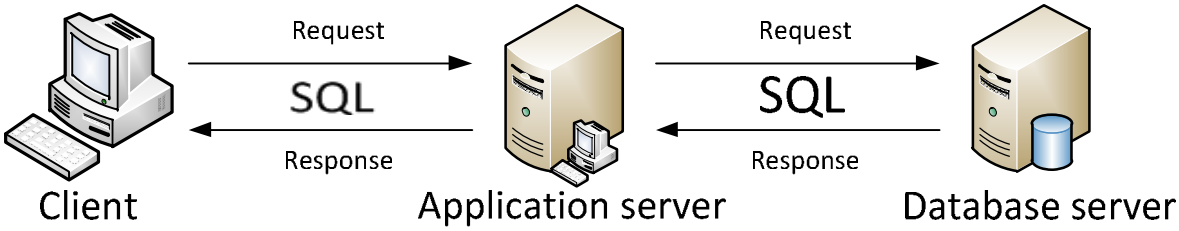
# 4 ระบบบริหารงานบำรุงทางหลวง (TPMS)

## 4.1 การพัฒนาสถาปัตยกรรมของระบบ TPMS

สถาปัตยกรรมของระบบ TPMS เดิมเป็นรูปแบบ Two – Tiers ซึ่งเป็นรูปแบบที่ผู้ใช้งานจะส่งคำสั่งจากเครื่องลูกข่าย (Client) เรียกข้อมูลจากเครื่องแม่ข่าย (Database Server) โดยตรง มาเป็นรูปแบบ Three -Tiers โดยมี Application Server เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงระบบสำหรับการสืบเรียกข้อมูลระหว่างเครื่องลูกข่ายและเครื่องแม่ข่ายมาประมวลผล ทั้งนี้ลักษณะการประมวลผลเพื่อวิเคราะห์แผนงานและงบประมาณซ่อมบำรุงนั้นยังคงใช้ทรัพยากรของเครื่องลูกข่ายในการประมวลเหมือนเดิม ซึ่งภาพรวมและองค์ประกอบของระบบ TPMS นี้ ได้แก่ Client Application Server และ Database Server แสดงดังรูปที่ 3.1




รูปที่ 4.1 สถาปัตยกรรมของระบบ TPMS

จากรูปที่ 4.1 ลักษณะการทำงานของระบบมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เครื่องลูกข่ายจะติดต่อผ่าน Application server ทำให้ระบบสามารถรองรับปริมาณเครื่องลูกข่ายได้เพิ่มมากขึ้น แทนที่เครื่องลูกข่ายจะติดต่อกับเครื่อง Database Server ที่ทำงานเป็นฐานข้อมูลกลางโดยตรง
2. การติดต่อระหว่าง Application Server กับเครื่องแม่ข่ายฐานข้อมูลจะเป็นแบบ Request/Response ภายใต้โปรโตคอลแบบ TCP/IP โดยที่ข้อมูลที่ส่งระหว่าง Application Server กับ Database Server จะใช้มาตรฐาน SQL (Structured Query Language) ซึ่งเป็นมาตรฐานการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องลูกข่ายกับเครื่องแม่ข่ายในปัจจุบัน
3. ความปลอดภัยของระบบจะปลอดภัยมากขึ้น เนื่องจากพอร์ตที่เครื่อง Database Server จะอนุญาตให้เฉพาะเครื่อง Application Server เข้าได้เพียงเครื่องเดียว ดังนั้นจึงไม่มีผู้ใช้อื่นสามารถ

เข้าถึง Database Server ได้ นอกจากนั้น Application Server จะมีการตรวจสอบสิทธิของเครื่องลูกข่ายก่อนดึงข้อมูลจากเครื่องแม่ข่ายฐานข้อมูล

## 4.2 โครงสร้างฐานข้อมูลของระบบ TPMS

โครงสร้างฐานข้อมูลของระบบ TPMS เป็นตารางข้อมูลหนึ่งที่จัดเก็บอยู่ในระบบฐานข้อมูลกลาง (CRDB) ซึ่งใช้ชื่อตารางว่า TPMS2010 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.) โดยเป็นการประมวลผลจากข้อมูลโครงข่ายทางทุกๆ 25 เมตรและสร้างเป็นตารางข้อมูลความละเอียดทุกๆ 1 กิโลเมตรเพื่อให้ระบบ TPMS สืบเรียกนำไปใช้ สำหรับการสืบเรียกตารางข้อมูลดังกล่าวนั้น ผู้ดูแลรักษาระบบ TPMS ควรปรับปรุงให้มีความทันสมัยก่อนการวิเคราะห์เสมอ เนื่องจากเมื่อมีการสืบเรียกข้อมูลโครงข่ายทางเสร็จเรียบร้อย ข้อมูลจะถูกบันทึกใน Database Server ของระบบ TPMS เพื่อทำหน้าที่ในการส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องประมวลผลในแต่ละหน่วยงาน (Client) ซึ่งหากข้อมูลในระบบฐานข้อมูลกลาง (CRDB) มีการเปลี่ยนแปลง แต่ผู้ดูแลรักษาระบบ TPMS ไม่ปรับปรุงให้ข้อมูลสอดคล้องกับสภาพปัจจุบันก็จะส่งผลให้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากระบบ TPMS คลาดเคลื่อนไปด้วย ในส่วนของสืบเรียกข้อมูลโครงข่ายทางผู้ดูแลระบบ TPMS สามารถดำเนินการได้จากหน้าจอการจัดการข้อมูลของโปรแกรม TPMS ตามขั้นตอนดังนี้

1. เลือกโครงข่ายทางที่ต้องการปรับปรุง ในระดับประเทศ หรือ ระดับสำนัก หรือ ระดับแขวง
2. กรอกข้อมูล ชื่อ Hostname ชื่อ Database ชื่อผู้ปรับปรุง รหัสผ่าน ชื่อ port และปีฐาน
3. กดปุ่ม ดึงข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.2

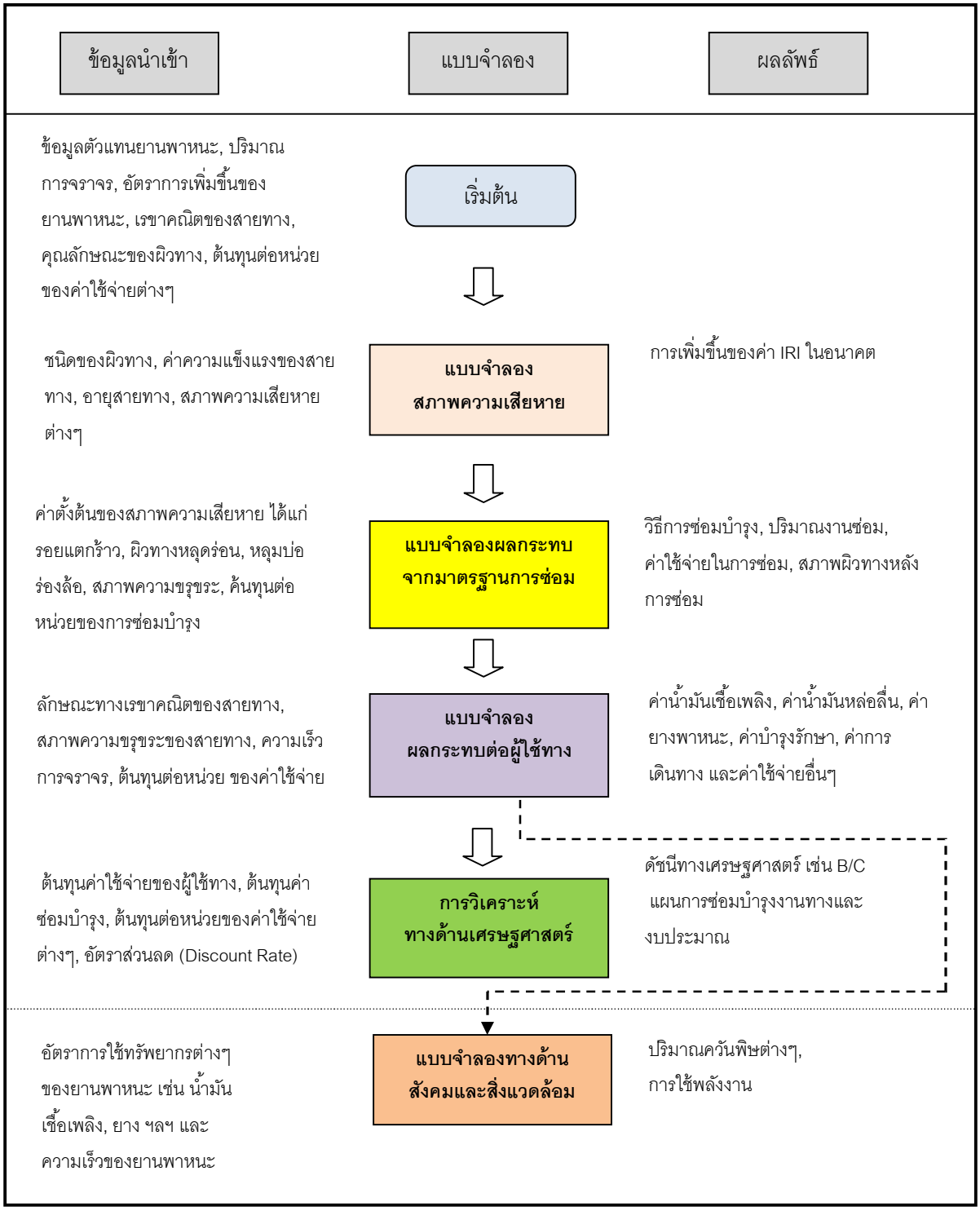


รูปที่ 4.2 หน้าจอการจัดการข้อมูลโครงข่ายทาง

## 4.3 องค์ประกอบของระบบ TPMS

ระบบ TPMS ประกอบไปด้วยแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์จัดสรรงบประมาณบำรุงทางได้แก่ แบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทาง (Deterioration Model) แบบจำลองผลกระทบจากการซ่อมบำรุง (Road Work Effect Model) แบบจำลองผลกระทบต่อผู้ใช้ทาง (Road User Effect Model) แบบจำลองทางด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม (Social & Environmental Model) และการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Analysis) เพื่อวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการซ่อมบำรุงและจัดลำดับความสำคัญของโครงการซ่อมบำรุง ซึ่งแบบจำลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้นมีความสัมพันธ์เชื่อมโยงต่อกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยการวิเคราะห์แผนและงบประมาณในการซ่อมบำรุงเริ่มจากการเตรียมข้อมูลนำเข้าที่จำเป็นซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ข้อมูลสายทาง ข้อมูลตัวแทนยานพาหนะ และข้อมูลมาตรฐานการซ่อมบำรุงของกรมทางหลวง จากนั้นเป็นการวิเคราะห์สภาพความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคตของผิวทาง ซึ่งในส่วนของแบบจำลองการเสื่อมสภาพความของสายทางนั้น จะวิเคราะห์และทำนายค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เมื่อสามารถทำนายสภาพผิวทางได้แล้ว ลำดับต่อมาเป็นการเลือกวิธีการซ่อมบำรุง โดยใช้แบบจำลองผลกระทบจากการซ่อมบำรุงที่พัฒนาขึ้นเป็นตัวกำหนดสภาพผิวทางหลังการซ่อมและค่าใช้จ่ายในการซ่อม ซึ่งผลการวิเคราะห์สภาพผิวทางของทั้ง 2 แบบจำลองนี้จะถูกส่งไปยังแบบจำลองผลกระทบต่อผู้ใช้ทาง เนื่องจากค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางจะแปรผันตามสภาพผิวทาง โดยที่ข้อมูลความเสียหายหลักที่ใช้ในการคำนวณค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางคือค่า IRI เมื่อ IRI มีค่าสูงจะส่งผลให้อัตราการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง ค่าซ่อมบำรุง และค่าเสื่อมของยานพาหนะสูงตามไปด้วย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณอัตราการใช้เชื้อเพลิงหรืออัตราการสึกหรอต่างๆ นั้น จะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อในแบบจำลองด้านสังคมและสิ่งแวดล้อม โดยจะคำนวณปริมาณควันพิษและการใช้พลังงานที่เกิดขึ้นในสายทางนั้นๆ นอกจากนี้ค่า IRI ยังส่งผลกระทบต่อความเร็วที่ใช้ในการเดินทาง ดังนั้นหากพิจารณาเรื่องของมูลค่าเวลาการเดินบนสายทางที่มีค่า IRI สูง ผู้ใช้จะใช้เวลาเดินทางนานกว่าส่งผลให้มีต้นทุนมูลค่าเวลาในการเดินทางมากกว่า

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นกับผู้ใช้ทางจะเกิดขึ้นเมื่อสภาพผิวทางดีขึ้นหลังจากได้รับการซ่อมบำรุง โดยผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นนี้จะคำนวณจาก ผลต่างของค่าใช้จ่ายผู้ใช้ทางในกรณีที่สายทางได้รับการซ่อมบำรุงและไม่ได้ซ่อมบำรุง เมื่อสามารถประเมินผลประโยชน์ของการซ่อมสายทางได้แล้ว ลำดับถัดมาจะเป็นการวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าในการซ่อมบำรุง เนื่องจากสายทางส่วนใหญ่ของกรมทางหลวงมีปริมาณการจราจรสูง จึงส่งผลให้ผลประโยชน์หลังการซ่อมของสายทางสูงตามปริมาณการจราจรไปด้วย ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะนำการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ในส่วนอื่นๆ โดยดัชนีที่ใช้ชี้วัดความคุ้มค่าคือ อัตราส่วนผลประโยชน์ที่ผู้ใช้ทางได้รับหลังจากการ




รูปที่ 4.3 ความเชื่อมโยงของแบบจำลองต่างๆ ในการวิเคราะห์งบประมาณบำรุงทาง

ซ่อมต่อต้นทุนในการซ่อมบำรุง (B/C) และในลำดับสุดท้ายของการวิเคราะห์แผนและงบประมาณในการซ่อมบำรุงจะเป็นการวิเคราะห์หาแผนการซ่อมที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ภายใต้เงื่อนไขงบประมาณหรือค่า IRI เป้าหมายที่จำกัด

## 4.4 การพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ผิวทางคอนกรีตในระบบ TPMS

การพัฒนาให้ระบบ TPMS สามารถวิเคราะห์สภาพความเสียหายของผิวทางคอนกรีตนั้น คณะที่ปรึกษาได้ศึกษารูปแบบความเสียหายของผิวทางคอนกรีต โดยคัดเลือกพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์ ลำดับต่อมา คือ พัฒนาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางคอนกรีตโดยอ้างอิงแบบจำลองจาก HDM-4 จากนั้นได้การศึกษาร่วมกับคณะกรรมการของกรมทางหลวงเพื่อกำหนดวิธีการซ่อมบำรุงผิวทางและผลกระทบหลังการซ่อมที่เหมาะสม แสดงภาพรวมของการพัฒนาดังรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์สภาพสายทางคอนกรีตในระบบ TPMS

### 4.4.1 สรุปรูปแบบความเสียหายและการจัดเก็บข้อมูลของผิวทางคอนกรีต

จากการศึกษาประเภทความเสียหายของผิวทางคอนกรีตพบว่า ข้อมูลสภาพผิวทางคอนกรีตที่จำเป็นในการสำรวจและนำเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลกลางของ TPMS เพื่อนำไปวิเคราะห์แผนงานบำรุงรักษานั้น ประกอบด้วยลักษณะความเสียหาย 13 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลสภาพผิวทางคอนกรีตที่จัดเก็บในระบบฐานข้อมูลกลางของ TPMS

| ลำดับ | รูปแบบความเสียหาย | หน่วยการวัด |
|---|---|---|
| 1 | ดัชนีความขรุขระสากล (IRI) | เมตร/กม. |
| 2 | การแตกตามขวางและรอยแตกตามแนวทแยงมุม (Transverse and diagonal cracks) | จำนวนแผ่น/กม. |
| 3 | รอยเลื่อนต่างระดับ (Faulting) | จำนวนแผ่น/กม. |
| 4 | รอยบิ่นกระเทาะที่รอยต่อ (Spalling) | ร้อยละของการบิ่นที่รอยต่อตามขวาง |
| 5 | การแตกตามยาว (Longitudinal cracks) | จำนวนแผ่น/กม. |
| 6 | รอยแตกที่มุม (Corner breaks) | จำนวน/กม. |
| 7 | วัสดุยาแนวรอยต่อเสียหาย (joint seal damage) | เสียหาย/ไม่เสียหาย |
| 8 | รอยปะซ่อม (Patching) | ตารางเมตร |
| 9 | Microtexture | MPD |
| 10 | ความเสียหายไหล่ทาง | เมตร |
| 11 | โพรงใต้แผ่นคอนกรีต (Voids) | จำนวน/กม. |
| 12 | Hi-cracking (มีรอยแตกมากกว่า 1 จุด หรือ มีรอยแตกและมีความเสียหายประเภทอื่นรวมอยู่ในแผ่นนั้นด้วย) | จำนวนแผ่น/กม. |
| 13 | Low-cracking (มีรอยแตกเพียง 1จุด โดยไม่มีความเสียหายประเภทอื่นรวมอยู่ด้วย) | จำนวนแผ่น/กม. |

สำหรับการทำนายสภาพความเสียหายของผิวทางคอนกรีตนั้น นอกจากพารามิเตอร์สภาพสายทางที่ต้องจัดเก็บดังกล่าวข้างต้น ข้อมูลประวัติการซ่อมและอายุของสายทางเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์หลักในแบบจำลองการทำนายความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ดังนั้นคณะที่ปรึกษาจึงได้สรุปและออกแบบเพิ่มเติมให้จัดเก็บข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุงของสายทางคอนกรีตดังนี้

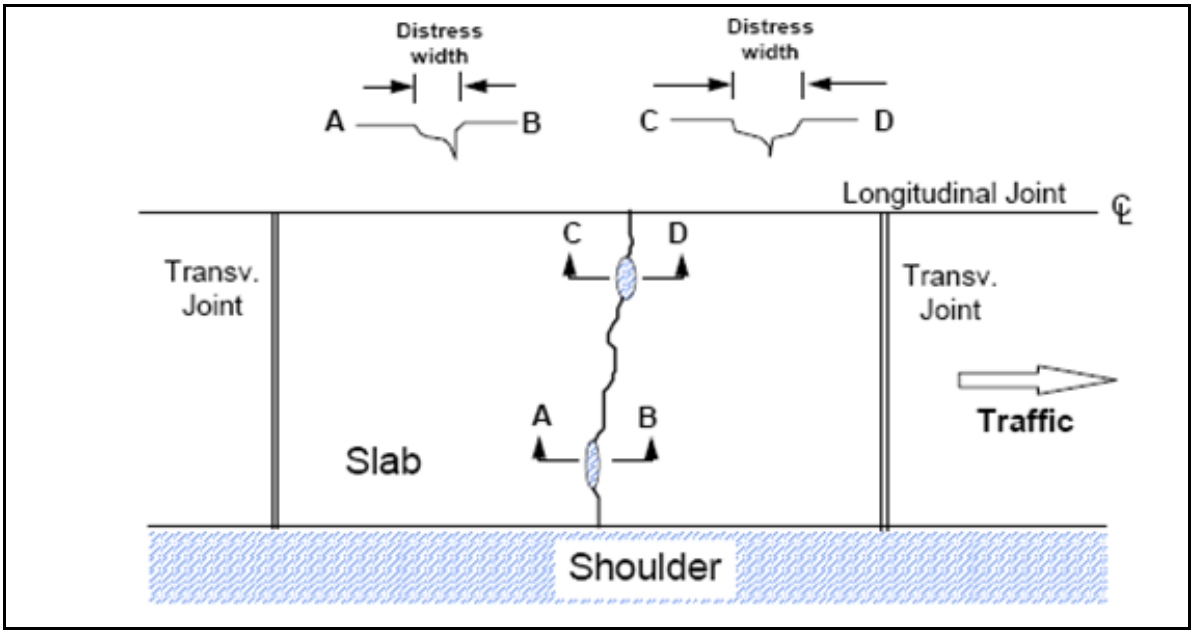
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลประวัติของสายทางคอนกรีต

| ลำดับ | ชื่อข้อมูล | หน่วย |
|---|---|---|
| 1 | ปีที่ก่อสร้าง | ปี พ.ศ. |
| 2 | ปีซ่อมล่าสุด บูรณะผิวทาง รหัส 4200 | ปี พ.ศ. |
| 3 | ปีซ่อมล่าสุด งานเปลี่ยนวัสดุรอยต่อ รหัส 2400 | ปี พ.ศ. |
| 4 | ปีซ่อมล่าสุด งานซ่อมวัสดุรอยต่อ รหัส 1121 | ปี พ.ศ. |
| 5 | ปีซ่อมล่าสุด งานซ่อมผิวคอนกรีต รหัส 3400 | ปี พ.ศ. |

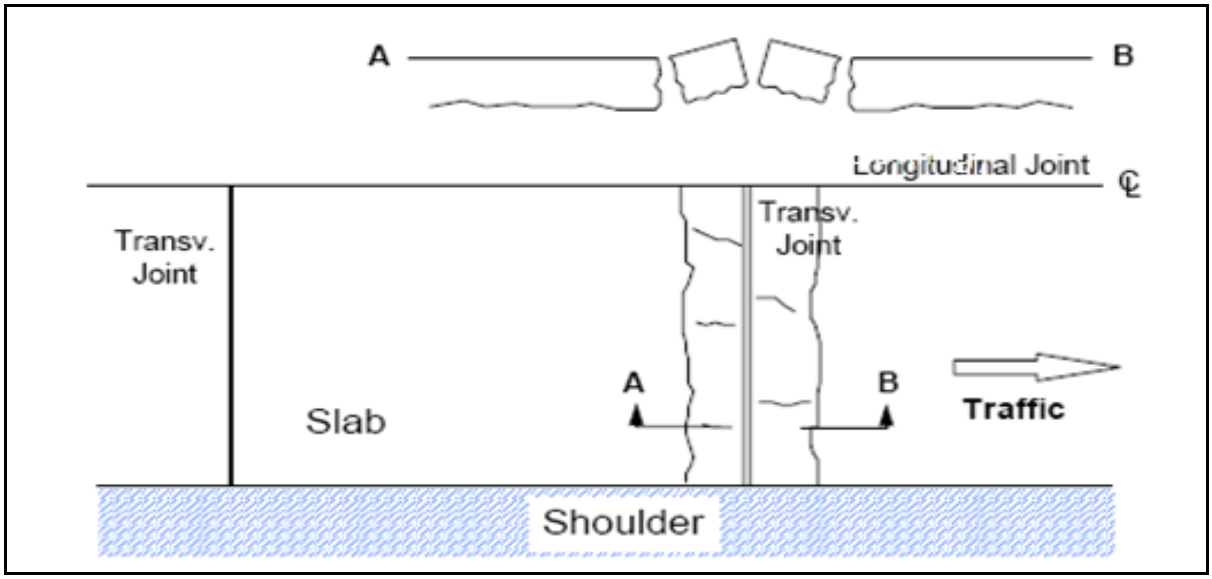
### 4.4.2 แบบจำลองการเสื่อมสภาพของผิวทางคอนกรีต (Deterioration Model)

การคาดการณ์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นบนผิวทางคอนกรีตรวมไปถึงการทำนายความเรียบของผิวทางคอนกรีตในระบบ TPMS ได้ใช้สมการตามคู่มือของ HDM-4 ซึ่งเป็นสมการสำหรับผิวทางคอนกรีตแบบมีเหล็กเสริม Jointed Reinforced Concrete Pavement (JRCP) โดยได้แบ่งรูปแบบความเสียหายและระดับการให้บริการของผิวทางออกเป็น 5 รูปแบบหลัก คือ

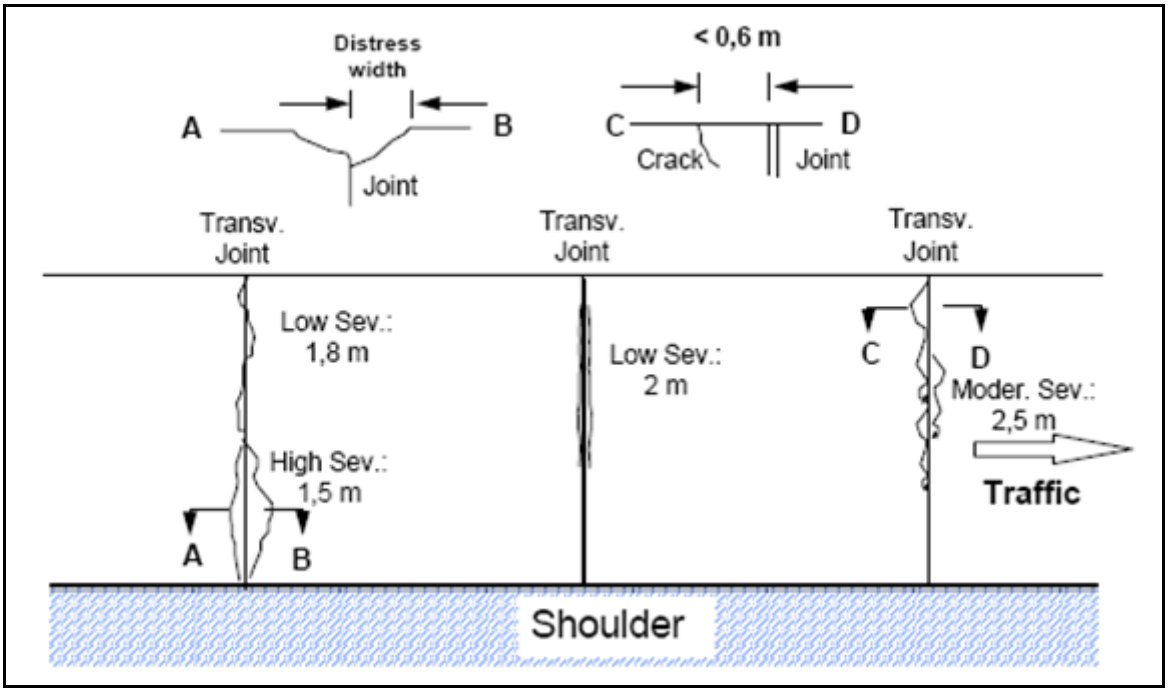
1. การแตกตามขวาง (Transverse Cracking) แสดงดังรูปที่ 4.5
2. รอยเลื่อนต่างระดับของผิวทาง (Faulting) แสดงดังรูปที่ 4.6
3. การบิ่นกะเทาะที่รอยต่อ (Spalling) แสดงดังรูปที่ 4.7
4. ระดับการให้บริการ (Present Serviceability Rating: PSR)
5. ดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI)




รูปที่ 4.5 รอยแตกตามขวาง (Transverse Cracking), ที่มา: HDM-4 volume 4 หน้า C3-7




รูปที่ 4.6 รอยเลื่อนต่างระดับของผิวทาง (Faulting), ที่มา: HDM-4 Volume 4 หน้า C3-8




รูปที่ 4.7 การบิ่นกะเทาะที่รอยต่อ (Spalling), ที่มา: HDM-4 Volume 4 หน้า C3-9

ซึ่งรายละเอียดของสมการการคาดการณ์ความเสียหายตามรูปแบบของ HDM-4 Deterioration Model มีดังนี้

4.4.2.1 การคาดการณ์การแตกร้าวตามแนวขวาง (DCRACK) ในผิวทางคอนกรีต

$$DCRACK = Kjr_c * AGE^{2.5} * [6.88 * 10^{-5} * FI / SLABTHK + NE4 * (0.116 - 0.073 * BASE) * (1-exp (-0.032 * MI) * exp(7.5518-66.5 * PSTEEL-(1 - 5*PSTEEL) * E_c * 10^{-6}] \quad ...(4.1)$$

โดยที่

| | |
|---|---|
| DCRACK | คือ จำนวนรอยแตกตามขวางต่อไมล์ |
| AGE | คือ อายุของผิวทางตั้งแต่ก่อสร้าง |
| FI | คือ ดัชนีเยือกแข็ง |
| SLABTHK | คือ ความหนาผิวทางคอนกรีต (นิ้ว) |
| NE4 | คือ จำนวนเพลามาตรฐานสะสมต่อช่องจราจรตั้งแต่เริ่มใช้ผิวทาง |
| BASE | คือ ประเภทของชั้นพื้นทาง |
| MI | คือ ดัชนีความชื้น |
| PSTEEL | คือ ร้อยละของเหล็กเสริมตามยาว |
| Ec | คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (psi) |

Kjrc คือ ค่าปรับแก้การแตกตามแนวขวาง(มาตรฐาน = 1.0)

โดยตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง คือ ปริมาณรถบรรทุกเท่านั้น ส่วนค่าของตัวแปรอื่นๆ ใช้ค่ามาตรฐาน ตามตารางที่ 4.3 และสำหรับการนับจำนวนรอยแตกได้กำหนดเพิ่มเติมให้มีจำนวนรอยแตกมากสุดได้เพียง 1 รอยแตกต่อผิวทางคอนกรีต 1 แผ่น (ยาว 10 เมตร) ซึ่งคำนวณได้ว่าจะมีจำนวนรอยแตกสูงสุดอยู่ที่ 160 รอยแตกต่อไมล์

4.4.2.2 การคาดการณ์การเลื่อนตัวของรอยต่อ (TFAULT)

$$FAULT = Kjr_f * NE4^{0.25} * [0.0628 * (1-Cd) + 3.673 * 10^{-9} * BSTRESS^2 + (4.116 * 10^{-6} * JTSPACE^2 + 7.466 * 10^{-10} * FI^2 * PRECIP^{0.5} - (0.009503 * BASE - 0.01917 * WIDENED + 0.0009217 * AGE)] \quad ...(4.2)$$

โดยที่

| | |
|---|---|
| FAULT | คือ รอยเลื่อนต่างระดับโดยเฉลี่ยของผิวทางตามขวาง (นิ้ว) |
| NE4 | คือ จำนวนเพลามาตรฐานสะสมต่อช่องจราจรตั้งแต่เริ่มใช้ผิวทาง |
| Cd | คือ สัมประสิทธิ์ การระบายน้ำตาม AASHTO |
| BSTRSS | คือ หน่วยแรงแบกทานสูงสุดของคอนกรีต(psi) |
| JTSPACE | คือ ระยะห่างระหว่างรอยต่อโดยเฉลี่ย (ฟุต) |
| FI | คือ ดัชนีเยือกแข็ง |
| PRECIP | คือ อัตราการระเหยเฉลี่ยต่อปี (นิ้ว) |
| BASE | คือ ประเภทของชั้นพื้นทาง |
| WIDENED | คือ ลักษณะการขยายความกว้างผิวทาง |
| AGE | คือ อายุของผิวทางตั้งแต่ก่อสร้าง |
| Kjrf | คือ ตัวประกอบการสอบเทียบ (มาตรฐาน = 1.0) |

ในการคำนวณรอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยนั้นสมการคาดการณ์อาจให้ผลการคำนวณค่ารอยเลื่อนที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านเลยไปในระยะยาว ซึ่งไม่สมเหตุสมผลนักในทางปฏิบัติดังนั้นในการคำนวณคาดการณ์ค่ารอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยในระบบ TPMS ได้กำหนดให้ผลการคำนวณค่ารอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยในปีที่คาดการณ์จะต้องไม่น้อยกว่าค่ารอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยของปีที่ก่อนหน้า หากคำนวณได้ค่าน้อยกว่าก็ให้ใช้ค่ารอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยของปีที่คาดกาณ์มีค่าเท่ากับค่ารอยเลื่อนต่างระดับเฉลี่ยของปีก่อนหน้า

4.4.2.3 การคาดการณ์การกระเทาะร่อนของรอยต่อ (SPALL)

$$SPALL = Kjr_s * AGE^3 * JTSPACE * 10^{-5} * [1.94 * DWLCOR + 8.819 * BASE * (1-PREFSEAL) + 7.01 * FI * 10^{-3}] \quad ...(4.3)$$

โดยที่

| | |
|---|---|
| SPALL | คือ ร้อยละของการบิ่นที่รอยต่อตามขวาง |
| AGE | คือ อายุของผิวทางตั้งแต่ก่อสร้าง |
| JTSPACE | คือ ระยะห่างระหว่างรอยต่อโดยเฉลี่ย (ฟุต) |
| DWLCOR | คือ การป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเดือย |
| BASE | คือ ประเภทของชั้นพื้นทาง |
| PREFSEAL | คือ ลักษณะปัจจุบันของการผนึกร่องรอยต่อ |
| FI | คือ ดัชนีเยือกแข็ง |
| Kjrs | คือ ตัวประกอบการสอบเทียบ (มาตรฐาน = 1.0) |

4.4.2.4 การคาดการณ์ดัชนีความขรุขระสากลของผิวทางคอนกรีต (RI) โดยคำนวณจากค่า PSR และสมการการคาดการณ์ค่า PSR

$$RI = Kjr_r [-\log_e (0.2 * PSR_t / 0.0043)] \quad ...(4.4)$$

โดยที่ $PSR_t = 4.165 - 0.06694 * TFAULT^{0.5} - 0.00003228 * DCRACK^2 - 0.1447 * SPALL^{0.25}$

| | |
|---|---|
| PSR | คือ ระดับการให้บริการในปีที่สนใจ |
| TFAULT | คือ รอยเลื่อนต่างระดับทั้งหมดต่อ 1 ไมล์ (นิ้ว/ไมล์) |
| DCRACK | คือ จำนวนรอยแตกตามขวางต่อไมล์ |
| SPALL | คือ ร้อยละของการบิ่นที่รอยต่อตามขวาง |

TFAULT สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$TFAULT = \frac{FAULT * 5280}{JTSPACE}$$

โดยที่

| | |
|---|---|
| TFAULT | คือ รอยเลื่อนต่างระดับทั้งหมดต่อ 1 ไมล์ (นิ้ว/ไมล์) |
| FAULT | คือ รอยเลื่อนต่างระดับโดยเฉลี่ยของผิวทางตามขวาง (นิ้ว) |
| JTSPACE | คือ ระยะห่างระหว่างรอยต่อโดยเฉลี่ย (ฟุต) |

คำอธิบายสำหรับตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคาดการณ์ความเสียหายของผิวทางคอนกรีตแบบ Jointed Reinforced Concrete Pavement ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดตัวแปรในสมการการคาดการณ์ความเสียหาย

| No | ตัวแปร | Description | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|---|---|
| 1 | AGE | number of year since pavement construction | อายุหลังการก่อสร้าง | ปี |
| 2 | alpha | thermal coefficient of concrete | สัมประสิทธิ์ อุณหภูมิของ คอนกรีต | ไม่มีหน่วย |
| 3 | BASE | base type: 0 if not stabilised; 1 if stabilized | ค่าแสดงชนิดพื้นทาง | ไม่มีหน่วย |
| 4 | BETA | relative stiffness of the dowel-concrete system | สติฟเนสสัมพัทธ์ระหว่าง เหล็กเดือย-คอนกรีต | ไม่มีหน่วย |
| 5 | BSTRESS | max concrete bearing stress in the dowel-concrete system | หน่วยแรงแบกทานสูงสุดของ คอนกรีตกับเหล็กเดือย | psi |
| 6 | Cd | drainage coefficient, modified AASHTO | สปส.การระบายน้ำ | ไม่มีหน่วย |
| 7 | CON | adjustment factor due to base-slab frictional restaint: 0.80 if non stabilised base; 0.65 if stabilised base | ค่าปรับแก้ความเสียดทาน ระหว่างแผ่นพื้นกับพื้นทาง | ไม่มีหน่วย |
| 8 | DFAC | distribution factor, 24/(I+12) | ค่าการกระจายแรง | ไม่มีหน่วย |
| 9 | DOWEL | dowel diameter | ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ เหล็กเดือย | นิ้ว |
| 10 | DWLCOR | dowel corrosion protection: 0 if no dowels exist, or are protected from corrosion; 1 if dowels are not protected from corrosion | การป้องกันการกัดกร่อนของ เหล็กเดือย | ไม่มีหน่วย |
| 11 | Ec | modulus of elasticity of concrete | โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต | psi |
| 12 | Es | modulus of elasticity of dowel bar | โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก เดือย | psi |
| 13 | FI | freezing index | ดัชนีเยือกแข็ง | ไม่มีหน่วย |
| 14 | gamma | drying shrinkage coefficient of | สัมประสิทธิ์ การหดตัวระเหย | ไม่มีหน่วย |

| No | ตัวแปร | Description | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|---|---|
| | | concrete | น้ำของคอนกรีต | |
| 15 | INERT | moment of inertia of the transverse section of the dowel bar | โมเมนต์เฉื่อยของเหล็กเดือย | นิ้ว^4 |
| 16 | JTSPACE | average transverse joint spacing | ระยะห่างระหว่างรอยต่อเฉลี่ย | ฟุต |
| 17 | Kd | modulus of dowel support, pci (default=1.5*10^6 pci) | โมดูลัสการรองรับเหล็กเดือย | pci |
| 18 | Kjrc | Cracking deterioration calibration factor (default =1.0) | ค่าปรับแก้การแตกตามแนวขวาง | ไม่มีหน่วย |
| 19 | Kjrf | Faulting calibration factor (default =1.0) | ค่าปรับแก้รอยเลื่อนต่างระดับ | ไม่มีหน่วย |
| 20 | Kjrs | Joint spalling calibration factor (default =1.0) | ค่าปรับแก้การบิ่นกระเทาะ | ไม่มีหน่วย |
| 21 | Kjrr | Roughness progression calibration factor (default =1.0) | ค่าปรับแก้ดัชนีความขรุขระสากล | ไม่มีหน่วย |
| 22 | l | radius of relative stiffness of the slab-foundation system | รัศมีของสติฟเนสสัมพัทธ์ของแผ่นพื้น-พื้นทาง | นิ้ว |
| 23 | LT | percentage of load transfer between transverse joints | %การถ่ายแรงผ่านรอยต่อตามขวาง | ไม่มีหน่วย |
| 24 | MI | Thornthwaite moisture index | ดัชนีความชื้น | ไม่มีหน่วย |
| 25 | NE4 | cumulative ESALs since pavement construction (millions ESAs per lane) | จำนวน ESALs ต่อช่องจราจรสะสมตั้งแต่ก่อสร้างเสร็จ | ESAs |
| 26 | OPENING | average transverse joint spacing | ระยะห่างของรอยต่อเฉลี่ย | นิ้ว |
| 27 | P | half of single axle load | ½ ของน้ำหนักเพลาเดี่ยว | ปอนด์ |
| 28 | PRECIP | annual average precipitation | ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยต่อปี | นิ้ว |
| 29 | PREFSEAL | present of preformed sealant in joint: 0 if not present; 1 if present | มีวัสดุอุดรอยต่อ | ไม่มีหน่วย |
| 30 | PSTEEL | percentage of longitudinal steel reinforcement | % เหล็กเสริมแนวยาว | ไม่มีหน่วย |

| No | ตัวแปร | Description | คำอธิบาย | หน่วย |
|---|---|---|---|---|
| 31 | SLABTHK | slab thickness | ความหนาของผิวคอนกรีต | นิ้ว |
| 32 | TRANGE | temperature range (the mean monthly temp range obtained from data on the difference between the max and the min temp for each month) | ช่วงอุณหภูมิ | ฟาเรนไฮท์ |
| 33 | WIDENED | widened lane: 0 if not widened; 1 if widened or shoulder provided during initial construction; 0.5 if concrete shoulders are placed after initial construciton | ค่าแสดงช่องจราจรมีการขยายความกว้าง | ไม่มีหน่วย |

สำหรับตัวอย่างขั้นตอนวิธีการคำนวณค่าความเสียหายทั้ง 4 ประเภทนั้น สามารถดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ข.

### 4.4.3 เงื่อนไขวิธีการซ่อมบำรุง (Maintenance Criteria) และสภาพหลังการซ่อมที่เหมาะสมของผิวทางคอนกรีต (Road Work Effect)

เกณฑ์ในการเลือกประเภทงานซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีตได้พิจารณาจากรูปแบบความเสียหายและปริมาณความเสียหายที่พบหรือคาดการณ์ได้ ซึ่งในระบบ TPMS ได้พัฒนางานซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีตจากการรวบรวมข้อมูลวิธีการซ่อมผิวทางคอนกรีตที่กรมทางหลวงปฏิบัติอยู่ในปัจจุบัน ในส่วนของการพิจารณาวิธีซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีตและผลที่ได้รับจากงานบำรุงรักษาผิวทางด้วยประเภทงานต่างๆ (Road Work Effect) ที่ปรึกษาใช้รายการงานซ่อมบำรุงอ้างอิงจากคู่มืองานซ่อมบำรุงผิวทางของกรมทางหลวงเป็นข้อมูลพื้นฐาน ซึ่งผลการบำรุงรักษา (Road Work Effect) จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงในข้อมูลโครงสร้างทางของผิวทางคอนกรีต และสภาพความเสียหายบนผิวทางคอนกรีต โดยแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เกณฑ์การซ่อมบำรุงและผลการซ่อมบำรุงรักษาผิวทางคอนกรีต

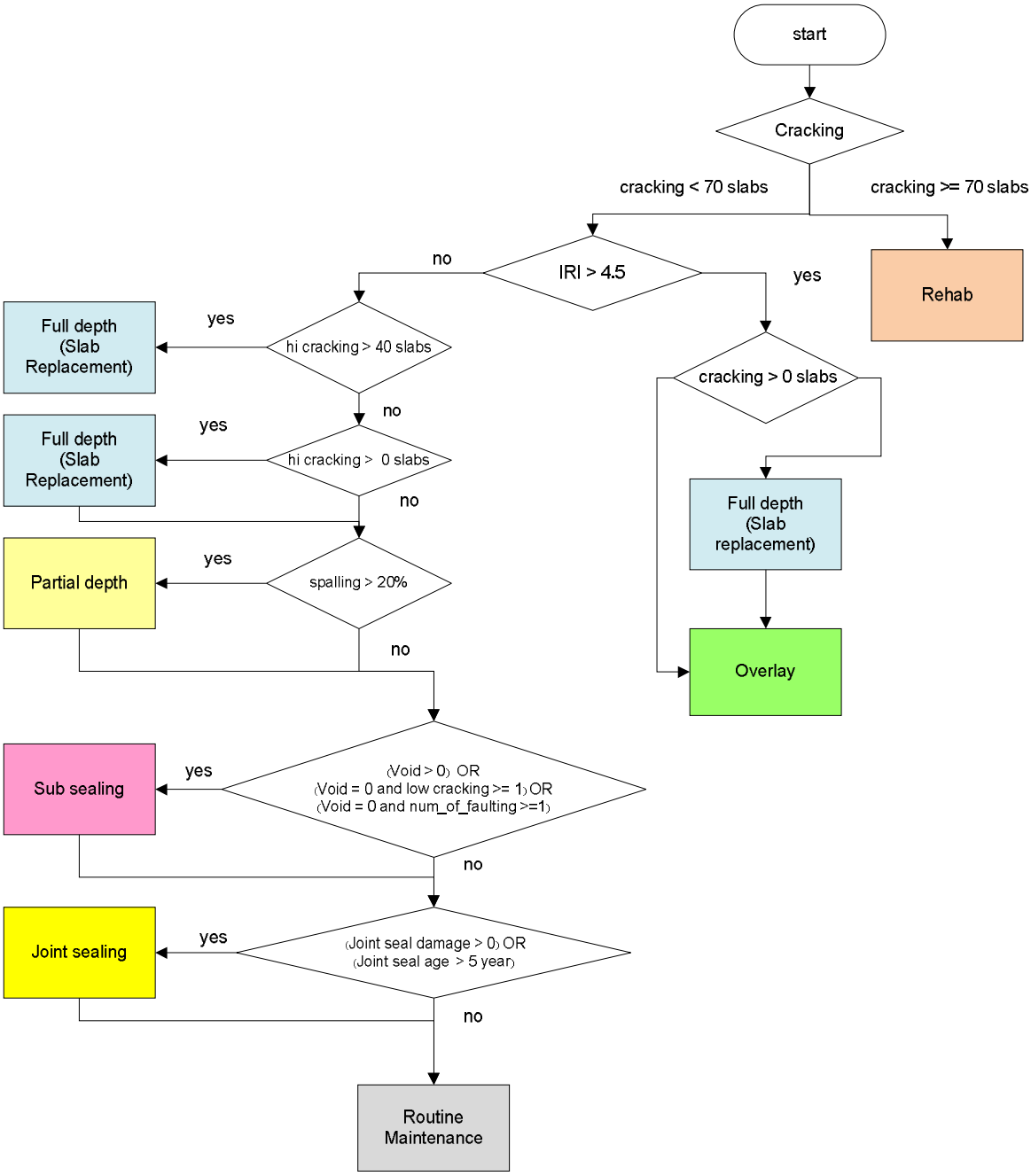
| งานซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีต | เกณฑ์การซ่อมบำรุง | ปริมาณงานซ่อมบำรุง | ผลต่อความเสียหายบนผิวทาง | ผลต่อตัวแปรในแบบจำลอง |
|---|---|---|---|---|
| เปลี่ยนวัสดุรอยต่อผิวคอนกรีต (replacement of joint sealing) | ตามกำหนดเวลา หรือเมื่อพบว่ามีวัสดุอุดรอยต่อเสียหาย | ความยาวรอยต่อ | ไม่มี | ไม่มี |
| ซ่อมผิวคอนกรีตบางส่วน (partial depth patching) | เมื่อพบว่ามีการบิ่นกระเทาะที่รอยต่อ (Spalling) > xx% * | ความยาวของรอยบิ่นกระเทาะ | การบิ่นกระเทาะที่รอยต่อ = 0 | ค่าตัวแปร SPALL = 0 |
| ซ่อมผิวคอนกรีตเต็มความหนา (full depth patching) | เมื่อพบว่ามีรอยแตกแนวขวางและแนวทแยง | ตารางเมตร | รอยแตก = 0 | ค่าตัวแปร DCRACK = 0 |
| ซ่อมคอนกรีตทั้งแผ่น (slab replacement) | เมื่อพบว่ามีการแตกตามขวางและรอยแตกตามแนวทแยงมุม / การแตกตามยาว > 1 แนวต่อแผ่น | จำนวนแผ่น | ทุกความเสียหาย = 0 | ค่าตัวแปร DCRACK = 0 SPALL = 0 |
| อุดโพรงใต้แผ่นพื้น (subsealing) | พบว่ามีโพรงใต้แผ่นพื้นหรือพบว่ามีรอยเลื่อนต่างระดับ | จำนวนแผ่น | ไม่มี | ไม่มี |
| งานบูรณะทางผิวคอนกรีต (rehabilitation of concrete pavement) | พบว่าจำนวนแผ่นที่มีการแตกตามขวางและรอยแตกตามแนวทแยงมุม / การแตกตามยาว > 70 แผ่นต่อ1กิโลเมตร | ระยะทาง | ทุกความเสียหาย = 0 | DCRACK=0 FAULT=0 SPALL=0 IRI = yy* |
| งานเสริมผิวทางด้วยแอสฟัลต์คอนกรีต | ค่า IRI > 4.5 ม./กม. | ระยะทาง | IRI ลดต่ำลง | IRI = zz* |

* หมายเหตุ

1. xx เป็นเกณฑ์ที่กำหนดโดยกรมทางหลวงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมในการวางแผนบำรุงทาง
2. yy เป็นค่า IRI หลังจากบูรณะทางผิวคอนกรีตซึ่งใช้ค่า IRI ของผิวทางคอนกรีตหลังจากก่อสร้างเสร็จ
3. zz เป็นค่า IRI หลังจากเสริมผิวทางซึ่งขึ้นกับความหนาของการเสริมผิวทาง

สำหรับขั้นตอนการพิจารณาเลือกงานซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีตเริ่มจากการตรวจสอบจำนวนรอยแตกของช่วงสายทาง 1 กม. ว่ามากกว่าหรือเท่ากับ 70 แผ่นหรือไม่ หากมากกว่าหรือเท่ากับจะกำหนดให้ซ่อมบำรุงด้วยวิธีบูรณะสายทางทั้งช่วง 1 กม. แต่ถ้าไม่ถึง 70 แผ่น จะพิจารณาที่ค่า IRI ว่ามากกว่าหรือเท่ากับ 4.5 หรือไม่ หากใช่จะซ่อมแผ่นที่แตกด้วยวิธี Full depth ก่อน จากนั้นจึงเสริมผิวลาดยางทับ แต่ในกรณีที่ค่า IRI ไม่ถึง 4.5 จะพิจารณาจำนวนรอยแตก High-Crack ว่ามากกว่าหรือเท่ากับ 40 แผ่นหรือไม่ หากใช่จะพิจารณาซ่อมด้วยวิธี Full depth เพียงอย่างเดียวแต่ถ้าไม่ จะพิจารณาซ่อมด้วยวิธี Full depth ก่อนและพิจารณาวิธีซ่อมอื่นๆ ประกอบไปด้วย โดยพิจารณาว่ามี Spalling มากกว่า 20% หรือไม่ ถ้ามากกว่าจะซ่อมโดยวิธี Partial Depth จากนั้นพิจารณาว่ามีโพรงใต้แผ่นคอนกรีตหรือไม่ ถ้ามีจะซ่อมด้วยวิธี Subsealing และลำดับสุดท้ายพิจารณาว่ารอยต่อแผ่นคอนกรีตเสียหายหรือวัสดุยารอยต่อหมดอายุหรือไม่ ถ้าใช่จะซ่อมด้วยวิธี Joint Sealing

ในส่วนของการกำหนดค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์เงื่อนไขในการซ่อมต่างๆ นั้น ที่ปรึกษาได้ออกแบบให้ผู้ใช้ในระดับส่วนกลางหรือเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลระบบสามารถปรับแก้ค่าได้จากหน้าจอการใช้งานของโปแกรม ซึ่งการปรับแก้ค่าต่างๆ นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความสอดคล้องกับการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ โดยขั้นตอนการเลือกวิธีซ่อมตามเงื่อนไขที่กล่าวข้างต้นของโปรแกรม TPMS แสดงดังรูปที่ 4.8




รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการพิจารณาวิธีซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีต

## 4.5 การปรับแก้ค่าคงที่ในสมการแบบจำลองต่าง ๆ

### 4.5.1 ปรับแก้ค่า Kgp ในแบบจำลองการทำนายค่า IRI ของผิวทางลาดยาง

แบบจำลองทำนายการเสื่อมสภาพความขรุขระผิวทางลาดยาง ใช้ค่าดัชนีความขรุขระสากล (IRI) เป็นดัชนีชี้วัดสภาพความขรุขระผิวทาง โดยในแบบจำลองต้นแบบของ HDM-4 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความขรุขระผิวทาง ได้แก่ ความแข็งแรงโครงสร้างทาง ปริมาณจราจร ความเสียหายผิวทาง และสภาพแวดล้อม ซึ่ง Ronet ได้ปรับแก้แบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยไม่นำตัวแปรปริมาณความเสียหายผิวทาง (รอยแตกร้าว ร่องล้อ หลุมบ่อ) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า ความขรุขระผิวทาง มาร่วมในสมการทำนายการเสื่อมสภาพความขรุขระผิวทาง แต่ใช้อายุการใช้งานของผิวทางเป็นตัวแทนผลกระทบของความเสียหายผิวทางที่มีต่อความขรุขระผิวทาง ดังนี้

$$dIRI = Kgp*(134*Exp(Kgm*m*AGE3)*[(1 + SNC*0.755)]^{-5} *YE4 + 0.0121*AGE3) + (Kgm*m*RIa) \quad \ldots (4.5)$$

โดย AGE3 = อายุสายทางตั้งแต่มีการเสริมผิว การบูรณะ หรือ การก่อสร้างใหม่ (ปี)

RIa = ค่าความขุรขระสากลเมื่อต้นปีที่สนใจ (ม./กม.)

m = ค่าสัมประสิทธิ์ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม (อ้างอิง HDM-4 Volume 6 ตาราง B10-3) ดังตารางที่ 4.5

SNC = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางตั้งแต่มีการก่อสร้าง การเสริมผิว การบูรณะ หรือ การก่อสร้างใหม่ ครั้งล่าสุด (ASSHTO)

YE4 = Annual Number of Equivalent Standard Axles (ล้าน ESAL/ช่องทางจราจร/ปี)

Kgp = ค่าปรับแก้อัตราการเสื่อมสภาพของความขรุขระผิวทาง

Kgm = ค่าปรับแก้ของค่าสัมประสิทธิ์ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมโดยที่ค่าตั้งต้นมีค่าเท่ากับ 1(อ้างอิง HDM-4, Volume 5, P. 93-96)

ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อม m

| ระดับความชื้น | ระดับอุณหภูมิ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Tropical | Sub-tropical Hot | Sub-tropical cool | Temperate cool | Temperate Freeze |
| Arid | 0.005 | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.030 |
| Semi-Arid | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.030 | 0.040 |
| Sub-Humid | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.040 | 0.050 |
| Humid | 0.025 | 0.030 | 0.040 | 0.050 | 0.060 |

| ระดับความชื้น | ระดับอุณหภูมิ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Tropical | Sub-tropical Hot | Sub-tropical cool | Temperate cool | Temperate Freeze |
| Pre-Humid | 0.030 | 0.040 | 0.050 | | |

ตัวแปร SNC คือ Modified Structural Number หรือค่าความแข็งแรงของโครงสร้างทางที่รวมชั้นดินคันทางตั้งแต่มีการก่อสร้างหรือปรับปรุงทาง (Overlay, Reconstruction, Rehabilitation) ครั้งล่าสุด คำนวณได้จากรายละเอียดหน้าตัดโครงสร้างทางด้วยสมการที่ (4.6)

$$SNC = SN + 3.51 (\log_{10} CBRs) - 0.85 (\log_{10} CBRs)2 - 1.43 \quad \ldots (4.6)$$

เมื่อ $SN = \sum_{i=1}^{n} (a_i h_i)$

SN = ค่าความแข็งแรงของทาง

n = จำนวนชั้นทาง

ai = ค่าสัมประสิทธิ์ ความแข็งแรงของแต่ละชั้นทาง

hi = ความหนาของแต่ละชั้นทาง

CBRs = ค่า CBR ภาคสนามของชั้นดินเดิม

ในกรณีที่มีข้อมูลการทดสอบการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง ซึ่งกระทำโดยการทดสอบด้วย Benkelman Beam หรือ Falling Weight Deflectometer ก็สามารถนำมาคำนวณหาค่า SNC ได้จากสมการของ Paterson (1987) ในสมการ ดังนี้

$SNC = 3.2\ DEF^{-0.63}$ พื้นทางแบบมวลรวมไม่เชื่อมแน่น (granular bases)

$SNC = 2.2\ DEF^{-0.63}$ พื้นทางปรับปรุงด้วยซีเมนต์ (cemented bases)

โดย DEF = ค่าการแอ่นตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam (มม.)

ในกรณีที่แขวงการทางไม่มีข้อมูลค่าการแอ่นตัวจากการวัดด้วยเครื่องมือ Benkelman Beam หรือ Falling Weight Deflectometer และไม่ทราบรายละเอียดหน้าตัดโครงสร้างทาง จำเป็นต้องใช้ใช้ค่า SNC คำนวณจากหน้าตัดโครงสร้างทางที่กำหนดในแบบทั่วไปสำหรับปริมาณจราจรระดับต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.6

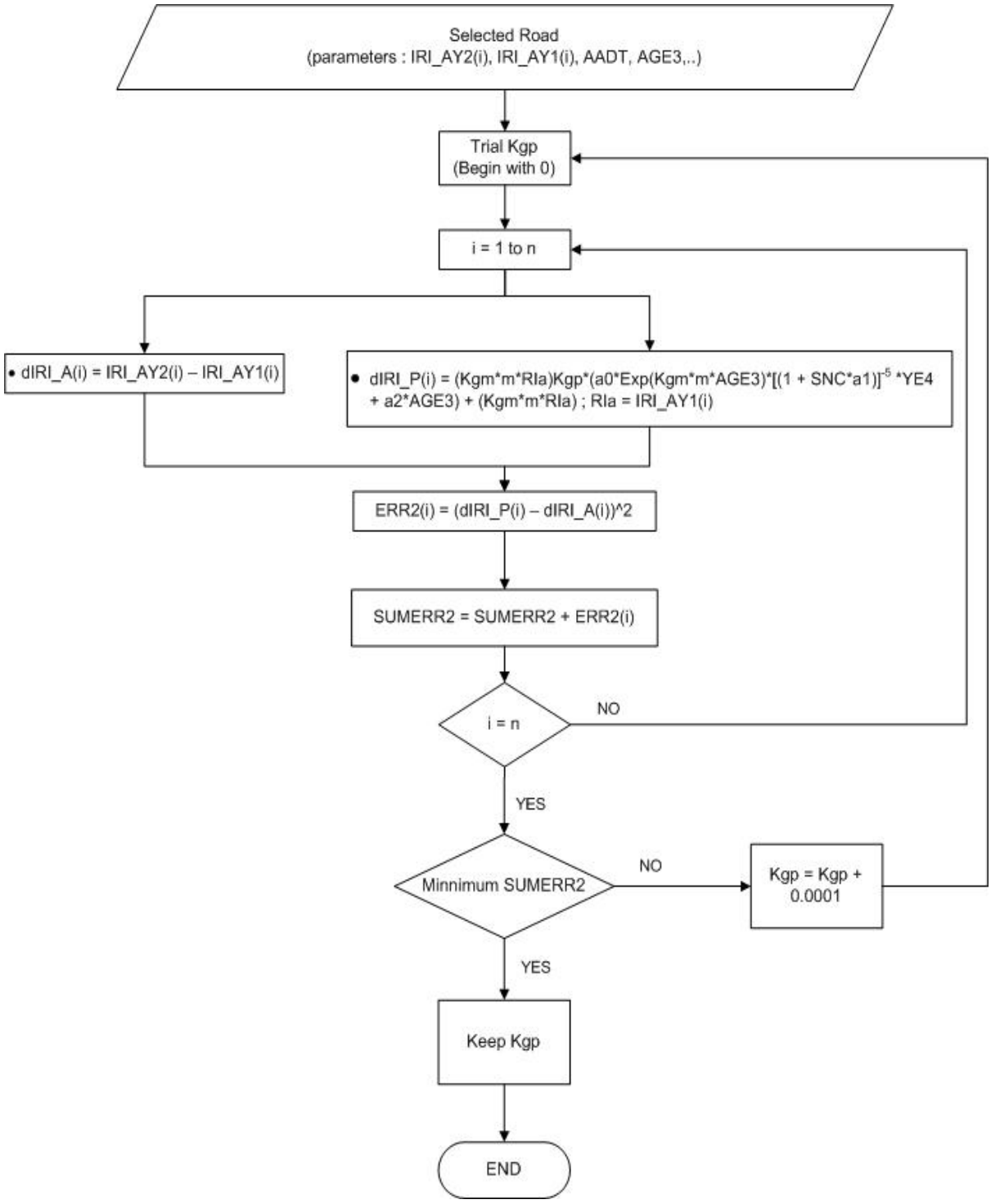
ตารางที่ 4.6 รายละเอียดหน้าตัดโครงสร้างทางและค่า SNC สำหรับประเภทชั้นทาง

| **ประเภทชั้นทาง** | AADT | **ความหนาผิวทาง** (cm) | **ความหนาพื้นทาง** (cm) | **ความหนารองพื้นทาง** (cm) | **ชั้น** Select A (cm) | SNC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| พิเศษ | >10,000 | 10 | 30 | 30 | 30 | 6.38 |
| 1 | 5,000 - 10,000 | 10 | 25 | 30 | 30 | 5.49 |
| 2 | 2,500 - 5,000 | 10 | 20 | 30 | 30 | 5.04 |
| 3 | 1,000 - 2,500 | 5 | 25 | 30 | 30 | 4.55 |
| 4 | <= 1,000 | 5 | 20 | 30 | 30 | 3.50 |

ในการปรับแก้ค่า Kgp ของสมการคาดการณ์ความขรุขระของผิวทางลาดยาง ที่ปรึกษาได้คัดเลือกสายทางตัวอย่างทั้งหมด 390 ช่วงสายทาง (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ค.) สำหรับใช้เป็นตัวอย่างสายทางที่จะใช้ปรับแก้ในอนาคตเมื่อมีการสำรวจเก็บและจัดเก็บข้อมูล IRI เพิ่มขึ้น โดยสายทางตัวอย่างนี้เป็นสายทางที่มีการซ่อมบำรุงปกติ (Routine Maintenance) ช่วงปี พ.ศ. 2551 – 2553 โดยจะใช้อ้างอิงและติดตามพฤติกรรมอย่างต่อเนื่องในอนาคตเพื่อสะสมข้อมูลในระยะยาวสำหรับใช้เป็นกลุ่มข้อมูลในการปรับแก้ค่าคงที่ของสมการในอนาคต สำหรับวิธีการปรับแก้ค่า Kgp มี 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. <u>การคัดเลือกค่า Kgp ที่ส่งผลให้ค่า IRI ที่คำนวณได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับค่า IRI จริงมากที่สุด</u>

วิธีการคัดเลือกเริ่มจากการคัดเลือกสายทางที่ค่า IRI เพิ่มขึ้นตลอดทุกปีต่อเนื่องกันเป็นข้อมูลตัวอย่าง จากนั้นหาค่าความแตกต่างของ IRI จากค่าจริงของแต่ละช่วงกิโลเมตร (dIRI_Actual) และคำนวณค่าความแตกต่างของ IRI ของช่วงกิโลเมตรเดียวกันจากแบบจำลอง (dIRI_model) โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ตามสมการที่ (1) ซึ่งจะทำการสมมติค่า Kgp ขึ้นมาก่อน 1 ค่า หลังจากนั้นหาค่าคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Error Square) ของความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าจากแบบจำลองสำหรับช่วงกิโลเมตรนั้นๆ แล้วจึงรวมค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Sum of Error Square) ของทุกช่วงกิโลเมตรตัวอย่าง ทำการเปลี่ยนค่า Kgp แล้วคำนวณซ้ำ เพื่อหาค่า Kgp ที่ดีที่สุด ซึ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองโดยรวมของ dIRI น้อยที่สุด ซึ่งเป็นไปดัง Flow Chart ในรูปที่ 4.9




รูปที่ 4.9 Flow Chart แสดงขั้นตอนการปรับแก้ค่า Kgp

2. <u>การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง</u>

การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง สามารถทำได้โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์($R^2$) ระหว่างข้อมูลจริงที่สำรวจกับค่าดัชนีความขรุขระสากลที่ได้จากการทำนาย ยิ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์ต่อกันสูง โดยใช้สมการนี้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

$$R^2 = 1 - (\sum( dIRI_model_i - dIRI_actual_i)^2 / \sum( dIRI_actual_i - IRI_{avg})^2)$$

โดยที่ $R^2$ = ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์(Correlation Coefficient)

dIRI_model = ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่พยากรณ์ได้โดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

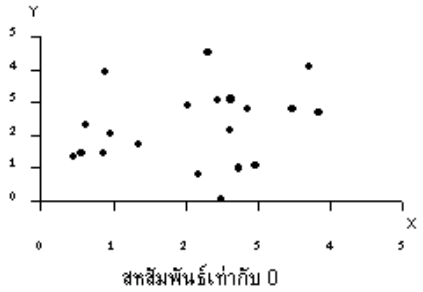
dIRI_actual = ค่าดัชนีความขรุขระสากลที่สำรวจและเก็บรวบรวมจริง

$IRI_{avg}$ = ค่าเฉลี่ยความขรุขระสากลที่สำรวจและเก็บรวบรวมจริง

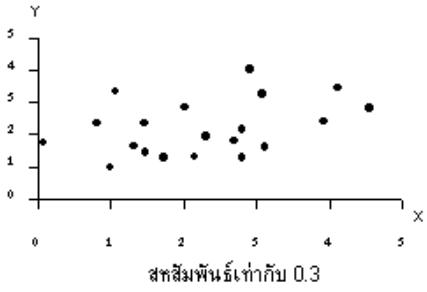
การหาค่าของสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์(Correlation Coefficient) ใช้□สัญลักษณ์□ $R^2$ ค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์จะเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรเป็นไปในทิศทางเดียวกันและความใกล้เคียงเท่าไร โดยค□าสัมประสิทธิ์ การตัดสินใจมีค่าระหว่าง0 ถึง 1 ดังรูปที่ 4.10

- ถ□า $R^2$ มีค่าสูง แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรเป็นไปในทิศทางเดียวกันและมีความใกล้เคียงกันมาก มีความสัมพันธ์กันสูง
- ถ□า $R^2$ มีค่าต่ำ แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรมีความใกล้เคียงกันน้อย มีความสัมพันธ์กันต่ำ
- ถ□า $R^2$ มีค่าเป็น 0 แสดงว่าตัวแปรไม□มีความสัมพันธ์ต่อ□กัน

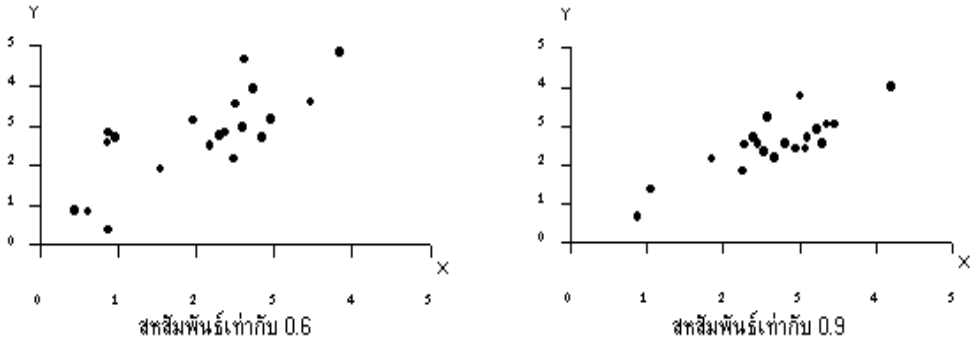
การวิเคราะห์แบบจำลองที่พัฒนาว่ามีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด สามารถดูได้จากค่าสัมประสิทธิ์ สหสัมพันธ์($R^2$) แบบจำลองยิ่งที่มีค่า $R^2$ ใกล้ 1 แสดงว่าผลที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองกับสภาพหน้างานจริงมีความสัมพันธ์ต่อกันมาก สามารถพยากรณ์ค่าความขรุขระสากลได้ใกล้เคียงความเป็นจริง



สหสัมพันธ์เท่ากับ 0

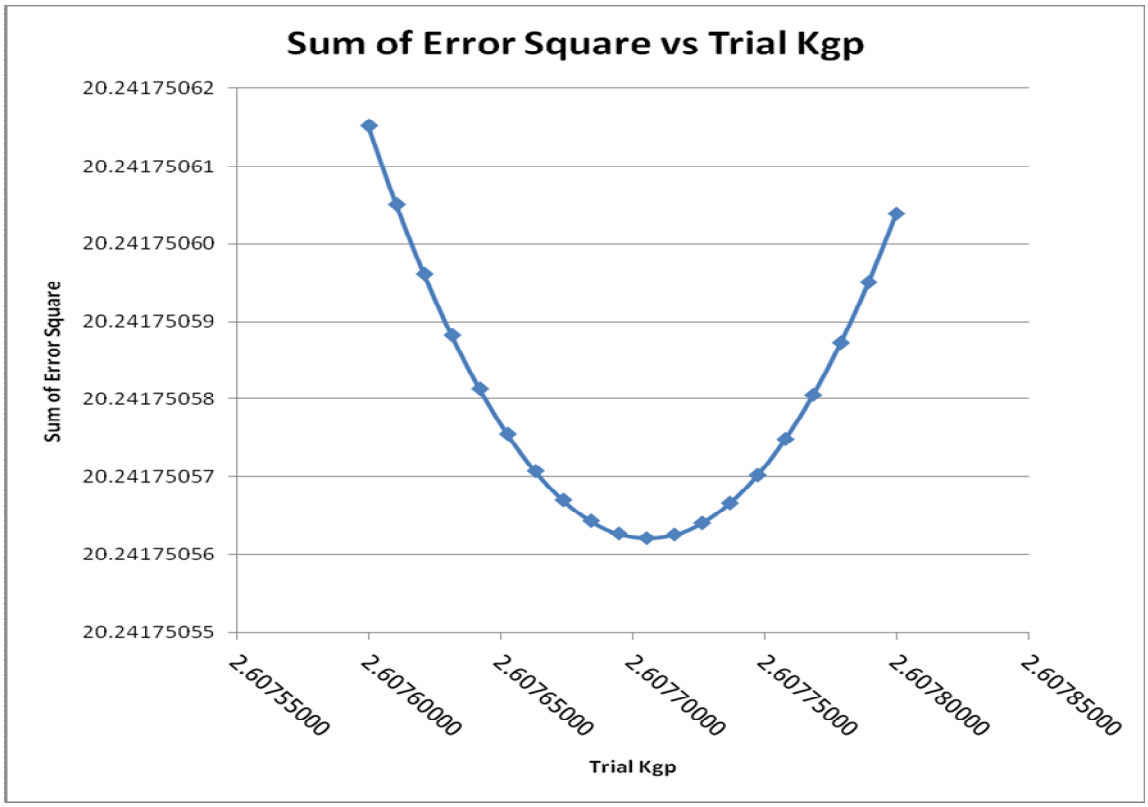


สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.3

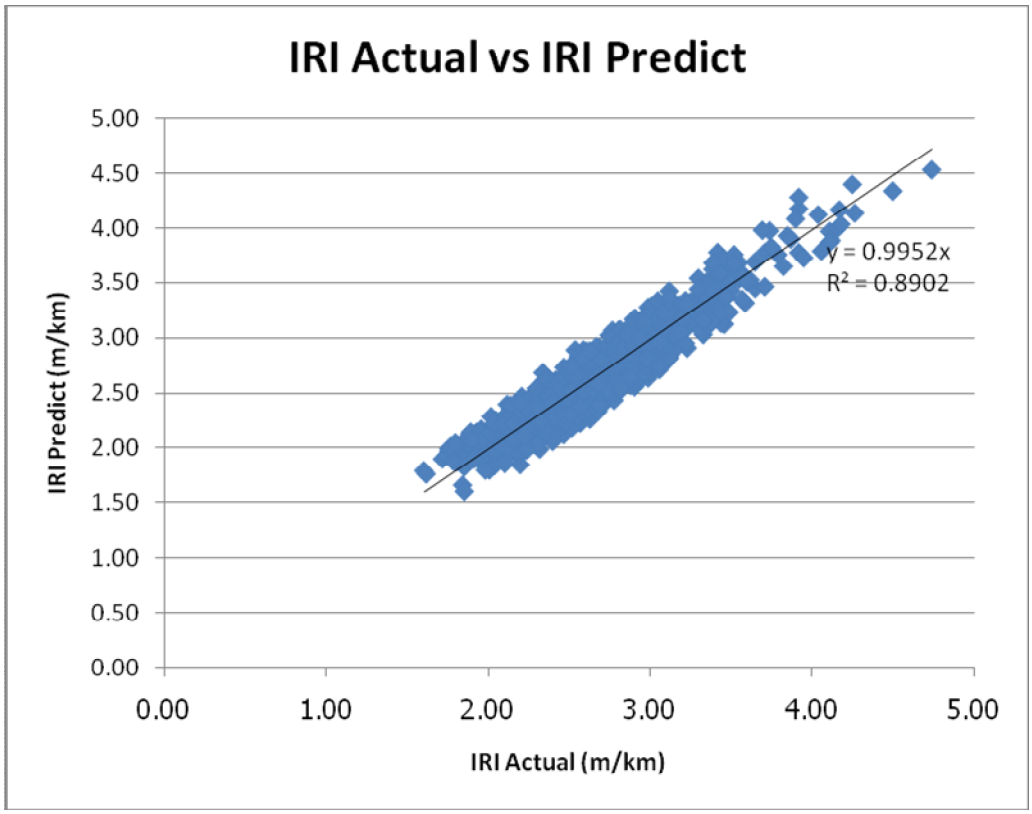



รูปที่ 4.10 การกระจายของข้อมูลที่มีค่ากลางและการกระจายเหมือนกันแต่ระดับความสัมพันธ์ต่างกัน

จากการทดลองปรับแก้ค่า Kgp ของตัวอย่างสายทาง 390 ช่วงสายทางที่คัดเลือกมาจากโครงข่ายทางทั้งหมดของกรมทางหลวงตามกระบวนการข้างต้น พบว่าค่า Kgp ที่ดีที่สุด คือ 2.6077 ซึ่งให้ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด อยู่ที่ 20.24175 (ม./กม.)$^2$ แสดงดังรูปที่ 4.11 และเมื่อทดสอบความสัมพันธ์ทางสถิติ ได้นำข้อมูลค่า IRI จริง และ IRI จากแบบจำลอง มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าค่า $R^2$ มีค่าเท่ากับ 0.8902 ดังรูปที่ 4.12




รูปที่ 4.11 ค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน เมื่อคำนวณโดยใช้ค่า Kgp ต่างๆ




รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI จริง และ IRI จากแบบจำลอง

อย่างไรก็ตาม การปรับแก้ค่า Kgp ที่แสดงข้างต้น มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับตัวแปรในสมการ dIRI มีไม่ครบถ้วนจึงจำเป็นต้องใช้ค่าสมมุติโดยให้อยู่บนพื้นฐานของความเป็นจริง เช่นค่า SNC หากจะใช้ค่าที่ถูกต้อง จำเป็นต้องทราบถึงความหนาของโครงสร้างชั้นทางแต่ละชั้น ซึ่งในกรณีนี้ยังไม่มีข้อมูล จึงต้องใช้ค่า SNC ทั่วไปตามประเภทของชั้นทางแทน

### 4.5.2 การปรับค่า $A_0$ ของแบบจำลองผลกระทบหลังการเสริมผิวทางลาดยาง

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่า IRI หลังจากเสริมผิวทางในระบบ TPMS ได้อ้างอิงจาก HDM-4 โดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\Delta RIa = \max\{0 , A_0[\min(a1,RIbw)–a2]+a3\max[0,(RIbw –a1)]\} \quad \ldots(4.7)$$

$$RIaw = RIbw – \Delta RIa \quad \ldots(4.8)$$

โดยที่ $A_0$ = 0.9 ค่าสัมประสิทธิ์ ปรับแก้(default)

$a1 = \max\{4.0 , 2.1\exp[0.019HSNEWaw]\}$

$a2 = 1 + 0.018\max[ 0 , (100-HSNEWaw)]$

a3 = min{ a0 , max[ 0 , (0.01HSNEWaw- 0.15)]}

$\Delta$RIa = การลดค่าของค่า IRI หลังการการเสริมผิวทาง

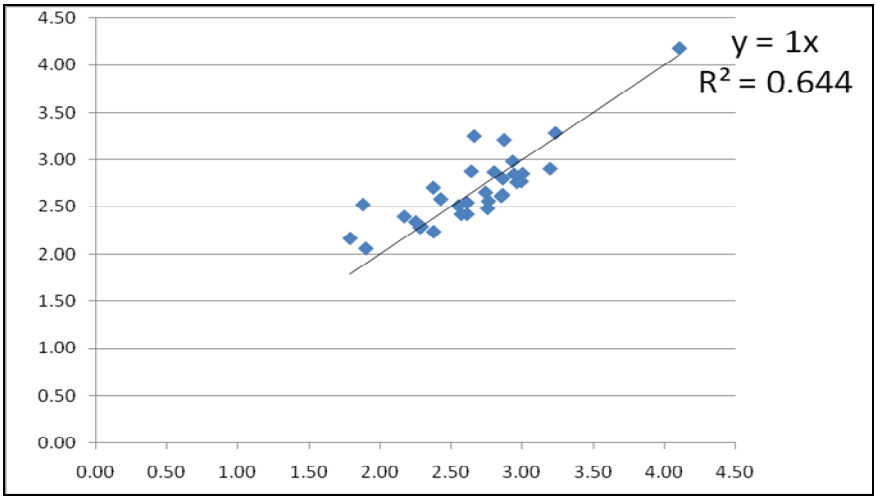
RIbw = ค่า IRI ก่อนการเสริมผิวทาง (m/km )

RIaw = ค่า IRI หลังการเสริมผิวทาง (m/km )

HSNEWaw = ความหนาของการเสริมผิวทาง (mm)

ขั้นตอนการปรับแก้คล้ายกับวิธีการปรับแก้ค่า kpg คือ เริ่มจากการคัดเลือกตัวอย่าสายทางของกรมทางหลวงที่มีการเสริมผิวทางลาดยาง ในปี 2553 โดยรวบรวมข้อมูล IRI ก่อนและหลังการเสริมผิวทางลาดยาง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค.) จากนั้นคำนวณค่า IRI หลังการเสริมผิวทางลาดยางโดยใช้สมการที่ (4.7) และ (4.8) ถัดมานำค่า IRI ที่คำนวณได้มา plot กราฟระหว่างค่า IRI ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่า IRI จริงหลังการเสริมผิวลาดยาง โดยวิเคราะห์หาค่า $A_0$ ที่ส่งผลให้เกิดค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า IRI จริง กับค่า IRI ที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและความชันใกล้เคียง 1 มากที่สุด ซึ่งหมายความว่าค่า IRI ที่คำนวณได้กับค่า IRI จริงหลังการซ่อมมีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงเป็นพิจารณาถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโดยคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($R^2$)

จากตัวอย่างผลการทดลองปรับแก้ค่า $A_0$ ของผิวทางลาดยาง 5 cm. จำนวน 43 ตัวอย่าง พบว่าค่า $A_0$ ที่ส่งผลให้เกิดค่าค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.1822 โดยมีความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($R^2$) เท่ากับ 0.644 แสดงดังรูปที่ 4.13




รูปที่ 4.13 ค่า IRI จริง และ IRI จากแบบจำลองผลกระทบหลังการเสริมผิวทางลาดยาง 5 cm

### 4.5.3 การปรับแก้ค่า $A_0$ ของแบบจำลองผลกระทบหลังการฉาบผิวทางลาดยาง

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณค่า IRI หลังจากฉาบผิวทางลาดยางในระบบ TPMS ได้อ้างอิงจาก HDM-4 โดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$RI_a = RI_b - MAX\{0, MIN[A_0*(RI_b - 2.85), 0.06 * Hsl ]\} \quad \ldots(4.9)$$

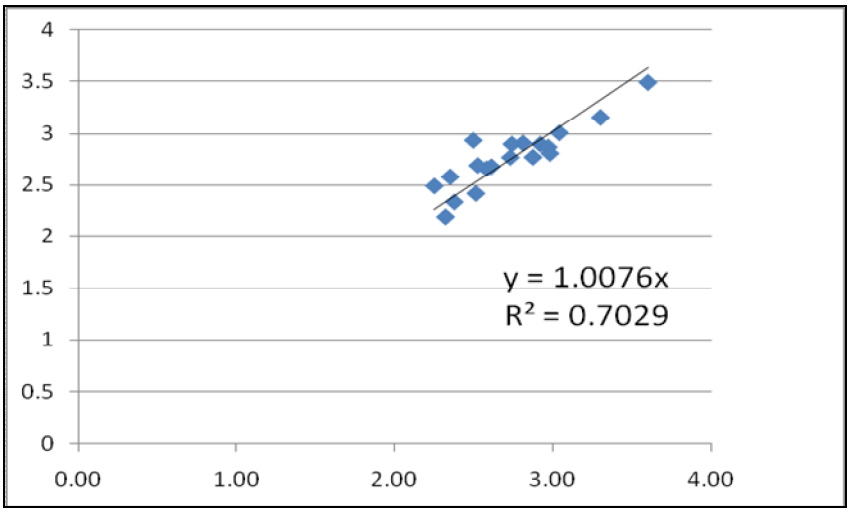
$RI_a$ = IRI หลังการฉาบผิว (m/km)

$RI_b$ = IRI ก่อนการฉาบผิว (m/km)

Hsl = ความหนาของการฉาบผิวl (mm)

$A_0$ = 1 ค่าสัมประสิทธิ์ ปรับแก้(default)

ขั้นตอนการปรับแก้คล้ายกับวิธีการปรับแก้ค่า kpg คือ เริ่มจากการคัดเลือกตัวอย่างสายทางของกรมทางหลวงที่มีการเสริมผิวทางลาดยาง ในปี 2553 โดยรวบรวมข้อมูล IRI ก่อนและหลังการฉาบผิวทางลาดยาง (ดูรายละเอียดภาคผนวก ค.) จากนั้นคำนวณค่า IRI หลังการฉาบผิวทางลาดยางโดยใช้สมการที่ (4.9) ถัดมานำค่า IRI ที่คำนวณได้มา plot กราฟระหว่างค่า IRI ที่คำนวณได้จากแบบจำลองและค่า IRI จริงหลังการเสริมผิวลาดยาง โดยวิเคราะห์หาค่า $A_0$ ที่ส่งผลให้เกิดค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ จากนั้นจึงเป็นพิจารณาถึงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโดยคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($R^2$) ซึ่งจากตัวอย่างผลการทดลองปรับแก้ค่า $A_0$ จำนวน 22 ตัวอย่าง พบว่าค่า $A_0$ ที่ส่งผลให้เกิดค่าค่าผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.25 โดยมีความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ($R^2$) เท่ากับ 0.7029 แสดงดังรูปที่ 4.14




รูปที่ 4.14 ค่า IRI จริง และ IRI จากแบบจำลองผลกระทบหลังการฉาบผิวทางลาดยาง

## 4.6 การพัฒนาการวิเคราะห์แผนงานโดยวิธี Optimization

ระบบ TPMS ออกแบบให้สามารถการวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงได้ 1-10 ปี ซึ่งในแต่ละปีสามารถกำหนดเงินงบประมาณหรือค่า IRI เป้าหมายเฉลี่ยของโครงข่ายทางที่ต้องการได้ สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ เริ่มจากแบบจำลองการเสื่อมสภาพของสายทาง ผลลัพธ์ที่ได้คือ ค่า IRI ในปีที่วิเคราะห์ (t) จากนั้นค่าสภาพความเสียหายที่คำนวณได้นี้จะถูกส่งไปเป็นข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองผลกระทบจากมาตรฐานการซ่อมเพื่อใช้เป็นปัจจัยเลือกวิธีการซ่อม โดยที่การเลือกวิธีซ่อมในแบบจำลองนี้จะขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขการซ่อม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองนี้คือการปรับลดค่า IRI โดยจะคำนวณค่า IRI หลังซ่อมบำรุงทุกวิธีที่ตรงกับเงื่อนไขการซ่อม ซึ่งได้แก่ค่า IRI หลังการซ่อมบำรุงปกติ และค่า IRI หลังการซ่อมบำรุงด้วยวิธีอื่นๆ (Road Work j)

นอกจากค่า IRI หลังการซ่อมแล้ว แบบจำลองผลกระทบจากมาตรฐานการซ่อมนี้จะคำนวณต้นทุนค่าซ่อมบำรุงเพื่อใช้วิเคราะห์ใน Optimization Model ต่อไป สำหรับค่า IRI หลังการซ่อมบำรุงปกติ และค่า IRI หลังการซ่อมด้วยวิธีต่างๆ จะถูกส่งไปยังแบบจำลองผลกระทบต่อผู้ใช้ทาง โดยการวิเคราะห์ในแบบจำลองนี้จะใช้ข้อมูลตัวแทนยานพาหนะและข้อมูลสายทาง ประกอบกับค่า IRI เพื่อคำนวณหาความเร็วในการเดินทาง อัตราการใช้เชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองอะไหล่และค่าซ่อม อัตราการสิ้นเปลืองยาง อัตราการเสื่อมของยานพาหนะ และเวลาในการเดินทาง ซึ่งทั้งหมดนี้ผลลัพธ์ที่ได้จะรวมเป็นค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางกรณีที่ซ่อมบำรุงปกติ (Road user cost in year t, Routine Maintenance) และค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางกรณีซ่อมบำรุงด้วยวิธีอื่นๆ (Road user cost in year t, Perform j Maintenance) นอกจากนี้อัตราการสิ้นเปลืองต่างๆ จะถูกส่งไปยังแบบจำลองสิ่งแวดล้อม (Environmental Model) เพื่อคำนวณปริมาณควันพิษและการใช้พลังงานของสายทาง

ในส่วนของการวิเคราะห์และจัดลำดับแผนงานซ่อมบำรุงโดยวิธี Network Optimization นั้นได้แบ่ง กรณีการวิเคราะห์ออกเป็น 3 กรณีหลัก ซึ่งแต่ละกรณีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กรณีไม่จำกัดงบประมาณ (Unlimited Budget)
    a. *Objective function: Maximize total benefit* ระบบจะวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงให้ โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นทางเลือกที่ทำให้เกิดผลประโยชน์โดยรวมของผู้ใช้ทางในโครงข่ายทางที่วิเคราะห์มากที่สุด
2. กรณีจำกัดงบประมาณในแต่ละปี (Budget Constraint)
    a. *Objective function: Maximize total benefit* ระบบจะวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงตามการจำกัดงบประมาณรูปแบบต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นทางเลือกที่ทำให้เกิดผลประโยชน์โดยรวมของผู้ใช้ทางในโครงข่ายทางที่วิเคราะห์มากที่สุดและเงินงบประมาณ

ไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งเหมาะสำหรับวิเคราะห์โครงข่ายทางที่มีปริมาณการจราจรสูง เนื่องจากผลประโยชน์ของผู้ใช้ทางจะแปรผันตามปริมาณการจราจร หากปริมาณการจราจรสูงผลประโยชน์ของผู้ใช้ทางจะสูงตามไปด้วย ซึ่งโปรแกรมจะใช้มุมมองทางด้านความคุ้มค่าทางด้นเศรษฐศาสตร์มาร่วมวิเคราะห์และคัดเลือกแผนงาน

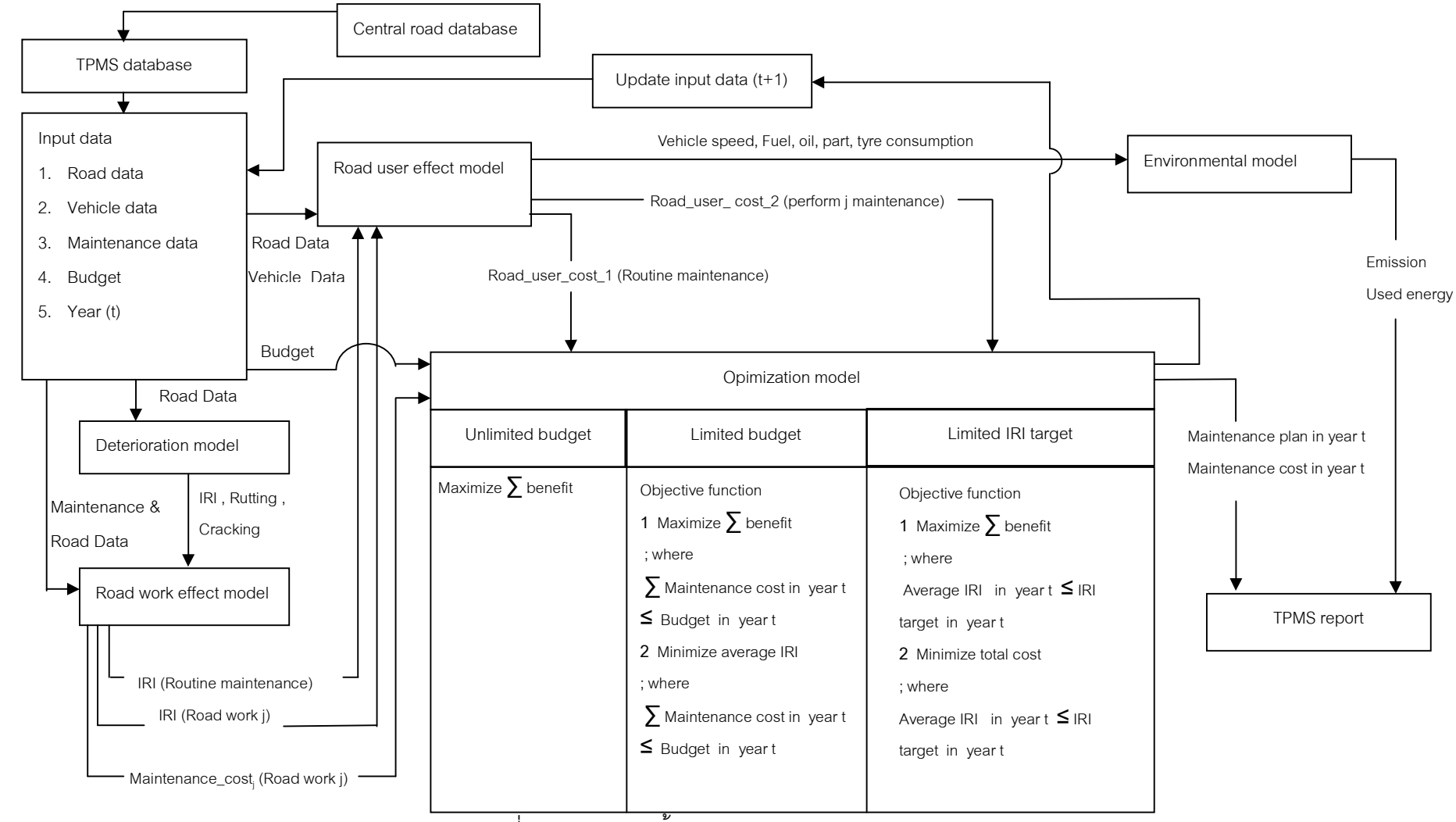
b. *Objective function: Minimize average IRI* ระบบจะวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงตามงบประมาณต่างๆ โดยผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นทางเลือกที่ทำให้เกิดค่าเฉลี่ย IRI ของทั้งโครงข่ายทางต่ำที่สุดและเงินงบประมาณไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงข่ายทางที่มีปริมาณการจราจรต่ำ เนื่องจากหากใช้มุมมองทางด้านความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เพียงอย่างเดียวมาวิเคราะห์สายทางที่ปริมาณการจราจรต่ำๆ อาจจะไม่คุ้มค่าในการซ่อม

3. กรณีกำหนดค่า IRI เป้าหมายในแต่ละปี (IRI Constraint)

a. *Objective function: Maximize total benefit* ระบบจะวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงโดยผลลัพธ์มีค่า IRI เฉลี่ยของโครงข่ายไม่เกินจากที่ผู้ใช้กำหนด และผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นทางเลือกที่ทำให้เกิดผลประโยชน์โดยรวมของผู้ใช้ทางในโครงข่ายทางที่วิเคราะห์มากที่สุด ซึ่งเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการวางแผนสายทางที่มีปริมาณการจราจรสูง

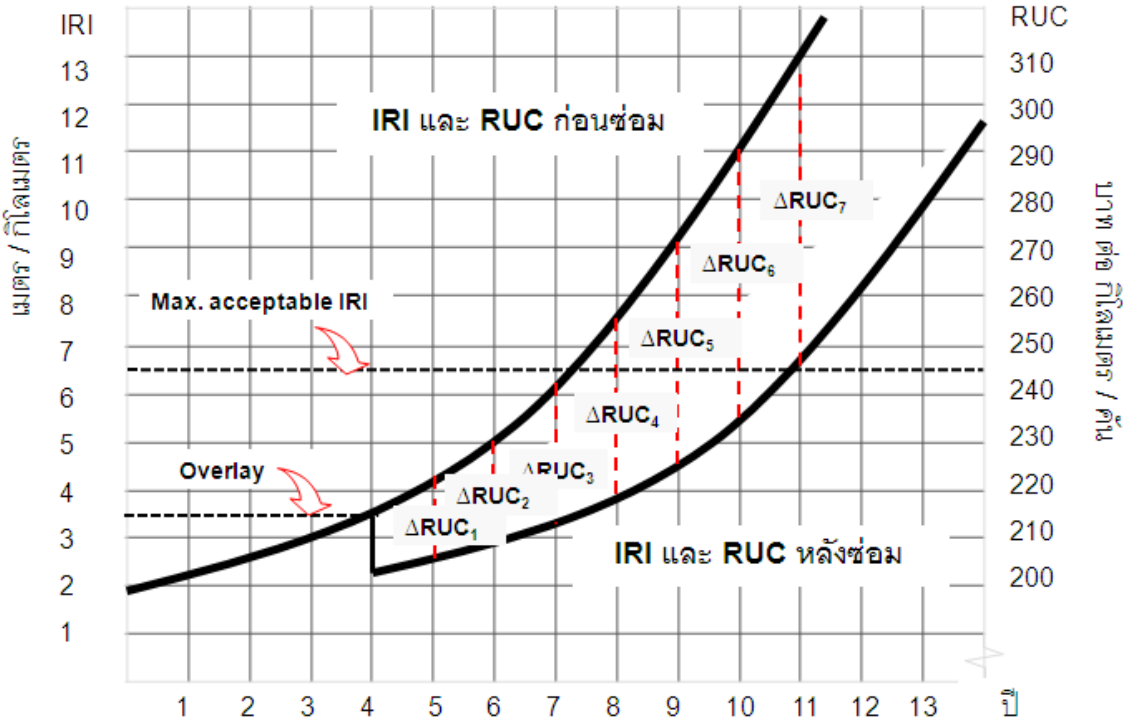
b. *Objective function: Minimize total cost* ระบบจะวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงโดยผลลัพธ์มีค่า IRI เฉลี่ยของโครงข่ายไม่เกินจากที่ผู้ใช้กำหนด และผลลัพธ์ที่ได้นั้นเป็นทางเลือกที่ทำให้เกิดผลรวมของค่าซ่อมบำรุงทางทั้งโครงข่ายต่ำที่สุด เหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการวางแผนสายทางที่มีปริมาณการจราจรต่ำ

แสดงภาพรวมขั้นตอนการวิเคราะห์ของระบบ TPMS ดังรูปที่ 4.15




รูปที่ 4.15 ภาพรวมขั้นตอนการวิเคราะห์ของระบบ TPMS

สำหรับวิธีการคำนวณค่าผลประโยชน์ของผู้ใช้ทาง พิจารณาจากผลต่างค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางระหว่างก่อนซ่อมและหลังซ่อม ซึ่งค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางจะแปรผันตามค่า IRI ดังนั้นเมื่อมีการซ่อมบำรุงสายทางจะส่งผลให้ค่า IRI ลดลง และค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางลดลงไปด้วย โดยการคำนวณผลประโยชน์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้จะคำนวณตลอดอายุการใช้งานของสายทาง (Life Cycle Analysis) ซึ่งเป็นการรวมส่วนต่างค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางดังกล่าวทุกปีไปจนถึงปีที่สายทางหมดอายุ การพิจารณาว่าสายทางหมดอายุหรือไม่นั้น ได้กำหนดจากค่า IRI หลังการซ่อมว่าเกินกว่าค่า IRI ที่ไม่สามารถรองรับการให้บริการที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งในตัวอย่างรูปที่ 4.16 กำหนดไว้ที่ค่า IRI มากที่สุดเท่ากับ 6.5 เมตร/กิโลเมตร โดยจำนวนปีที่นำส่วนต่างมารวมคือ 7 ปี ตั้งแต่ปีที่ 5 จนถึงปีที่ 11 นอกจากการนำมารวมกันตามที่กล่าวแล้ว ได้นำค่าอัตราส่วนลด หรือ Discount rate มาพิจาณาร่วมด้วยเพื่อคำนวณมูลค่าในอนาคตเทียบกลับมาเป็นปีปัจจุบัน ซึ่งผลประโยชน์รวมที่เกิดขึ้นหลังการซ่อมเทียบกลับมาในปีปัจจุบัน เท่ากับ $\Sigma\ (\Delta RUC_j) / (1+i)^n$ ; i = Discount Rate




รูปที่ 4.16 การคำนวณผลประโยชน์ของผู้ใช้ทางตลอดอายุการใช้งาน

## 4.7 การพัฒนาฟังก์ชั่นการใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ TPMS

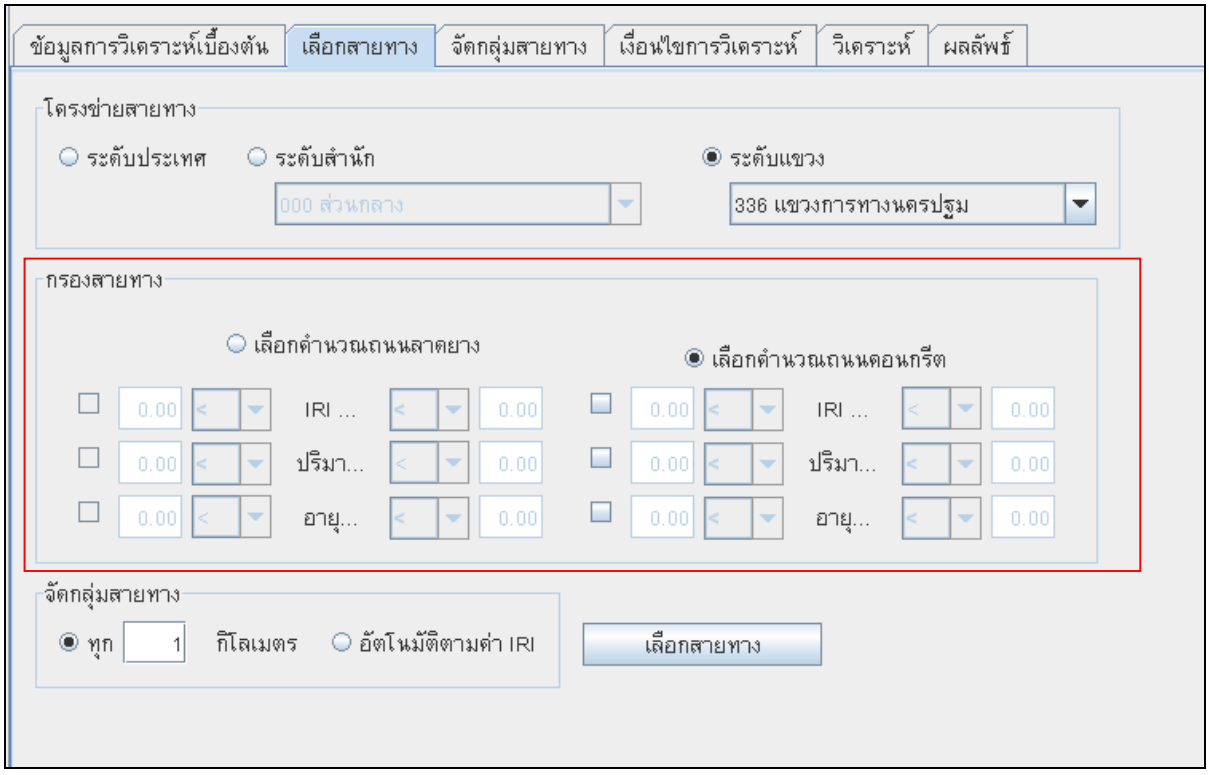
### 4.7.1 การสร้างข้อมูลสภาพสายทางแบบ Dynamic Segmentation

การสร้างข้อมูลแบบ Dynamic Segmentation คณะที่ปรึกษาได้ออกแบบให้สามารถเตรียมข้อมูลสายทางก่อนการวิเคราะห์ได้ 2 รูปแบบ คือ การกรองสายทางและการจัดกลุ่มสายทาง

4.7.1.1 *การกรองสายทาง* โปรแกรมสามารถคัดกรองสายทางได้จากการกำหนดเงื่อนไข 3 เงื่อนไข คือ

- ช่วงของค่า IRI
- ช่วงของปริมาณการจราจร
- ช่วงของอายุสายทาง

โดยผู้วิเคราะห์สามารถเลือกเงื่อนไขทั้ง 3 รวมกันได้ แสดงดังรูปที่ 4.17



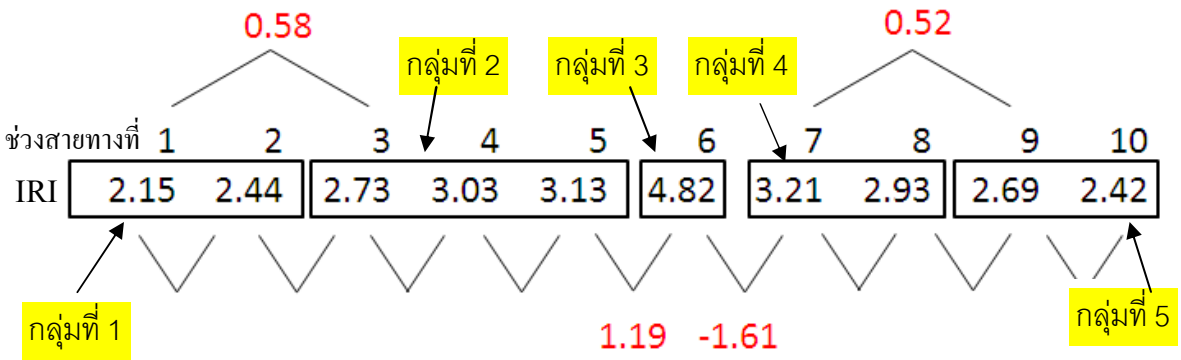

รูปที่ 4.17 หน้าจอการเลือกสายทางก่อนการวิเคราะห์

4.7.1.2 *การจัดกลุ่มสายทาง* คณะที่ปรึกษาได้ออกแบบให้โปรแกรมสามารถจัดกลุ่มได้ 2 รูปแบบคือ

- จัดกลุ่มโดยแบ่งเป็นช่วงความยาวเท่าๆ กัน ตามความต้องการของผู้ใช้ เช่น ทุกๆ 5 กิโลเมตร หรือ ทุกๆ 3 กิโลเมตร โดยที่ช่วงสั้นที่สุดคือ ทุกๆ 1 กิโลเมตร ตามความละเอียดของข้อมูลสายทางที่จัดเก็บในระบบ CRDB
- จัดกลุ่มสายทางโดยพิจารณาจากค่า IRI ที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับเงื่อนไขในการจัดกลุ่มมีดังนี้

- เป็นช่วงสายทางที่ต่อเนื่องกันโดยที่ กม สิ้นสุด ของช่วงก่อน เท่ากับ กม เริ่มต้นของช่วงหลัง เช่น ช่วง 30+015 – 31+015 และช่วง 31+015 – 32+015
- มีสภาพทางด้านกายภาพเหมือนกัน (Homogeneous section) ได้แก่
  a. หมายเลขทางหลวง
  b. ตอนควบคุม
  c. ทิศทางการจราจร
  d. ประเภทผิวทาง
  e. ความกว้างผิวจราจร
- กรณีที่เป็นการจัดกลุ่มสายทางโดยพิจารณาจากค่า IRI ที่ใกล้เคียงกัน มีเงื่อนไขในการรวมกลุ่มคือ ผลต่างของค่า IRI ที่มากที่สุดกับน้อยที่สุดในกลุ่มเดียวกันจะต้องไม่เกินค่าที่กำหนด ซึ่งผู้ใช้ระดับส่วนกลางหรือผู้ดูแลระบบสามารถปรับแก้ค่าได้จากหน้าจอโปรแกรม แสดงตัวอย่างวิธีการคำนวณในการจัดกลุ่มได้ดังรูปที่ 4.18

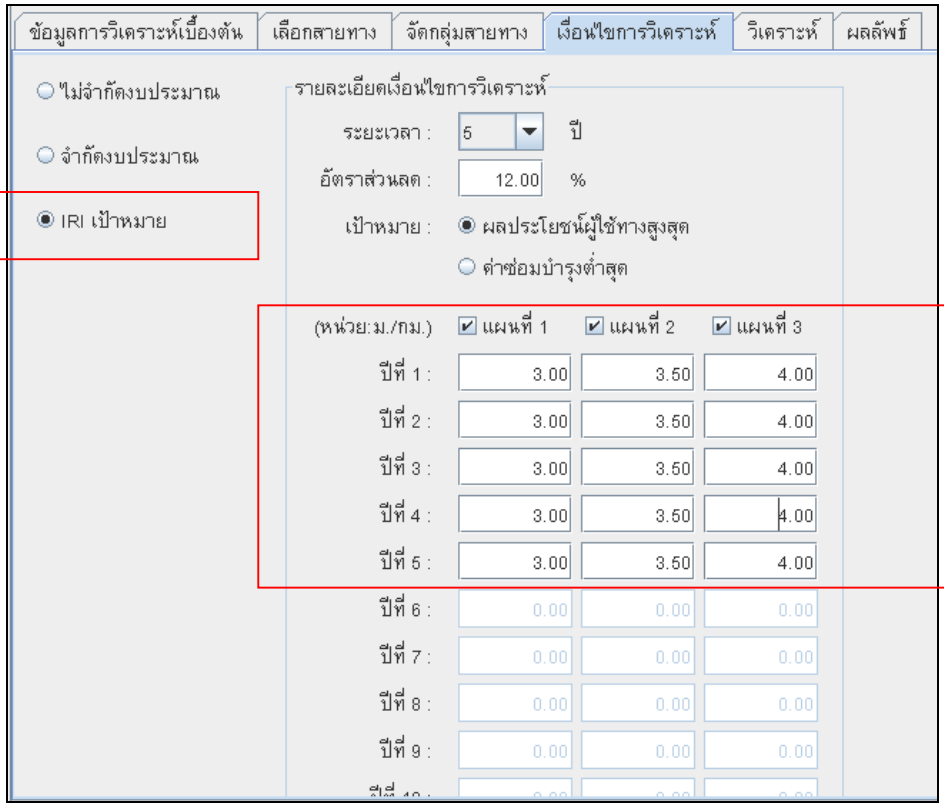



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการจัดกลุ่มสายทางโดยพิจารณาจากค่า IRI

จากรูปที่ 4.18 มีตัวอย่างสายทางทั้งหมด 10 ช่วง แต่ละช่วงมีค่า IRI แตกต่างกัน และกำหนดเงื่อนไขในการจัดกลุ่ม คือ ผลต่างของค่า IRI ที่มากที่สุด กับ น้อยที่สุดในกลุ่มเดียวกัน ไม่เกิน 0.5 เมตร/กิโลเมตร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าช่วงสายทางที่ 3 ไม่สามารถรวมกลุ่มกับ ช่วงสายทางที่ 1 และ 2 ได้ เนื่องจากผลต่างระหว่างค่า IRI ของช่วงสายทางที่ 1 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.58 จากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถแบ่งกลุ่มสายทางได้ทั้งหมด 5 กลุ่มดังรูปที่ข้างต้น

### 4.7.2 การพัฒนาให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์แผนซ่อมบำรุงจากการกำหนดเงื่อนไขค่า IRI เป้าหมายได้

จากที่กล่าวถึงการวิเคราะห์แผนงานโดยวิธี Optimization ในหัวข้อที่ 4.6 ข้างต้น ระบบ TPMS ได้ออกแบบให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์แผนงบประมาณซ่อมบำรุงได้จากการกำหนดค่า IRI เป้าหมายในแต่ละปี เป็นระยะเวลา 1-10 ปี โดยโปรแกรมจะคำนวณงบประมาณทั้งที่ต้องใช้และแนะนำวิธีการซ่อมบำรุงในแต่ละสายทางให้ แสดงหน้าจอตัวอย่างการกำหนดค่า IRI เป้าหมาย ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งกำหนดค่า IRI เป้าหมายในแต่ละปีนั้นสามารถกำหนดค่าได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการกำหนดนโยบายของผู้วิเคราะห์

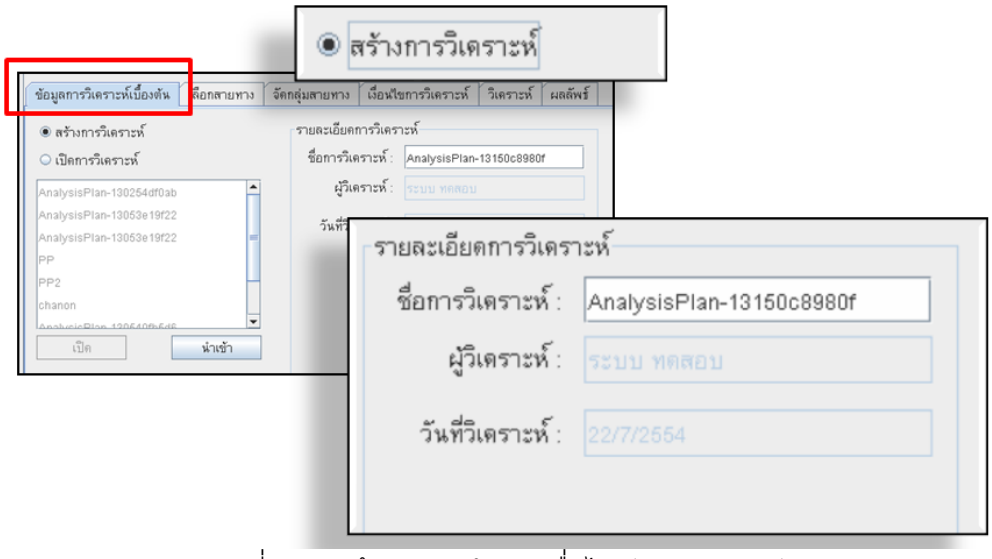



รูปที่ 4.19 หน้าจอการกำหนดค่า IRI เป้าหมายในแต่ละปีก่อนการวิเคราะห์

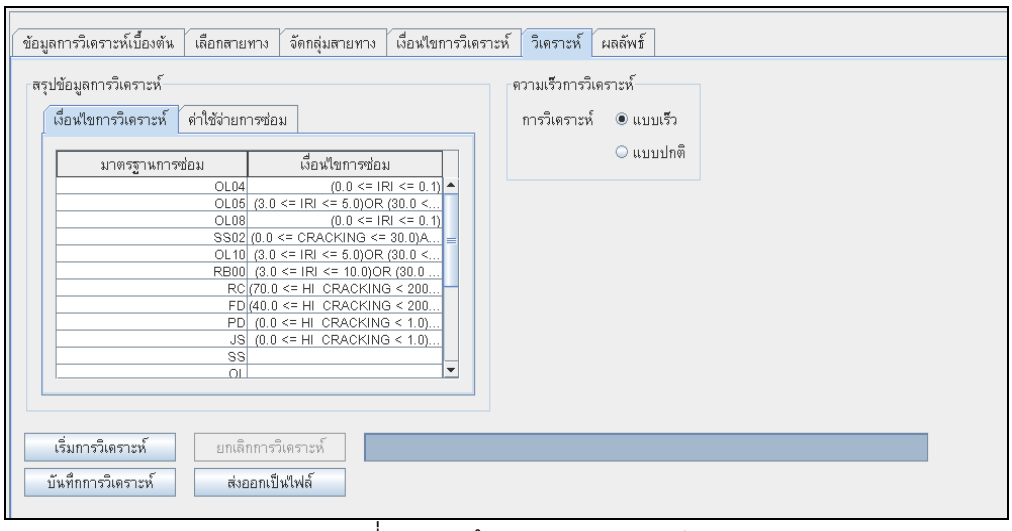
### 4.7.3 การบันทึกระหว่างการวิเคราะห์และการบันทึกผลการวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

การบันทึกรูปแบบการวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์นั้น ผู้วิเคราะห์ต้องกำหนดชื่อไฟล์การวิเคราะห์ก่อนในเมนู “การวิเคราะห์เบื้องต้น” ซึ่งโปรแกรมจะบันทึกชื่อของผู้วิเคราะห์และวันที่วิเคราะห์ให้อัตโนมัติตามรหัสการ Login เข้าสู่ระบบ แสดงหน้าจอการตั้งชื่อการวิเคราะห์ของโปรแกรมดังรูปที่ 4.20 หลังจากที่ผู้วิเคราะห์ได้กำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ต่างๆ และได้สั่งให้โปแกรมประมวลผลแล้ว เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์เสร็จ ผู้ใช้สามารถบันทึกรูปแบบการวิเคราะห์เพื่อเก็บไว้สำหรับนำกลับมาวิเคราะห์ใหม่ได้โดยกดปุ่ม

ในหน้าจอการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 4.21




รูปที่ 4.20 หน้าจอการกำหนดชื่อไฟล์การวิเคราะห์



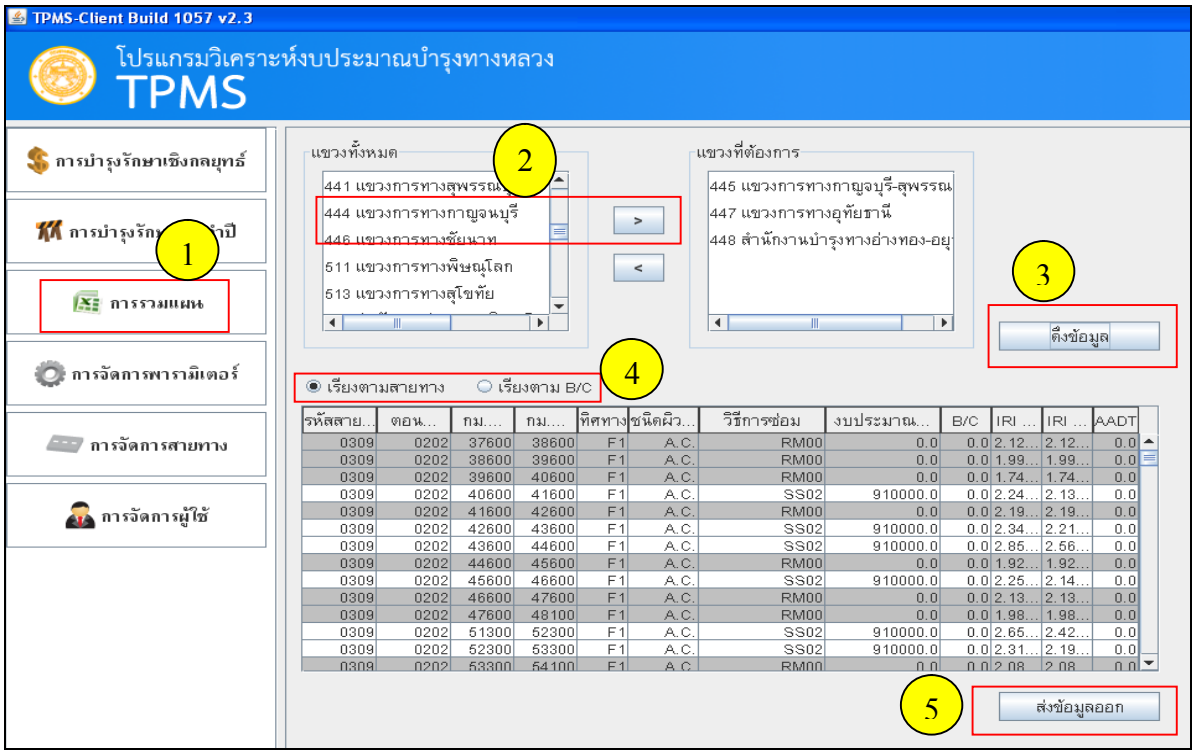

รูปที่ 4.21 หน้าจอการวิเคราะห์

### 4.7.4 การส่งต่อผลการวิเคราะห์ จากแขวงการทาง/สำนักงานบำรุงทาง สู่สำนักทางหลวง/สำนักงานทางหลวง และสำนักบริหารบำรุงทาง เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแผนงานบำรุงทาง

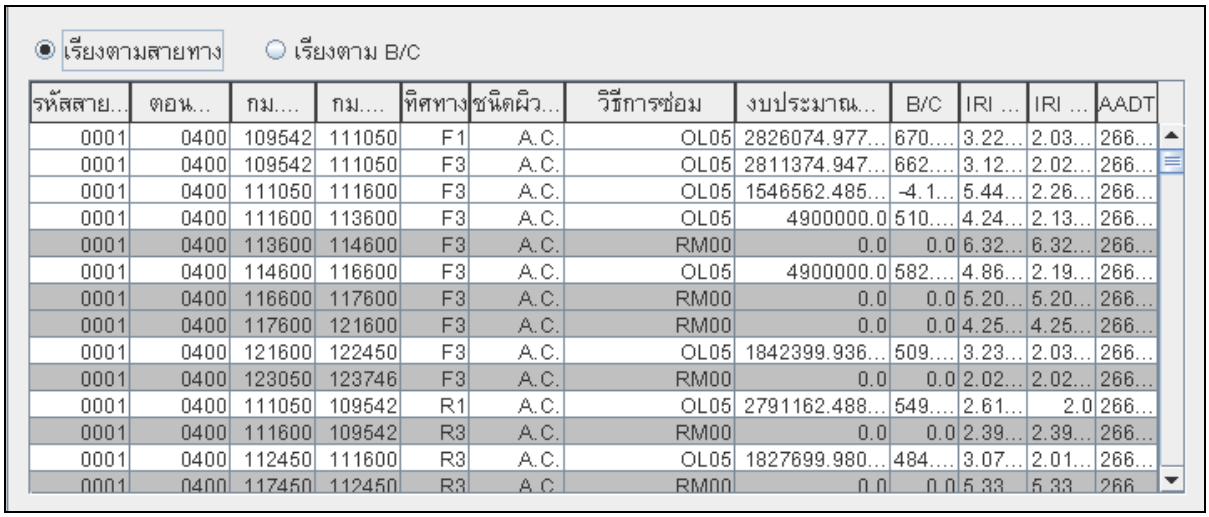
ที่ปรึกษาได้ออกแบบฟังก์ชั่นการรวมแผนงานออกแบบมาเพื่อให้เจ้าหน้าที่ในส่วนกลางสามารถนำผลการวิเคราะห์ของแผนงานบำรุงรักษาประจำปีของแต่ละแขวงมารวมกัน โดยสามารถเรียกดูได้แบบเรียงตามรหัสสายทางและเรียงตามค่า B/C นอกจากนั้นสามารถส่งออกการรวมแผนงานดังกล่าวในรูปแบบ Excel File เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ต่อหรือทำเอกสารรายงานต่อไปได้ โดยมีขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. กดปุ่มเมนู

ตำแหน่งที่ 1 ในรูปที่ 4.22
2. เลือกแผนงานในแขวงที่ต้องการ ตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 4.22
3. กดปุ่มดึงข้อมูล ตำแหน่งที่ 3 โปรแกรมจะแสดงผลดังรูปที่ 4.23 และ 4.24
4. เรียงแผนงานที่รวมกันได้ตามรหัสสายทางและตามค่า B/C
5. กรณีกดปุ่ม “ส่งออกข้อมูล” โปรแกรมจะแสดงผลดังรูปที่ 4.25 เพื่อเลือกที่อยู่ในการจัดเก็บ




รูปที่ 4.22 หน้าจอการรวมแผนงาน

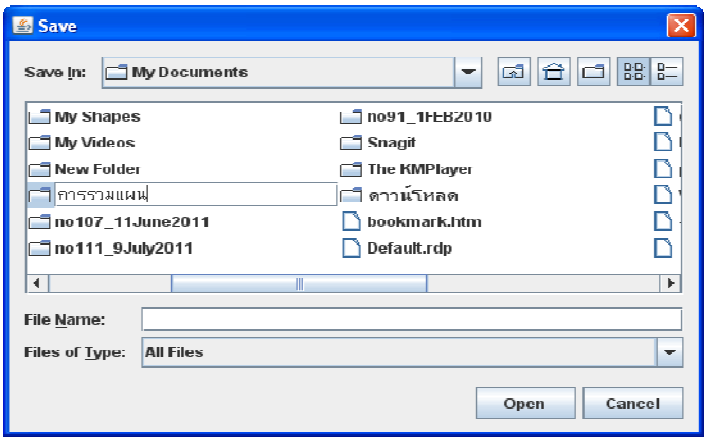



| รหัสสาย... | ตอน... | กม.... | กม.... | ทิศทาง | ชนิดผิว... | วิธีการซ่อม | งบประมาณ... | B/C | IRI ... | IRI ... | AADT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0001 | 0400 | 109542 | 111050 | F1 | A.C. | OL05 | 2826074.977... | 670.... | 3.22... | 2.03... | 266... |
| 0001 | 0400 | 109542 | 111050 | F3 | A.C. | OL05 | 2811374.947... | 662.... | 3.12... | 2.02... | 266... |
| 0001 | 0400 | 111050 | 111600 | F3 | A.C. | OL05 | 1546562.485... | -4.1... | 5.44... | 2.26... | 266... |
| 0001 | 0400 | 111600 | 113600 | F3 | A.C. | OL05 | 4900000.0 | 510.... | 4.24... | 2.13... | 266... |
| 0001 | 0400 | 113600 | 114600 | F3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 6.32... | 6.32... | 266... |
| 0001 | 0400 | 114600 | 116600 | F3 | A.C. | OL05 | 4900000.0 | 582.... | 4.86... | 2.19... | 266... |
| 0001 | 0400 | 116600 | 117600 | F3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 5.20... | 5.20... | 266... |
| 0001 | 0400 | 117600 | 121600 | F3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 4.25... | 4.25... | 266... |
| 0001 | 0400 | 121600 | 122450 | F3 | A.C. | OL05 | 1842399.936... | 509.... | 3.23... | 2.03... | 266... |
| 0001 | 0400 | 123050 | 123746 | F3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 2.02... | 2.02... | 266... |
| 0001 | 0400 | 111050 | 109542 | R1 | A.C. | OL05 | 2791162.488... | 549.... | 2.61... | 2.0 | 266... |
| 0001 | 0400 | 111600 | 109542 | R3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 2.39... | 2.39... | 266... |
| 0001 | 0400 | 112450 | 111600 | R3 | A.C. | OL05 | 1827699.980... | 484.... | 3.07... | 2.01... | 266... |
| 0001 | 0400 | 117450 | 112450 | R3 | A.C. | RM00 | 0.0 | 0.0 | 5.33 | 5.33 | 266 |

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการแสดงผลการรวมแผนงานเรียงตามรหัสสายทาง

| รหัสสาย... | ตอน... | กม.... | กม.... | ทิศทาง | ชนิดผิว... | วิธีการซ่อม | งบประมาณ... | B/C | IRI ... | IRI ... | AADT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0001 | 0400 | 109542 | 111050 | F1 | A.C. | OL05 | 2826074.977... | 670.... | 3.22... | 2.03... | 266... |
| 0001 | 0400 | 109542 | 111050 | F3 | A.C. | OL05 | 2811374.947... | 662.... | 3.12... | 2.02... | 266... |
| 0001 | 0400 | 114600 | 116600 | F3 | A.C. | OL05 | 4900000.0 | 582.... | 4.86... | 2.19... | 266... |
| 0001 | 0400 | 123746 | 123050 | R3 | A.C. | OL05 | 1908549.961... | 565.... | 4.22... | 2.13... | 266... |
| 0001 | 0400 | 111050 | 109542 | R1 | A.C. | OL05 | 2791162.488... | 549.... | 2.61... | 2.0 | 266... |
| 0001 | 0400 | 111600 | 113600 | F3 | A.C. | OL05 | 4900000.0 | 510.... | 4.24... | 2.13... | 266... |
| 0001 | 0400 | 121600 | 122450 | F3 | A.C. | OL05 | 1842399.936... | 509.... | 3.23... | 2.03... | 266... |
| 0001 | 0400 | 112450 | 111600 | R3 | A.C. | OL05 | 1827699.980... | 484.... | 3.07... | 2.01... | 266... |
| 0033 | 0101 | 102000 | 103000 | F2 | A.C. | OL05 | 2450000.0 | 388.... | 4.67... | 2.17... | 133... |
| 0033 | 0101 | 104000 | 105000 | F2 | A.C. | OL05 | 2450000.0 | 388.... | 4.58... | 2.16... | 133... |
| 0033 | 0101 | 105833 | 104833 | R2 | A.C. | OL05 | 2450000.0 | 384.... | 3.34... | 2.04... | 133... |
| 0033 | 0101 | 105000 | 106000 | F2 | A.C. | OL05 | 2450000.0 | 372.... | 3.70... | 2.08... | 133... |
| 0033 | 0101 | 101000 | 102000 | F2 | A.C. | OL05 | 2450000.0 | 367.... | 3.57... | 2.06... | 133... |
| 0323 | 0202 | 101000 | 100927 | R2 | A.C. | RR00 | 243459.9916 | 157 | 6.5 | 1.8 | 501 |

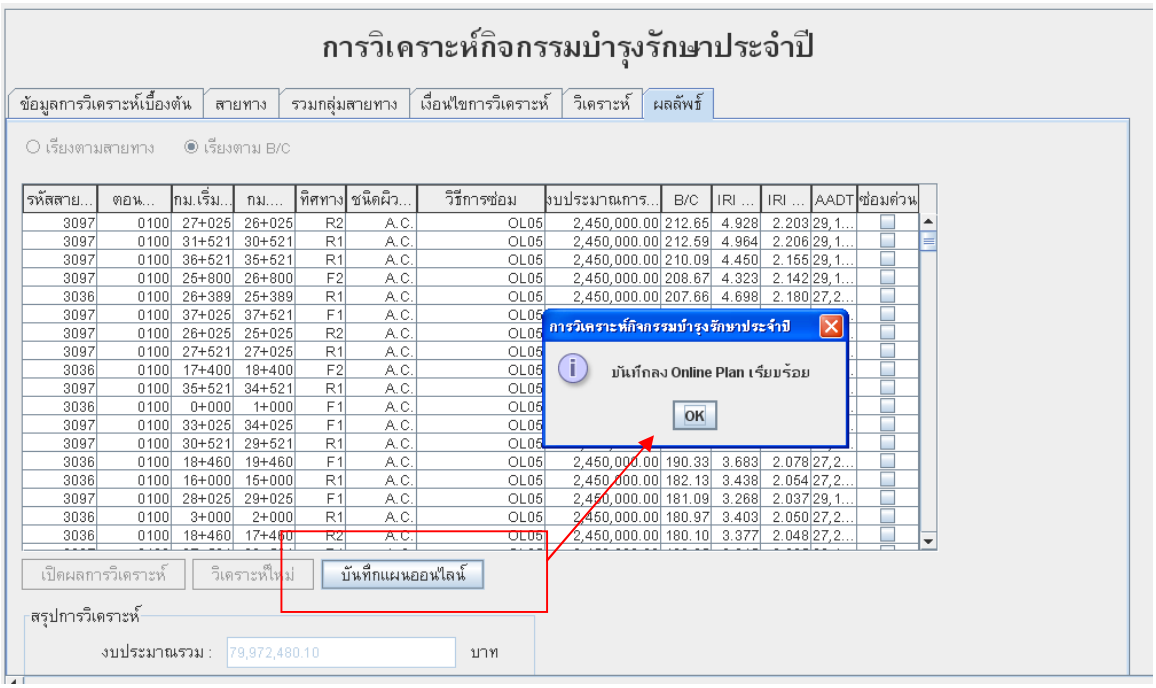
รูปที่ 4.24 ตัวอย่างการแสดงผลการรวมแผนงานเรียงตามค่า B/C




รูปที่ 4.25 หน้าจอแสดงการเลือกที่อยู่สำหรับจัดเก็บการส่งออกข้อมูลการรวมแผน

### 4.7.5 การส่งผลการวิเคราะห์เข้ามายังโปรแกรมสารสนเทศแผนรายประมาณการ (Online Plan)

คณะที่ปรึกษาได้ออกแบบให้สามารถส่งออกข้อมูลผลการวิเคราะห์บำรุงรักษาประจำปี (Export Data) ไปเป็นข้อมูลนำเข้า (Input Data) สำหรับระบบ Online Plan โดยโปรแกรมจะส่งวิธีการซ่อมบำรุงที่โปรแกรมแนะนำ ราคาค่าซ่อมบำรุง ค่า IRI และอัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน (B/C Ratio) หลังการซ่อม ซึ่งหากผู้ใช้ตรวจสอบและต้องการส่งผลการวิเคราะห์ดังกล่าวไปยังระบบ Online Plan สามารถส่งได้จากหน้าของผลการวิเคราะห์แผนงานบำรุงรักษาประจำปี ดังรูปที่ 4.26 ข้อมูลผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจะถูกบันทึกและจัดเก็บไว้ที่ Application Server เพื่อเตรียมให้ระบบ Online Plan สืบเรียกต่อไป

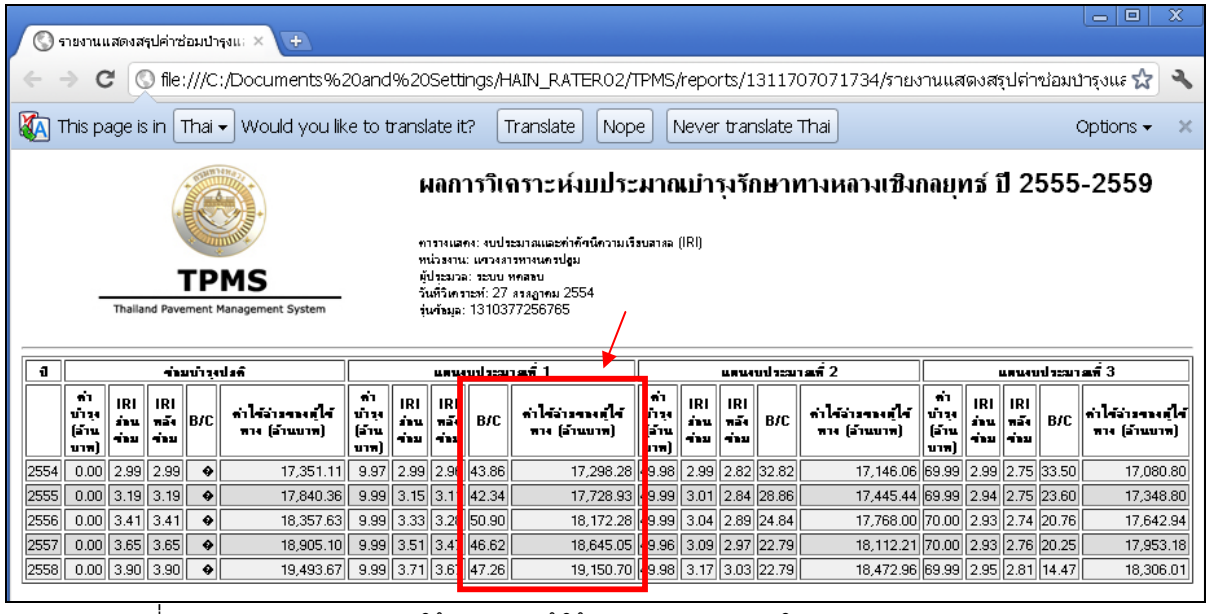



รูปที่ 4.26 หน้าจอแสดงผลการวิเคราะห์เพื่อบันทึกไปยังระบบ Online Plan

### 4.7.6 การแสดงและสรุปผลประโยชน์ที่เกิดขึ้น (Road User Benefits) จากการดำเนินการซ่อมบำรุงสายทาง

จากวิธีการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางในหัวข้อที่ 3.5 ผลการคำนวณทั้งหมดจะแสดงเป็นค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางและอัตราผลประโยชน์ต่อต้นทุนหลังการซ่อม (B/C) ในรายงานสรุปงบประมาณในแต่ละแผนกับค่า IRI ที่เกิดขึ้นในแต่ละปี แสดงดังรูปที่ 4.27 โดยที่

ผลประโยชน์ของผู้ใช้ทางคำนวณจากค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางที่ลดลงเทียบกับกรณีที่เป็นการบำรุงปกติ

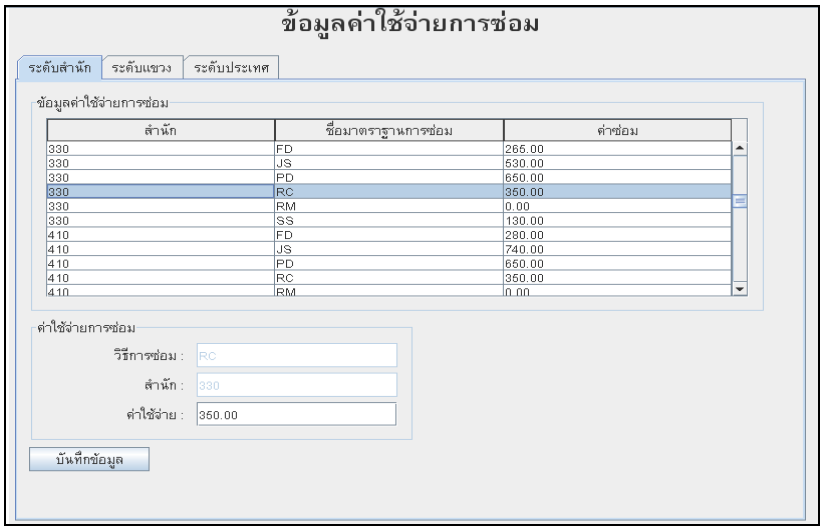



| ปี | ซ่อมบำรุงปกติ | | | | | แผนงบประมาณที่ 1 | | | | | แผนงบประมาณที่ 2 | | | | | แผนงบประมาณที่ 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ค่าบำรุง (ล้านบาท) | IRI ส่วนซ่อม | IRI หลังซ่อม | B/C | ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง (ล้านบาท) | ค่าบำรุง (ล้านบาท) | IRI ส่วนซ่อม | IRI หลังซ่อม | B/C | ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง (ล้านบาท) | ค่าบำรุง (ล้านบาท) | IRI ส่วนซ่อม | IRI หลังซ่อม | B/C | ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง (ล้านบาท) | ค่าบำรุง (ล้านบาท) | IRI ส่วนซ่อม | IRI หลังซ่อม | B/C | ค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง (ล้านบาท) |
| 2554 | 0.00 | 2.99 | 2.99 | ◆ | 17,351.11 | 9.97 | 2.99 | 2.96 | 43.86 | 17,298.28 | 9.98 | 2.99 | 2.82 | 32.82 | 17,146.06 | 69.99 | 2.99 | 2.75 | 33.50 | 17,080.80 |
| 2555 | 0.00 | 3.19 | 3.19 | ◆ | 17,840.36 | 9.99 | 3.15 | 3.11 | 42.34 | 17,728.93 | 9.99 | 3.01 | 2.84 | 28.86 | 17,445.44 | 69.99 | 2.94 | 2.75 | 23.60 | 17,348.80 |
| 2556 | 0.00 | 3.41 | 3.41 | ◆ | 18,357.63 | 9.99 | 3.33 | 3.26 | 50.90 | 18,172.28 | 9.99 | 3.04 | 2.89 | 24.84 | 17,768.00 | 70.00 | 2.93 | 2.74 | 20.76 | 17,642.94 |
| 2557 | 0.00 | 3.65 | 3.65 | ◆ | 18,905.10 | 9.99 | 3.51 | 3.47 | 46.62 | 18,645.05 | 9.96 | 3.09 | 2.97 | 22.79 | 18,112.21 | 70.00 | 2.93 | 2.76 | 20.25 | 17,953.18 |
| 2558 | 0.00 | 3.90 | 3.90 | ◆ | 19,493.67 | 9.99 | 3.71 | 3.61 | 47.26 | 19,150.70 | 9.98 | 3.17 | 3.03 | 22.79 | 18,472.96 | 69.99 | 2.95 | 2.81 | 14.47 | 18,306.01 |

รูปที่ 4.27 รายงานแสดงค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทางและค่า B/C ในรูปแบบงบประมาณต่างๆ

### 4.7.7 การกำหนดราคาต่อหน่วยของค่าบำรุงรักษาแต่ละลักษณะงานและสามารถบันทึกได้

การกำหนดราคาต่อหน่วยของค่าบำรุงรักษาแต่ละลักษณะงาน สามารถปรับแก้ค่าได้จาก เมนู “ค่าใช้จ่ายในการซ่อม” โดยผู้ใช้งานระดับส่วนกลางหรือผู้ดูแลระบบสามารถแก้ไขค่าซ่อมบำรุงต่างๆ ในระดับประเทศ ระดับเขต และระดับแขวง ได้จากตารางในหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 4.28 เมื่อแก้ไขเสร็จเรียบร้อยให้กดปุ่มบันทึก เพื่อจัดเก็บข้อมูลที่แก้ไข

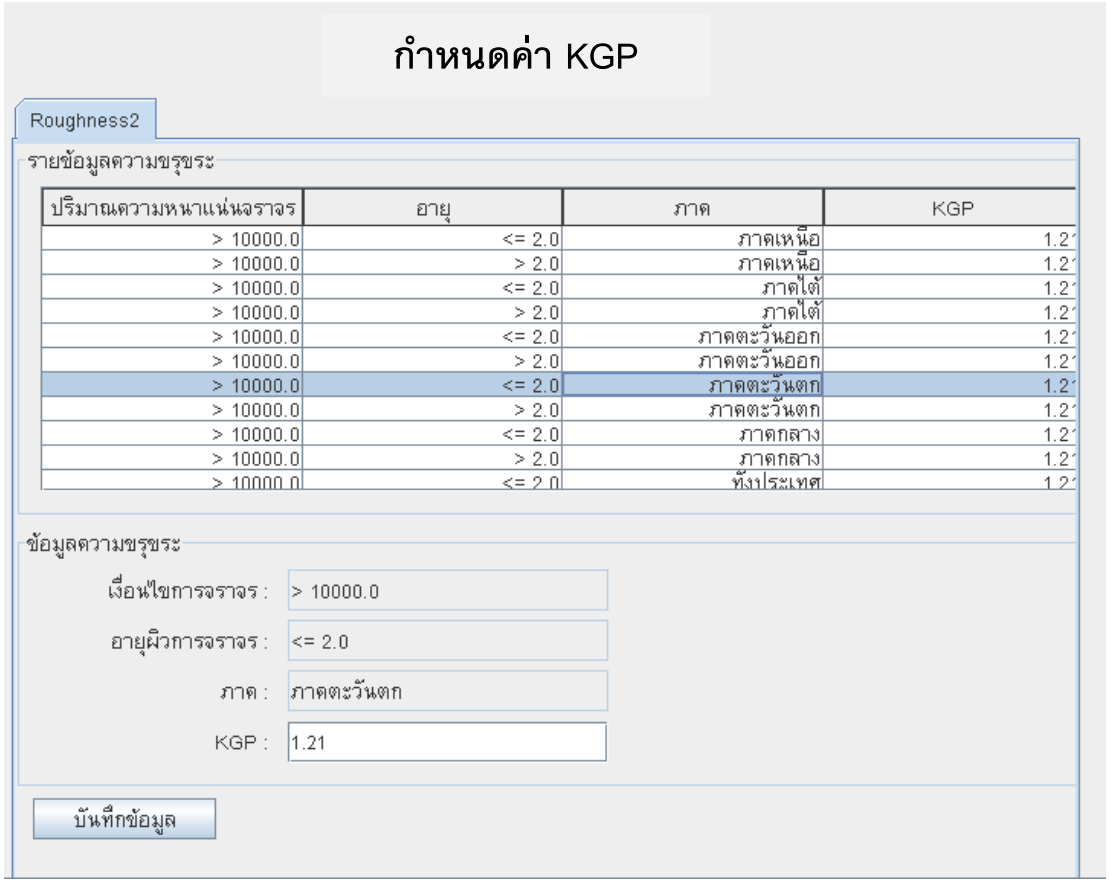



รูปที่ 4.28 หน้าจอการปรับแก้ราคาค่าซ่อมบำรุงประเภทต่างๆ ในแต่ละพื้นที่

### 4.7.8 **การปรับแก้ค่าคงที่ของสมการ** (Model Calibration)

การปรับแก้ค่าคงที่ของสมการในการการศึกษาโครงการนี้มุ่งเน้นที่แบบจำลองการทำนายค่า IRI เนื่องจากค่า IRI เป็นพารามิเตอร์หลักที่ส่งผลกระทบถึงแบบจำลองค่าใช้จ่ายของผู้ใช้ทาง แบบจำลองผลกระทบหลังการซ่อม ตลอดจนงบประมาณค่าซ่อมบำรุง นอกจากนั้นปัจจุบันกรมทางหลวงมีนโยบายการจัดเก็บข้อมูล IRI อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นหากสามารถปรับแก้สมการการทำนายค่า IRI ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นก็จะส่งผลให้ผลการวิเคราะห์แผนงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

จากหัวข้อที่ 3.4 จะเห็นว่า ค่า KPG เป็น ค่าสัมประสิทธิ์ที่สำคัญในแบบจำลองการทำนายค่า IRI ของผิวทางลาดยาง ถ้าค่า KGP มากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเสื่อมสภาพของค่า IRI สูงมากขึ้น ซึ่งปัจจุบันค่าที่ใช้ในแบบจำลองนี้ได้ทำการปรับแก้จากข้อมูล IRI ของกรมทางทางหลวงที่ผ่านมา ดังนั้นหากในอนาคตมีการศึกษาหรือปรับแก้ค่าตามข้อมูลที่ได้รับในอนาคต ผู้ใช้สามารถนำมาแก้ไขได้ในหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 4.29 โดยโปรแกรมได้จัดกลุ่มของค่า KGP ตาม ภาค อายุของสายทางและปริมาณการจราจร หากแก้ไขค่าแล้วให้กดปุ่มบันทึก เพื่อจัดเก็บข้อมูลที่แก้ไข




รูปที่ 4.29 หน้าจอการปรับแก้ ค่า KGP ของแบบจำลองการทำนายค่า IRI ผิวทางลาดยาง

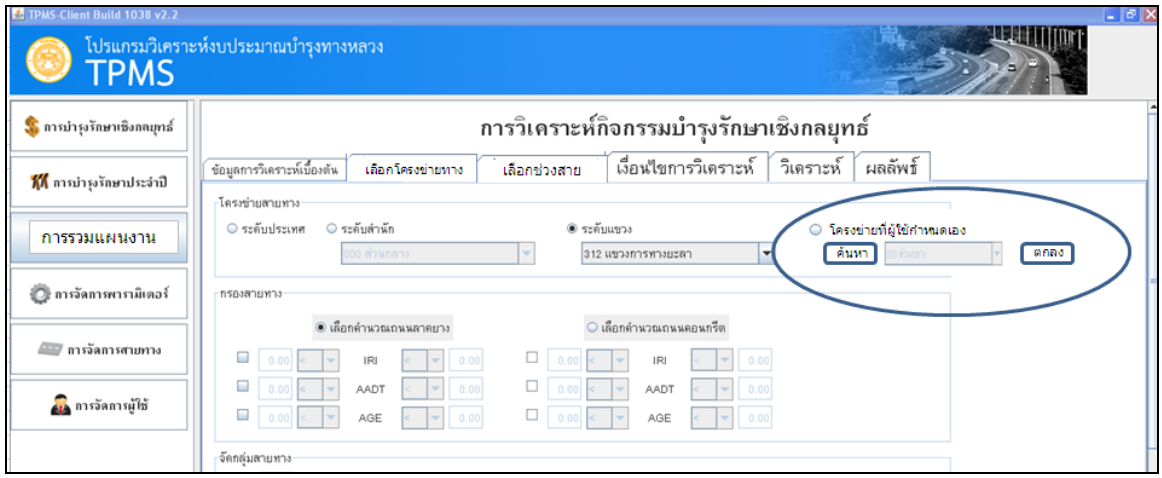
### 4.7.9 การนำเข้า (Import) รายการสายทาง ในรูปแบบ Excel Template สำหรับการวิเคราะห์ และส่งออก (Export) ข้อมูลในรูปแบบ Excel หรือรูปแบบอื่นๆ

โปรแกรม TPMS สามารถนำเข้าข้อมูลสายทางได้ตามการคัดเลือกของผู้ใช้ 2 วิธีคือ

1) คัดเลือกสายทางทางจากหน้าจอโปรแกรม ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น
2) นำเข้าจาก Excel File ที่ผู้ใช้คัดเลือกสายทางไว้แล้ว โดยมีรูปแบบที่ดังตารางที่ 4.7 และนำเข้า Excel File ได้จากเมนู “โครงข่ายทางที่ผู้ใช้กำหนดเอง” ดังรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.7 รูปแบบ Excel file สำหรับนำเข้าข้อมูลสายทาง

| รหัสเขต | รหัสแขวง | รหัสสายทาง | ตอนควบคุม | กม เริ่มต้น | กม สิ้นสุด |
|---|---|---|---|---|---|
| 520 | 521 | 1 | 100 | 230300 | 238000 |
| 520 | 521 | 1 | 100 | 314000 | 358000 |
| 520 | 521 | 1 | 100 | 230300 | 238000 |
| 520 | 521 | 1 | 100 | 230300 | 238000 |
| 520 | 523 | 24 | 100 | 230300 | 238000 |
| 520 | 523 | 24 | 100 | 230300 | 238000 |
| 520 | 523 | 24 | 100 | 230300 | 238000 |




รูปที่ 4.30 หน้าจอการนำเข้าข้อมูลโครงข่ายทางที่ผู้ใช้กำหนดเอง

สำหรับวิธีการใช้งานระบบสามารถดูรายละเอียดขั้นตอนการใช้งานต่างๆ ได้ในคู่มือการใช้งานระบบ TPMS และคู่มือการดูแลรักษาระบบ TPMS

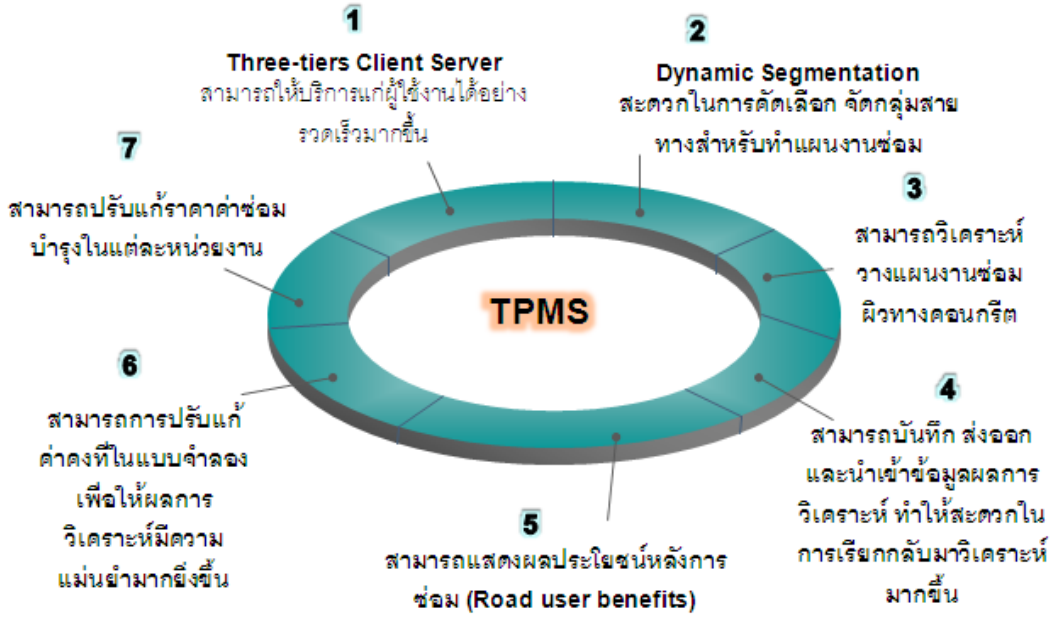
## 4.8 สรุปภาพรวมระบบและผลการวิเคราะห์แผนงบประมาณซ่อมบำรุงทางโดย TPMS

### 4.8.1 สรุปภาพรวมการเพิ่มประสิทธิภาพระบบ TPMS

ปัจจุบันระบบบริหารงานบำรุงทางหลวง (TPMS) ได้ดำเนินงานพัฒนาโปรแกรมครบถ้วนตามกรอบของการพัฒนาและกำลังดำเนินการทดสอบระบบ ซึ่งการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ TPMS ในโครงการนี้ สามารถสรุปภาพรวมการพัฒนาได้ 7 ประเด็นหลัก คือ

1) ได้พัฒนาปรับปรุงสถาปัตยกรรมของระบบให้อยู่ในรูปแบบ Three-tiers Client Server โดยสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น และความปลอดภัยของข้อมูลที่เครื่องแม่ข่ายสูงมากขึ้น
2) ผู้ใช้สามารถคัดเลือกและเตรียมข้อมูลสายทางก่อนการวิเคราะห์ได้ยืดหยุ่นมากว่าเดิม ซึ่งการคัดเลือกสายางนั้นอยู่ในรูปแบบ Dynamic Segmentation ระบบจะทำการคำนวณและประเมินสภาพความเสียหายเฉลี่ยให้ใหม่ในกรณีที่มีการรวมกลุ่มช่วงสายทาง
3) มีแบบจำลองการทำนายสภาพผิวทางคอนกรีตและเกณฑ์การตัดสินใจในการซ่อมบำรุงที่สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของกรมทางหลวง เพื่อรองรับการวิเคราะห์วางแผนงานซ่อมบำรุงผิวทางคอนกรีตได้
4) สามารถบันทึก ส่งออกและนำเข้าข้อมูลผลการวิเคราะห์ ทำให้สะดวกในการเรียกกลับมาวิเคราะห์มากขึ้น
5) มีรายงานสำหรับแสดงผลประโยชน์หลังการซ่อม (Road User Benefits) เพื่อให้ผู้วิเคราะห์งานสามารถตัดสินใจวางแผนงานซ่อมบำรุงได้ง่ายยิ่งขึ้น
6) สามารถการปรับแก้ค่าคงที่ในแบบจำลองเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่มีผลการศึกษาในอนาคต
7) โปรแกรมสามารถปรับแก้ราคาค่าซ่อมบำรุงในแต่ละหน่วยงาน เพื่อให้ราคาค่าซ่อมบำรุงต่างๆ สอดคล้องกับต้นทุนค่าซ่อมบำรุงในแต่ละพื้นที่ โดยที่ที่เจ้าหน้าที่สามารถปรบแก้ได้ง่ายจากหน้าจอโปรแกรม

แสดงภาพรวมของการเพิ่มประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.28 ในส่วนของการวิเคราะห์แผนงานซ่อมบำรุงรักษาเชิงกลยุทธ์และบำรุงรักษาประจำปีนั้น ปัจจุบันกำลังดำเนินการวิเคราะห์และจัดทำแผนซึ่งจะนำเสนอในรายงานฉบับสมบูรณ์ต่อไป




รูปที่ 4.31 ภาพรวมการเพิ่มประสิทธิภาพระบบ TPMS

### 4.8.2 ผลการวิเคราะห์แผนงานซ่อมบำรุงโดยระบบ TPMS