

การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการนำทางด้วยขั้นตอนวิธีคำนวณ
แบบวิวัฒนาการ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**PATH OPTIMIZATION OF NAVIGATION BY
EVOLUTIONARY ALGORITHMS**



Jetsada Meeruang

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

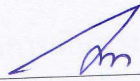
Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการนำทางด้วยขั้นตอนวิธีคำนวณแบบวิวัฒนาการ

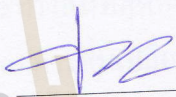
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



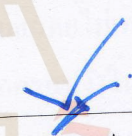
(ผศ. ดร. กীরติ สุกษ์กันย์)

ประธานกรรมการ



(อ. ดร. ธีทัต คลวิชัย)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



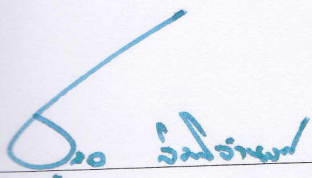
(รศ. ดร. วัฒนวงศ์ รัตนวราห์)

กรรมการ



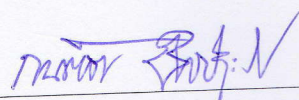
(ผศ. ดร. ชวัฒน์ชัย คุณะโคตร)

กรรมการ



(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจันทร์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจษฎา มีเรื่อง : การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการนำทางด้วยขั้นตอนวิธีคำนวณ
แบบวิวัฒนาการ (PATH OPTIMIZATION OF NAVIGATION BY EVOLUTIONARY
ALGORITHMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ธิตต์ คลวิชัย, 140 หน้า.

การเดินทางด้วยรถยนต์ในปัจจุบันต้องใช้อุปกรณ์นำทางเพื่อนำบอกเส้นทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการ โดยทั่วไปผู้ใช้งานต้องการเดินทางไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้องที่สุด ซึ่งจากการทำงานของอุปกรณ์นำทางที่มีในปัจจุบันมีการนำทางเพียงการหาเส้นทางสั้นที่สุด โดยที่ไม่ได้คำนึงถึงเรื่องเวลาในการเดินทาง ซึ่งสภาพจราจรมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเดินทาง และส่งผลกระทบต่อเนื่องมาจากการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถยนต์ เนื่องจากรถยนต์ที่สัญจรอยู่ในเมืองถูกจำกัดให้ใช้ความเร็วต่ำ จากปริมาณรถยนต์ที่หนาแน่นจึงทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมีค่าสูงมากขึ้น หากการนำทางของอุปกรณ์นำทางสามารถบอกเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดหรือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดได้ ผู้ขับขี่จึงจะสามารถควบคุมรถเพื่อลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงได้ จากที่กล่าวมาข้างต้น การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการนำทางจึงเป็นปัญหาแบบ 2 วัตถุประสงค์ คือ การหาเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด และการหาเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งปัญหาข้างต้นเป็นปัญหาแบบไม่ต่อเนื่องและมีจำนวนตัวแปรออกแบบของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดร่วมกับเทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำในการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยสร้างเส้นทางจำลองเพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา 4 กรณี คือ เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจรใช้แผนที่บริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งแต่ละเส้นทางถูกกำหนดสภาพจราจรจากระดับการให้บริการทั้งสิ้น 6 ระดับตามสภาพความหนาแน่นของจราจร ผลการวิจัยได้ผลเฉลยของปัญหาถูกเก็บให้อยู่ในรูปแบบของขอบหน้าพาเรโต โดยสามารถเลือกพิจารณาจุดต่างๆที่อยู่ภายในขอบหน้าพาเรโตได้ทั้งหมด โดยประเมินค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (sfc) โดยใช้คุณสมบัติของรถกระบะยี่ห้อ ISUZU D-max 2016 และเมื่อพิจารณาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณีศึกษาสามารถลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลงได้มีค่าเท่ากับ 3.32%, 2.08%, 4.67% และ 23.24% ตามลำดับ.

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา อนุชา มีเรื่อง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธิตต์ คลวิชัย

JETSADA MEERUANG : PATH OPTIMIZATION OF NAVIGATION
BY EVOLUTIONARY ALGORITHMS. THESIS ADVISOR : TEETUT
DOLWICHAI, Ph.D., 140 PP.

TABU SEARCH ALGORITHM/PATH OPTIMIZATION/FUEL CONSUMPTION

Travelling by vehicle now a day, it has used the navigation devices for guide the user to get the destination point. The requirement of the user in general must be arrived by the right destination. The navigation device is function only shortest path. It does not concern the travelling time that effect from the traffic condition and consequence to fuel consumption of the vehicle. The vehicle that running in the city, it assign with low speed with high traffic density, so that vehicle engine must be consumed more fuel. If the navigation system can be directed the path with short distance or short time, the driver will be controlled the vehicle to reduce the fuel consumption. All above, the path optimization of the problem is the 2 objective function. The first is minimize the travelling distance and the second is minimize the travelling time. There are the discrete problems and non-equality of design variable for the all solution. This work are used Tabu search technique combine with non-dominating technique to seek the optimal solution. The creation of path model, we are divided by 4 cases, the grid path model with 4x4, 5x5 and 6x6. The final path model is modeled by real map that located behind the Suranaree monument in Nakorn Ratchasima province. All path model are assigned the level of service by 6 levels, there refer to traffic density. The results work are collected in the set of Pareto. It can be selected individual solution that contain in the set of Pareto front. The specific fuel consumption (sfc) evaluation has used the specification of ISUZU D-max 2016. The

optimal path for all path model can be decreased the SFC of individual case in percentage as follow; 3.32%, 2.08%, 4.67% and 23.24% respectively.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature Jetsada Meeraang

Advisor's Signature Pakut Dolwicha

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนการนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแก่ผู้วิจัย

อาจารย์ ดร.ธีรทัต คลวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ และให้คำปรึกษาทั้งในด้านการเรียนและการทำงานวิจัย ให้แนวคิดของงานวิจัย ช่วยหาวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ให้คำแนะนำต่างๆ สำหรับการทำงานและการดำเนินชีวิตในอนาคต และเป็นแบบอย่างที่ดีแก่ผู้วิจัยเรื่อยมา

รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง ที่ให้แนวคิดเรื่อง ระดับการให้บริการ กับผู้วิจัย เพื่อกำหนดสภาพจราจรของเส้นทางในกระบวนการคำนวณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุตตาชาติ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ที่ให้แนวคิดเรื่อง วิธีการค้นหาแบบตามู กับผู้วิจัย เพื่อใช้แก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัย ด้วยความเมตตากรุณาทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำทั้งในด้านการเรียนและการทำงานวิจัยที่ดีแก่ผู้วิจัย

ท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อสมจิต มีเรื่อง และคุณแม่พิศสมัย มีเรื่อง ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และให้โอกาสในการศึกษาแก่ผู้วิจัยจนถึงปัจจุบันตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

เจษฎา มีเรื่อง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชมนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	5
2.2.1 ตัวแปรออกแบบ.....	5
2.2.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย.....	6
2.2.3 เงื่อนไขบังคับ.....	6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	ประเภทของการหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	7
2.3.1	การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์.....	7
2.3.2	การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ใช้อนุพันธ์.....	8
2.4	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่นิยมใช้ในงานวิจัย.....	8
2.4.1	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA).....	9
2.4.2	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม (Particle Swarm Optimization, PSO).....	11
2.5	ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสำหรับปัญหาการออกแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Single Objective Evolutionary Algorithms, SOEA).....	12
2.5.1	ปัญหาการออกแบบ.....	12
2.5.2	ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ หนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย.....	12
2.5.3	กระบวนการคำนวณในรูปแบบทั่วไป.....	13
2.6	ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสำหรับปัญหาการออกแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Evolutionary Algorithms, MOEA).....	14
2.6.1	ปัญหาการออกแบบ.....	14
2.6.2	ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสอง ฟังก์ชันเป้าหมาย หรือขอบหน้าพารेटอ (Pareto Front).....	15
2.6.3	กระบวนการคำนวณในรูปแบบทั่วไป.....	16
2.7	วิธีการค้นหาแบบตาบู่ (Tabu Search Algorithm, TS).....	17
2.7.1	ส่วนประกอบหลักของวิธีการค้นหาแบบตาบู่.....	18
2.8	การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-Dominated Sorting).....	20
2.8.1	นิยามของการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9	วิธีการค้นหาแบบตามที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Tabu Search Algorithm with Non-Dominated Technique).....	22
2.10	ระดับการให้บริการ (Level of Service, LOS).....	25
2.11	การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption, sfc).....	29
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.13	สรุป.....	34
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	35
3.1	การแบ่งกรณีศึกษา.....	35
3.1.1	เส้นทางจำลองของการจราจร.....	35
3.1.2	เส้นทางจริงของการจราจร.....	37
3.2	แนวคิดการทำงานของโปรแกรม.....	38
3.3	กระบวนการทำงานของโปรแกรม.....	40
3.3.1	การรับค่าพารามิเตอร์.....	40
3.3.1.1	จำนวนประชากร.....	40
3.3.1.2	ตำแหน่งบนแผนที่.....	40
3.3.1.3	ค่าพารามิเตอร์ของเส้นทาง.....	41
3.3.2	การหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	46
3.3.2.1	ฟังก์ชันเป้าหมาย.....	46
3.3.2.2	ตัวแปรออกแบบ.....	47
3.3.2.3	เงื่อนไขบังคับ.....	49
3.3.2.4	การหาเส้นทางที่เป็นไปได้จากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดเป้าหมาย.....	50
3.3.3	การแสดงผล.....	52
3.3.3.1	การคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การกำหนดค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ.....	58
3.4.1	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....	59
3.4.2	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....	61
3.4.3	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....	63
3.4.4	เส้นทางจริงของการจราจร.....	65
3.5	การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของโปรแกรม.....	67
3.6	สถานที่ทำการวิจัย.....	71
4	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล.....	72
4.1	ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด หรือขอบหน้าพาเรโต.....	72
4.1.1	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....	76
4.1.2	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....	80
4.1.3	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....	85
4.1.4	เส้นทางจริงของการจราจร.....	91
4.2	ผลเฉลยสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย.....	96
4.2.1	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....	97
4.2.2	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....	100
4.2.3	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....	103
4.2.4	เส้นทางจริงของการจราจร.....	106
4.3	ผลการคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ.....	109
4.3.1	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....	109
4.3.2	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....	110
4.3.3	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....	111
4.3.4	เส้นทางจริงของการจราจร.....	112
4.4	สรุป.....	113

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	117
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	117
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	118
	รายการอ้างอิง.....	119
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก โปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในงานวิจัย.....	121
	ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	134
	ประวัติผู้เขียน.....	140



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ความเร็วอิสระของรถยนต์ในแต่ละประเภทของเส้นทางในเมือง.....43
3.2	ช่วงความเร็วของรถยนต์ในแต่ละระดับการให้บริการ.....44
3.3	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nsol = 20$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 4×459
3.4	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nloop = 75$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 4×460
3.5	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nsol = 20$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 5×561
3.6	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nloop = 100$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 5×562
3.7	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nsol = 20$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 6×663
3.8	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nloop = 200$ สำหรับเส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 6×664
3.9	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nsol = 20$ สำหรับเส้นทางจริง ของการจราจร.....65
3.10	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีที่ $nloop = 50$ สำหรับเส้นทางจริง ของการจราจร.....66
3.11	ค่า $nloop$ และ $nsol$ ที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริด และเส้นทางจริงของการจราจร.....67
4.1	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4×473
4.2	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×573
4.3	ค่า HV ของขอบหน้าพารโตนีสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×674

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4	ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....75
4.5	ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....113
4.6	ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....114
4.7	ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....115
4.8	ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....116



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ผังงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม.....	9
2.2	ผังงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม.....	11
2.3	ผังงานของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย.....	13
2.4	ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย.....	15
2.5	ผังงานของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย.....	16
2.6	ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตามูพื้นฐาน.....	19
2.7	พื้นที่ครอบงำของผลเฉลย x_1	21
2.8	การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ.....	21
2.9	ระดับการครอบงำของผลเฉลยทั้งหมด.....	22
2.10	ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตามูที่ใช้เทคนิคการคัดสรร ผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ.....	24
2.11	แผนภาพจำแนกระดับการให้บริการ.....	25
2.12	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ A.....	26
2.13	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ B.....	26
2.14	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ C.....	27
2.15	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ D.....	28
2.16	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ E.....	28
2.17	สภาพจราจรของระดับการให้บริการ F.....	29
2.18	การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก บนความเร็วรอบของเครื่องยนต์.....	30
3.1	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ.....	36
3.2	เส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆที่ปรับเปลี่ยนค่าระยะทางใหม่.....	36
3.3	เส้นทางจริงของการจราจร.....	37
3.4	ไฟล์ของ M-file function สำหรับการคำนวณของโปรแกรม.....	38
3.5	กระบวนการทำงานของโปรแกรม.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	ตำแหน่งของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ.....40
3.7	ตำแหน่งของเส้นทางจริงของการจราจร.....41
3.8	ค่าพารามิเตอร์ของเส้นทาง.....41
3.9	ค่าระยะทางในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....42
3.10	ค่าความเร็วของรถยนต์ในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....45
3.11	ตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ.....45
3.12	ตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....46
3.13	เส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย.....48
3.14	ตำแหน่งของทางแยกที่เดินทางผ่านของเส้นทาง จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย.....49
3.15	เส้นทางเดินทางเดียวสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....50
3.16	ตำแหน่งจุดเริ่มต้น และเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....50
3.17	ตำแหน่งทางแยกข้างเคียงกับผลเฉลยปัจจุบันของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4x4.....51
3.18	ปัญหาการไม่ผ่านเงื่อนไขบังคับของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....51
3.19	เส้นทางทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4x4.....52
3.20	ขอบหน้าพาเรโตของปัญหา.....53
3.21	ขอบหน้าพาเรโต และบริเวณที่หาคำตอบได้.....53
3.22	ค่าต่างๆที่ถูกบันทึกใน Mat file ของโปรแกรม MATLAB.....54
3.23	รถยนต์ ISUZU D-MAX 2016 รุ่น Hi-Lander 4 ประตู 3.0 Ddi(Z-Prestige).....55
3.24	รายละเอียดข้อมูลของรถยนต์รุ่นที่พิจารณา.....55
3.25	กราฟการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์รุ่น 4JJ1T.....56
3.26	วิธีการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ความเร็วที่พิจารณา.....57
3.27	วิธีการหาค่า Hyper Volume.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nsol = 20$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4×459
3.29	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nloop = 75$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4×460
3.30	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nsol = 20$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 5×561
3.31	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nloop = 100$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 5×562
3.32	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nsol = 20$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 6×663
3.33	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nloop = 200$ ของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 6×664
3.34	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nsol = 20$ สำหรับเส้นทาง จริงของการจราจร.....65
3.35	เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ $nloop = 50$ สำหรับเส้นทาง จริงของการจราจร.....66
3.36	เส้นทางบริเวณ Olympic Green ในกรุงปักกิ่ง.....68
3.37	เส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด.....68
3.38	เส้นทางบริเวณ Olympic Green ในกรุงปักกิ่ง.....69
3.39	ขอบหน้าพาเรโตของปัญหา.....69
3.40	ผลเฉลยจุดที่ 1 หรือเส้นทางที่ใช้ระยะทางสั้นที่สุด.....70
3.41	ผลเฉลยจุดที่ 10 หรือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด.....70
4.1	ขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4×472
4.2	ขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×573
4.3	ขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×674
4.4	ขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31	ผลเฉลยจุดที่ 11 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....90
4.32	ผลเฉลยจุดที่ 12 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....91
4.33	ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....92
4.34	ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....92
4.35	ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....93
4.36	ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....93
4.37	ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....94
4.38	ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....94
4.39	ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....95
4.40	ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....95
4.41	ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพารโโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....96
4.42	ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....97
4.43	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4x4.....97
4.44	ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 4x4.....98
4.45	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทาง น้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....99
4.46	ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....100
4.47	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 5x5.....100
4.48	ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 5x5.....101
4.49	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทาง น้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....102
4.50	ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 6x6.....103
4.52	ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทาง จำลองแบบกริดขนาด 6x6.....104
4.53	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทาง น้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....105
4.54	ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....106
4.55	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดสำหรับ เส้นทางจริงของการจราจร.....106
4.56	ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....107
4.57	ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทาง น้อยที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....108
4.58	การสั้นเปลื้องเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4.....109
4.59	การสั้นเปลื้องเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5.....110
4.60	การสั้นเปลื้องเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6.....111
4.61	การสั้นเปลื้องเชื้อเพลิงจำเพาะสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร.....112

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

<i>SOEA</i>	=	ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย
<i>MOEA</i>	=	ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย
<i>x</i>	=	เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ
<i>f</i>	=	ฟังก์ชันเป้าหมาย
<i>g_i</i>	=	เงื่อนไขบังคับในรูปแบบอสมการ
<i>h_i</i>	=	เงื่อนไขบังคับในรูปแบบสมการ
<i>L_i</i>	=	ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ
<i>U_i</i>	=	ขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ
<i>GA</i>	=	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
<i>PSO</i>	=	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม
<i>TS</i>	=	วิธีการค้นหาแบบตาคู
<i>X</i>	=	เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้
<i>xx</i>	=	ผลเฉลยปัจจุบัน
<i>xx'</i>	=	ผลเฉลยดีที่สุดในกลุ่มของผลเฉลยข้างเคียง
<i>xx''</i>	=	ผลเฉลยดีที่สุดในแต่ละรอบการคำนวณ
<i>E(xx)</i>	=	ค่าฟังก์ชันเป้าหมายของผลเฉลยที่พิจารณา
<i>N(xx)</i>	=	เซตของผลเฉลยข้างเคียงจากผลเฉลยที่พิจารณา
<i>TL</i>	=	รายการตาคู
<i>AL</i>	=	เกณฑ์ความทะเยอทะยาน
<i>SC</i>	=	เกณฑ์การหยุดค้นหา
<i>ND(xx)</i>	=	เซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ
<i>LOS</i>	=	ระดับการให้บริการ
<i>sfc</i>	=	การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ
<i>bsfc</i>	=	การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก
<i>m_f</i>	=	อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิง
<i>Ẇ</i>	=	กำลังของเครื่องยนต์

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

\dot{W}_b	=	กำลังเพลลา
SP	=	จุดเริ่มต้น
FP	=	จุดเป้าหมาย
$nloop$	=	Number of Loop
$nsol$	=	Number of Solution
v	=	ความเร็วของรถยนต์
s	=	ระยะทาง
t	=	เวลาในการเดินทาง
FES	=	ความเร็วอิสระ
N	=	ความเร็วรอบของเครื่องยนต์
r	=	รัศมีของล้อรถยนต์
G_i	=	อัตราดอกเบี้ยที่พิจารณา
G_f	=	อัตราดอกเบี้ยที่จ่าย
HV	=	Hyper Volume

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเดินทางไปยังเป้าหมายด้วยรถยนต์ ณ ปัจจุบันมีการใช้งานเครื่องนำทาง (Navigator) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อให้สามารถเดินทางไปยังเป้าหมายได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว แต่การใช้เครื่องนำทางในปัจจุบันมีข้อจำกัดคือ หากมีสภาพจราจรเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ปัญหาการจราจรติดขัด ปัญหาสภาพถนน เป็นต้น ทำให้เครื่องนำทางไม่สามารถแนะนำเส้นทางเพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางดังกล่าวได้ ส่งผลให้การเดินทางไปยังเป้าหมายไม่ทันเวลาตามที่กำหนด ดังนั้นปัญหาการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดจึงมีความสำคัญยิ่งต่อการเดินทาง สำหรับการเดินทางโดยรถยนต์สิ่งที่ต้องการนอกจากการเดินทาง ไปถึงเป้าหมายภายในระยะเวลาที่กำหนดแล้ว ผู้ใช้งานยังต้องการให้ใช้น้ำมันน้อยที่สุดด้วยเช่นกัน ซึ่งการสิ้นเปลืองน้ำมันสามารถหาได้จาก การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (specific fuel consumption) และใช้เปรียบเทียบการสิ้นเปลืองน้ำมันของแต่ละเส้นทางในคำตอบ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาในการเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ปัญหาการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดเป็นแนวทางหนึ่งที่มีนักวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสนใจ ซึ่งได้ใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) ช่วยในการแก้ไขปัญหา เช่น การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการกระจายน้ำในระบบท่อที่มีความซับซ้อน โดยใช้ Ant colony optimization (Symeon E. Christodoulou, A.M.ASCE and Georgios Ellinas, 2010) การออกแบบเส้นทางและขนาดท่อที่เหมาะสมที่สุดระบบท่อส่งน้ำ ซึ่งได้ใช้ Evolutionary algorithms ในการแก้ปัญหา (Sujin Bureerat and Krit Sriworamas, 2013) การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการขนส่งสินค้าด้วยยานพาหนะ โดยใช้ Ant colony optimization (Thititon Srisuwandee and Rapeepan Pitakaso, 2012) การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการจราจร โดยใช้ Missile Guidance (Gong Yan, Li Sujian and Xing Enhui, 2013) และปัญหาการออกแบบระบบท่อส่งน้ำ โดยใช้ Tabu search algorithm (Maria da Conceicao Cunha and Luisa Ribeiro, 2004) เป็นต้น จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมีหลากหลายวิธีมาก โดยงานวิจัยนี้ให้ความสนใจ Tabu search algorithm เพราะว่าเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยคอมพิวเตอร์สามารถใช้แก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (Combination Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้หลากหลายรูปแบบ

และการค้นหาแบบตามมึ้นขั้นตอนวิธีการคำนวณที่มีความง่ายทำให้สะดวกสำหรับการเขียนโปรแกรม ซึ่ง Tabu Search Algorithm มีพื้นฐานมาจากขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบ Meta-Heuristic Algorithms ในปัจจุบันได้รับความนิยมนำมาใช้ในหลากหลายสายงานทางวิศวกรรม เช่น ปัญหาระบายความร้อน (B. Lin and D. C. Miller, 2004) ปัญหาการหารูปร่างที่เหมาะสมของชิ้นงาน (Mostafa Ranjbar, Steffen Marburg and Hans-Jurgen Hardtke, 2012) ปัญหาเรื่องค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม (Lust Thibaut and Teghem Jacques, 2006) และปัญหาการออกแบบค่า PID (Abdullah Ates and Celaleddin Yeroglu, 2016) เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาปัญหาการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการจราจร (Traffic Path Optimization) โดยใช้ Tabu Search Algorithm ในการแก้ไขปัญหาคำหนดวัตถุประสงค์คือเดินทางตามเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด และควบคู่กับใช้ระยะทางน้อยที่สุด นั่นคือเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองวัตถุประสงค์ (Bi-Objective) ซึ่งทำให้ได้ผลเฉลยมากกว่าหนึ่งเส้นทาง ในการศึกษาได้กำหนดสภาพจราจร เช่น สภาพการจราจรติดขัด เป็นข้อมูลสำหรับการค้นหาผลเฉลย ซึ่งข้อมูลนี้ถือว่าเป็นสภาพจริงของปัญหาการจราจร ณ ปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในปัญหาการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด (Path Optimization) ของการจราจร
- 2) ศึกษาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธแบบวิวัฒนาการ (Evolutionary Optimizations)
- 3) ประยุกต์ใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการกับปัญหาการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของการจราจร

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

เนื่องจากเส้นทางจราจรของแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงกำหนดให้

- 1) จำลองเส้นทางเป็นแบบ Grid ขนาด 4x4, 5x5, 6x6 ในคอมพิวเตอร์
- 2) จำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย
- 3) จำลองสภาพจราจรของเส้นทางทั้งหมด
- 4) ประยุกต์ใช้กับเส้นทางจริงของการจราจรบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี

จังหวัดนครราชสีมา

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการ และศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด
- 2) จำลองแผนทีเพื่อกำหนดเส้นทางการจราจรตัวอย่าง และกำหนดเงื่อนไขสภาพจราจร
- 3) ประยุกต์การใช้เทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบวิวัฒนาการกับปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด และนำไปใช้กับเส้นทางจริงของการจราจร
- 4) สรุปผลงานวิจัย และจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางการแก้ปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจร

1.6 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท 2 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อ ดังนี้

บทที่ 1 คือ บทนำ กล่าวถึงความที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย และผลที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 คือ ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปัญหา การกำหนดเงื่อนไขสภาพจราจร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 คือ วิธีการดำเนินการวิจัย กล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของโปรแกรม การแบ่งกรณีศึกษา และการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด

บทที่ 4 คือ ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล กล่าวถึงการแสดงค่าผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณีศึกษา

บทที่ 5 คือ สรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับทฤษฎีสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Single Objective Evolutionary Algorithm, SOEA) และขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Evolutionary Algorithm, MOEA) ได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการกำหนดสภาพจราจรและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดเพื่อแก้ไขปัญหา ซึ่งได้ปรับปรุงวิธีการดังกล่าวให้เป็นวิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอรับเพื่อหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 บทนำ

การหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization) คือ วิธีการในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการตัดสินใจ เช่น การเดินทางไปยังเป้าหมาย โดยทั่วไปแล้วต้องการให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง จึงต้องเลือกเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดเพื่อลดค่าใช้จ่าย หรือ การเลือกซื้อสินค้าและบริการต้องมีการเปรียบเทียบสิ่งที่จะได้รับกับจำนวนเงินที่ต้องจ่าย เพื่อพิจารณาว่าคุ้มหรือไม่ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าการหาค่าเหมาะสมที่สุดมีได้หลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบดังที่ได้กล่าวมาเป็นเพียงแค่รูปแบบบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นในการดำเนินชีวิตประจำวันโดยทั่วไปของมนุษย์มักถูกแฝงไปด้วยการหาค่าเหมาะสมที่สุดเสมอ ซึ่งปัญหาทางคณิตศาสตร์ของการหาค่าเหมาะสมที่สุดไม่ได้ถูกจำกัดแค่ปัญหาในการดำเนินชีวิตประจำวันเท่านั้น แต่การหาค่าเหมาะสมที่สุดยังสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาในสาขาวิชาเฉพาะด้านได้ เช่น ปัญหาทางออกแบบทางวิศวกรรม พบว่าการหาค่าเหมาะสมที่สุดมีความจำเป็นมากในงานออกแบบ และเป็นเครื่องมือช่วยให้สามารถออกแบบระบบต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง เมื่อพิจารณาถึงจุดประสงค์ในการหาค่าเหมาะสมที่สุดจึงสามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ การหาค่าน้อยที่สุด (Minimization) และการหาค่ามากที่สุด (Maximization) ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเริ่มต้นจากการตั้งโจทย์ปัญหาทางคณิตศาสตร์ กำหนดส่วนประกอบต่างๆ

สำหรับปัญหา และใช้วิธีการเชิงตัวเลขแก้ไขปัญหาดังกล่าว เพื่อให้ได้ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดตามที่ต้องการ

2.2 ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) เป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์โดยจัดอยู่ในรูปแบบพิเศษ ยกตัวอย่างปัญหาการหาค่าต่ำสุด ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$\min_x f(x) \quad (2.1)$$

ภายใต้เงื่อนไขบังคับ

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ h_i(x) &= 0, \quad i = 1, \dots, l \\ L_i &\leq x_i \leq U_i, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ (Design variable vector) ขนาด $n \times 1$
 f คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective function)
 g_i คือ เงื่อนไขบังคับในรูปแบบอสมการ (Inequality constraints)
 h_i คือ เงื่อนไขบังคับในรูปแบบสมการ (Equality constraints)
 L_i คือ ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ (Lower bound constraints)
 U_i คือ ขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ (Upper bound constraints)

ปัญหาทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในสมการที่ (2.1) หมายความว่า จงหาเวกเตอร์ของตัวแปรออกแบบ x ที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายต่ำที่สุด ซึ่งผลเฉลยของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบนั้นต้องเป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่กำหนดไว้ และอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ในปัญหานี้ ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดอาจเรียกได้ว่าเป็นปัญหาการออกแบบเหมาะสมที่สุดหรือดีที่สุด (Optimum design problem) ซึ่งมีส่วนประกอบย่อยที่สำคัญดังนี้

2.2.1 ตัวแปรออกแบบ

ตัวแปรออกแบบ คือ กลุ่มของตัวแปรต้น หรือตัวแปรอิสระ (Independent variable) โดยรวมกันอยู่ในรูปของเวกเตอร์ เรียกว่า เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ ซึ่งตัวแปรออกแบบควรมีคุณสมบัติเฉพาะคือ มีความเป็นอิสระต่อกัน หมายความว่าเมื่อตัวแปรออกแบบตัวใดตัวหนึ่ง

เปลี่ยนแปลงค่า จะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าของตัวแปรออกแบบตัวอื่นๆ แต่เมื่อค่าของตัวแปรออกแบบมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย และค่าฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับเปลี่ยนแปลงไปด้วย แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับมีสถานะเป็นตัวแปรตาม (Dependent variable) ในการออกแบบทางวิศวกรรมสามารถจำแนกประเภทของตัวแปรออกแบบดังนี้

- 1) การจำแนกทางกายภาพ คือ ตัวแปรออกแบบที่บ่งบอกถึง รูปทรง ขนาด วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงาน และทอพอโลยี (Topology) เป็นต้น
- 2) การจำแนกเชิงตัวเลข คือ ตัวแปรออกแบบที่ใช้ข้อมูลในรูปแบบของตัวเลข สำหรับการพิจารณาผลเฉลย สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น ตัวแปรแบบต่อเนื่อง (Continuous) ตัวแปรแบบวิยุคหรือไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ตัวแปรเลขฐานสอง (Binary) ตัวแปรแบบจำนวนเต็ม (Integer) และตัวแปรแบบผสม (Mixed) เป็นต้น

2.2.2 ฟังก์ชันเป้าหมาย

ฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ค่าตัวแปรตามที่บ่งบอกถึง ความดี หรือคุณภาพของตัวแปรออกแบบในระบบใดๆ ดังนั้นฟังก์ชันเป้าหมายคือ ฟังก์ชันวัดความดี (Merit function) สามารถแสดงดังสมการที่ (2.3)

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันเป้าหมายจะถูกกำหนดให้เป็นการหาค่าต่ำที่สุด หรือการหาค่าสูงที่สุด ซึ่งสามารถจำแนกประเภทของฟังก์ชันเป้าหมายดังนี้

- 1) การจำแนกทางกายภาพ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายในการออกแบบประเภทนี้สามารถแสดงค่าได้หลายรูปแบบ เช่น ราคา ความสะดวกสบาย น้ำหนัก สมรรถนะของระบบ และการเปลี่ยนรูปร่างของโครงสร้าง เป็นต้น
- 2) การจำแนกทางคณิตศาสตร์ ซึ่งฟังก์ชันเป้าหมายในการออกแบบประเภทนี้สามารถแสดงค่าได้หลายรูปแบบ เช่น ฟังก์ชันแบบเชิงเส้น (Linear) และฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) เป็นต้น

2.2.3 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับ เป็นเงื่อนไขที่ใช้บ่งชี้ว่าผลเฉลยของตัวแปรออกแบบที่ได้มาจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้น สามารถนำไปใช้งานได้หรือมีความเป็นไปได้ (Feasible) หรือไม่ โดยเงื่อนไขบังคับถูกใช้เป็นตัวแบ่งเขต (Boundary) ระหว่างบริเวณที่หาค่าตอบได้

(Feasible region) และบริเวณที่หาคำตอบไม่ได้ (Infeasible region) เงื่อนไขบังคับสามารถจำแนกได้หลายรูปแบบ โดยส่วนมากเงื่อนไขบังคับมักอยู่ในรูปแบบของอสมการและสมการ แต่ยังมีการจำแนกเงื่อนไขบังคับในรูปแบบอื่นๆ เช่น เงื่อนไขบังคับแบบกล่อง (Box constraints) เป็นเงื่อนไขบังคับที่มีขอบเขตของตัวแปรออกแบบแสดงอยู่ในรูปแบบของขอบเขตบนและขอบเขตล่าง เงื่อนไขบังคับรูปแบบนี้บริเวณที่หาคำตอบมีพื้นที่ได้เป็นรูปสี่เหลี่ยม เพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดในปริภูมิสองมิติ และมีรูปร่างเป็นกล่องเมื่อเป็นปัญหาในปริภูมิสามมิติ และเงื่อนไขบังคับขีดจำกัดของระบบ ยกตัวอย่างการหาน้ำหนักน้อยที่สุดของโครงสร้าง ซึ่งจำเป็นต้องลดขนาดของชิ้นส่วนลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงด้วย เมื่อได้รับการกระทำ (Applied loads) อาจส่งผลให้โครงสร้างนั้นเสียหายได้ ดังนั้นการหาค่าเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างต้องมีการกำหนดเงื่อนไขบังคับขีดจำกัดของระบบ เพื่อป้องกันไม่ให้โครงสร้างเกิดความเสียหายจากการกระทำ ตัวอย่างเงื่อนไขบังคับขีดจำกัดของระบบ เช่น ความเค้น การกระจัด การโก่ง (Buckling) และการล้า (Fatigue) เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีรูปแบบของเงื่อนไขบังคับอื่นๆ อีกมากที่นิยมใช้สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด

2.3 ประเภทของการหาค่าเหมาะสมที่สุด

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด คือ กระบวนการที่ใช้วิธีการเชิงตัวเลขในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหา ซึ่งการจำแนกประเภทของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถแบ่งได้หลายรูปแบบ แต่ในงานวิจัยนี้ขอยกตัวอย่างการจำแนกแค่รูปแบบเดียวเท่านั้น เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในเนื้อหาของทฤษฎี โดยได้จำแนกออกเป็น 2 ประเภทคือ การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์ และการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ใช้อนุพันธ์ สามารถแสดงรายละเอียดดังนี้

2.3.1 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์ เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้อนุพันธ์ของฟังก์ชันในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์มีสมรรถนะในการหาผลเฉลยที่สูง หมายความว่า มีอัตราการลู่เข้า (Convergence rate) สูง มีความคงกัน (Consistency) ในการหาผลเฉลย หมายถึงเมื่อหาคำตอบของปัญหาแบบเดิมซ้ำกันหลายครั้ง ผลเฉลยที่ได้รับจะมีค่าเหมือนเดิมทุกครั้ง และสามารถรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยเหมาะสมที่สุดจริง ตัวอย่างวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช้อนุพันธ์ เช่น วิธีภาคตัดทอง (Golden section method, GSM) วิธีของโพลเวลล์ (Powell's method) วิธีลดลงชันสุด (Steepest descent method, SDM) วิธีนิวตัน (Newton method, NTM) วิธีนิวตันเสมือน (Quasi Newton method) และวิธีซิมเพล็กซ์ลงเขา (Simplex Downhill method, SPDM) เป็นต้น

2.3.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ใช่อนุพันธ์

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ใช่อนุพันธ์ เป็นวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ไม่มีการหาอนุพันธ์ของฟังก์ชันในระหว่างการคำนวณ ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithm, EA) เป็นหนึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดประเภทนี้ โดยมีกระบวนการคำนวณเลียนแบบมาจากพฤติกรรมการวิวัฒนาการของระบบต่างๆ ในธรรมชาติ ซึ่งขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการที่นิยมใช้ และรู้จักกันมากที่สุดคือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งต่อมาได้มีการศึกษา และพัฒนาขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก จึงทำให้เกิดขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการในรูปแบบใหม่หลากหลายรูปแบบ นอกจากจะเลียนแบบพฤติกรรมของระบบทางธรรมชาติแล้ว ยังมีการพัฒนากระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดให้เลียนแบบพฤติกรรมของระบบอื่นๆ ทั้งสิ่งมีชีวิต และสิ่งไม่มีชีวิต ดังนั้นจึงมีการกำหนดชื่อของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบนี้ขึ้นมาใหม่ โดยเรียกว่า วิธีศึกษาสำนึกขั้นสูง (Meta Heuristics) แต่คำว่าขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการก็ยังคงเป็นที่นิยมเรียกกันอยู่เหมือนเดิม ถึงแม้ว่าจะมีชื่อเรียกใหม่แล้วก็ตาม

ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการมีข้อดีหลายอย่าง เช่น มีวิธีการคำนวณที่เข้าใจง่าย เนื่องจากไม่ต้องคำนวณค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชันในการหาผลเฉลย เป็นวิธีการที่มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนหรือหยุดทำงานในระหว่างกระบวนการคำนวณน้อยมาก หรือเรียกได้ว่าเป็นวิธีที่มีความทนทาน (Robust) สามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้างได้ (Global optimum) และสามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการออกแบบได้ทุกรูปแบบ เพราะค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสามารถปรับเปลี่ยนได้ง่าย อย่างไรก็ตามขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการมีข้อเสียหลายอย่างคือ มีอัตราการลู่เข้าที่ต่ำเมื่อเทียบกับการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบใช่อนุพันธ์ และไม่สามารถรับประกันได้ว่าผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยเหมาะสมที่สุดจริง ดังนั้นผลเฉลยที่ได้รับมาจากการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการมักจะถูกเรียกว่า ผลเฉลยใกล้เคียงความเหมาะสมที่สุด (Near optimum) ตัวอย่างขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ เช่น ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) วิธีการเรียนรู้แบบเพิ่มพูน โดยอาศัยกลุ่มประชากร (Population-Based Incremental Learning, PBIL) วิธีแผนการวิวัฒนาการ (Evolution Strategies, ES) วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม (Particle Swarm Optimization, PSO) และวิธีวิวัฒนาการเชิงอนุพันธ์ (Differential Evolution, DE) เป็นต้น

2.4 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่นิยมใช้ในงานวิจัย

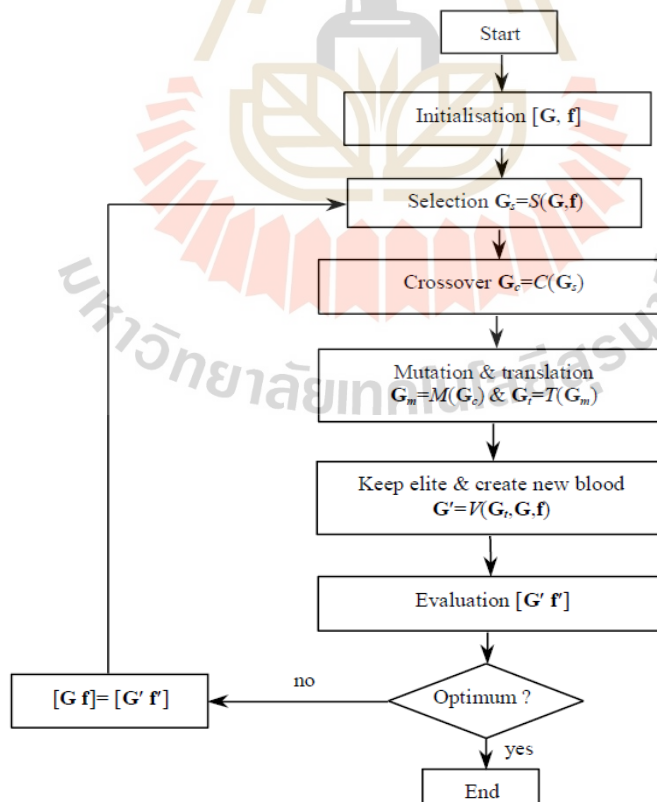
ในปัจจุบันได้มีการนำเอาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบต่างๆ มาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยกันอย่างแพร่หลาย เพราะวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดมีวิธีการคำนวณที่เข้าใจง่าย และมี

กระบวนการทำงานของโปรแกรมไม่ซับซ้อน ทำให้การหาค่าผลเฉลยของปัญหาทำได้ดีกว่าวิธีการอื่นๆ ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่นิยมใช้ในงานวิจัย ดังนี้

2.4.1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เป็นขั้นตอนวิธีที่ถูกพัฒนามาจากการเลียนแบบหลักการวิวัฒนาการ และการคัดเลือกทางธรรมชาติของกลุ่มสิ่งมีชีวิต โดยอ้างอิงจากทฤษฎีวิวัฒนาการของชาร์ล ดาร์วิน ซึ่งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนี้เป็นขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมในการใช้งานและเป็นที่ยอมรับมากที่สุด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาและปรับปรุงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อประยุกต์เข้ากับปัญหาการออกแบบจริง ทำให้ในปัจจุบันขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีมากกว่า 100 วิธี

กระบวนการค้นหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เริ่มต้นจากการกำหนดประชากรตั้งต้น แล้วทำการคัดเลือก (Selection) คู่พ่อ-แม่จากสมาชิกของประชากรรุ่นปัจจุบัน เพื่อผลิตประชากรลูก ซึ่งการผลิตประชากรลูกทำได้โดยใช้ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ (Crossover) และตัวดำเนินการมิวเทชัน (Mutation) จากนั้นนำประชากรลูกที่ได้มาทำการคัดเลือกอีกครั้ง เพื่อหาคู่พ่อ-แม่สำหรับประชากรในรุ่นถัดไป และดำเนินการซ้ำแบบเดิมไปเรื่อยๆจนครบเงื่อนไขการหยุดค้นหา ซึ่งมีผังงานและรายละเอียดของตัวดำเนินการสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผังงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

1) ตัวดำเนินการคัดเลือก (Selection)

ตัวดำเนินการคัดเลือกสำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่นิยมใช้งานมีหลายแบบ เช่น การคัดเลือกแบบวงล้อรูเลตต์ (Roulette selection) ซึ่งจะแบ่งพื้นที่วงกลมของวงล้อออกเป็นเซกเตอร์ย่อยตามจำนวนของผลเฉลยที่สามารถถูกเลือกได้ แล้วทำการหมุนวงล้อโดยใช้แรงแบบสุ่ม เมื่อวงล้อหยุดหมุน เซกเตอร์ที่อยู่ตรงกับเข็มชี้จะได้รับการคัดเลือก และการคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament selection) ซึ่งจะจัดการแข่งขันขึ้นมาหลายๆครั้ง โดยผู้เข้าแข่งขันถูกเลือกมาแบบสุ่ม ผู้ชนะในการแข่งขันแต่ละครั้งคือผู้ที่ได้รับการคัดเลือกเข้าสู่กระบวนการต่อไป เป็นต้น ซึ่งโอกาสในการถูกเลือกขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของสมาชิกแต่ละตัวในกลุ่มประชากรสามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นถ้าสมาชิกตัวใดมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่า หรือมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีกว่าจะมีโอกาสถูกเลือกได้มากกว่าสมาชิกตัวอื่นๆ

2) ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ (Crossover)

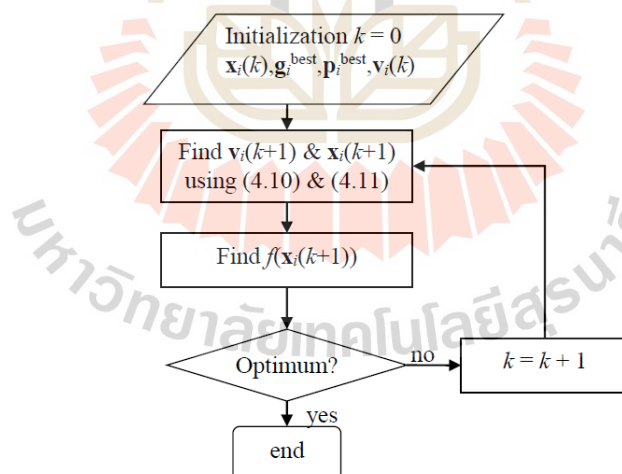
ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีรูปแบบกระบวนการทำงานคล้ายคลึงกับการผสมพันธุ์ของคู่พ่อ-แม่ของสิ่งมีชีวิต กระบวนการทำงานของครอสโอเวอร์เป็นการสุ่มเลือกจุดตัดโครโมโซมของคู่พ่อ-แม่ ซึ่งมีลักษณะของจุดตัดโครโมโซมคือ Single point และ Multi point โดยประชากรถูกได้จากการรวมโครโมโซมของพ่อและแม่ที่ถูกตัดเข้าด้วยกัน แต่ในทางกระบวนการคำนวณของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ใช้แนวคิดของเลขฐานสองแทนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งตัวดำเนินการครอสโอเวอร์เป็นตัวดำเนินการหลักของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการผลิตประชากรลูก

3) ตัวดำเนินการมิวเทชัน (Mutation)

ตัวดำเนินการมิวเทชัน คือ ตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรมที่มีกระบวนการทำงานเลียนแบบมาจากการกลายพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตในธรรมชาติ กล่าวคือ เมื่อมีการผสมพันธุ์ระหว่างคู่พ่อ-แม่ ซึ่งมีโอกาสที่ผลผลิตหรือประชากรลูกจะมียีน (Gene) บางส่วนที่แตกต่างไปจากคู่พ่อ-แม่ ซึ่งกระบวนการทำงานของมิวเทชันเป็นการสุ่มเลือกยีนบางตัวในโครโมโซมของประชากรลูก จากนั้นเปลี่ยนแปลงยีนที่ถูกเลือกให้แตกต่างไปจากเดิม แต่ในการคำนวณของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมได้ใช้เลขฐานสองแทนโครโมโซมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งตัวดำเนินการมิวเทชันมีไว้เพื่อป้องกันการลู่เข้าสู่คำตอบก่อนเวลาอันควร (Premature convergence)

2.4.2 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม (Particle Swarm Optimization, PSO)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม หรือ PSO เป็นหนึ่งในวิธีแรกของขั้นตอนวิธีการรวมกลุ่มแบบฉลาด (Swarm intelligence) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิถีศึกษาสำนึกขั้นสูง (Meta Heuristics) โดยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่มเลียนแบบมาจากพฤติกรรมของสิ่งมีชีวิตในการออกหาอาหารเป็นฝูง เช่น ปลา และนก เป็นต้น ซึ่งสัตว์เหล่านี้จะรวมกลุ่มกันเป็นฝูงเพื่อออกหาอาหารในแหล่งที่มีความอุดมสมบูรณ์มากที่สุด แต่อาจมีสัตว์บางตัวที่ออกหาอาหารในแหล่งที่มีความอุดมสมบูรณ์น้อยกว่า ซึ่งในทางคำนวณตำแหน่งของสัตว์คือ ตำแหน่งของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ และความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งอาหารคือ ค่าฟังก์ชันเป้าหมาย โดยกระบวนการคำนวณของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม เริ่มต้นจากการกำหนดกลุ่มของอนุภาคตั้งต้น หรืออาจเรียกว่าประชากรตั้งต้น และมีค่าความเร็วของอนุภาคเพื่อใช้พิจารณาในการคำนวณ จากนั้นคำนวณหาเวกเตอร์ความเร็ว ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของแหล่งอาหาร หรือค่าฟังก์ชันเป้าหมาย แล้วปรับปรุงตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมด และดำเนินการซ้ำแบบเดิมไปเรื่อยๆจนครบเงื่อนไขการหยุดค้นหา ซึ่งมีผังงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่มดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ผังงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบอนุภาครวมกลุ่ม (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

2.5 ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสำหรับปัญหาการออกแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Single Objective Evolutionary Algorithms, SOEA)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีลักษณะของปัญหาที่ให้ความสนใจ หรือความต้องการแค่สิ่งๆเดียวเท่านั้น หรือพิจารณาตัวแปรออกแบบแค่ตัวแปรเดียวในการคำนวณ เช่น การหาระยะทางสั้นที่สุดจากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดเป้าหมาย การหาน้ำหนักน้อยที่สุดสุดของสิ่งของที่พิจารณา และการใช้จ่ายเงินให้น้อยที่สุดสำหรับการซื้อสินค้าที่ต้องการ เป็นต้น ซึ่งจะเห็นว่าปัญหาเหล่านี้มีฟังก์ชันเป้าหมาย หรือสิ่งที่สนใจแค่อย่างเดียวกัน

2.5.1 ปัญหาการออกแบบ

ปัญหาการออกแบบ ได้ถูกประยุกต์โดยขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการเพื่อหาผลเฉลย ซึ่งกำหนดให้เป็นปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด โดยมีเงื่อนไขบังคับแบบกล่อง หรือขอบเขตของตัวแปรออกแบบ เรียกปัญหาแบบนี้ว่า การหาค่าต่ำที่สุดที่มีเงื่อนไขบังคับแบบกล่อง สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1) และมีเงื่อนไขบังคับดังสมการที่ (2.4)

$$L_i \leq x \leq U_i \quad (2.4)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ ขนาด $n \times 1$

f คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย

L_i คือ ขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ

U_i คือ ขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ

2.5.2 ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย

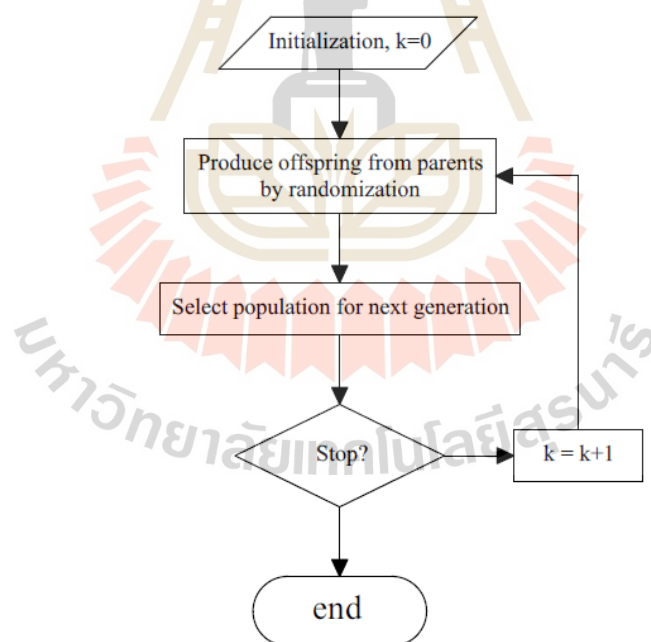
โดยทั่วไปขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสามารถหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้โดยไม่จำเป็นต้องมีเงื่อนไขบังคับ แต่ถ้ามีเงื่อนไขบังคับเพิ่มเข้ามาในการคำนวณ จึงต้องมีกระบวนการเชิงตัวเลขเพื่อใช้สำหรับดัดแปลงปัญหาการออกแบบให้เหมาะสมกับเงื่อนไขบังคับ เช่น การประยุกต์ใช้เทคนิคฟังก์ชันปรับแก้ (Penalty function techniques) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสามารถหาได้จากกลุ่มของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ หรือ เรียกว่าประชากร (Population) ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ (2.5)

$$\text{Population} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (2.5)$$

เมื่อ n คือ ขนาดของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบหรือจำนวนประชากร ในการหาผลเฉลยสำหรับขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการใช้หลักการคำนวณแบบกระทำซ้ำ (Iteration method) ซึ่งรอบของการคำนวณถูกเรียกว่า รุ่น (Generation) ของประชากร

2.5.3 กระบวนการคำนวณในรูปแบบทั่วไป

กระบวนการค้นหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ เริ่มต้นจากการกำหนดกลุ่มของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบตั้งต้นหรือประชากรตั้งต้น (Initial population) จากนั้นสร้างประชากรลูก (Offspring) ขึ้นมาโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการสุ่ม (Randomization) เป็นเครื่องมือหลัก ซึ่งประยุกต์มาจากการเลียนแบบพฤติกรรมวิวัฒนาการทางธรรมชาติ จากนั้นหาผลเฉลยเพื่อเป็นประชากรในรุ่นถัดไป (Next generation) โดยการคัดเลือก (Selection) ซึ่งโอกาสในการถูกเลือกขึ้นอยู่กับค่าฟังก์ชันเป้าหมาย และดำเนินการซ้ำแบบเดิมไปเรื่อยๆจนครบเงื่อนไขการหยุดค้นหาสามารถแสดงผังงานของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผังงานของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย

2.6 ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการสำหรับปัญหาการออกแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Evolutionary Algorithms, MOEA)

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective optimization) เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อยมากในการออกแบบระบบทางวิศวกรรม เช่น ปัญหาการออกแบบโครงสร้างที่ไม่เสียหายจากแรงหรือภาระกระทำ ซึ่งมีฟังก์ชันเป้าหมายคือ น้ำหนักหรือราคาของชิ้นงานน้อยที่สุด และความแข็งแรงของโครงสร้างมากที่สุด และมีเงื่อนไขบังคับคือ ความปลอดภัยในการใช้งาน เป็นต้น

การหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายมีความแตกต่างจากการหาผลเฉลยของปัญหาการออกแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย ในอดีตได้มีการประยุกต์การใช้เทคนิคเชิงตัวเลขแบบพิเศษเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย เช่น วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted sum method) แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ต้องรันโปรแกรมการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นจำนวนหลายครั้งหรือเท่ากับจำนวนผลเฉลยที่ต้องการ ต่อมาได้มีการพัฒนาครั้งใหญ่ เมื่อมีการพัฒนาขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (Multi Objective Evolutionary Algorithms, MOEA) เพื่อใช้ในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ข้อดีของขั้นตอนวิธีการเหล่านี้คือ สามารถคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้เกือบทุกรูปแบบ เป็นวิธีการที่ประยุกต์ใช้งานกับปัญหาการออกแบบต่างๆ ได้ง่าย สามารถรันโปรแกรมได้โดยไม่มีสะดุดหรือเกิดข้อผิดพลาดในระหว่างกระบวนการคำนวณ และข้อดีที่สำคัญที่สุดคือ ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายถูกพัฒนาขึ้นมาให้สามารถหากลุ่มของผลเฉลยเหมาะสมที่สุดได้ในการรันโปรแกรมเพียงครั้งเดียว ทำให้ขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการประเภทนี้ได้รับความนิยมสูง

2.6.1 ปัญหาการออกแบบ

การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งกำหนดให้เป็นปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด โดยมีเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ และแบบสมการ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของปัญหาทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.6)

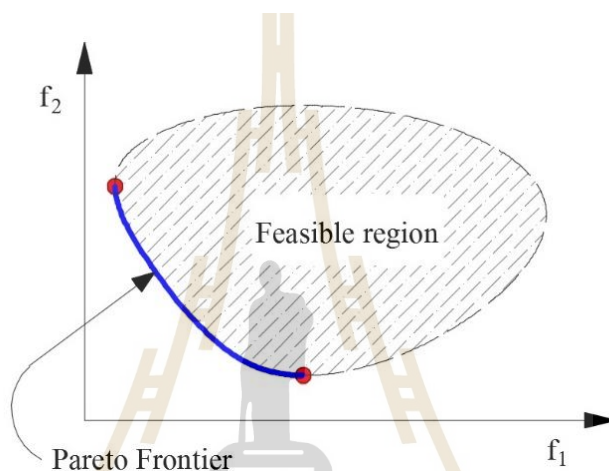
$$\min_x f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x) \quad (2.6)$$

ภายใต้เงื่อนไขบังคับ

$$\begin{aligned} g_i(x) &\leq 0 \\ h_i(x) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

- เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ
 f คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย จำนวน p ฟังก์ชัน
 g_i คือ เงื่อนไขบังคับในรูปแบบอสมการ (inequality constraints)
 h_i คือ เงื่อนไขบังคับในรูปแบบสมการ (equality constraints)

2.6.2 ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือ ขอบหน้าพารेट (Pareto Front)



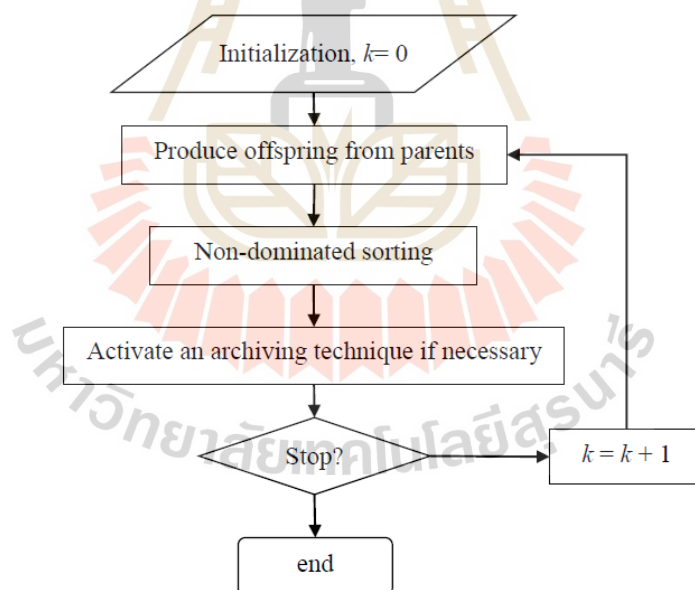
รูปที่ 2.4 ผลเฉลยของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

จากรูปที่ 2.4 แสดงผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาการออกแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย (Bi Objective Optimization) ซึ่งบริเวณที่แรเงาคือ บริเวณที่หาค่าตอบได้ (Feasible region) หรือกลุ่มของผลเฉลยทั้งหมดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับของปัญหาการออกแบบ เรียกว่า กลุ่มของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible solution) เมื่อต้องการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย f_1 จะได้ผลเฉลยที่อยู่ตำแหน่งปลายเส้นทึบ (เส้นสีน้ำเงิน) ด้านบน หรือจุดสีแดงด้านบน และเมื่อต้องการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมาย f_2 จะได้ผลเฉลยที่อยู่ตำแหน่งปลายเส้นทึบ (เส้นสีน้ำเงิน) ด้านล่าง หรือจุดสีแดงด้านล่าง แต่หากต้องการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองพร้อมกัน จะได้คำตอบเป็นเซตของผลเฉลยเหมาะสมที่สุด (อาจจะมีผลเฉลยมากกว่าหนึ่งค่า) ซึ่งก็คือบริเวณขอบด้านหน้าของกราฟหรือเส้นทึบสีน้ำเงินดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปเส้นทึบสีน้ำเงินดังกล่าว มักถูกเรียกว่า ขอบหน้าพารेट (Pareto front) ซึ่งพารेटคือชื่อนักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาลีที่เป็น

หนึ่งในผู้บุกเบิกด้านการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ดังนั้นขอบหน้าพारेโตก็คือ เซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหาการออกแบบสองฟังก์ชันเป้าหมายนั่นเอง

2.6.3 กระบวนการคำนวณในรูปแบบทั่วไป

โดยทั่วไปกระบวนการค้นหาขอบหน้าพारेโตของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย เริ่มต้นจากการกำหนดประชากรตั้งต้น และกำหนดหน่วยเก็บผลเฉลยเหมาะสมที่สุดหรือขอบหน้าพारेโต (Pareto archive) จากนั้นผลิตประชากรลูกจากคู่พ่อ-แม่ และคำนวณค่าฟังก์ชันเป้าหมายของประชากรลูกเพื่อคัดสรรผลเฉลยบางส่วนโดยใช้การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ เมื่อได้กลุ่มของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำแล้ว จากนั้นทำการปรับปรุงผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำไปเรื่อยๆจนกระทั่งหยุดการค้นหาผลเฉลย ดังนั้นกลุ่มของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำล่าสุดก็คือ ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาหรือขอบหน้าพारेโต อย่างไรก็ตามผลเฉลยนี้อาจเรียกว่าค่าประมาณของขอบหน้าพारेโต (Approximate Pareto front) เนื่องจากไม่มีการรับประกันว่าขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการจะหาขอบหน้าพारेโตที่แม่นยำได้ ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมายดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันของขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

2.7 วิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search Algorithm, TS)

วิธีการค้นหาแบบตาบ (Fred Glover, 1986) มีพื้นฐานมาจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีศึกษาสำนึกขั้นสูง (Meta Heuristics Algorithm) โดยที่วิธีการค้นหาแบบตาบเป็นวิธีการค้นหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถใช้แก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (Combination Optimization) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีจำนวนตัวแปรออกแบบของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวัตถุประสงค์ที่ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบกับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่อง เพราะว่าวิธีการค้นหาแบบตาบมีหน่วยความจำที่มีความยืดหยุ่นสามารถปรับปรุงค่าของผลเฉลยจากการค้นหาผลเฉลยรอบๆตำแหน่งผลเฉลยเดิมได้ และยังสามารถจดจำเส้นทางเดิมในการค้นหาผลเฉลยได้ ซึ่งวิธีการค้นหาแบบตาบสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้หลากหลายรูปแบบ และขั้นตอนการคำนวณของวิธีการค้นหาแบบตาบสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย ทำให้สะดวกสำหรับการเขียน โปรแกรม จึงมีนักวิจัยหลายท่านได้ใช้วิธีการค้นหาแบบตาบในการแก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด และที่สำคัญคือ วิธีการค้นหาแบบตาบสามารถหลีกเลี่ยงจากกับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น (Local minimum trap) ได้ ทำให้สามารถค้นหาผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global optimum) ได้

(ชนิดชัย กุลสุวรรณิชพงษ์, 2550) วิธีการค้นหาแบบตาบมีหลักการทำงานโดยการค้นหาผลเฉลยรอบๆตำแหน่งผลเฉลยปัจจุบัน (Neighborhood search) จึงทำให้ได้ผลเฉลยข้างเคียง (Neighborhood solution) และกำหนดในรายการตาบ (Tabu list) กระบวนการค้นหาผลเฉลยดำเนินการคล้ายกับการปีนเขา หรือกระบวนการค้นหาแบบปีนเขา (Hill-Climbing method) โดยที่การค้นหาจะเข้าสู่ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด ซึ่งกระบวนการค้นหาจะค้นหาผลเฉลยข้างเคียงที่ดีกว่าและปรับปรุงผลเฉลยต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดหรือครบเงื่อนไขการค้นหาผลเฉลย แต่ในบางครั้งกระบวนการค้นหาอาจไม่สามารถปรับปรุงผลเฉลยได้อีกทั้งที่ยังไม่ใช่ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด ปรากฏการณ์แบบนี้เรียกว่า กับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น (Local minimum trap) ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบตาบจึงได้นำวิธีการเฉพาะมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว ซึ่งวิธีการเฉพาะนี้เป็นที่รู้จักกันอย่างดีในชื่อของ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration Criterion) และในปัจจุบันวิธีการค้นหาแบบตาบได้ถูกพัฒนาให้มีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น เช่น Reactive Tabu Search (RTS), Probabilistic Tabu Search (PTS), Adaptive Tabu Search (ATS) เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆสำหรับวิธีการค้นหาแบบตาบดังนี้

2.7.1 ส่วนประกอบหลักของวิธีการค้นหาแบบตาบอด

วิธีการค้นหาแบบตาบอดมีส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างสำคัญ 4 ส่วน ได้แก่

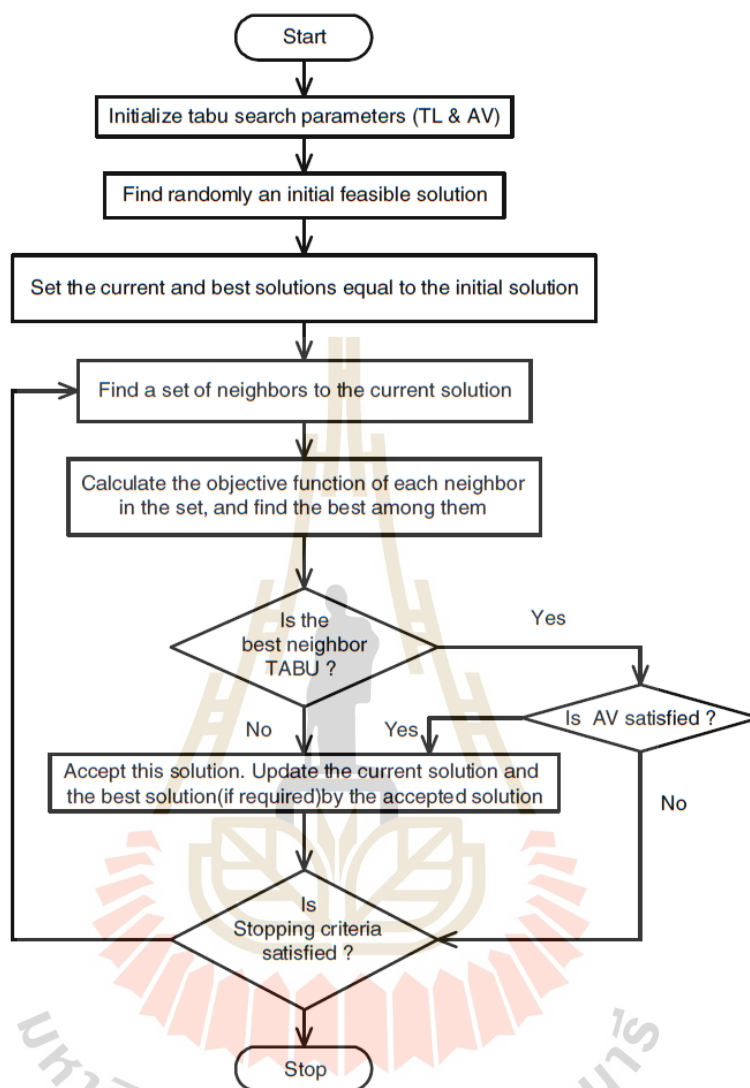
1) ปริภูมิการค้นหา (Search space) เป็นการแบ่งพื้นที่การค้นหาออกเป็นพื้นที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete search space) โดยมีความละเอียดในการคำนวณของโปรแกรมเป็นตัวกำหนดการแบ่งพื้นที่การค้นหา

2) เซตข้างเคียง (Neighborhood set) เป็นการสร้างเซตของผลเฉลยจากตำแหน่งข้างเคียงกับตำแหน่งผลเฉลยเดิม หรือผลเฉลยปัจจุบัน (Current solution) โดยทำการค้นหาผลเฉลยรอบๆผลเฉลยปัจจุบัน ผลเฉลยที่ได้ถูกเรียกว่าผลเฉลยข้างเคียง (Neighborhood solution)

3) หน่วยความจำของการค้นหา (Search memories) เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการค้นหาผลเฉลยของวิธีการค้นหาแบบตาบอดสามารถหลีกเลี่ยงกับดักจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นได้ หน่วยความจำของการค้นหาแบบตาบอดเป็นหน่วยความจำที่มีความยืดหยุ่น โดยทั่วไปหน่วยความจำของการค้นหาสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ หน่วยความจำระยะสั้น (Short Term Memory) มีหน้าที่เก็บเซตของผลเฉลยที่ถูกปรับปรุงแล้วในรอบการคำนวณที่ผ่านมา และกำหนดให้ผลเฉลยนั้นเป็นสถานะต้องห้ามหรือเรียกว่า รายการตาบอด (Tabu list) และหน่วยความจำระยะยาว (Long Term Memory) มีหน้าที่เก็บเซตของผลเฉลยที่ถูกปรับปรุงแล้วเช่นกัน แต่มีช่วงเวลาในการเก็บผลเฉลยที่ยาวนานกว่าหน่วยความจำระยะสั้น เนื่องจากผลเฉลยที่ถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำระยะยาวจะถูกใช้เพื่อเริ่มต้นการค้นหาผลเฉลยใหม่ ในกรณีที่ค้นพบจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นใดๆแล้ว ดังนั้นจึงทำให้สามารถหลุดจากกับดักจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่นได้

4) เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration Criterion) เป็นวิธีการที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ปลดล็อกการติดกับดักของจุดต่ำสุดเฉพาะถิ่น ผลของเกณฑ์ความทะเยอทะยานจะส่งผลให้ผลเฉลยในรายการตาบอดถูกปลดเงื่อนไข ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการค้นหาสามารถค้นหาผลเฉลยที่เป็นสถานะต้องห้ามในรายการตาบอดได้ (โดยปกติแล้วผลเฉลยที่เป็นสถานะต้องห้ามในรายการตาบอดจะถูกห้ามไม่ให้ค้นหา) ซึ่งเกณฑ์ความทะเยอทะยานจำเป็นต้องกำหนดกฎเกณฑ์บางอย่างกำกับไว้ เช่น เมื่อผลเฉลยไม่ได้ถูกปรับปรุงค่าเป็นเวลานานเกินกว่า 10 รอบของการค้นหา เป็นต้น โดยกฎเกณฑ์ดังกล่าวไม่มีข้อกำหนดที่ตายตัวผู้ใช้งานสามารถกำหนดได้อย่างอิสระ

ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่พื้นฐาน สามารถแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตาบู่พื้นฐาน (S.A. Soliman and A.H. Mantawy, 2012)

จากหลักการเกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบตาบู่ที่ได้กล่าวในข้างต้น สามารถแสดงขั้นตอนวิธีการทำงานอย่างง่ายดังนี้

- เมื่อ X คือ เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้
 xx คือ ผลเฉลยปัจจุบัน โดยที่ $xx \in X$
 xx' คือ ผลเฉลยดีที่สุดในกลุ่มของผลเฉลยข้างเคียง
 xx'' คือ ผลเฉลยดีที่สุดในแต่ละรอบการคำนวณ
 E(xx) คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของผลเฉลย xx

$N(xx)$ คือ เซตของผลเฉลยข้างเคียงจากผลเฉลย xx

TL คือ รายการตามู หรือรายการต้องห้าม

AL คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน

SC คือ เกณฑ์การหยุดค้นหา

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดให้ TL เป็นเซตว่าง และ AL มีค่าเท่ากับศูนย์

ขั้นตอนที่ 2) สุ่มเลือกผลเฉลยเริ่มต้น $xx \in X$ และกำหนดให้ $xx'' = xx$

ขั้นตอนที่ 3) ค้นหาเซตของผลเฉลยข้างเคียงจากผลเฉลยปัจจุบัน $N(xx)$ และหาผลเฉลยที่ดีที่สุดในกลุ่มของผลเฉลยข้างเคียง $xx' \in N(xx)$ โดยพิจารณาจากผลเฉลยที่ให้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ดีกว่า

ขั้นตอนที่ 4) เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมาย ถ้า $E(xx') > E(xx'')$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 5) แต่ถ้า $E(xx') \leq E(xx'')$ กำหนดให้ $xx'' = xx'$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 5)

ขั้นตอนที่ 5) ตรวจสอบสถานะต้องห้ามของผลเฉลย TL ถ้า xx' ไม่ได้อยู่ในรายการตามู $xx' \notin TL$ ให้กำหนดเป็นผลเฉลยปัจจุบัน $xx = xx'$ และปรับปรุงค่า TL และ AL ข้ามไปขั้นตอนที่ 7) แต่ถ้า xx' อยู่ในรายการตามู $xx' \in TL$ ข้ามไปขั้นตอนที่ 6)

ขั้นตอนที่ 6) ตรวจสอบเกณฑ์ความทะเยอทะยาน AL ถ้าเป็นจริงให้ลบค่าสถานะต้องห้ามของรายการตามู กำหนดให้ $xx = xx'$ และปรับปรุงค่า AL ข้ามไปขั้นตอนที่ 7) แต่ถ้าเป็นเท็จ กำหนดให้ $xx = xx'$ และปรับปรุงค่า AL ข้ามไปขั้นตอนที่ 7)

ขั้นตอนที่ 7) ตรวจสอบเกณฑ์การหยุดค้นหา SC ถ้าเป็นจริงให้หยุดค้นหา แต่ถ้าเป็นเท็จ ข้ามไปขั้นตอนที่ 3)

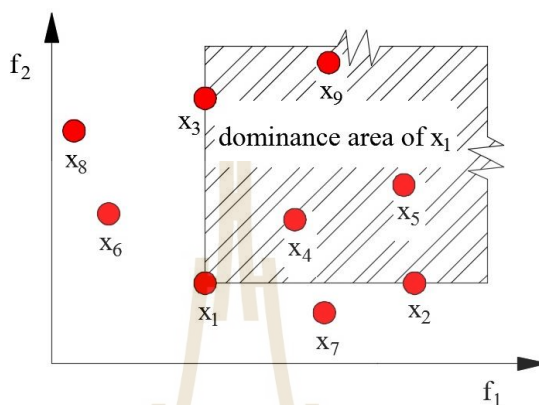
2.8 การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-Dominated Sorting)

เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาขอบหน้าพาเรโต ข้อดีของเทคนิคนี้คือ สามารถหาขอบหน้าพาเรโตซึ่งเป็นผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหา ออกแบบได้ภายในการรัน โปรแกรมเพียงครั้ง ข้อดีนี้มีแค่ในขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการและวิธีศึกษา สำนักขั้นสูงอื่นๆเท่านั้น โดยกระบวนการทำงานของเทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ ทำได้ โดยการเก็บรวบรวมผลเฉลยที่มีค่าฟังก์ชันดีกว่าผลเฉลยอื่นๆ และปรับปรุงผลเฉลยที่ถูกเก็บไว้เรื่อยๆ ซึ่งผลเฉลยนี้จะถูกเรียกว่าผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated solution) เมื่อวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดดำเนินไปจนกระทั่งครบเงื่อนไขการคำนวณ ผลลัพธ์ที่ได้คือ เซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำล่าสุด นั่นคือเซตของผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาการออกแบบ หรือขอบหน้าพาเรโต

2.8.1 นิยามของการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ

นิยามสำหรับการค้นหาผลเฉลยด้วยเทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated sorting) ในกรณีของการหาค่าต่ำสุดมีดังนี้

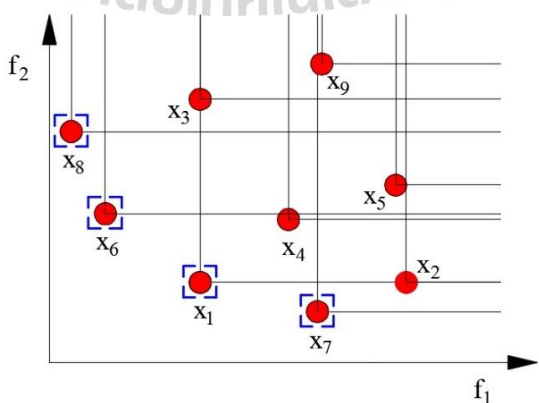
1) นิยาม 1 การครอบงำ (Dominance)



รูปที่ 2.7 พื้นที่ครอบงำของผลเฉลย x_1 (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

จากรูปที่ 2.7 แสดงผลเฉลยในกราฟของฟังก์ชันเป้าหมายสองฟังก์ชัน จากรูปแสดงให้เห็นถึงพื้นที่การครอบงำของผลเฉลย x_1 ซึ่งหมายความว่า ผลเฉลยใดก็ตามที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่การครอบงำนี้จะถูกรอบงำโดยผลเฉลย x_1 ซึ่งจะพบว่าผลเฉลย x_1 ครอบงำผลเฉลย x_2, x_3, x_4, x_5, x_9 ในขณะที่ผลเฉลย x_6, x_7, x_8 ไม่อยู่ในพื้นที่การครอบงำของผลเฉลย x_1 จึงไม่ถูกรอบงำโดยผลเฉลย x_1

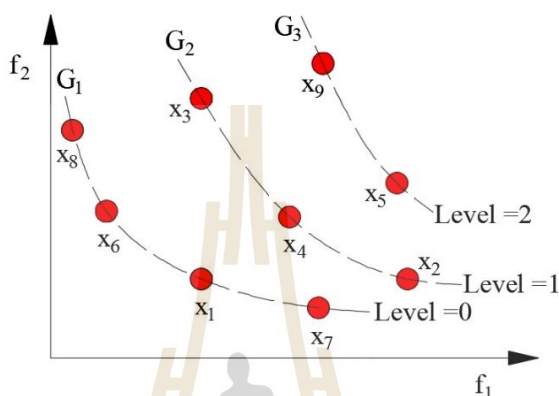
2) นิยาม 2 ผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated solution)



รูปที่ 2.8 การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

จากนิยาม 1 เมื่อทำการสร้างพื้นที่การครอบงำของทุกผลเฉลยในกราฟของฟังก์ชันเป้าหมายสองฟังก์ชันแล้ว พบว่ามีผลเฉลยบางค่าที่ไม่ได้ถูกครอบงำจากผลเฉลยตัวอื่นๆ เรียกผลเฉลยเหล่านั้นว่า ผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (Non-dominated solution) จากรูปที่ 2.8 ผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำคือ x_1, x_6, x_7 และ x_8

3) นิยาม 3 ระดับของการครอบงำ (Level of being dominated)



รูปที่ 2.9 ระดับการครอบงำของผลเฉลยทั้งหมด (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556)

จากรูปที่ 2.9 แสดงการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของกลุ่มประชากรทั้งหมด $G = \{x_1, \dots, x_9\}$ ซึ่งสามารถแบ่งระดับของการถูกครอบงำดังนี้ $G = \{G_1, G_2, G_3\}$ เมื่อ $G_1 = \{x_1, x_6, x_7, x_8\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 0, $G_2 = \{x_2, x_3, x_4\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 1 และ $G_3 = \{x_5, x_9\}$ มีระดับของการถูกครอบงำเป็น 2 โดยจากนิยามแล้วถ้าลบเซตของผลเฉลย G_2, G_3 ทิ้งไป เซตของผลเฉลย G_1 ก็คือผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำของประชากรทั้งหมด

2.9 วิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (Tabu Search Algorithm with Non-Dominated Technique)

วิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคของการหาค่าเหมาะสมที่สุดสองวิธีเข้าด้วยกัน คือ วิธีการค้นหาแบบตาบอด และวิธีการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ โดยได้แบ่งหน้าที่การทำงานของแต่ละวิธีการดังนี้ เริ่มต้นจากวิธีการค้นหาแบบตาบอดมีหน้าที่สำหรับค้นหาผลเฉลยที่เป็นไปได้ หรือการค้นหาประชากรสำหรับการคำนวณภายใต้เงื่อนไขบังคับของปัญหา จากนั้นคำนวณหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของแต่ละผลเฉลย และส่ง

ข้อมูลทั้งหมด เช่น ค่าฟังก์ชันเป้าหมาย และเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งหมดถูกส่งให้กับวิธีการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ เพื่อทำการคัดสรรผลเฉลยที่ดีที่สุดเก็บไว้ และยังสามารถปรับปรุงค่าได้เมื่อเจอผลเฉลยที่ดีกว่า ซึ่งกระบวนการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำจะดำเนินการซ้ำแบบเดิมไปเรื่อยๆจนกว่าจะครบเงื่อนไขการคำนวณ และเมื่อสิ้นสุดการคำนวณผลลัพธ์ที่ได้คือ ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาการออกแบบ

จากหลักการเกี่ยวกับวิธีการค้นหาแบบตามที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำที่ได้กล่าวในข้างต้น สามารถแสดงรายละเอียดของขั้นตอนวิธีการทำงานดังนี้

เมื่อ	X	คือ เซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (Feasible solution)
	xx	คือ ผลเฉลยปัจจุบัน โดยที่ $xx \in X$ (Current solution)
	N(xx)	คือ เซตของผลเฉลยข้างเคียง (Neighborhood solution set)
	ND(xx)	คือ เซตของผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (Non-dominated solution set)
	TL	คือ รายการตาม หรือรายการต้องห้าม (Tabu list)
	AL	คือ เกณฑ์ความทะเยอทะยาน (Aspiration criterion)
	SC	คือ เกณฑ์การหยุดค้นหา (Stopping criterion)

ขั้นตอนที่ 1) กำหนดให้ TL และ X เป็นเซตว่าง และกำหนดให้ AL มีค่าเท่ากับศูนย์ สุ่มเลือกผลเฉลยเริ่มต้นและกำหนดให้เป็นผลเฉลยปัจจุบัน xx

ขั้นตอนที่ 2) ค้นหาเซตของผลเฉลยข้างเคียงจากผลเฉลยปัจจุบัน N(xx) โดยผลเฉลยที่ถูกค้นหาห้ามซ้ำกับผลเฉลยในรายการตาม $N(xx) \notin TL$

ขั้นตอนที่ 3) คัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำของเซตผลเฉลยข้างเคียง ND(N(xx)) และปรับปรุงค่า TL

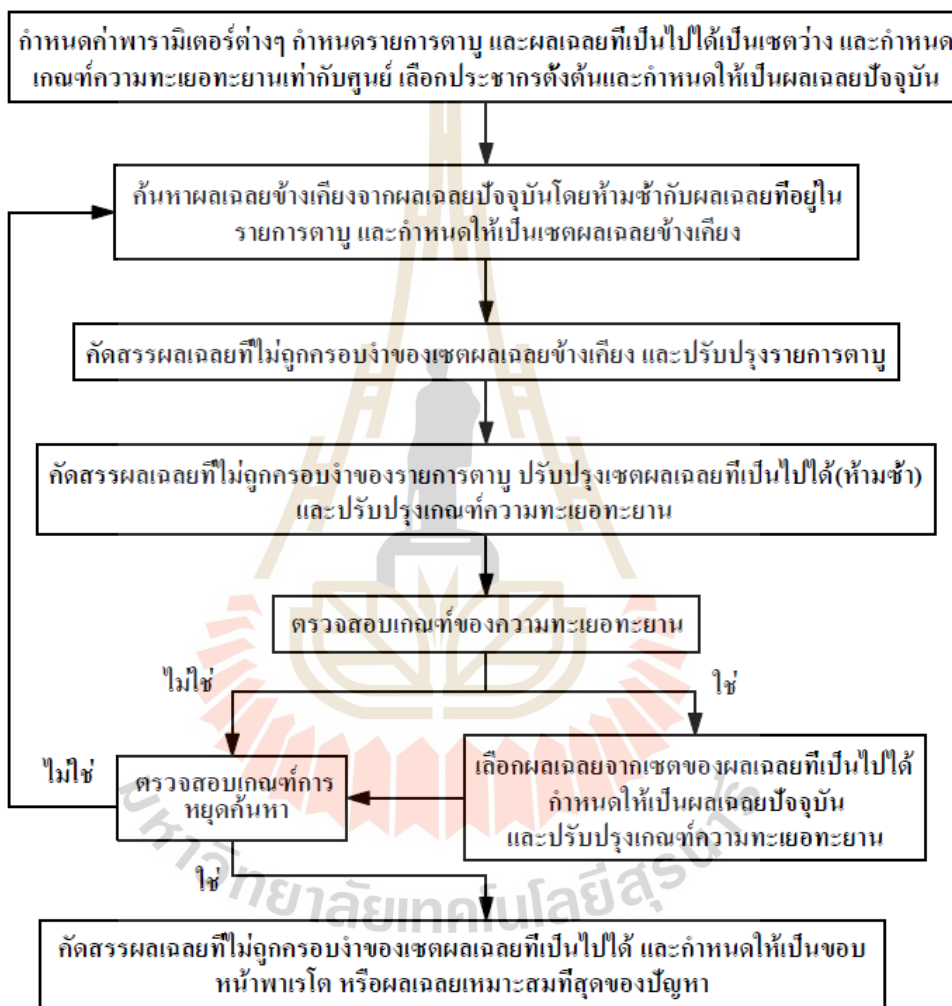
ขั้นตอนที่ 4) คัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำของรายการตาม ND(TL) และปรับปรุงค่า X โดยห้ามซ้ำกับผลเฉลยเก่าที่เคยนำมาปรับปรุงค่าแล้ว และปรับปรุงค่า AL

ขั้นตอนที่ 5) ตรวจสอบเกณฑ์ความทะเยอทะยาน AL ถ้าเป็นจริงให้สุ่มเลือกผลเฉลยจากเซตของผลเฉลยที่เป็นไปได้ $xx \in X$ แล้วกำหนดให้เป็นผลเฉลยปัจจุบัน xx และปรับปรุงค่า AL ซ้ำไปขั้นตอนที่ 6) แต่ถ้าเป็นเท็จ ซ้ำไปขั้นตอนที่ 6)

ขั้นตอนที่ 6) ตรวจสอบเกณฑ์การหยุดค้นหา SC ถ้าเป็นจริง ซ้ำไปขั้นตอนที่ 7) แต่ถ้าเป็นเท็จ ซ้ำไปขั้นตอนที่ 2)

ขั้นตอนที่ 7) คัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำของเซตผลเฉลยที่เป็นไปได้ $ND(X)$ แล้วกำหนดให้เป็น Pareto front หรือผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหา และสิ้นสุดกระบวนการค้นหาผลเฉลย

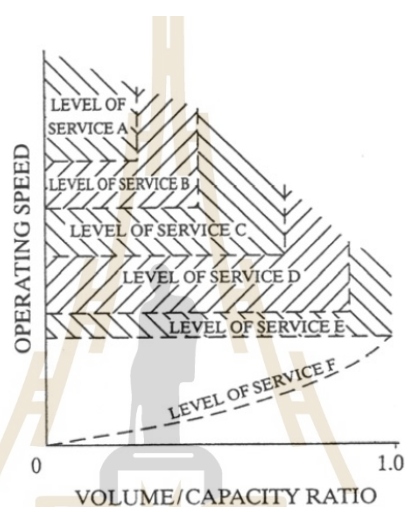
ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตามูที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ สามารถแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ผังงานของวิธีการค้นหาแบบตามูที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ

2.10 ระดับการให้บริการ (Level of Service, LOS)

ระดับการให้บริการ (Level of service, LOS) มีที่มาจาก Transportation Research Board (2000) ได้นำเสนอแนวความคิดในการประเมินสภาพจราจร และประสิทธิภาพของถนน ซึ่งระดับการให้บริการคือ วิธีการวัดคุณภาพของการจราจรในถนน โดยพิจารณาจากองค์ประกอบหลายๆ ด้าน เช่น ความเร็วของยานยนต์ ระยะเวลาในการเดินทาง ความสะดวก ความสบายในการขับขี่ และเดินทาง ความคล่องตัวในการจราจร ค่าใช้จ่ายในการเดินทาง และความปลอดภัย เป็นต้น ซึ่งระดับการให้บริการสามารถแบ่งออกเป็น 6 ระดับ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพจำแนกระดับการให้บริการ (Transportation Research Board, 2000)

จากรูปที่ 2.11 แสดงกราฟของการจำแนกระดับการให้บริการทั้ง 6 ระดับ ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วของรถยนต์ และอัตราส่วนของปริมาณการจราจรต่อความจุของถนน (Volume/Capacity, v/c ratio) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยพื้นที่ภายในขอบเขตเส้นกราฟจะถูกแบ่งออกเป็น 6 พื้นที่ย่อย นั่นคือระดับการให้บริการทั้ง 6 ระดับ โดยระดับการให้บริการจะถูกแทนด้วยตัวอักษร A ถึง F ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของระดับการให้บริการแต่ละระดับ ดังนี้

1) ระดับการให้บริการ A (Level of service A, LOS A)

เป็นระดับการให้บริการที่รถยนต์สามารถเคลื่อนได้อย่างอิสระ ด้วยความเร็วอิสระ (Free Flow Speed) หรือเรียกว่า สภาพอิสระ (Free Flow) ผู้ขับขี่สามารถเลือกใช้ความเร็วของรถยนต์ได้อย่างอิสระโดยไม่ได้รับอิทธิพลจากรถยนต์คันอื่นบนถนน หมายความว่า การขับขี่รถยนต์จะไม่ถูกรบกวนจากรถยนต์คันอื่นถึงแม้ว่าการจราจรจะมีความหนาแน่นสูงสุดของระดับการให้บริการนี้ ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรถยนต์สามารถเปรียบเทียบได้กับความยาวโดยประมาณของ

รถยนต์ 27 คัน ดังนั้นระดับการให้บริการ A จึงเป็นระดับการให้บริการที่สะดวกสบายมากที่สุด อุบัติเหตุและสภาพถนนที่เป็นอุปสรรคต่อการขับขี่จะไม่ส่งผลกระทบต่อมากนักที่ระดับการให้บริการนี้ สภาพจราจรของระดับการให้บริการ A แสดงดังรูป 2.12



รูปที่ 2.12 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ A (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

2) ระดับการให้บริการ B (Level of service B, LOS B)

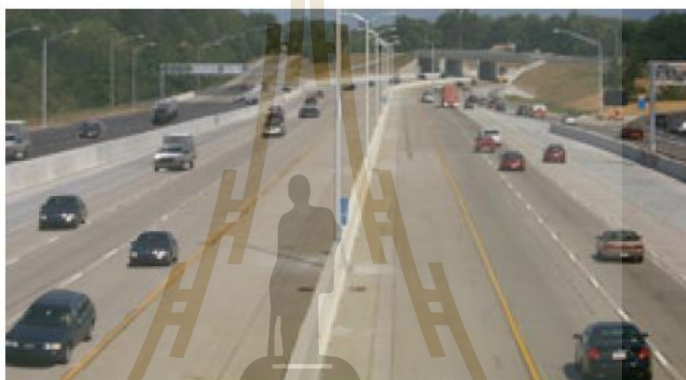
เป็นระดับการให้บริการที่รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หรือเรียกว่า สภาพอยู่ตัวตัว (Stable Flow) ผู้ขับขี่ยังสามารถเลือกใช้ความเร็วของรถยนต์ได้อย่างอิสระ แต่การเปลี่ยนช่องทางจราจรอาจถูกจำกัดบ้างเล็กน้อย แต่โดยภาพรวมที่ระดับการให้บริการนี้ยังคงมีความสะดวกสบายในการขับขี่เช่นเดียวกับที่ระดับการให้บริการ A สำหรับอุบัติเหตุและสภาพถนนที่เป็นอุปสรรคต่อการขับขี่จะไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพจราจรมากนักที่ระดับการให้บริการนี้ ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรถยนต์สามารถเปรียบเทียบได้กับความยาวโดยประมาณของรถยนต์ 16 คัน สภาพจราจรของระดับการให้บริการ B แสดงดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ B (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

3) ระดับการให้บริการ C (Level of service C, LOS C)

เป็นระดับการให้บริการที่สามารถใช้ความเร็วในการขับขี่ได้ใกล้เคียงกับความเร็วอิสระ หรือเรียกว่า สภาพอยู่ตัว (Stable Flow) ความอิสระในการขับขี่รถยนต์เริ่มถูกจำกัดมากขึ้น ผู้ขับขี่ต้องใช้ความระมัดระวังขณะเปลี่ยนช่องทางจราจร ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรถยนต์สามารถเปรียบเทียบได้กับความยาวโดยประมาณของรถยนต์ 11 คัน สำหรับอุบัติเหตุบนถนนยังไม่ส่งผลกระทบต่อสภาพจราจรมากนัก แต่สภาพถนนที่เป็นอุปสรรคต่อการขับขี่อาจเริ่มมีผลกระทบมากขึ้น และอาจทำให้เกิดรถติดได้ในตำแหน่งที่เป็นอุปสรรคนั้น สภาพจราจรของระดับการให้บริการ C แสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ C (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

4) ระดับการให้บริการ D (Level of service D, LOS D)

เป็นระดับการให้บริการที่ความเร็วในการขับขี่เริ่มลดลง หรือเรียกว่า สภาพใกล้ไม่อยู่ตัว (Approach Unstable Flow) ในขณะที่ปริมาณการจราจร และความหนาแน่นเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความอิสระในการสัญจรในกระแสจราจรของผู้ขับขี่ถูกจำกัดมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทำให้ความสะดวกสบายในการขับขี่ลดลง และมีความเครียดในการขับขี่เพิ่มขึ้น ถ้าเกิดอุบัติเหตุเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดการจราจรติดขัดได้ เนื่องจากพื้นที่ในการสัญจรและใช้สำหรับหลบหลีกลดลง ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรถยนต์สามารถเปรียบเทียบได้กับความยาวโดยประมาณของรถยนต์ 8 คัน สภาพจราจรของระดับการให้บริการ D แสดงดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ D (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

5) ระดับการให้บริการ E (Level of service E, LOS E)

เป็นระดับการให้บริการที่ระดับสูงสุดที่ถนนสามารถรองรับปริมาณได้ การสัญจรเป็นไปด้วยความยากลำบาก หรือเรียกว่า สภาพไม่อยู่ตัว (Unstable Flow) มีพื้นที่ในการสัญจรและเปลี่ยนช่องทางจราจรน้อยลง การขัดกระแสนจราจรเพียงเล็กน้อยอาจทำให้เกิดการจราจรติดขัดได้ เช่น การเปลี่ยนช่องทางจราจร การขับขึ้นรถยนต์ออกมาจากทางเชื่อมเข้าสู่กระแสจราจรหลัก เป็นต้น แต่ถ้าเกิดอุบัติเหตุเพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เกิดการจราจรติดอย่างรุนแรงได้ เนื่องจากไม่มีพื้นที่เพียงพอสำหรับระบายการจราจร ซึ่งเป็นสภาพจราจรที่ส่งผลให้เกิดความอึดอัดและความเครียดต่อผู้ขับขี่อย่างมาก ซึ่งระยะห่างเฉลี่ยระหว่างรถยนต์สามารถเปรียบเทียบกับความยาวโดยประมาณของรถยนต์ 6 คัน สภาพจราจรของระดับการให้บริการ E แสดงได้รูป 2.16



รูปที่ 2.16 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ E (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

6) ระดับการให้บริการ F (Level of service F, LOS F)

เป็นระดับการให้บริการที่เกิดสภาพการติดขัดของกระแสจราจร หรือเรียกว่า สภาพถูกบีบ (Force Flow) ซึ่งการติดขัดของกระแสจราจรมีสาเหตุมาจากการเกิดอุบัติเหตุชั่วขณะ ส่งผลให้ความสามารถในการรองรับปริมาณการจราจรของถนนลดลง ดังนั้นจำนวนรถยนต์ที่วิ่งเข้ามาจึงมีจำนวนมากกว่ารถยนต์ที่ระบายออกไปจากจุดดังกล่าว หมายความว่าปริมาณการจราจรวิ่งเข้าสู่ตำแหน่งที่เกิดการขัดแย้งของกระแสจราจรมากกว่าปริมาณการจราจรที่วิ่งออกจากตำแหน่งนั้น ตัวอย่างตำแหน่งที่เกิดการขัดแย้ง เช่น ตำแหน่งที่กระแสจราจรรวมเข้าด้วยกัน (Merging) ตัดกัน (Weaving) และตำแหน่งที่จำนวนช่องทางจราจรลดลง (Lane drop) เป็นต้น ดังนั้นที่ระดับการให้บริการนี้มีปริมาณการจราจรที่สูงเกินกว่าความสามารถในการรองรับปริมาณการจราจรของถนน สภาพจราจรของระดับการให้บริการ F แสดงดังรูป 2.17



รูปที่ 2.17 สภาพจราจรของระดับการให้บริการ F (สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551)

2.11 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption, sfc)

ในการทดสอบเครื่องยนต์การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงถูกวัดเป็นอัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) ซึ่งการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แต่ละรุ่นไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องยนต์ ถ้าเครื่องยนต์มีขนาดใหญ่จะมีการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมากกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์ขนาดเล็ก ดังนั้นจึงได้กำหนดการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงในรูปแบบใหม่คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption, sfc) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ที่มีขนาดต่างกัน ได้ ซึ่งการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีหน่วยเป็น gm/kW-hr หรือ lbm/hp-hr สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.8)

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}} \quad (2.8)$$

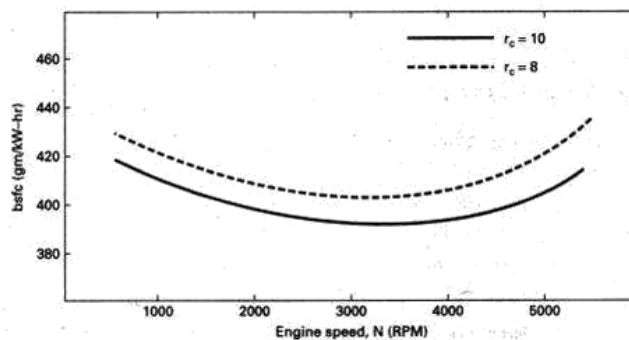
เมื่อ \dot{m}_f คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิง
 \dot{W} คือ กำลังของเครื่องยนต์

จากสมการที่ (2.8) แสดงสัมพันธภาพของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ คือค่าของอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะยิ่งมีค่าต่ำยิ่งดี หมายความว่าเครื่องยนต์นี้ใช้ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่น้อยแต่ให้กำลังของเครื่องยนต์มากกว่านั่นเอง โดยทั่วไปแล้วการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะจะถูกคำนวณในรูปแบบของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก (Brake specific fuel consumption, bsfc) คือค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อกำลังเพลา สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.9)

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{\dot{W}_b} \quad (2.9)$$

เมื่อ \dot{m}_f คือ อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันเชื้อเพลิง
 \dot{W}_b คือ กำลังเพลา

การแสดงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก สามารถแสดงได้ในรูปแบบของความสัมพันธ์กับค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรก บนความเร็วรอบของเครื่องยนต์

(Willard W. Pulkrabek, 1997)

จากรูปที่ 2.18 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าสูงเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบต่ำ และเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบที่สูงขึ้น หรือเครื่องยนต์มีความเร็วรอบระดับปานกลาง ทำให้ค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆอีกครั้งเมื่อเครื่องยนต์มีความเร็วรอบที่สูงมาก เนื่องจากแรงเสียดสีที่เพิ่มขึ้นอย่างมากจึงต้องใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงไปชดเชยกับแรงเสียดสีที่เกิดขึ้น ทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าเพิ่มขึ้น และที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่ำส่งผลให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าสูง เพราะว่าการทำงานต่อหนึ่งวัฏจักรใช้เวลานานจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนทางผนังกระบอกสูบและผนังห้องเผาไหม้ และลูกเบี้ยวควบคุมลิ้นถูกออกแบบสำหรับช่วงความเร็วรอบปานกลางของเครื่องยนต์ ทำให้การประจุไอดีและการคายไอเสียไม่ดีเท่าที่ควร และสุดท้ายการเพิ่มอัตราส่วนการอัดสามารถทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกมีค่าลดลงได้ เพราะว่าการเพิ่มอัตราส่วนการอัดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเครื่องยนต์

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Symeon E. Christodoulou et al. (2010) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของท่อส่งน้ำ โดยใช้วิธีการแบบ Ant Colony Optimization (ACO) เป็นวิธีการที่มีแนวคิดมาจากการเดินทางของฝูงมดไปยังเป้าหมายโดยใช้ Pheromone ในการนำทาง ซึ่งวิธีการแบบ ACO ถูกคิดค้นโดย Dorigo ในปี 1996 และ Dorigo and Stutzle ในปี 2002 จากงานวิจัยได้เลือกกรณีศึกษา 2 กรณีคือ กรณีศึกษาที่ 1 ได้จำลองเส้นทางของท่อส่งน้ำโดยกำหนดให้มี Valve ช็องอ และข้อต่อต่างๆ และกรณีศึกษาที่ 2 ได้ใช้เส้นทางของท่อส่งน้ำจริงในเมืองใหญ่ ซึ่งผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ขั้นตอนวิธีการแบบ ACO ให้ประสิทธิภาพที่ดีและใช้เวลาในการคำนวณน้อยสำหรับการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของท่อส่งน้ำ

Sujin Bureerat and Krit Sriworamas (2013) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาเส้นทางและขนาดที่เหมาะสมที่สุดของระบบท่อส่งน้ำ โดยใช้วิธีการคำนวณแบบวิวัฒนาการของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ได้แก่ วิธีการ MOHS, UPS-EMOA, MPSO, SPEA2, NSGAI, RPBIL, RPBIL-DE สำหรับการหาผลเฉลย ซึ่งวัตถุประสงค์ คือ ควบคุมแรงดันสูญเสียให้มีค่าต่ำที่สุด และควบคุมค่าใช้จ่ายให้มีค่าต่ำที่สุด ดังนั้นปัญหานี้จึงเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย จากงานวิจัยได้จำลองเส้นทางของท่อส่งน้ำ 3 รูปแบบ และเส้นทางจริงของท่อส่งน้ำที่อำเภอชุมพลบุรี จังหวัดสุรินทร์ ได้ใช้วิธีการ Network Repairing Technique (NRT) ช่วยแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการไหลของน้ำภายในท่อ โดยใช้โปรแกรม EPANET version2 เพื่อคำนวณค่าของฟังก์ชันเป้าหมาย และใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าเหมาะสมที่สุดของท่อส่งน้ำ

จากผลการวิจัยพบว่า ขั้นตอนวิธีการคำนวณต่างๆดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถหาขอบหน้าพาเรโตของท่อส่งน้ำในทุกกรณีศึกษาได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงใช้ค่า Hypervolume (HV) นำมาเปรียบเทียบวิธีการคำนวณทั้งหมด จากการเปรียบเทียบได้ผลลัพธ์ว่าวิธีการ RPBIL-DE ให้ค่า Hypervolume มากที่สุด ดังนั้นวิธีการ RPBIL-DE จึงมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหานี้

Thititon Srisuwandee and Rapeepan Pitakaso (2012) ได้เสนอการแก้ปัญหาการกำหนดเส้นทางการขนส่งด้วยยานพาหนะโดยวิธีการอาณานิคมมด จากงานวิจัยได้กำหนดกรณีศึกษาเป็นบริษัทเจียรนัยน้ำดื่มจำกัด ซึ่งมีฟังก์ชันเป้าหมาย คือ จัดหาเส้นทางสำหรับยานพาหนะให้มีระยะทางรวมสั้นที่สุด โดยความจุของยานพาหนะมีจำนวนจำกัด และลูกค้าแต่ละรายมีความต้องการสินค้าไม่แน่นอน จึงทำการออกแบบขั้นตอนวิธีการด้วยวิธีการย้ายลูกค้ำระหว่างเส้นทาง (Crossover-Move) การสลับสองตำแหน่ง (2-opt) และการย้ายหนึ่งตำแหน่ง (One-Move) จากผลการทดสอบวิธีการพบว่า ทั้ง 3 วิธีข้างต้นสามารถลดระยะทางรวมให้สั้นที่สุดได้ เมื่อเทียบกับเส้นทางเดิมสามารถลดระยะทางจาก 584.25 km เป็น 441.35 km คิดเป็น 24.46% ซึ่งเมื่อทำการวัดประสิทธิภาพแล้วพบว่าทั้ง One-Move, Crossover-Move และ 2-opt มีความน่าเชื่อถือในการหาผลเฉลย และยังใช้เวลาประมวลผลอย่างเหมาะสม

Gong Yan, Li Sujian and Xing Enhui (2013) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการหาเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงการจราจรที่ติดขัด โดยใช้วิธีการคำนวณการทำงานของจรวดนำวิถี (Missile Guidance Algorithm) ซึ่งเป็นปัญหาแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย จากงานวิจัยได้จำลองการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของสภาพจราจรในประเทศจีน เมืองปักกิ่ง บริเวณ Olympic Green และถนนข้างเคียงเป็นกรณีศึกษา ซึ่งเป็นเขตชุมชนเมือง และมีการจราจรติดขัดมาก มีการกำหนดจุดเริ่มต้น และจุดเป้าหมาย พร้อมทั้งกำหนดสภาพจราจรที่แตกต่างกันในแต่ละเส้นทาง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียน code เพื่อคำนวณ ผลการคำนวณทำให้ได้คำตอบเป็นเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด ซึ่งผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดนั้นไม่จำเป็นต้องมีระยะทางสั้นที่สุดเสมอไป แต่ต้องใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด

Maria da Conceicao Cunha and Luisa Ribeiro (2004) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของท่อส่งน้ำด้วยวิธีการค้นหาแบบดาบ ซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ควบคุมค่าใช้จ่ายให้มีค่าต่ำที่สุด จากงานวิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 5 กรณี ได้แก่ แผนผังท่อส่งน้ำของ Alperovits and Shamir, แผนผังท่อส่งน้ำของเมืองฮานอย, แผนผังท่อส่งน้ำของเมืองนิวยอร์ก, แผนผังท่อส่งน้ำของ Gessler และแผนผังท่อส่งน้ำของ Walski et al. ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่า วิธีการค้นหาแบบดาบสามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงได้ ยกตัวอย่างแผนผังท่อส่งน้ำที่ 4 (Gessler) มีค่าใช้จ่าย 834,000

ดอลลาร์ แต่เมื่อใช้ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดจากวิธีการค้นหาแบบตาบแล้วทำให้ค่าใช้จ่ายลดลงมาเหลือ 807,999 ดอลลาร์ ดังนั้นวิธีการค้นหาแบบตาบสามารถใช้กับปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของท่อส่งน้ำได้

B. Lin and D. C. Miller (2004) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการหาโครงข่ายของการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ควบคุมค่าใช้จ่ายรายปีให้มีค่าต่ำที่สุด จากงานวิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 3 กรณี โดยใช้โปรแกรม Gcc ในการเขียน code และรันบน Red Hat Linux 7.1 เพื่อหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหานี้ จากผลการวิจัยพบว่าทั้ง 3 กรณีศึกษา วิธีการค้นหาผลเฉลยแบบตาบสามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดที่ทำให้ค่าใช้จ่ายรายปีลดลงได้ ซึ่งวิธีการค้นหาแบบตาบนี้สามารถหาจุดเหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum) ได้ และยังมีแนวโน้มจะเป็นในการค้นพบผลเฉลยสูงมากกว่า 90%

Mostafa Ranjbar et al. (2012) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาโครงสร้างเสถียรที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ เพื่อให้ได้ชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยมตามที่ต้องการ จากงานวิจัยได้กำหนดฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหานี้ คือ การควบคุมค่า Root Mean Square Level (RMSL) ให้มีค่าต่ำที่สุด โดยใช้โปรแกรม ANSYS ในการจำลองชิ้นงานแผ่นสี่เหลี่ยม จากผลการวิจัยพบว่า วิธีการค้นหาแบบตาบสามารถหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดได้ ซึ่งผลเฉลยนี้สามารถลดค่าของฟังก์ชันเป้าหมายหรือค่า Root Mean Square Level (RMSL) ได้ถึง 67% โดยที่ใช้เวลาในการคำนวณแค่ 30% ของเวลาทั้งหมด

Lust Thibaut and Teghem Jacques (2006) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับปัญหาการซ่อมบำรุงของระบบการทำงานของเครื่องจักร ซึ่งเป็นปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย คือ ควบคุมความน่าเชื่อถือของระบบให้มีค่าสูงที่สุด และควบคุมค่าใช้จ่ายให้มีค่าต่ำที่สุด โดยใช้วิธีการ Pareto Ranking Tabu Search + Density (PRTS+D) ในการแก้ไขปัญหานี้ วิธีการ PRTS+D มีพื้นฐานมาจากวิธีการค้นหาแบบตาบ (Tabu Search, TS) จากงานวิจัยมีกรณีศึกษาเป็นระบบทำความเย็นของโรงงานผลิต Liquefied natural gas (LNG) ซึ่งระบบทำความเย็นมีส่วนประกอบสำคัญหลายชิ้น เช่น วาล์ว, ปั๊ม, เครื่องอัดไอ เป็นต้น จากผลการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ซึ่งเป็นผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย จากขอบหน้าพาเรโตที่ได้มานั้นประกอบไปด้วยผลเฉลยทั้งหมด 64 ผลเฉลย ซึ่งผลเฉลยของค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงมีค่าอยู่ระหว่าง 0-3040 ยูโร และผลเฉลยของความน่าเชื่อถือของระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.145-0.906 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการ PRTS+D สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

Abdullah Ates and Celaleddin Yeroglu (2016) นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ให้มีค่าเหมาะสมที่สุด โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการหาผลเฉลย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการออกแบบได้แก่ $k_p, k_i, k_d, \lambda, \mu$ ได้ใช้โปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด จากงานวิจัยได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีแรกเปรียบเทียบการออกแบบค่าพารามิเตอร์ระหว่าง ตัวควบคุม PID ที่ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด และตัวควบคุม Fractional-Order Proportional-Integral-Derivative (FOPID) ที่ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด และกรณีที่ 2 เปรียบเทียบการออกแบบค่าพารามิเตอร์ระหว่าง ตัวควบคุม FOPID ที่ใช้วิธีการ Differential Evolution (DE) ในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด และตัวควบคุม FOPID ที่ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด จากผลการวิจัยพบว่า กรณีแรกตัวควบคุม FOPID ให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีกว่าตัวควบคุม PID ซึ่งดูได้จากการลู่เข้าสู่สถานะคงที่ของระบบที่เร็วกว่า และกรณีที่ 2 วิธีการค้นหาแบบตามูให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีกว่าขั้นตอนวิธี Differential Evolution เมื่อพิจารณาการลู่เข้าสู่สถานะคงที่ของระบบแล้ว จะเห็นว่าเส้นกราฟของวิธีการค้นหาแบบตามูลู่เข้าสู่สถานะคงที่ของระบบได้รวดเร็วกว่าอย่างชัดเจน

2.13 สรุป

การเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด คือการเลือกเส้นทางที่สามารถเดินทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายได้ทันเวลาตามที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งเส้นทางนั้นอาจเป็นเส้นทางที่ใช้เวลาน้อยที่สุด มีระยะทางที่สั้นที่สุด หรืออาจเป็นเส้นทางอื่นๆก็ได้ แต่ในการเดินทางมักประสบปัญหาคือ สภาพจราจรที่ติดขัด สภาพถนนที่ชำรุดเสียหาย เป็นต้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการเดินทาง และพบว่าปัญหาการเลือกเส้นทางเป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีการใช้การหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูจำนวนมาก และให้ผลเฉลยที่มีความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยจึงนำวิธีการดังกล่าวมารวมใช้หาผลเฉลยของปัญหาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตามูใช้งานง่าย เข้าใจง่าย เป็นวิธีที่ทนทาน สามารถประยุกต์ใช้กับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดได้เกือบทุกรูปแบบ สามารถแก้ไขปัญหามีจำนวนตัวแปรออกแบบของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีควมซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตามูในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

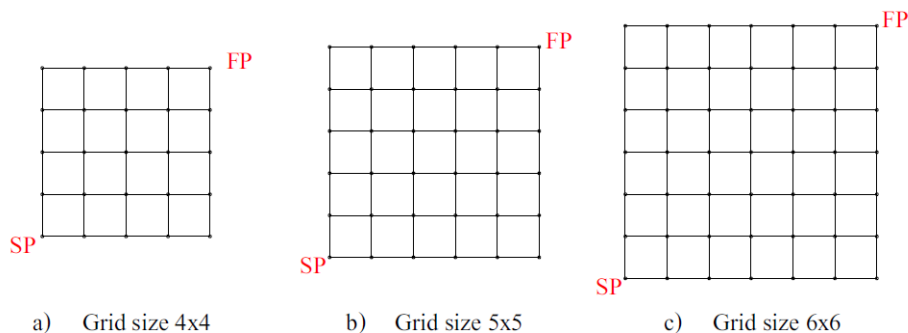
ในบทนี้ได้นำเสนอการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจรด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอรับ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Version R2010a เป็นเครื่องมือในการออกแบบ วิเคราะห์ และคำนวณผลของค่าฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางต่างๆในการจราจร เพื่อให้ได้มาซึ่งเส้นทางเหมาะสมที่สุด และนำวิธีการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับการหาเส้นทางจริงของการจราจรต่อไป โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การแบ่งกรณีศึกษา

สำหรับวิธีการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจร เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงได้มีการวิเคราะห์เส้นทางจำลองของการจราจรอย่างง่ายก่อน เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและความเป็นไปได้ของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดว่าได้ผลลัพธ์เป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ สำหรับการสร้างเส้นทางจำลองได้ถูกสร้างขึ้นให้ใกล้เคียงกับเส้นทางจริงของการจราจร เพื่อให้สะดวกต่อการนำมาประยุกต์ใช้กับเส้นทางจริงของการจราจรในขั้นตอนถัดไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งการวิเคราะห์และการคำนวณออกเป็น 2 แบบ ดังนี้

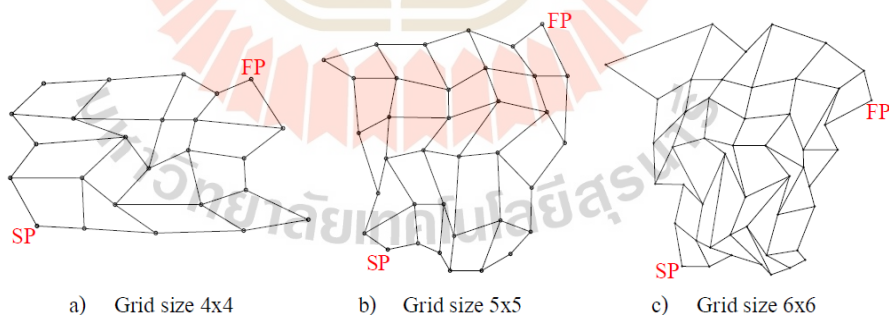
3.1.1 เส้นทางจำลองของการจราจร

เส้นทางจำลองของการจราจร เป็นเส้นทางจำลองอย่างง่ายที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้สะดวกต่อการทำความเข้าใจในกระบวนการทำงานของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งเส้นทางจำลองนี้มีลักษณะคือ เป็นเส้นทางที่ไม่มีความซับซ้อน มีรูปแบบของเส้นทางจราจรที่เหมือนกัน และมีจุดทางแยกที่เกิดจากตัดกันของเส้นทางต่างๆเหมือนกับเส้นทางจริงของการจราจร เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้จำลองเส้นทางของการจราจรแบบกริด (Grid path) ขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ

จากรูปที่ 3.1 แสดงเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5 และ 6x6 ตามลำดับ การระบุขนาดของกริดสามารถระบุได้จากจำนวนแถวและหลักของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยระยะทางของเส้นทางในแต่ละช่วง (เส้นรอบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส) มีความยาวเท่ากันทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้การคำนวณของโปรแกรมไม่มีความหลากหลายของกลุ่มประชากร ทำให้ได้ผลเฉลยของการคำนวณที่มีค่าซ้ำเดิมทุกรอบการค้นหา หรือผลเฉลยไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงเส้นทางในแต่ละช่วงของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆใหม่ โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะทางของเส้นทางในแต่ละช่วงให้มีความยาวที่แตกต่างกันไป เพื่อให้การคำนวณของโปรแกรมสามารถค้นหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดได้ตามที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 3.2



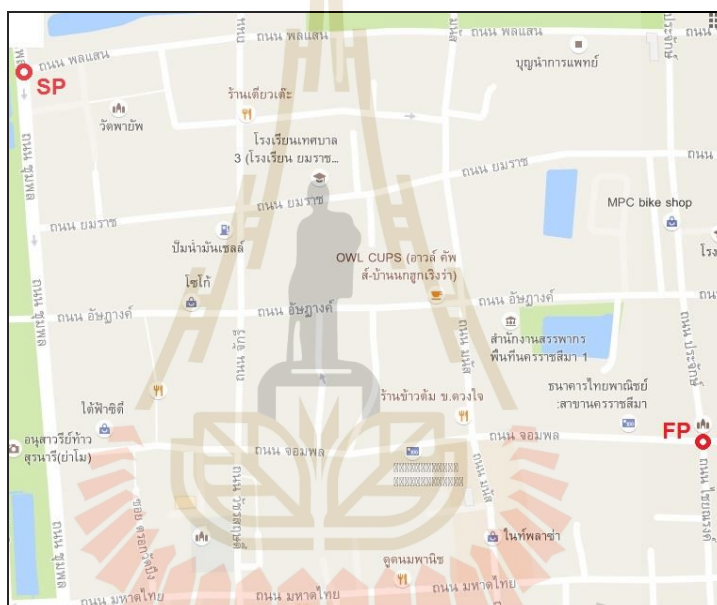
รูปที่ 3.2 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆที่ปรับเปลี่ยนค่าระยะทางใหม่

จากรูปที่ 3.2 แสดงเส้นทางจำลองแบบกริดต่างๆที่ปรับเปลี่ยนค่าระยะทางของเส้นทางในแต่ละช่วงใหม่ ซึ่งระยะทางใหม่ถูกกำหนดขึ้นมาโดยการสุ่มค่าแบบไม่เจาะจง และเป็นเส้นทางจำลองนี้จะถูกใช้ในการคำนวณของโปรแกรมเพื่อหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดในขั้นตอนถัดไป ซึ่งได้กำหนดจุดต่างๆที่ตำแหน่งทางแยกทั้งหมด และกำหนดจุดเริ่มต้น (Start point, SP) คือ

จุดมุมซ้ายมือล่าง และกำหนดจุดเป้าหมาย (Finish point, FP) คือ จุดมุมขวามือบน สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ

3.1.2 เส้นทางจริงของการจราจร

เส้นทางจริงของการจราจร คือเส้นทางที่ถูกใช้ในการเดินทางจริงและมีอยู่ในแผนที่ ซึ่งประกอบไปด้วยเส้นทางในการสัญจรของยานพาหนะ ทางแยกต่างๆซึ่งอาจมีสัญญาณไฟจราจรในบางจุด และยังมีเงื่อนไขต่างๆในการขับขี่ เช่น เส้นทางเดินรถทางเดียว เส้นทางจำกัดความเร็ว และจุดห้ามจอด เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกเส้นทางจริงของการจราจรคือ เส้นทางบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.3

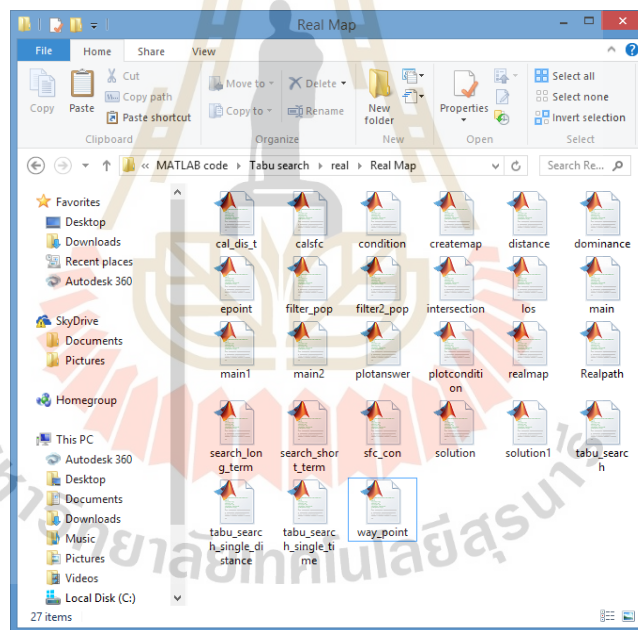


รูปที่ 3.3 เส้นทางจริงของการจราจร (<https://www.google.co.th/maps>)

จากรูปที่ 3.3 แสดงเส้นทางจริงของการจราจรบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี ซึ่งเป็นเส้นทางทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด โดยกำหนดจุดต่างๆที่ตำแหน่งทางแยกทั้งหมด และได้กำหนดจุดเริ่มต้นคือ บริเวณหน้าวัดพายัพ และกำหนดจุดเป้าหมายคือ บริเวณศาลหลักเมือง

3.2 แนวคิดการทำงานของโปรแกรม

กระบวนการทำงานของโปรแกรมทำได้โดยการเขียน code ของโปรแกรม MATLAB ขึ้นมาให้อยู่ในรูปของ M-file function หลายๆ ไฟล์ ซึ่งแต่ละไฟล์ถูกเขียนให้มีหน้าที่การทำงานแตกต่างกันไป และแต่ละไฟล์สามารถเชื่อมโยงกันได้ เพื่อใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลที่ต้องการ โดยการคำนวณของโปรแกรมเริ่มต้นจาก โปรแกรมหลัก หรือที่เรียกว่า Main program ซึ่งโปรแกรมหลักนี้สามารถเรียกใช้โปรแกรมย่อย หรือ Sub program อื่นๆ เพื่อคำนวณหรือค้นหาข้อมูลที่ต้องการ และส่งข้อมูลดังกล่าวกลับมา โดยโปรแกรมหลักจะเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ให้โปรแกรมย่อยของขั้นตอนถัดไป โดยที่โปรแกรมย่อยในการคำนวณมีหลายระดับขึ้นอยู่กับลำดับขั้นในการถูกเรียกใช้จากโปรแกรมหลัก เช่น โปรแกรมหลักจะเรียกใช้โปรแกรมย่อยระดับที่หนึ่ง และโปรแกรมย่อยระดับที่หนึ่งจะเรียกใช้โปรแกรมย่อยระดับที่สอง เป็นต้น ซึ่ง M-file function ต่างๆ ของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.4



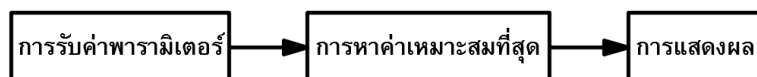
รูปที่ 3.4 ไฟล์ของ M-file function สำหรับการคำนวณของโปรแกรม

จากรูปที่ 3.4 แสดง M-file function ต่างๆ ของโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด โดยชื่อของแต่ละไฟล์ถูกตั้งขึ้นมาให้สอดคล้องกับหน้าที่หรือกระบวนการทำงาน ถ้าจำแนกชนิดของไฟล์ตามหน้าที่ในการทำงานสามารถแบ่งโปรแกรมออกเป็น 2 แบบ คือ โปรแกรมสำหรับการคำนวณ และ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ ซึ่งแต่ละไฟล์มีหน้าที่ในการทำงานดังนี้

- 1) ไฟล์ `tabu_search` คือ โปรแกรมหลัก (Main program) ของกระบวนการคำนวณ ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลเพื่อหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด ซึ่งมาจากการเรียกใช้โปรแกรมย่อยต่างๆ ให้คำนวณหาข้อมูลที่ต้องการ โดยโปรแกรมหลักจะส่งค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการคำนวณของโปรแกรมย่อยต่างๆ เช่น จุดเริ่มต้น จุดเป้าหมาย และจำนวนรอบในการคำนวณ เป็นต้น
 - 2) ไฟล์ `distance` คือ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ ทำหน้าที่เก็บค่าระยะทางของแต่ละเส้นทางในแผนที่ โดยค่าระยะทางเหล่านี้ถูกระบุโดยผู้ใช้งาน
 - 3) ไฟล์ `condition` คือ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ ทำหน้าที่เก็บค่าความเร็วของรถยนต์ที่สามารถใช้ได้ของแต่ละเส้นทางในแผนที่ โดยค่าความเร็วของรถยนต์เหล่านี้ถูกระบุโดยผู้ใช้งาน
 - 4) ไฟล์ `epoint` คือ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ ทำหน้าที่เก็บตำแหน่งของทางแยกต่างๆในแผนที่ โดยตำแหน่งของทางแยกเหล่านี้ถูกระบุโดยผู้ใช้งาน
 - 5) ไฟล์ `intersection` คือ โปรแกรมสำหรับเก็บค่าพารามิเตอร์ ทำหน้าที่เก็บตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรต่างๆในแผนที่ โดยตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรเหล่านี้ถูกระบุโดยผู้ใช้งาน
 - 6) ไฟล์ `main` คือ โปรแกรมย่อยระดับที่หนึ่ง (1st sub program) ของกระบวนการคำนวณ ทำหน้าที่ควบคุมการหาเส้นทางที่สามารถเกิดขึ้นได้ หรือเรียกว่าเส้นทางที่เป็นไปได้ และควบคุมการหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางที่เป็นไปได้ โดยรับค่าจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมายมาจากโปรแกรมหลักและส่งข้อมูลของเส้นทางดังกล่าวกลับไป ซึ่งไฟล์ `main` รับค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรมอื่นด้วย เช่น ระยะทาง เวลาในการเดินทาง ตำแหน่งของทางแยก และตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจร
 - 7) ไฟล์ `solution` คือ โปรแกรมย่อยระดับที่สอง (2nd sub program) ของกระบวนการคำนวณ ทำหน้าที่ค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้ โดยรับค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นมาจากไฟล์ `main` คือ จุดเริ่มต้น จุดเป้าหมาย และตำแหน่งของทางแยก และเปลี่ยนเส้นทางที่เป็นไปได้ให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบส่งกลับไปยังไฟล์ `main`
 - 8) ไฟล์ `cal_dis_t` คือ โปรแกรมย่อยระดับที่สอง (2nd sub program) ของกระบวนการคำนวณ ทำหน้าที่คำนวณค่าฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางที่เป็นไปได้ โดยรับค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นมาจากไฟล์ `main` คือ ระยะทาง เวลาในการเดินทาง และตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจร และส่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายจากการคำนวณกลับไปยังไฟล์ `main`
- และยังมีไฟล์โปรแกรมของ M-file function อื่นๆที่ไม่ได้กล่าวถึง โดยแต่ละไฟล์จะมีหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกันไป ซึ่งโปรแกรมจะไม่สามารถทำงานถ้ามีไฟล์หายไป ดังนั้นทุกไฟล์จึงมีความสำคัญในการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด

3.3 กระบวนการทำงานของโปรแกรม

เมื่อพิจารณาถึงแนวคิดการทำงานในภาพรวมของโปรแกรมห่วงที่กล่าวในข้างต้น พบว่าโปรแกรมได้แบ่งกระบวนการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบอธิบายดังนี้



รูปที่ 3.5 กระบวนการทำงานของโปรแกรม

3.3.1 การรับค่าพารามิเตอร์

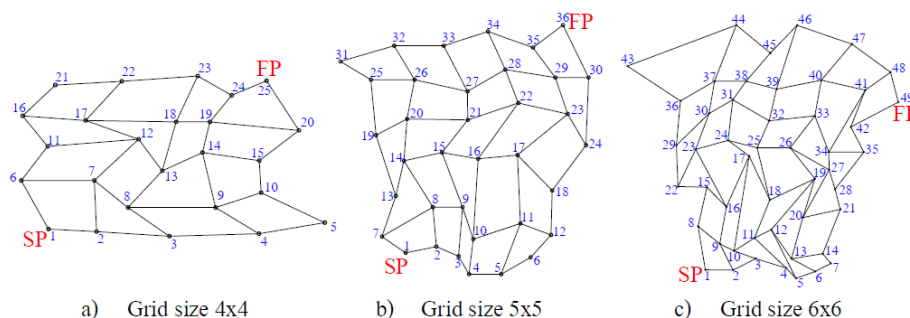
การรับค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม คือ การรับข้อมูลต่างๆที่จำเป็นต่อการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจร โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกระบุค่าโดยผู้ใช้งาน ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่โปรแกรมรับมามีหลายข้อมูล ดังนี้

3.3.1.1 จำนวนประชากร

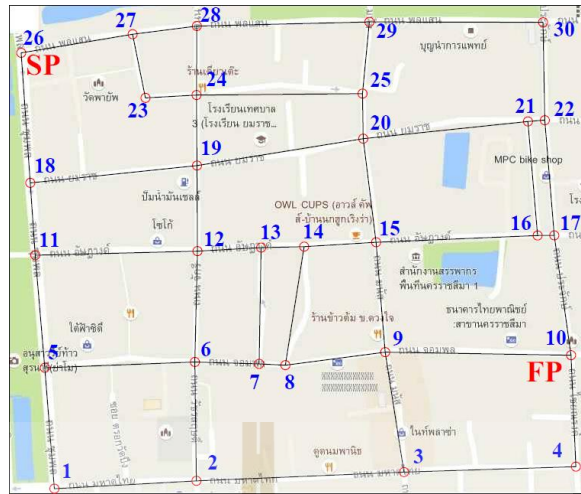
จำนวนประชากรทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณ โดยปกติแล้วจำนวนประชากรสำหรับการคำนวณของโปรแกรมสามารถแบ่งออก 2 ประเภท ได้แก่ Number of loop (nloop) คือ จำนวนของรอบในการคำนวณ หรือจำนวนรุ่นของประชากร และ Number of solution (nsol) คือ จำนวนของประชากรในหนึ่งรอบการคำนวณ หรือจำนวนประชากรในหนึ่งรุ่น

3.3.1.2 ตำแหน่งบนแผนที่

ตำแหน่งบนแผนที่ได้ถูกกำหนดตามทางแยกต่างๆที่แสดงอยู่ในแผนที่ โดยกำหนดตัวเลขแทนตำแหน่งของทางแยก ซึ่งการกำหนดตำแหน่งถูกเรียงลำดับตัวเลขจากซ้ายมือไปขวามือ และจากแถวล่างขึ้นแถวบน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ

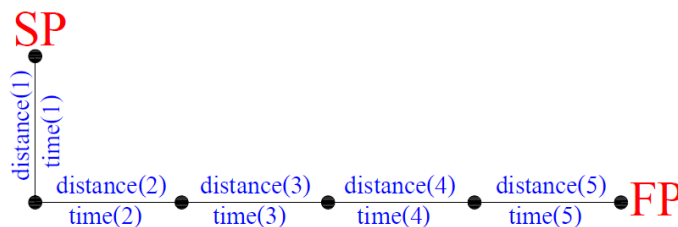


รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 3.6 เป็นการกำหนดตำแหน่งของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ ซึ่งเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 มีจุดทั้งหมด 25 จุด โดยมีจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 1 และจุดเป้าหมายคือ จุดที่ 25 ส่วนเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 มีจุดทั้งหมด 36 จุด โดยมีจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 1 และจุดเป้าหมายคือ จุดที่ 36 และเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 มีจุดทั้งหมด 49 จุด โดยมีจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 1 และจุดสุดท้ายคือ จุดที่ 49 สำหรับรูปที่ 3.7 เป็นการกำหนดตำแหน่งบนเส้นทางจริงของการจราจร ซึ่งมีจุดทั้งหมด 30 จุด โดยมีจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 26 และจุดเป้าหมายคือ จุดที่ 10

3.3.1.3 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นทาง

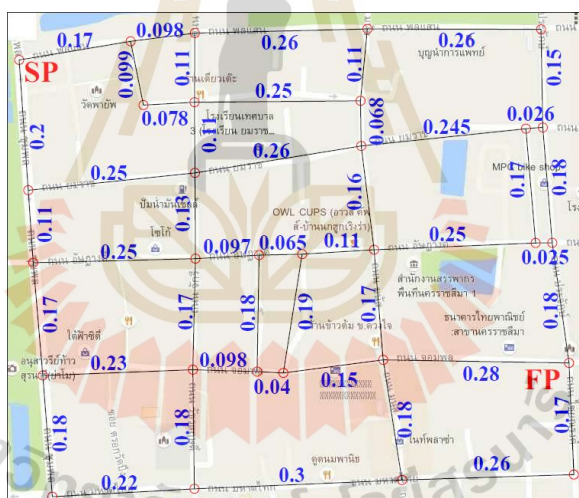
ในแต่ละเส้นทางจะถูกระบุค่าพารามิเตอร์ลงไปเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าฟังก์ชันเป้าหมาย ซึ่งค่าพารามิเตอร์นั้นคือ ค่าระยะทาง และเวลาที่ใช้ในการเดินทางของเส้นทางแต่ละเส้นทาง แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ค่าพารามิเตอร์ของเส้นทาง

จากรูปที่ 3.8 แสดงเส้นทางจากจุดเริ่มไปยังจุดเป้าหมาย โดยมีเส้นทางย่อยจำนวน 5 เส้นทาง ในแต่ละเส้นทางย่อยจะมีค่าพารามิเตอร์ประจำเส้นทาง คือ ระยะทาง และเวลาในการเดินทาง ซึ่งมีจำนวน 5 ชุดข้อมูลเท่ากับจำนวนเส้นทางย่อยทั้งหมด รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของเส้นทางอธิบายดังนี้

1) ระยะทาง คือ ค่าความยาวของเส้นทางที่พิจารณา ดังนั้นในแต่ละเส้นทางอาจมีระยะทางที่เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ซึ่งระยะทางถูกวัดค่าให้อยู่ในหน่วยของ กิโลเมตร สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆถูกสร้างขึ้นมาใช้โปรแกรม Auto CAD 2015 ดังนั้นการวัดระยะทางของเส้นทางแต่ละเส้นทางจึงสามารถใช้เครื่องมือ Linear dimension วัดค่าระยะทางได้ และสำหรับเส้นทางจริงของการจราจรถูกนำมาจากเว็บไซต์ Google Map ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอาศัยเว็บไซต์นี้ช่วยวัดค่าระยะทาง ซึ่งทำได้โดยการระบุจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมายลงใน Google Map จากนั้นเว็บไซต์จะแสดงค่าระยะทางของเส้นทางนั้นออกมาอัตโนมัติ ค่าระยะทางในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ค่าระยะทางในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

2) เวลาในการเดินทาง คือ ระยะเวลาที่ใช้เดินทางผ่านเส้นทางที่พิจารณา มีหน่วยเป็น นาที ซึ่งเวลาในการเดินทางสามารถบอกได้ถึงสภาพจราจรและความเร็วของรถยนต์บนเส้นทางนั้นได้ กล่าวคือ เมื่อเส้นทางนั้นมีสภาพจราจรที่ติดขัด จึงทำให้รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ดังนั้นจึงส่งผลให้ใช้เวลาในการเดินทางมาก ในทางตรงกันข้ามเมื่อเส้นทางนั้นไม่มีการติดขัดของสภาพจราจร จึงทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่าได้ และใช้เวลาในการเดินทางน้อยลง ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการทำความเข้าใจ จึงกำหนดให้การเคลื่อนที่ของ

รถยนต์เป็นการเคลื่อนที่อย่างง่าย หมายถึงรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และไม่พิจารณาผลกระทบที่เกิดจากความเร่งของรถยนต์ ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของรถยนต์ และเวลาในการเดินทางดังสมการที่ (3.1)

$$v = \frac{(60)s}{t} \quad (3.1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของรถยนต์ มีหน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 s คือ ระยะทาง มีหน่วยเป็น กิโลเมตร
 t คือ เวลาในการเดินทาง มีหน่วยเป็น นาที

ในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าเวลาในการเดินทางของเส้นทางแต่ละเส้นทางด้วยค่าความเร็วของรถยนต์ตามทฤษฎีของ ระดับการให้บริการ (Level of service) ซึ่งสามารถจำแนกได้ว่าสภาพจราจรบนเส้นทางที่พิจารณาเป็นแบบใด ดังนั้นจึงต้องใช้การคำนวณจากสมการที่ (3.1) และใช้ค่าระยะทางกับความเร็วของรถยนต์ร่วมในการคำนวณ ทำให้ได้ค่าเวลาในการเดินทางของเส้นทางแต่ละเส้นทางตามที่ต้องการ และนำค่าเวลาดังกล่าวไปใช้ในการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดต่อไป และจาก Transportation Research Board (2000) ได้จำแนกประเภทของเส้นทางในเมือง (Urban street class) ด้วยความเร็วอิสระ (Free-Flow Speed, FFS) ของรถยนต์ที่สามารถใช้ได้บนเส้นทางนั้น แสดงดังตารางที่ 3.1 และยังสามารถกำหนดช่วงความเร็วของรถยนต์ในแต่ละระดับการให้บริการ โดยแบ่งตามประเภทของเส้นทางในเมือง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นทางจริงของการจราจรบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี โดยที่เส้นทางดังกล่าวเป็นเส้นทางในเมืองเหมือนกัน ดังนั้นการกำหนดค่าความเร็วของรถยนต์ในแต่ละเส้นทางจึงสามารถใช้เงื่อนไขในการคำนวณได้

ตารางที่ 3.1 ค่าความเร็วอิสระของรถยนต์ในแต่ละประเภทของเส้นทางในเมือง

Urban Street Class	Default (km/h)
I	80
II	65
III	55
IV	45

ที่มา: Transportation Research Board (2000)

จากตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเร็วอิสระของรถยนต์ในแต่ละประเภทของเส้นทางในเมือง ซึ่งแบ่งเป็น 4 ประเภทดังนี้ เส้นทางในเมืองประเภทที่ 1 มีความเร็วอิสระของรถยนต์ที่สามารถใช้ได้คือ 80 km/h เส้นทางในเมืองประเภทที่ 2 สามารถใช้ความเร็วอิสระของรถยนต์ได้ 65 km/h เส้นทางในเมืองประเภทที่ 3 สามารถใช้ความเร็วอิสระของรถยนต์ได้ 55 km/h และเส้นทางในเมืองประเภทที่ 4 มีความเร็วอิสระของรถยนต์ที่สามารถใช้ได้คือ 45 km/h

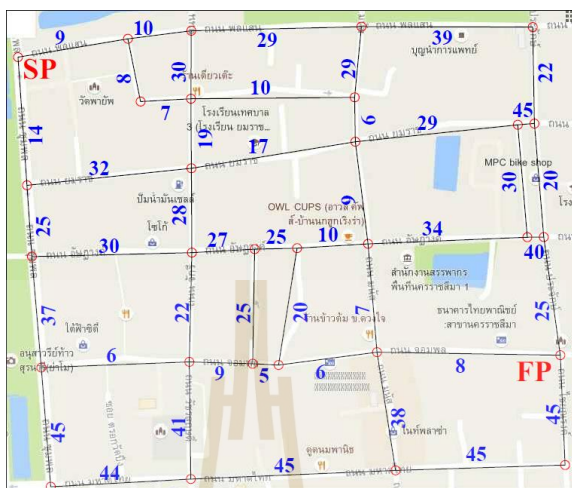
ตารางที่ 3.2 ช่วงความเร็วของรถยนต์ในแต่ละระดับการให้บริการ

Urban Street Class	I	II	III	IV
Range of free-flow speed (FFS)	90 to 70 km/h	70 to 55 km/h	55 to 50 km/h	55 to 40 km/h
Typical FFS	80 km/h	65 km/h	55 km/h	45 km/h
LOS	Average Travel Speed (km/h)			
A	>72	>59	>50	>41
B	>56-72	>46-59	>39-50	>32-41
C	>40-56	>33-46	>28-39	>23-32
D	>32-40	>26-33	>22-28	>18-23
E	>26-32	>21-26	>17-22	>14-18
F	≤26	≤21	≤17	≤14

ที่มา: Transportation Research Board (2000)

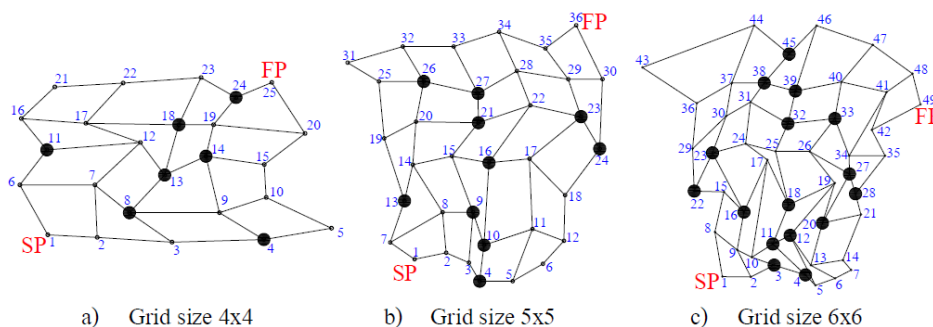
จากตารางที่ 3.2 แสดงช่วงความเร็วของรถยนต์ในแต่ละระดับการให้บริการ และแสดงช่วงความเร็วอิสระของรถยนต์ ซึ่งถูกจำแนกตามประเภทของเส้นทางในเมือง สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เส้นทางในเมืองประเภทที่ 4 (Urban Street Class IV) เนื่องจากเส้นทางบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารีมีจำนวนรถยนต์สัญจรกันมาก เป็นถนนที่มีแค่สองช่องทางเดินรถเท่านั้น และระยะทางของเส้นทางแต่ละช่วงมีระยะทางที่สั้น จึงทำให้การขับขีรถยนต์ถูกจำกัดให้ใช้ความเร็วต่ำ ดังนั้นที่ค่าความเร็วอิสระของรถยนต์ 45 km/h จึงสมเหตุสมผลต่อการพิจารณาเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ระบุค่าความเร็วของรถยนต์สำหรับเส้นทางที่พิจารณาโดยการเลือกระดับการให้บริการของแต่ละเส้นทาง หมายถึงการเลือกสภาพจราจรนั่นเอง จากนั้นทำการสุ่มเลือกค่าความเร็วของรถยนต์ที่อยู่ในช่วงความเร็วของแต่ละระดับการให้บริการที่

ได้เลือกไว้ก่อนหน้านี้ และนำค่าความเร็วของรถยนต์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าเวลาในการเดินทางต่อไป ซึ่งค่าความเร็วของรถยนต์ในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร แสดงดังรูปที่ 3.10

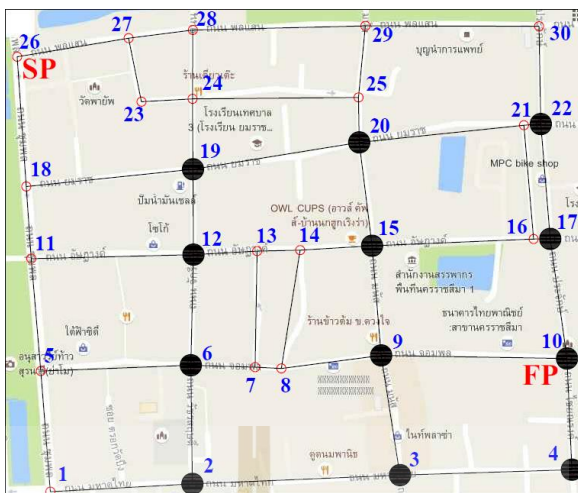


รูปที่ 3.10 ค่าความเร็วของรถยนต์ในแต่ละเส้นทางสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

3) การห้วงเวลาที่สัญญาณไฟจราจร โดยทั่วไปบริเวณทางแยกของเส้นทางที่มีรถยนต์สัญจรจำนวนมากจำเป็นต้องมีสัญญาณไฟจราจร เพื่อจัดระเบียบการใช้ถนนและป้องกันการเกิดอุบัติเหตุ โดยสัญญาณไฟจราจรมีการห้วงเวลาเมื่อสัญญาณไฟจราจรเป็นสีแดงเพื่อให้เส้นทางอื่นเคลื่อนที่ไปก่อน และจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้เมื่อสัญญาณไฟจราจรเป็นสีเขียว ซึ่งระยะเวลาในการห้วงของสัญญาณไฟจราจรแต่ละเส้นทางมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสภาพจราจรบริเวณทางแยกนั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้กำหนดระยะเวลาในการห้วงสัญญาณไฟจราจรให้มีค่าเท่ากับ 1 นาที ต่อ 1 ทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร โดยเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ และเส้นทางจริงของการจราจร สามารถแสดงตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรดังรูปที่ 3.11 และ 3.12



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาดต่างๆ โดยที่เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4×4 มีตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรคือ 4, 8, 11, 13, 14, 18 และ 24 ส่วนเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×5 มีตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรคือ 4, 9, 10, 13, 16, 21, 23, 24, 26 และ 27 และเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×6 มีตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรคือ 3, 4, 11, 12, 16, 18, 20, 22, 23, 27, 28, 32, 33, 38, 39 และ 45 สำหรับรูปที่ 3.12 แสดงตำแหน่งสัญญาณไฟจราจรสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร โดยมีตำแหน่งของสัญญาณไฟจราจรคือ 2, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 17, 19, 20 และ 22

3.3.2 การหาค่าเหมาะสมที่สุด

สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดของโปรแกรมได้ประยุกต์ใช้วิธีการค้นหาแบบตามูที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการทำงานดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยเริ่มต้นจากการรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดของโปรแกรม โดยถูกแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การหาเส้นทางที่เป็นไปได้จากจุดเริ่มไปยังจุดเป้าหมาย เพื่อหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางเหล่านี้ และส่งค่าที่ได้รับเข้าสู่กระบวนการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตามูที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำต่อไป ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดของวิธีการหาเส้นทางดังกล่าวดังนี้

3.3.2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย

ฟังก์ชันเป้าหมายคือ ค่าของตัวแปรตามที่บ่งบอกถึงความดีหรือคุณภาพของตัวแปรออกแบบในระบบใดๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization

problem) โดยมีฟังก์ชันเป้าหมายเป็นแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย (Bi objective function) คือ หาค่าระยะทางในการเดินทางสั้นที่สุด (Minimum path distance) และหาค่าเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด (Minimum traveling time) สามารถเขียนฟังก์ชันเป้าหมายของปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ดังสมการที่ (3.2)

$$\min_x f(x) = \min_x (f_1(\text{distance}), f_2(\text{time})) \quad (3.2)$$

เมื่อ x คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ มีขนาด $n \times 1$
 $f_1(\text{distance})$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของระยะทาง
 $f_2(\text{time})$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมายของเวลาในการเดินทาง

จากสมการที่ (3.2) แสดงฟังก์ชันเป้าหมายที่ถูกเขียนในรูปของปัญหาทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในรูปแบบของปัญหา ซึ่งค่าฟังก์ชันเป้าหมายจะถูกควบคุมด้วยเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ x เพื่อระบุตำแหน่งของเส้นทางในการคำนวณค่าฟังก์ชันดังกล่าว โดยฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองสามารถเขียนดังนี้

$$f_1(\text{distance}) = s_{x_1} + s_{x_2} + \dots + s_{x_n} \quad (3.3)$$

$$f_2(\text{time}) = t_{x_1}(s_{x_1}) + t_{x_2}(s_{x_2}) + \dots + t_{x_n}(s_{x_n}) \quad (3.4)$$

เมื่อ s คือ ค่าพารามิเตอร์ของระยะทาง
 t คือ ค่าพารามิเตอร์ของเวลาในการเดินทาง

จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะเห็นว่าค่าฟังก์ชันเป้าหมายคือ การรวมค่าฟังก์ชันเป้าหมายของแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย และนำค่าฟังก์ชันที่ได้ไปพิจารณาเพื่อหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดต่อไป

3.3.2.2 ตัวแปรออกแบบ

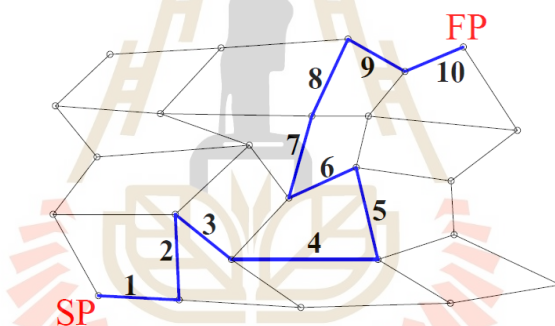
ตัวแปรออกแบบ คือ กลุ่มของตัวแปรตั้งต้นหรือตัวแปรอิสระ อาจเรียกว่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ เนื่องจากการเรียงตัวของกลุ่มตัวแปรออกแบบถูกเรียงในรูปแบบของเวกเตอร์ แสดงดังสมการที่ (3.5)

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T \quad (3.5)$$

สำหรับงานวิจัยนี้การหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดมีแนวคิดมาจากการเดินทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.6)

$$Path_{navigation} = Path_1 + Path_2 + \dots + Path_n \quad (3.6)$$

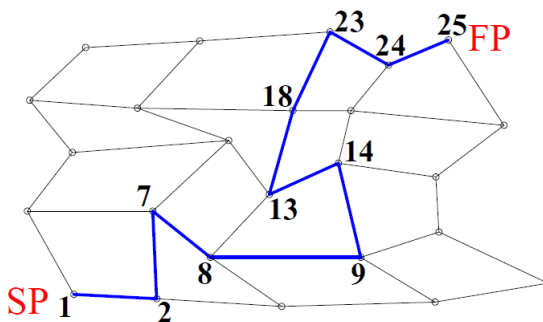
จากสมการ (3.6) แสดงให้เห็นถึงการรวมเส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (3.5) จะได้ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ x คือ $Path_{navigation}$ และค่าของตัวแปรออกแบบใดๆ x_i คือ $Path_i$ ดังนั้นเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบสำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้คือ เส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย โดยทำการเรียงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ขนาด $n \times 1$ แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย

จากรูปที่ 3.13 แสดงการเก็บค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบจากตำแหน่งของเส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 10 มีค่าเท่ากับ $x = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}^T$

สำหรับกระบวนการคำนวณของโปรแกรมไม่ได้ระบุตำแหน่งบนเส้นทางเหมือนดังรูปที่ 3.13 แต่ว่าโปรแกรมมีการระบุตำแหน่งของทางแยกขึ้นมาแทน ดังนั้นการเก็บค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบจึงถูกปรับเปลี่ยนจากเดิมเก็บตำแหน่งของเส้นทางย่อยแต่ละเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย เปลี่ยนมาเป็นการเก็บตำแหน่งของทางแยกทุกจุดที่เดินทางผ่านของเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตำแหน่งของทางแยกที่เดินทางผ่านของเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย

จากรูปที่ 3.14 แสดงการเก็บค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบจากตำแหน่งของทางแยกที่เดินทางผ่านของเส้นทางจากจุดที่ 1 ไปยังจุดที่ 25 มีค่าเท่ากับ $x = \{1, 2, 7, 8, 9, 14, 13, 18, 23, 24, 25\}^T$

3.3.2.3 เงื่อนไขบังคับ

เงื่อนไขบังคับ คือ เงื่อนไขที่ใช้บ่งชี้ว่าผลเฉลยของตัวแปรออกแบบที่ได้มาจากกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดสามารถนำไปใช้งานได้หรือมีความเป็นไปได้หรือไม่ รูปแบบของเงื่อนไขบังคับสามารถกำหนดได้หลายรูปแบบ เช่น เงื่อนไขบังคับแบบกล่อง หรือเงื่อนไขบังคับชนิดจำกัดของระบบ เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีรูปแบบของเงื่อนไขบังคับอื่นๆอีกมากที่นิยมใช้สำหรับการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขบังคับคือ การขั้บขั้รถยนต์ห้ามย้อนกลับเส้นทางเดิม หรือห้ามใช้เส้นทางซ้ำถ้าเส้นทางนั้นเคยถูกใช้แล้ว โดยพิจารณาต่อการหาเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายหนึ่งเส้นทาง ซึ่งในกระบวนการคำนวณของโปรแกรมหมายถึง ห้ามมีตำแหน่งของทางแยกซ้ำกันในเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ เหตุผลในการกำหนดเงื่อนไขบังคับนี้คือ ต้องการให้เวลาในการคำนวณของโปรแกรมลดลง และการคำนวณให้ผลเฉลยที่ดีกว่าทั้งในด้านของระยะทางและเวลาในการเดินทาง ซึ่งส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้ลู่เข้าสู่ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดได้เร็วยิ่งขึ้น และสำหรับเส้นทางจริงของการจราจรได้กำหนดเงื่อนไขบังคับเพิ่มอีกหนึ่งข้อคือ เส้นทางเดียวรถทางเดียว แสดงดังรูปที่ 3.15



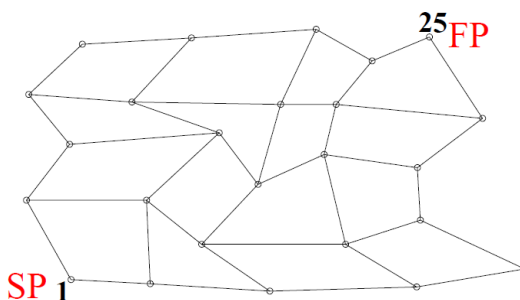
รูปที่ 3.15 เส้นทางเดินรถทางเดียวสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 3.15 แสดงเส้นทางที่มีเงื่อนไขบังคับกับการเดินรถทางเดียวสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร ได้แก่เส้นทางจากทางแยกตำแหน่งที่ 26-18, 18-11, 11-5 และ 5-1 ทั้งนี้การกำหนดเงื่อนไขบังคับข้อนี้ขึ้นมาเพื่อให้สอดคล้องกับการขับขีรถยนต์บนเส้นทางจริงของการจราจรที่ตำแหน่งนั้น

3.3.2.4 การหาเส้นทางที่เป็นไปได้จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย

การหาเส้นทางจากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดเป้าหมาย สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมช่วยในการค้นหาเส้นทางเหล่านี้ และนำเส้นทางดังกล่าวไปเป็นประชากรปัจจุบันและประชากรในรุ่นถัดๆ ไปของวิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำเพื่อหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดเมื่อสิ้นสุดกระบวนการคำนวณ การหาเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายโดยยกตัวอย่างเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

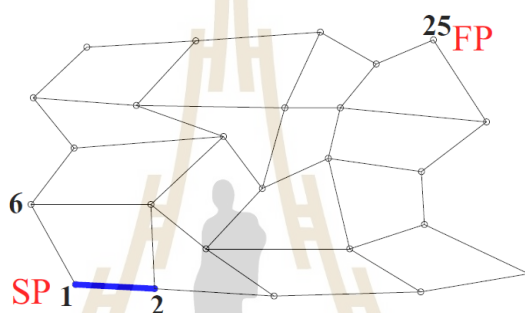
ขั้นตอนที่ 1) เริ่มต้นจากการรับค่าของตำแหน่งจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมาย และกำหนดเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบเป็นเซตว่าง $x = \{ \}$ สามารถแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งจุดเริ่มต้น และจุดเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

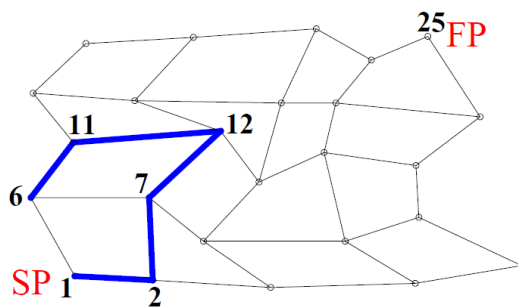
จากรูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 1 และจุดเป้าหมายคือ จุดที่ 25 และปรับปรุงค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ มีค่าเท่ากับ $x=\{1,\dots,25\}^T$

ขั้นตอนที่ 2) ค้นหาตำแหน่งทางแยกข้างเคียงกับตำแหน่งปัจจุบัน แล้วสุ่มเลือกตำแหน่งทางแยกข้างเคียงจำนวน 1 ตำแหน่ง และตรวจสอบเงื่อนไขบังคับ ถ้าผ่านให้ปรับปรุงค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ แต่ถ้าไม่ผ่านให้สุ่มเลือกตำแหน่งทางแยกข้างเคียงขึ้นมาใหม่และตรวจสอบเงื่อนไขบังคับอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 แต่ถ้าโปรแกรมไม่สามารถสุ่มเลือกตำแหน่งทางแยกให้ผ่านเงื่อนไขบังคับได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โปรแกรมจะเริ่มต้นการค้นหาเส้นทางใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1)



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งทางแยกข้างเคียงกับผลเฉลยปัจจุบันของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

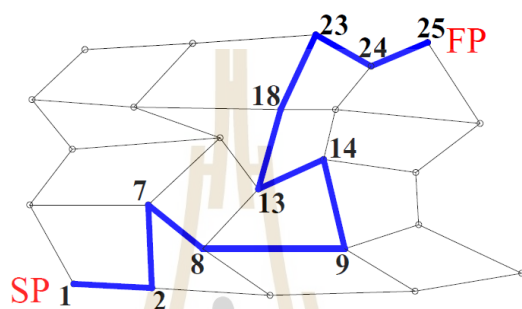
จากรูปที่ 3.17 แสดงตำแหน่งทางแยกข้างเคียงคือ จุดที่ 2 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งข้างเคียงกับตำแหน่งปัจจุบัน หรือ จุดที่ 1 โดยโปรแกรมจะสุ่มเลือกตำแหน่งทางแยกข้างเคียงมาหนึ่งตำแหน่งคือ จุดที่ 2 จากนั้นกำหนดให้ตำแหน่งทางแยกจุดที่ 2 เป็นตำแหน่งปัจจุบัน และปรับปรุงค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ มีค่าเท่ากับ $x=\{1,2,\dots,25\}^T$



รูปที่ 3.18 ปัญหาการไม่ผ่านเงื่อนไขบังคับของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

จากรูปที่ 3.18 แสดงตำแหน่งปัจจุบันคือ จุดที่ 6 มีตำแหน่งทางแยกข้างเคียงคือ จุดที่ 1, 7 และ 11 ซึ่งทั้งสามจุดเมื่อตรวจสอบเงื่อนไขบังคับแล้วปรากฏว่าทุกจุดไม่ผ่านเงื่อนไขบังคับ เนื่องจากทั้งสามจุดโปรแกรมเคยคำนวณผ่านมาแล้ว หรือหมายถึงทั้งสามจุดมีอยู่ในเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบแล้ว มีค่าเท่ากับ $x = \{1, 2, 7, 12, 11, 6, \dots, 25\}^T$

ขั้นตอนที่ 3) ทำขั้นตอนที่ 2) ซ้ำเดิมไปเรื่อยๆ เพื่อค้นหาเส้นทางใหม่จนกระทั่งพบตำแหน่งของจุดเป้าหมาย แสดงดังรูปที่ 3.19

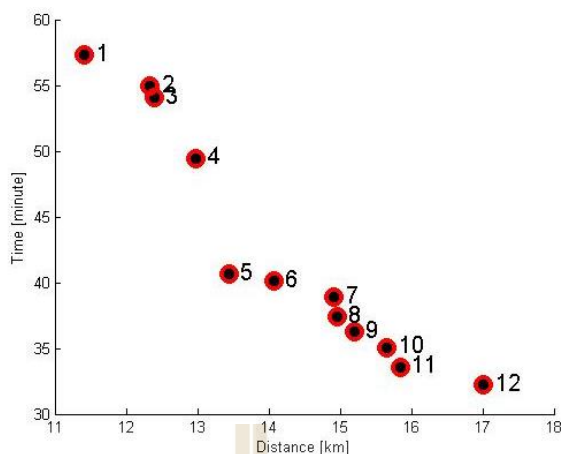


รูปที่ 3.19 เส้นทางทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

จากรูปที่ 3.19 แสดงเส้นทางย่อยทั้งหมดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย โดยตำแหน่งทางแยกทั้งหมดที่เดินทางผ่านถูกเก็บไว้ในเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ มีค่าเท่ากับ $x = \{1, 2, 7, 8, 9, 14, 13, 18, 23, 24, 25\}^T$ ซึ่งโปรแกรมจะนำค่าเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบนี้ไปคำนวณหาค่าฟังก์ชันเป้าหมายของระยะทางและเวลาในการเดินทาง เพื่อนำไปพิจารณาหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำต่อไป

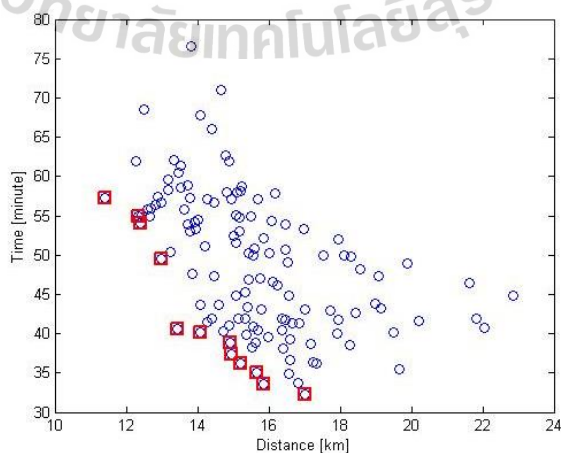
3.3.3 การแสดงผล

การแสดงผลของโปรแกรมถูกแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นโค้ง หรือเรียกว่าขอบหน้าหน้าพาเรโต ซึ่งก็คือเซตของผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา หรือเซตของเส้นทางเหมาะสมที่สุด สามารถแสดงดังรูปที่ 3.20



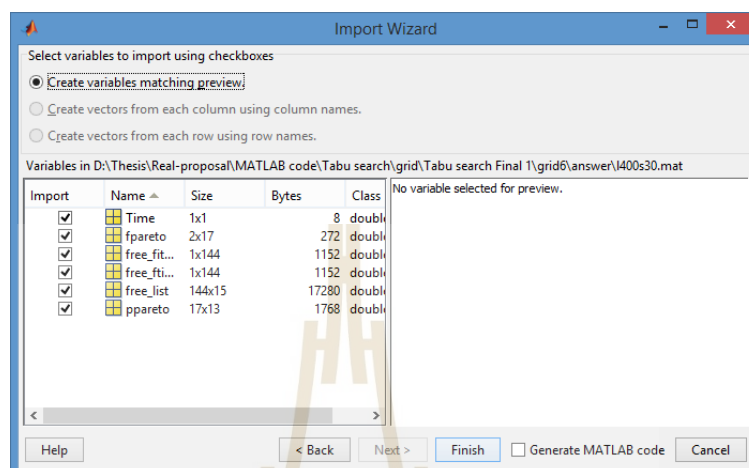
รูปที่ 3.20 ขอบหน้าพารโศของปัญหา

จากรูปที่ 3.20 แสดงขอบหน้าพารโศของปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุด โดยมีแกนแนวนอนเป็นค่าของระยะทางมีหน่วยเป็น เมตร และแกนแนวตั้งเป็นค่าของเวลาในการเดินทางมีหน่วยเป็น นาที ภายในขอบหน้าพารโศประกอบไปด้วยจุดของผลเฉลยต่างๆ ซึ่งจำนวนจุดภายในขอบหน้าพารโศก็คือจำนวนของผลเฉลยที่อยู่ในเซตของผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหา ซึ่งขอบหน้าพารโศสามารถหาได้จากบริเวณที่หาค่าตอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยจุดที่อยู่ในขอบหน้าพารโศหนึ่งจุดคือ เส้นทางเหมาะสมที่สุดจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายหนึ่งเส้นทาง โดยมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายของระยะทางและเวลาในการเดินทางมีค่าจำเพาะไม่เหมือนกับจุดอื่นๆ ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายและค่าอื่นๆ ในการคำนวณจะถูกบันทึกเป็น Mat file ของโปรแกรม MATLAB ดังแสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 ขอบหน้าพารโศ และบริเวณที่หาค่าตอบได้

จากรูปที่ 3.21 แสดงบริเวณที่หาคำตอบได้ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของผลเฉลยที่เป็นไปได้ (จุดสีน้ำเงิน) ซึ่งขอบหน้าสุดของบริเวณดังกล่าว หรือแนวจุดของผลเฉลยที่ใกล้แกน x-y ของกราฟมากที่สุด (จุดสีแดง) คือ ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของปัญหา หรือขอบหน้าพาเรโต



รูปที่ 3.22 ค่าต่างๆที่ถูกบันทึกใน Mat file ของโปรแกรม MATLAB

จากรูปที่ 3.22 แสดงข้อมูลจากการคำนวณของโปรแกรมที่ถูกบันทึกลงใน Mat file ซึ่งมีข้อมูลดังนี้

- 1) time คือ เวลาที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของโปรแกรม
- 2) fpareto คือ ค่าฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับแต่ละเส้นทางเหมาะสมที่สุด
- 3) ppareto คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบสำหรับแต่ละเส้นทางเหมาะสมที่สุด
- 4) free_fitness คือ ค่าฟังก์ชันของระยะทางสำหรับเส้นทางที่เป็นไปได้
- 5) free_time คือ ค่าฟังก์ชันของเวลาในการเดินทางสำหรับเส้นทางที่เป็นไปได้
- 6) free_list คือ เวกเตอร์ตัวแปรออกแบบสำหรับเส้นทางที่เป็นไปได้

3.3.3.1 การคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงต่อกำลังของเครื่องยนต์ ซึ่งการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของรถยนต์แต่ละคันมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการคำนวณของโปรแกรม ในงานวิจัยนี้จึงได้ยกตัวอย่างรถยนต์ที่พิจารณามาหนึ่งรุ่นเท่านั้นคือ ISUZU D-MAX 2016 รุ่น Hi-Lander 4 ประตู 3.0 Ddi(Z-Prestige) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลของรถยนต์รุ่นนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.24

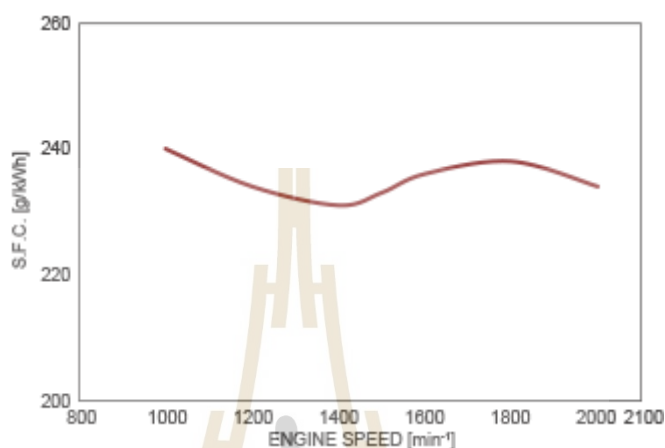


รูปที่ 3.23 รถยนต์ ISUZU D-MAX 2016 รุ่น Hi-Lander 4 ประตู 3.0 Ddi(Z-Prestige)
(<http://isuzu-tis.com/>)

รายละเอียด	รายละเอียดทางเทคนิค									
	Cab 4				Hi-Lander 4 ประตู					
	1.9 Ddi S	1.9 Ddi Z	1.9 Ddi L	1.9 Ddi Z	1.9 Ddi Z DVD	1.9 Ddi Z-Prestige	3.0 Ddi Z-Prestige			
M/T	M/T	M/T	M/T	A/T	M/T	M/T	A/T	M/T	A/T	
รุ่น	R24E-TC				R24E-TC				4J11-TCX	
แบบ	4 สูบ แถวเรียง 16 วาล์ว ดีเซลไดโอดเทอร์โบคอมเพรสเซอร์(DOHC) ระบบควบคุมแรงบิดแบบใหม่ คอมมอนเรลไดเร็กต์อินเจกชั่น พร้อม VGS เซอร์โวเบรคและระบบช่วยผู้ขับขี่ (รถข. 2550-2554)				4 สูบ แถวเรียง 16 วาล์ว ดีเซลไดโอดเทอร์โบคอมเพรสเซอร์(DOHC) ระบบควบคุมแรงบิดแบบใหม่ คอมมอนเรลไดเร็กต์อินเจกชั่น พร้อม VGS เซอร์โวเบรคและระบบช่วยผู้ขับขี่ (รถข. 2550-2554)					
ความจุถังเชื้อเพลิง (ลิตร)	1,898				1,898				2,099	
ความกว้างกระบอกสูบ x ช่วงชัก (มม.)	80 x 94.4				80 x 94.4				95.4 x 104.9	
อัตราส่วนเกียร์ลด (ต่อ 1)	16.5				16.5				16.5	
กำลังสูงสุด (ลิตร/แรงม้า)/รอบต่อนาที	110 (150)/3,600				110 (150)/3,600				130 (177)/3,600	
แรงบิดสูงสุด (ลิตร-เมตร/รอบต่อนาที)	350/1,800-2,600				350/1,800-2,600				380/1,800-2,800	
ระบบ IS (Idle Stop/Start System)	-				-				-	
ระบบขับเคลื่อน	แบบเพิกเฉลแบบเต็ม				แบบเพิกเฉลแบบเต็ม		ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ		ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อ	
ระบบเบรก	เบรกมือแบบดึง				เบรกมือแบบดึง		เบรกมือแบบดึง		เบรกมือแบบดึง	
เกียร์	6 จังหวะ				6 จังหวะ		6 จังหวะ		5 จังหวะ	
เกียร์อัตโนมัติ	-				-		6 จังหวะ พร้อม Retronic		6 จังหวะ พร้อม Retronic	
อัตราทดเกียร์	เกียร์ 1: 4.942				เกียร์ 1: 4.942		เกียร์ 1: 3.600		เกียร์ 1: 4.332	
	เกียร์ 2: 2.430				เกียร์ 2: 2.430		เกียร์ 2: 2.090		เกียร์ 2: 2.090	
	เกียร์ 3: 1.428				เกียร์ 3: 1.428		เกียร์ 3: 1.488		เกียร์ 3: 1.488	
	เกียร์ 4: 1.000				เกียร์ 4: 1.000		เกียร์ 4: 1.000		เกียร์ 4: 1.000	
	เกียร์ 5: 0.749				เกียร์ 5: 0.749		เกียร์ 5: 0.687		เกียร์ 5: 0.791	
	เกียร์ 6: 0.634				เกียร์ 6: 0.634		เกียร์ 6: 0.580		เกียร์ 6: 0.580	
อัตราทดเกียร์สูงสุด	4.597				4.597		3.732		3.732	
อัตราทดเกียร์ต่ำสุด	3.583				3.909		4.100		3.583	
ระบบพวงมาลัย	แบบพวงมาลัยตีบังคับ พร้อมเพาเวอร์ช่วยผ่อนแรง				แบบพวงมาลัยตีบังคับ พร้อมเพาเวอร์ช่วยผ่อนแรง					
อัตราทด (ต่อ 1)	37.4				41.1					
รัศมีวงเลี้ยวแคบสุด (เมตร)	6.0				6.3					
ระบบกระจก	ติดตั้งกระจกบานเล็กพร้อมความร้อน				ติดตั้งกระจกบานเล็กพร้อมความร้อน					
หลัง	ติดตั้งกระจกบานเล็กหลัง/กระจกบังลม				ติดตั้งกระจกบานเล็กหลัง/กระจกบังลม					
ระบบกันสะเทือน	แบบอิสระปีกนก 2 ชั้น พร้อมสปริงและหมอนรองล้อแบบไฮดรอลิก				แบบอิสระปีกนก 2 ชั้น พร้อมสปริงและหมอนรองล้อแบบไฮดรอลิก					
หลัง	แบบหมอนรองล้อพร้อมสปริงไฮดรอลิก				แบบหมอนรองล้อพร้อมสปริงไฮดรอลิก (แบบหมอนรองล้อ)					
ล้อและยาง	-				-					
ล้อ	ล้อเหล็ก 6.5J x 15		ล้ออะลูมิเนียม 6.5J x 16		ล้ออะลูมิเนียม 7.0J x 16		ล้ออะลูมิเนียม 7.0J x 18			
ขนาดยาง	215/70R15C		215/70R16C		245/70R16		255/60R18			
ยางอะไหล่	ล้อเหล็ก 6.5J x 15		ล้อเหล็ก 6.5J x 16		ล้อเหล็ก 7.0J x 16		ล้ออะลูมิเนียม 7.0J x 18			
มิติและน้ำหนัก	-		-		-		-			
มิติตัวรถ ยาว x กว้าง x สูง (ไม่รวมกระจกหลัง, มม.)	5,200 x 1,775 x 1,690		5,200 x 1,775 x 1,700		5,200 x 1,800 x 1,795		5,200 x 1,890 x 1,795			
มิติกระโปรง ยาว x กว้าง x สูง (มม.)	1,485 x 1,530 x 465		1,485 x 1,530 x 465		1,485 x 1,530 x 465		1,485 x 1,530 x 465			
ฐานล้อ (มม.)	3,095		3,095		3,095		3,095			
ความกว้างช่วงล้อหน้า/หลัง (มม.)	1,510/1,510		1,510/1,510		1,510/1,510		1,570/1,570			
ความสูงค้ำโครง (มม.)	190		200		225		235			
น้ำหนักนั้โดยประมาณ (กก.)	1,715		1,755		1,770		1,800		1,820	
ความจุถังน้ำมัน (ลิตร)	76		76		76		76			

รูปที่ 3.24 รายละเอียดข้อมูลของรถยนต์รุ่นที่พิจารณา
(<http://isuzu-tis.com/>)

ในงานวิจัยนี้การคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสามารถคำนวณได้จากการเปรียบเทียบกับกราฟการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของรถยนต์รุ่นที่พิจารณา จากรูปที่ 3.24 รถยนต์รุ่นนี้ใช้เครื่องยนต์รุ่น 4JJ1T ซึ่งกราฟการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์รุ่นนี้แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กราฟการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์รุ่น 4JJ1T

(<http://www.isuzu.co.jp/world/product/industrial/engines/jp/>)

จากรูปที่ 3.25 แสดงกราฟการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเครื่องยนต์รุ่น 4JJ1T โดยมีแกนแนวตั้งแสดงค่าของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีหน่วยเป็น g/kWh และแกนแนวนอนแสดงค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีหน่วยเป็น min⁻¹ หรือ รอบต่อนาที, RPM เมื่อนำมาประยุกต์เข้ากับการคำนวณของงานวิจัยนี้แล้ว พบว่าในงานวิจัยไม่ได้มีการกำหนดความเร็วรอบของเครื่องยนต์ แต่มีการกำหนดความเร็วของรถยนต์ที่สามารถใช้ได้ในแต่ละเส้นทาง ซึ่งค่าความเร็วนั้นมาจากการกำหนดค่าระดับการให้บริการ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนค่าจากความเร็วของรถยนต์ให้กลายเป็นความเร็วรอบของเครื่องยนต์ เพื่อหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะตามที่ต้องการได้ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.7)

$$N = \frac{(v)(Gi)(Gf)}{(0.12)(\pi)(r)} \quad (3.7)$$

- เมื่อ N คือ ความเร็วรอบของเครื่องยนต์มีหน่วยเป็น รอบต่อนาที
 v คือ ความเร็วของรถยนต์มีหน่วยเป็น กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 Gi คือ อัตราทดเกียร์ที่พิจารณา

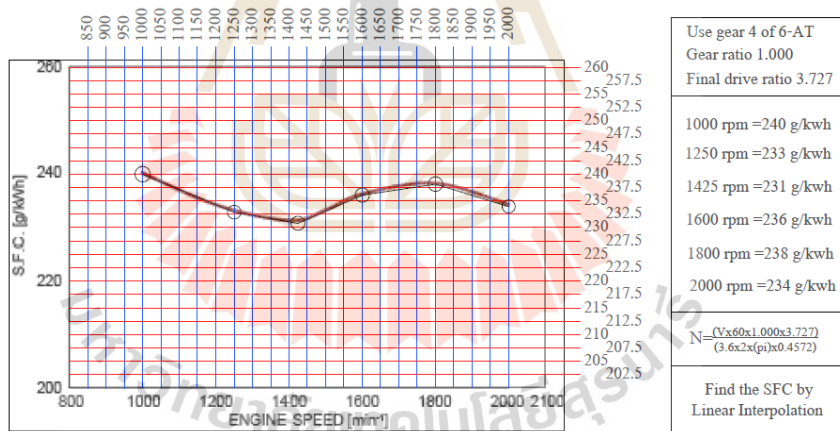
G_f คือ อัตราทดเฟืองท้าย

r คือ รัศมีของล้อรถยนต์มีหน่วยเป็น เมตร

จากการคำนวณได้พิจารณาข้อมูลจากรูปที่ 3.24 จึงได้ค่ารัศมีของล้อรถยนต์มีค่าเท่ากับ 18 นิ้ว หรือ 0.4572 เมตร และค่าอัตราทดเฟืองท้ายมีค่าเท่ากับ 3.727 ส่วนค่าอัตราทดเกียร์ได้พิจารณาเลือกใช้เกียร์ที่ 4 ในการคำนวณ ซึ่งมีค่าเท่า 1.000 ดังนั้นจึงสามารถแสดงความสัมพันธ์ใหม่ดังสมการที่ (3.8)

$$N = \frac{(v)(1.000)(3.727)}{(0.12)(\pi)(0.4572)} \tag{3.8}$$

เมื่อหาความเร็วรอบของเครื่องยนต์ได้แล้ว จากนั้นนำค่าความเร็วรอบของเครื่องยนต์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกราฟของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในรูปที่ 3.25 เพื่อหาการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ความเร็วที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ 3.26



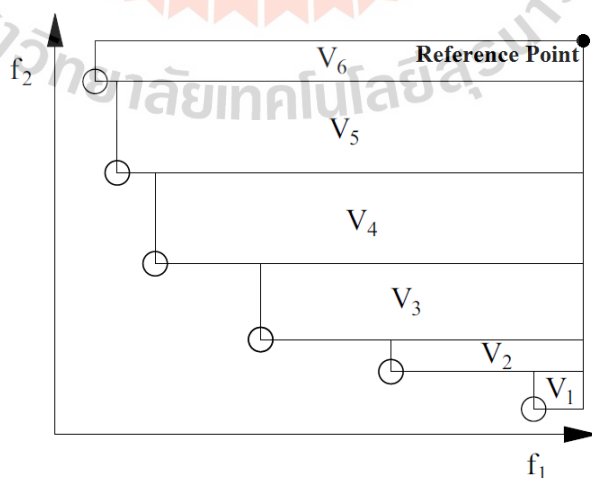
รูปที่ 3.26 วิธีการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ความเร็วที่พิจารณา

จากรูปที่ 3.26 แสดงวิธีการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ความเร็วที่พิจารณา โดยหาได้จากวิธีการประมาณค่าในช่วงแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) ซึ่งได้แบ่งช่วงการประมาณค่าของข้อมูลออกเป็น 5 ช่วงดังรูป ซึ่งในงานวิจัยการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางหาได้จากผลรวมของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะในแต่ละเส้นทางที่เดินทางผ่าน โดยพิจารณาเส้นทางเหล่านี้จากเวกเตอร์ตัวแปรออกแบบ ดังนั้นเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดทุกเส้นทางหรือทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโตมีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่แตกต่างกันไป

3.4 การกำหนดค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ

สำหรับกระบวนการคำนวณค่า nloop และ nsol เป็นตัวกำหนดจำนวนประชากรของวิธีการคำนวณค่าที่เหมาะสมที่สุด หรือเป็นตัวกำหนดจำนวนรอบในการคำนวณของโปรแกรม ดังนั้นค่า nloop และ nsol จึงมีความสำคัญมากสำหรับการแก้ไขปัญหา ซึ่งค่าเหล่านี้ต้องมีการกำหนดให้มีค่ามากพอที่จะให้จำนวนประชากรสำหรับการค้นหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ ในทางทฤษฎีมักจะกำหนดค่า nloop และ nsol ให้มีค่าสูงมากไว้ก่อนเพื่อยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้รับเป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดแน่นอน โดยไม่ได้คำนึงว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมีค่ามากเกินไปจนความจำเป็นหรือไม่ แต่ในทางปฏิบัติการถ้ากำหนดค่า nloop และ nsol ให้มีค่าสูงมากเกินไป ซึ่งส่งผลเสียคือ ทำให้ใช้ระยะเวลาในการคำนวณสูงมาก ยิ่งกำหนดค่าเหล่านี้สูงมากเท่าไรก็ต้องใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อต้องการลดระยะเวลาในการคำนวณลง จึงจำเป็นต้องเลือกค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ และค่าที่เลือกมานั้นต้องให้จำนวนประชากรที่เพียงพอต่อการหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ ซึ่งการหาค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมทำได้โดยการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตของปัญหาด้วยค่า Hyper Volume

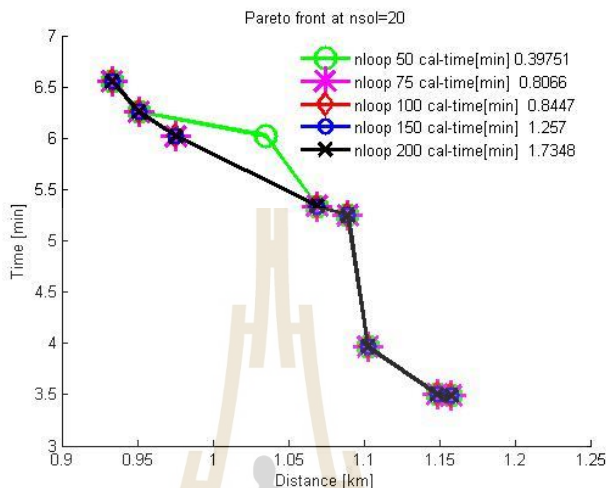
Hyper Volume (HV) คือ เครื่องมือที่ใช้วัดคุณภาพของขอบหน้าพาเรโตของปัญหา โดยการวัดปริมาณพื้นที่ทั้งหมดจากการรวมพื้นที่ย่อยๆที่เกิดจากจุดผลเฉลยทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโต ดังแสดงในรูปที่ 3.27 แสดงการหาค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตสำหรับปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด โดยมีพื้นที่ย่อยทั้งหมด 6 ส่วน ดังนั้นเมื่อค่า HV มีค่ามาก หมายความว่า ขอบหน้าพาเรโตนั้นมีคุณภาพที่ดีกว่า จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานต่อไป ซึ่งวิธีการหาค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมแสดงดังนี้



รูปที่ 3.27 วิธีการหาค่า Hyper Volume

3.4.1 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

พิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตที่ nloop ค่าต่างๆ และกำหนดให้ nsol มีค่าเท่ากับ 20 แสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ nsol = 20 ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

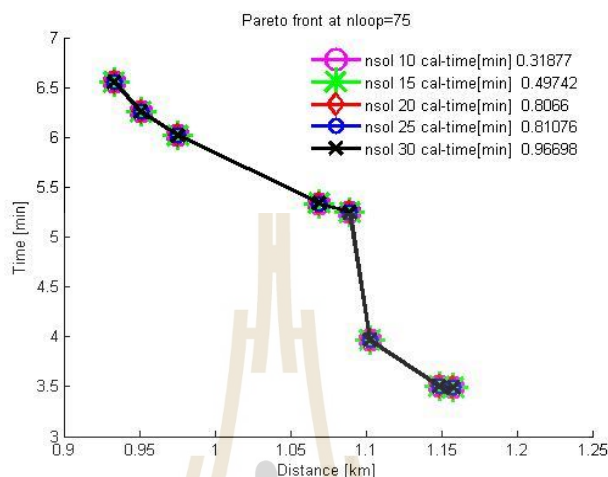
จากรูปที่ 3.28 แสดงขอบหน้าพาเรโตที่ nloop มีค่าเท่ากับ 50, 75, 100, 150 และ 200 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.39751, 0.8066, 0.8447, 1.257 และ 1.7348 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโต แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ nsol = 20 สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

Hyper Volume	nsol = 20				
	nloop = 50	nloop = 75	nloop = 100	nloop = 150	nloop = 200
	0.2312	0.2457	0.2457	0.2457	0.2457

จากตารางที่ 3.3 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ nloop มีค่าเท่ากับ 75, 100, 150 และ 200 มีค่า HV มากที่สุด คือ 0.2457 ดังนั้นจึงเลือก nloop = 75 เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

เมื่อได้เลือก $nloop = 75$ แล้ว จึงพิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटโตที่ $nsol$ ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 เปรียบเทียบขอบหน้าพารेटโตเมื่อ $nloop = 75$ ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4×4

จากรูปที่ 3.29 แสดงขอบหน้าพารेटโตที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.31877, 0.49742, 0.8066, 0.81076 และ 0.96698 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพารेटโต แสดงดังตารางที่ 3.4

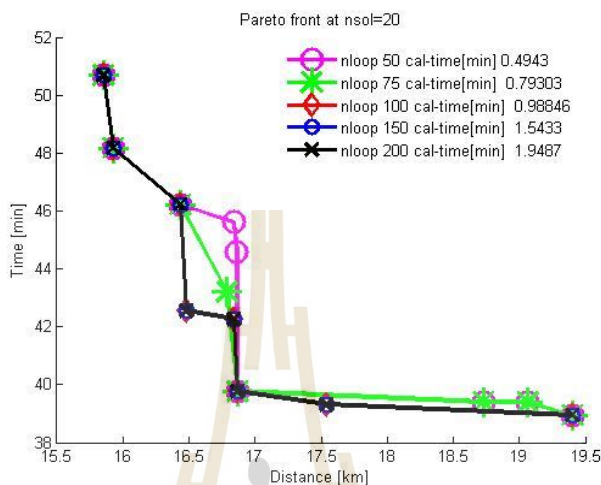
ตารางที่ 3.4 ค่า HV ของขอบหน้าพารेटโตที่ $nloop = 75$ สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4×4

Hyper Volume	$nloop = 75$				
	$nsol = 10$	$nsol = 15$	$nsol = 20$	$nsol = 25$	$nsol = 30$
	0.2457	0.2457	0.2457	0.2457	0.2457

จากตารางที่ 3.4 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 มีค่า HV มากที่สุด คือ 0.2457 ดังนั้นจึงเลือก $nsol = 10$ เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

2.4.2 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

พิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตที่ nloop ค่าต่างๆ และกำหนดให้ nsol มีค่าเท่ากับ 20 แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ nsol = 20 ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

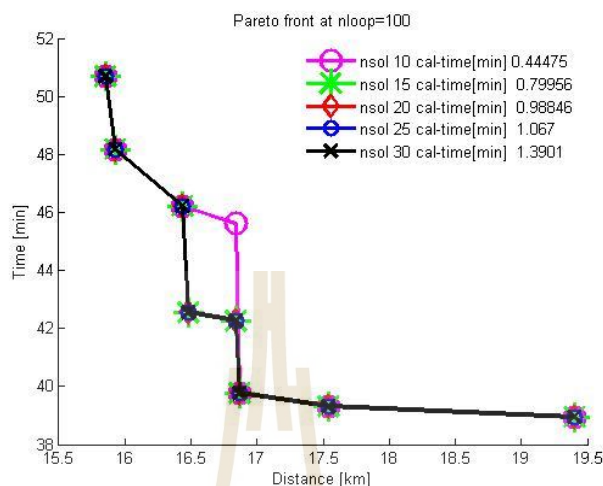
จากรูปที่ 3.30 แสดงขอบหน้าพาเรโตที่ nloop มีค่าเท่ากับ 50, 75, 100, 150 และ 200 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.4943, 0.79303, 0.98846, 1.5433 และ 1.9487 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโต แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ nsol = 20 สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

Hyper Volume	nsol = 20				
	nloop = 50	nloop = 75	nloop = 100	nloop = 150	nloop = 200
	31.1224	31.3422	33.1214	33.1214	33.1214

จกตารางที่ 3.5 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ nloop มีค่าเท่ากับ 100, 150 และ 200 มีค่า HV มากที่สุด คือ 33.1214 ดังนั้นจึงเลือก nloop = 100 เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

เมื่อได้เลือก $nloop = 100$ แล้ว จึงพิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटอที่ $nsol$ ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 เปรียบเทียบขอบหน้าพารेटอเมื่อ $nloop = 100$ ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×5

จากรูปที่ 3.31 แสดงขอบหน้าพารेटอที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.44475, 0.79956, 0.98846, 1.067 และ 1.3901 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพารेटอ แสดงดังตารางที่ 3.6

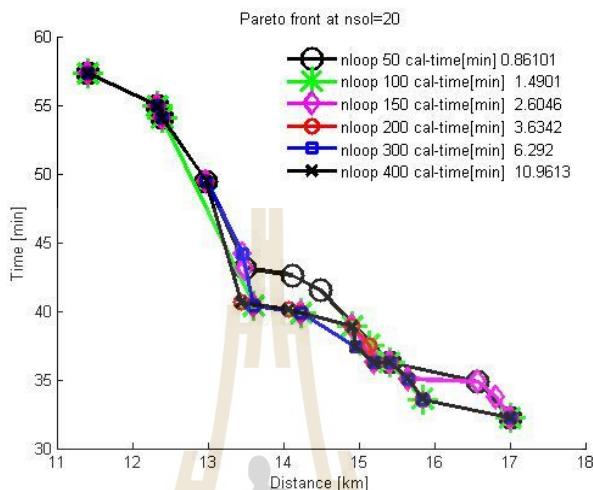
ตารางที่ 3.6 ค่า HV ของขอบหน้าพารेटอที่ $nloop = 100$ สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×5

Hyper Volume	$nloop = 100$				
	$nsol = 10$	$nsol = 15$	$nsol = 20$	$nsol = 25$	$nsol = 30$
	31.7191	33.1214	33.1214	33.1214	33.1214

จากตารางที่ 3.6 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 15, 20, 25 และ 30 มีค่า HV มากที่สุด คือ 33.1214 ดังนั้นจึงเลือก $nsol = 15$ เพราะที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

2.4.3 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

พิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตที่ nloop ค่าต่างๆ และกำหนดให้ nsol มีค่าเท่ากับ 20 แสดงดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ nsol = 20 ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

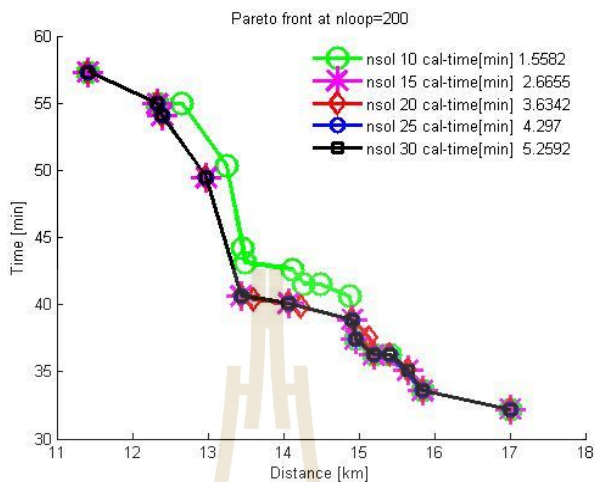
จากรูปที่ 3.32 แสดงขอบหน้าพาเรโตที่ nloop มีค่าเท่ากับ 50, 100, 150, 200, 300 และ 400 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.86101, 1.4901, 2.6046, 3.6342, 6.292 และ 10.9613 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโต แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ nsol = 20 สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

Hyper Volume	nsol = 20					
	nloop = 50	nloop = 100	nloop = 150	nloop = 200	nloop = 300	nloop = 400
	69.1689	72.8172	75.5885	77.7184	77.2177	77.6915

จากตารางที่ 3.7 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ nloop มีค่าเท่ากับ 200 มีค่า HV มากที่สุด คือ 77.7184 ดังนั้นจึงเลือก nloop = 200 เพราะที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

เมื่อได้เลือก nloop = 200 แล้ว จึงพิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพารेटอที่ nsol ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 เปรียบเทียบขอบหน้าพารेटอเมื่อ nloop = 200 ของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

จากรูปที่ 3.33 แสดงขอบหน้าพารेटอที่ nsol มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 1.5582, 2.6655, 3.6342, 4.297 และ 5.2592 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพารेटอ แสดงดังตารางที่ 3.8

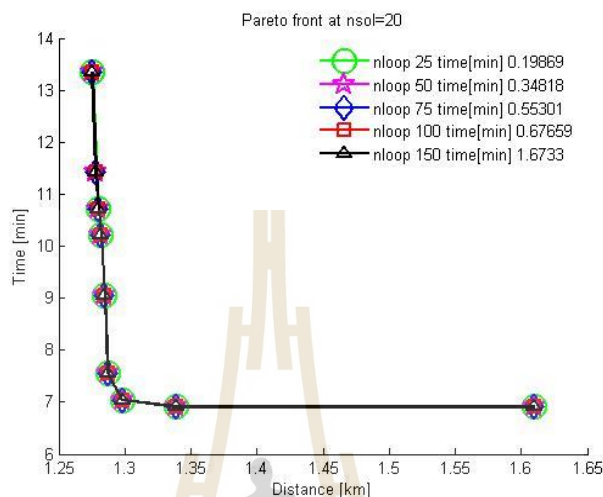
ตารางที่ 3.8 ค่า HV ของขอบหน้าพารेटอที่ nloop = 200 สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

Hyper Volume	nloop = 200				
	nsol = 10	nsol = 15	nsol = 20	nsol = 25	nsol = 30
	72.1046	77.6867	77.7184	77.4762	77.6915

จากตารางที่ 3.8 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ nsol มีค่าเท่ากับ 15, 20 และ 30 มีค่า HV ใกล้เคียงกัน คือ 77.6867, 77.7184 และ 77.6915 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือก nsol = 15 เพราะที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

2.4.4 เส้นทางจริงของการจราจร

พิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตที่ nloop ค่าต่างๆ และกำหนดให้ nsol มีค่าเท่ากับ 20 แสดงดังรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 เปรียบเทียบขอบหน้าพาเรโตเมื่อ nsol = 20 สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

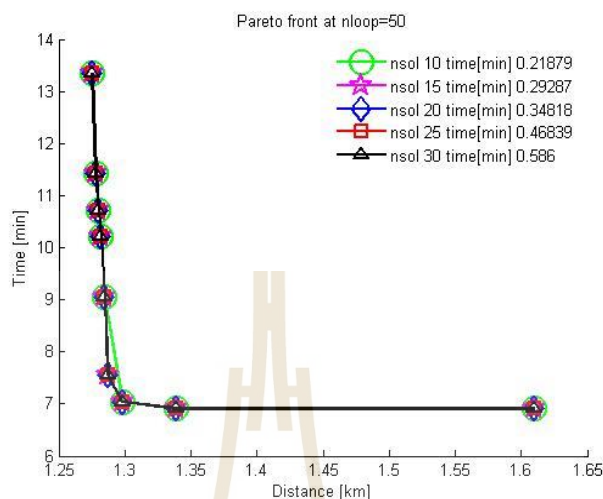
จากรูปที่ 3.34 แสดงขอบหน้าพาเรโตที่ nloop มีค่าเท่ากับ 25, 50, 75, 100 และ 150 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.19869, 0.34818, 0.55301, 0.67659 และ 1.6733 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโต แสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตที่ nsol = 20 สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

Hyper Volume	nsol = 20				
	nloop = 25	nloop = 50	nloop = 75	nloop = 100	nloop = 150
	2.0897	2.0935	2.0935	2.0935	2.0935

จากตารางที่ 3.9 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ nloop มีค่าเท่ากับ 50, 75, 100 และ 150 มีค่า HV มากที่สุด คือ 2.0935 ดังนั้นจึงเลือก nloop = 50 เพราะที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

เมื่อได้เลือก $nloop = 50$ แล้ว จึงพิจารณาการเปรียบเทียบขอบหน้าพारेโตที่ $nsol$ ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 เปรียบเทียบขอบหน้าพारेโตเมื่อ $nloop = 50$
สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 3.35 แสดงขอบหน้าพारेโตที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ซึ่งใช้เวลาในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.21879, 0.29287, 0.34818, 0.46839 และ 0.586 นาที ตามลำดับ และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพारेโต แสดงดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ค่า HV ของขอบหน้าพारेโตที่ $nloop=50$ สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

Hyper Volume	$nloop = 50$				
	$nsol = 10$	$nsol = 15$	$nsol = 20$	$nsol = 25$	$nsol = 30$
	2.0772	2.0935	2.0935	2.0935	2.0935

จากตารางที่ 3.10 เมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่ $nsol$ มีค่าเท่ากับ 15, 20, 25 และ 30 มีค่า HV มากที่สุด คือ 2.0935 ดังนั้นจึงเลือก $nsol = 15$ เพราะใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด

จากการพิจารณาดังที่ได้แสดงในข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่าค่า nloop และ nsol มีความสำคัญมากต่อกระบวนการคำนวณของโปรแกรม โดยค่าเหล่านี้เป็นตัวกำหนดจำนวนประชากรทั้งหมดที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัญหา ถ้ากำหนดค่า nloop และ nsol น้อยเกินไปจะส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้ อาจยังไม่ใช่วิธีการที่เหมาะสมที่สุด แต่ถ้ากำหนดค่า nloop และ nsol มากเกินไปจะส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าเหล่านี้ให้มีค่าที่เหมาะสม ดังนี้

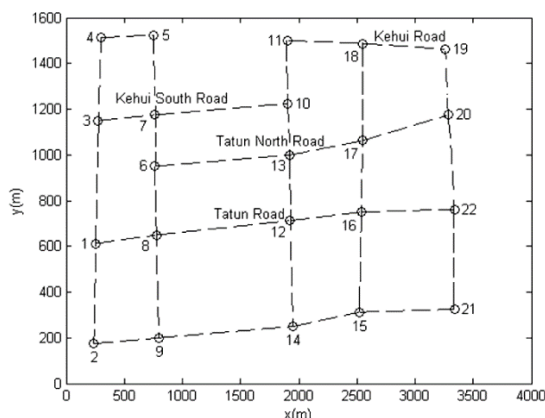
ตารางที่ 3.11 ค่า nloop และ nsol ที่เหมาะสมสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริด และเส้นทางจริงของการจราจร

กรณีศึกษา	เส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 4x4	เส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 5x5	เส้นทางจำลอง แบบกริดขนาด 6x6	เส้นทางจริง ของ การจราจร
No. of loop (nloop)	75	100	200	50
No. of solution (nsol)	10	15	15	15

3.5 การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของโปรแกรม

การตรวจสอบความสมเหตุสมผลของโปรแกรมคือ การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของโปรแกรมว่าสามารถหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดได้จริงหรือไม่ เนื่องจากโปรแกรมในการคำนวณนี้ ผู้วิจัยเขียนขึ้นมาเอง (ยกเว้นโปรแกรมในส่วนของ การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ) เพราะฉะนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ซึ่งวิธีการตรวจสอบโปรแกรมที่นิยมใช้ในงานวิจัยมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีการเปรียบเทียบผลเฉลยในกรณีศึกษาเดียวกันกับงานวิจัยอื่นที่ได้รับการยอมรับแล้ว โดยมีรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

สำหรับงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบคือ Least-time path algorithm based on missile guidance (Gong Yan et al, 2013) ซึ่งได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับการหาเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด โดยใช้ขั้นตอนวิธีการคำนวณของจรวดนำวิถีในการหาผลเฉลย และใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ สำหรับกรณีศึกษาได้ใช้เส้นทางบริเวณใกล้กับ Olympic Green ในกรุงปักกิ่ง ประเทศจีน แสดงดังรูปที่ 3.36



รูปที่ 3.36 เส้นทางบริเวณ Olympic Green ในกรุงปักกิ่ง (Gong Yan et al, 2013)

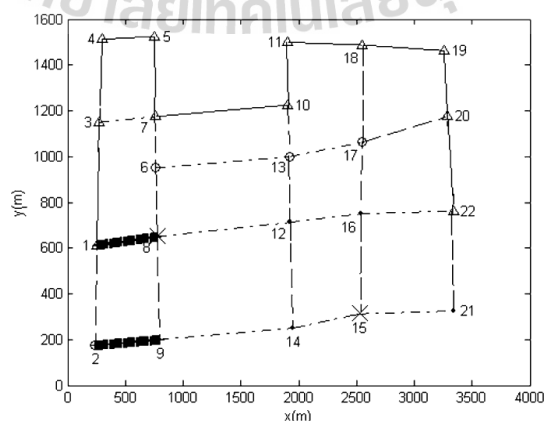
จากรูปที่ 3.36 แสดงเส้นทางของการจราจรบริเวณ Olympic Green โดยได้กำหนดตำแหน่งที่ทางแยกต่างๆ มีจุดเริ่มต้นคือ จุดที่ 1 และจุดเป้าหมายคือ จุดที่ 22 ดังรูป ซึ่งได้การกำหนดสภาพจราจรในแต่ละเส้นทางถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้

1) ระดับที่ 1 Congestion รถยนต์สามารถใช้ความเร็วได้ต่ำกว่า 10 km/h ได้แก่ เส้นทางที่ 1-8 และ 2-9 และตำแหน่งทางแยกที่ 8 และ 15

2) ระดับที่ 2 Unsmooth รถยนต์สามารถใช้ได้ในช่วง 10-35 km/h ได้แก่ เส้นทางที่ 3-7, 6-13, 8-12, 9-14, 12-16, 13-17, 14-15, 15-21 และ 16-22 และตำแหน่งทางแยกที่ 9, 12, 14, 16, 21

3) ระดับที่ 3 Smooth รถยนต์สามารถใช้ความเร็วได้มากกว่า 35 km/h ได้แก่ เส้นทางและตำแหน่งทางแยกอื่นที่ยังไม่ได้ระบุสภาพจราจร

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยดังรูปที่ 3.37



รูปที่ 3.37 เส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด (Gong Yan et al, 2013)

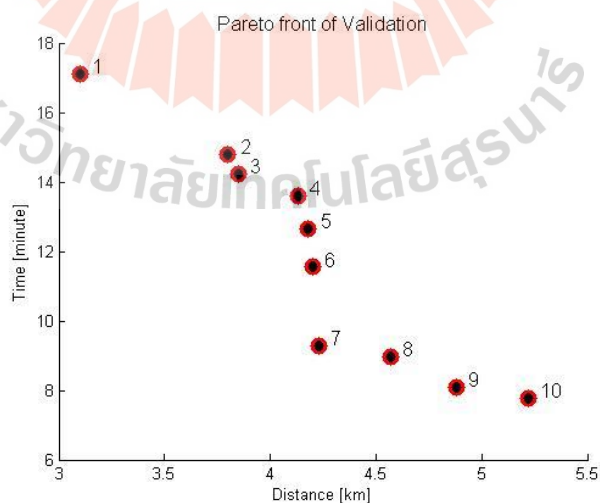
จากรูปที่ 3.37 แสดงผลเฉลยของปัญหานี้คือ เส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดซึ่งมีตำแหน่งของเส้นทางทั้งหมดคือ 1-3-4-5-7-10-11-18-19-20-22

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ทำการคำนวณในกรณีศึกษาเดียวกัน เพื่อนำผลเฉลยที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลเฉลยข้างต้นในรูปที่ 3.37 แล้วพิจารณาว่าได้ผลเฉลยเดียวกันหรือไม่ โดยได้กำหนดตำแหน่งทางแยกต่างๆ จุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมาย และกำหนดเงื่อนไขสภาพจราจรของแต่ละเส้นทางและตำแหน่งทางแยกให้สอดคล้องกับงานวิจัยในข้างต้น แสดงดังรูปที่ 3.38



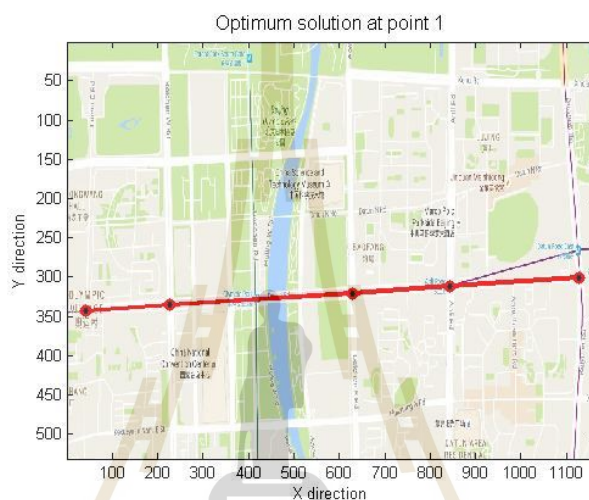
รูปที่ 3.38 เส้นทางบริเวณ Olympic Green ในกรุงปักกิ่ง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการคำนวณทำให้ได้ขอบหน้าพาเรโตของปัญหานี้ แสดงดังรูปที่ 3.39

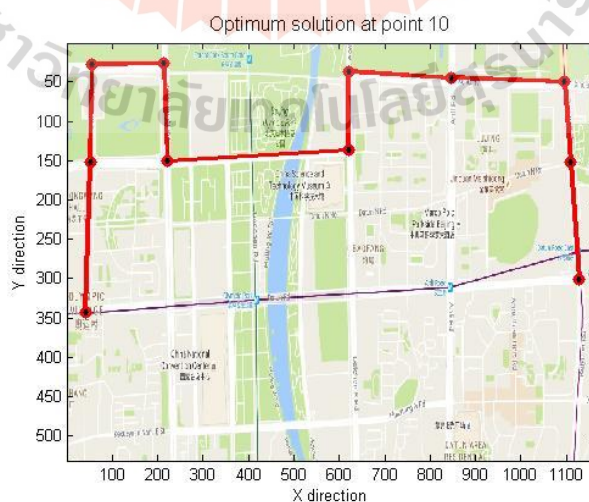


รูปที่ 3.39 ขอบหน้าพาเรโตของปัญหา

จากรูปที่ 3.39 เนื่องจากโปรแกรมถูกเขียนขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาแบบสองฟังก์ชันเป้าหมาย ทำให้ผลเฉลยที่ได้มาจึงอยู่ในรูปของขอบหน้าพาเรโต ซึ่งมีแกนแนวตั้งแสดงค่าเวลาในการเดินทาง และแกนแนวนอนแสดงค่าระยะทาง ดังนั้นเมื่อต้องการพิจารณาในรูปแบบของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายจึงต้องพิจารณาจุดที่มีค่าต่ำสุดของแกนนั้น เช่น ถ้าต้องการให้ระยะทางสั้นที่สุดก็คือ จุดที่ 1 และถ้าต้องการให้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดก็คือ จุดที่ 10 ซึ่งสามารถแสดงเส้นทางของผลเฉลยทั้งสองจุดดังนี้



รูปที่ 3.40 ผลเฉลยจุดที่ 1 หรือเส้นทางที่ใช้ระยะทางสั้นที่สุด



รูปที่ 3.41 ผลเฉลยจุดที่ 10 หรือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด

จากรูปที่ 3.40 และ 3.41 แสดงผลเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดที่ 1 และ 10 หรือเส้นทางที่ใช้ระยะทางสั้นที่สุดและเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดตามลำดับ เมื่อพิจารณาเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด พบว่าโปรแกรมให้เส้นทางเดียวกันกับผลเฉลยในงานวิจัยข้างต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.37 ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าวิธีการคำนวณของโปรแกรมนี้นี้มีความน่าเชื่อถือ และให้ผลเฉลยที่ถูกต้อง

3.6 สถานที่ทำการวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



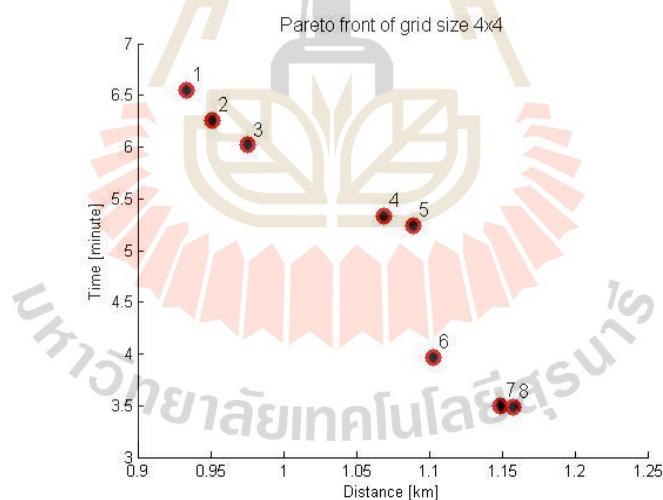
บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้กล่าวถึง รายละเอียดของผลการศึกษาเส้นทางเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบู่ที่ใช้การคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ ซึ่งผลการศึกษาเส้นทางเหมาะสมที่สุดประกอบด้วย เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5 และ 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจร โดยพิจารณาค่าระยะทาง เวลาในการเดินทาง และการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะดังนี้

4.1 ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด หรือขอบหน้าพารेट

จากการคำนวณทำให้ได้ขอบหน้าพารेट หรือผลเฉลยของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจร ดังนี้



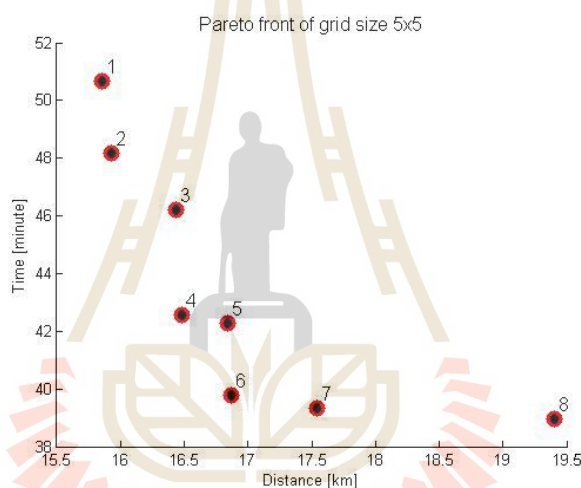
รูปที่ 4.1 ขอบหน้าพารेटของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ซึ่งได้ตรวจสอบความเหมาะสมที่สุดของขอบหน้าพารेटสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากการคำนวณทั้งหมด 10 ครั้ง ในกรณีศึกษาเดียวกัน และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพารेटแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า HV ของขอบหน้าพารेटอสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

Calculation times	1	2	3	4	5
Hyper Volume	0.2457	0.2457	0.2457	0.2428	0.2457
Calculation times	6	7	8	9	10
Hyper Volume	0.1850	0.2428	0.2457	0.2206	0.2457

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่า HV ของทุกขอบหน้าพารेटอ พบว่าค่า HV มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.2457 ที่การคำนวณครั้งที่ 1, 2, 3, 5, 8 และ 10 ดังนั้นจึงเลือกขอบหน้าพารेटอของการคำนวณครั้งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



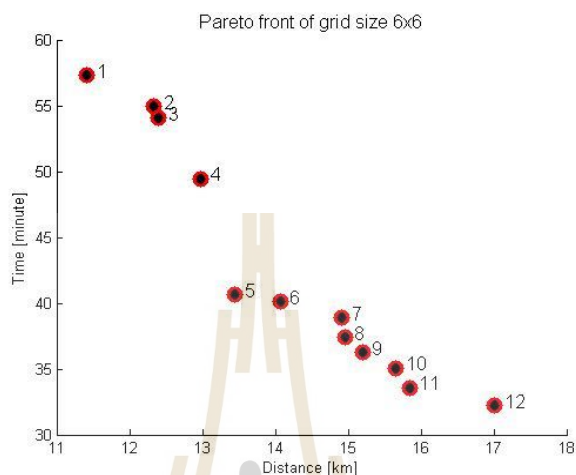
รูปที่ 4.2 ขอบหน้าพารेटอของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ซึ่งได้ตรวจสอบความเหมาะสมที่สุดของขอบหน้าพารेटอสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากการคำนวณทั้งหมด 10 ครั้ง ในกรณีศึกษาเดียวกัน และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพารेटอแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่า HV ของขอบหน้าพารेटอสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

Calculation times	1	2	3	4	5
Hyper Volume	31.944	33.121	31.944	31.719	33.121
Calculation times	6	7	8	9	10
Hyper Volume	31.804	33.121	33.121	33.121	33.121

จากตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบค่า HV ของทุกขอบหน้าพาเรโต พบว่าค่า HV มีค่าสูงสุดเท่ากับ 33.121 ที่การคำนวณครั้งที่ 2, 5, 7, 8, 9 และ 10 ดังนั้นจึงเลือกขอบหน้าพาเรโตของการคำนวณครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



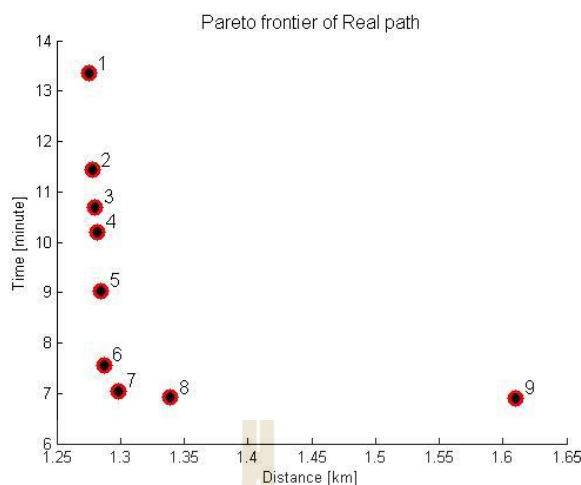
รูปที่ 4.3 ขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ซึ่งได้ตรวจสอบความเหมาะสมที่สุดของขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากการคำนวณทั้งหมด 10 ครั้ง ในกรณีศึกษาเดียวกัน และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโตแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

Calculation times	1	2	3	4	5
Hyper Volume	73.601	77.337	69.188	74.773	77.687
Calculation times	6	7	8	9	10
Hyper Volume	76.108	77.687	76.991	77.198	77.196

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบค่า HV ของทุกขอบหน้าพาเรโต พบว่าค่า HV มีค่าสูงสุดเท่ากับ 77.687 ที่การคำนวณครั้งที่ 5 และ 7 ดังนั้นจึงเลือกขอบหน้าพาเรโตของการคำนวณครั้งที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.4 ขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ซึ่งได้ทำการตรวจสอบความเหมาะสมที่สุดของขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร โดยเปรียบเทียบกับผลเฉลยจากการคำนวณทั้งหมด 10 ครั้ง ในกรณีศึกษาเดียวกัน และหาค่า HV ของแต่ละขอบหน้าพาเรโตแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า HV ของขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

Calculation times	1	2	3	4	5
Hyper Volume	2.0935	2.0920	2.0935	2.0935	2.0758
Calculation times	6	7	8	9	10
Hyper Volume	2.0935	2.0772	2.0935	2.0935	2.0920

จากตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบค่า HV ของทุกขอบหน้าพาเรโต พบว่าค่า HV มีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.0935 ที่การคำนวณครั้งที่ 1, 3, 4, 6, 8 และ 9 ดังนั้นจึงเลือกขอบหน้าพาเรโตของการคำนวณครั้งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

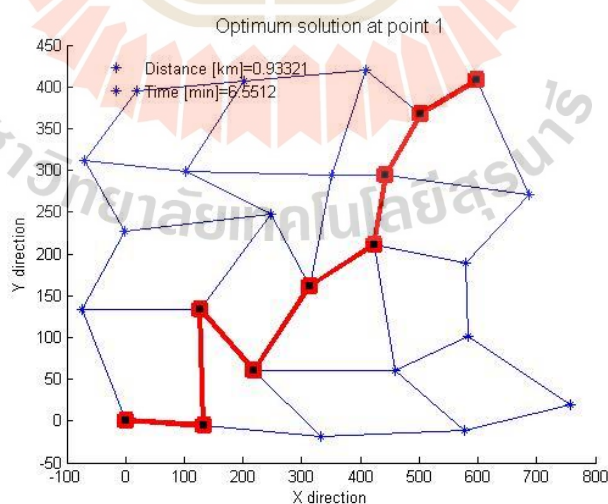
จากรูปที่ 4.1-4.4 แสดงเซตผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจร ซึ่งถูกแสดงในรูปของขอบหน้าพาเรโต ประกอบด้วย ผลเฉลยทั้งหมด 8 ผลเฉลย, 8 ผลเฉลย, 12 ผลเฉลย และ 9 ผลเฉลย ตามลำดับ โดยที่ผลเฉลยแต่ละจุดคือ เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย โดยทุกจุดมีค่าระยะทางถูกแสดงในแนวแกนนอน และ

ค่าเวลาในการเดินทางถูกแสดงในแนวแกนตั้ง ซึ่งผลเฉลยทั้งหมดถูกเก็บไว้ในเซตของผลเฉลยเหมาะสมที่สุดในแต่ละกรณีศึกษาโดยจัดเรียงตามลำดับหมายเลขที่แสดงไว้บนขอบหน้าพาเรโต เมื่อพิจารณาขอบหน้าพาเรโตทั้งหมด พบว่าแนวการเรียงตัวของขอบหน้าพาเรโตไม่เป็นระเบียบเหมือนกับในทฤษฎี ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะของปัญหาที่พิจารณา เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาแบบไม่ต่อเนื่องทำให้ผลเฉลยที่ได้ไม่มีความต่อเนื่องกัน ดังนั้นเมื่อนำผลเฉลยทั้งหมดมาพล็อตในกราฟเดียวกันจึงทำให้แนวของผลเฉลยไม่เป็นแนวเดียวกัน และพิจารณาจำนวนจุดผลเฉลยที่เกิดขึ้นบนขอบหน้าพาเรโต ซึ่งเป็นผลมาจากความหลายของประชากรในการคำนวณหมายถึงความหลากหลายของเส้นทางที่เป็นไปได้ สังเกตได้จากเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 มีจำนวนจุดผลเฉลยมากที่สุด เพราะว่ากรณีศึกษานี้มีจำนวนตำแหน่งของทางแยกมากจึงทำให้มีเส้นทางย่อยมากขึ้น ดังนั้นความหลากหลายของเส้นทางที่เป็นไปได้จึงมีจำนวนมากกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ ซึ่งแสดงรายละเอียดของผลเฉลยแต่ละจุดบนขอบหน้าพาเรโตในแต่ละกรณีศึกษาดังนี้

4.1.1 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

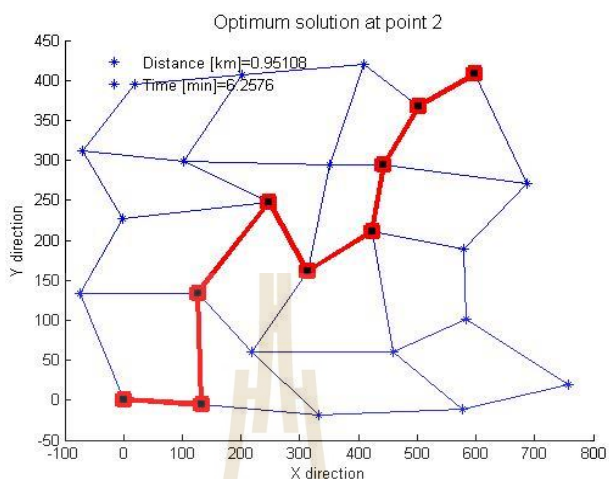
จากขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 ดังรูปที่ 4.1 สามารถแสดงรายละเอียดของผลเฉลยทั้ง 8 จุดดังนี้

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีระยะทางเท่ากับ 0.93321 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 6.5512 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.5



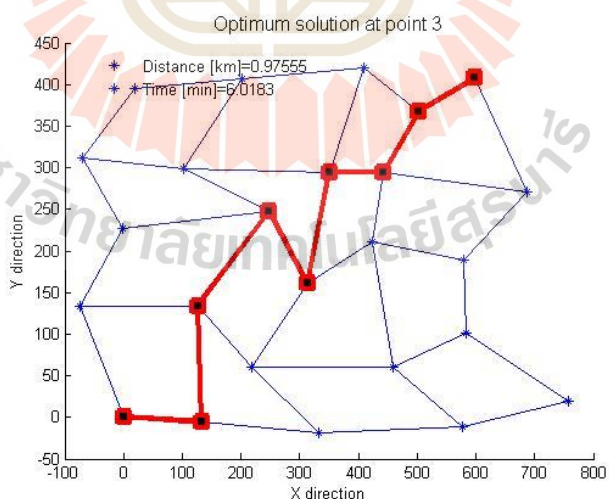
รูปที่ 4.5 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีระยะทางเท่ากับ 0.95108 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 6.2576 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.6



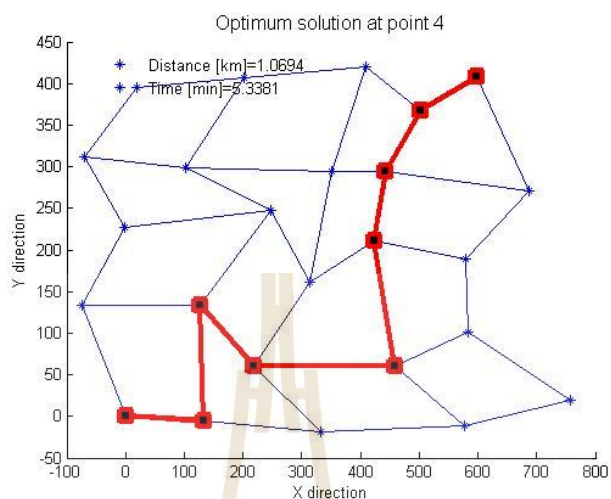
รูปที่ 4.6 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีระยะทางเท่ากับ 0.97555 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 6.0183 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.7



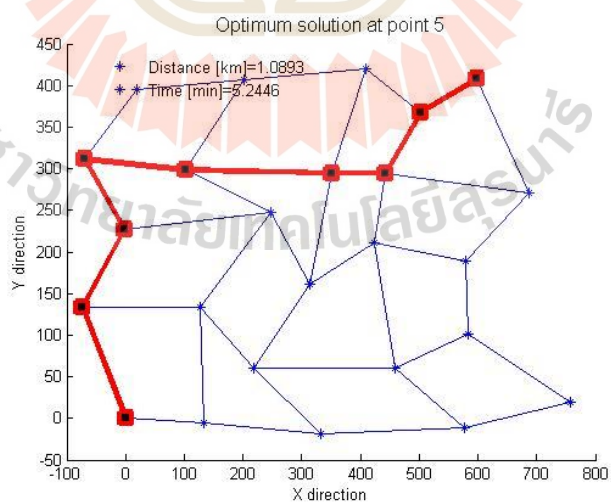
รูปที่ 4.7 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีระยะทางเท่ากับ 1.0694 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 5.3381 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.8



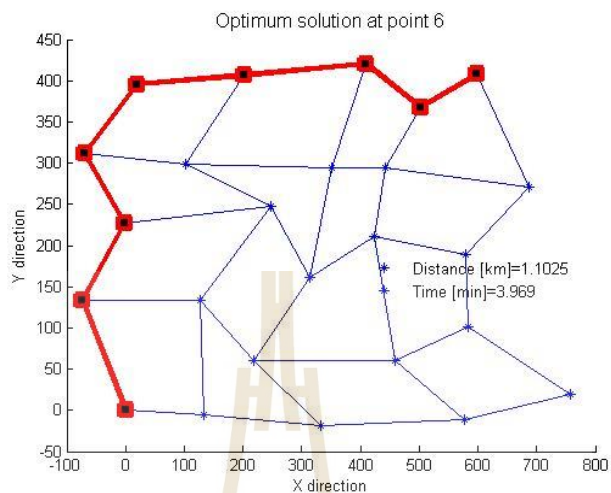
รูปที่ 4.8 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีระยะทางเท่ากับ 1.0893 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 5.2446 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.9



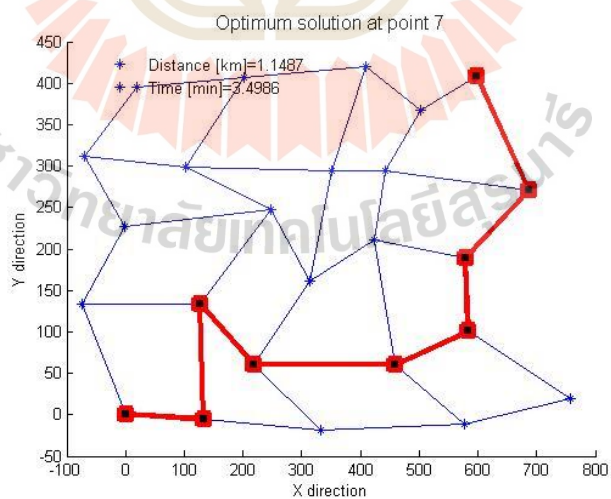
รูปที่ 4.9 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพารโโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีระยะทางเท่ากับ 1.1025 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 3.969 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.10



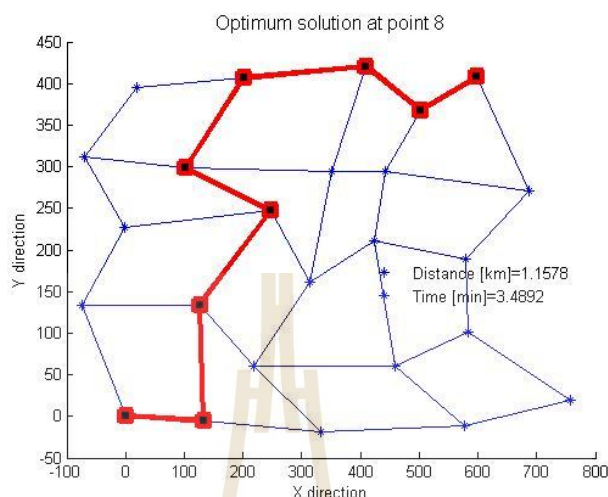
รูปที่ 4.10 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพारे โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีระยะทางเท่ากับ 1.1487 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 3.4986 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพारे โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีระยะทางเท่ากับ 1.1578 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 3.4892 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.12



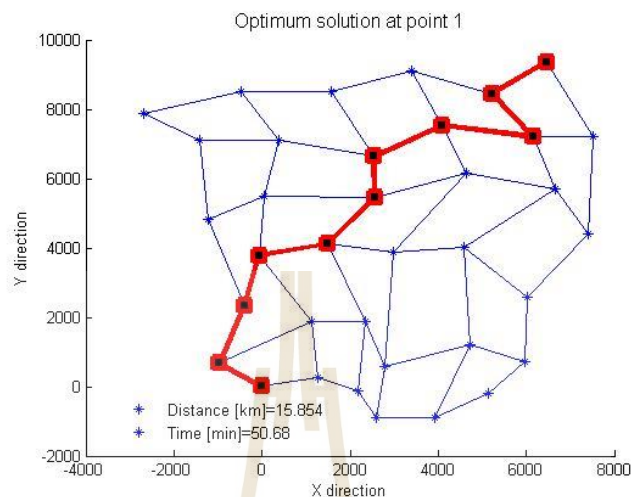
รูปที่ 4.12 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

จากรูปที่ 4.4-4.12 แสดงเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของทุกจุดผลเฉลยบนพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 ซึ่งแต่ละผลเฉลยมีเส้นทางที่ต่างกัน ทำให้ค่าระยะทางและเวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน โดยที่ผลเฉลยจุดที่ 1 คือ เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.93321 กิโลเมตร และผลเฉลยจุดที่ 8 คือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 3.4892 นาที

4.1.2 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

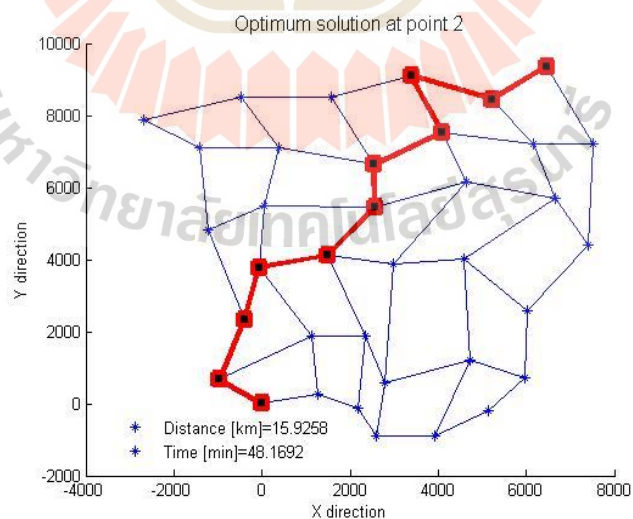
จากขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 ดังรูปที่ 4.2 สามารถแสดงรายละเอียดของผลเฉลยทั้ง 8 จุดดังนี้

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีระยะทางเท่ากับ 15.854 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 50.68 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.13



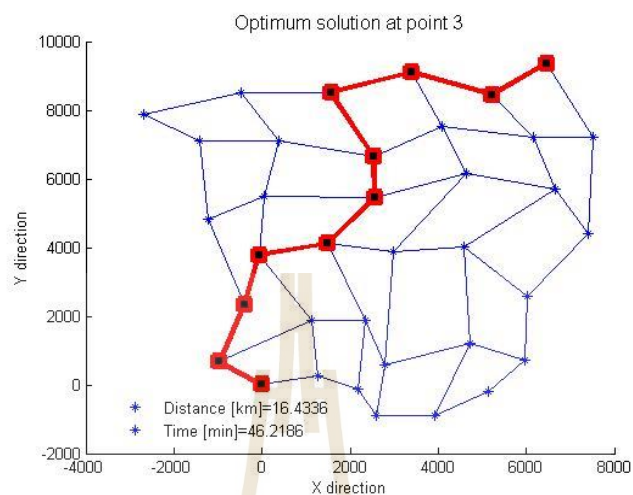
รูปที่ 4.13 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีระยะทางเท่ากับ 15.9258 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 48.1692 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.14



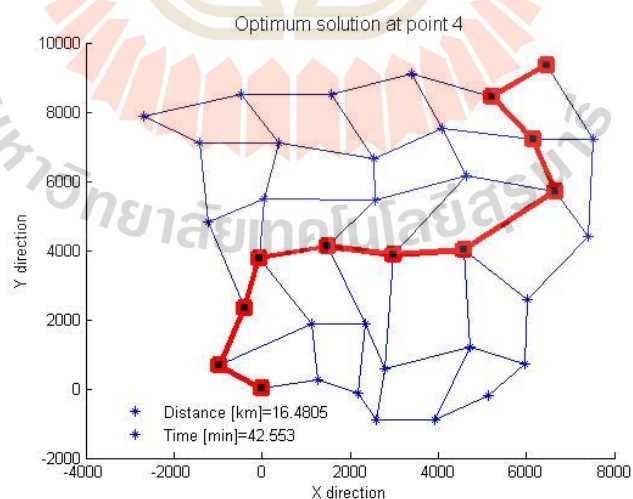
รูปที่ 4.14 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีระยะทางเท่ากับ 16.4336 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 46.2186 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.15



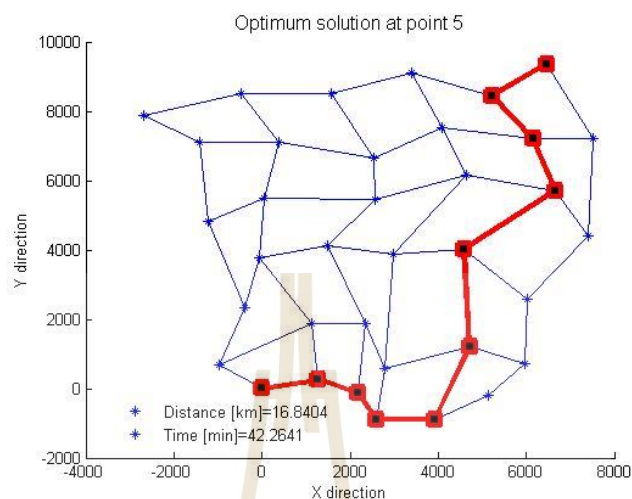
รูปที่ 4.15 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีระยะทางเท่ากับ 16.4805 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 42.553 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.16



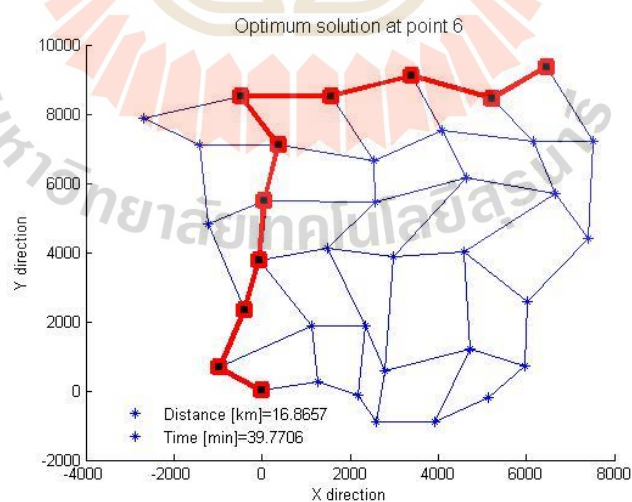
รูปที่ 4.16 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีระยะทางเท่ากับ 16.8404 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 42.2641 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.17



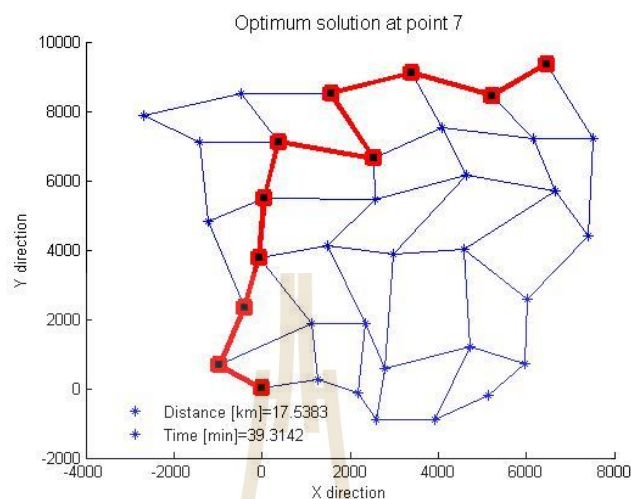
รูปที่ 4.17 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีระยะทางเท่ากับ 16.8657 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 39.7706 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.18



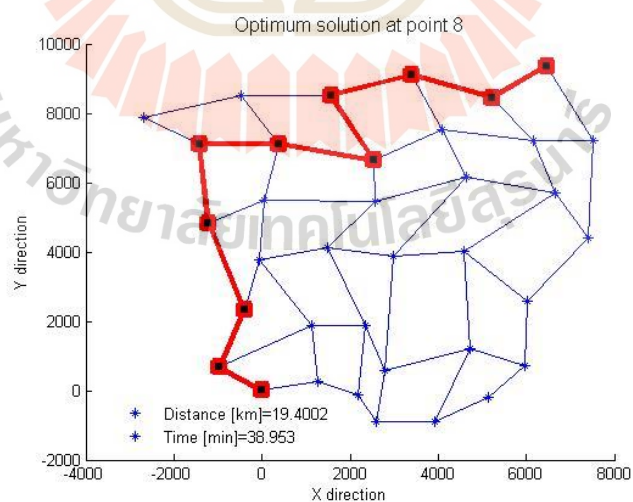
รูปที่ 4.18 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีระยะทางเท่ากับ 17.5383 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 39.3142 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีระยะทางเท่ากับ 19.4002 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 38.953 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.20



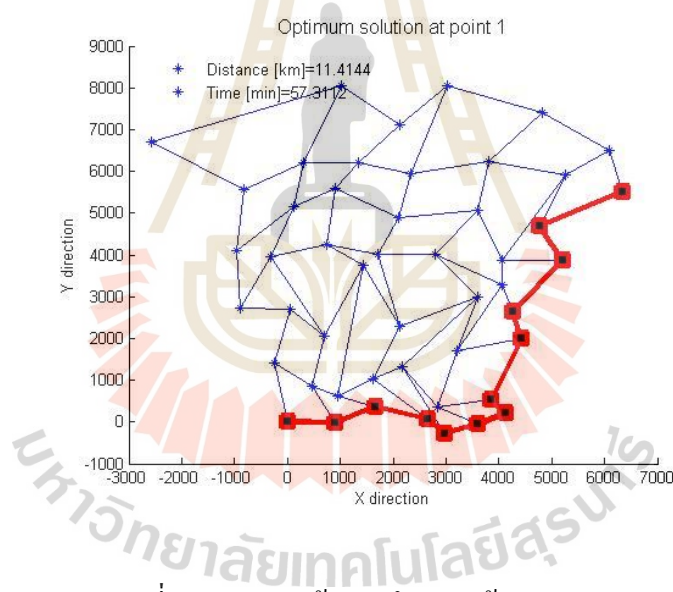
รูปที่ 4.20 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

จากรูปที่ 4.13-4.20 แสดงเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของทุกจุดผลเฉลยบนพารโทสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5×5 ซึ่งแต่ละผลเฉลยมีเส้นทางที่ต่างกัน ทำให้ค่าระยะทางและเวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน โดยที่ผลเฉลยจุดที่ 1 คือ เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด มีค่าเท่ากับ 15.854 กิโลเมตร และผลเฉลยจุดที่ 8 คือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 38.953 นาที

4.1.3 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×6

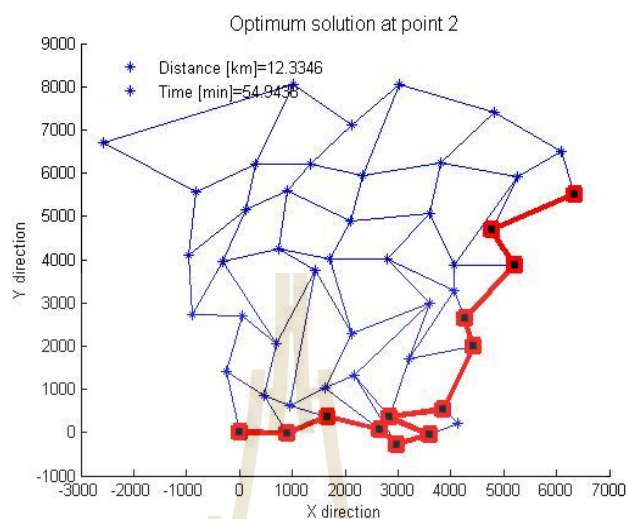
จากขอบหน้าพารโทของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×6 ดังรูปที่ 4.3 สามารถแสดงรายละเอียดของผลเฉลยทั้ง 12 จุดดังนี้

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีระยะทางเท่ากับ 11.4144 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 57.3112 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.21



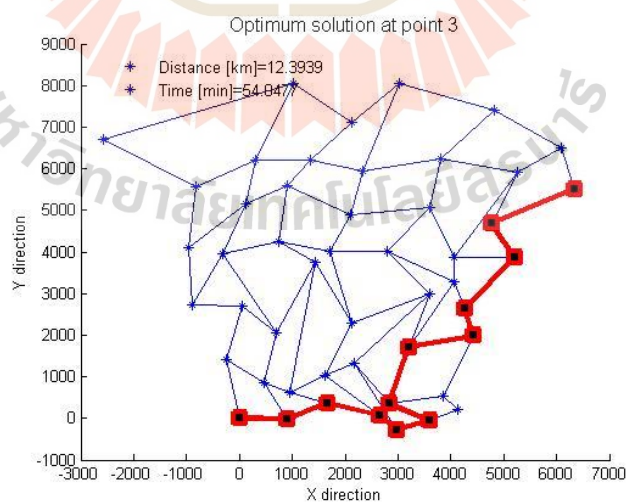
รูปที่ 4.21 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพารโทของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6×6

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีระยะทางเท่ากับ 12.3346 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 54.9438 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.22



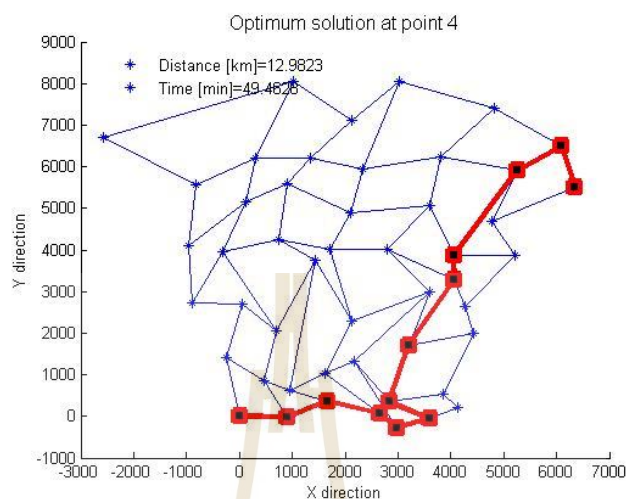
รูปที่ 4.22 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีระยะทางเท่ากับ 12.3939 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 54.0477 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.23



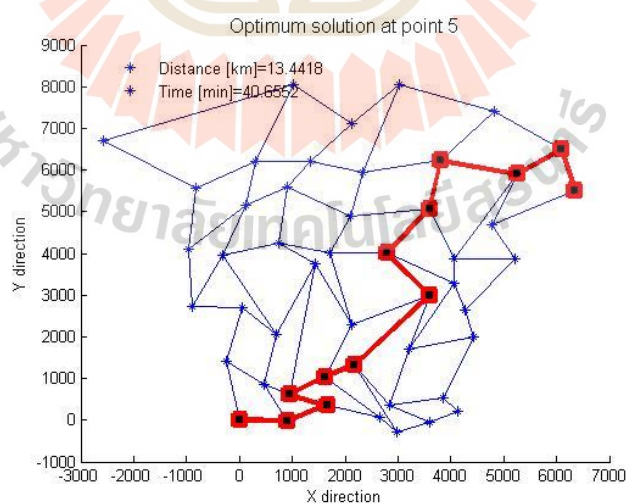
รูปที่ 4.23 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีระยะทางเท่ากับ 12.9823 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 49.4628 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.24



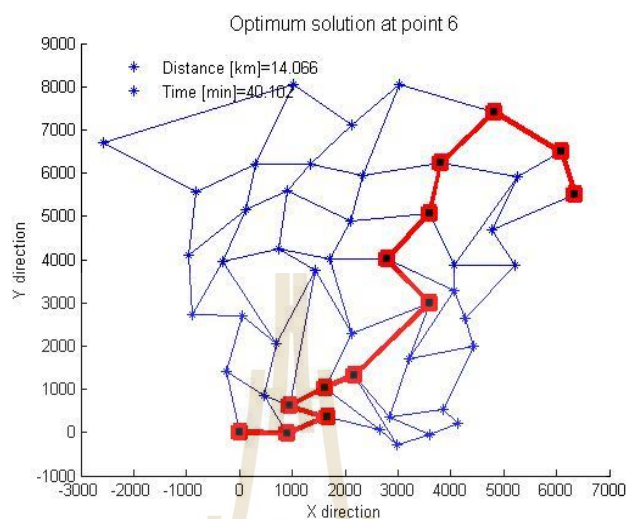
รูปที่ 4.24 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีระยะทางเท่ากับ 13.4418 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 40.6552 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.25



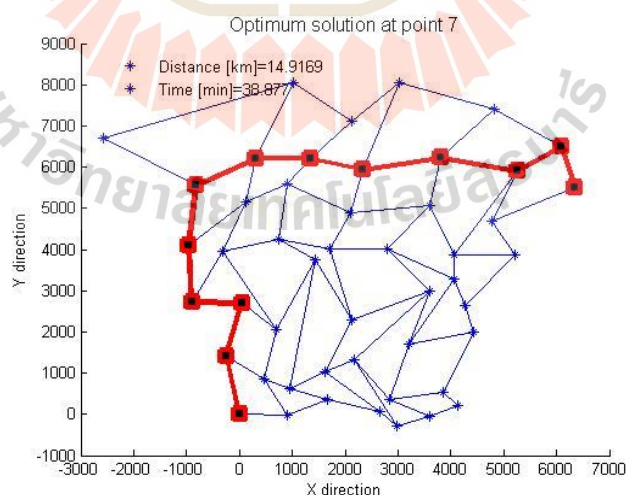
รูปที่ 4.25 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเร โดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีระยะทางเท่ากับ 14.066 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 40.102 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.26



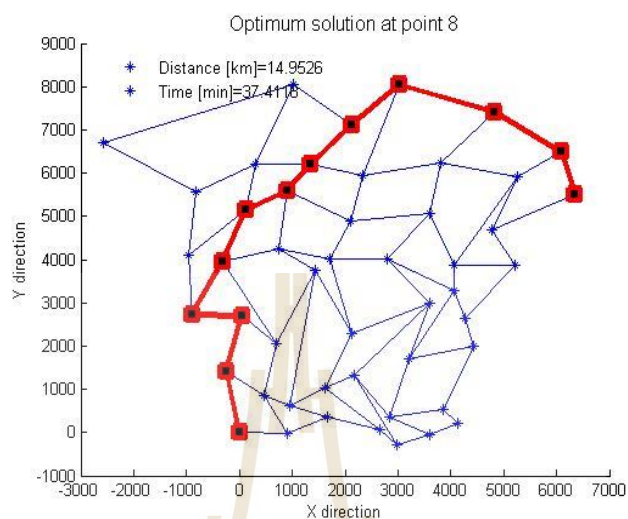
รูปที่ 4.26 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีระยะทางเท่ากับ 14.9169 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 38.877 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.27



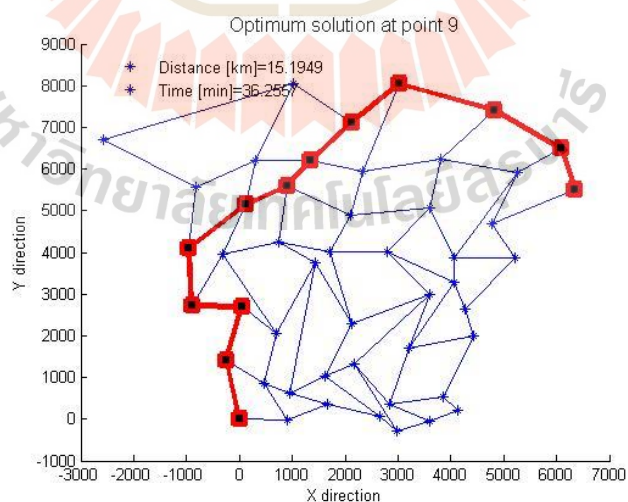
รูปที่ 4.27 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีระยะทางเท่ากับ 14.9526 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 37.4118 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.28



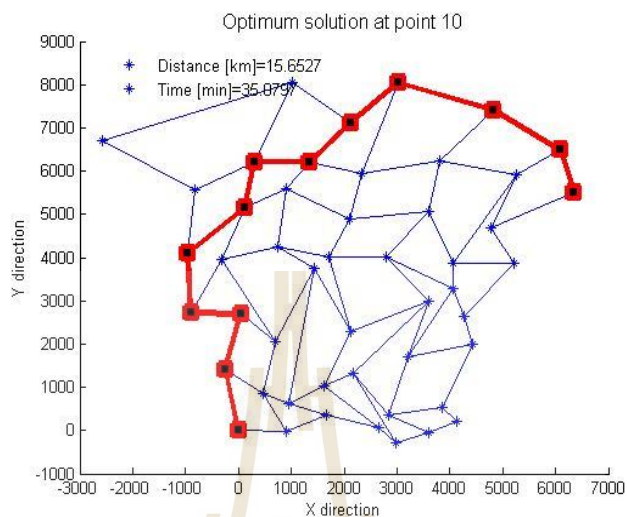
รูปที่ 4.28 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีระยะทางเท่ากับ 15.1949 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 36.2557 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.29



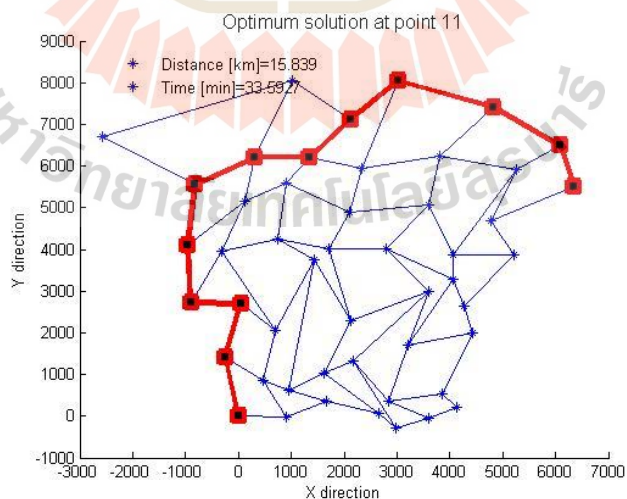
รูปที่ 4.29 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 10 มีระยะทางเท่ากับ 15.6527 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 35.0797 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.30



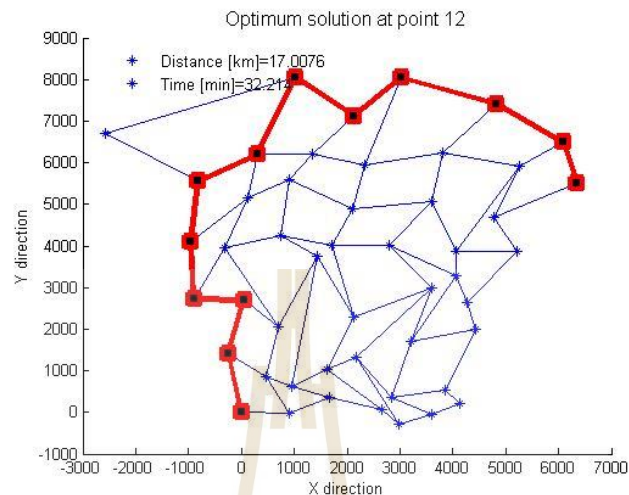
รูปที่ 4.30 ผลเฉลยจุดที่ 10 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 11 มีระยะทางเท่ากับ 15.839 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 33.5927 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลเฉลยจุดที่ 11 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

ผลเฉลยจุดที่ 12 มีระยะทางเท่ากับ 17.0076 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 32.214 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ผลเฉลยจุดที่ 12 บนขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

จากรูปที่ 4.21-4.32 แสดงเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของทุกจุดผลเฉลยบนพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 ซึ่งแต่ละผลเฉลยมีเส้นทางที่ต่างกัน ทำให้ค่าระยะทางและเวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน โดยที่ผลเฉลยจุดที่ 1 คือ เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด มีค่าเท่ากับ 11.4144 กิโลเมตร และผลเฉลยจุดที่ 12 คือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 32.214 นาที

4.1.4 เส้นทางจริงของการจราจร

จากขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร ดังรูปที่ 4.4 สามารถแสดงรายละเอียดของผลเฉลยทั้ง 9 จุดดังนี้

ผลเฉลยจุดที่ 1 มีระยะทางเท่ากับ 1.275 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 13.3482 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.33



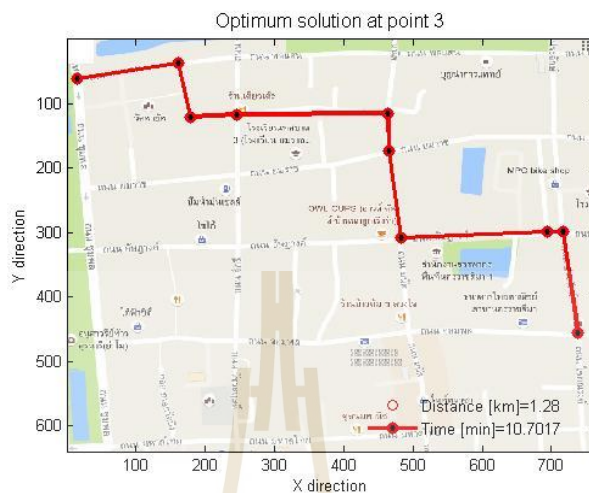
รูปที่ 4.33 ผลเฉลยจุดที่ 1 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 2 มีระยะทางเท่ากับ 1.278 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 11.4302 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 ผลเฉลยจุดที่ 2 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 3 มีระยะทางเท่ากับ 1.28 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 10.7017 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.35



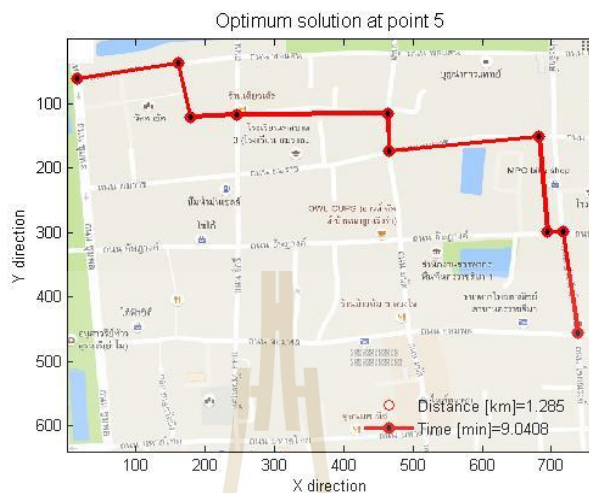
รูปที่ 4.35 ผลเฉลยจุดที่ 3 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 4 มีระยะทางเท่ากับ 1.282 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 10.2098 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.36



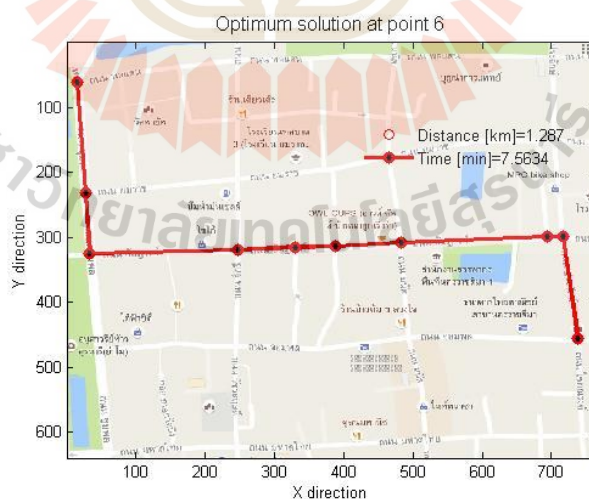
รูปที่ 4.36 ผลเฉลยจุดที่ 4 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 5 มีระยะทางเท่ากับ 1.285 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 9.0408 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.37



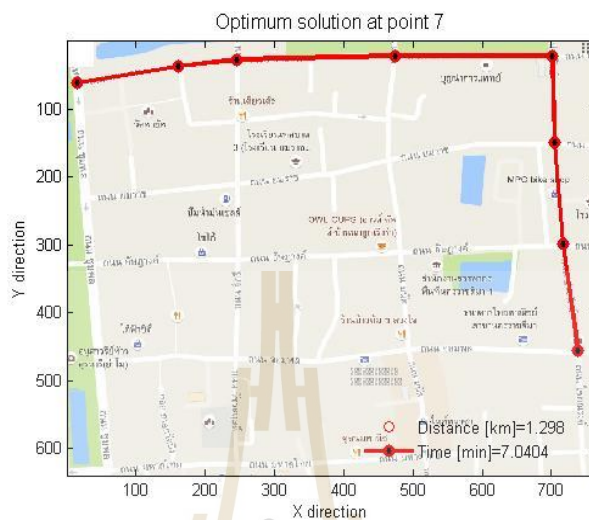
รูปที่ 4.37 ผลเฉลยจุดที่ 5 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 6 มีระยะทางเท่ากับ 1.287 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 7.5634 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.38



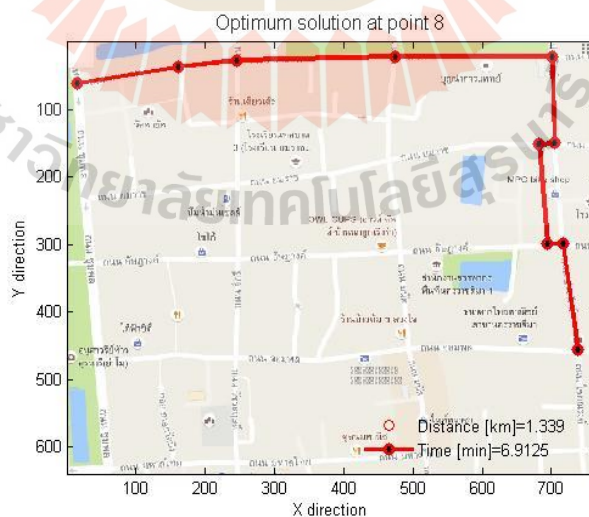
รูปที่ 4.38 ผลเฉลยจุดที่ 6 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 7 มีระยะทางเท่ากับ 1.298 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 7.0404 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.39



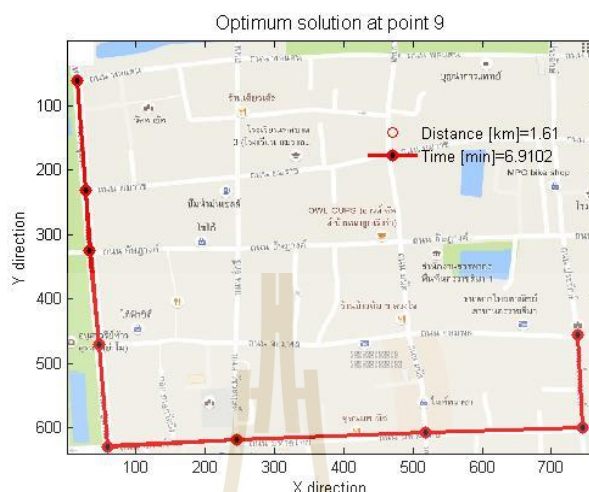
รูปที่ 4.39 ผลเฉลยจุดที่ 7 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 8 มีระยะทางเท่ากับ 1.339 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 6.9125 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ผลเฉลยจุดที่ 8 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

ผลเฉลยจุดที่ 9 มีระยะทางเท่ากับ 1.61 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 6.9102 นาที โดยมีเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 ผลเฉลยจุดที่ 9 บนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

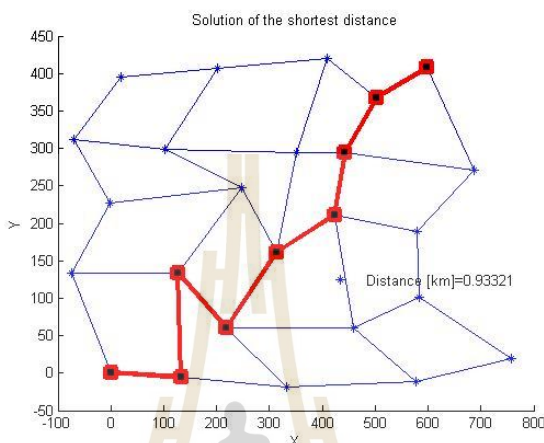
จากรูปที่ 4.33-4.41 แสดงเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของทุกจุดผลเฉลยบนพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร ซึ่งแต่ละผลเฉลยมีเส้นทางที่ต่างกัน ทำให้ค่าระยะทางและเวลาในการเดินทางไม่เท่ากัน โดยที่ผลเฉลยจุดที่ 1 คือ เส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.275 กิโลเมตร และผลเฉลยจุดที่ 9 คือเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 6.9102 นาที

4.2 ผลเฉลยสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย

สำหรับเหตุการณ์หาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย เพื่อต้องการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าของผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายกับค่าของผลเฉลยแบบสองฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาเฉพาะค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายเท่านั้น เมื่อพิจารณาจากขอบหน้าพาเรโต พบว่าค่าต่ำสุดของฟังก์ชันเป้าหมายคือ ผลเฉลยจุดที่ 1 ซึ่งมีค่าระยะทางสั้นที่สุด และผลเฉลยจุดสุดท้าย ซึ่งมีค่าเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ดังนั้นจึงสามารถใช้ผลเฉลยที่จุดเหล่านี้สำหรับการเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันเป้าหมายได้ ซึ่งแสดงผลเฉลยสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของแต่ละกรณีศึกษาดังนี้

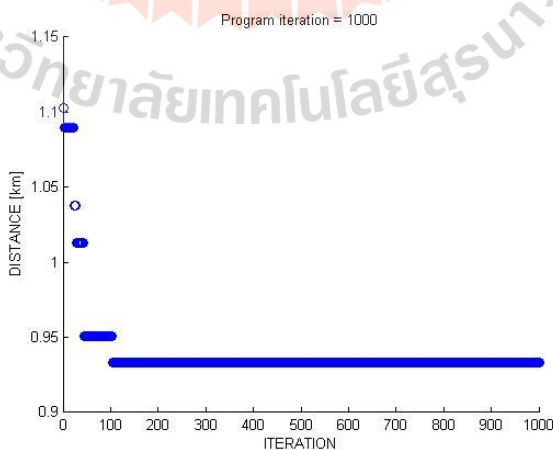
4.2.1 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ ระยะทางสั้นที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.93321 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

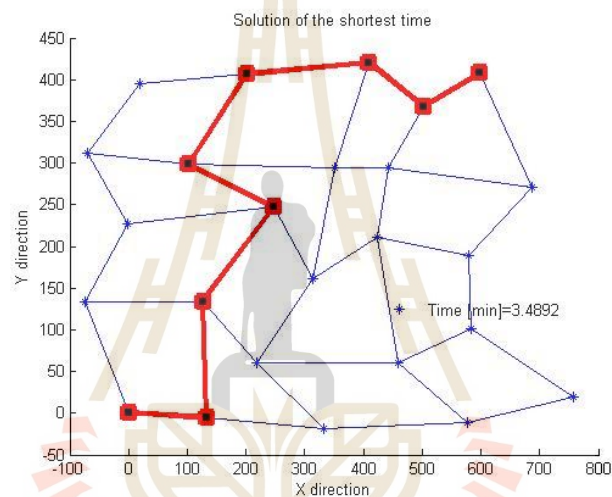
หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 ดังรูปที่ 4.42 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

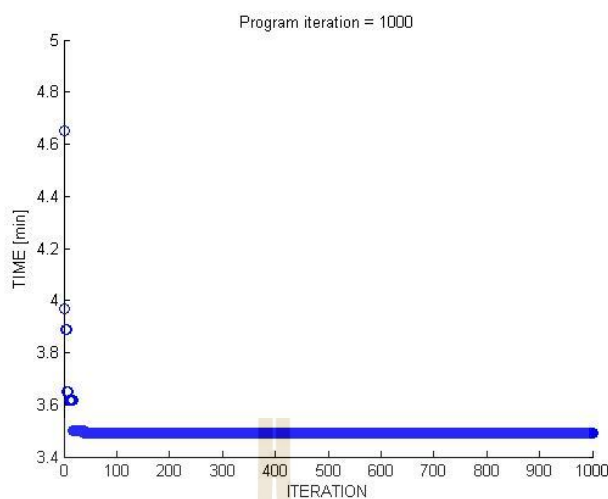
จากรูปที่ 4.43 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 1000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-100 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 100 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.4892 นาที ดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 ดังรูปที่ 4.44 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.45



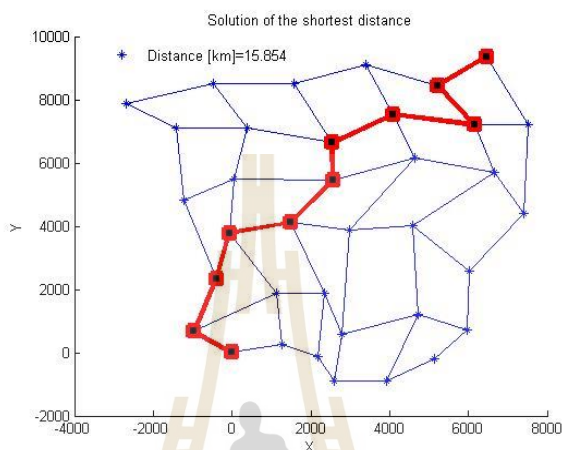
รูปที่ 4.45 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

จากรูปที่ 4.45 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 1000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-50 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 50 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายกับผลเฉลยของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 พบว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 0.93321 กิโลเมตร และผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.5 มีค่าเท่ากับ 0.93321 กิโลเมตรเท่ากัน และพิจารณาผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 3.4892 นาที และผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 8 ดังรูปที่ 4.12 มีค่าเท่ากับ 3.4892 นาทีเท่ากัน ซึ่งทั้งสองปัญหามีค่าเท่ากันทุกอย่าง โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายเป็นเส้นทางเดียวกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 มีความถูกต้อง

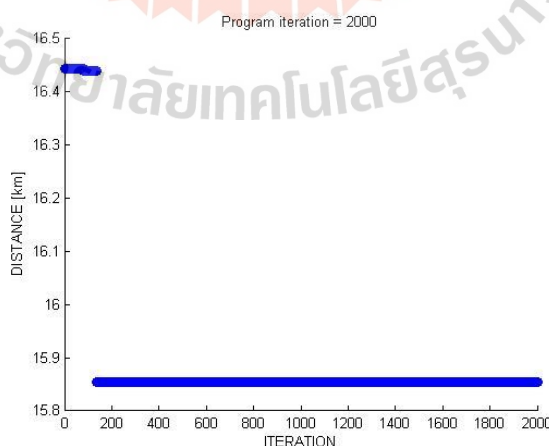
4.2.2 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ ระยะทางสั้นที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.854 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

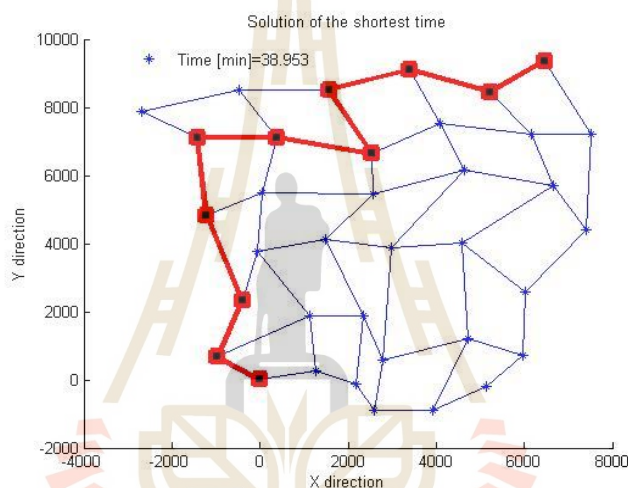
หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 ดังรูปที่ 4.46 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

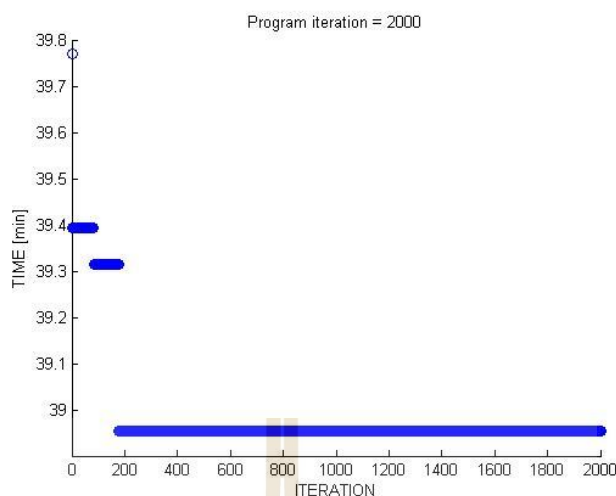
จากรูปที่ 4.47 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 2000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-100 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 100 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 38.953 นาที ดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 ดังรูปที่ 4.48 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.49



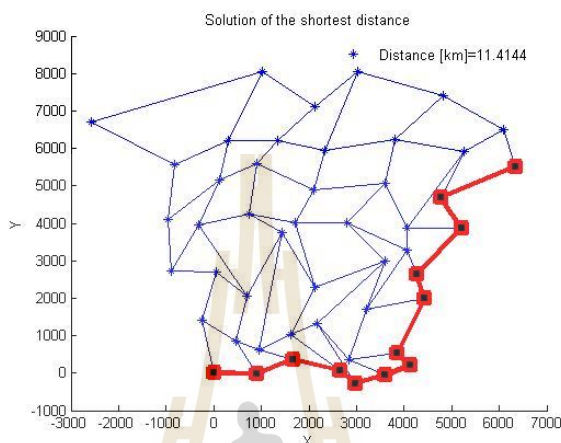
รูปที่ 4.49 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

จากรูปที่ 4.49 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 2000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-200 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 200 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายกับผลเฉลยของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 พบว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 15.854 กิโลเมตร และผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.13 มีค่าเท่ากับ 15.854 กิโลเมตรเท่ากัน และพิจารณาผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 38.953 นาที และผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 8 ดังรูปที่ 4.20 มีค่าเท่ากับ 38.953 นาทีเท่ากัน ซึ่งทั้งสองปัญหามีค่าเท่ากันทุกอย่าง โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายเป็นเส้นทางเดียวกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 มีความถูกต้อง

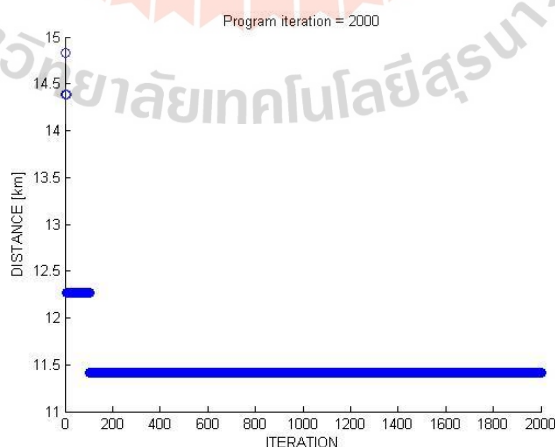
4.2.3 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ ระยะทางสั้นที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.4144 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

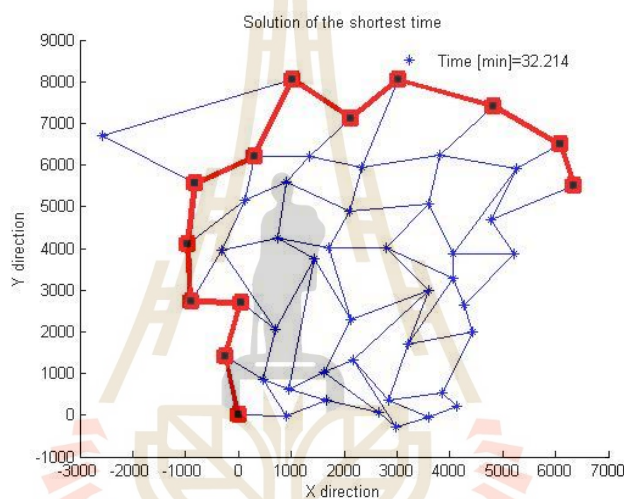
หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 ดังรูปที่ 4.50 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

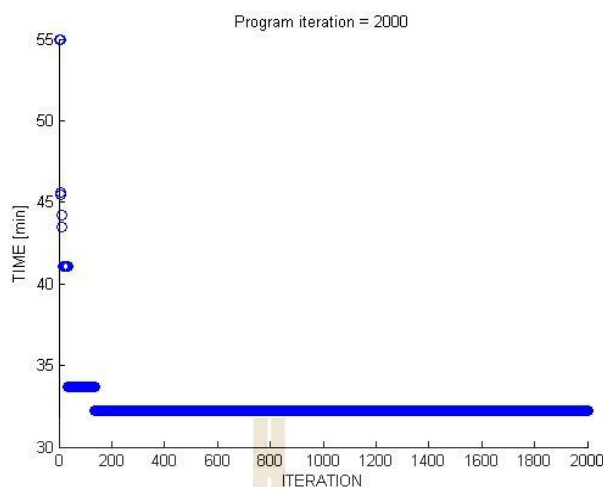
จากรูปที่ 4.51 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 2000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-100 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 100 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 32.214 นาที ดังรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.52 ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 ดังรูปที่ 4.52 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.53



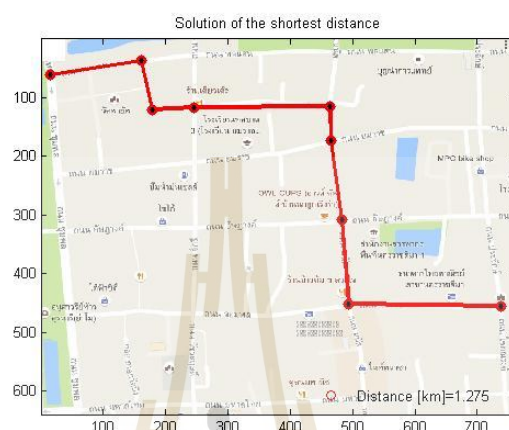
รูปที่ 4.53 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

จากรูปที่ 4.53 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 2000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่คำตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-150 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 150 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายกับผลเฉลยของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 พบว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่า 11.4144 กิโลเมตร และผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.21 มีค่าเท่ากับ 11.4144 กิโลเมตรเท่ากัน และพิจารณาผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่า 32.214 นาที และผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 12 ดังรูปที่ 4.32 มีค่าเท่ากับ 32.214 นาทีเท่ากัน ซึ่งทั้งสองปัญหามีค่าเท่ากันทุกอย่าง โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายเป็นเส้นทางเดียวกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าขอบหน้าพาเรโตของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 มีความถูกต้อง

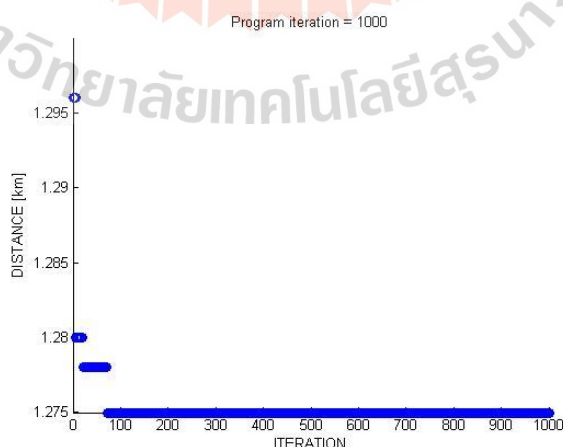
4.2.4 เส้นทางจริงของการจราจร

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ ระยะทางสั้นที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.275 กิโลเมตร ดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

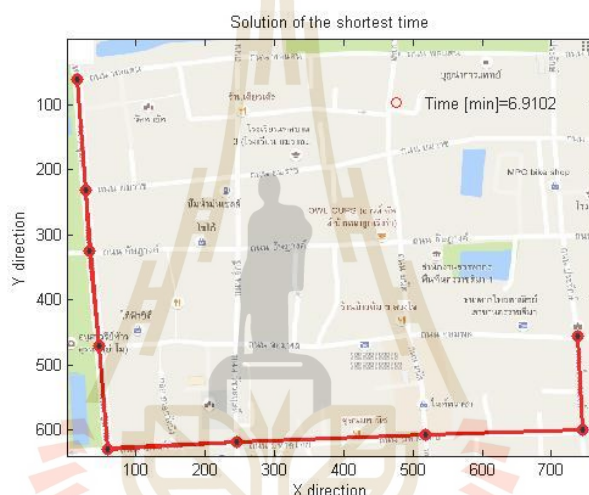
หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร ดังรูปที่ 4.54 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุด
สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

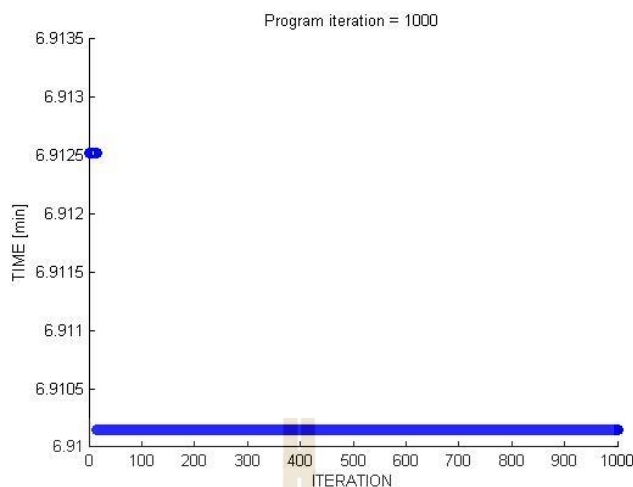
จากรูปที่ 4.55 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 1000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่ค่าตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-100 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 100 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

สำหรับการหาผลเฉลยแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร โดยฟังก์ชันเป้าหมายที่พิจารณาคือ เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด จากการคำนวณทำให้ได้ผลเฉลยเป็นเส้นทางที่มีเวลาในการเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.9102 นาที ดังรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 ผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

หลังจากการคำนวณเพื่อให้มั่นใจว่าผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร ดังรูปที่ 4.56 เป็นผลเฉลยที่ดีที่สุดสำหรับปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลย ดังรูปที่ 4.57



รูปที่ 4.57 ตรวจสอบความถูกต้องของผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุด สำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 4.57 แสดงการลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยได้กำหนดจำนวนรอบในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 1000 รอบ ซึ่งเห็นได้ว่าผลเฉลยจากการคำนวณเริ่มลู่เข้าสู่ค่าตอบในช่วงรอบการคำนวณประมาณ 0-10 รอบ และลู่เข้าสู่ผลเฉลยที่ดีที่สุดเมื่อผ่านไปประมาณ 10 รอบการคำนวณ จนถึงรอบการคำนวณสุดท้ายผลเฉลยที่ได้ยังคงเป็นผลเฉลยเดิม ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าผลเฉลยที่ได้เป็นผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดจริง

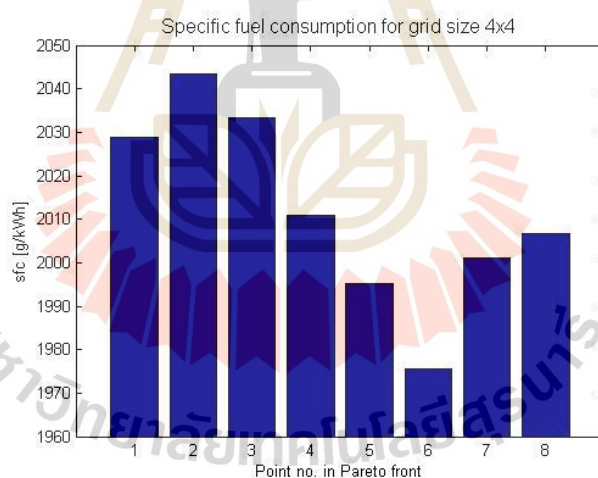
เมื่อเปรียบเทียบผลเฉลยของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายกับผลเฉลยของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมายสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร พบว่าผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่า 1.275 กิโลเมตร และผลเฉลยที่มีระยะทางสั้นที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.33 มีค่าเท่ากับ 1.275 กิโลเมตรเท่ากัน และพิจารณาผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมายมีค่าเท่า 6.9102 นาที และผลเฉลยที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดของปัญหาสองฟังก์ชันเป้าหมาย หรือผลเฉลยจุดที่ 9 ดังรูปที่ 4.41 มีค่าเท่ากับ 6.9102 นาทีเท่ากัน ซึ่งทั้งสองปัญหามีค่าเท่ากันทุกอย่าง โดยสามารถสังเกตได้จากเส้นทางจากจุดเริ่มต้น ไปยังจุดเป้าหมายเป็นเส้นทางเดียวกัน ดังนั้นจึงยืนยันได้ว่าขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจรมีความถูกต้อง

4.3 ผลการคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

การหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีวิธีการคำนวณดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.11 เพื่อต้องการทราบว่าที่ผลเฉลยแต่ละจุดบนขอบหน้าพาเรโตมีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะแตกต่างกันอย่างไร และสามารถใช้อะไรประกอบการตัดสินใจในการเลือกเส้นทางที่พิจารณาสำหรับการขับจรวดยนต์ ซึ่งแสดงรายละเอียดการคำนวณดังนี้

4.3.1 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

สำหรับการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 โดยนำจุดผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตทุกจุดไปใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว จากการคำนวณได้ผลลัพธ์คือ ผลเฉลยจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2028.96 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2043.49 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2033.20 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2010.80 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 5 มีค่าเท่ากับ 1995.06 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 1975.68 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 7 มีค่าเท่ากับ 2001.11 g/kWh และผลเฉลยจุดที่ 8 มีค่าเท่ากับ 2006.56 g/kWh แสดงดังรูปที่ 4.58



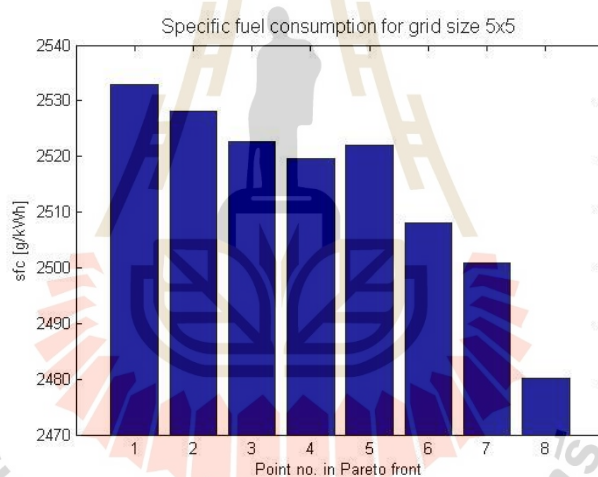
รูปที่ 4.58 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

จากรูปที่ 4.58 แสดงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของผลเฉลยทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 พบว่าจุดผลเฉลยที่มีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำที่สุดคือจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 1975.68 g/kWh ดังนั้นเมื่อต้องการให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าต่ำที่สุดจึงต้องเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดนี้ดังรูปที่ 4.10 มีระยะทางเท่ากับ 1.1025 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 3.969 นาที ในทางตรงกันข้าม

ถ้าเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดที่ 2 ดังรูปที่ 4.6 จะทำให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2043.49 g/kWh เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 3.32% ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยจุดที่ 6 ประหยัดกว่าผลเฉลยจุดที่ 2 ถึง 3.32%

4.3.2 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

สำหรับการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 โดยนำจุดผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตทุกจุดไปใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว จากการคำนวณได้ผลลัพธ์คือ ผลเฉลยจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2532.88 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2528.03 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2522.58 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2519.56 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 5 มีค่าเท่ากับ 2521.98 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 2508.05 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 7 มีค่าเท่ากับ 2500.79 g/kWh และผลเฉลยจุดที่ 8 มีค่าเท่ากับ 2480.20 g/kWh แสดงดังรูปที่ 4.59



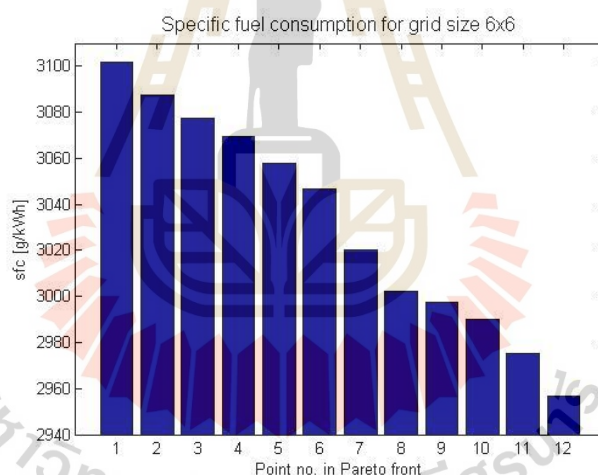
รูปที่ 4.59 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

จากรูปที่ 4.59 แสดงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของผลเฉลยทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 พบว่าจุดผลเฉลยที่มีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำที่สุดคือจุดที่ 8 มีค่าเท่ากับ 2480.20 g/kWh ดังนั้นเมื่อต้องการให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าต่ำที่สุดจึงต้องเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดนี้ดังรูปที่ 4.20 มีระยะทางเท่ากับ 19.4002 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 38.953 นาที ในทางตรงกันข้ามถ้าเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.13 จะทำให้การ

สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2532.88 g/kWh เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 2.08% ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยจุดที่ 8 ประหยัดกว่าผลเฉลยจุดที่ 1 ถึง 2.08%

4.3.3 เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

สำหรับการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 โดยนำจุดผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตทุกจุดไปใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว จากการคำนวณได้ผลลัพธ์คือ ผลเฉลยจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 3101.57 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 3087.64 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 3077.35 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 3069.48 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 5 มีค่าเท่ากับ 3057.98 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 3046.47 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 7 มีค่าเท่ากับ 3020.44 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 8 มีค่าเท่ากับ 3002.28 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 9 มีค่าเท่ากับ 2997.43 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 10 มีค่าเท่ากับ 2990.17 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 11 มีค่าเท่ากับ 2975.03 g/kWh และผลเฉลยจุดที่ 12 มีค่าเท่ากับ 2956.87 g/kWh แสดงดังรูปที่ 4.60



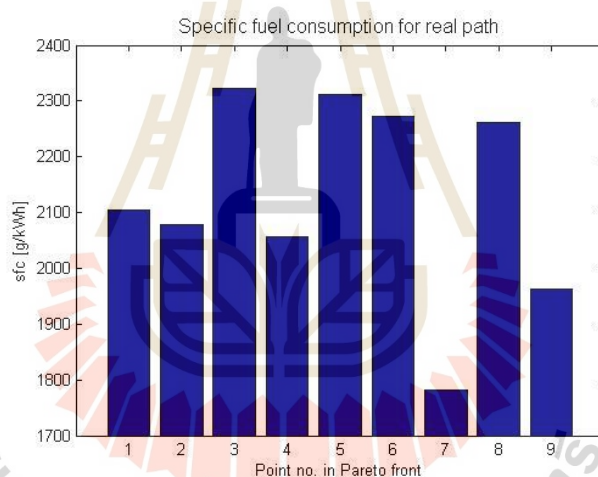
รูปที่ 4.60 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

จากรูปที่ 4.60 แสดงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของผลเฉลยทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 พบว่าจุดผลเฉลยที่มีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำที่สุดคือจุดที่ 12 มีค่าเท่ากับ 2956.87 g/kWh ดังนั้นเมื่อต้องการให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าต่ำที่สุดจึงต้องเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดนี้ดังรูปที่ 4.32 มีระยะทางเท่ากับ 17.0076 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 32.214 นาที ในทางตรงกันข้ามถ้าเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดที่ 1 ดังรูปที่ 4.21 จะทำให้การ

สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3101.57 g/kWh เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 4.67% ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยจุดที่ 12 ประหยัดกว่าผลเฉลยจุดที่ 1 ถึง 4.67%

4.3.4 เส้นทางจริงของการจราจร

สำหรับการหาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร โดยนำจุดผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตทุกจุดไปใช้ในการคำนวณค่าดังกล่าว จากการคำนวณได้ผลลัพธ์คือ ผลเฉลยจุดที่ 1 มีค่าเท่ากับ 2105.25 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 2 มีค่าเท่ากับ 2077.40 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 3 มีค่าเท่ากับ 2322.39 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 4 มีค่าเท่ากับ 2055.60 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 5 มีค่าเท่ากับ 2312.71 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 6 มีค่าเท่ากับ 2272.75 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 7 มีค่าเท่ากับ 1782.76 g/kWh, ผลเฉลยจุดที่ 8 มีค่าเท่ากับ 2261.24 g/kWh และผลเฉลยจุดที่ 9 มีค่าเท่ากับ 1962.36 g/kWh แสดงดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.61 การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

จากรูปที่ 4.61 แสดงค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของผลเฉลยทุกจุดบนขอบหน้าพาเรโตสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร พบว่าจุดผลเฉลยที่มีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำที่สุดคือจุดที่ 7 มีค่าเท่ากับ 1782.76 g/kWh ดังนั้นเมื่อต้องการให้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าต่ำที่สุดจึงต้องเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดนี้ดังรูปที่ 4.39 มีระยะทางเท่ากับ 1.298 กิโลเมตร และใช้เวลาในการเดินทางเท่ากับ 7.0404 นาที ในทางตรงกันข้ามถ้าเลือกใช้เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายของผลเฉลยจุดที่ 3 ดังรูปที่ 4.35 จะทำให้การสิ้นเปลือง

เชื้อเพลิงจำเพาะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2322.39 g/kWh เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 23.24% ซึ่งหมายความว่าผลเฉลยจุดที่ 7 ประหยัดกว่าผลเฉลยจุดที่ 3 ถึง 23.24%

4.4 สรุป

จากการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆข้างต้น ทำให้ได้ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดที่แสดงในรูปของขอบหน้าพาเรโต และค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจร ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลทั้งหมดดังนี้

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4

Grid size 4x4					
Point no. in Pareto		1	2	3	4
Bi-objective	Distance [km]	0.93	0.95	0.98	1.07
	Time [min]	6.55	6.26	6.02	5.34
sfc. [g/kWh]		2028.96	2043.49	2033.20	2010.80
Single-objective	Distance [km]	0.93	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-
Grid size 4x4					
Point no. in Pareto		5	6	7	8
Bi-objective	Distance [km]	1.09	1.10	1.15	1.16
	Time [min]	5.25	3.97	3.50	3.49
sfc. [g/kWh]		1995.06	1975.68	2001.11	2006.56
Single-objective	Distance [km]	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	3.49

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5

Grid size 5x5					
Point no. in Pareto		1	2	3	4
Bi-objective	Distance [km]	15.85	15.93	16.43	16.48
	Time [min]	50.68	48.17	46.22	42.55
sfc. [g/kWh]		2532.88	2528.03	2522.58	2519.56
Single-objective	Distance [km]	15.85	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-
Grid size 5x5					
Point no. in Pareto		5	6	7	8
Bi-objective	Distance [km]	16.84	16.87	17.54	19.40
	Time [min]	42.26	39.77	39.31	38.95
sfc. [g/kWh]		2521.98	2508.05	2500.79	2480.20
Single-objective	Distance [km]	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	38.95



ตารางที่ 4.7 ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6

Grid size 6x6							
Point no. in Pareto		1	2	3	4	5	6
Bi-objective	Distance [km]	11.41	12.34	12.39	12.98	13.44	14.07
	Time [min]	57.31	54.94	54.05	49.46	40.66	40.10
sfc. [g/kWh]		3101.57	3087.64	3077.35	3069.48	3057.98	3046.47
Single-objective	Distance [km]	11.41	-	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-	-	-
Grid size 6x6							
Point no. in Pareto		7	8	9	10	11	12
Bi-objective	Distance [km]	14.92	14.95	15.20	15.65	15.84	17.01
	Time [min]	38.88	37.41	36.26	35.08	33.59	32.21
sfc. [g/kWh]		3020.44	3002.28	2997.43	2990.17	2975.03	2956.87
Single-objective	Distance [km]	-	-	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-	-	32.21



ตารางที่ 4.8 ข้อมูลของผลเฉลยต่างๆสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

Real path						
Point no. in Pareto		1	2	3	4	5
Bi-objective	Distance [km]	1.275	1.278	1.280	1.282	1.285
	Time [min]	13.348	11.430	10.702	10.210	9.041
sfc. [g/kWh]		2105.250	2077.400	2322.390	2055.600	2312.710
Single-objective	Distance [km]	1.275	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-	-
Real path						
Point no. in Pareto		6	7	8	9	
Bi-objective	Distance [km]	1.287	1.298	1.339	1.610	
	Time [min]	7.563	7.040	6.913	6.910	
sfc. [g/kWh]		2272.750	1782.760	2261.240	1962.360	
Single-objective	Distance [km]	-	-	-	-	
	Time [min]	-	-	-	6.910	

เมื่อพิจารณาข้อมูลทั้งหมด พบว่าผลเฉลยเหมาะสมที่สุด หรือขอบหน้าพาเรโตของปัญหา ซึ่งภายในประกอบด้วยผลเฉลยต่างๆหลายจุด โดยผลเฉลยหนึ่งจุดคือ เส้นทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดเป้าหมายหนึ่งเส้นทาง โดยมีระยะทางและเวลาในการเดินทางโดยเฉพาะของแต่ละเส้นทาง ดังนั้นเมื่อต้องการเลือกใช้เส้นทางดังกล่าว ทำได้โดยการพิจารณาขอบหน้าพาเรโตของปัญหา เช่น เมื่อต้องการเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดให้เลือกใช้จุดของผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตจุดที่ 1 ในทางตรงกันข้ามถ้าต้องการเส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดให้เลือกใช้จุดของผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโตจุดสุดท้าย แต่ถ้าต้องการพิจารณาค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองร่วมกัน ดังนั้นทางเลือกของผู้ใช้งานคือ ทุกจุดของผลเฉลยบนขอบหน้าพาเรโต ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความพึงพอใจของผู้ใช้งานมีความต้องการค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองทำไร ซึ่งสามารถคิดเป็นอัตราส่วนได้ เช่น ต้องการค่าฟังก์ชันเป้าหมายทั้งสองเท่ากัน เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางช่วยในการตัดสินใจเลือกเส้นทางของผู้ใช้งาน โดยพิจารณาจากค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ซึ่งแต่ละเส้นทางมีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะแตกต่างกัน ดังนั้นถ้าเลือกเส้นทางที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะได้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้กล่าวถึง การสรุปผลการศึกษาเส้นทางเหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ ประกอบด้วย เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5 และ 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจร และข้อเสนอแนะสำหรับการคำนวณดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้หาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจร โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 แบบคือ เส้นทางจำลองแบบกริด ซึ่งถูกแบ่งออกเป็นขนาดต่างๆ ได้แก่ 4x4, 5x5 และ 6x6 และเส้นทางจริงของการจราจรบริเวณด้านหลังอนุสาวรีย์ท้าวสุรนารี โดยใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดที่ใช้เทคนิคการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำสำหรับการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยเหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการนี้เกิดจากการทำงานร่วมกันของวิธีการค้นหาแบบตาบอดกับวิธีการคัดสรรผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ สำหรับโปรแกรมที่ใช้คำนวณคือ โปรแกรม MATLAB Version R2010a

จากการวิจัยได้ศึกษาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดในปัญหาการหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของการจราจร พบว่าขั้นตอนวิธีการวิวัฒนาการสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ และได้ศึกษาการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีวิวัฒนาการ จึงได้ตัดสินใจเลือกใช้วิธีการค้นหาแบบตาบอดสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย ซึ่งวิธีการนี้มีพื้นฐานมาจากวิศศึกษาสำนึกขั้นสูง นั่นคือเป็นวิธีการแบบวิวัฒนาการเช่นกัน เนื่องจากวิธีการค้นหาแบบตาบอดมีข้อดีคือ สามารถใช้แก้ไขปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดเชิงผสมผสาน (Combination Optimization) ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีจำนวนตัวแปรออกแบบของแต่ละผลเฉลยไม่เท่ากัน และปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ต่อเนื่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากผลการคำนวณสามารถหาขอบหน้าพาเรโตของปัญหาในทุกกรณีศึกษาได้ นั่นคือสามารถหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเส้นทางจริงของการจราจรที่พิจารณาได้ ซึ่งขอบหน้าพาเรโตเป็นเซตของผลเฉลยต่างๆ ประกอบด้วยค่าระยะทาง และเวลาในการเดินทาง ใช้เวลาในการคำนวณเท่ากับ 19.13, 47.97, 159.93 และ 17.57 วินาที ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้รับทำให้รู้ว่าเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดอาจไม่ใช่เส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดเสมอไป เนื่องจากเส้นทางที่มีระยะทางสั้นที่สุดหรือ

เส้นทางที่ใช้เวลาในการเดินทางน้อยที่สุดในบางครั้งอาจยังไม่เพียงพอต่อการพิจารณาเลือกเส้นทางที่เหมาะสม ดังนั้นเส้นทางเหมาะสมที่สุดคือ เส้นทางที่สามารถตอบสนองความต้องการหรือความพึงพอใจของผู้ใช้งานได้มากที่สุดทั้งในเรื่องของระยะทางและเวลาในการเดินทาง

จากการคำนวณค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสามารถหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดของแต่ละกรณีศึกษาที่มีค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำที่สุด และสูงที่สุดได้ดังนี้ เส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 4x4 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1975.68 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 6 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2043.49 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 2 เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 3.32% สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 5x5 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2480.20 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 8 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2532.88 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 1 เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 2.08% สำหรับเส้นทางจำลองแบบกริดขนาด 6x6 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2956.87 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 12 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3101.57 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 1 เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 4.67% และเส้นทางจริงของการจราจรมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1782.76 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 7 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2322.39 g/kWh ของผลเฉลยจุดที่ 3 เมื่อเทียบอัตราส่วนของจุดทั้งสองมีค่าเท่ากับ 23.24% ซึ่งค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสามารถนำไปช่วยพิจารณาสำหรับการเลือกเส้นทางเหมาะสมที่สุดของผู้ใช้งานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการคำนวณทำให้ทราบว่าขั้นตอนการเขียน code ของ M-file function มีความซับซ้อนเนื่องจากต้องเขียนหลายไฟล์ที่ต้องเชื่อมต่อกันเพื่อรับ-ส่งข้อมูลจึงอาจทำให้เกิดความสับสนได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ความรอบคอบในการเขียน code และมันตรวจสอบจุดผิดพลาดของโปรแกรมให้ถี่ถ้วน และรีบแก้ไขโดยทันที จากการคำนวณของโปรแกรมพบว่า เมื่อมีจำนวนเส้นทางที่พิจารณาเพิ่มมากขึ้น หรือแผนที่ของการพิจารณากว้างขึ้นทำให้ต้องกำหนดจำนวนประชากรสำหรับการคำนวณให้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยกำหนดให้ nloop และ msol มีค่าสูงมาก ซึ่งส่งผลให้ใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น จึงจะได้ผลเฉลยเหมาะสมที่สุดดังที่ต้องการ และมีโอกาสสูงที่ผลเฉลยที่ได้รับยังไม่ใช่ผลเฉลยเหมาะสมที่สุด เนื่องจากกำหนดค่า nloop และ msol ไม่เพียงพอ สำหรับแนวทางแก้ไขทำได้โดยการแบ่งแผนที่ออกเป็นหลายส่วน เพื่อลดความหลากหลายของเส้นทางที่เป็นไปได้ และคำนวณหาผลเฉลยที่ละส่วนของแผนที่ สุดท้ายนำผลเฉลยที่ได้มารวมกันเพื่อเป็นเส้นทางเหมาะสมที่สุดดังที่ต้องการ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณมีค่าน้อยมากจึงเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการขับรถยนต์ในชีวิตประจำวัน หรือนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์นำทางอื่นๆ เช่น Google map เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- ชนัดชัย กุลวรรณิพงษ์. (2550). เทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุด. เอกสารประกอบการสอน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 197-205.
- ธีระยุทธ สุวรรณประทีป. (2550). วิศวกรรมยานยนต์ ฉบับเสริมประสบการณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.
- บรรณัญดี บริบูรณ์. (2548). การหาค่าตำแหน่งความผิดพลาดในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคด้วยการค้นหาแบบตาคู. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 80-82.
- บุญเสริม กิจศิริกุล. (2548). ปัญญาประดิษฐ์. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 31-42.
- สุจินต์ บุรีรัตน์. (2556). การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. ขอนแก่น: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์. (2551). บทที่ 4 วิศวกรรมจราจร. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. 140-143
- Abdullah Ates and Celaleddin Yeroglu. (2016). Optimal fractional order PID design via tabu search based algorithm. **Journal of ISA Transactions**. 60: 109-118.
- B. Lin, and D. C. Miller. (2004). Solving heat exchanger network synthesis problems with tabu search. **Journal of Computers and Chemical Engineering**. 28: 1451-1464.
- Fred Glover. (1986). Future paths for integer programming and likes to artificial intelligence. **Computers and Operations Research**. 13(5): 533-549.
- Gong Yan, Li Sujian and Xing Enhui. (2013). Least-time path algorithm based on missile guidance. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**. 13(6): 94-100.
- Google Map Website. **The map at rear of Thao Suranaree monument**. [On-line]. Available: <https://www.google.co.th/maps> (13 May 2016).

- ISUZU Industrial Diesel Engine. **The specific fuel consumption chart for engine type 4JJ1T.** [On-line]. Available: http://www.isuzu.co.jp/world/product/industrial/engines/jp/it4_4jj1t.html (8 August 2016).
- ISUZU Motor. **The Specification and Picture of ISUZU D-MAX 2016 Model Hi-Lander 4 door 3.0 Ddi(Z-Prestige).** [On-line]. Available: <http://isuzu-tis.com> (8 August 2016).
- Lust Thibaut and Teghem Jacques. (2006). Multicriteria maintenance problem resolved by tabu search. **Information Control Problems in Manufacturing**, 12(1): 481-486.
- Maria da Conceicao Cunha and Luisa Ribeiro. (2004). Tabu search algorithms for water network optimization. **European Journal of Operational Research**, 157: 746-758.
- Mostafa Ranjbar, Steffen Marburg and Hans-Jurgen Hardtke. (2012). Structural-acoustic optimization of a rectangular plate a tabu search approach. **Journal of Finite Elements in Analysis and Design**, 50: 142-146.
- Soliman Abdel-Hady Soliman and Abdel-Aal Hassan Mantawy. (2012). **Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems**. New York: Springer Science Business Media.
- Sujin Bureerat and Krit Sriworamas. (2013). Simultaneous topology and sizing optimization of a water distribution network using a hybrid multiobjective evolutionary algorithm. **Journal of Applied Soft Computing**, 13: 3693-3702.
- Symeon E. Christodoulou, A. M. ASCE and Georgios Ellinas. (2010). Pipe routing through ant colony optimization. **Journal of Infrastructure System**, 16(2): 149-159.
- Thititon Srisuwandee and Rapeepan Pitakaso. (2012). Solving vehicle routing problem by using ant colony optimization case study in jiaranai drinking water company. **KKU Research Journal**, 17(5): 706-714.
- Transportation Research Board. (2000). **Highway Capacity Manual** (4th ed.). Washington DC: National Research Council.
- Willard W. Pulkrabek. (1997). **เครื่องยนต์สันดาปภายใน**. แปลจาก Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine โดย เจษฎา ตันตเศรษฐี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: Pearson Education Indochina.



ภาคผนวก ก

โปรแกรม MATLAB ที่ใช้งานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การหาเส้นทางเหมาะสมที่สุดสำหรับเส้นทางจริงของการจราจร

```

function tabu_search
%% bi-objective in min. distance and min. time
%% written by Jetsada Meeruang
%% Dominated technique by Professor Dr.Sujin Bureerat
%% Real map problem

clc; clear all; close all;

%% start
s_i=26; %% input start point
f_i=10; %% input finish point
save solution s_i f_i

nloop=50; n_sol=15; tabu_slot=20;

fout='Tabu_search';
tabu_list=zeros(tabu_slot);
fitness=zeros(tabu_slot,1);
ftime=zeros(tabu_slot,1);
free_list=0; free_fitness=0; free_ftime=0; free_i=1;
search_t=0; fpareto=0; ppareto=0;

tic % time start

[tabu_list,fitness,ftime]=initial(n_sol,tabu_slot);

iter = 0;

while iter < nloop
iter = iter+1; fprintf('Iteration no. %d\n',iter)

searching neighborhood solution

```

```

if search_t==1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% long term memory & Aspiration criterion
i=1;
while i<=n_sol
xx(i,:)=0; f(i)=0; ft(i)=0;
main2(free_list,free_fitness,free_ftime);
load data_Tabu3.mat
f(i)=sum_path; ft(i)=sum_con;
popj=filter_pop(popj); a=length(popj);
for i1=1:a
xx(i,i1)=popj(1,i1); end
p1=compare1(tabu_list,xx(i,:),tabu_slot);
aa=0;
while aa~=1
if p1==0
i=i-1; %%%%%%%%%%% disp(' repeat ')
break ; end
aa=1; end
i=i+1; end
f0=0; f0=dominance(f,ft);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); c=length(f1);
i1=1;
for i=1:n_sol
for j=1:c
if f(i)==f1(j)
nsort(i1)=i; i1=i1+1;
end; end; end;
f1=0; f1=f(nsort); f2=ft(nsort);
XX=xx(nsort(:,:),:); c=length(f1);

```

```

for i=1:c
[tabu_list,fitness,ftime]=compare2(tabu_list,fitness,ftime,f1(i),XX(i,:),f2(i),tabu_slot);
end
xx(:)=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
search_t=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% short term memory & neighborhood search
else
i=1;
while i<=n_sol
xx(i,:)=0; f(i)=0; ft(i)=0;
run main
load data_Tabu1.mat
f(i)=sum_path; ft(i)=sum_con;
popj=filter_pop(popj); a=length(popj);
for il=1:a
xx(i,il)=popj(1,il); end
p1=compare1(tabu_list,xx(i,:),tabu_slot);
aa=0;
while aa~=1
if p1==0
i=i-1; %%%%%%%%%%% disp(' repeat ')
break ; end
aa=1; end
i=i+1; end
f0=0; f0=dominance(f,ft);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); c=length(f1);
il=1;
for i=1:n_sol

```

```

for j=1:c
if f(i)==f1(j)
nsort(i1)=i; i1=i1+1;
end; end; end;
f1=0; f1=f(nsort); f2=ft(nsort);
XX=xx(nsort(:,:)); c=length(f1);
for i=1:c
[tabu_list,fitness,ftime]=compare2(tabu_list,fitness,ftime,f1(i),XX(i,:),f2(i),tabu_slot);
end
xx(:)=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
i=1;
while i<=n_sol
xx(i,:)=0; f(i)=0; ft(i)=0;
main1(XX,f1,f2); load data_Tabu2.mat
f(i)=sum_path; ft(i)=sum_con;
popj=filter_pop(popj); a=length(popj);
for il=1:a
xx(i,il)=popj(1,il); end
p1=compare1(tabu_list,xx(i,:),tabu_slot);
aa=0;
while aa~=1
if p1==0
i=i-1; %%%%%%%%% disp(' repeat ')
break ; end
aa=1; end
i=i+1; end
f0=0; f0=dominance(f,ft);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); c=length(f1);

```



```

i1=1;
for i=1:n_sol
for j=1:c
if f(i)==f1(j)
nsort(i1)=i; i1=i1+1;
end; end; end;

f1=0; f1=f(nsort); f2=ft(nsort);
XX=xx(nsort(:,:)); c=length(f1);

for i=1:c
[tabu_list,fitness,ftime]=compare2(tabu_list,fitness,ftime,f1(i),XX(i,:),f2(i),tabu_slot);
end
xx(:)=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% plot %%%%%%%%%
figure(1),hold on
plot(fitness,ftime,'ob')
title(['TABU Search Iteration = ' num2str(iter)])
ylabel('Time [minute]'),xlabel('Distance [km]')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Dominance in Tabu list %%%%%%%%%
if sum(ismember(fitness(:,0))==0)
f0=0; f0=dominance(fitness,ftime);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); f2=f0(2,:); c=length(f1);
i1=1;
for i=1:tabu_slot
for j=1:c
if (fitness(i)==f1(j))&&(ftime(i)==f2(j))
nsort(i1)=i; i1=i1+1;
end; end; end;

```

```

f1=0; f2=0; nsort1=0;
i1=1;
for i=1:length(nsort)
if sum(ismember(nsort(i),nsort1(:)))==0
nsort1(i1)=nsort(i); i1=i1+1;
end; end;
f1=fitness(nsort1); f2=ftime(nsort1);
XX=tabu_list(nsort1(:,:));
f111=[0]; f222=[0];
n=0; i1=1;
for i=1:length(f1)
i2=0;
for j=1:(length(f111))
if (f1(i)~=f111(j))||(f2(i)~=f222(j))
i2=i2+1;
end; end;
if i2==(length(f111))
f111(i1)=f1(i); f222(i1)=f2(i);
n(i1)=i; i1=i1+1;
end; end;
f11=0; f22=0; XXX=0;
f11=f1(n); f22=f2(n); XXX=XX(n(:,:));
if free_i==1
nsortj=1; fitnessj=0; ftimej=0; tabu_listj=0;
fitnessj=f1(n); ftimej=f2(n); tabu_listj=XX(n(:,:));
else
c=length(f11);
fitnessj=0; ftimej=0; tabu_listj=0;
nsort=0; nsortj=0;
i1=1;

```

```

for i=1:c
i2=0;
for j=1:dd
if (f11(i)~=free_fitness(j))||(f22(i)~=free_ftime(j))
i2=i2+1;
end; end;
if i2==dd
nsort(i1)=i;
i1=i1+1; nsortj=1;
end; end;
if nsortj==0
%%%%%%%%% disp('%%%%%%%% non-dominance %%%%%%%%%')
else
fitnessj=f11(nsort); ftimej=f22(nsort);
tabu_listj=XXX(nsort(:,:));
end; end;
if nsortj==0
%%%%%%%%% disp('use long term memory')
search_t=1;
else
c=length(fitnessj);
[tabu_listj,jk]=filter2_pop(tabu_listj,c);
for i=1:c
for j=1:jk(i)
free_list(free_i,j)=tabu_listj(i,j); end
free_fitness(free_i)=fitnessj(i);
free_ftime(free_i)=ftimej(i);
free_i=free_i+1; dd=length(free_fitness);
end; end;
tabu_nf=0;

```

```

else
tabu_nf=1; end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
end
if tabu_nf==1
disp('----- Tabu list no full -----')
disp('----- Increase nloop&nsol and Run again -----')
else
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Dominance in Free list %%%%%%%%%%%%%%%
disp('Dominance in feasible solutions')
f0=0; f0=dominance(free_fitness,free_fime);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); f2=f0(2,:); c=length(f1);
i1=1;
for i=1:(length(free_fitness))
for j=1:c
if (free_fitness(i)==f1(j))&&(free_fime(i)==f2(j))
nsort(i1)=i; i1=i1+1;
end; end; end;
f1=0; f2=0; nsort1=0;
i1=1;
for i=1:length(nsort)
if sum(ismember(nsort(i),nsort1(:)))==0
nsort1(i1)=nsort(i); i1=i1+1;
end; end;
f1=free_fitness(nsort1); f2=free_fime(nsort1);
XX=free_list(nsort1(:,:));
f111=[0]; f222=[0];
n=0; i1=1;
for i=1:length(f1)

```

```

i2=0;
for j=1:(length(f111))
if (f1(i)~=f111(j))|(f2(i)~=f222(j))
i2=i2+1;
end; end;
if i2==(length(f111))
f111(i1)=f1(i); f222(i1)=f2(i);
n(i1)=i; i1=i1+1;
end; end;
f11=0; f22=0; XXX=0;
f11=f1(n); f22=f2(n); XXX=XX(n(:),:);
c=length(f11); tabu_list1=0;
[XXX,jk]=filter2_pop(XXX,c);
for i=1:c
for j=1:jk(i)
tabu_list1(i,j)=XXX(i,j);
end; end;
nsort=0; fpareto1=0; fpareto2=0;
[fpareto1,nsort]=sort(f11);
fpareto2=f22(nsort);
ppareto=tabu_list1(nsort(:),:);
fpareto=[fpareto1;fpareto2];
%%%%%%%%%%%%%% summary %%%%%%%%%%%%%%%
Time=toc % time finish [second]
figure(1),hold on
plot(fpareto(1,:),fpareto(2:,:), 'sr','MarkerSize',10)
title('Answer and Pareto of TABU Search')
ylabel('Time [minute]'),xlabel('Distance [km]')
figure(2),hold on
plot(fpareto(1,:),fpareto(2:,:), 'sr','MarkerSize',10)

```

```

title('Pareto of TABU Search')
ylabel('Time [minute]',xlabel('Distance [km]')
for i=1:length(fpareto1)
text(fpareto1(i),fpareto2(i),[" num2str(i)'],'FontSize',18)
end
save(fout,'Time','free_list','free_fitness','free_fime','fpareto','ppareto')
%%%%%%%%%%%% Save the final solutions to fout
end
end

function p1=compare1(f1,f2,cd)
p1=1; p2=0; d=0;
[f1,jk]=filter2_pop(f1,cd);
f2=filter_pop(f2);
for i=1:cd
p=0; bb=length(f2); jj=1;
if bb==jk(i)
b=jk(i); jj=1;
else
b=bb; jj=0; end
if jj==1;
for i1=1:b
if sum(ismember(f1(i,i1),f2(1,i1)))==1
p=p+1;
end; end;
else end
p2(i)=p; d(i)=b; end
for i=1:cd
if sum(ismember(p2(i),d(i)))==1
p1=0;

```



```

end; end;
end

function [tl,tf,tt]=compare2(tal,taf,tat,f1,x1,ft,cd)
tff=0; tll=0; ttt=0;
for i=1:cd
if i==cd
tf(i)=f1;
else
tff=taf(i+1); tf(i)=tff;
end; end;
for i=1:cd
if i==cd
tt(i)=ft;
else
ttt=tat(i+1); tt(i)=ttt;
end; end;
x1=filter_pop(x1); [tal,jk]=filter2_pop(tal,cd);
for i=1:cd
if i==cd
tl(i,:)=0; b=length(x1);
for i1=1:b
tl(i,i1)=x1(i1); end
else
tll=0;
for i1=1:jk(i+1)
tll(i1)=tal((i+1),i1); end
tl(i,:)=0;
for i1=1:jk(i+1)
tl(i,i1)=tll(i1);

```

```

end; end; end;
end

function [tabu_list,fitness,ftime]=initial(n_sol,tabu_slot)
xx=0; f=0; ft=0;
for i=1:n_sol
run main
load data_Tabu1.mat
f(i)=sum_path; ft(i)=sum_con;
popj=filter_pop(popj); a=length(popj);
for il=1:a
xx(i,il)=popj(1,il); end; end;
f0=0; f0=dominance(f,ft);
f1=0; nsort=0; f2=0; XX=0;
f1=f0(1,:); c=length(f1);
il=1;
for i=1:n_sol
for j=1:c
if f(i)==f1(j)
nsort(il)=i; il=il+1;
end; end; end;
f2=ft(nsort); XX=xx(nsort(:),:);
[XX,jk]=filter2_pop(XX,c);
for i=1:c
for j=1:jk(i)
tabu_list(tabu_slot+1-i,j)=XX(i,j); end
fitness(tabu_slot+1-i)=f1(i);
ftime(tabu_slot+1-i)=f2(i);
end
end
end

```



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Jetsada Meeruang and Teetut Dolwichai. (2016). **Optimum criterion of the vehicle navigation for saving the fuel consumption by tabu search algorithm with non dominated technique.** 2016 The 7th International Conference on Advanced Computer Control (ICACC). 10-11 December 2016 in Hong Kong. China.



Optimum Criterion of the Vehicle Navigation for Saving the Fuel Consumption by Tabu Search Algorithm with Non Dominated Technique

Jetsada Meeruang

School of Mechanical Engineering,
Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, Thailand, jetsada.mee@hotmail.com

Teetut Dolwichai

School of Mechanical Engineering,
Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, Thailand, prapun@sut.ac.th

Abstract—Vehicle navigation now a day, it has used the navigation devices for guided the user to get the destination point. The requirement of the user in general must be arrived by the right destination. In usual work of navigation system, it directed the path with shortest path, by did not calculate the time consuming as the traffic condition. Which effect to fuel consumption of the vehicle. The vehicle fuel consumption for running in the city has known as high because of it almost run on low load which the engine must be consumed more fuel. If the navigation system can be directed the path with short time or short distance, the vehicle can be saved the fuel. According to the navigation system, it is the optimization problem with 2 objectives; minimization of the time and the distance. Tabu search algorithm (TS) is used for this work. It efficient for working with the multi variables and unequal variable for each navigation. The navigation examples are simulated with 4x4, 5x5 and 6x6 grid path. All of the path are assigned the traffic condition by using the level of service (LOS) which shown the ratio between volume and road capacity. The optimum solution path can be shown as the Pareto frontier. It can be used for alternating choice of the path in navigation system. The minimum time criterion is effective in decreasing of specific fuel consumption (sfc) than the distance criterion with the percentage of 5.54%.

Keywords—Tabu search algorithm; Path optimization; Fuel consumption.

I. INTRODUCTION

Now a day, almost of travelling by car is used the navigation device for guidance the travelling path. The navigation device in usual has limitation of guidance algorithm. It has only the shortest path which is guided, but not included the effected of traffic condition. The fuel consuming of the vehicle are directed by traffic condition or load condition, so that the navigation system must be guided optimal path.

The navigation criterion for guidance the user in usual are clarify by two criterions, the first is shortest distance criterion, and the second is shortest time criterion. The seeking of the optimal path is the optimization problem with 2 objectives criterion. There are many researcher that has shown the method for seeking the optimal solution. One of the effective method for this work is Tabu search algorithm (TS) [1]. It based on the Meta-Heuristic algorithm. Because of the problem is 2 objective criterion, the non-dominated technique is used. The set of optimal paths are collected in the Pareto frontier. The algorithm of TS starting with

randomized the path which is the set of candidate search. The candidate set are evaluated to be the optimal solution for the first iteration. Some of that are collected for comparing with the future iteration in tabu list. The TS are used in many optimization problem, such as heat exchanger design problem [2], Sizing optimization [3], finance cost optimization [4], control optimization with PID [5] and water distribution network design [6] etc.

II. OPTIMIZATION OF THE PATH NAVIGATION

A. Path navigation modeling

The destination point is the target of the navigation devices. In actually, it simulated the path for guide the user with the shortest path. The path solution is made by summing the individual path until reach the destination point as shown in (1). As the same manner for the time travelling function, it can be shown as (2).

$$f_1(\text{distance}) = x_1 + x_2 + \dots + x_i \quad (1)$$

$$f_2(\text{time}) = t_1(x_1) + t_2(x_2) + \dots + t_i(x_i) \quad (2)$$

Where x_i is the i th individual path which is the design variable (km).

$t_i(x_i)$ is the i th individual travelling time for drive on x_i path (min).

$f_1(\text{distance})$ is the objective function of navigation distance (km).

$f_2(\text{time})$ is the objective function of the travelling time (min).

Optimization of the path navigation can be written as (3) [7].

$$\min_x (f(x)) = \min (f_1(\text{distance}), f_2(\text{time})) \quad (3)$$

The solution of navigation problems in actually are not equal design variables because of each solution are simulated by the addition of individual path which not necessary the same number of the path. In addition, the travelling time function in the function of the path. In usual of the navigation devices user almost need to get the destination point by rapidly and shortest path which it is not impossible when consideration the traffic condition included. Also that

considered the vehicle consumption together with, it can be saved if the navigation guide with the optimum path. Therefore, if the navigation guide path is considered as the bi-objective optimization, the optimal path solution can be shown by Pareto frontier as shown in Fig.1. The optimal solutions are coincident as the solid line.

B. Traffic Condition

In general, the vehicle fuel consumption depends on the vehicle load and the speed. It can be realized with the navigation guide by added the traffic condition in the form of the Level of Service (LOS) which show that the traffic quality [8, 9]. LOS is defined by ratio of traffic volume per road capacity (v/c ratio) which its value in range of 0 to 1. It can be classified by 6 levels: A, B, C, D, E, and F as shown in Fig.2. In addition, the value of LOS shown the traffic state as the movement, the speed and number of the car on that path. The vehicle speed in each LOS are the function of travelling time, LOS-A is located is in the zone of lowest LOS value with high speed that implied the traffic is good, in the other hand for LOS-F that bad traffic situation.

The vehicle fuel consumption for this work are assigned on each individual path for 6 LOS by setting the speed of the ISUZU D-Max 2016 engine [10] that running on gear 4 as follow its specific fuel consumption chart as shown in Fig.3 and converts to the specific fuel consumption (SFC) for each navigation path.

C. Path navigation examples

Paths modeling are simulated by grid path with grid size as 4x4, 5x5, and 6x6 as shown in Fig.4, there are simplification of the real path as shown in Fig.5 which easy for program coding. Each of the path are assigned the distance and the LOS which can be realized the traffic condition.

D. Path navigation optimizer

This work used the Tabu search algorithm with non-dominated technique to filter the solution of the path navigation which accept of the two objective as the (3). The Tabu search algorithm with non-dominated technique can be described by Fig.6. It algorithm are initiated by randomized the path navigation for equal to the number of Tabu candidate. The non-dominated technique is filed the optimum solution. The optimal solutions set are collected in the box of Tabu list which replaced by the better solution in the next iteration.

III. RESULT AND DISCUSSION

According to the all grid path modelling, the optimal path navigation sets are shown as the Pareto frontier as shown in Figs.7-9. All of that Pareto frontier, the grid size 6x6 got the maximum number of the optimum path navigation which are shown that only this grid size.

The optimum path navigation for grid size 6x6 are show in Fig.10, it shown that first solution is the solution for the first objective (distance is shortest) and the last solution is the solution for the second objective (time travelling shortest).

All of the solution can be shown the path distance, travelling time and the SFC if that vehicle is driven on that navigation guide as shown in Table. I.

TABLE I THE OBJECTIVE VALUE FOR SOLUTION PATH NAVIGATION OF GRID MODELING WITH GRID SIZE 6x6

Grid size 6x6					
Point no. in Pareto set	1	2	3	4	
Bi-Objective	Distance [km]	11.41	12.33	12.39	13.44
	Time [min]	33.72	32.50	32.23	25.08
SFC. [g/kWh]		3015	2992	2972	2942
Single-Objective	Distance [km]	11.41	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-

Grid size 6x6					
Point no. in Pareto set	5	6	7	8	
Bi-Objective	Distance [km]	14.07	14.92	14.95	15.19
	Time [min]	24.76	23.59	22.98	21.90
SFC. [g/kWh]		2925	2903	2882	2879
Single-Objective	Distance [km]	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	-

Grid size 6x6					
Point no. in Pareto set	9	10	11	12	
Bi-Objective	Distance [km]	15.65	15.84	16.82	17.00
	Time [min]	21.32	20.41	20.06	19.15
SFC. [g/kWh]		2866	2857	2858	2848
Single-Objective	Distance [km]	-	-	-	-
	Time [min]	-	-	-	19.15

According to Table. I, the optimum path distance is shown as oppose with the travelling time that implied the traffic condition is effected to the navigation time and distance. It shown that path navigation solution with long distance has short travelling time.

Consideration of the SFC, its value is direct variation with the travelling time, so that the SFC of the vehicle will save as the short travelling time. The saving of vehicle SFC can be compared between the minimum of the travelling time and the minimum of the path distance for 5.54%.

IV. CONCLUSIONS

The path navigation optimization can be used the Tabu search algorithm with the non-dominated technique with good efficient. The path navigation examples is shown that the saving of SFC for used the optimum travelling time for 5.54%, and it can be apply with realize map that will be developed in the future.

ACKNOWLEDGMENT

The author is grateful for the financial support from Suranaree University of Technology.

REFERENCES

- [1] Glover, F., "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence," Computers and Operations Research, vol.13, pp. 533-549, 1986.
- [2] B. Lin, and D. C. Miller, "Solving Heat Exchanger Network Synthesis Problem with Tabu Search," Journal of Computers and Chemical Engineering, vol.28, pp.1451-1464, 2004.
- [3] Mostafa, R., Steffen, M., and Hans-Jurgen, H., "Structural-Acoustic Optimization of a Rectangular Plate: A Tabu Search Approach," Journal of Finite Elements in Analysis and Design, vol.50, pp.142-146, 2012.
- [4] Lust, T. and Tezhem, J., "Multicriteria Maintenance Problem Resolved by Tabu Search," Journal of Mathematics and Operational Research, 2006.
- [5] Abdullah, A. and Celaledin, Y., "Optimal Fractional Order PID Design via Tabu Search based Algorithm," Journal of ISA Transactions, vol.60, pp.109-118, 2006.
- [6] Maria da, C.C. and Luisa, R., "Tabu Search Algorithms for Water Network Optimization," Journal of Operational Research, vol.157, pp.746-758, 2004.
- [7] Sujin, B., "Optimization of mechanical engineering system," 1st edition, Khon kaen university, Khon Kaen, Thailand, 2013.
- [8] Papacostas, C.S. and Prevedouras, P.D., "Transportation Engineering and Planning," 2nd edition, New Jersey, USA, 1993.
- [9] Transportation Research Board, "Highway Capacity Manual," 4th edition, Washington DC, USA, 2000.
- [10] Information on [http:// www.isuzu.co.jp/world/product/industrial/](http://www.isuzu.co.jp/world/product/industrial/).

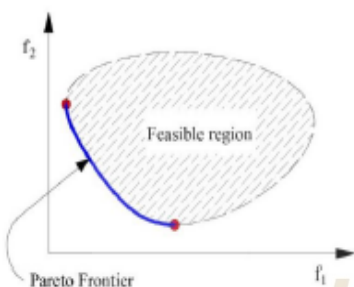


Figure 1. Pareto frontier for bi-objective problem

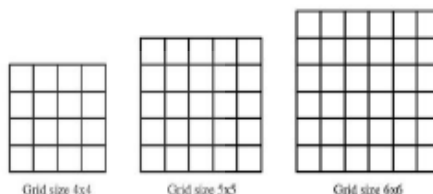


Figure 4. Grid size modeling

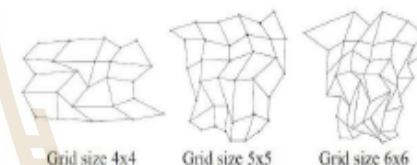


Figure 5. Real path modeling

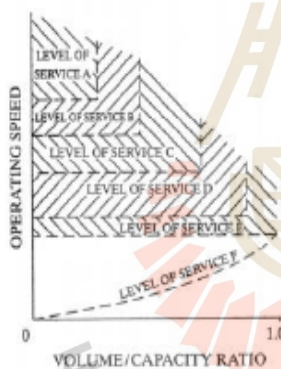


Figure 2. Level of service (LOS) chart

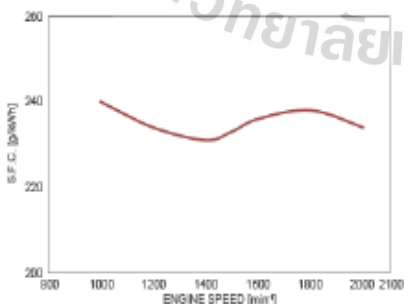


Figure 3. Specific fuel consumption chart [10]

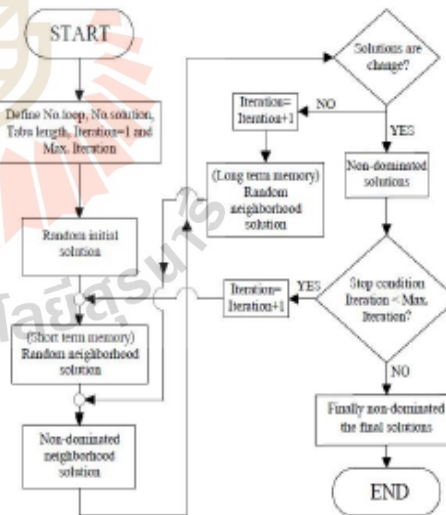


Figure 6. Flow chart of Tabu search algorithm with non-dominated technique

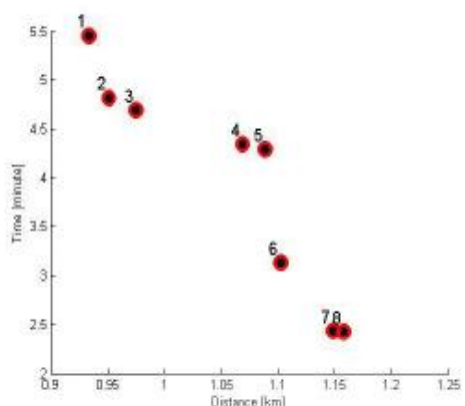


Figure 7. Pareto front of grid path size 4x4

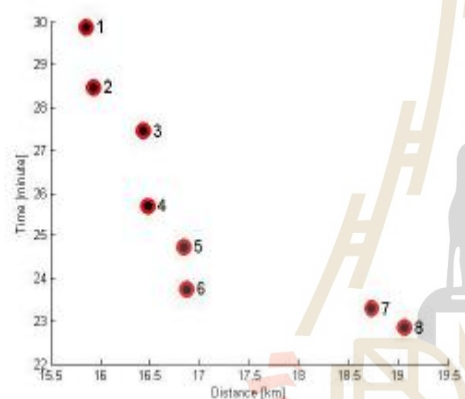


Figure 8. Pareto front of grid path size 5x5

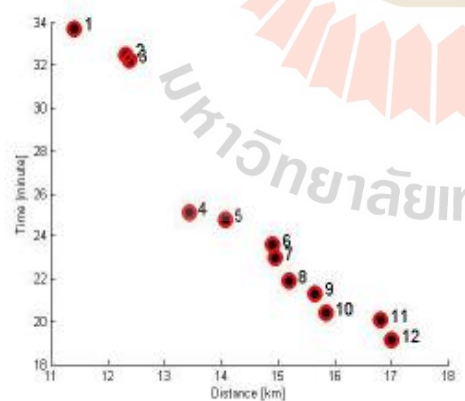


Figure 9. Pareto front of grid path size 6x6

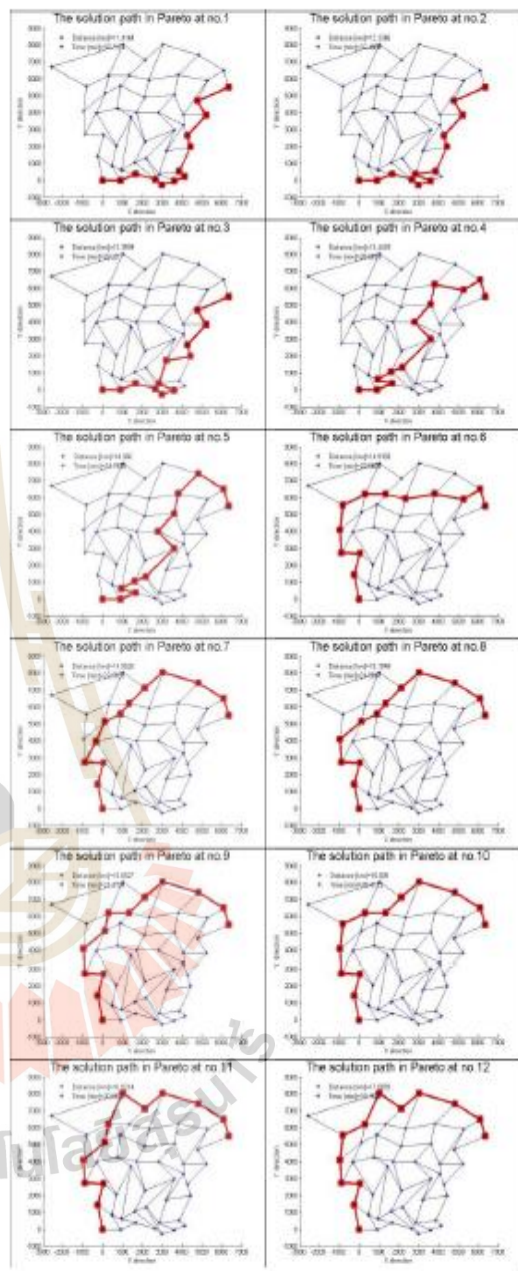


Figure 10. The solution of Pareto set for grid size 6x6

ประวัติผู้เขียน

นายเจษฎา มีเรื่อง เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2534 มีภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่ อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบ้านสวนวิทยาคม จังหวัดสุโขทัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2556 ต่อมาได้ไปทำงานที่บริษัท Mitsubishi Elevator (Thailand) Co., Ltd. ตำแหน่ง Design Engineer และในภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2557 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อพัฒนาความรู้และความสามารถให้กับตนเอง ในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 4 รายวิชา คือ (1) Engineering Graphics I (2) Engineering Graphics II (3) Mechanical Drawings และ (4) Geometric Dimensioning and Tolerances ซึ่งทำให้เพิ่มพูนความรู้ความสามารถและประสบการณ์ต่าง ๆ ในการนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย