

การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวทางถนนคอนกรีต
ด้วยภาษาไพทอน

DEVELOPMENT OF A PROGRAM FOR DESIGNING CONCRETE
PAVEMENT USING PYTHON PROGRAMMING LANGUAGE

วิรัช หิรัญ¹ และ จิตาภรณ์ พอบุดดี²

^{1,2}อาจารย์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
59/5 หมู่ 1 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000,

¹wirach.hi@ku.th, ²titaporn.pob@ku.th

Wirach Hirun¹ and Titaporn Pobutdee²

^{1,2}Lecturer, Kasetsart University, Chalermphrakiat Sakon Nakhon Province Campus
59/5 Village no.1 Chiangkrua Subdistrict, Muang District, Sakon Nakhon 47000, Thailand,

¹wirach.hi@ku.th, ²titaporn.pob@ku.th

บทคัดย่อ

ถนนคอนกรีตสามารถรองรับปริมาณจราจรได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน อย่างไรก็ตาม ถนนคอนกรีตมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างค่อนข้างสูง ดังนั้น การออกแบบจึงต้องมีความละเอียดและถูกต้อง แต่เนื่องจากวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน ดังนั้น วิธีการออกแบบจึงใช้การอ่านค่าจากกราฟการออกแบบในการคำนวณ ซึ่งการนำค่าประมาณจากกราฟการออกแบบไปใช้ในการคำนวณอาจมีความผิดพลาดได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวทางคอนกรีตด้วยภาษาไพทอน โดยพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยกราฟฟิกทำให้ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้ยังใช้การหาค่าจากสมการแทนการอ่านค่าจากกราฟการออกแบบทำให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่า ผลการทดสอบการใช้งานของโปรแกรมเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการประมาณค่าจากกราฟการออกแบบ พบว่าผลการวิเคราะห์ที่หาค่าที่ยอมรับให้เนื่องจากความล้ามีค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เท่ากับ 3.62 ส่วนการวิเคราะห์การสึกกร่อนมีค่าเท่ากับ 1.24 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยโปรแกรมจะให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่าการประมาณค่าจากกราฟการออกแบบ

คำสำคัญ: ผิวทางคอนกรีต, การออกแบบผิวทาง, การออกแบบถนน

ABSTRACT

Concrete pavement can carry high traffic volume and provides long service life. Concrete pavement is costly to construct, therefore designing must be precise and accurate. However, the concrete pavement design method has been developed for a long time. Therefore, the design charts were employed in the calculations. For the reason, the approximated value from the design chart was used in the calculation, which may have errors. The purpose of this research is to develop a program for designing concrete pavement using the PYTHON language. The user interfaces were developed to accommodate the user with a graphic interface. Moreover, the program solves the equation for the result, instead of design chart reading, which provides more accurate calculation results. The result of comparing the result of the program against the result of the design chart indicated that the mean percentage absolute error (MAPE) of allowable repeat load of fatigue analysis is 3.62 while the allowable repeat load of erosion analysis gathers the value 1.24. The developed program provides more accurate calculation results than the approximated value from the design chart.

KEYWORDS: Concrete pavement, Pavement design, Road design

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการก่อสร้างถนนคอนกรีตในทุกพื้นที่ของประเทศไทยเนื่องจากมีความแข็งแรงและรองรับปริมาณจราจรได้มาก ทั้งนี้การพัฒนาวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตถูกพัฒนาขึ้นในราวทศวรรษที่ 70 โดยในช่วงเวลาที่พัฒนาวิธีการออกแบบขึ้น คอมพิวเตอร์ในสมัยนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร รวมทั้งการใช้งานยังมีความยุ่งยากและยังไม่แพร่หลาย ดังนั้น เพื่อให้การออกแบบทำได้ง่ายขึ้น ผู้พัฒนาวิธีการออกแบบจึงได้พัฒนากฎการออกแบบสำหรับอ่านค่าเพื่อลดเวลาในการคำนวณ โดยผู้ออกแบบสามารถอ่านค่าการคำนวณได้จากกราฟการออกแบบ อย่างไรก็ตาม ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งอาจเกิดการคลาดเคลื่อนได้ และเนื่องจากในปัจจุบันปริมาณจราจรได้เพิ่มขึ้นจากเดิมมาก ดังนั้น การประมาณค่าจากกราฟการออกแบบอาจทำให้ค่าที่ประมาณคลาดเคลื่อนไปมาก ประกอบกับในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นเครื่องมือที่คำนวณได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ดังนั้น การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตจะช่วยลดความผิดพลาดในการออกแบบลงได้

วิธีการของ Portland Cement Association (PCA) ได้เริ่มต้นพัฒนาและจัดทำคู่มือการออกแบบความหนาของถนนในปี ค.ศ.1951 และมีการปรับปรุงเป็นฉบับปี 1984 ทั้งนี้วิธีการ PCA เป็นวิธีการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตซึ่งมีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทาง

พื้นฐานและการทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต คุ่มี้อยู่ PCA (1984) แบ่งขั้นตอนการออกแบบความหนาของพื้นทางคอนกรีตออกเป็น 2 กรณี โดยแบ่งวิธีการวิเคราะห์เป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 มีข้อมูลน้ำหนักลงเพลลา (Axle-load data available) และ กรณีที่ 2 ไม่มีข้อมูลน้ำหนักลงเพลลา (Axle-load data not available) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวิธีการถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน โดยในช่วงเวลานั้นปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกยังไม่สูงเช่นในปัจจุบัน ดังนั้น การนำมาประยุกต์ใช้สำหรับออกแบบถนนจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับสภาพถนนและสภาพการจราจรที่ออกแบบ โดยเฉพาะเมื่อปริมาณจราจรสูงสุดเกิน 5-10 ล้าน ESALs เนื่องจากทำให้ค่าจำนวนเที่ยวสูงเกินกว่ากราฟการออกแบบ (Nomograph) อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการออกแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการ M-E PDG ของ AASHTO ซึ่งใช้หลักการกลศาสตร์-เชิงประสพการณ์ (Mechanistic-Empirical) โดยหลักการนี้จะเกี่ยวข้องกับการคำนวณเพื่อหาค่าความเค้น ความเครียดและการเสียรูป เพื่อใช้สำหรับประเมินความเสียหายของผิวทาง [1] ทำให้สามารถออกแบบผิวทางได้หลายรูปแบบ รองรับประเภทวัสดุ ปริมาณจราจร และสภาพอากาศที่แตกต่างกัน รวมทั้งมีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้สามารถคำนวณได้อย่างสะดวกสบาย แต่ราคาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวมีราคาสูงถึง 8,200 เหรียญสหรัฐ หรือประมาณ 250,000 บาทต่อปีสำหรับการใช้งาน 1 ผู้ใช้งาน ด้วยราคาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ AASHTO ทำให้การจัดหาโปรแกรมสำหรับนำมาใช้ออกแบบถนนคอนกรีตสำหรับหน่วยงานขนาดเล็ก เช่น เทศบาล องค์การบริหารส่วนตำบลเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้การออกแบบด้วยวิธี PCA ยังเป็นวิธีการที่กรมทางหลวงนำเสนอไว้ในคู่มือการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทางซึ่งจัดทำขึ้นโดยสำนักงานวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง และนำเสนอในคู่มือการออกแบบโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางและถนนคอนกรีตในเว็บไซต์ การจัดการความรู้ กรมทางหลวง <http://km.doh.go.th/> ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าวิธี PCA เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับของหน่วยงานระดับประเทศ

ภาษาไพทอนเป็นซอฟต์แวร์เสรี (Open source software) ที่รองรับการเขียนโปรแกรมทั้งโปรแกรมเชิงโครงสร้างและการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ และด้วยคุณสมบัติความเป็นซอฟต์แวร์เสรีทำให้มีการพัฒนาโดยนักพัฒนาจากทั่วโลกช่วยกันพัฒนาให้ไพทอนมีความสามารถสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ในปัจจุบันมีไลบรารีมาตรฐานจำนวนมาก เช่น โครงสร้างข้อมูลแบบซับซ้อน ไลบรารีสำหรับคณิตศาสตร์ รวมทั้งไลบรารีสำหรับสร้างอินเทอร์เน็ตเฟส ซึ่งส่งผลให้สามารถพัฒนาโปรแกรมที่มีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่มีความสวยงามและง่ายต่อการใช้งาน จึงทำให้โปรแกรมที่พัฒนาโดยภาษาไพทอนมีความเป็นมิตรต่อผู้ใช้

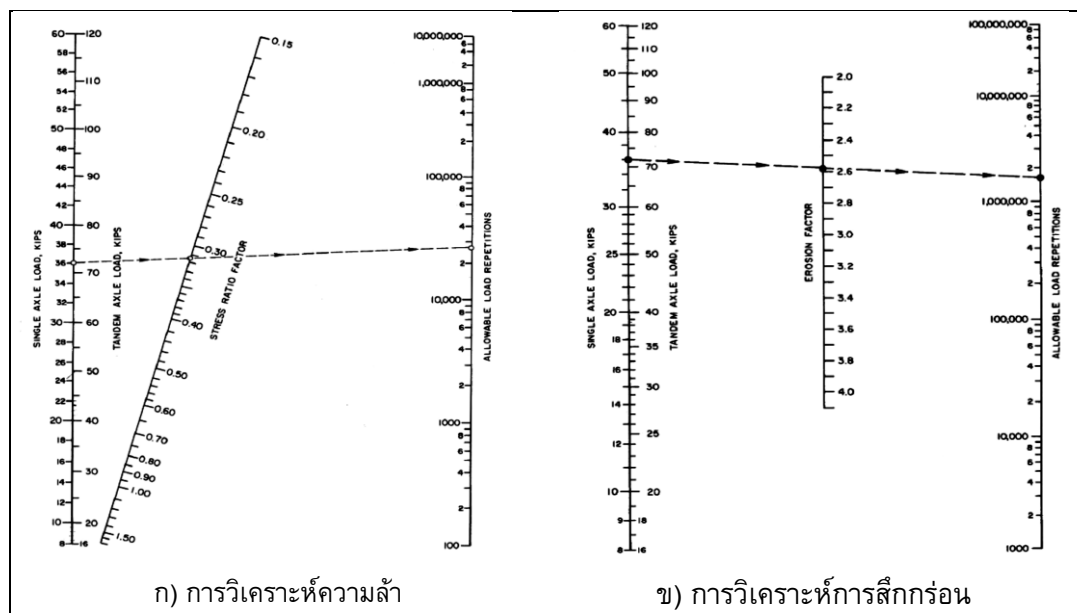
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการออกแบบผิวทางคอนกรีตตามวิธีการของ Portland Cement Association (PCA) ด้วยภาษาไพทอน 3.8 โดย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะช่วยลดเวลาและลดความผิดพลาดในการคำนวณออกแบบผิวทางถนนคอนกรีต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการออกแบบถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA

Portland Cement Association [2] ได้นำเสนอหลักการออกแบบถนนคอนกรีตโดยพัฒนาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทางพื้นฐาน ร่วมกับผลการทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนาของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย กำลังของดินฐานราก ความแข็งแรงของคอนกรีต และปริมาณและน้ำหนัการจราจร นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย รูปแบบของรอยต่อ ไหล่ทาง และชนิดของชั้นรองพื้นทาง ทั้งนี้ วิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาว่าความเสียหายของถนนคอนกรีตเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก คือ 1) การเกิดความล้า (Fatigue) เนื่องจากการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีตซึ่งรับแรงกระทำจากน้ำหนักยานพาหนะ และ 2) การเกิดการสึกกร่อน (Erosion) ของชั้นดินเดิมหรือชั้นรองพื้นทาง เนื่องจากการเกิดการแอ่นตัวเข้าไปเข้ามาของคอนกรีตบริเวณรอยต่อหรือรอยแตก และได้พัฒนา Nomograph สำหรับการออกแบบประกอบด้วย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) และ Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การสึกกร่อน (Erosion) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA [2]

ทั้งนี้สำหรับวิธี PCA ค่าที่แสดงใน Nomograph และตารางการออกแบบไม่ได้ให้ความหนาของผลลัพธ์โดยตรง แต่เป็นพารามิเตอร์ระดับกลาง เช่น อัตราส่วนความเค้นปัจจัยการสึกกร่อนและการเกิดซ้ำที่ยอมให้ โดยผู้ออกแบบต้องคำนวณความเสียหายทั้งหมดสำหรับการวิเคราะห์ความล้าและการสึกกร่อน [3]

เมื่อพิจารณา Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้า (Fatigue) จะพบว่าจำนวนเทียวยที่ยอมให้เป็นค่าที่อยู่ในสเกลลอจการิทึม ซึ่งเมื่อค่าของจำนวนเทียวยสูงสุดที่ยอมให้มากขึ้นระยะห่างระหว่างค่าบนกราฟจะลดลง โดยเฉพาะช่วง 10^6 เทียวย – 10^7 เทียวย การประมาณค่าจากกราฟไม่สามารถประมาณค่าได้ละเอียดกว่าช่วงละ 10^6 เทียวยได้ และเมื่อพิจารณา Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การสึกกร่อน (Erosion) จะพบว่ามัลักษณะเช่นเดียวกัน โดยเฉพาะช่วง 10^7 เทียวย – 10^8 เทียวย การประมาณค่าจากกราฟไม่สามารถประมาณค่าได้ละเอียดกว่าช่วงละ 10^7 เทียวยได้ ทั้งนี้การประมาณค่าจากกราฟดังกล่าวนี้เป็นค่าสำคัญในการนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของผิวทางถนนคอนกรีต การประมาณค่าที่มีความละเอียดน้อยจะส่งผลต่อการคำนวณ นอกจากนี้ในปัจจุบันปริมาณจราจรและน้ำหนักบรรทุกทุกสำหรับใช้ในการออกแบบเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นค่าประมาณจึงอยู่ในช่วงปริมาณจราจรสูง ซึ่งมีโอกาสในการประมาณค่าได้ไม่ตรงกับค่าจริง

2.1.1 การวิเคราะห์การเกิดความล้า (Fatigue)

การวิเคราะห์การเกิดความล้าในผิวจราจรคอนกรีตของวิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาผลเนื่องจากน้ำหนักของยานพาหนะ 2 ประเภท ได้แก่ รถบรรทุกเพลาดียว และรถบรรทุกเพลาคู่ ในรูปของค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวจราจรคอนกรีตที่ความหนาต่าง ๆ ที่วางบนชั้นรองพื้นทางที่มีคุณสมบัติต่างกัน โดย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ความล้าของ Portland Cement Association (PCA) พัฒนาจากชุดสมการในการหาวิเคราะห์ความล้า [4] โดยค่าความเค้นหาได้จากสมการที่ (1)

$$\sigma_{eq} = \frac{6M_e}{h^2} f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (1)$$

โดยที่ σ_{eq} หมายถึง ค่าความเค้น

h หมายถึง ความหนาของแผ่นคอนกรีต

M_e หมายถึง โมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต

$f_1 - f_4$ หมายถึง ค่าแฟกเตอร์

ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต (M_e) แยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณีคือ 1) ผิวคอนกรีตมีไหล่ทาง และ 2) ผิวจราจรคอนกรีตไม่มีไหล่ทาง โดยค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นสำหรับรถบรรทุกทุกเพลาดียว และเพลาคู่หาได้จากสมการที่ (2) ถึงสมการที่ (5)

กรณี เพลาดียว/ไม่มีไหล่ทาง

$$M_e = -1600 + 2525 * \log(l) + 24.42 * l + 0.204 * l^2 \quad (2)$$

กรณี เพลาคู่/ไม่มีไหล่ทาง

$$M_e = 3029 - 2966.8 * \log(l) + 133.69 * l - 0.0632 * l^2 \quad (3)$$

กรณี เพลาดียว/มีไหล่ทาง

$$M_e = (-970.4 + 1202.6 * \log(l) + ((53.587 * l)) * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447})) \quad (4)$$

กรณี เพลาคู่/มีไหล่ทาง

$$M_e = 2005.4 - 980.9 * \log(l) + 99.008 * l * (0.8742 + 0.01088 * k^{0.447}) \quad (5)$$

โดยที่ l หมายถึง radius of relative stiffness of the slab-subgrade system

k หมายถึง modulus of subgrade reaction

สำหรับสัมประสิทธิ์ f_1 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลาดียวและพื้นที่สัมผัสของล้อ f_2 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับไหล่ทาง f_3 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับผลของรถบรรทุกต่อขอบของถนน และ f_4 เป็นแฟกเตอร์สำหรับความแปรผันของกำลังของคอนกรีต โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (6) ถึงสมการที่ (9)

กรณีเพลาดียว

$$f_1 = (24 / SAL)^{0.06} * (SAL / 18) \quad (6)$$

กรณีเพลาคู่

$$f_1 = (48 / TAL)^{0.06} * (TAL / 36) \quad (7)$$

กรณีไม่มีไหล่ทาง

$$f_2 = 0.892 + h/85.71 - h^2/3000 \quad f_2 = 1 \quad (8)$$

กรณีมีไหล่ทาง

$$f_3 = 0.894 \text{ และ } f_4 = 1/[1.235*(1-CV)] \quad (9)$$

โดยที่ SAL หมายถึง น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดียวที่พิจารณา

TAL หมายถึง น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาคู่ที่พิจารณา

H หมายถึง ความหนาของแผ่นคอนกรีต

CV หมายถึง สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน

การพิจารณาจำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้สำหรับบรรทุกที่น้ำหนักใด ๆ (N_f) พิจารณาจากค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนผิวจราจรคอนกรีต โดยพิจารณาระดับความเค้นเป็น 3 ระดับคือ
1) ค่าความเค้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.55 2) ค่าความเค้นอยู่ระหว่าง 0.45 ถึง 0.55 และ
3) ค่าความเค้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.45 แสดงว่าจำนวนเที่ยวไม่จำกัดซึ่งหมายความว่าความเค้นที่เกิดขึ้นไม่ทำให้เกิดความล้า ทั้งนี้จำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้หาได้จากสมการที่ (10) ถึงสมการที่ (12)

สำหรับกรณี $\sigma_{eq} / S_c \geq 0.55$

$$\log(N_f) = 11.737 - 12.077 * (\sigma_{eq} / S_c) \quad (10)$$

สำหรับกรณี $0.45 < \sigma_{eq} / S_c < 0.55$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\sigma_{eq} / S_c - 0.4325} \right)^{3.268} \quad (11)$$

สำหรับกรณี $\sigma_{eq} / S_c \leq 0.45$

$$N_f = Unlimited \quad (12)$$

2.1.2 การวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อน (Erosion)

การวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อนในผิวจราจรคอนกรีตของวิธี Portland Cement Association (PCA) พิจารณาความเสียหายเนื่องจากการอัดทะลัก การสึกกร่อนของชั้นฐานราก และการเสียหายของรอยต่อ โดยการวิเคราะห์พิจารณาในกรณีการโก่งที่ส่งผลต่อการสึกกร่อนคือ กรณีที่ล้อรถอยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต ทั้งนี้จะพิจารณาผลที่เกิดกับแผ่นคอนกรีต ในกรณีถนนมีไหล่ทางคอนกรีตและถนนที่ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต โดย Nomograph สำหรับการวิเคราะห์การเกิดการสึกกร่อนของ Portland Cement Association (PCA) พัฒนาจากชุดสมการ ในการวิเคราะห์ความสึกกร่อน [4] โดยการโก่งสามารถหาได้จากสมการที่ (13)

$$\delta_{eq} = \frac{P_c}{k} f_5 * f_6 * f_7 \quad (13)$$

โดยที่ δ_{eq} หมายถึง ค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต

P_c หมายถึง แรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ

k หมายถึง modulus of subgrade reaction

$f_5 - f_7$ หมายถึง ค่าแฟกเตอร์

การวิเคราะห์หาแรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ (P_c) ได้แบ่ง การวิเคราะห์ออกเป็น 8 กรณี โดยพิจารณาจากการมีไหล่ทางหรือไม่มีไหล่ทาง และการมีเสริม เหล็กเดี่ยวที่รอยต่อหรือไม่มีการเสริมเหล็กเดี่ยวที่รอยต่อ สำหรับการวิเคราะห์หาแรงดันสำหรับ รถบรรทุกเพลเดียว และเพลาคู่หาได้จากสมการที่ (14) ถึงสมการที่ (21)

กรณี เพลเดียว / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 1.571 + (46.127/l) + (4372.7/l^2) - (22886/l^3) \quad (14)$$

กรณี เพลคู่ / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 1.847 + (213.68/l) - (1260.8/l^2) + (22989/l^3) \quad (15)$$

กรณี เพลเดียว / มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดี่ยว

$$P_c = 0.578 + (65.108/l) + (1130.6/l^2) - (5245.8/l^3) \quad (16)$$

กรณี เพลาคู่ / มีไหล่ทางคอนกรีต / ไม่มีเหล็กเดือย

$$P_c = 1.47 + (102.2/l) - (1072/l^2) + (14451/l^3) \quad (17)$$

กรณี เพลาเดี่ยว / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = -0.319 + (128.85/l) + (1105.8/l^2) + (3269.1/l^3) \quad (18)$$

กรณี เพลาคู่ / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 1.258 + (97.491/l) + (1484.1/l^2) - (180/l^3) \quad (19)$$

กรณี เพลาเดี่ยว / มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 0.018 + (72.99/l) + (323.1/l^2) + (1620/l^3) \quad (20)$$

กรณี เพลาคู่ / มีไหล่ทางคอนกรีต / มีเหล็กเดือย

$$P_c = 0.0345 + (146.25/l) - (2385.6/l^2) + (23848/l^3) \quad (21)$$

สำหรับสัมประสิทธิ์ f_5 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลลา f_6 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเดือยที่รอยต่อ f_7 เป็นค่าแฟกเตอร์สำหรับกรณีที่มีล้อรถอยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต โดยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวหาได้จากสมการที่ (22) ถึงสมการที่ (28)

กรณี เพลาเดี่ยว

$$f_5 = SAL / 18 \quad (22)$$

กรณี เพลาคู่

$$f_5 = TAL / 36 \quad (23)$$

กรณี ไม่มีเหล็กเดือย / ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต

$$f_6 = 0.95 \quad (24)$$

กรณี ไม่มีเหล็กเดือย / มีไหล่ทางคอนกรีต

$$f_6 = 1.001 - \left(0.26363 - \frac{k}{3034.5} \right)^2 \quad (25)$$

กรณีมีเหล็กเดือย

$$f_6 = 1 \quad (26)$$

กรณีไม่มีไหล่ทาง

$$f_7 = 0.896 \quad (27)$$

กรณีมีไหล่ทาง

$$f_7 = 1 \quad (28)$$

การพิจารณาจำนวนเที่ยวสูงสุดที่ยอมให้สำหรับรถบรรทุกที่น้ำหนักใด ๆ พิจารณาจากค่ากำลังที่ทำให้เกิดการโก่งตัว P ค่าแฟกเตอร์ และค่าแฟกเตอร์ C_1 และแฟกเตอร์ C_2 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (29) ถึงสมการที่ (32)

$$P = 268.7 \left(\frac{P_c^2}{h * k^{0.73}} p_c \right) \text{ หรือ } P = 268.7 \left(\frac{\delta_{eq}^2 k^{1.27}}{h} \right) \quad (29)$$

$$C_1 = 1 - \left(\frac{k}{2000} * \frac{4}{h} \right)^2 \quad (30)$$

โดยที่ $C_2 = 0.06$ สำหรับกรณีไม่มีไหล่ทาง และ $C_2 = 0.94$ สำหรับกรณีมีไหล่ทาง

กรณี $C_1 * P > 9$

$$\log N_e = 14.524 - 6.777 * (C_1 * P - 9)^{0.103} \quad (31)$$

กรณี $C_1 * P \leq 9$

$$N_e = Unlimited \quad (32)$$

2.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี PCA

2.2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

พารามิเตอร์เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับการวิเคราะห์ตามวิธี PCA ใช้ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ที่อายุ 28 วันคอนกรีต อย่างไรก็ตาม กรมทางหลวงเสนอว่า ในทางปฏิบัติจะควบคุมคุณสมบัติคอนกรีตที่ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ซึ่งทดสอบได้สะดวกกว่า [5] โดยความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและค่ากำลังรับแรงดัดเป็นไปตามสมการที่ (33)

$$f_f = 0.75 \sqrt{f'_c} \quad (33)$$

โดยที่ f_f = กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

f'_c = กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

การพิจารณาเลือกใช้ค่า modulus of subgrade reaction (k) ของการก่อสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย ประกอบด้วย ชั้นรองพื้นทางเหนือชั้น Subgrade การกำหนดค่า modulus of subgrade reaction (k) ต้องคำนึงถึงผลกระทบของชั้นรองพื้นทางที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยค่าที่ใช้ออกแบบจะต้องเป็นค่ารวมของทั้งสองชั้น [2] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่า k ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางอยู่เหนือดิน Subgrade [2]

ค่า k ของ Subgrade (pci)	ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทางดินลูกรัง Untreated subbase (pci)				ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทางดินซีเมนต์ Cement-Treated subbase (pci)			
	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว
50	65	75	85	110	170	230	310	390
100	130	140	160	190	280	400	520	640
200	220	230	270	320	470	640	830	-
300	320	330	370	430	-	-	-	-

2.2.2 ข้อกำหนดเกี่ยวกับผิวทาง

กรมทางหลวงกำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.2 สำหรับถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงหลายช่องจราจรที่ต้องรองรับการจราจรของรถหนักจำนวนมากโดยไม่มีการหยุดชะงัก และต้องการคุณภาพการบริการ (Serviceability) สูงตลอดอายุการใช้งานโดยเสียค่าบำรุงรักษาต่ำ กำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.1 สำหรับถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงสายหลักที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนปานกลาง และกำหนดค่า Load Safety Factor เท่ากับ 1.0 สำหรับถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนน้อย [5]

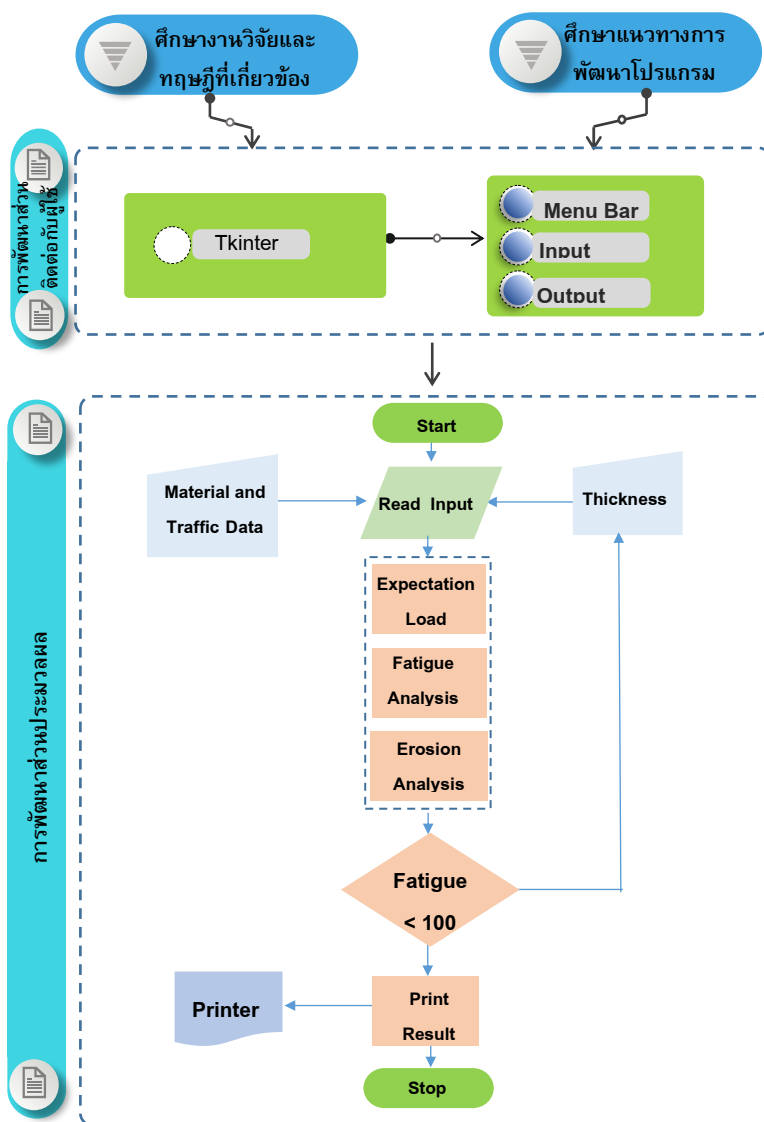
3. การดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบโครงสร้างของโปรแกรม

การออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างซับซ้อนและใช้ข้อมูลทั้งด้านจราจร และข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุ ดังนั้น การออกแบบโปรแกรมจึงต้องทำการออกแบบโปรแกรมให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่าย รวมทั้งควรมีการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ได้อย่างง่าย นอกจากนี้การออกแบบด้วยวิธี Portland Cement Association (PCA) ใช้วิธีการเลือกหน้าตัดแล้วจึงพิจารณาผลการวิเคราะห์ว่าเหมาะสมหรือไม่ ดังนั้นจึงมีลักษณะเป็นการออกแบบแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งในบางครั้งอาจต้องใช้เวลานาน ดังนั้น โปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงมีส่วนสำคัญในการลดเวลาในกระบวนการวนซ้ำนี้ เพื่อให้การออกแบบทำได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

การพัฒนาโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ใช้การอินเทอร์เฟซแบบกราฟฟิกโดยผู้ใช้งานติดต่อกับโปรแกรมผ่านส่วนที่เป็นกราฟฟิกโดยใช้เมาส์คลิกเพื่อสั่งงาน แทนการใช้คอมพิวเตอร์ไค์บอร์ด ซึ่งยุ่งยากและต้องเรียนรู้การใช้งาน [6] การใช้อินเทอร์เฟซแบบกราฟฟิกเป็นวิธีการที่ทำให้โปรแกรมที่

พัฒนาขึ้นใช้งานได้ง่าย และภาษาสำหรับการพัฒนาโปรแกรมส่วนใหญ่สนับสนุนการพัฒนาโปรแกรมที่มีอินเตอร์เฟซแบบกราฟฟิก สำหรับโปรแกรม Python ซึ่งเป็นโปรแกรมประเภทซอฟต์แวร์เสรีจึงได้รับการสนับสนุนโมดูลสำหรับพัฒนาไว้หลายโมดูลซึ่งแต่ละโมดูลมีลักษณะการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ Tkinter ซึ่งเป็นโมดูลที่ได้รวบรวมฟังก์ชันต่าง ๆ ให้นำมาใช้สร้างคอมพิวเตอร์ได้อย่างหลากหลาย [7] รวมทั้งไพทอนเลือกใช้สำหรับการพัฒนากราฟฟิกบนไพทอนเป็นหลัก มีการใช้งานกันแพร่หลาย ทำงานได้รวดเร็ว โดยส่วนติดต่อผู้ใช้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

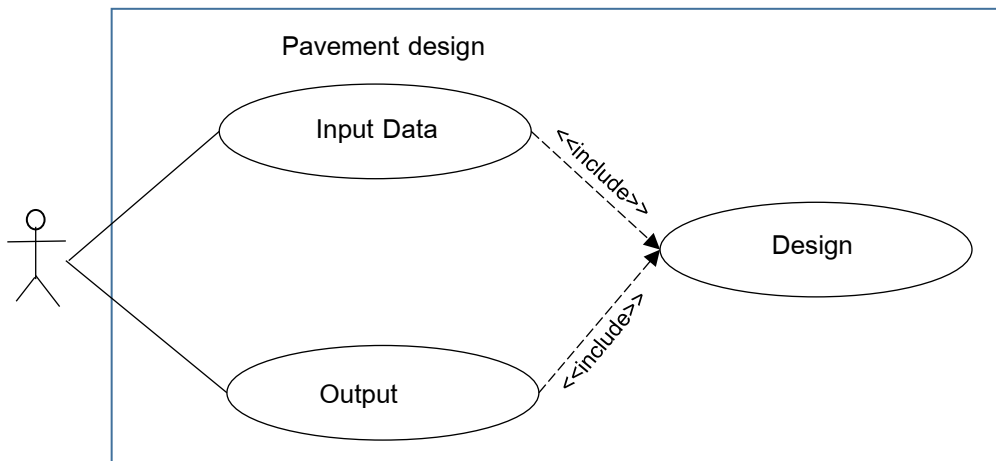


รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานพัฒนาโปรแกรม

3.2 การออกแบบการทำงานของโปรแกรม

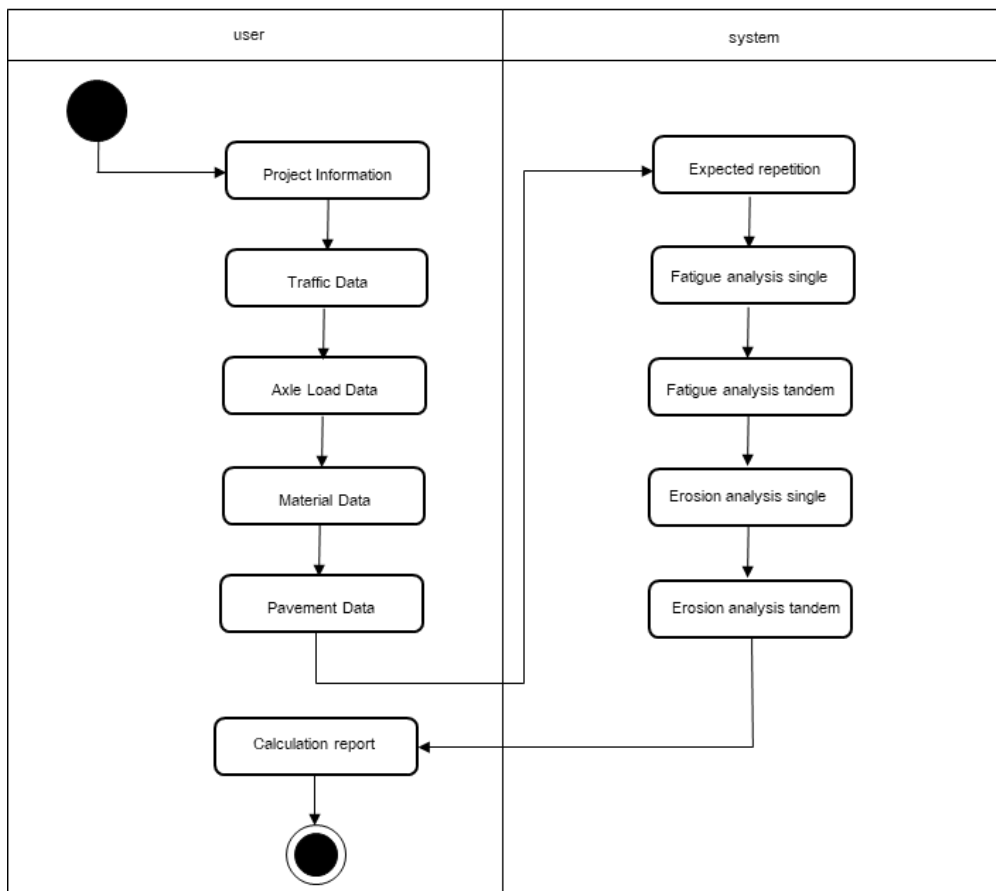
การออกแบบการทำงานของโปรแกรมสำหรับออกแบบผิวถนนคอนกรีตตามวิธี PCA (1984) มีขั้นตอนดังนี้ 1) Use Case Diagram แสดงรายละเอียดการกำหนดฟังก์ชันของผู้ใช้งาน 2) Activity Diagram แสดงรายละเอียดฟังก์ชัน การทำงานของโปรแกรม 3) E-R Diagram แสดงรายละเอียดโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล 4) Data Dictionary แสดงรายละเอียดพจนานุกรมข้อมูล และ 5) User Interface แสดงรายละเอียดส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การวิเคราะห์ระบบงาน Use case diagram โดย Actor ได้แก่ ผู้ใช้ และ use case ประกอบด้วย (1) การนำเข้าข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลด้านการจราจร ข้อมูลวัสดุ ข้อมูลผิวทาง (2) การคำนวณ และ (3) การรายงานผลการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 Use case diagram ของโปรแกรม

2) Activity Diagram แสดงรายละเอียดฟังก์ชัน การทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเมื่อผู้ใช้งานเรียกใช้โปรแกรมสามารถเลือกเมนูได้ 5 เมนูเพื่อทำการป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ได้แก่ (1) Project information (2) Material data (3) Pavement data (4) Traffic data และ (5) Axle load data โดยข้อมูลจะส่งเข้าสู่ระบบเพื่อทำการประมวลผล 3 ส่วน ได้แก่ (1) Expected repetition (2) Fatigue analysis และ (3) Erosion analysis เมื่อประมวลผลเสร็จจะสร้าง Calculation report เพื่อแสดงผลการคำนวณออกแบบ



รูปที่ 4 Activity diagram ของโปรแกรม

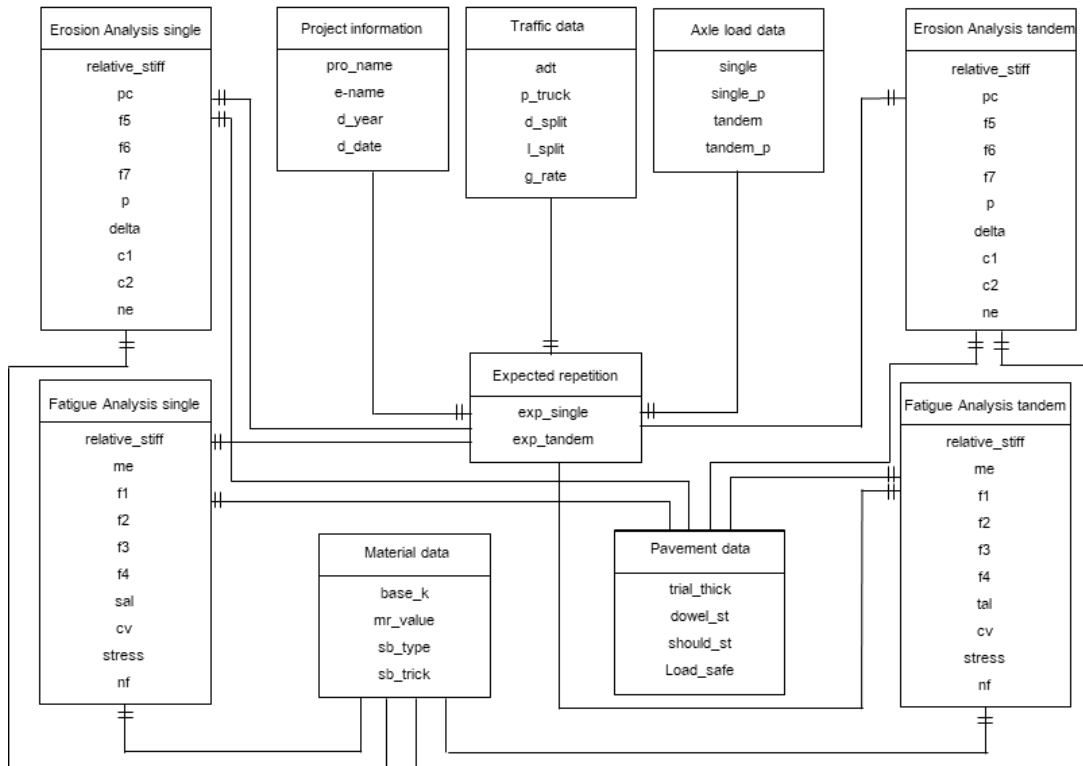
3) E-R Diagram แสดงรายละเอียดโครงสร้างแสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลในส่วนต่าง ๆ ของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 5

4) Data Dictionary แสดงรายละเอียดพจนานุกรมข้อมูล จำนวน 10 กลุ่มข้อมูล มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2

5) การพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้

การพัฒนาโปรแกรมในส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (user interface) มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ใช้งานได้ง่าย และเนื่องจากการออกแบบถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA มีลักษณะเป็นการออกแบบแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ส่งผลให้การใช้งานโปรแกรมจึงต้องมีการป้อนค่าใหม่หลายครั้ง ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมในส่วนติดต่อกับผู้ใช้จึงได้แบ่งส่วนติดต่อกับผู้ใช้เป็น 2 ลักษณะคือ (1) ส่วนเมนู (Menu) และ (2) ส่วนปุ่มกด (Button) โดยในส่วนของเมนูจะเป็นส่วนที่เรียกใช้สำหรับ

การสั่งงานที่ไม่บ่อยครั้งมากนัก ในขณะที่ส่วนของปุ่มกดจะเป็นส่วนที่มีการใช้งานหลายครั้งในขณะทำการวิเคราะห์



รูปที่ 5 E-R Diagram ของโปรแกรม

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
project information	pro_name	string	ชื่อโครงการ
	e_name	string	ชื่อวิศวกรผู้ออกแบบ
	d_year	integer	อายุการออกแบบ
	d_date	string	วันที่ออกแบบ
Traffic data	adt	integer	ปริมาณจราจร
	p_truck	float	สัดส่วนรถบรรทุก
	d_split	float	สัดส่วนการกระจายปริมาณจราจรต่อทิศทาง

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล (ต่อ)

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
Traffic data	l_split	float	สัดส่วนการกระจายปริมาณจราจรต่อช่องทาง
	g_rate	float	อัตราการเพิ่มของปริมาณจราจร
Axle load data	single	list	น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาดียว
	single_p	list	สัดส่วนบรรทุกทุกเพลาดียวในการจราจร
	tandem	list	น้ำหนักบรรทุกทุกเพลาคู่
	tandem_p	list	สัดส่วนบรรทุกทุกเพลาคู่ในการจราจร
Material data	base_k	float	โมดูลัสของชั้นดินเดิม
	mr_value	float	ค่าโมดูลัสแตกร้าวของคอนกรีต
	sb_type	string	ชนิดวัสดุของชั้นรองพื้นทาง
	sb_thick	float	ความหนาของชั้นรองพื้นทาง
Pavement data	trail_thick	float	ความหนาผิวทางที่ออกแบบ
	dowel_st	string	สถานะของเหล็กเดือย
	should_st	string	สถานะของไหล่ทาง
	load_safe	float	ค่า Load Safety Factor
Expected repetition	exp_single	list	จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกเพลาดียวตลอดอายุการออกแบบ
	exp_tandem	list	จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกเพลาคู่ตลอดอายุการออกแบบ
Erosion analysis single และ tandem	relative_stiff	float	radius of relative stiffness of the slab-subgrade system
	pc	float	แรงดันที่ผิวรอยต่อของแผ่นคอนกรีตและฐานรองรับ
	f5	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลาดียว
	f6	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับแผ่นคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเดือยที่รอยต่อ
	f7	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับกรณีล้อรถอยู่ตรงรอยต่อใกล้กับมุมของแผ่นคอนกรีต
	p	float	ค่ากำลังที่ทำให้เกิดการโก่งตัว
	delta	float	ค่าการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต
	c1	float	ค่าแฟกเตอร์
	c2	float	ค่าแฟกเตอร์
	ne	list	จำนวนเที่ยวที่ยอมให้

ตารางที่ 2 รายละเอียดและประเภทของข้อมูลในโมดูล (ต่อ)

โมดูล	ชื่อ	ชนิด	คำอธิบาย
Fatigue analysis single และ tandem	relative_stiff	float	radius of relative stiffness of the slab-subgrade system
	me	float	ค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในผิวคอนกรีต
	f1	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับน้ำหนักเพลลาและพื้นที่สัมผัสของล้อ
	f2	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับไหล่ทาง
	f3	float	ค่าแฟกเตอร์สำหรับผลของรถบรรทุกต่อขอบของถนน
	f4	float	แฟกเตอร์สำหรับความแปรผันของกำลังของคอนกรีต
	sal	float	น้ำหนักเพลลาบรรทุกทุกเพลลาเดี่ยว
	tal	float	น้ำหนักเพลลาบรรทุกทุกเพลลาคู่
	cv	float	สัมประสิทธิ์ของความแปรผัน
	stress	float	ค่าความเค้น
	nf	list	จำนวนเที่ยวที่ยอมให้

3.3 การตรวจสอบโปรแกรม

การทดสอบโปรแกรม โดยการให้ทำการวิเคราะห์ห่อแบบโดยใช้กราฟการออกแบบและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Mean absolute percent error: MAPE) ดังสมการสมการที่ (34)

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{z_i} \right|}{N} \times 100 \quad (34)$$

โดยที่ e_i = ความแตกต่างของค่าที่ได้จากการอ่านกราฟและค่าที่ได้จากโปรแกรม

z_i = ค่าที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

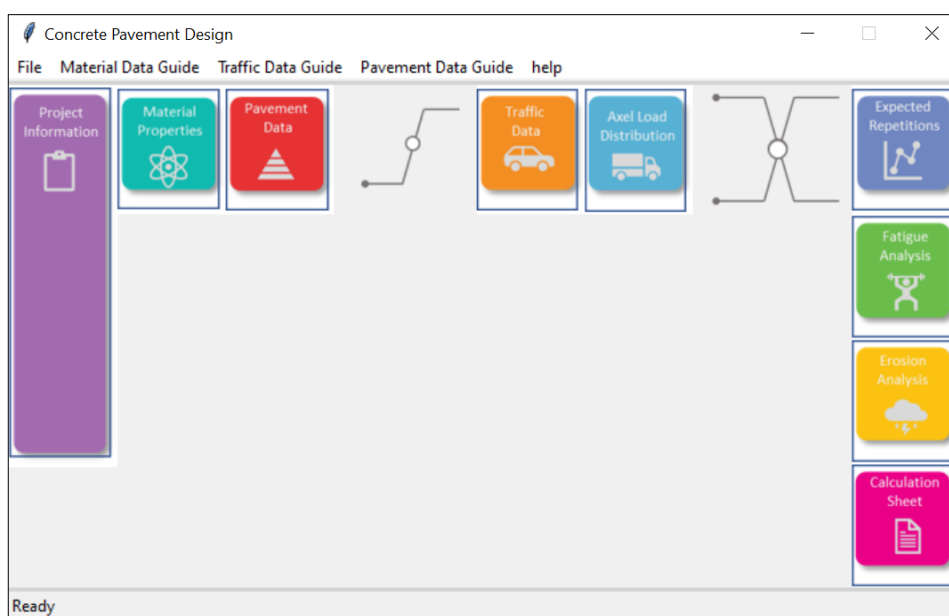
N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาเปรียบเทียบ

4. ผลการวิจัย

โปรแกรมออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตตามวิธีการของ PCA โดยใช้ภาษาไพทอนในการพัฒนา โดยใช้ไลบรารี Tkinter ในการพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถดำเนินการในส่วนที่เกี่ยวข้องกับ 1) การป้อนข้อมูลและการบันทึกข้อมูล 2) การแสดงข้อมูล และ 3) การสร้างรายงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูลและการบันทึกข้อมูล

การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผิวทางถนนคอนกรีตด้วยวิธี PCA มีข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 5 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ 2) ข้อมูลวัสดุ 3) ข้อมูลเกี่ยวกับผิวทาง 4) ข้อมูลปริมาณจราจร และ 5) ข้อมูลการกระจายน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 6 หน้าจอหลักของโปรแกรม

1) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการ ได้แก่ ชื่อโครงการ ชื่อวิศวกร อายุการออกแบบ และวันที่ทำการคำนวณ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Project Information

2) ข้อมูลวัสดุ ได้แก่ ค่า modulus of subgrade reaction (k) ค่ากำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) ของคอนกรีต ข้อมูลชนิดและความหนาของชั้นรองพื้นทาง โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Material Data

3) ข้อมูลเกี่ยวกับผิวทาง ได้แก่ ความหนาของผิวทาง ข้อมูลเหล็กเสริมที่รอยต่อ ไหล่ทาง และ Load Safety Factor โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Radio button และ Combo box โดยใช้ปุ่ม Pavement Data

4) ข้อมูลปริมาณจราจร ได้แก่ ปริมาณจราจร (ADT) สัดส่วนรถบรรทุก การกระจายตามทิศทางการจราจร การกระจายตามช่องทางทางจราจร และ อัตราการเพิ่มของปริมาณจราจร โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Traffic Data

5) ข้อมูลการกระจายน้ำหนักบรรทุกของรถบรรทุก แบ่งเป็นรถบรรทุกเพลาดียว และ รถบรรทุกเพลาคู่ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Entry ในการนำเข้าข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Axle Load Distribution

ทั้งนี้การเพิ่ม/ลบ ข้อมูล การป้อนข้อมูล ผู้ใช้ดำเนินการโดยการใช้เมาส์กรอกช่องของข้อมูลซึ่งเป็น Widgets ชนิด Entry เพื่อกำหนดข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้ง 5 รายการ ส่วนการบันทึกข้อมูลการบันทึกข้อมูลผู้ใช้สามารถกดปุ่ม Save ในหน้าต่างของข้อมูลแต่ละรายการ ดังแสดงในรูปที่ 7

The screenshot displays five overlapping windows for data entry:

- Project Information:** Fields for Project Name (Project X), Engineer (Rata Eng), Design Year (20), and Date (20 DEC 2030). Buttons: Save, Close.
- Traffic Data:** Fields for Average Daily Traffic, ADT (1000), Proportion of Truck % (10), Directional Distribution % (50), Lane Distribution % (30), and Annual Growth rate % (1). Buttons: Save, Close.
- Pavement Data:** Fields for Trial Thickness (10 Inch), Dowel Joint (Yes/No), Concrete Shoulder (Yes/No), and Load Safety Factor (1.2). Buttons: Save, Close.
- Axle Load Data:** A table for Single Axle Load and Tandem Axle Load. Buttons: Save, Close.
- Material Properties:** Fields for Sub grade K (130 PCI), Sub base Type (Laterite), Modulus of Rupture (650 PSI), and Sub base Thickness (6 Inch). Buttons: Save, Close.

Single Axle Load		Tandem Axle Load	
Axle Load (Kips)	Axle/100	Axle Load (Kips)	Axle/100
30	5	52	5
28	10	48	10
26	15	44	15
24	20	40	20
22	25	36	25
20	30	32	30
18	35	28	35
16	40	24	40
14	45	20	45
12	50	16	50

รูปที่ 7 การนำเข้าและการบันทึกข้อมูล

4.2 การแสดงข้อมูล

การแสดงผลการคำนวณ เป็นการรายงานผลการคำนวณตามวิธีการออกแบบผิวทางตามวิธี PCA ซึ่งได้แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) จำนวนเที่ยวของรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่ผ่านโครงการตลอดอายุการออกแบบ 2) ผลการวิเคราะห์ความล้า และ 3) ผลการวิเคราะห์ความสึกกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 8 และมีรายละเอียดดังนี้

Expected load					
Single Axle Load			Tandem Axle Load		
Axle Load (Kips)	Axle/100	Expected Rep	Axle Load (Kips)	Axle/100	Expected Rep
30	5	543478	52	5	543478
28	10	1086957	48	10	1086957
26	15	1630435	44	15	1630435
24	20	2173914	40	20	2173914
22	25	2717393	36	25	2717393
20	30	3260871	32	30	3260871
18	35	3804350	28	35	3804350
16	40	4347828	24	40	4347828
14	45	4891307	20	45	4891307
12	50	5434786	16	50	5434786

Fatigue Analysis Result					
Single Axle Load			Tandem Axle Load		
Axle Load (Kips)	Equivalent Stress	Stress Ratio	Axle Load (Kips)	Equivalent Stress	Stress Ratio
30	366.41	0.564	52	301.67	0.464
28	343.41	0.528	48	279.8	0.43
26	320.3	0.493	44	257.83	0.397
24	297.08	0.457	40	235.73	0.363
22	273.75	0.421	36	213.51	0.328
20	250.29	0.385	32	191.13	0.294
18	226.69	0.349	28	168.58	0.259
16	202.93	0.312	24	145.84	0.224
14	178.99	0.275	20	122.87	0.189
12	154.85	0.238	16	99.62	0.153

Erosion Analysis Result					
Single Axle Load			Tandem Axle Load		
Axle Load (Kips)	Power	Erosion Factor	Axle Load (Kips)	Power	Erosion Factor
30	32.6	4.433	52	39.16	4.593
28	28.4	4.313	48	33.37	4.454
26	24.49	4.185	44	28.04	4.302
24	20.86	4.046	40	23.17	4.137
22	17.53	3.895	36	18.77	3.954
20	14.49	3.729	32	14.83	3.749
18	11.74	3.546	28	11.35	3.517
16	9.27	3.341	24	8.34	3.249
14	7.1	3.109	20	5.79	2.933
12	5.22	2.842	16	3.71	2.545

รูปที่ 8 การแสดงผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม

การแสดงผลข้อมูล ผู้ใช้ดำเนินการโดยการคลิกที่ปุ่ม ได้แก่ Expected Repetition Fatigue Analysis และ Erosion Analysis โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

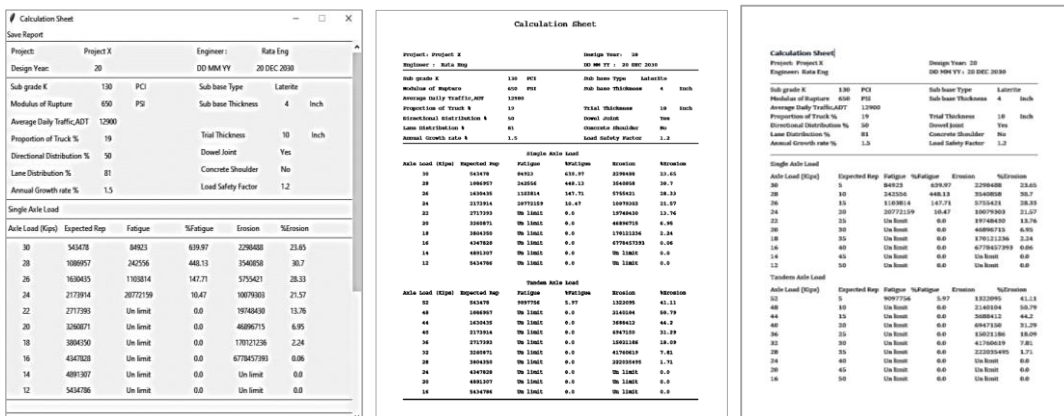
1) ปุ่ม Expected Repetition สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์จำนวนเที่ยวที่เกิดขึ้นของรถบรรทุกประเภทต่าง ๆ ที่ได้กรอกข้อมูลไว้ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

2) ปุ่ม Fatigue Analysis สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์ความล้าที่เกิดขึ้นของรถประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ค่า equivalent stress และค่า stress ration สำหรับรถประเภทต่าง ๆ ทั้งชนิดเพลาดียวและเพลาคู่ โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

3) ปุ่ม Erosion Analysis สำหรับเรียกดูผลการวิเคราะห์ความสึกกร่อนที่เกิดขึ้นของรถประเภทต่าง ๆ ได้แก่ ค่า Power และ Erosion Factor โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล

4.3 การสร้างรายงาน การเรียกดูและแสดงผล และการบันทึกผล

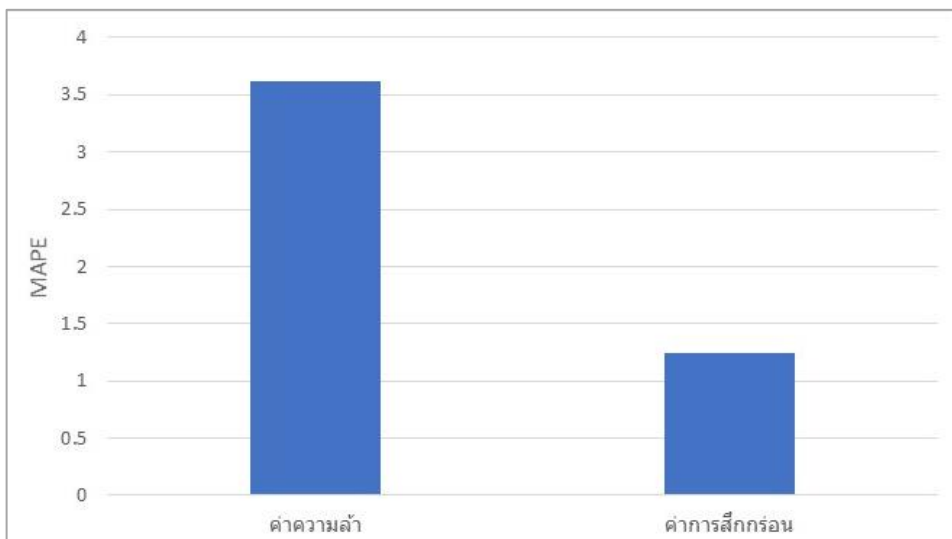
ผลการคำนวณ ได้แก่ จำนวนเที่ยวที่ยอมให้ ทั้งในกรณีการวิเคราะห์ความล้าและการวิเคราะห์การสึกกร่อน โดยเลือกใช้ Widgets ชนิด Canvas และ ชนิด Frame สำหรับการจัดตำแหน่งข้อมูลและตาราง เลือกใช้ Widgets ชนิด Scrollbar สำหรับเลื่อนหน้าแสดงผล และใช้ Widgets ชนิด Label ในการนำเสนอข้อมูล โดยใช้ปุ่ม Calculation Sheet โดยรายงานจะแสดงผลผ่านทางหน้าจอ รวมทั้งรายงานที่จัดทำขึ้นสามารถบันทึกผลในรูปแบบ pdf ซึ่งพัฒนาโมดูลการจัดเก็บโดยใช้ไลบรารี reportlab และเอกสาร words ซึ่งพัฒนาโมดูลการจัดเก็บโดยใช้ไลบรารี docx ดังแสดงในรูปที่ 9 การเรียกดูและแสดงผลการคำนวณสามารถใช้โปรแกรมในการเรียกใช้งานไฟล์ pdf เช่น acrobat reader ได้โดยตรง ส่วนรายงานในรูปแบบเอกสาร words สามารถเรียกใช้งานได้โดยใช้โปรแกรม ms words หรือ google docs ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การสร้างรายงานผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม

4.4 การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

หลังจากการพัฒนาโปรแกรมเสร็จสิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงได้ดำเนินการทดสอบและปรับแก้โปรแกรม โดยป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการออกแบบและการเขียนโปรแกรม โดยได้ดำเนินการทดสอบโปรแกรมโดยใช้ค่าที่คำนวณในเอกสารของ PCA โดยใช้ข้อมูลตามตัวอย่างทดสอบการคำนวณของโปรแกรม ผลการทดสอบพบว่าผลการคำนวณที่แสดงในคู่มือของ PCA เป็นการประมาณค่าจากกราฟสำหรับการออกแบบ ดังนั้น ค่าที่ได้จึงเป็นค่าประมาณในขณะที่ค่าที่คำนวณได้จากโปรแกรมเป็นค่าได้จากการแทนค่าในสมการต่าง ๆ โดยค่า MAPE กรณีการวิเคราะห์ความล้มเหลวเท่ากับ 3.62 ส่วนการวิเคราะห์การสึกกร่อนมีค่าเท่ากับ 1.24 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าจากกราฟมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมและคู่มือ PCA

สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผิวทางคอนกรีต เช่น โปรแกรม RPD ที่พัฒนาขึ้นจาก AASHTO supplemental guide [8] มีความแตกต่างในหลักการที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งวิธีการในการพัฒนาซอฟต์แวร์โดยโปรแกรม RPD พัฒนาขึ้นโดยใช้การทำงานของ Macro ในโปรแกรม MS Excel ดังนั้น การใช้งานโปรแกรม RPD ต้องมีโปรแกรม MS Excel ในขณะที่โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากภาษา PYTHON จึงสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องมีโปรแกรมประยุกต์อื่น สำหรับโปรแกรม PCA WIN [4] ซึ่งเป็นโปรแกรมการออกแบบถนนคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นเมื่อปี ค.ศ.2001 ซึ่งในขณะนั้นระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่เป็น Windows XP หรือรุ่นก่อนหน้านั้น การ

ทำงานของโปรแกรมจึงอยู่ในสภาพแวดล้อม 32 บิต ในขณะที่ Windows 10 ทำงานในสภาพแวดล้อม 64 บิต นอกจากนี้การแสดงผลของโปรแกรม PCA WIN ไม่สามารถสร้างรายงานในรูปแบบ pdf และ เอกสาร words ซึ่งเอกสารทั้งสองประเภทนี้เป็นรูปแบบเอกสารที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้น โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจึงมีข้อได้เปรียบกว่า PCA WIN ในเรื่องของการจัดทำรายงาน โดยผู้ใช้สามารถนำรายงานในรูปแบบเอกสาร words ไปจัดทำรายการคำนวณได้โดยสะดวก

5. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและพัฒนาโปรแกรมสำหรับการออกแบบผิวทางคอนกรีตและนำไปทดสอบการใช้งาน พบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะทำการออกแบบผิวทางคอนกรีต ตามหลักการของวิธี Portland Cement Association (PCA) โดยโปรแกรมนี้พัฒนาขึ้นจากภาษาไพทอนซึ่งสามารถสร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้ด้วยรูปแบบกราฟฟิกในการป้อนข้อมูลและการแสดงผลของโปรแกรมจะมีลักษณะเป็นตารางซึ่งทำให้สะดวกในการใช้งาน และผลการทดสอบโปรแกรมพบว่ามีประสิทธิภาพในการคำนวณผลที่ดีและให้ค่าผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำกว่าการประมาณค่าจากกราฟที่ใช้สำหรับออกแบบ

โปรแกรมสำหรับการออกแบบผิวทางคอนกรีตที่พัฒนาขึ้นอ้างอิงวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้นมาเป็นเวลานาน ดังนั้น จึงมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานสำหรับถนนที่มีปริมาณจราจรสูง เช่น ถนนมอเตอร์เวย์ ถนนสายประธาน ซึ่งอยู่ภายใต้ความรับผิดชอบของกรมทางหลวง ทั้งนี้หน่วยงานระดับประเทศ เช่น กรมทางหลวงสามารถจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบ ซึ่งมีราคาสูงมาใช้งานได้โดยไม่ติดปัญหาเรื่องงบประมาณ อย่างไรก็ตาม สำหรับถนนคอนกรีตที่รองรับปริมาณจราจรไม่สูงมากนัก เช่น ถนนในความรับผิดชอบขององค์การบริหารส่วนท้องถิ่น การจัดหาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีราคาสูงถึงปีละ 250,000 บาท สำหรับการออกแบบถนนในความรับผิดชอบเป็นไปได้อย่างยาก สำหรับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมต้นแบบจึงยังไม่ครอบคลุมวิธีการออกแบบที่มีการพัฒนาขึ้นมาในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ในอนาคตผู้วิจัยจะมีการพัฒนาเพิ่มเติมโมดูลเพื่อเพิ่มความสามารถในการออกแบบของโปรแกรม เช่น การออกแบบด้วยวิธี AASHTO ปี ค.ศ. 1993 หรือ ปี ค.ศ. 2008 ซึ่งเป็นวิธีการที่กรมทางหลวงระบุไว้ในรายการข้อกำหนดสำหรับจ้างที่ปรึกษาในงานออกแบบของกรมทางหลวง หากการดำเนินการพัฒนาเพิ่มเติมวิธีการนั้น ๆ ไม่ติดปัญหาเรื่องลิขสิทธิ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO. Mechanistic-empirical pavement design guide. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [2] Portland Cement Association. Thickness design for concrete highway and street pavements. Illinois, USA: Portland Cement Association, 1984.
- [3] Jenjiwattanakul T, Sano K. Pavement thickness design thresholds of having doweled joints and concrete shoulders. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2011.
- [4] Lee Y, Carpenter SH. PCAWIN Program for jointed concrete pavement design, Tamkang Journal of Science and Engineering 2001;4(4):293-300.
- [5] Bureau of Road Research and Development. Manual of design and analysis of pavement structure. Bangkok, Thailand: Department of Highways, Bangkok, 2013. (In Thai)
- [6] Uprasitwong P. Principles of programming in PYTHON language. Bangkok, Thailand: S. Asia Press (1989); 2021. (In Thai)
- [7] Thearmontree S. PYTHON programming language guide. Nonthaburi, Thailand: ICD Premier; 2010. (In Thai)
- [8] FHWA. Long-term pavement performance project [Internet]. 2006 [cited 2021 June 11]. Available from: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/ppt/rig2.ppt>.

ประวัติผู้เขียนบทความ



รศ.ดร.วิรัช หิรัญ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เลขที่ 59/5 หมู่ 1 ถนน วปรอ.366 ตำบลเชียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000 โทรศัพท์ 0-4272-5033 อีเมล: wirach.hi@ku.th

งานวิจัยที่สนใจ: การวางแผนการขนส่ง, วิศวกรรมจราจร, การออกแบบทางหลวง, การออกแบบผิวทาง.



ผศ.จิตาภรณ์ พอบุตรดี ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะ
วิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต
เฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร เลขที่ 59/5 หมู่ 1 ถนน วปรอ.366 ตำบล
เซียงเครือ อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร 47000 โทรศัพท์ 0-4272-5033
อีเมล: titaporn.pob@ku.th

งานวิจัยที่สนใจ: การจัดการงานก่อสร้าง, ประมวลราคางานก่อสร้าง, การ
ออกแบบทางหลวง, การออกแบบผิวทาง

Article History:

Received: March 23, 2021

Revised: August 25, 2021

Accepted: August 25, 2021