบำรุง หรือเวลาในการคลี่คลายผลกระทบ ซึ่งแต่ละตำแหน่งบนเครือข่ายอาจใช้เวลาดังกล่าวไม่เท่ากัน ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ความใกล้-ไกลจากศูนย์ซ่อมบำรุงกับตำแหน่งเกิดเหตุ เป็นต้น

5.4 แนวทางการวิจัยในอนาคต

นอกจากการแก้ไขข้อจำกัดของงานวิจัยแล้ว แนวทางการวิจัยในอนาคตที่น่าสนใจ คือ การศึกษาการพัฒนาารูปแบบของเครือข่ายขนส่งมวลชนทางรางในเมืองอื่นๆ ซึ่งจะทำให้สามารถเปรียบเทียบลักษณะการพัฒนาของเมืองอื่นๆ กับกรุงเทพมหานครได้ ซึ่งน่าจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกัน

อีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจ คือ การศึกษาเครือข่ายขนส่งมวลชนในรูปแบบอื่น เช่น ทางถนน หรือ ทางเรือ หรืออาจศึกษาเครือข่ายขนส่งมวลชนในหลายๆ แบบพร้อมกัน (Multi-modal Transportation) ซึ่งจะทำให้มองเห็นถึงรูปแบบขนส่งมวลชนทั้งหมดที่อยู่ในเมืองที่ต้องการศึกษา และใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาของเครือข่ายขนส่งมวลชนทั้งหมดได้ ซึ่งอาจส่งผลถึงรูปแบบของผังเมือง (พนิต ภู์จินดา, 2556) และรูปแบบการเดินทางของผู้โดยสาร



รายการอ้างอิง

- พนิต ภูจินดา, (2556). ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบขนส่งมวลชน. พิมพ์ครั้งที่ 1, 162 หน้า
- สำนักนโยบายและวางแผนขนส่งมวลชน, (2553). แผนแม่บทการพัฒนาโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนสายหลักและสายรองในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล.
- สุทธิพันธุ์ พุฒิเลิศพงศ์, (2554). แนวทางการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อที่อยู่อาศัยเพื่อรองรับระบบรถไฟฟ้าสายสีม่วง. วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร, ปีที่ 5.
- วลีพร พจนะวาที, (2549). ผลกระทบของสถานีรถไฟฟ้่าใต้ดินบางซื่อ ที่มีต่อชุมชนและพื้นที่โดยรอบ. สาขาวิชาการวางแผนผังเมือง คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 144 หน้า
- Ahmad K., N., Silvana, S., Anna, T., (2009). *Networks, Topology and Dynamics: Theory and Applications to Economics and Social Systems*.
- Barthélemy, M., (2011). Spatial Networks. *Physics Reports*, 499(1-3), 1-101.
doi:10.1016/j.physrep.2010.11.002
- Bavelas, A., (1948). A mathematical model for group structures *Hum. Organ.*, 7(3), 16-30.
- Bimal, V., Alan, M., Meeyoung, C., Kroshna P., G., (2009). *On the evolution of user interaction in Facebook*. Paper presented at the Proceedings of the 2nd ACM workshop on Online social Networks, Barcelona, Spain.
- Bonacich, P., (1987). Power and Centrality: A Family of Measures. *Am. J. Sociol*, 92(5), 1170-1182.
- Bonacich, P., (2007). Some unique properties of Eigenvector centrality. *Social Networks*, 29(4), 555-564. doi:10.1016/j.socnet.2007.04.002
- Bonacich P., Lloyd P., (2001). Eigenvector-like measures of centrality for asymmetric relations *Social Networks*, 23, 191-201.

- Cats, O., (2017). Topological evolution of a metropolitan rail transport Network: The case of Stockholm. *Journal of Transport Geography*, 62, 172-183.
doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.06.002
- Daniel J., S., Yuhan, Z., Lu, Q.-C., (2015). Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Shanghai, China. *Sustainability*, 7, 6919-6936.
- Derrible, S., (2012). Network centrality of metro systems. *PLOS one*, 7(7), e40575.
doi:10.1371/journal.pone.0040575
- Ferguson G.A., (1980). *Statistical Analysis in Psychology and Education* New York: McGraw Hill Book Co.
- Fernquest, J., (2017). Bangkok traffic jams among world's worst. *Bangkok's Post*.
- Florian K., (2005). *Ranking and importance in complex Networks*.
- Freeman, L. C., (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35-41.
- Freeman, L. C., (1979). Centrality in social Networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215-239.
- Freeman, L. C., Borgatti, P. F., White, D. R., (1991). Centrality in valued graphs: A measure of Betweenness based on Network flow. *Social Networks*, 13, 141-154.
- Garrison, W. L., (1960). Connectivity of the interstate highway system. *Regional Science*, 6(1), 121-137.
- Haggett, P., & Chorley, R. J., (1972). Network Analysis in Geography. *New Zealand Geographer*, 28(1), 102-103.
- Hotelling, H., (1936). Simplified calculation of principal components. *Psychometrika*, 1(1), 27-35.
- Iyer, S., Killingback, T., Sundaram, B., Wang, Z., (2013). Attack robustness and centrality of complex networks. *PLoS One*, 8(4): p. e59613.
- Jenelius, E. (2009). Network structure and travel patterns: explaining the geographical disparities of road Network vulnerability. *Journal of Transport Geography*, 17(3), 234-244. doi:10.1016/j.jtrangeo.2008.06.002

- Katz, L., (1953). A new status index derived from sociometric analysis. *Psychometrika*, 18(1), 39-43.
- KENDALL, M. G., (1938). A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30(1/2), 81-93.
- Koordinaten., (2014). Formula for the distance calculation between two coordinates on earth. <http://www.koordinaten.com/informations/formula.shtml>
- Leskovec, J., Lang, K., Dasgupta, A., Mahoney, M., (2009). Community Structure in Large Networks: Natural Cluster Sizes and the Absence of Large Well-Defined Clusters. *Internet Mathematics*, 6(1), 29-123.
- Leskovec, J., Kleinberg, J., (2007). Graph evolution: Densification and shrinking diameters. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data (TKDD)*, 1(1).
- Litman, T., (2005). Impacts of rail transit on the performance of a transportation system. *Transport Research Record*, 1930, 21-29.
- Lü, L., Chen, D., Ren, X.-L., Zhang, Q.-M., Zhang, Y.-C., Zhou, T., (2016). Vital nodes identification in complex Networks. *Physics Reports*, 650, 1-63. doi:10.1016/j.physrep.2016.06.007
- Li, P.-X., Ren, Y.-Q., Xi, Y.-M., (2004). An importance measure of actor (set) within a Network. *Systems Science Press*, 22(4), 13-20.
- Liu, J., Xiong, Q., Shi, W., Shi, X., Wang, K., (2016). Evaluating the importance of nodes in complex networks. *Physica A*, 452, 209-219.
- Martin, T., Zhang X., Newman, M.E.J., (2014). Localization and centrality in Networks. *Phys. Rev. E*, 90(5).
- Reggiani, A., Nijkamp, P., Lanzi, D., (2015). Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, 4-15. doi:10.1016/j.tra.2014.12.012
- Rui, D., Norsidah, U., Hussain bin, H., Jianjun, W., (2015). Complex Network Theory Applied to the Growth of Kuala Lumpur's Public Urban Rail Transit Network. *PLOS one*, 10(10), e0139961.
- Sadit T. (2003). Network Analysis of Rail Mass Transit Transformation In Bangkok Metropolis. *Arch Journal*, 16, 137-152.

- Wang, J., Jin, F., Mo, H., Wang, F., (2009). Spatiotemporal evolution of China's railway Network in the 20th century: An accessibility approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(8), 765-778.
doi:10.1016/j.tra.2009.07.003
- William, P. Fox, Sean F. Everton., (2014). Using Mathematical Models in Decision Making Methodologies to Find Key Nodes in the Noordin Dark Network. *American Journal of Operations Research*, 4, 255-267. doi:10.4236/ajor.2014.44025
- Wittenbaum G. M., Hubbell A. P., & Zuckerman C. . (1999). Mutual enhancement: toward an understanding of the collective preference for shared information., *J. Pers. Soc. Psychol*, 77(5), 967.
- Yang, J., Leskovec, J. (2013). Defining and Evaluating Network Communities based on Ground-truth. *Knowledge and Information Systems*, 42(1), 181-213.
- Yang, X.-H., Chen, G., Chen, S.-Y., Wang, W.-L., Wang, L., (2014). Study on some bus transport Networks in China with considering spatial characteristics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 1-10.
doi:10.1016/j.tra.2014.08.004
- Yang, Y., Liu, Y., Zhou, M., Li, F., Sun, C., (2015). Robustness assessment of urban rail transit based on complex Network theory: A case study of the Beijing Subway. *Safety Science*, 79, 149-162. doi:10.1016/j.ssci.2015.06.006
- Zhang, J., Zhaoa, M., Liua, H., Xu, X., (2013). Networked characteristics of the urban rail transit Networks. *Physica A*, 392, 1538-1546.
- Zhou, J., Xu, W., Guo, X., Ma, X., (2015). Railway faults spreading model based on dynamics of complex Network. *International Journal of Modern Physics B*, 29(06). doi:10.1142/s0217979215500381
- Zhu L., Jinlong, L., (2016). The Evolution Analysis of Guangzhou Subway Network by Complex Network Theory. *Procedia Engineering*, 137, 186-195.
doi:10.1016/j.proeng.2016.01.249



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ลำดับการเปิดให้บริการเส้นทาง

ปี พ.ศ.	เปิดให้บริการ	ปิดให้บริการ
2542	สายสีเขียวเข้ม ช่วงหมอชิต-อ่อนนุช	
2547	สายสีเขียวอ่อน ช่วงสะพานตากสิน-ถนนตากสิน สายสีน้ำเงิน ช่วงบางซื่อ-หัวลำโพง	
2552	สายสีเขียวอ่อน ช่วงสะพานตากสิน-วงเวียนใหญ่	
2553	สายท่าอากาศยาน ช่วงมักกะสัน-สุวรรณภูมิ	
2554	สายสีเขียวเข้ม ช่วงอ่อนนุช-แบริ่ง	
2555	สายสีแดงอ่อน ช่วงตลิ่งชัน-บางซื่อ	
2556	สายสีเขียวอ่อน ช่วงวงเวียนใหญ่-บางหว้า	
2557		สายสีแดงอ่อน ช่วงตลิ่งชัน-บางซื่อ
2559	สายสีม่วง ช่วงเตาปูน-บางใหญ่	
2560	สายสีม่วง ช่วงบางซื่อ-เตาปูน สายสีเขียวเข้ม ช่วงแบริ่ง-สำโรง	
2561	สายสีเขียวเข้ม ช่วงสำโรง-สมุทรปราการ	

ปี พ.ศ.	เปิดให้บริการ	ปิดให้บริการ
	สายสีทอง ช่วงวงเวียนใหญ่-ประชาธิปไตย	
2562	สายสีเขียวเข้ม (ช่วงหมอชิต-คูคต) สายสีน้ำเงิน ช่วงหัวลำโพง-บางแค	
2563	สายสีแดงเข้ม ช่วงบางซื่อ-ธรรมศาสตร์ สายสีแดงอ่อน ช่วงบางซื่อ-พญาไท-มักกะสัน สายสีเขียวเข้ม ช่วงสมุทรปราการ-บางปู สายสีชมพู ช่วงแคราย-มีนบุรี สายสีเหลือง ช่วงลาดพร้าว-สำโรง	
2564	สายสีน้ำเงิน ช่วงบางแค-พุทธมณฑลสาย 4	
2565	สายสีน้ำตาล ช่วงศูนย์ราชการนนทบุรี-การเคหะแห่งชาติ	
2566	สายสีส้ม (ช่วงตลิ่งชัน-ศูนย์วัฒนธรรม)	
2567	สายสีม่วง ช่วงเตาปูน-ศรีนครินทร์	
2572	สายสีเทา ช่วงวัชรพล-มหาดไทย สายสีส้ม ช่วงศูนย์วัฒนธรรม-เคหะรามคำแหง สายสีแดงเข้ม ช่วงยศเส-มหาชัย	

ตารางที่ ก.2 สถานที่ที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Degree มากที่สุด 5 อันดับแรก

	อันดับ	พ.ศ. 2542	พ.ศ. 2547	พ.ศ. 2554	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2563	พ.ศ. 2567	พ.ศ. 2572
รายชื่อ สถานี ที่มีค่า DC สูงสุด 5 อันดับ แรก	1	สยาม (4)	สยาม (4)	สยาม (4)	สยาม (4)	สยาม (4)	บางซื่อ (5)	บางซื่อ (5)	เพชรบุรี (5)
	2	สีลม (2)	สีลม (4)	สีลม (4)	สีลม (4)	สีลม (4)	สีลม (4)	อนุสาวรีย์ ประชาธิปไตย (5)	บางซื่อ (5)
	3	โอโศก (2)	โอโศก (4)	โอโศก (4)	โอโศก (4)	โอโศก (4)	โอโศก (4)	สุขุมวิท (4)	ช่องนนทรี (5)
	4	พระขนิษฐ (2)	สวนจตุจักร (53.94)	เพชรบุรี (4)	เพชรบุรี (4)	เพชรบุรี (4)	เพชรบุรี (4)	สุขุมวิท (4)	แยกลำสาตี (5)
	5	เอกมัย (2)	นานา (53.32)	สวนจตุจักร (3)	สวนจตุจักร (3)	สวนจตุจักร (3)	สวนจตุจักร (3)	บางซื่อ (4)	อนุสาวรีย์ ประชาธิปไตย (5)
ค่าเฉลี่ย	1.91	2.05	2.04	2.03	2.06	2.10	2.16	2.27	
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.58	0.69	0.68	0.60	0.57	0.57	0.63	0.74	

ตารางตารางที่ ก.3 สถานที่ที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Eigenvector มากที่สุด 5 อันดับแรก

	อันดับ	2542	2547	2555	2560	2563	2567	2572
รายชื่อ สถานี ที่มีค่า EC สูงสุด 5 อันดับแรก	1	สีลม (0.212)	สีลม (0.412)	อโศก (0.477)	เพชรบุรี (0.438)	บางซื่อ (0.541)	บางซื่อ (0.512)	ลุมพินี (0.367)
	2	อโศก (0.079)	สยาม (0.379)	เพชรบุรี (0.439)	อโศก (0.434)	บางซื่อ (0.464)	เตาปูน (0.441)	ช่องนนทรี (0.336)
	3	สวนจตุจักร (0.011)	ราชดำริ (0.328)	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์ (0.255)	ราชปรารภ (0.252)	เตาปูน (0.409)	บางซื่อ (0.440)	สีลม (0.313)
	4	อ่อนนุช (0.004)	อโศก (0.280)	นานา (0.254)	นานา (0.228)	กำแพงเพชร (0.231)	สามเสน (0.210)	เพลินจิต (0.298)
	5	พระชโน่ง (0.009)	ลุมพินี (0.246)	พร้อมพงษ์ (0.240)	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์ (0.224)	สามเสน (0.225)	กำแพงเพชร (0.208)	เพชรบุรี (0.271)
ค่าเฉลี่ย	0.1469	0.1180	0.0855	0.0669	0.0220	0.0211	0.0218	
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.1480	0.1113	0.1054	0.0970	0.0710	0.0626	0.0552	

ตารางตารางที่ ก.4 สถานที่ที่มีค่าความเป็นศูนย์กลาง Closeness มากที่สุด 5 อันดับแรก ($\times 10^2$)

	อันดับ	พ.ศ. 2542	พ.ศ. 2547	พ.ศ. 2554	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2563	พ.ศ. 2567	พ.ศ. 2572
รายชื่อ สถานี	1	สยาม (125.35)	สยาม (56.25)	อโศก (30.56)	อโศก (5.234)	พญาไท (14.07)	พหลโยธิน (4.039)	บางซื่อ (4.523)	พญาไท (3.540)
ที่มีค่า CC สูงสุด	2	ชิดลม (118.17)	ชิดลม (54.91)	นานา (29.25)	สยาม (5.211)	ราชเทวี (14.02)	สวนจตุจักร (4.039)	สามเสน (4.399)	เพชรบุรี (3.477)
5 อันดับ แรก	3	ราชเทวี (115.27)	เพลินจิต (54.15)	เพลินจิต (29.25)	ชิดลม (5.207)	สยาม (13.98)	บางซื่อ (4.020)	ราชวิถี (4.325)	ราชปรารภ (3.477)
	4	เพลินจิต (112.18)	อโศก (53.94)	ชิดลม (28.98)	เพลินจิต (5.205)	อนุสาวรีย์ชัย สมรภูมิ (13.78)	สะพานควาย (3.955)	จตุจักร (4.318)	ราชวิถี (3.449)
	5	ราชดำริ (109.59)	นานา (53.32)	สยาม (28.62)	นานา (5.204)	ชิดลม (13.68)	กำแพงเพชร (3.947)	บางซื่อ (4.308)	บางซื่อ (3.444)
ค่าเฉลี่ย		86.92	42.06	21.32	4.116	10.12	2.820	2.996	2.480
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน		22.49	8.308	5.559	1.275	2.761	0.660	0.690	0.513

ตารางที่ ก.5 สถานที่ที่มีความเป็นศูนย์กลาง Betweenness มากที่สุด 5 อันดับแรก ($\times 10^2$)

	อันดับ	พ.ศ. 2542	พ.ศ. 2547	พ.ศ. 2559	พ.ศ. 2560	พ.ศ. 2563	พ.ศ. 2567	พ.ศ. 2572
รายชื่อ สถานี ที่มีค่า BC สูงสุด 5 อันดับแรก	1	สยาม (0.1240)	พร้อมพงษ์ (0.0540)	เพชรบุรี (0.0633)	พญาไท (3.434)	พหลโยธิน (2.270)	พหลโยธิน (2.170)	ราชเทวี (1.558)
	2	ชิดลม (0.0992)	ทองหล่อ (0.0491)	อโศก (0.0626)	สวนจตุจักร (3.404)	บางซื่อ (1.919)	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ (2.062)	พหลโยธิน (1.446)
	3	เพลินจิต (0.0930)	เอกมัย (0.0440)	อ่อนนุช (0.0577)	อนุสาวรีย์ชัย สมรภูมิ (3.262)	วัดพระศรีมหาธาตุ (1.760)	ราชเทวี (1.850)	อนุสาวรีย์ ประชาธิปไตย (1.256)
	4	อโศก (0.0495)	สยาม (0.0431)	ห้วยขวาง (0.0555)	สยาม (3.215)	ลาดพร้าว (1.678)	เสนานิคม (1.741)	มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ (1.168)
	5	นานา (0.0485)	พระโขนง (0.0386)	สีลม (0.0513)	สนามเป้า (3.192)	พหลโยธิน 24 (1.655)	รัชโยธิน (1.725)	พญาไท (1.140)
ค่าเฉลี่ย	2.632	1.961	1.408	1.389	0.562	0.437	0.351	
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.821	1.508	1.378	1.024	0.447	0.396	0.277	



ตารางที่ ข.1 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรายยอดด้านประสิทธิภาพเครื่องข่ายสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2561-2564
 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรายยอดด้านประสิทธิภาพมากที่สุด (ลึที่บ) 0-10% แรกของสถานีทั้งหมด และ (ลึที่บ) 10-20% แรกของสถานีทั้งหมด

ลำดับ	2561	COM _E	2562	COM _E	2563	COM _E	2564	COM _E
1	สุภูมิวิท	0.9965	สุภูมิวิท	0.9567	บางซื่อ	0.9686	บางซื่อ	0.9737
2	สยาม	0.9786	สีลม	0.9493	บางซื่อ	0.7604	พญาไท	0.7890
3	สีลม	0.9545	สยาม	0.9479	พญาไท	0.7275	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7862
4	เพชรบุรี	0.9489	เพชรบุรี	0.8915	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7144	สุภูมิวิท	0.7843
5	พญาไท	0.8197	สวนจตุจักร	0.8190	สุภูมิวิท	0.7079	สยาม	0.7707
6	สวนจตุจักร	0.7814	เตาปูน	0.7777	สยาม	0.7043	บางซื่อ	0.7583
7	กรุงธนบุรี	0.7059	พญาไท	0.7776	สีลม	0.6751	สีลม	0.7528
8	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.6319	พหลโยธิน	0.7555	พหลโยธิน	0.6712	เพชรบุรี	0.7360
9	สนามเป้า	0.6222	กรุงธนบุรี	0.6721	เพชรบุรี	0.6638	หลักสี่	0.7271
10	ราชเทวี	0.6219	ท่าพระ	0.6532	หลักสี่	0.6468	พหลโยธิน	0.7073
11	อารีย์	0.6131	บางหว้า	0.6331	ลาดพร้าว	0.6091	ลาดพร้าว	0.6494
12	พร้อมพงษ์	0.6047	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.5960	สวนจตุจักร	0.6036	สวนจตุจักร	0.6336
13	สะพานควาย	0.6045	สนามเป้า	0.5928	เตาปูน	0.5898	เตาปูน	0.5859
14	กำแพงเพชร	0.5897	กำแพงเพชร	0.5914	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.5233	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.5792
15	ทองหล่อ	0.5887	อารีย์	0.5905	ลำโพง	0.4882	ลำโพง	0.5442

ลำดับ	2561	COM _E	2562	COM _E	2563	COM _E	2564	COM _E
16	บางซื่อ	0.5783	สะพานควาย	0.5874	พหลโยธิน 24	0.4857	กรุงธนบุรี	0.5396
17	ชิดลม	0.5770	บางซื่อ	0.5843	กรุงธนบุรี	0.4783	ท่าพระ	0.5336
18	นานา	0.5744	ราชเทวี	0.5828	รัชโยธิน	0.4779	บางหว้า	0.5302
19	เอกมัย	0.5736	พร้อมพงษ์	0.5524	เสนานิคม	0.4711	พหลโยธิน 24	0.5076
20	ช่องนนทรี	0.5731	พหลโยธิน 24	0.5495	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.4664	รัชโยธิน	0.5010
21	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์	0.5726	บางซื่อ	0.5446	สามเสน	0.4641	เสนานิคม	0.4948
22	เพลินจิต	0.5725	ทองหล่อ	0.5398	ราชเทวี	0.4625	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.4889
23	ราชดำริ	0.5704	รัชโยธิน	0.5395	กรมป่าไม้	0.4596	ราชเทวี	0.4880
24	เตาปูน	0.5671	วงศ์สว่าง	0.5326	ท่าพระ	0.4593	กรมป่าไม้	0.4833
25	คลองเตย	0.5620	ราชดำริ	0.5306	บางบัว	0.4548	บางบัว	0.4779
26	คูมพินี	0.5601	เอกมัย	0.5286	กำแพงเพชร	0.4501	กรมทหารราบที่ 11	0.4772
27	ราชปรารภ	0.5595	เสนานิคม	0.5284	กรมทหารราบที่ 11	0.4489	พร้อมพงษ์	0.4723
28	พระขนิษฐา	0.5593	ช่องนนทรี	0.5229	บางหว้า	0.4454	ทองหล่อ	0.4636
29	สุรศักดิ์	0.5579	แยกติวานนท์	0.5196	วงศ์สว่าง	0.4439	สามเสน	0.4601
30	บางซื่อ	0.5562	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.5192	ราชวิถี	0.4373	ราชวิถี	0.4565
31	พระราม 9	0.5550	พระขนิษฐา	0.5180	พร้อมพงษ์	0.4358	เอกมัย	0.4553
32	รามคำแหง-แดง	0.5525	สุรศักดิ์	0.5119	ทองหล่อ	0.4268	วงศ์สว่าง	0.4517
33	ศูนย์วัฒนธรรม	0.5459	คูมพินี	0.5118	เอกมัย	0.4194	กำแพงเพชร	0.4489
34	อ่อนนุช	0.5457	กระทรวงสาธารณสุข	0.5090	ภาวนา	0.4153	พระขนิษฐา	0.4474
35	วงศ์สว่าง	0.5456	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์	0.5077	บางโพ	0.4147	ภาวนา	0.4419

ลำดับ	2561	COME	2562	COME	2563	COME	2564	COME
36	สะพานตากสิน	0.5434	ชิดลม	0.5075	แยกติวานนท์	0.4125	แยกติวานนท์	0.4415
37	ห้วยขวาง	0.5373	คลองเตย	0.5067	พระขนิษฐา	0.4125	อ่อนนุช	0.4398
38	แยกติวานนท์	0.5351	กรมป่าไม้	0.5063	จตุจักร	0.4076	บางโพ	0.4353
39	บางจาก	0.5327	อ่อนนุช	0.5048	รัชดาภิเษก	0.4074	ราชดำริ	0.4329
40	หัวหมาก	0.5313	สะพานตากสิน	0.5028	อ่อนนุช	0.4040	โชคชัย 4	0.4325
41	สุทธิสาร	0.5291	เพลินจิต	0.5012	โชคชัย 4	0.4037	บางจาก	0.4325
42	กระทรวงสาธารณสุข	0.5249	พระราม 9	0.4976	สุทธิสาร	0.4032	กระทรวงสาธารณสุข	0.4323
43	รัชดาภิเษก	0.5214	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.4975	ราชดำริ	0.4032	รัชดาภิเษก	0.4307
44	ปทุมธานี	0.5202	นานา	0.4965	สะพานควาย	0.4009	พระราม 9	0.4294
45	พหลโยธิน	0.5194	บางบัว	0.4960	ห้วยขวาง	0.4002	สุทธิสาร	0.4275
46	สามย่าน	0.5166	สามย่าน	0.4948	พระราม 9	0.3986	บางอ้อ	0.4255
47	ลาดพร้าว	0.5162	ศูนย์วัฒนธรรม	0.4945	ศูนย์วัฒนธรรม	0.3978	ปทุมธานี	0.4254
48	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.5149	บางโพ	0.4941	กระทรวงสาธารณสุข	0.3969	ห้วยขวาง	0.4254
49	บ้านทับช้าง	0.5122	บางจาก	0.4934	บางจาก	0.3968	ศูนย์วัฒนธรรม	0.4253
50	อุดมสุข	0.5082	ห้วยขวาง	0.4916	ลาดพร้าว 65	0.3947	ลาดพร้าว 65	0.4238
51	ศรีพรสวรรค์	0.5051	สุทธิสาร	0.4893	อารีย์	0.3925	รามอินทรา 3	0.4226
52	วงเวียนใหญ่	0.4999	ลาดพร้าว	0.4890	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.3911	ทองนพคุณ	0.4218
53	บางนา	0.4966	รัชดาภิเษก	0.4875	ปทุมธานี	0.3903	อุดมสุข	0.4186
54	แยกนนทบุรี 1	0.4954	ศรีพรสวรรค์	0.4872	รามอินทรา 3	0.3900	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.4183
55	ลาดกระบัง	0.4946	บางอ้อ	0.4854	สนามเป้า	0.3895	สะพานควาย	0.4183

ลำดับ	2561	COM _E	2562	COM _E	2563	COM _E	2564	COM _E
56	เจริญนคร	0.4879	กรมทหารราบที่ 11	0.4833	ลาดพร้าว 71	0.3880	บางพลัด	0.4168
57	โพธิ์นิมิต	0.4863	ปทุมธานี	0.4826	บางอ้อ	0.3875	ลาดพร้าว 71	0.4159
58	สะพานพระนั่งเกล้า	0.4858	หัวลำโพง	0.4813	อุดมสุข	0.3837	อารีย์	0.4151
59	แบริ่ง	0.4853	แยกถนนพบุรี 1	0.4762	ช่องนนทรี	0.3819	ราชวิถี	0.4140
60	ไทรมา	0.4763	บางพลัด	0.4758	จิดลุม	0.3816	จตุจักร	0.4135

ตารางที่ ข.2 สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดด้านประสิทธิภาพเครือข่ายสูงสุด 60 อันดับแรก พ.ศ. 2565-2572

สถานีที่มีค่าตัวชี้วัดรวบยอดด้านประสิทธิภาพมากที่สุด (ลำดับ) 0-10% แรกของสถานีทั้งหมด และ (ลำดับ) 10-20% แรกของสถานีทั้งหมด

ลำดับ	2565	COM _E	2566	COM _E	2567	COM _E	2572	COM _E
1	บางซื่อ	0.9331	บางซื่อ	0.9281	อนุสาวรีย์ประชาธิปไตย	0.9162	อนุสาวรีย์ประชาธิปไตย	0.9457
2	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.8553	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.8531	บางซื่อ	0.9123	บางซื่อ	0.9435
3	พญาไท	0.7730	ราชเทวี	0.7932	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.8323	เพชรบุรี	0.9136
4	สุขุมวิท	0.7654	พญาไท	0.7829	ราชเทวี	0.8216	ช่องนนทรี	0.8996
5	สยาม	0.7610	สยาม	0.7687	พญาไท	0.7927	แยกลำสาลี	0.8857
6	บางเขน	0.7608	สุขุมวิท	0.7663	สุขุมวิท	0.7545	ราชเทวี	0.8566
7	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7490	บางเขน	0.7579	บางเขน	0.7514	พญาไท	0.8064
8	สีลม	0.7438	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7469	สยาม	0.7473	ศูนย์วัฒนธรรม	0.7948
9	เพชรบุรี	0.7308	สีลม	0.7406	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7370	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.7871
10	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.7233	เพชรบุรี	0.7320	เตาปูน	0.7306	ประดิษฐ์มูธรรม	0.7709
11	บางซื่อ	0.7219	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.7219	บางซื่อ	0.7266	บางซื่อ	0.7598
12	พหลโยธิน	0.7187	พหลโยธิน	0.7200	เพชรบุรี	0.7215	ตลาดพลู	0.7540
13	หลักสี่	0.7066	บางซื่อ	0.7184	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.7191	เพลินจิต	0.7533
14	ลาดพร้าว	0.6553	หลักสี่	0.7045	พหลโยธิน	0.7068	สยาม	0.7480
15	สวนจตุจักร	0.6253	บางขุนนนท์	0.6930	หลักสี่	0.7050	เตาปูน	0.7450
16	เตาปูน	0.5816	ลาดพร้าว	0.6542	สีลม	0.7045	สุขุมวิท	0.7350
17	พหลโยธิน 24	0.5426	สวนจตุจักร	0.6289	บางขุนนนท์	0.6608	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.7340

ลำดับ	2565	COM _E	2566	COM _E	2567	COM _E	2572	COM _E
18	รัชโยธิน	0.5406	ศูนย์วัฒนธรรม	0.5806	ลาดพร้าว	0.6347	ทุ่งสองห้อง	0.7315
19	แยกถ้ำสาลี	0.5400	เตาปูน	0.5759	สวนจตุจักร	0.6283	วงเวียนใหญ่ (LG)	0.7309
20	เสนาภิคม	0.5384	พหลโยธิน 24	0.5435	ศูนย์วัฒนธรรม	0.5632	คลองรัช	0.7306
21	กรุงธนบุรี	0.5382	รัชโยธิน	0.5412	วังบูรพา	0.5604	วุฒากาศ	0.7273
22	สำโรง	0.5379	เสนาภิคม	0.5385	ท่าพระ	0.5364	หลักสี่	0.7256
23	ท่าพระ	0.5303	กรุงธนบุรี	0.5383	สำโรง	0.5311	ลุมพินี	0.7167
24	บางหัว	0.5270	สำโรง	0.5382	บางหัว	0.5283	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.7162
25	ราชเทวี	0.4781	แยกถ้ำสาลี	0.5381	ประตูน้ํา	0.5277	ประดิษฐ์มนูธรรม (น้ำตาล)	0.7154
26	กรมป่าไม้	0.4745	บางหัว	0.5277	ราชปรารถ	0.5252	หัวลำโพง	0.7110
27	บางบัว	0.4688	ท่าพระ	0.5276	พหลโยธิน 24	0.5252	คลองเตย	0.7088
28	กรมทหารราบที่ 11	0.4607	ประตูน้ํา	0.5255	แยกถ้ำสาลี	0.5248	ท่าพระ	0.7060
29	พร้อมพงษ์	0.4571	ราชปรารถ	0.5235	รัชโยธิน	0.5211	สีลม	0.7034
30	คุณหญิงจิสรา (น้ำตาล)	0.4500	กรมป่าไม้	0.4734	กรุงธนบุรี	0.5193	พหลโยธิน	0.6933
31	ทองหล่อ	0.4491	บางบัว	0.4676	เสนาภิคม	0.5177	มีนสวรินทร์ (ม่วง)	0.6928
32	ภาวนา	0.4452	กรมทหารราบที่ 11	0.4595	กรมป่าไม้	0.4589	คลองสาน	0.6859
33	รัชดาภิเษก	0.4436	พร้อมพงษ์	0.4593	พร้อมพงษ์	0.4528	บางขุนนนท์	0.6784
34	สามเสน	0.4433	ทองหล่อ	0.4510	ยมราช	0.4520	สวนจตุจักร	0.6438
35	เอกมัย	0.4423	คุณหญิงจิสรา (น้ำตาล)	0.4460	บางบัว	0.4518	ยมราช (ส้ม)	0.6394
36	สุทธิสาร	0.4403	รัชดาภิเษก	0.4449	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.4513	ลาดพร้าว	0.6079
37	ราชวิถี	0.4385	ภาวนา	0.4443	สะพานควาย	0.4495	พระชัยเมิง	0.6044

ลำดับ	2565	COM _E	2566	COM _E	2567	COM _E	2572	COM _E
38	ห้วยขวาง	0.4374	เอกมัย	0.4441	อารีย์	0.4474	ทองหล่อ	0.5989
39	พระชนก	0.4360	สามเสน	0.4429	หลานหลวง	0.4465	วังบูรพา	0.5834
40	โชคชัย 4	0.4359	สุทธิสาร	0.4426	สนามเป้า	0.4462	ประตูนํ้า (ส้ม)	0.5645
41	ศูนย์วัฒนธรรม	0.4344	ห้วยขวาง	0.4406	กรมทหารราบที่ 11	0.4452	กรุงธนบุรี	0.5628
42	ราชดำริ	0.4337	ราชวิถี	0.4396	ทองหล่อ	0.4444	วัชรพล	0.5504
43	พระราม 9	0.4333	สะพานควาย	0.4376	เอกมัย	0.4365	ยศเส (แดง)	0.5500
44	บางโพ	0.4323	พระชนก	0.4376	ภavana	0.4319	ลำโพง	0.5432
45	กำแพงเพชร	0.4301	ราชดำริ	0.4360	สามเสน	0.4306	บางหว้า	0.5391
46	สะพานควาย	0.4298	โชคชัย 4	0.4349	ศูนย์จิงอิศรา (น้ำตาล)	0.4305	ราชปรารถ	0.5327
47	ลาดพร้าว 65	0.4284	อารีย์	0.4349	พระชนก	0.4289	ตลิ่งชัน (ส้ม)	0.5236
48	อ่อนนุช	0.4279	สนามเป้า	0.4334	ราชวิถี	0.4284	พหลโยธิน 24	0.5047
49	ทุ่งสองห้อง	0.4258	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.4329	วงศ์สว่าง	0.4271	เจริญนคร	0.4999
50	อารีย์	0.4257	พระราม 9	0.4329	รัชดาภิเษก	0.4249	รัชโยธิน	0.4989
51	บางอ้อ	0.4243	อ่อนนุช	0.4293	โชคชัย 4	0.4233	เสนานิคม	0.4939
52	สนามเป้า	0.4233	ลาดพร้าว 65	0.4274	สุทธิสาร	0.4224	พระราม 9	0.4678
53	ลาดพร้าว 71	0.4229	บางโพ	0.4268	อ่อนนุช	0.4218	รพม (ส้ม)	0.4620
54	รามอินทรา 3	0.4224	กำแพงเพชร	0.4264	ห้วยขวาง	0.4210	หลานหลวง (ส้ม)	0.4591
55	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.4220	ทุ่งสองห้อง	0.4247	ทุ่งสองห้อง	0.4206	วงศ์สว่าง	0.4539
56	บางจาก	0.4212	บางจาก	0.4224	แยกติวานนท์	0.4184	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.4516
57	กรมเยื่อใยทหารบก BR	0.4208	ลาดพร้าว 71	0.4218	พระราม 9	0.4182	อ่อนนุช	0.4469

ลำดับ	2565	COM _E	2566	COM _E	2567	COM _E	2572	COM _E
58	วงศ์สว่าง	0.4188	รามอินทรา 3	0.4207	เกียกกาย	0.4160	แยกติวานนท์	0.4444
59	ช่องนนทรี	0.4184	วงศ์สว่าง	0.4204	ลาดพร้าว 65	0.4155	สนามเป้า	0.4442
60	ฉลองรัช	0.4168	กรมแพทย์โรงพยาบาลบก (น้ำตาล)	0.4196	บางจาก	0.4150	สะพานควาย	0.4441

ตารางที่ ข.3 สถานีที่มีค่าตัวรวบยอดด้านการแพร่กระจายผลกระทบสูงสุด 60 อันดับแรก บนเครือข่าย พ.ศ. 2561-2564

สถานีที่มีค่าตัวรวบยอดด้านประสิทธิภาพมากที่สุด (สตีป) 0-10% แรกของสถานีทั้งหมด และ (สีโอ่น) 10-20% แรกของสถานีทั้งหมด

ลำดับ	2561	COMs	2562	COMs	2563	COMs	2564	COMs
1	สุขุมวิท	0.9913	สุขุมวิท	0.9657	บางซื่อ	0.9964	บางซื่อ	0.9408
2	เพชรบุรี	0.9895	เพชรบุรี	0.9226	บางซื่อ	0.8510	บางซื่อ	0.6964
3	สยาม	0.5968	สยาม	0.6452	เตาปูน	0.7544	พหลโยธิน	0.6196
4	ราชปรารภ	0.5797	สีลม	0.5978	กำแพงเพชร	0.4778	เตาปูน	0.5513
5	พญาไท	0.5472	พญาไท	0.5795	สามเสน	0.4694	พญาไท	0.5178
6	นานา	0.5383	พร้อมพงษ์	0.5082	จตุจักร	0.4513	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.5126
7	ศูนย์ประชุมสิริกิตต์	0.5324	ราชปรารภ	0.4944	วงศ์สว่าง	0.4055	สุขุมวิท	0.4885
8	สีลม	0.5206	ศูนย์ประชุมสิริกิตต์	0.4933	บางบำรัว	0.3896	สวนจตุจักร	0.4870
9	พร้อมพงษ์	0.5157	นานา	0.4873	บางโพ	0.3739	ลาดพร้าว	0.4754
10	พระราม 9	0.5096	พระราม 9	0.4682	สวนจตุจักร	0.3365	สยาม	0.4624
11	รามคำแหง (แดง)	0.5083	ราชเทวี	0.4576	ราชวิถี	0.2854	พหลโยธิน 24	0.4346
12	ราชเทวี	0.4352	รามคำแหง (แดง)	0.4484	พญาไท	0.2742	สีลม	0.4260
13	ราชดำริ	0.4023	ราชดำริ	0.4066	พหลโยธิน	0.2577	สามเสน	0.4232
14	เพลินจิต	0.3921	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.3755	วัดเสมียนนารี	0.2525	รัชโยธิน	0.4177
15	ชิดลม	0.3854	เพลินจิต	0.3729	แยกติวานนท์	0.2339	กำแพงเพชร	0.4081
16	คลองเตย	0.3742	ชิดลม	0.3711	บางอ้อ	0.2234	เสนานิคม	0.4065
17	ลุมพินี	0.3474	คลองเตย	0.3685	สะพานควาย	0.2094	วงศ์สว่าง	0.4008
18	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.3242	ลุมพินี	0.3524	บางกรวย	0.2063	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.3975

ลำดับ	2561	COMs	2562	COMs	2563	COMs	2564	COMs
19	ทองหล่อ	0.3208	ทองหล่อ	0.3484	ลาดพร้าว	0.2025	กรมป่าไม้	0.3895
20	ศูนย์วัฒนธรรม	0.3149	สวนจตุจักร	0.3441	สยาม	0.1978	บางบัว	0.3821
21	หัวหมาก	0.3098	ศูนย์วัฒนธรรม	0.3120	เพชรบุรี	0.1975	ราชเทวี	0.3809
22	ช่องนนทรี	0.2839	ช่องนนทรี	0.3094	สุขุมวิท	0.1882	เพชรบุรี	0.3803
23	สามย่าน	0.2651	เตาปูน	0.3029	ราชเทวี	0.1836	กรมทหารราบที่ 11	0.3769
24	สนามกีฬาแห่งชาติ	0.2347	สนามเป้า	0.3029	พหลโยธิน 24	0.1785	หลักสี่	0.3711
25	สนามเป้า	0.2332	พหลโยธิน	0.2960	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.1760	บางโพ	0.3494
26	เอกมัย	0.2239	สามย่าน	0.2871	ราชปรารภ	0.1726	พร้อมพงษ์	0.3449
27	หัวขวาง	0.2190	หัวหมาก	0.2834	บางเขน	0.1719	ราชวิถี	0.3430
28	บ้านทับช้าง	0.2103	อารีย์	0.2680	สีลม	0.1696	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.3323
29	สุรศักดิ์	0.2053	เอกมัย	0.2674	อารีย์	0.1685	ทองหล่อ	0.3321
30	สวนจตุจักร	0.1980	สะพานควาย	0.2521	หลักสี่	0.1645	เอกมัย	0.3207
31	อารีย์	0.1884	กรุงธนบุรี	0.2462	กระทรวงสาธารณสุข	0.1641	จตุจักร	0.3202
32	กรุงธนบุรี	0.1867	กำแพงเพชร	0.2447	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.1626	แยกติวานนท์	0.3192
33	พระชนมโง	0.1749	สุรศักดิ์	0.2414	สนามเป้า	0.1599	พระชนมโง	0.3098
34	สุทธิสาร	0.1716	บางซื่อ	0.2369	บางพลัด	0.1572	อ่อนนุช	0.2992
35	สะพานควาย	0.1669	หัวขวาง	0.2355	รัชโยธิน	0.1545	บางจาก	0.2887
36	สะพานตากสิน	0.1666	พระชนมโง	0.2247	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1543	ลำโพง	0.2864
37	ลาดกระบัง	0.1587	ท่าพระ	0.2178	รัชดาภิเษก	0.1513	ภาวนา	0.2852
38	อ่อนนุช	0.1492	หัวลำโพง	0.2170	ภาวนา	0.1479	กระทรวงสาธารณสุข	0.2804

ลำดับ	2561	COMs	2562	COMs	2563	COMs	2564	COMs
39	รัชดาภิเษก	0.1482	พหลโยธิน 24	0.2161	เสนานิคม	0.1427	ปทุมธานี	0.2783
40	กำแพงเพชร	0.1473	บางซื่อ	0.2091	พระราม 9	0.1422	บางอ้อ	0.2761
41	บางซื่อ	0.1398	สะพานตากสิน	0.2072	ราชดำริ	0.1415	โชคชัย 4	0.2690
42	ลาดพร้าว	0.1377	รัชโยธิน	0.2063	ชิดลม	0.1400	อุดมสุข	0.2679
43	พหลโยธิน	0.1371	บางหว้า	0.2036	สุทธิสาร	0.1396	ราชดำริ	0.2587
44	หัวลำโพง	0.1370	วงศ์สว่าง	0.2020	ทุ่งสองห้อง	0.1389	บางนา	0.2576
45	บางจาก	0.1350	อ่อนนุช	0.2002	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1376	รามอินทรา 3	0.2563
46	เตาปูน	0.1346	บ้านทับช้าง	0.1986	พร้อมพงษ์	0.1363	ลาดพร้าว 65	0.2555
47	บางซื่อ	0.1307	สุทธิสาร	0.1983	ศูนย์วัฒนธรรม	0.1351	รัชดาภิเษก	0.2546
48	วงเวียนใหญ่	0.1296	เสนานิคม	0.1982	ห้วยขวาง	0.1351	กรุงธนบุรี	0.2514
49	วงศ์สว่าง	0.1274	แยกติวานนท์	0.1950	นานา	0.1349	บางรัก	0.2473
50	เจริญนคร	0.1270	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1913	เพลินจิต	0.1339	สุทธิสาร	0.2472
51	ปทุมธานี	0.1266	สนามกีฬาแห่งชาติ	0.1911	กรมป่าไม้	0.1323	พระราม 9	0.2468
52	แยกติวานนท์	0.1245	กระทรวงสาธารณสุข	0.1886	โชคชัย 4	0.1313	ลาดพร้าว 71	0.2438
53	กระทรวงสาธารณสุข	0.1217	บางจาก	0.1850	บางบัว	0.1301	ห้วยขวาง	0.2433
54	อุดมสุข	0.1209	กรมป่าไม้	0.1841	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์	0.1285	ลาดพร้าว 65	0.2432
55	โพธิ์นิมิต	0.1199	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1820	สิรินธร	0.1281	ช่องนนทรี	0.2426
56	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1191	วัดมิ่งกร	0.1817	กรมทหารราบที่ 11	0.1272	ศูนย์วัฒนธรรม	0.2421
57	คลองสาน	0.1170	รัชดาภิเษก	0.1808	ทองหล่อ	0.1266	บางหว้า	0.2417
58	บางนา	0.1167	บางบัว	0.1775	ลุมพินี	0.1249	สะพานควาย	0.2414

ลำดับ	2561	COMs	2562	COMs	2563	COMs	2564	COMs
39	รัชดาภิเษก	0.1482	พหลโยธิน 24	0.2161	เสนาภิคม	0.1427	ปทุมฉวี	0.2783
40	กำแพงเพชร	0.1473	บางซื่อ	0.2091	พระราม 9	0.1422	บางอ้อ	0.2761
41	บางซื่อ	0.1398	สะพานตากสิน	0.2072	ราชดำริ	0.1415	โชคชัย 4	0.2690
42	ลาดพร้าว	0.1377	รัชโยธิน	0.2063	จิดลม	0.1400	อุดมสุข	0.2679
43	พหลโยธิน	0.1371	บางหว้า	0.2036	สุทธิสาร	0.1396	ราชดำริ	0.2587
44	หัวลำโพง	0.1370	วงศ์สว่าง	0.2020	ทุ่งสองห้อง	0.1389	บางนา	0.2576
45	บางจาก	0.1350	อ่อนนุช	0.2002	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1376	รามอินทรา 3	0.2563
46	เตาปูน	0.1346	บ้านทับช้าง	0.1986	พร้อมพงษ์	0.1363	ลาดพร้าว 65	0.2555
47	บางซื่อ	0.1307	สุทธิสาร	0.1983	ศูนย์วัฒนธรรม	0.1351	รัชดาภิเษก	0.2546
48	วงเวียนใหญ่	0.1296	เสนาภิคม	0.1982	ห้วยขวาง	0.1351	กรุงธนบุรี	0.2514
49	วงศ์สว่าง	0.1274	แยกติวานนท์	0.1950	นานา	0.1349	แยรง	0.2473
50	เจริญนคร	0.1270	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1913	เพลินจิต	0.1339	สุทธิสาร	0.2472
51	ปทุมฉวี	0.1266	สนามกีฬาแห่งชาติ	0.1911	กรมป่าไม้	0.1323	พระราม 9	0.2468
52	แยกติวานนท์	0.1245	กระทรวงสาธารณสุข	0.1886	โชคชัย 4	0.1313	ลาดพร้าว 71	0.2438
53	กระทรวงสาธารณสุข	0.1217	บางจาก	0.1850	บางบัว	0.1301	ห้วยขวาง	0.2433
54	อุดมสุข	0.1209	กรมป่าไม้	0.1841	ศูนย์ประชุมสิริกิติ์	0.1285	ลาดปลาเค้า	0.2432
55	โพธิ์นิมิต	0.1199	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1820	สิรินธร	0.1281	ช่องนนทรี	0.2426
56	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1191	วัดมิ่งกร	0.1817	กรมทหารราบที่ 11	0.1272	ศูนย์วัฒนธรรม	0.2421
57	คลองสาน	0.1170	รัชดาภิเษก	0.1808	ทองหล่อ	0.1266	บางหว้า	0.2417
58	บางนา	0.1167	บางบัว	0.1775	ลุมพินี	0.1249	สะพานคางาย	0.2414

ลำดับ	2561	COMs	2562	COMs	2563	COMs	2564	COMs
59	ศรีพรสวรรค์	0.1166	ลาดพร้าว	0.1760	กรุงเทพมหานคร	0.1246	บางพลัด	0.2401
60	แยกถนนพญาศรี 1	0.1142	ศรีพรสวรรค์	0.1756	คลองเตย	0.1236	บางบัว	0.2386

ตารางที่ ข.4 สถานีที่มีค่าตัวตรวจยอบยอตด้านารเพาร์กระจายผลกรทบสูงสูด 60 ันดับแรก บนเครีอขาย พ.ศ. 2565-2572

สถานีที่มีค่าตัวตรวจยอบยอตด้านประสิทธิภาพมากที่สุด (ลีสบี) 0-10% แรกของสถานีทั้งหมด และ (ลีสอาน) 10-20% แรกของสถานีทั้งหมด

ลำดับ	2565	COMs	2566	COMs	2567	COMs	2572	COMs
1	บางซื่อ	0.9801	บางซื่อ	0.9786	บางซื่อ	0.9868	ลุมพินี	0.9764
2	บางซื่อน	0.8242	บางซื่อน	0.8160	เตาปูน	0.8515	ขอนแก่นทรี	0.9069
3	เตาปูน	0.7272	เตาปูน	0.7205	บางซื่อน	0.8493	สีลม	0.8424
4	กำแพงเพชร	0.4262	สามเสน	0.4482	สามเสน	0.4350	เพลินจิต	0.8137
5	สามเสน	0.4206	กำแพงเพชร	0.4240	กำแพงเพชร	0.4273	เพชรบุรี	0.7581
6	จตุจักร	0.4077	พญาไท	0.4071	จตุจักร	0.4188	คลองเตย	0.6092
7	วงศ์สว่าง	0.3562	จตุจักร	0.4061	วงศ์สว่าง	0.3657	สุขุมวิท	0.5717
8	บางกรวย	0.3396	ราชเทวี	0.3796	เกียกกาย	0.3641	สยาม	0.5100
9	บางโพ	0.3230	วงศ์สว่าง	0.3514	บางโพ	0.3599	ราชเทวี	0.4992
10	สวนจตุจักร	0.2696	บางกรวย	0.3352	บางกรวย	0.3516	ราชปารถ	0.4819
11	ราชวิถี	0.2203	บางโพ	0.3166	พญาไท	0.2704	นาา	0.4536
12	วัดเสมียนนารี	0.2073	ราชวิถี	0.3019	สวนจตุจักร	0.2538	ราชดำริ	0.4447
13	พหลโยธิน	0.2030	ราชปารถ	0.2942	ราชวิถี	0.2530	ชิดลม	0.4372
14	พญาไท	0.1967	สวนจตุจักร	0.2671	ราชเทวี	0.2391	พญาไท	0.4257
15	บางเขน	0.1894	ประตูน้มา	0.2637	วัดเสมียนนารี	0.2116	สวนพลู (เทา)	0.4122
16	แยกติวานนท์	0.1748	สยาม	0.2574	ราชปารถ	0.1895	สามย่าน	0.3969
17	บางอ้อ	0.1607	เพชรบุรี	0.2491	แยกติวานนท์	0.1787	ศูนย์ประชุมสิริกิตต์	0.3894
18	บางบำหรุ	0.1513	วัดเสมียนนารี	0.2031	กรมชลประทาน	0.1770	สุรศักดิ์	0.3737

ลำดับ	2565	COMs	2566	COMs	2567	COMs	2572	COMs
19	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1444	พหลโยธิน	0.1982	พหลโยธิน	0.1723	ประตูนํ้า (ส้ม)	0.3670
20	ลาดพร้าว	0.1337	สุขุมวิท	0.1945	บางอ้อ	0.1720	หัวลำโพง	0.3618
21	สะพานควาย	0.1327	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.1846	ประตูนํ้า	0.1695	นราธิวาส (เทา)	0.3575
22	พหลโยธิน 24	0.1271	บางเขน	0.1789	บางเขน	0.1665	งามดูพลี (เทา)	0.3425
23	ราชเทวี	0.1153	แยกติวานนท์	0.1699	สยาม	0.1609	พระราม 9	0.3299
24	สยาม	0.1137	ยมราช	0.1575	เพชรบุรี	0.1561	ยมราช (ส้ม)	0.3147
25	เพชรบุรี	0.1111	บางอ้อ	0.1551	บางบำหรุ	0.1521	รามคำแหง	0.3068
26	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.1092	บางบำหรุ	0.1527	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.1413	คลองสาน	0.3012
27	สุขุมวิท	0.1087	สะพานควาย	0.1363	สะพานควาย	0.1377	ยศเส (แดง)	0.3005
28	คุณหญิงอิศรา BR	0.1064	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1347	ยมราช	0.1267	สนามกีฬาแห่งชาติ	0.2734
29	รัชโยธิน	0.1059	ราชดำริ	0.1308	สุขุมวิท	0.1258	พระราม 4 (เทา)	0.2559
30	กระทรวงสาธารณสุข	0.1042	ลาดพร้าว	0.1284	ลาดพร้าว	0.1142	พร้อมพงษ์	0.2524
31	เสนานิคม	0.1030	พระราม 9	0.1283	อนุสาวรีย์ประชาธิปไตย	0.1134	วงเวียนใหญ่(LG)	0.2384
32	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.0986	รางนํ้า	0.1238	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	0.1105	เจริญนคร	0.2185
33	ทุ่งสองห้อง	0.0985	พหลโยธิน 24	0.1235	พหลโยธิน 24	0.1092	ศูนย์วัฒนธรรม	0.2181
34	หลักสี่	0.0981	สีลม	0.1222	กระทรวงสาธารณสุข	0.1070	กรุงธนบุรี	0.2151
35	บางพลัด	0.0931	จิดลุม	0.1216	สามเสน (ม่วง)	0.1039	สะพานตากสิน	0.2097
36	ชินเขต BR	0.0908	สนามเป้า	0.1143	สนามเป้า	0.1014	ราชวิถี	0.2019
37	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.0902	รามคำแหง	0.1065	อารีย์	0.1012	อนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ	0.1959
38	อารีย์	0.0895	พร้อมพงษ์	0.1050	คุณหญิงอิศรา (น้ำตาล)	0.0995	รางนํ้า (ส้ม)	0.1804

ลำดับ	2565	COMs	2566	COMs	2567	COMs	2572
39	สีลม	0.0880	ศูนย์วัฒนธรรม อภิรักษ์	0.1028	บางพลัด	0.0979	ประชาธิปไตย
40	ราชปรารภ	0.0877	อภิรักษ์	0.1019	ทุ่งสองห้อง	0.0970	วัดมิ่งกร
41	สนามเป้า	0.0806	รัชโยธิน	0.1018	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.0969	องสาวรีย์ประชาธิปไตย (ม่วง)
42	กรมป่าไม้	0.0794	คุณหญิงอิศรา (น้ำตาล)	0.1001	รางน้ำ	0.0944	หลานหลวง (ส้ม)
43	ภาวนา	0.0764	ศูนย์ราชการนนทบุรี	0.0998	หลานหลวง	0.0943	นางลิ้นจี่ (เทา)
44	รัชดาภิเษก	0.0759	กระทรวงสาธารณสุข	0.0995	ตี่งชัน	0.0942	ทองหล่อ
45	บางบัว	0.0708	เสนาบดี	0.0986	พระราม 9	0.0935	บางซื่อ
46	พร้อมพงษ์	0.0706	นานา	0.0982	ชิดลม	0.0926	หัวหมาก
47	พระราม 9	0.0687	บางขุนนนท์	0.0965	ราชดำริ	0.0918	วังบูรพา
48	กรมทหารราบที่ 11	0.0677	ทุ่งสองห้อง	0.0931	ชินเขต BR	0.0916	ตลาดพลู
49	ราชดำริ	0.0673	บางพลัด	0.0895	บางขุนนนท์	0.0907	โพธิ์นิมิต
50	แยกพงษ์เพชร BR	0.0651	เพลินจิต	0.0890	รัชโยธิน	0.0892	สามเสน
51	สีรินธร	0.0646	หลักสี่	0.0885	สีลม	0.0881	เกษมราษฎร์ (เทา)
52	สุทธิสาร	0.0640	ศูนย์ประชุมสิริกิตต์	0.0884	หลักสี่	0.0881	วุฒากาศ
53	ทองหล่อ	0.0629	สนามกีฬาแห่งชาติ	0.0864	เสนาบดี	0.0854	ตลาดพลู (แดง)
54	โชคชัย 4	0.0624	หลานหลวง	0.0850	รามคำแหง	0.0848	ประชาสงเคราะห์ (ส้ม)
55	กรมยุทธโยธาทหารบก (น้ำตาล)	0.0624	ชินเขต (น้ำตาล)	0.0850	พร้อมพงษ์	0.0815	บางซื่อ
56	ตี่งชัน	0.0610	ตี่งชัน	0.0837	ศูนย์วัฒนธรรม	0.0814	รพม (ส้ม)
57	ศูนย์วัฒนธรรม	0.0609	วัดพระศรีมหาธาตุ	0.0812	นานา	0.0786	เตาปูน
58	หัวขวง	0.0600	รัชดาภิเษก	0.0747	หอสมุดแห่งชาติ	0.0779	ดินแดง (ส้ม)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิชญา ณ บางช้าง เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2537 จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาจากหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2559 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ของปีการศึกษา 2560

ได้รับการตอบรับตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการในเอกสารงานประชุมวิชาการ 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2018) หัวข้อเรื่อง “Topological Evolution of Public Transportation Network: A case study of Bangkok Rail Transit Network” ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยฉบับนี้ด้วย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY