



โครงการออกแบบและพัฒนารถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้า
รองรับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ

**Design and Development of Electric
Three – Wheeled Vehicle (E – Tuk Tuk) with an Efficient
Battery Switching System**

เสนอ

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

จัดทำโดย

ผศ.ดร.ณัฐพล ลิ้มจิระจรัส

TNI

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี จึงขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัย และขอขอบพระคุณกรมมลพิษที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนรถตุ๊ก ตุ๊กในการนำมาทำการวิจัยและขอขอบพระคุณบริษัท โตโยต้า มอเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ที่อนุเคราะห์มอเตอร์ แบตเตอรี่และคอนโทรลเลอร์ ที่ได้ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ และสุดท้ายขอขอบคุณท่านอาจารย์หลายๆท่าน ที่ให้คำแนะนำในระหว่างการทำงานวิจัย และขอบคุณนักศึกษาที่ได้ทำโครงการนี้ให้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผศ.ดร. ณัฐพล ลิ่มจิระจรัส และคณะผู้วิจัย

TNI

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ

ข

สารบัญ

ค

สารบัญตาราง

จ

สารบัญรูปประกอบ

ฉ

บทที่

1. บทนำ

1

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

2

1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

3

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่หน้าสัมผัสไฟฟ้ากับความต้านทานไฟฟ้า

4

2.2 แรงเสียดทาน (friction force)

6

2.3 คำนิจของสปริง

7

2.4 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

8

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

11

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

12

3.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

12

3.2 ออกแบบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

12

3.3 สร้างระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ทดสอบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และการถ่ายโอนไฟฟ้า	15
3.5 สร้างแบบจำลองโครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊ก	15
3.6 สร้างเอลิเมนต์ตามของเขตแบบจำลอง	18
3.7 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต	19
4. ผลและการอภิปราย	21
4.1 ผลการคำนวณและการทดลอง	21
4.2 ผลการออกแบบ	23
4.3 การวิเคราะห์การเสีขรูป	25
4.4 การวิเคราะห์ความเค้น	26
4.5 ค่าความปลอดภัย	29
4.6 ผลสมรรถนะของรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้า	29
5. สรุปผลการวิจัย	30
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	30
5.2 ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31

TNI

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน	3
3.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ (AISI1018)	19
4.1 ค่าการเสียรูปที่มากที่สุดตามการเอียงขององศา (θ) ต่างๆ	26



TNI

สารบัญรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของรถไฟฟ้า	4
2.2 ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิวที่ไม่เรียบ	5
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าความต้านทานไฟฟ้า	6
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ผลักวัดถูกกับแรงเสียดทาน	6
2.5 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยการแทนรูปร่างของอิเล็กเมนต์	8
2.6 ลักษณะทิศทางของความเค้นและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นวัตถุของแข็ง	10
2.7 อิเล็กเมนต์ทรงหกหน้าอยู่ในวัตถุของแข็ง	10
3.1 การจำลองแสดงก่อนใส่แบตเตอรี่	13
3.2 การจำลองแสดงหลังใส่แบตเตอรี่	14
3.3 การจำลองระบบล็อกแบตเตอรี่เข้ากับรางเลื่อนลูกกลิ้งและสปริงที่ดันแบตเตอรี่	14
3.4 ลักษณะรูปร่างของรถตุ๊ก ตุ๊กที่จำลองมาจากแบบจริง	16
3.5 โครงสร้างหลักของรถตุ๊ก ตุ๊กที่สเก็ทบนโปรแกรม CATIA	17
3.6 ตำแหน่งในการจัดวางมอเตอร์และแบตเตอรี่	17
3.7 ลักษณะความเค้นเมื่อเทียบกับจำนวนอิเล็กเมนต์ที่เพิ่มขึ้น	18
3.8 ลักษณะการให้ขอบเขตการให้แรงและจุดยึดบนโครงสร้าง	20
3.9 การเอียงของโครงสร้างรถตามมุม (θ) ที่กำหนด	20
4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างรางลูกกลิ้งกับถาดแบตเตอรี่	21
4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างทองแดงกับทองแดง	22
4.3 ระบบหน้าสัมผัสไฟฟ้า	23
4.4 ระบบล็อกแบตเตอรี่ขณะที่ยังไม่ถูกล็อก	24
4.5 ระบบล็อกแบตเตอรี่ขณะที่ถูกล็อก	24
4.6 รถเข็นสำหรับสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	25
4.7 การเสียรูปของโครงสร้างรถที่ทำการเอียงองศา ลำดับ (ก) 0° (ข) 10° (ค) 20° และ (ง) 30°	25

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.8 กระจายของความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างรถที่พื้นระนาบ องศา (ก) 0° (ข) 10° (ค) 20° และ (ง) 30°	27
4.9 บริเวณจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดเพื่อนำมาทำการวิเคราะห์	27
4.10 ค่าความเค้นที่จุด A, B, C, และ D ที่มุมเอียงต่างๆ	28
4.11 ค่าความปลอดภัยของพื้นเอียง 30 องศา	28
4.12 รถตุ๊ก ตุ๊ก ไฟฟ้าที่รองรับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในสภาวะทางการขยายตัวทางเศรษฐกิจและสังคมที่เกิดขึ้นทั่วโลก รวมไปถึงประเทศไทย ทำให้ปัญหาพลังงานที่ได้มาจากแหล่งพลังงานจากน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ได้ถูกยกมาศึกษากันอย่างกว้างขวาง ตั้งแต่การศึกษาหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ รวมไปถึงการสรรหาพลังงานทดแทน เช่น พลังงานจาก แสงอาทิตย์ ลม คลื่นในทะเล เข้ามาใช้กันอย่างกว้างขวาง

พลังงานที่ถูกนำไปใช้ในภาคการขนส่ง ถูกแบ่งออกเป็นทั้งก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquid Petroleum Gas; LPG), ก๊าซธรรมชาติอัด (Compressed Natural Gas; CNG) รวมไปถึง น้ำมันเบนซิน และดีเซล ที่มักถูกนำไปใช้ในการขับเคลื่อนยานยนต์ โดยมีเครื่องยนต์ สันดาปภายใน (Internal Combustion Engines; ICEs) เป็นหลัก ทั้งนี้การเปลี่ยนสภาพจากพลังงานเคมี ซึ่งได้จาก ก๊าซธรรมชาติและน้ำมัน ไปเป็นพลังงานกล โดยที่เครื่องยนต์สันดาปภายในนี้ยังมีข้อด้อยในส่วนของ การสูญเสียพลังงาน โดยเทียบกับยานยนต์ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า และอีกทั้งยังมีมลพิษซึ่งเกิดจากการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน

รูปแบบพลังงานไม่ว่าจะได้มาจากทั้งแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป หรือพลังงานที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สามารถแปลงให้อยู่ในสภาพของพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถเป็นคำตอบหนึ่งของการนำพลังงานทดแทน ซึ่งเป็นเป็นพลังงานที่สะอาด มาใช้ในส่วนของการขนส่ง สภาพผังเมืองในกรุงเทพมหานคร รวมไปถึงเมืองหลักๆ ในประเทศไทย พัฒนาจากตรอก ซอกซอย เล็กๆ ที่เชื่อมกับถนนสายหลัก โดยที่ รถสามล้อเครื่อง (ตุ๊ก ตุ๊ก) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานสำหรับระบบการขนส่งในเมือง ทั้งในส่วนกรุงเทพมหานคร และตามหัวเมืองหลักๆ ในประเทศไทยในอดีต ถูกลดบทบาทลงในปัจจุบัน เนื่องจากรถตุ๊ก ตุ๊กที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางเสียงและอากาศ การเปลี่ยนรถตุ๊ก ตุ๊กไปใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน สามารถแก้ปัญหาทางด้านมลพิษทางเสียงและอากาศ ดังที่กล่าวมาข้างต้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในส่วนของการสร้างระบบประจุไฟฟ้าพื้นฐาน เวลาที่ใช้ในการเติมพลังงานให้แก่ยานยนต์ และระยะทางที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ในการเติมพลังงานแต่ละครั้ง ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้มีผลอย่างมากในการตัดสินใจนำเทคโนโลยีการขับเคลื่อนยานยนต์ ด้วยพลังงาน

ไฟฟ้า ไปใช้กับหน่วยการขนส่ง เมื่อเปรียบเทียบกับยานยนต์ที่ใช้พลังงานที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิง และก๊าซธรรมชาติ

การศึกษาวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษาในส่วนการออกแบบและพัฒนารถตุ๊กๆไฟฟ้าที่ใช้งานร่วมกับระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ของรถตุ๊ก โดยวิเคราะห์โครงสร้างของตัวรถที่สามารถรับรองการใช้งาน ตลอดจนความสะดวกในการถอดเปลี่ยน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบ และพัฒนารถตุ๊กๆไฟฟ้าที่มีโครงสร้างรองรับระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เพื่อใช้เป็นพาหนะขนส่งภายในสถาบันฯ

1.2.2 เพื่อออกแบบ และพัฒนาระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ โดยสามารถทำงานได้โดยสะดวกและรวดเร็ว

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 รถตุ๊กๆไฟฟ้าที่จะพัฒนาในงานวิจัยนี้ จะถูกพัฒนาดังจากโครงรถตุ๊กๆที่ได้รับจากกรมควบคุมมลพิษ แบตเตอรี่ที่ใช้เป็นแบบกรดตะกั่ว

1.3.2 การออกแบบโครงสร้าง จะทำการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม ANSYS ในการทำการวิเคราะห์หาความเค้นและการเสียรูปของ chassis

1.3.3 ออกแบบระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพ และสามารถบริการได้เพียงคนเดียวภายใน 5 นาที

1.3.4 การวิจัยไม่ได้มุ่งเน้นการออกแบบระบบขับเคลื่อนของอุปกรณ์ทางไฟฟ้า

1.3.5 รถตุ๊กๆไฟฟ้าจะถูกออกแบบโดยคำนึงถึงสภาพการใช้ภายในสถาบันเป็นหลัก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

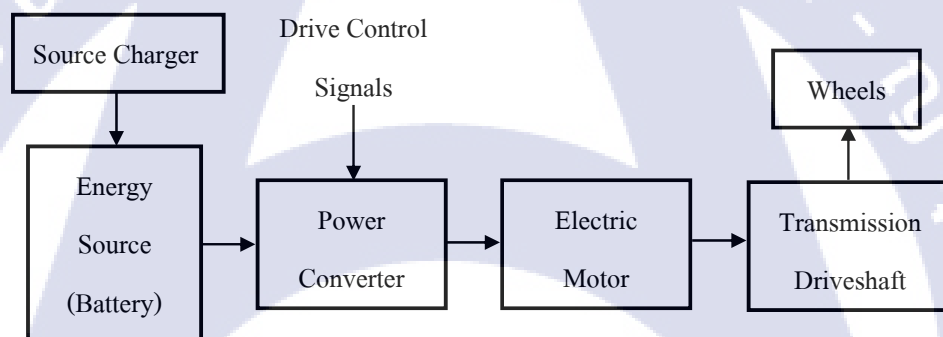
1.4.1 แบบจำลองโครงสร้างของรถตุ๊กๆไฟฟ้าที่ใช้หลักการ Finite Element ในการออกแบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาหลักการพื้นฐาน เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ใช้กับรถสามล้อไฟฟ้า โดยทฤษฎีในการออกแบบมีดังต่อไปนี้

องค์ประกอบของรถไฟฟ้า จะมี 2 องค์ประกอบอยู่ 2 อย่าง ประกอบด้วย แหล่งที่มาของพลังงานโดยอยู่ในรูปทางเคมีหรือทางกลศาสตร์ไฟฟ้าและแรงที่ใช้ขับเคลื่อนดังภาพที่ 2.1 ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะอยู่ในส่วนของการออกแบบระบบสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพเป็นหลัก



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของรถไฟฟ้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่หน้าสัมผัสไฟฟ้ากับความต้านทานไฟฟ้า

แรงดันหรือความดันเป็นปริมาณชนิดหนึ่งในทางฟิสิกส์ หมายถึง แรงที่กระทำตั้งฉากซึ่งทำโดยของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของสารใด ๆ ความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีแต่ขนาดไม่มีทิศทาง จากความหมายของความดันข้างต้นสามารถเขียนเป็นสูตรคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

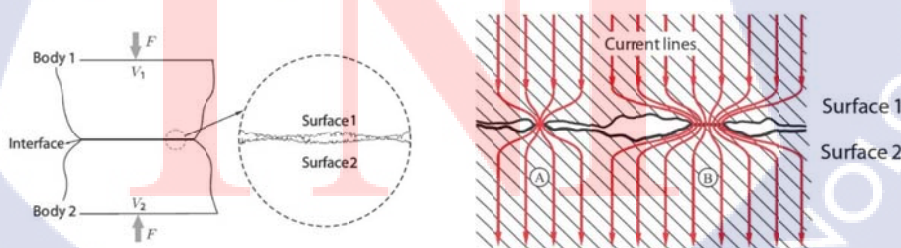
$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

โดย P เป็นความดันมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2), F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นที่นั้นๆ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ A คือ พื้นที่หน้าตัดบริเวณที่แรงกระทำตั้งฉากจะมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

ค่าความต้านทานไฟฟ้าใช้สัญลักษณ์ R มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสไฟฟ้าของวัตถุ วัตถุที่มีความต้านทานต่ำจะยอมให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ง่ายซึ่งจะเรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า ในขณะที่วัตถุที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงมากและกระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ยากซึ่งจะเรียกว่า ฉนวนไฟฟ้า โดยกฎของโอห์มสามารถแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันไฟฟ้า (V) มีหน่วยเป็นโวลต์ (V), กระแสไฟฟ้า (I) มีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A) และความต้านทาน (R) มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ดังสมการต่อไปนี้

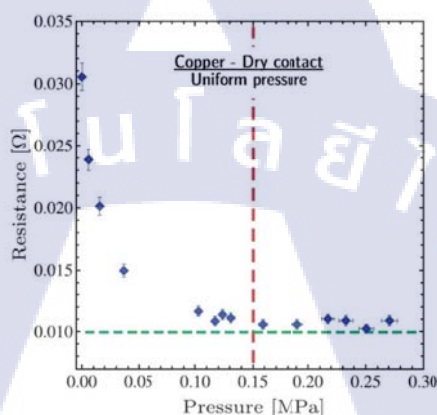
$$R = \frac{V}{I} \quad (2.2)$$

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการออกแบบหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า (electrical contact) ซึ่งในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้การเสียบปลั๊กเพื่อถ่ายโอนของกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ไปยังมอเตอร์ แต่พบว่าเกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกใช้หน้าสัมผัสไฟฟ้าจะทำให้เกิดความสะดวกในการใช้งานมากกว่าในแบบเสียบปลั๊ก ซึ่งหน้าสัมผัสไฟฟ้าจะให้โลหะ เป็นตัวเชื่อมต่อเพื่อถ่ายเทกระแสไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่กับมอเตอร์ แต่เนื่องจากความเรียบที่หน้าสัมผัสทำให้มีผลต่อการส่งถ่ายประจุไฟฟ้าเพราะว่า กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านพื้นที่ผิวที่เกิดการสัมผัสกันเท่านั้นดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าบนพื้นที่ผิวไม่เรียบ [1]

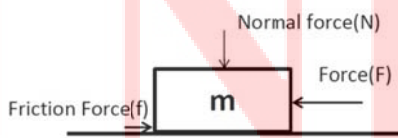
ในการที่จะทำให้พื้นที่ผิวของหน้าสัมผัสนั้น ให้มีความแนบสนิทมากที่สุดจะต้องมีการให้แรงลงบนวัตถุ ซึ่งผลกระทบของแรงกดที่หน้าสัมผัสไฟฟ้ามีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสไฟฟ้า เนื่องจากแรงที่กดไปนั้นจะยังทำให้หน้าสัมผัสนั้นยังมีพื้นที่ผิวติดกันมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงและเริ่มคงตัวเมื่อมีแรงกดอย่างน้อย 0.15 MPa เป็นต้นไป ดังแสดงในรูปนี้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับค่าความต้านทานไฟฟ้า [1]

2.2 แรงเสียดทาน (Friction Force)

แรงเสียดทาน คือ แรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุเกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชิ้น มีทิศตรงข้ามกันกับทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ผลักวัตถุกับแรงเสียดทาน

โดย F เป็นแรงผลักวัตถุมีหน่วยเป็นนิวตัน (N), f คือแรงเสียดทานมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ N เป็นแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับวัตถุมีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

ประเภทของแรงเสียดทาน (type of friction) ประเภทของแรงเสียดทานแบ่งได้ตามลักษณะการเกิดแรงได้ 2 ประเภท ได้แก่

1 แรงเสียดทานสถิต (static frictional force) เป็นแรงเสียดทานระหว่างผิวทั้งสองของวัตถุที่สัมผัสกัน เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกระทำกับวัตถุ หนึ่งแต่ยังไม่เคลื่อนที่ แรงเสียดทานสถิตมีค่าสูงสุดเมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่บนอีกผิวหนึ่ง

2 แรงเสียดทานจลน์ (dynamic frictional force or sliding frictional force) เป็นแรงเสียดทานเมื่อผิวหนึ่งเคลื่อนที่บนอีกผิวหนึ่งที่อัตราเร็วคงตัว แรงเสียดทานจลน์ มีค่าน้อยกว่าแรงเสียดทานสถิตเล็กน้อย โดยแรงเสียดทานทั้งหมดจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f = \mu N \quad (2.3)$$

2.3 ค่านิจของสปริง

โดยทั่วไปสปริงสามารถยืดหรือหดได้ โดยสปริงแต่ละอันจะมีค่านิจสปริง (spring's stiffness) แรงที่ทำให้สปริงยืดหรือหดต่อความยาวหนึ่งหน่วย ค่านิจของสปริงแต่ละอันจะไม่เท่ากันขึ้นกับความแข็งของสปริง สปริงที่แข็งมากจะมีค่านิจของสปริงมาก สปริงที่อ่อนจะมีค่านิจสปริงน้อย โดยแรงกับค่านิจสปริงจะหาได้จากสมการดังนี้

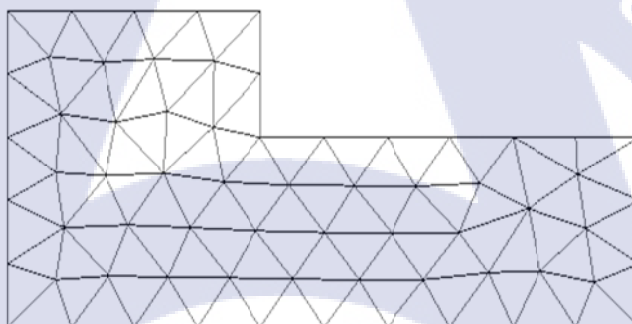
$$k = \frac{F}{x} \quad (2.4)$$

โดย k คือ ค่านิจสปริงมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร (N/m), F เป็นแรงที่กระทำกับสปริงมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ x เป็นระยะยวบตัวของสปริงมีหน่วยเป็นเมตร (m)

การออกแบบระบบสลับเปลี่ยนแบบเตอร์นั้น จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ หน้าสัมผัสไฟฟ้าจะมีความต้านทานไฟฟ้าเกิดขึ้นตามแรงที่กดลงบนหน้าสัมผัสไฟฟ้า เพื่อให้แรงที่กระทำการกดนั้นคงที่ ทางผู้วิจัยได้ใช้สปริงในการควบคุมแรงกดของหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าและยังใช้สปริงช่วยในการถอดเบตเตอร์ออกมาเมื่อต้องการสลับเปลี่ยนเบตเตอร์เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

2.4 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ นั้นมักจะประกอบไปด้วยสมการทางคณิตศาสตร์คือ สมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลคำตอบที่ถูกต้อง (exact solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจะประกอบไปด้วยค่าตัวแปรต่างๆตามตำแหน่งที่จะเกิดขึ้นบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ผลคำตอบที่ถูกต้องจะประกอบด้วยค่าต่างๆ ทั้งหมดนั้นนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาผลคำตอบที่ถูกต้องที่ประกอบไปด้วยค่าต่างๆ ในจำนวนที่มากมาย เช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นไม่สามารถเป็นไปได้ หลักการก็คือ ทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมานั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) ซึ่งมีขนาดที่ต่างกัน ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.5 [2]



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยการแทนรูปร่างของเอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังบ่งบอกว่า ผลของคำตอบที่ถูกต้องของแต่ละเอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์แต่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์จะต้องให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณา หลังจากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้สร้างขึ้นมาทำการประกอบเข้ารวมกันจึงเป็นระบบของสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันทำให้เกิดเป็นรูปร่างของปัญหาที่นำมาพิจารณาได้อย่างแท้จริงแล้วจึงนำมาประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมนี้ก่อนนี้ทำการแก้ทั้งระบบสมการกล่าวเพื่อหาผลคำตอบโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น

2.4.1 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์ปัญหาของแข็ง

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์เพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับปัญหาทางด้านของแข็ง เช่น การเคลื่อนตัวตามตำแหน่งต่างๆ อันเกิดจากการยืดและหดตัว ตลอดจนความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นตามมา วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านของแข็งโดยสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากวิธีหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงภายนอกมากระทำ ในการเริ่มต้นของการคำนวณจะใช้สมการพื้นฐานทั่วไปในสามมิติ ของความสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในรูป 2.5 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้ [5]

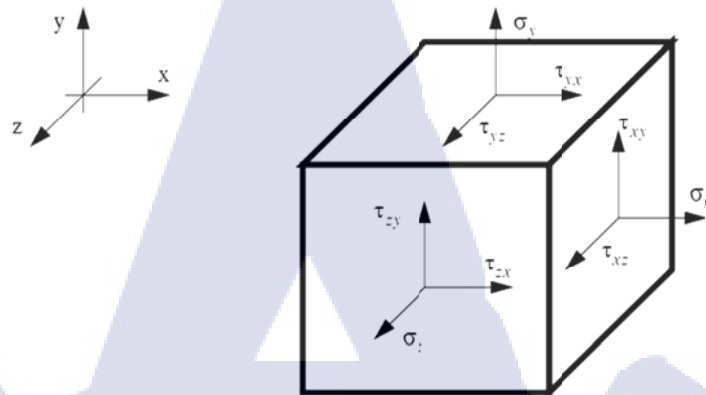
$$[D]^T \{\sigma\} + \{F\} = \{0\} \quad (2.5)$$

โดย σ แทนด้วยความเค้น และ F แทนด้วยแรงวัตถุ ตามลำดับตลอดจนผิวรอบนอกของของแข็ง นอกจากเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวเหล่านี้แล้ว ของแข็งอาจจะมีมีความเครียดขั้นต้น ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดและระยะกระจัด ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \quad (2.6)$$

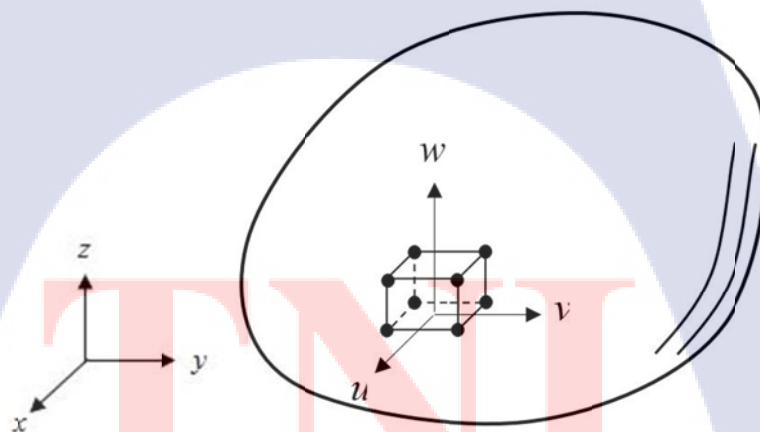
$$\{\varepsilon\} = [D]\{u\} \quad (2.7)$$

โดยกำหนดให้ $\{\sigma\}$ แทนเมทริกซ์ของความเค้น $\{\varepsilon\}$ แทนเมทริกซ์ของความเครียด $\{u\}$ แทนเวกเตอร์ของระยะกระจัด และ $[D]$ คือ เมทริกซ์ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ ความเค้น และแรงเฉือนแต่ละตำแหน่งนั้นจะเกิดตามแนวแกนแล้วทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวเสมอ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะทิศทางของความเค้นและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในวัตถุของแข็ง

ในวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะทำการวิเคราะห์โดยการแบ่งวัตถุออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ สมมุติว่ามีเอลิเมนต์ทรงหกหน้าซึ่งประกอบไปด้วยแปดจุดต่อดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เอลิเมนต์ทรงหกหน้าอยู่ในวัตถุของแข็ง

หลังจากนั้นนำเอลิเมนต์ที่สนใจมาพิจารณาหาโดยอาศัยวิธีถ่วงน้ำหนักเสถียรค้ำ และจะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดและจุดต่อที่เอลิเมนต์นั้นๆ และทำการแทนเมทริกซ์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวลงในสมการพลังงานศักย์รวม จะได้สมการดังนี้

$$J = \frac{1}{2} [\delta] [K] \{\delta\} - [\delta] \{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0] [C] \{\varepsilon_0\} dV - [\delta] \{F_B\} - [\delta] \{F_t\} \quad (2.8)$$

ในที่นี้ $[K]$ คือเอลิเมนต์เมทริกซ์ของความแข็งเกร็ง $\{F_0\}$, $\{F_B\}$, $\{F_t\}$ คือโหนดเวกเตอร์เนื่องมาจากเค้นด้น แรงวัตถุ และแรงที่ผิวตามลำดับ

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์และเอลิเมนต์เมทริกซ์ต่างๆเหล่านี้ในสามมิติสามารถดัดแปลงเพื่อนำไปสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์และเอลิเมนต์เมทริกซ์ต่างๆ สำหรับเอลิเมนต์ในหนึ่ง สอง หรือ สามมิติชนิดอื่นๆได้โดยง่าย

2.5 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2002 Riley and George [3] ได้ทำการออกแบบวิเคราะห์ และทดสอบ แชสซี (chassis) ของรถ SAE โดยอาศัยหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรม ANSYS สำหรับผลที่ได้ได้นั้นได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการวิเคราะห์และผลจากการทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ออกมาขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่สามารถรับได้ แต่ยังคงพบว่าคุณค่าความคลาดเคลื่อนยังอยู่ในเกณฑ์ที่สูง ซึ่งอาจเกิดจากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ถัดมาในปีเดียวกันนั้น Karaoglu และ Kuralay [4] ได้ทำการวิเคราะห์บริเวณของแชสซีรถบรรทุกที่ถูกยึดด้วยหมุดโดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อดูแนวโน้มการเกิดความเค้นที่บริเวณข้อต่อ เมื่อขนาดของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลที่ได้ทำให้เราสามารถลด หรือเพิ่มขนาดของโครงสร้างได้ เมื่อเกิดความเค้นมากเกินไป แต่ในงานวิจัยครั้งนี้

ถัดมาในปี 2011 Peyman Taheri และคณะ [1] ได้ทำการวิเคราะห์หน้าสัมผัสไฟฟ้า โดยการทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของแรงกับความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าแรงที่กระทำทำให้ค่าความต้านทานนั้นลดลงและเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อถูกแรงกระทำเท่ากับ 0.15 MPa เมื่อวัตถุเป็นทองแดง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยของโครงการนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของออกแบบระบบ สับเปลี่ยนแบตเตอรี่และทำการสร้างระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่รวมไปถึงการทดสอบระบบ สับเปลี่ยนแบตเตอรี่และถ่ายโอนไฟฟ้าของระบบ และส่วนออกแบบตำแหน่งของระบบสับเปลี่ยน แบตเตอรี่แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างรถตุ๊กๆไฟฟ้าในการรองรับชุดอุปกรณ์ทางไฟฟ้าและ ผู้โดยสาร

3.1 การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เป็นการศึกษาทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เช่น หลักการทางไฟฟ้า หลักการวิธีไฟ ในดีเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านของแข็ง และผลงานวิจัยที่ทางคณะวิจัยท่านอื่นๆ ได้ ทำการศึกษาไว้ก่อนแล้ว ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 เพื่อนำมาปรับใช้กับงานวิจัยในครั้งนี้

3.2 ออกแบบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

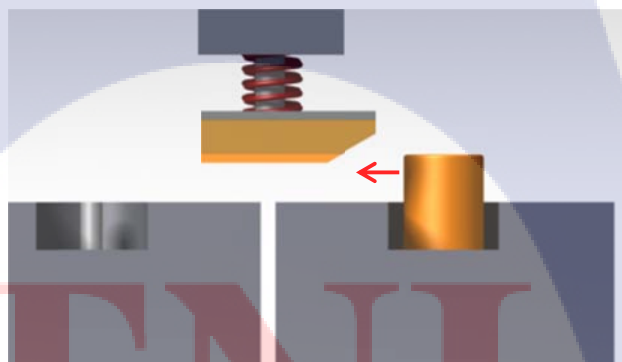
ในการออกแบบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ทางผู้วิจัยได้ให้ข้อกำหนดของการสับเปลี่ยน แบตเตอรี่คือจะต้องสามารถทำการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่โดยคนเพียงคนเดียว ภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที และต้องทำให้เกิดความต้านทานที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าน้อยที่สุด ซึ่งในการออกแบบนั้นได้ แบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่

- 3.2.1 หน้าสัมผัสไฟฟ้าและสปริงที่กดหน้าสัมผัสไฟฟ้า (electrical contact and spring)
- 3.2.2 ระบบล็อกแบตเตอรี่ (the locking system)
- 3.2.3 ลางเลื่อนลูกกลิ้งและสปริงที่ดันแบตเตอรี่ (the track roller and spring)

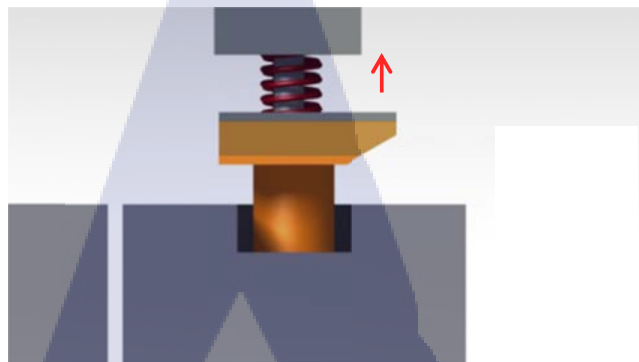
3.2.1 หน้าสัมผัสไฟฟ้าและสปริงที่กดหน้าสัมผัสไฟฟ้า (electrical contact and spring)

ส่วนที่เป็นหน้าสัมผัสนั้นจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเบตเตอร์และมอเตอร์ พื้นที่ผิวของหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวรถนั้นจะถูกทำให้มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ผิวของหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวเบตเตอร์ เหตุที่ต้องทำให้ใหญ่กว่านั้น เพื่อจะได้มั่นใจได้ว่าพื้นที่ผิวของหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวเบตเตอร์จะสัมผัสกับพื้นที่ผิวของหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวรถตลอดเวลา และแม้ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนตัวอยู่นั้น หน้าสัมผัสจะไม่ลื่นไถลออกจากกัน ทางผู้วิจัยได้ออกแบบหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวเบตเตอร์ เป็นรูปทรงกระบอก เพราะสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด และการออกแบบหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวรถให้มีด้านที่ใส่เบตเตอร์เข้าไปนั้น มีมุมหน้าตัดลงมา 30 องศา ที่ต้องทำการออกแบบในลักษณะนี้ เพราะจะได้ทำการใส่เบตเตอร์เข้าไปได้โดยง่าย

การออกแบบหน้าสัมผัสตรงส่วนที่ติดกับตัวรถนั้นสามารถแบ่งวัสดุที่ทำออกมาได้เป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ทองแดง เบกาไลต์ และเหล็ก เหตุที่ทางผู้วิจัยเลือกใช้ทองแดงนั้น เพราะทองแดงสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีและราคาไม่แพง เบกาไลต์เป็นฉนวนไฟฟ้าที่กั้นอยู่ระหว่างทองแดงและเหล็กดังรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 การจำลองแสดงก่อนใส่เบตเตอร์



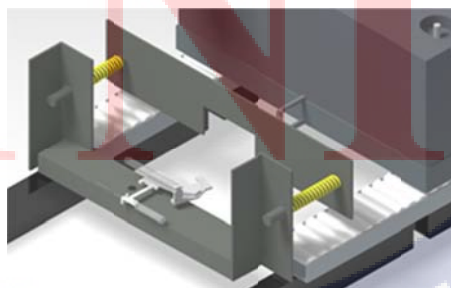
รูปที่ 3.2 การจำลองแสดงหลังใส่เบตเตอร์

3.2.2 ระบบล็อกเบตเตอร์ (the locking System)

เพื่อการป้องกันเบตเตอร์ลื่นไถล ขณะที่รถเคลื่อนที่ ทางผู้วิจัยจึงออกแบบให้มีตัวล็อกติดอยู่ที่ถาดเบตเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปตัวยู และตัวระบบล็อกเบตเตอร์จะติดอยู่กับตัวรถ และเมื่อต้องการทำการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ สามารถทำการปลดล็อกได้โดยผู้ขับ ตรงบริเวณด้านหน้าของตัวรถ

3.2.3 ลางเลื่อนลูกกลิ้งและสปริงที่ดันเบตเตอร์ (the track roller and spring)

เพื่อความสะดวกสบายในการสับเปลี่ยนเบตเตอร์ ทางผู้วิจัยจึงได้ใส่รางเลื่อนเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานขณะทำการสับเปลี่ยนเบตเตอร์เมื่อมีการใส่เบตเตอร์เข้าหรือนำเบตเตอร์ออกมา โดยจะทำงานร่วมกับสปริง เมื่อผู้ขับทำการปลดล็อกเบตเตอร์ สปริงจะทำการดันเบตเตอร์ออกมาโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.3 การจำลองระบบล็อกเบตเตอร์เข้ากับลางเลื่อนลูกกลิ้งและสปริงที่ดันเบตเตอร์

ในการออกแบบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ใช้โปรแกรม CATIA เป็นเครื่องมือในการออกแบบ เพราะจะได้ความแม่นยำในการออกแบบและสามารถจำลองได้ในการนำประกอบเข้ากับตัวชิ้นส่วนของระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.3 สร้างระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

ในส่วนของโครงสร้างของตัวรถนั้น ทางผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนมาจากทางกรมควบคุมมลพิษ โดยทำการปรับปรุงจากตัวรถเดิมให้สามารถนำมาใช้งานได้ และในส่วนของมอเตอร์และแบตเตอรี่นั้น ทางผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์เพื่อทำวิจัยร่วมกับ บริษัท โตโยต้า มอเตอร์ อิเล็กทรอนิกส์ (ไทยแลนด์) จำกัด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลทั้งหมดมาออกแบบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ให้สามารถใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่ได้รับความอนุเคราะห์มาได้

3.4 ทดสอบระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่และการถ่ายโอนไฟฟ้า

การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.4.1 การทดสอบระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

เป็นการทดสอบว่าระบบการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ได้ทำการออกแบบมานั้นสามารถทำได้ตามข้อกำหนดได้หรือไม่

3.4.2 การทดสอบการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าที่หน้าสัมผัส

การทดสอบการถ่ายโอนกระแสไฟฟ้าที่ผ่านหน้าสัมผัสโดยใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (multimeter) เพื่อวิเคราะห์ค่าพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากหน้าสัมผัสไฟฟ้า

3.5 สร้างแบบจำลองโครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊ก

รถตุ๊ก ตุ๊กได้รับความอนุเคราะห์จากกรมควบคุมมลพิษ (Pollution Control Department, PCD) เพื่อนำมาทำการวิจัยประดิษฐ์เป็นรถไฟฟ้าอย่างเต็มรูปแบบ (E-TUK TUK) โดยไม่มีการใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน ทั้งนี้ได้นำมาสร้างแบบจำลองของรถตุ๊ก ตุ๊กทั้งคันที่มีความเหมือนกับแบบจริงมากที่สุดดังรูปที่ 3.4



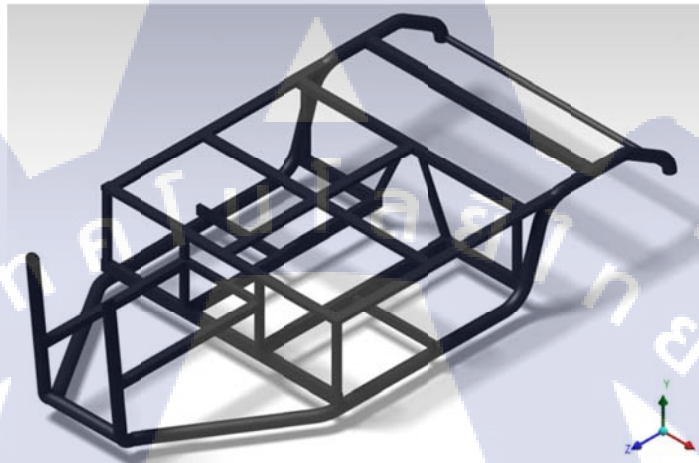
รูปที่ 3.4 ลักษณะรูปร่างของรถตุ๊ก ตุ๊กที่จำลองมาจากแบบจริง

ซึ่งในการออกแบบระบบสลับเปลี่ยนแบบเตอร์ให้เหมาะสมกับโครงสร้างหลักของรถตุ๊ก ตุ๊กที่มีอย่างจำกัด ดังรูปที่ 3.5 เพราะจำเป็นต้องคำนึงถึงความสมดุลของโครงสร้างรถ เพื่อให้ไม่ให้เกิดการเอียงหรือเทไม่ข้างใดข้างหนึ่ง ดังนั้นในการจะหาตำแหน่งวางอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น แบตเตอรี่ มอเตอร์ และชุดสายไฟต่าง เป็นต้น ให้เหมาะสม โดยการเริ่มจากการสเก็ต (sketch) โครงสร้างของรถตุ๊ก ตุ๊กโดยใช้โปรแกรม CATIA ซึ่งทำให้มีความแม่นยำและมีความเสมือนจริงตามแบบโครงสร้างของรถตุ๊ก ตุ๊ก

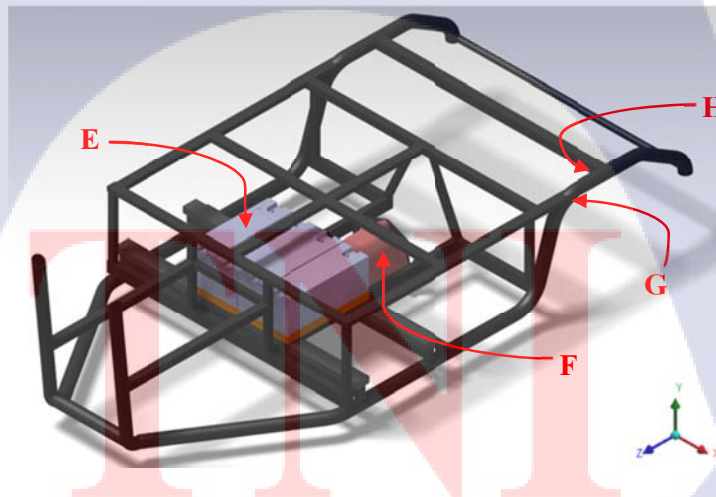
หลังจากที่ได้การสเก็ตแบบโครงสร้างรถตุ๊กตุ๊ก ขั้นตอนต่อไปทำการหาตำแหน่งที่เหมาะสม ในการวางแบตเตอรี่และมอเตอร์ โดยให้มีความสะดวกต่อการซ่อมบำรุงหรือให้ประสิทธิภาพในการถ่ายกำลังมากในการลดระยะสายไฟ โดยทำการสเก็ตแบตเตอรี่และมอเตอร์ในโปรแกรม CATIA เพื่อจะสามารถจำลองระยะและความน่าจะเป็น ในการที่จะเลือกใช้ขนาดของสายไฟฟ้า และจะสามารถรู้ระยะทางของสายไฟฟ้าได้อย่างแน่นอน และที่สำคัญคือตำแหน่งที่เหมาะสมในการรับแรงมากที่สุด โดยตรงฐานของแบตเตอรี่ได้มีการเสริมเหล็กขึ้นเพื่อมาช่วยรองรับน้ำหนักของแบตเตอรี่ให้มีการกระจายของแรงอย่างสม่ำเสมอ แล้วทำการออกแบบตัวหน้าเป็นมอเตอร์ให้มีความเหมาะสมในเรื่องของความแข็งแรงและเรื่องของน้ำหนักมาเป็นหลักในการออกแบบหน้าเป็นมอเตอร์

หลังจากที่เราสามารถออกแบบได้ข้อสรุปว่าตำแหน่งในการวางแบตเตอรี่ (E) นั้นควรที่จะวางให้อยู่บริเวณกึ่งกลางห่างจากจุดศูนย์กลางของโครงสร้างในแกน x ประมาณ 8 มิลลิเมตรของตัวโครงสร้างของรถเพื่อไม่รบกวนเทไปข้างใดข้างของตัวจากภาพที่ 3.6 และได้ทำการคำนวณของแบตเตอรี่เพื่อเป็นตัวในการกระจายแรงของแบตเตอรี่ และตำแหน่งในการยึดมอเตอร์ (F) นั้นจะอยู่

ข้างหลังของแบตเตอรี่และจุดศูนย์กลางของมอเตอร์จะอยู่ต่ำกว่าโครงสร้างรถเล็กน้อย เพื่อให้มอเตอร์นั้นสามารถส่งถ่ายกำลังผ่านเพลากลางได้ง่ายและลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากการเอียงศูนย์ของเฟืองท้ายแนวระนาบ yz และได้มาทำการประกอบกันโดยใช้โปรแกรม CATIA ในการที่จะนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป ดังภาพที่ 3.4



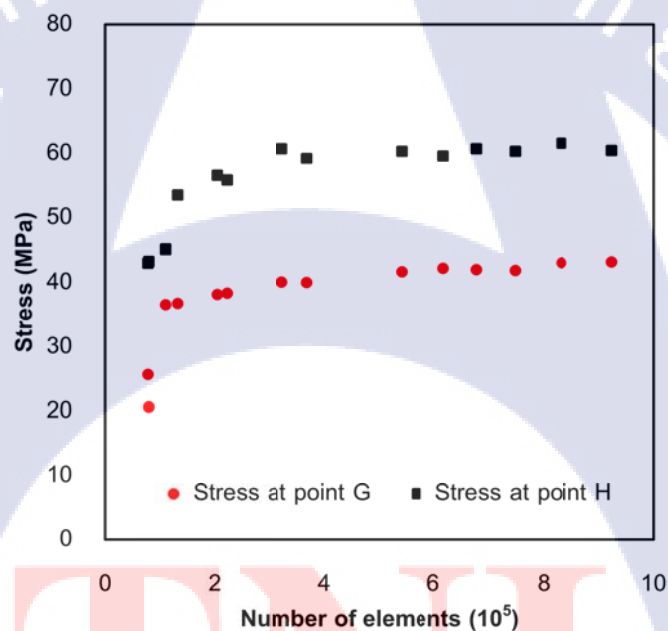
รูปที่ 3.5 โครงสร้างหลักของรถตุ๊ก ตุ๊กที่สเก็คคบนโปรแกรม CATIA



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งในการจัดวางมอเตอร์และแบตเตอรี่

3.6 สร้างเอลิเมนต์ตามขอบเขตแบบจำลอง

เมื่อทำการออกแบบการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าเป็นเรียบร้อยแล้ว จึงทำการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรมที่เราใช้วิเคราะห์คือโปรแกรม ANSYS แต่เราจะทำการหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์แบบจำลองในครั้งนี้ เนื่องจากให้คำตอบเชิงประมาณที่สามารถรับได้และใช้เวลาในการคำนวณนั้นไม่นานจึงควรเลือกใช้ในครั้งที่สอง เป็นต้น โดยเลือกทำการเลือกจุด 2 จุดคือ จุด G (Stress at point G) และจุด H (Stress at point H) ในรูปที่ 3.6 บริเวณที่เกิดความเค้นบนโครงสร้าง เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการใช้งาน ดังรูปที่ 3.7 โดยใช้เอลิเมนต์แบบรูปทรง Tetrahedrons



รูปที่ 3.7 ลักษณะความเค้นเมื่อเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 3.7 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจะเริ่มไม่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่เอลิเมนต์ 300,000 เอลิเมนต์เป็นต้นไป และค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่รับได้คือประมาณ $\pm 5\%$ เพราะฉะนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่อยู่ในช่วง 300,000-400,000 เอลิเมนต์ เพื่อจะเป็นลดระยะเวลาในการคำนวณ จำนวนเอลิเมนต์ที่ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 352,044 เอลิเมนต์ และจะจุดต่อ 700,917 จุดต่อ

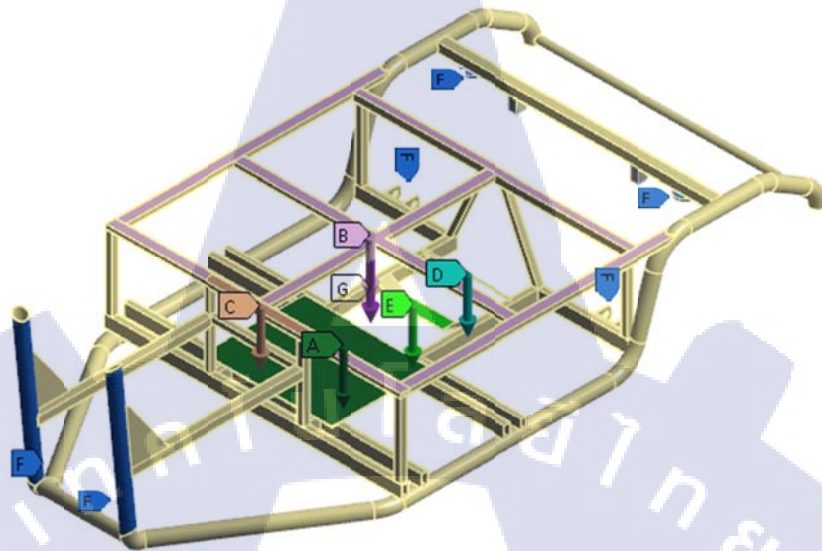
3.7 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Apply Boundary Conditions)

หลังจากที่ได้กำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่ต้องนำมาทำการวิเคราะห์ได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ซึ่งวัสดุที่ใช้นั้นเป็นเหล็กกล้า AISI1018 มีค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1 [7] ซึ่งวัสดุทางที่วิจัยได้สอบถามทางกรมมลพิษที่เป็นผู้ประดิษฐ์โครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊ก และการกำหนดขอบเขตของแรงที่จะกระทำบนโครงสร้างบนจะอยู่อย่าง 3 ส่วนหลักๆคือ น้ำหนักของแบตเตอรี่ น้ำหนักของผู้โดยสารและน้ำหนักของมอเตอร์ ซึ่งจำนวนแบตเตอรี่ที่นำมาใช้เป็นต้นกำลังของรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าใช้ทั้งหมด 4 ลูก ใน 1 ลูกมีน้ำหนักเท่ากับ 84 (824.04) กิโลกรัม (N) อยู่บริเวณที่จุด A ในส่วนของผู้โดยสารได้กำหนดให้คิดที่ผู้โดยสารจำนวน 3 คนคนละ 80 กิโลกรัม แต่ต้องทำการรวมน้ำหนักของโครงสร้างที่นั่งในรูปที่ 3.4 ซึ่งน้ำหนักของโครงสร้างรถมีค่าเท่ากับ 80 กิโลกรัม แล้วทำการรวมน้ำหนักของผู้โดยสารและโครงสร้างรถมีค่าเท่ากับ 320 (3140) กิโลกรัม (N) บริเวณที่จุด B ในบริเวณที่จุด C เป็นบริเวณของน้ำหนักผู้ขับขี่ ได้กำหนดให้ผู้ขับขี่เท่ากับผู้โดยสารมีค่าเท่ากับ 80 (392.4) กิโลกรัม (N) ในส่วนของมอเตอร์นั้นมีน้ำหนักเท่ากับ 26 กิโลกรัม ต้องทำการติดตั้งทั้งด้านหน้าและด้านหลัง จำเป็นต้องคำนวณในการหาค่าแรงที่กระทำที่จุดยึดด้านหน้าและด้านหลังดังมีค่าเท่ากับ 16 (153.53) และ 10 (101.53) กิโลกรัม (N) อยู่บริเวณจุด D, E ตามลำดับ ในการวิเคราะห์โครงสร้างนำค่าแรงโน้มถ่วงของโลกมาทำการวิเคราะห์ครั้งนี้เท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที² (m/s^2) และบริเวณที่จุด F คือจุดยึด (fix support) ของโครงสร้างน้ำหนักเฉพาะโครงสร้างหลักของรถมีค่าเท่ากับ 62 กิโลกรัมคำนวณจากรูปจำลองโปรแกรม ANSYS อยู่ในรูปที่ 3.8

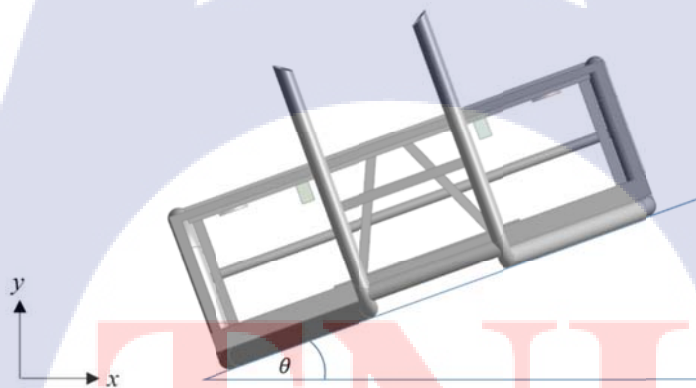
ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ (AISI1018)

ความหนาแน่น Density (kg/m^3)	โมดูลัสความยืดหยุ่น Young's modulus (GPa)	อัตราส่วนปัวซอง Poisson's ratio	ความเค้นคราก Yield stress (MPa)
7,850	205	0.29	370

ที่มา SAE Ferrous Materials Standards Manual [7]



รูปที่ 3.8 ลักษณะการให้ขอบเขตการให้แรงและจุดยึดบน โครงสร้าง



รูปที่ 3.9 การเอียงของโครงสร้างรถตามมุม (θ) ที่กำหนด

สำหรับการวิเคราะห์ในครั้งนี้ได้ทำแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 4 กรณี ได้แก่ กรณีที่รถวางตัวอยู่ขนานกับพื้นราบ ($\theta = 0^\circ$) และกรณีที่รถอยู่บนพื้นเอียงทำมุม 10° 20° และ 30° ตามลำดับ เพื่อจะศึกษาความเค้นที่เปลี่ยนแปลงตามองศาที่เกิดเอียงเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.9

บทที่ 4

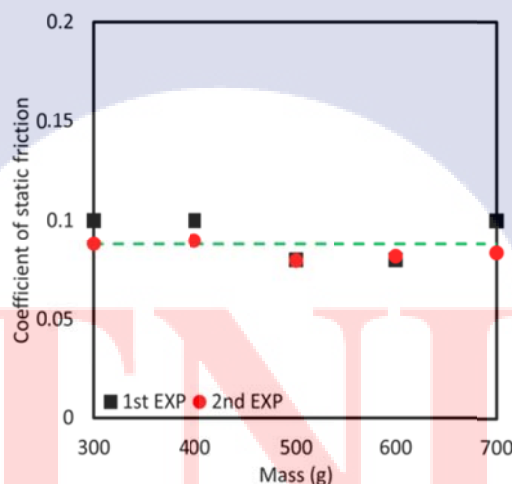
ผลและการอภิปราย

ผลที่ได้จากการทำงานวิจัยในการออกแบบและทำการคำนวณรวมไปถึงการทดลองระบบ สับเปลี่ยนแบตเตอรี่ และในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าแล้วทำการวิเคราะห์หา การเสีรูปของโครงสร้างรวมไปถึงการวิเคราะห์เพื่อหาความเค้นและค่าความปลอดภัยบน โครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊กและสมรรถนะของรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้า มีดังต่อไปนี้

4.1 ผลการคำนวณและการทดลอง

4.1.1 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

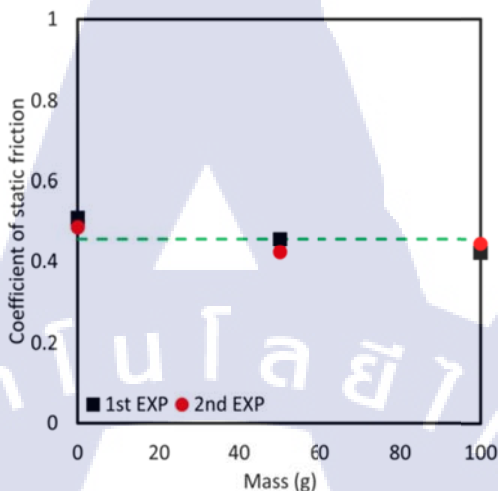
4.1.1.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างรางลูกกลิ้งกับถาดแบตเตอรี่



รูปที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างรางลูกกลิ้งกับถาดแบตเตอรี่

จากการทดลองจำนวน 5 ครั้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างรางลูกกลิ้ง กับถาดแบตเตอรี่มีค่า 0.088 ($\mu = 0.088$)

4.1.1.2 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างทองแดงกับทองแดง



รูปที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างทองแดงกับทองแดง

จากการทดลองจำนวน 3 ครั้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างทองแดงกับทองแดงมีค่า 0.454 ($\mu = 0.454$)

4.1.2 ผลการคำนวณหาค่านิจของสปริง

4.1.2.1 ผลการคำนวณหาค่านิจสปริงที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าจากผลงานทางวิชาการของ Taheri และคณะที่ได้ศึกษาผลกระทบของแรงกดที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าที่มีผลต่อความต้านทานที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าพบว่าค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและเริ่มคงที่เมื่อมีแรงกดอย่างน้อย 0.15 MPa เป็นต้นไปทางผู้วิจัยจึงได้นำค่าแรงกดขนาด 0.15 MPa มาใช้ในการคำนวณหาค่านิจของสปริงที่หน้าสัมผัสไฟฟ้า และหน้าสัมผัสไฟฟ้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 ซม. (พื้นที่หน้าตัดขนาด 4.9 ตร.ซม.) สามารถคำนวณแรงกดที่หน้าสัมผัสไฟฟ้า ซึ่งค่านิจสปริงที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่า 12,250 N/m

ดังนั้นสปริงที่ใช้ควรมีค่านิจสปริงขนาด 12,250 N/m แต่ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่านิจสปริงขนาด 25,600 N/m เนื่องจากสปริงมีขนาดของรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานและสามารถหามาใช้ได้อย่างสะดวก

4.1.2.2 ผลการคำนวณค่านิจสปริงสำหรับคันถาดแบตเตอรี่การคำนวณหาค่านิจสปริงสำหรับคันถาดแบตเตอรี่นั้นพบว่าแรงที่สปริงใช้สำหรับคันถาดแบตเตอรี่ออกมาต้องมามีค่ามากกว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นโดยแรงเสียดทานเกิดขึ้นอยู่ 2 จุด ได้แก่แรงเสียดทานระหว่างทองแดงกับทองแดงที่หน้าสัมผัสไฟฟ้าและแรงเสียดทานระหว่างรางลูกลิ้งกับถาดแบตเตอรี่ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยระหว่างทองแดงกับทองแดงมีค่า 0.454 และแรงกดที่หน้าสัมผัสมีค่า 154 N ดังนั้นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างทองแดงกับทองแดงมีค่าเท่ากับ 140 N และแรงเสียดทานระหว่างรางลูกลิ้งกับถาดแบตเตอรี่รวมกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับทองแดงจะมีค่าเท่ากับ 240 N โดยใช้สปริงสองตัวสำหรับคันถาดแบตเตอรี่และกำหนดให้มีระยะยุบ 5 ซม. จะมีค่าเท่ากับ 2,400 N/m

ดังนั้นสปริงที่ใช้ควรมีค่านิจสปริงขนาด 2,400 N/m แต่ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่านิจสปริงขนาด 10,000 N/m เนื่องจากสปริงมีขนาดของรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานและสามารถหามาใช้ได้อย่างสะดวก

4.2 ผลการออกแบบ

การออกแบบนั้นจะแบ่งออกทั้งสิ้น 3 ส่วน คือ สปริงที่หน้าสัมผัสไฟฟ้า, สปริงที่คันถาดแบตเตอรี่และรถเข็นสำหรับเปลี่ยนแบตเตอรี่

4.2.1 สปริงที่หน้าสัมผัสไฟฟ้า



รูปที่ 4.3 ระบบหน้าสัมผัสไฟฟ้า

4.2.2 สปริงที่ดันถาดแบตเตอรี่



รูปที่ 4.4 ระบบล็อกแบตเตอรี่ขณะที่ยังไม่ถูกล็อก



รูปที่ 4.5 ระบบล็อกแบตเตอรี่ขณะที่ถูกล็อก

4.2.3 รถเข็นสำหรับสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

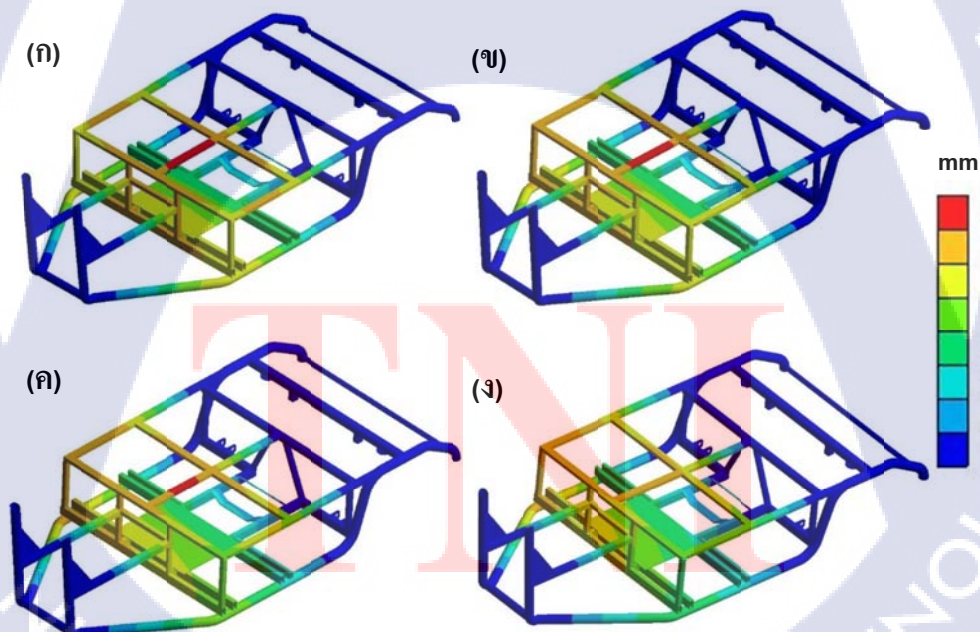
เพื่อให้การเปลี่ยนแบตเตอรี่มีความสะดวกทางคณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบรถเข็นสำหรับสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ดังภาพที่ 4.6 โดยรถเข็นสำหรับสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ประกอบไปด้วยรางลูกกลิ้ง(วงกลมสีเขียว)สำหรับลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเพื่อให้แบตเตอรี่สามารถเข็นเข้าและออกได้อย่างสะดวกแบตเตอรี่สต็อปปเปอร์(วงกลมสีเหลือง)สำหรับป้องกันไม่ให้แบตเตอรี่ไถลออกจากรถเข็นและคาร์ทสต็อปปเปอร์(วงกลมสีแดง)สำหรับกำหนดตำแหน่งระหว่างรถเข็นกับรถตุ๊ก ตุ๊ก เพื่อให้แบตเตอรี่สามารถเข็นเข้าและออกได้อย่างสะดวก



รูปที่ 4.6 รถเข็นสำหรับสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

4.3 การวิเคราะห์การเสียรูป (Deformation)

การเสียรูปของโครงสร้างรถตุ๊ก ตุ๊กเมื่อมีรับแรงกระทำที่ตามองที่เพิ่มขึ้นขององศา (θ) ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเสียรูปของโครงสร้างรถที่ทำการเอียงองศาลำดับ (ก) 0° (ข) 10° (ค) 20° และ (ง) 30°

จากรูปที่ 4.7 จะสามารถสังเกตได้ว่าจุดที่เกิดการเสียรูปมากที่สุดจะอยู่บริเวณกึ่งกลางของตัวโครงสร้างรถพอดีคือบริเวณที่โคนแรงกระทำมากที่สุดเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้างและน้ำหนักของผู้โดยสาร ซึ่งเป็นบริเวณส่วนใหญ่ของโครงสร้าง และมีการถ่ายเทไปทางด้านที่ต่ำกว่าเมื่อองศาของพื้นเพิ่มขึ้น และทั้ง 4 กรณีมีค่าการเสียรูปมากที่สุด ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการเสียรูปที่มากที่สุดตามการเอียงขององศา (θ) ต่างๆ

พื้นเอียง (องศา)	ค่าการเสียรูปที่มากที่สุด (mm)
0	2.813
10	2.775
20	2.687
30	2.548

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพื้นเอียงอยู่ในพื้นราบ ($\theta = 0^\circ$) มีค่าการเสียรูปจะอยู่ที่ 2.813 มิลลิเมตร และมีค่าที่แนวโน้มที่จะลดลงเรื่อยๆ จนมีค่าการเสียรูปมากที่สุดเป็น 2.548 มิลลิเมตรเมื่อพื้นทำมุมเอียง 30 องศา จากผลการคำนวณพบว่าค่าของการเสียรูปมากที่สุดจะลดลง ตามมุมของพื้นเอียงที่เพิ่มมากขึ้น

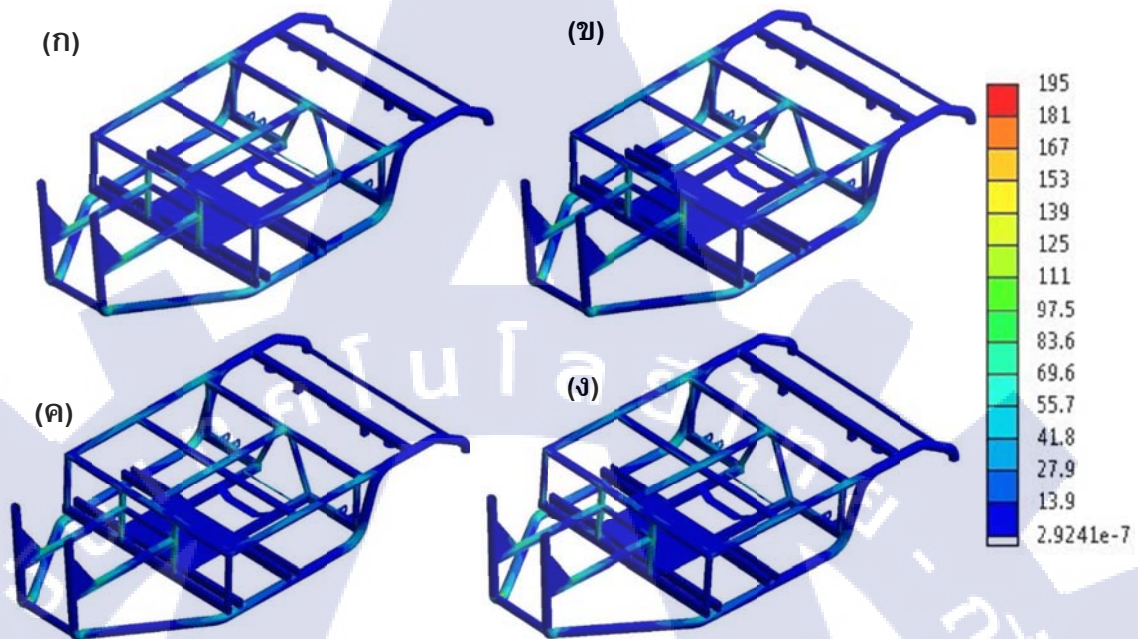
เมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์ร่วมกันจะพบว่า การเสียรูปมากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างวางตัวอยู่ในแนวพื้นราบบริเวณที่รับน้ำหนักของโครงสร้างและน้ำหนักของผู้โดยสาร จึงเป็นเหตุที่ทำให้บริเวณกึ่งกลางมาการเสียรูปมากที่สุด

หากระยะกระจัดระหว่างแบตเตอรี่ และโครงสร้างรถด้านบนมีระยะประมาณ 7 เซนติเมตร การเสียรูปที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดบริเวณจุด B นั้นไม่สามารถส่งผลกระทบต่อแบตเตอรี่ ดังนั้น เรายังสามารถสลับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ในขณะที่มีผู้โดยสารอยู่ได้

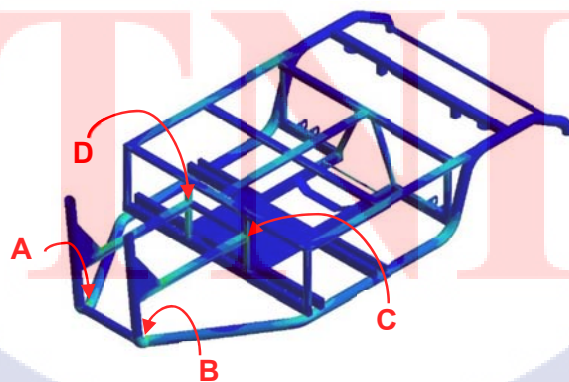
4.4 การวิเคราะห์ความเค้น (Stress)

การกระจายตัวของความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของรถตุ๊ก ตุ๊ก ซึ่งค่าความเค้นของโครงสร้างรถจะเริ่มกระจายไปในด้านที่มีองศาการเอียงสูงกว่าไปยังด้านที่มีการเอียงที่ต่ำกว่า สังเกตสีของความเค้นของโครงสร้างทางด้านขวาเมื่อมองจากด้านหน้ารถเป็นส่วนที่โคนยก จะ

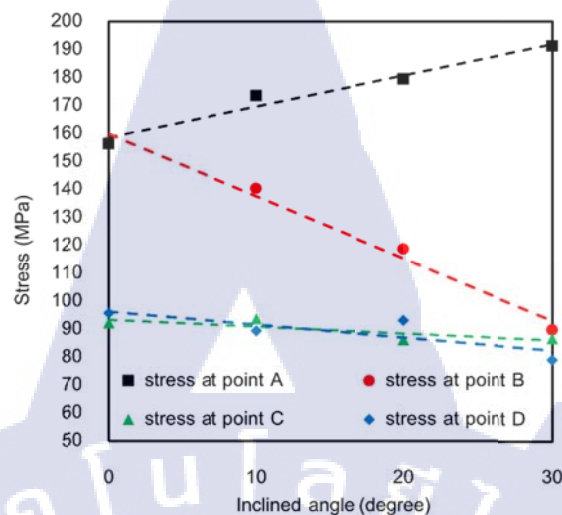
สังเกตได้ว่าความเค้นที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปยังด้านซ้ายมือ ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ได้เกิดการยกเกิดขึ้นดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 4.8



เมื่อตรวจสอบดูทั้งหมดจึงพบว่ามีจุดทั้งหมด 4 จุดที่มีความเค้นสูง จึงนำทั้ง 4 จุดนั้นมาพิจารณา ดังรูปที่ 4.9 ที่มุมต่างๆ และนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.10 เพื่อทำการวิเคราะห์ผล



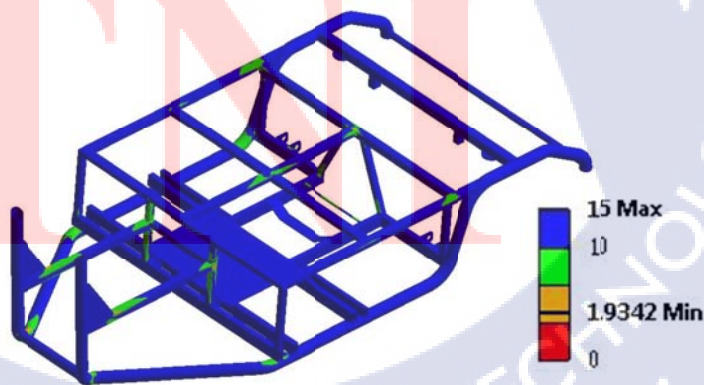
ภาพที่ 4.9 บริเวณจุดที่เกิดความเค้นสูงสุดเพื่อจะนำมาทำการวิเคราะห์



รูปที่ 4.10 ค่าความเค้นที่จุด A, B, C, และ D ที่มุมเอียงต่างๆ

พบว่าความเค้นที่จุด A มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีองศาเอียงเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าความเค้นที่จุด B มีค่าลดลงเมื่อมีองศาเอียงเพิ่มขึ้น และค่าความเค้นที่จุด C และ D มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อองศาเอียงเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 4.10

เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระยะที่ตั้งฉากระหว่างจุด B กับแรงลัพธ์ที่ลดลงเมื่อองศาเอียงเพิ่มขึ้น ทำให้โมเมนต์ต้านและแรงต้านที่เกิดขึ้นที่จุด B ลดลง ส่งผลทำให้ความเค้นที่จุด B นั้นมีค่าที่ลดลง และด้านที่ต่ำกว่าของชั้มล้อหน้าต้องรับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมมองการเอียงของรถเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเค้นที่จุด A สูงขึ้นเมื่อองศาเอียงนั้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เราต้องพิจารณาให้ดีเมื่อออกแบบชั้มล้อหน้าของรถ



รูปที่ 4.11 ค่าความปลอดภัยของพื้นเอียง 30 องศา

4.5 ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)

ค่าความปลอดภัยของโครงสร้างรถที่ได้จากการวิเคราะห์ซึ่งถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.11 พบว่าบริเวณที่เสี่ยงต่อการเสียรูปเกิดขึ้นเมื่อรถวางตัวอยู่บนมุมเอียง 30 องศา ซึ่งโครงสร้างจะไม่เกิดการเสียรูปใดๆ เนื่องจากค่าความปลอดภัยมีค่าสูงกว่า 1.93 แต่กรณีนี้เป็นกรณีที่ไม่ค่อยได้พบกันทั่วไปในชีวิตประจำวัน ดังนั้นหากเราพิจารณารถที่วางอยู่บนพื้นราบ ซึ่งเป็นกรณีที่พบเจอกันในชีวิตประจำวันแล้ว พบว่าค่าความปลอดภัยมีค่ามากกว่า 2.33 ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างรถตุ๊กตุ๊กที่ใช้ร่วมกับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะไม่เกิดการเสียรูปใดๆ

4.6 ผลสมรรถนะของรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้า

เมื่อได้ทำการประกอบรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.12 ทางทีมผู้วิจัยจึงได้มาทำการทดสอบสมรรถนะของรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าผลที่ได้คือสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้ตามจำนวนที่ได้ทำการคำนวณนั้นคือ มีผู้โดยสารจำนวน 3 คน และรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าสามารถวิ่งด้วยความเร็ว 40 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและสามารถรองรับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ซึ่งสามารถสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้โดยคนเดียวภายใน 5 นาที โดยผู้ขายใช้เวลาในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ 2.23 นาทีและผู้หญิงใช้เวลาเปลี่ยนแบตเตอรี่ 2.83 นาที



รูปที่ 4.12 รถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าที่รองรับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ที่ถูกออกแบบและพัฒนาสำหรับรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ที่น่าสนใจในเบื้องต้น โดยสามารถเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้โดยคนเดียวภายใน 5 นาทีโดยผู้ขายใช้เวลาเปลี่ยนแบตเตอรี่ 2.23 นาทีและผู้หญิงใช้เวลาเปลี่ยนแบตเตอรี่ 2.83 นาทีและค่าความต้านทานไฟฟ้าที่หน้าสัมผัสไฟฟ้ามีค่าต่ำสุดตามทฤษฎีและการคำนวณคือ 0.01 Ω

การวิเคราะห์โครงสร้างของรถตุ๊ก ตุ๊กที่ใช้ร่วมกับระบบสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกพัฒนาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ซึ่งโครงสร้างรถที่ถูกวิเคราะห์นั้นจะไม่เกิดการเสียรูปใดๆ เมื่อโครงสร้างรถวางตัวบนพื้นเอียงทำมุมต่างๆ โดยค่าความเค้นและการเสียรูปที่มากที่สุดของโครงสร้างรถจะเกิดขึ้นที่ซุ้มล้อด้านหน้าและจุดยึดต่างๆ และจากผลการคำนวณพบว่าค่าการเสียรูปและความเค้นที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 3 มิลลิเมตร และ 190 MPa ตามลำดับ เมื่อนำโครงสร้างรถทำมุมเอียงมีค่าเท่ากับ 30 องศา และมีค่าความปลอดภัยมีค่า 2.33 เมื่อรถอยู่บนพื้นราบ ซึ่งเป็นกรณีที่เราสามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน หากเราพิจารณาจากค่าความปลอดภัยแล้ว ทำให้สามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างจะไม่เกิดการเสียรูปและมีความปลอดภัยในการใช้งานได้ และสามารถนำรถตุ๊ก ตุ๊กไฟฟ้าออกมาใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากต้องใช้ความชำนาญในการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ ดังนั้นผู้ที่ทำการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ควรได้รับการแนะนำจากทางผู้วิจัยก่อนการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่เพื่อความชำนาญและความปลอดภัย ในการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นควรที่จะเพิ่มการวิเคราะห์ในเรื่องของการเคลื่อนที่ของตัวโครง (dynamic analysis of structure) เมื่อเจอสถานการณ์ต่างๆ อาทิเช่น รถขึ้นลูกระนาด(speed bump) ตกหลุมหรือการเลี้ยวโค้ง เป็นต้น เพื่อที่จะให้มีความเสมือนจริงมากที่สุด ในสภาพแวดล้อมที่รถยนต์ถูกกระทำ และรถควรที่จะสามารถทำความเร็วให้ได้มากกว่า 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อที่จะสามารถนำไปทำการจดทะเบียนได้อย่างสมบูรณ์

บรรณานุกรม

1. Taheri, P., Hsieh, S. and Bahrami, M. 2011, “Investigating electrical contact resistance losses in lithium-ion battery assemblies for hybrid and electric vehicles”, **Journal of Power Sources**, Vol. 196(15), pp. 6525 – 6533.
2. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2555, **ไฟฟ้ในต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**, พิมพ์ครั้งที่ 5, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
3. Riley, W.B. and George, A.R., (2002), “Design, Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis, paper presented” in *the SAE Motorsports Engineering Conference and Exhibition 2002*, Indiana, USA.
4. Karaoglu, C. and Kuralay, N. (2002), “Stress analysis of a truck chassis with riveted joints”, **Applied Finite Elements in Analysis and Design**, vol.38, October 2001, pp. 1115-1130.
5. Lee, H. (2012). **Finite Element Simulation with ANSYS Workbench 14**, Schroff Development Corporation, USA.
6. ANSYS, Inc. (2009). **Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications**, ANSYS, Inc., Southpointe.
7. Society of Automotive Engineers, 1999 ed., **SAE Ferrous Materials Standards Manual**, Inc., Warrendale, PA.