MRG5080061 ดร. ปฤษทัศว์ ศีตะปันย์

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246858

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

โดย นายปฤษทัศว์ ศีตะปันย์ และคณะ

ธันวาคม 2551

b00251276 246858

สัญญาเลขที่ MRG5080061

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246858

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การศึกษาพารามิเตอร์ในระบบรางความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะผู้วิจัย สังกัด

1. นายปฤษทัศว์ ศีตะปันย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
2. ศาสตราจารย์สมชาย ชูชีพสกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ทบวงฯ และสกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

246858

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา ผลตอบสนองของยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะรถไฟความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐาน แบบสะพานช่วงเดียว และ ทำการสร้างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่องของตัวแปรอิสระ ระบบพื้นผิว ระบบโครงสร้างพื้นฐาน และ ระบบยานพาหนะ ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบ โพลิโนเมียล โดยทำการสร้างแบบจำลองความขรุขระของพื้นผิว ด้วยสเตชั่นนารี่ เกาส์เซียน แรนดอม โพรเซส ผ่านตัวกรองไวท์นอยซ์ และ ทำการสร้างแบบจำลองยานพาหนะ 2 เพลา 4 ลำดับขั้นความเป็นอิสระ เคลื่อนที่บนพื้นผิวสะพานช่วงเดียว จากนั้นทำการจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบตัวแปรไร้หน่วย และ ทำการแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ ด้วยวิธีการรุงเงคุตตา อันดับที่ 4 และ 5 โดยใช้โปรแกรม์ MATLAB เพื่อคำนวณค่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้นต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน และ จัดรูปสมการถดถอยพหุคูณ โพลิโนเมียล ต่อไป ผลการวิจัยพบว่า โดยทั่วไป ผลตอบสนองของยานพาหนะ เข้าสู่สเตชั่นนารี่ คือ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะส่งผลทำให้ค่าความแปรปรวนคงที่ แต่ผลตอบสนองต่อโครงสร้าง กลับตรงข้าม คือ จะไม่เข้าสู่สเตชั่นนารี่ และ ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 กม. ต่อ ชม. ค่าความแปรปรวนจะขยับขึ้น-ลง อย่างรุนแรง จากนั้นทำการสร้างความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เกี่ยวเนื่อง พบว่า ผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และ โครงสร้างพื้นฐาน โดยทั่วไป จัดอยู่ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และผลตอบสนอง จากสมการถดถอย มีค่าใกล้เคียงกับ ผลตอบสนองจากผลการทดลอง แต่มีผลตอบสนองบางกลุ่ม คือ ค่า $RMS[V_v pp/g]$ ของพารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงมาก เนื่องจากผลของค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ β_i ลำดับที่ i ใดๆ และ จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบ แสดงให้เห็นว่า วิธีการพื้นผิวตอบสนอง เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ซับซ้อน เชิงมิติของ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน

บทสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)

ปัจจุบันการขนส่งคมนาคมทางบกเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และคุณภาพชีวิตของประชาชน แต่เนื่องจากตอนนี้ภาวะเศรษฐกิจที่มีการแข่งขันอย่างรุนแรง ประกอบกับราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้น การจราจรทางถนนที่หนาแน่น และอุบัติเหตุที่เพิ่มขึ้นจากการจราจรที่เร่งรีบทำให้การขนส่งคมนาคมทางบก ประเภทรถไฟความเร็วสูง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่พึงนำมาใช้เป็นตัวเลือกในการเดินทางของประเทศไทย จากการศึกษาแผนแม่บทรถไฟความเร็วสูงในประเทศไทยนั้น ได้ข้อสรุปว่า เส้นทางสาย (กรุงเทพ – สนามบินหนองงูเห่า – ระยอง) เป็นเส้นทางสายแรก รวมระยะทาง 190 กิโลเมตร เนื่องจากช่วยพัฒนาทางเศรษฐกิจ สังคม และสภาพแวดล้อมพื้นที่ชายฝั่งทะเลตะวันออกให้มีความเจริญ โดยหลีกเลี่ยงความแออัดในกรุงเทพ ความหมายของรถไฟความเร็วสูงคือ ยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนพื้นผิวระบบราง หรือระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (MAGLEV) บนความเร็ว 150 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นไป จากการวิจัยที่ผ่านมาด้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะความเร็วสูงบนโครงสร้างพื้นฐานเป็นที่แพร่หลายในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นการวิจัยการเคลื่อนที่เป็น ประเภท รถยนต์ รถบรรทุก จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้เห็นถึงความสำคัญในการวิเคราะห์ตัวแปรในระบบรถไฟความเร็วสูง ด้วยวิธีของพื้นผิวตอบสนอง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นต่อยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานโดยทำการจำลองความขรุขระพื้นผิว เป็นชุดข้อมูล สเตชั่นนารี่ เกาส์เซียน แรนดอม โฟรเซส โดยใช้ฟิลเตอร์ไวท์นอยซ์ และสร้างแบบจำลองของพาหนะ 2 เพลา 4DOF ที่มีระบบรถไฟเป็นตัวหน่วง (Damping) และระบบสปริงเพลา ตามข้อกำหนดของรถไฟ ส่วนงานโครงสร้างพื้นฐานพิจารณาเป็นโครงสร้างสะพานช่วงเดียว เนื่องจากมีค่าการโก่งตัวสูงกว่าโครงสร้างแบบสะพานสองช่วง และหลายช่วง จากนั้นนำค่าของความขรุขระพื้นผิว แบบจำลองพาหนะ แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน มาสร้างสมการเคลื่อนที่ระบบคู่ควบ ยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน แล้วปรับค่าตัวแปรให้อยู่ในรูปของตัวแปรไร้หน่วย และทำการสมการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลต่อยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน รวมทั้งคำนวณค่าความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้น เพื่อหาค่าเฉลี่ยรากที่สอง (Root mean square ,RSM) จากรากที่สองของผลรวมค่าคาดหวังยกกำลังสองกับความแปรปรวน คือค่าเฉลี่ยที่สองนั้นคือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริงของพาหนะ และของโครงสร้างพื้นฐาน โดยการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น ทั้งหมดเกี่ยวเนื่องจากตัวแปรจำนวนมาก จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวเนื่องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ พารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้าง

การดำเนินการวิจัยนี้ เกิดขึ้นจากการที่ยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน เนื่องจากความขรุขระของพื้นผิว คุณสมบัติของยานพาหนะ และคุณสมบัติของโครงสร้างพื้นฐาน โดยการสร้างแบบจำลอง และกำหนดคุณสมบัติให้ใกล้เคียงกับคุณสมบัติยานพาหนะและโครงสร้างพื้นฐานระบบรางที่ใช้งานจริงในปัจจุบัน จากนั้นปรับให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรไร้หน่วย และทำการสร้างสมการเคลื่อนที่ (Equation of motion) เพื่อคำนวณผลตอบสนองต่อยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน โดยการคำนวณการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานนั้น เกี่ยวเนื่องกับตัวแปรจำนวนมาก ที่สำคัญได้แก่ ตัวแปรความยาวคาน ตัวแปรความเร็วพาหนะ ตัวแปรความขรุขระของพื้นผิว ตัวแปรความเข้มของขบวนการไวท์นอยซ์ ตัวแปรระบบสปริงรถไฟ และตัวแปรของความหน่วง และตัวแปรของสปริงเพลา จากตัวแปรดังกล่าวทำการสร้างความสัมพันธ์ทางสถิติของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวเนื่องด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) จากนั้นทำการสร้างสมการถดถอยพหุคูณ ของพารามิเตอร์ของุระบบพื้นผิว พารามิเตอร์ระบบโครงสร้างพื้นฐาน พารามิเตอร์ระบบยานพาหนะ และพารามิเตอร์ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน โดยแสดงรายละเอียดการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง เรียงตามลำดับ ดังนี้ 1.การวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม (Random surface analysis) 2. แบบจำลองยานพาหนะ (Vehicle Model) 3. แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน (Structure system) 4. ความสัมพันธ์พื้นผิวทาง ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน (Interface Models) 5.วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) แสดงถึงลำดับขั้นตอนการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐานด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

จากผลของการดำเนินการวิจัยจะพอสรุปได้ว่าผลตอบสนองยานพาหนะ ของค่าเฉลี่ยความเร่งในแนวดิ่งของห้องผู้โดยสารอยู่ในเกณฑ์ที่ผู้ใช้ยานพาหนะรู้สึกสะดวกสบาย แต่ถ้าความขรุขระของพื้นผิวที่เพิ่มขึ้น จะแสดงผลตอบสนองของยานพาหนะ ในรูปของค่าความแปรปรวนโดย จากการศึกษาจะพบว่าขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาหนึ่ง ค่าความแปรปรวนจะคงที่ หรือผลตอบสนองของยานพาหนะจะเข้าสู่สเตชั่นนารี่ จากผลของค่าความแปรปรวนจะได้ค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร และพิจารณาจาก ISO 2631 พบว่า ผู้โดยสารจะยังคงรู้สึกสะดวกสบาย ดังนั้นค่า RMS ของห้องผู้โดยสารอาจจะสูงถึงระดับผู้ใช่ไม่สะดวกสบาย ด้วยอิทธิพลของค่าความขรุขระระดับพื้นผิว ในส่วนของผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน ไม่เข้าสู่ความถี่ธรรมชาติพื้นฐานลำดับที่ 1 เนื่องจากค่าความสัมพันธ์ของ ค่าระยะห่างระหว่างเพลา ความยาวคาน และความเร็วยานพาหนะที่กำหนด และพบว่าโครงสร้างพื้นฐานมีการสั่นสะเทือนตลอดเวลา และเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนโครงสร้างพื้นฐาน จะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนทางพลวัต มากกว่าการสั่นสะเทือนทางสถิติ โดยพิจารณาในรูปของค่าเฉลี่ยของ DAF ของระยะโก่ง

กึ่งกลางคาน มีค่าสูงสุดที่พาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 350 กม/ชม. และสูงกว่ามาตรฐาน AASHTO สำหรับค่าความแปรปรวนของโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าค่าความแปรปรวนจะไม่เข้าสู่สเตชั่นนารี่ และในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 กม/ชม. ค่าความแปรปรวนมีค่าสูงสุด และมีการขยับขึ้นลงอย่างรุนแรง และจากการวิจัยจะทราบถึงว่าวิธีการ พื้นผิวตอบสนองเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปร ระบบคู่ควบยานพาหนะต่อโครงสร้างพื้นฐาน ในรูปของสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ แบบโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และในส่วนของการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน พบว่าผลตอบสนองจากสมการถดถอย จะมีผลใกล้เคียงกับผลตอบสนองจากการแก้สมการอนุพันธ์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับต่ำซึ่งทั้งหมดนี้คือสิ่งที่ได้จากการศึกษาตัวแปรในระบบรางรถไฟความเร็วสูงด้วยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	จุดมุ่งหมายของการวิจัย	3
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
	ขอบเขตของการวิจัย	3
	นิยามศัพท์เฉพาะ	4
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	5
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
3	**วิธีดำเนินการวิจัย**	24
	การวิเคราะห์พื้นผิวแบบสุ่ม	24
	แบบจำลองยานพาหนะ	45
	แบบจำลองโครงสร้างพื้นฐาน	50
	ความสัมพันธ์พื้นผิวทาง ยานพาหนะ และโครงสร้างพื้นฐาน	61
	วิธีการพื้นผิวตอบสนอง	82
4	**ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย**	98
	ผลตอบสนองของยานพาหนะ	99
	ผลตอบสนองของโครงสร้างพื้นฐาน	104
	การวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ	112

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	**บทสรุป**	138
	สรุปผลการวิจัย	138
	ข้อเสนอแนะ	140
บรรณานุกรม		142

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงค่าความถี่อัตราการมาถึงของเพลาเปรียบเทียบกับตัวแปรไร้หน่วย ความเร็วยานพาหนะ และระยะห่างระหว่างเพลาต่อความยาวของคาน..	19
2	แสดงค่าอัตราเร่งสูงสุดที่มีผลต่อความรู้สึกของผู้ใช้ยานพาหนะ ตามมาตรฐาน ISO 2631.....	49
3	แสดงค่าตัวแปรไร้หน่วยความถี่พื้นฐานของคานช่วงเดียว จำนวน 10 โหมด.....	76
4	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	85
5	ความสัมพันธ์ของค่า RMS ระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน และ ตัวแปรไร้หน่วย ระยะทางสหสัมพันธ์ $\frac{\Delta_c}{L}$ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 10 ครั้ง.....	88
6	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	89
7	แสดงความสัมพันธ์ของค่า RMS ระยะโก่งกึ่งกลางสะพาน ตัวแปรไร้หน่วย ระยะห่าง ระหว่างเพลา (ℓ / L) ตัวแปรไร้หน่วยระยะทางสหสัมพันธ์ (Δ_c / L) และตัวแปรไร้หน่วยความเข้มของไวท์นอยซ์ (q_0 / L^3) จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง	91
8	ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	93
9	แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียล ลำดับที่ 1 ถึง 3.....	94
10	แสดงสมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และ p-value สำหรับรูปแบบฟังก์ชันโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 3 ของตัวแปรอิสระ (ℓ / L) (Δ_c / L) และ (q_0 / L^3) ที่ส่งผลต่อตัวแปรตาม $RMS[V(0.50L)]$ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง.....	95
11	แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร (ℓ / L) (Δ_c / L) และ .....(q_0 / L^3) ที่ส่งผลต่อ $RMS[V_v pp / g]$	97

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง **หน้า**

12 แสดงค่าอัตราการมาถึงของเพลา ที่ความเร็ว และความยาวคานต่างๆ..... 105

13 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว จำนวนตัวอย่างทดสอบ 27 ครั้ง..... 114

14 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบพื้นผิว ของค่า $RMS[V_v pp/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$..... 115

15 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 9 ครั้ง..... 116

16 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง..... 117

17 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$ จำนวนตัวอย่าง ทดสอบ 121 ครั้ง..... 118

18 แสดงโพลิโนเมียลลำดับที่ 1 ถึง 4 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และp-value ของ $RMS[V_v pp/g]$ พารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 121 ครั้ง..... 119

19 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 3 ของพารามิเตอร์ของระบบโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v pp/g]$.... 121

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง **หน้า**

20 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และp-value ของ พารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ จำนวนตัวอย่างทดสอบ 81 ครั้ง..... 122

21 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของระบบยานพาหนะ ของค่า $RMS[V_v pp/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$..... 124

22 แสดงตัวแปรตาม สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และp-value ของ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง..... 126

23 แสดงพารามิเตอร์ของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v pp/g]$ $RMS[V(0.50L)]$ $RMS[M(0.50L)]$ และ $RMS[S(0.95L)]$..... 128

24 เปรียบเทียบค่า $RMS[V_v pp/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V_v pp/g]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 130

25 เปรียบเทียบค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V(0.50L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 130

26 เปรียบเทียบค่า $RMS[M(0.50L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[M(0.50L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 131

27 เปรียบเทียบค่า $RMS[S(0.95L)]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[S(0.95L)]$ จากสมการถดถอยในแต่ละกลุ่ม ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 131

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง **หน้า**

28 แสดงโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 และ3 สมมติฐาน ตัวทดสอบสถิติ ช่วงวิกฤต สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และp-value ของ $RMS[V_v pp/g]$ ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน จำนวนตัวอย่างทดสอบ 2,187 ครั้ง..... 134

29 เปรียบเทียบค่า $RMS[V_v pp/g]$ จากผลการทดลอง กับ ค่า $RMS[V_v pp/g]$ จากสมการถดถอยโพลิโนเมียล ลำดับที่ 2 และ3 ระบบการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ที่ความเร็ว 150 – 350 km./hr. 134

30 แสดงพารามิเตอร์ และช่วงความเชื่อมั่นของตัวแบบ สมการถดถอยโพลิโนเมียลลำดับที่ 2 ของพารามิเตอร์ของการเคลื่อนที่ยานพาหนะบนโครงสร้างพื้นฐาน ของค่า $RMS[V_v pp/g]$ 136

บัญชีภาพ

ภาพ		หน้า
1	แสดงค่า DAF ของการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของคานสำหรับน้ำหนักบรรทุกและความเร็วขนาดต่างๆ	7
2	แสดงค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งสูงสุดสำหรับอัตราส่วนค่าความหน่วงต่างๆ	7
3	แสดงแบบจำลองยานพาหนะทดสอบเพลาเดียว	8
4	แสดงตัวอย่างข้อมูลของกระบวนการสุ่ม	9
5	แสดงฟังก์ชัน PSD ของความขรุขระของผิวทาง	10
6	แสดง่ค่า DAF ของแรงกระทำที่เพลาหลังสะสม ที่ความเร็ว 140 กม./ชม. และที่ระดับความขรุขระต่างๆ	10
7	แสดงผลตอบสนองต่อคานในกรณีที่ $f_v = 0.08$ และ ค่าระยะห่างระหว่างเพลาต่อความยาวคาน $l/L = 0.50$	12
8	แสดงค่าความถี่ของยานพาหนะที่ระดับความขรุขระและความเร็วต่างๆ	14
9	แสดงค่าความเร่งในแนวดิ่งและแนวราบของรถไฟ 1 ขบวน (ค่า L คือ หัวรถจักร, T คือ ตู้สัมภาระ และP คือห้องผู้โดยสาร)	16
10	แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวน ของยานพาหนะในช่วงความเร็วสูง.	18
11	แสดงค่าคาดหวัง และ ค่าความแปรปรวนของโมเมนต์ภายใน	19
12	แสดงค่าการสั่นสะเทือน และ สเปรกตราฟูเรียร์ ของพื้นผิวดิน จากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ระดับความเร็ว 200 กม./ชม. โดยกำหนดระยะห่างจากศูนย์กลางรางรถไฟ 2.5, 5, 10 และ 20 เมตร ตามลำดับภาพ (จากบนลงล่าง)	21
13	แสดงค่าความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิว ในรูปแบบโดเมนเวลา	23
14	แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวทางบั๊ม อินทิเกรเตอร์ (Bump Integrator, BI)	25

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
15	แสดงตัวอย่างโปรไฟล์ของพื้นผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย.....	27
16	แสดงระดับค่าดัชนีชี้วัดความขรุขระผิวทาง ตามประเภทของถนน.....	28
17	แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล ของผิวถนนสายหนึ่งในประเทศไทย.....	28
18	แสดงเครื่องมือวัดความขรุขระของพื้นผิวระบบราง ของ Noptel's PSM-220...	30
19	แสดงค่าความขรุขระพื้นผิวและผลตอบสนองจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ	30
20	แสดงความไม่สม่ำเสมอของแนวทาง.....	31
21	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่หนึ่ง.....	32
22	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร $\frac{\dot{h}_d}{r_f}$ ของลำดับขั้นที่หนึ่ง.....	33
23	แสดงฟังก์ชันแปลงรูปค่าสัมบูรณ์ยกกำลังสองของ ตัวแปร W_d และตัวแปร h_d ของลำดับขั้นที่สอง.....	34
24	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(x_d)$	37
25	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(x_d)$	38
26	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของ $h_d(t_d)$	39
27	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ $h_d(t_d)$	40
28	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วย $h(t_d)$	42
29	แสดงค่า PSD และค่าความแปรปรวนร่วมของตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$	43
30	แสดงค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Autocorrelation function) ของ ตัวแปรไร้หน่วยเวลา $h(t)$	44
31	แสดงค่าความหนาแน่นกำลังสเปคตรัล ของพื้นผิวระบบรางที่ระดับความขรุขระต่างๆ เปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานระบบรางของสหรัฐอเมริกา.....	44

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ **หน้า**

32 แสดงยานพาหนะประเภทต่างๆ..... 45

33 แสดงแบบจำลองยานพาหนะแบบต่าง ๆ..... 47

34 แสดงแบบจำลองยานพาหนะสองเพลาหนึ่งคัน ลำดับขั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 4 48

35 แสดงค่าระยะโก่งตัวของโครงสร้างพื้นฐานยกระดับแบ่งตามช่วงความยาวคาน 51

36 แสดงผลของแรงกระทำเคลื่อนที่ต่อคาน รูป (1) แสดงส่วนประกอบ และตำแหน่งของคาน รูป (2) แสดงแรงกระทำต่อชิ้นส่วนคาน..... 52

37 แสดงองค์ประกอบของคานช่วงเดียว..... 56

38 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานช่วงเดียว..... 58

39 แสดงองค์ประกอบของคานสองช่วง..... 58

40 แสดงรูปแบบการสั่นสะเทือนจำนวน 10 โหมดของคานสองช่วง..... 60

41 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับขั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น..... 62

42 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับขั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีทั้งระบบกันสะเทือน และสปริงแบบต่อขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น..... 64

43 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับขั้นความเป็นอิสระหนึ่ง (Single Degree Of Freedom, SDOF) ที่มีจุดสัมผัสเป็นมวลแข็งแกร็ง และมีระบบกันสะเทือน และสปริงต่อเชื่อมแบบขนานบนพื้นผิวคานแบบยืดหยุ่น.... 66

44 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับขั้นความเป็นอิสระหนึ่ง แบบสปริงเชิงเส้นบนพื้นผิวคานช่วงเดียว..... 80

45 แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโก่งกึ่งกลางคาน..... 80

46 แสดงยานพาหนะ ระบบลำดับขั้นความเป็นอิสระสอง..... 81

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ		หน้า
47	แสดงค่าเฉลี่ยของระยะโก่งกึ่งกลางคาน เมื่อ $f_v = 0.06$	81
48	แสดงผลตอบสนองต่อค่าระยะโก่งกึ่งกลางของโครงสร้างพื้นฐาน (1) กรณีค่าความขรุขระพื้นผิวคงที่ และความเร็วเปลี่ยนแปลง (2) กรณีค่าความเร็วคงที่ และค่าความขรุขระพื้นผิวเปลี่ยนแปลง.....	83
49	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และRMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$	100
50	แสดงค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ช่วงความขรุขระ $r_f = 0.015 - 0.025m^{-1}$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $L = 20m$	101
51	แสดงค่า RMS ความเร่งแนวดิ่งของห้องผู้โดยสาร ช่วงความยาวคาน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 150 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	102
52	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน และRMS ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$ ..	106
53	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของระยะโก่งกึ่งกลางคาน ช่วงความยาวคาน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	107
54	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคานในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$	108
55	แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของโมเมนต์กึ่งกลางคาน ช่วงความยาวคาน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr. และ $r_f = 0.015m^{-1}$	109

บัญชีภาพ(ต่อ)

ภาพ **หน้า**

56 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ
ในช่วงความเร็ว 150 – 350 km./hr. $r_f = 0.015m^{-1}$ และ $L = 20m$. 110

57 แสดงค่าเฉลี่ย ค่าความแปรปรวน ของแรงเฉือนใกล้ฐานรองรับ
ช่วงความยาวคาน $L = 20 - 30m$ ความเร็วยานพาหนะ 350 km./hr.
และ $r_f = 0.015m^{-1}$ 111